





دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
(گروه استخراج)

تحلیل پایداری و نشست خاک طبیعی به منظور امکان سنجی مقدماتی ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام

امیرسلطان علیراده

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضان زاده

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۰



جمهوری اسلامی ایران

سازمان تعلیمات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

وبلاش:

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ایزدی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **امیر سلطان علیزاده** رشت معدن گرایش استخراج تحت عنوان تحصیل پایداری و تست غار طبیعی به منظور امکان سنجی مقدماتی ذخیره سازی زبور مینی تخت خام که در تاریخ **۱۳۹۹/۰۳/۱۴** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر اعلام می گردد:

☐ قبول (با طرح ایراد جزئی)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
---	------------------------------------	--------------------------------

۳- خوب (۱۳۹۹ - ۱۴)

۲- بسیار خوب (۱۳۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

۴- قابل قبول (۱۳۹۹ - ۱۴)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد ارشد	دکتر احمد رمضانزاده	استاد	
۲- استاد ارشد	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۴- استاد مستحق	دکتر حسین میرزائی نصیر آباد	استاد	
۵- استاد مستحق	دکتر سید رحمان تولی	دانشیار	

رئیس دانشکده

تقدیم بہ

والدین مہربانم کہ ہمیشہ دعایشان بدرقہ مسیر زندگی ام بودہ است

تشکر و قدردانی

اینجانب بر خود لازم می‌دانم که در این چند خط محدود از تلاش‌ها و کمک‌های اساتید راهنمای خود آقایان دکتر احمد رمضان‌زاده و دکتر سیدمحمداسماعیل جلالی کمال تشکر را داشته باشم، که در مسیر تهیه و ارائه این پروژه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند.

همچنین از آقایان مهندسین مهدی نجفی، مهدی نوروزی، ذکریا قدیری، علی اصغر لطفی‌آزاد، ابوالفضل مسعودی، کیومرث سیف‌پناهی و خانم مهندس ملیحه داوودآبادی به دلیل راهنمایی‌های سازنده ایشان تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب امیر سلطان‌علیزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل پایداری و نشت غارهای طبیعی ایران به منظور امکان‌سنجی مقدماتی ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان‌زاده و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی 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 تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood 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 بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

پروژه حاضر تحت عنوان تحلیل پایداری و نشت غار طبیعی به منظور امکان‌سنجی مقدماتی ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام ارائه شده است. همان‌گونه که واضح می‌باشد استفاده از غار طبیعی به عنوان مخزن ذخیره‌سازی، منجر به کاهش و یا حذف هزینه‌ی هنگفت حفر مغار در سنگ خواهد شد که این کار از مهمترین مزایا در این نوع روش ذخیره‌سازی است. به منظور تحقق این هدف ضروری است، ابتدا فهرستی از غارهای شناخته شده تهیه شود و سپس برای انتخاب غاری مناسب به منظور ذخیره‌سازی نفت خام، معیارهایی با توجه به الزامات ذخیره‌سازی تدوین شده و در نهایت بر اساس این معیارها، غار مستعد برای ذخیره‌سازی نفت خام انتخاب گردد. پس از مشخص شدن گزینه مناسب، تحلیل پایداری با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام شده است. شیوه کار به این صورت است که ابتدا مدل به تعادل اولیه رسانده می‌شود و در ادامه تاثیرات ناشی از ریختن و برداشت نفت خام از غار و همچنین پایداری غار در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها پس از توصیف کامل انواع روش‌های ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی، روش مناسب برای ذخیره‌سازی در غار مورد مطالعه انتخاب شده و تمهیدات مورد نیاز به منظور کنترل نشت پیشنهاد می‌شود.

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- اهمیت ذخیره‌سازی در ایران	۵
۳-۱- اهداف پایان‌نامه	۷
۴-۱- روش انجام تحقیق	۷
۵-۱- ضرورت انجام تحقیق	۸
۶-۱- بررسی انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی	۸
۱-۶-۱- سازه‌های مصنوعی	۹
۱-۶-۱-۱- مغارهای سنگی	۱۰
الف: مغارهای سنگی با پوشش	۱۰
ب: مغارهای سنگی بدون پوشش	۱۲
۲-۶-۱-۲- مغارهای نمکی	۱۳
۳-۶-۱-۳- معادن متروکه	۱۴
۲-۶-۱-۴- ساختارهای طبیعی	۱۴
۱-۶-۱-۵- میدان‌های نفت و گاز تهی شده	۱۵
۲-۶-۱-۶- سفره‌های عمیق آب زیرزمینی	۱۵
۳-۶-۱-۷- غارهای طبیعی	۱۶
۷-۱- ساختار پایان‌نامه	۱۷
۸-۱- جمع‌بندی	۱۸
فصل دوم: معرفی غارهای طبیعی ایران با توجه به الزامات کلی ذخیره‌سازی نفت خام	۱۹
۱-۲- مقدمه	۲۰
۲-۲- غارهای واقع در استان آذربایجان شرقی	۲۱
۱-۲-۲- غار کبوتر	۲۲
۲-۲-۲- غار اسکندر	۲۲
۳-۲-۲- آغ بلاق	۲۲

فهرست

- ۲۳..... ۲-۲-۴- غار دوگیجان
- ۲۳..... ۲-۲-۵- غار قدمگاه
- ۲۳..... ۲-۳-۳- غارهای واقع در استان آذربایجان غربی
- ۲۳..... ۲-۳-۱- غار سهولان
- ۲۴..... ۲-۳-۲- غار فلاچی
- ۲۵..... ۲-۳-۳- غار بورنیک بزرگ-مهاباد
- ۲۵..... ۲-۳-۴- غار میرداوود
- ۲۵..... ۲-۳-۵- غار قلاتاسیان
- ۲۶..... ۲-۳-۶- غار چاه زندان
- ۲۶..... ۲-۴-۴- غارهای واقع در استان اردبیل
- ۲۶..... ۲-۴-۱- غار هفت خانه
- ۲۷..... ۲-۴-۲- غار یخکان
- ۲۷..... ۲-۵-۵- غارهای واقع در استان اصفهان
- ۲۸..... ۲-۵-۱- چاه دیو (چاه ارازه)
- ۲۸..... ۲-۵-۲- غار قهرمان
- ۲۹..... ۲-۶-۶- غارهای واقع در استان ایلام
- ۲۹..... ۲-۶-۱- غار زینه‌گان (غار بهشت ایلام)
- ۲۹..... ۲-۶-۲- غار طلسم
- ۳۰..... ۲-۶-۳- غار تایه‌گه
- ۳۰..... ۲-۷-۷- غارهای واقع در استان تهران
- ۳۱..... ۲-۷-۱- غار یخ‌مراد
- ۳۲..... ۲-۷-۲- غار رودافشان
- ۳۲..... ۲-۷-۳- غار بورنیک هرانده
- ۳۳..... ۲-۸-۸- غارهای واقع در استان چارمحال و بختیاری
- ۳۳..... ۲-۸-۱- غار سراب

فهرست

- ۹-۲- غارهای واقع در استان‌های خراسان ۳۳
- ۹-۲-۱- غار جوجه ۳۴
- ۹-۲-۲- غار خونیک ۳۴
- ۹-۲-۳- غار سلیمان ۳۴
- ۹-۲-۴- غار مزدوران ۳۵
- ۹-۲-۵- غار مغان ۳۵
- ۹-۲-۶- غار کارده ۳۵
- ۹-۲-۷- غار کنه‌گرم ۳۵
- ۹-۲-۸- غار چنشت ۳۶
- ۱۰-۲- غارهای واقع در استان زنجان ۳۶
- ۱۰-۲-۱- غار گلجیک ۳۶
- ۱۰-۲-۲- غار کتله‌خور ۳۶
- ۱۱-۲- غارهای واقع در استان سمنان ۳۷
- ۱۱-۲-۱- غار دربند ۳۷
- ۱۲-۲- غارهای واقع در استان فارس ۳۸
- ۱۲-۲-۱- غار کان‌گوهر ۳۸
- ۱۲-۲-۲- غار بلع‌زار ۳۹
- ۱۲-۲-۳- غار تادوان ۳۹
- ۱۲-۲-۴- غار شاپور ۳۹
- ۱۲-۲-۵- غار مظفر سَهَلْک ۴۰
- ۱۳-۲- غارهای واقع در استان قم ۴۰
- ۱۳-۲-۱- غار کهک ۴۱
- ۱۴-۲- غارهای واقع در استان کردستان ۴۱
- ۱۴-۲-۱- غار کرفتو ۴۱
- ۱۵-۲- غارهای واقع در استان کرمان ۴۲

فهرست

۴۲.....	۲-۱۵-۱- چاه دریا.....
۴۲.....	۲-۱۵-۲- غار ترنگ.....
۴۳.....	۲-۱۵-۳- غار ایوب.....
۴۳.....	۲-۱۶-۱۶- غارهای واقع در استان کرمانشاه.....
۴۳.....	۲-۱۶-۱- غار پُراو.....
۴۴.....	۲-۱۶-۲- غار دواشکفت.....
۴۴.....	۲-۱۶-۳- غار قوری قلعه.....
۴۵.....	۲-۱۷-۱۷- غارهای واقع در استان گلستان.....
۴۵.....	۲-۱۷-۱- غار شیرآباد.....
۴۵.....	۲-۱۷-۲- غار کیارام.....
۴۶.....	۲-۱۸-۱۸- غارهای واقع در استان لرستان.....
۴۶.....	۲-۱۸-۱- غار کَلماکَره.....
۴۶.....	۲-۱۸-۲- غار ماهی کور.....
۴۷.....	۲-۱۹-۱۹- غارهای واقع در استان مازندران.....
۴۷.....	۲-۱۹-۱- غار الیاس تنگه.....
۴۸.....	۲-۱۹-۲- غار اسپهبد خورشید.....
۴۸.....	۲-۱۹-۳- غار هوتو.....
۴۸.....	۲-۲۰-۲۰- غارهای واقع در استان مرکزی.....
۴۹.....	۲-۲۰-۱- غار چال نخجیر.....
۴۹.....	۲-۲۰-۲- غار شاه زند.....
۵۰.....	۲-۲۰-۳- غار شاه بلبل.....
۵۰.....	۲-۲۰-۴- غار خان آباد.....
۵۰.....	۲-۲۰-۵- غار هیزج.....
۵۱.....	۲-۲۱-۲۱- غارهای واقع در استان همدان.....
۵۱.....	۲-۲۱-۱- غار علیصدر.....

۵۲.....	۲-۲۱-۲- غار بگلیجه
۵۲.....	۲-۲۱-۳- غار دره فراخ
۵۲.....	۲-۲۱-۴- غار سردکوه
۵۳.....	۲-۲۱-۵- غار گاماسیاب
۵۳.....	۲-۲۲-جمع‌بندی
۵۷.....	فصل سوم: ۵۷تعیین گزینه مستعد بر اساس معیارهای اولویت‌بندی مختلف به منظور ذخیره‌سازی نفت خام
۵۸.....	۳-۱- مقدمه
۵۸.....	۳-۲- تدوین معیارهای اولویت‌بندی
۵۹.....	۳-۲-۱- قوانین گردشگری و یا زیست‌محیطی
۶۰.....	۳-۲-۲- وضعیت آب‌های زیرزمینی
۶۱.....	۳-۲-۳- حجم غار
۶۲.....	۳-۲-۴- فاصله غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و نیز فاصله از پالایشگاه‌های بزرگ
۶۵.....	۳-۳- انتخاب غار مستعد از بین گزینه‌های باقی‌مانده
۶۸.....	۳-۴- غار رودافشان
۶۸.....	۳-۴-۱- راه‌های ارتباطی
۶۹.....	۳-۴-۲- دهانه غار رودافشان
۷۲.....	۳-۴-۲-۱- تالار اول
۷۳.....	۳-۴-۲-۲- تالار دوم
۷۳.....	۳-۴-۲-۳- تالار سوم
۷۴.....	۳-۴-۳- اطلاعات هواشناسی منطقه
۷۴.....	۳-۴-۴- اطلاعات زمین‌شناسی منطقه
۷۴.....	۳-۴-۴-۱- موقعیت زمین‌شناسی منطقه
۷۵.....	۳-۴-۴-۲- گسل مُشا - فشم
۷۶.....	۳-۴-۴-۳- سنگ‌شناسی منطقه
۷۷.....	۳-۵-جمع‌بندی

فصل چهارم: روش‌های تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی و برآورد پارامترهای موردنیاز توده‌سنگ	۷۸
۱-۴- مقدمه	۷۹
۲-۴- روش‌های تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی	۷۹
۱-۲-۴- روش‌های تجربی	۷۹
۲-۲-۴- روشهای مشاهد‌های	۸۰
۳-۲-۴- روشهای تحلیلی	۸۰
۴-۲-۴- روش‌های عددی	۸۱
۱-۴-۲- محیط‌های پیوسته	۸۲
۲-۴-۲- محیط‌های ناپیوسته	۸۴
۳-۴-۲- انتخاب مناسب‌ترین روش عددی	۸۴
۳-۴- برآورد پارامترهای مورد نیاز در تحلیل عددی	۸۵
۱-۳-۴- تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ با استفاده از چکش اشمیت	۸۵
۲-۳-۴- اندیس مقاومت زمین شناسی	۸۷
۳-۳-۴- عامل ثابت ماده‌سنگ (m_i)	۸۸
۴-۳-۴- عامل درجه آشفستگی توده‌سنگ (D)	۹۰
۴-۴-۴- برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ	۹۰
۵-۴-۴- برآورد پارامترهای مقاومتی مور- کلمب	۹۱
۱-۵-۴-۴- معرفی پارامترها	۹۲
عامل درجه آشفستگی توده‌سنگ (D)	۹۴
۵-۴- نتیجه‌گیری:	۹۴
فصل پنجم: تحلیل پایداری غار رودافشان	۱۰۱
۱-۵- مقدمه	۹۶
۲-۵- مدل‌سازی و تحلیل فضاهای زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$	۹۶
۱-۲-۵- انتخاب محدوده‌ی مناسب، ترسیم هندسه و شبکه‌بندی مدل مورد مطالعه	۹۷
۱-۱-۲-۵- تصحیح شکل غار رودافشان پس از بازدید میدانی	۹۷

۱۰۰	۲-۱-۲-۵- تعیین مختصات نقاط با استفاده از نرم افزار AutoCAD
۱۰۰	۳-۱-۲-۵- ایجاد شکل مورد نظر در نرم افزار FLAC ^{3D}
۱۰۱	۲-۲-۵- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
۱۰۱	۳-۲-۵- ایجاد شرایط مرزی و به تعادل رساندن نیروهای نامتعادل کننده
۱۰۷	۴-۲-۵- حل مدل در حالت وارد کردن نفت خام به داخل غار و بررسی تغییرات ناشی از آن
۱۰۹	۵-۲-۵- حل مدل در حالت برداشت نفت خام از داخل غار و بررسی تغییرات ناشی از آن
۱۱۲	۳-۵- تحلیل پایداری غار بعد از باربرداری بر اثر برداشت نفت خام
۱۱۵	۱-۳- تراز هشدار خطر
۱۱۷	۲-۳-۵- تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی
۱۱۸	۳-۳-۵- تعیین ضریب ایمنی
۱۱۹	۴-۵- تحلیل پارامترهای ورودی مدل عددی
۱۲۰	۱-۴-۵- تحلیل پارامتری زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ
۱۲۵	۲-۴-۵- تحلیل پارامتری چسبندگی
۱۳۰	۳-۴-۵- تحلیل پارامتری مدول دگرشکل پذیری توده سنگ
۱۳۴	۴-۴-۵- تحلیل حساسیت نسبت به تنش های توده سنگ (K)
۱۳۸	۵-۵- تحلیل شبه استاتیکی غار رودافشان در برابر زلزله
۱۴۴	۶-۵- جمع بندی
۱۴۵	فصل ششم: ۱۴۵ روش های کاهش نفوذپذیری و نشت مخزن
۱۴۶	۱-۶- مقدمه
۱۴۶	۲-۶- بررسی مسایل ذخیره سازی در مغارهای سنگی بدون پوشش
۱۴۹	۱-۲-۶- نوع ماده هیدروکربوری ذخیره سازی در مغارهای بدون پوشش
۱۴۹	۲-۲-۶- رشد باکتری ها
۱۵۰	۳-۲-۶- ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ و مغار بدون پوشش
۱۵۱	۴-۲-۶- اصول نگهداری مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون پوشش
۱۵۴	۵-۲-۶- کنترل نشت هیدرودینامیکی

فهرست

۱۵۵.....	۶-۲-۵-۱- کنترل طبیعی نشت هیدرودینامیکی
۱۵۶.....	۶-۲-۵-۲- کنترل مصنوعی نشت هیدرودینامیکی
۱۵۸.....	۶-۲-۶- مسایل زیست محیطی
۱۵۹.....	۶-۳- بررسی مسایل ذخیره سازی در مغارهای سنگی با پوشش
۱۶۰.....	۶-۳-۱- نوع ماده هیدروکربوری ذخیره شده و عوامل وابسته به آن
۱۶۱.....	۶-۳-۲- ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ و نحوه ساخت مغار در آن
۱۶۱.....	۶-۴- انتخاب روش مناسب به منظور کنترل نشت در غار رودافشان
۱۶۱.....	۶-۴-۱- معایب و مزایای مغارهای سنگی با پوشش و بدون پوشش
۱۶۲.....	۶-۵- ارائه الگوریتمی برای انتخاب روش بین مغارهای با پوشش و بدون پوشش
۱۶۶.....	۶-۵-۱- استفاده از الگوریتم انتخاب روش برای نحوه کنترل نشت غار رودافشان
۱۶۸.....	۶-۶- طراحی پوشش مخزن
۱۷۲.....	۶-۷- جمع بندی
۱۷۳.....	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۷۴.....	۷-۱- نتیجه گیری
۱۷۶.....	۷-۲- پیشنهادات
۱۷۷.....	پیوست ۱: کدهای نوشته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$
۲۰۵.....	منابع:

فهرست

جدول ۱-۲- فهرست غارهای مورد بررسی به منظور دخیره‌سازی نفت‌خام بر اساس استان محل قرارگیری	۵۴
جدول شماره ۳-۱: معیارهای انتخاب غار مناسب	۵۸
جدول ۳-۲- فهرست غارهای مهم از نظر قوانین گردشگری و یا زیست‌محیطی	۶۰
جدول ۳-۳- فهرست غارهای مورد بررسی از نظر وضعیت آب‌های زیرزمینی	۶۱
جدول ۳-۴- فهرست غارهای حذف شده به دلیل پایین بودن حجم	۶۲
جدول ۳-۵- فهرست غارهای حذف شده به دلیل دوری از خطوط لوله و مراکز مصرف	۶۴
جدول ۳-۶- فهرست غارهای باقی‌مانده در پایان مرحله چهارم	۶۵
جدول ۳-۷- مقایسه نسبی گزینه‌های باقی‌مانده بر اساس معیارهای مختلف	۶۸
جدول ۴-۱- اعداد قرائت شده توسط چکش اشمیت در حالت افقی چکش	۸۷
جدول ۴-۲- جدول تعیین ثابت ماده‌سنگ (m_i)	۸۹
جدول ۴-۳- مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ دربرگیرنده غار رودافشان	۹۴
جدول ۵-۱- مقادیر محاسبه شده کرنش بحرانی توسط روابط ساکورایی	۱۱۷
جدول ۵-۲- جابجایی‌هایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی	۱۲۱
جدول ۵-۳- جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی	۱۲۲
جدول ۵-۴- جابجایی پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی	۱۲۳
جدول ۵-۵- جابجایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی	۱۲۶
جدول ۵-۶- جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی	۱۲۷
جدول ۵-۷- جابجایی پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی	۱۲۸
جدول ۵-۸- جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل‌پذیری	۱۳۱
جدول ۵-۹- جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل‌پذیری	۱۳۲
جدول ۵-۱۰- جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل‌پذیری	۱۳۳
جدول ۵-۱۱- جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان پس از برداشت نفت‌خام بر اثر تغییر نسبت تنش‌ها	۱۳۵
جدول ۵-۱۲- جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان پس از برداشت نفت‌خام بر اثر تغییر پارامتر نسبت	۱۳۵
جدول ۵-۱۳- جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان پس از برداشت نفت‌خام بر اثر تغییر پارامتر نسبت	۱۳۶
جدول ۵-۱۴- جابجایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت	۱۳۹

فهرست

- جدول ۵-۱۵- جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت ۱۴۰
- جدول ۵-۱۶- جابجایی پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت ۱۴۱
- جدول ۶-۱: مزایا و معایب روش‌های URC و LRC ۱۶۲

شکل ۱-۱: توزیع حجم نفت ذخیره شده با توجه به نوع روش ذخیره‌سازی [۶].....	۴
شکل ۲-۱: توزیع تعداد پروژه‌های ذخیره‌سازی نفت با توجه به نوع روش ذخیره‌سازی [۶].....	۴
شکل ۳-۱: انواع سازه‌های زیرزمینی	۹
شکل ۴-۱: نمایی از طرح مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای باپوشش [۱۰۰].....	۱۱
شکل ۵-۱: نمای سه بعدی از تاسیسات مغار ذخیره‌سازی بدون پوشش [۲۱].....	۱۲
شکل ۶-۱: شروع عملیات انحلال پس از حفر چاه تا عمق مورد نظر [۱۷].....	۱۳
شکل ۷-۱: فلوچارت سازماندهی پایان‌نامه	۱۸
شکل ۱-۲: پراکندگی غارهای طبیعی مورد بررسی در کشور	۵۶
شکل ۱-۳: مسیر خطوط لوله نفت خام و نیز مراکز عمده مصرف نفت خام در کشور [۵۴].....	۶۳
شکل ۳-۳: پلان کلی از غار کان گوهر [۱].....	۶۶
شکل ۲-۳: پلان تقریبی از غار بورنیک [۱].....	۶۶
شکل ۴-۳: پلانی تقریبی از غار رودافشان [۱].....	۶۷
شکل ۵-۳: پلانی تقریبی از غار کهک [۱].....	۶۷
شکل ۶-۳: موقعیت غار بر روی نقشه استان تهران	۶۹
شکل ۸-۳: نمایی از دهانه غار رودافشان	۷۰
شکل ۷-۳: نمای عمومی دهانه غار بر روی دامنه کوه رودافشان.....	۷۰
شکل ۹-۳: نمای دیگری از دهانه غار رودافشان.....	۷۱
شکل ۱۰-۳: مقطع و پلان غار رودافشان [۱].....	۷۲
شکل ۱۱-۳: نمونه از غارسنگ‌ها در غار رودافشان	۷۴
شکل ۱۲-۳: گسل مشا-فشم (آبیک-فیروزکوه-شاهرود)-گسل شمال تهران و بهم رسیدن این دو در ناحیه لواسان [۳].....	۷۶
شکل ۱-۴: نمودار همبستگی میان مقاومت فشاری سنگ و عدد واجهش چکش اشمیت	۸۷
شکل ۲-۴: مقدار GSI برای توده سنگ [۲۵].....	۸۸
شکل ۳-۴: نمودار تنش برشی-نرمال و برازش نمودار مور-کلمب بر روی منحنی هوک-براون	۹۲
شکل ۱-۵: مدل ایجاد شده در نرم افزار	۹۷
شکل ۲-۵: مقطع و پلان تصحیح شده غار رودافشان [۱].....	۹۹
شکل ۳-۵: مقطعی از مدل ایجاد شده	۱۰۰
شکل ۴-۵: نمودار متعادل شدن نیروهای نامتعادل	۱۰۲

فهرست

- شکل ۵-۵- کنتور تنش در راستای X قبل از انباشت نفت در داخل غار ۱۰۳
- شکل ۵-۶- کنتور تنش در راستای Y قبل از انباشت نفت در داخل غار ۱۰۳
- شکل ۵-۷- کنتور تنش در راستای Z قبل از انباشت نفت در داخل غار ۱۰۴
- شکل ۵-۸- نقاط مورد بررسی از لحاظ جابجایی و تنش در غار رودافشان ۱۰۴
- شکل ۵-۹- تاریخچه سرعت چهار نقطه معلوم در سقف غار ۱۰۵
- شکل ۵-۸- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار ۱۰۵
- شکل ۵-۱۰- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار ۱۰۵
- شکل ۵-۱۱- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار ۱۰۵
- شکل ۵-۱۳- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار ۱۰۶
- شکل ۵-۱۲- تاریخچه سرعت چهار نقطه معلوم در دیواره غار ۱۰۶
- شکل ۵-۱۵- تاریخچه سرعت چهار نقطه معلوم در کف غار ۱۰۶
- شکل ۵-۱۴- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار ۱۰۶
- شکل ۵-۱۶- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در کف غار ۱۰۶
- شکل ۵-۱۷- شمایی از مدل ساخته شده در حالت انباشت نفت خام در غار ۱۰۷
- شکل ۵-۱۹- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از انباشت نفت خام ۱۰۸
- شکل ۵-۱۸- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از انباشت نفت خام ۱۰۸
- شکل ۵-۲۰- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از انباشت نفت خام ۱۰۸
- شکل ۵-۲۱- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از انباشت نفت خام ۱۰۸
- شکل ۵-۲۲- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار پس از انباشت نفت خام ۱۰۸
- شکل ۵-۲۳- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از انباشت نفت خام ۱۰۸
- شکل ۵-۲۴- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از برداشت نفت خام ۱۰۹
- شکل ۵-۲۵- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از برداشت نفت خام ۱۰۹
- شکل ۵-۲۶- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از برداشت نفت خام ۱۱۰
- شکل ۵-۲۷- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از برداشت نفت خام ۱۱۰
- شکل ۵-۲۹- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در کف غار پس از برداشت نفت خام ۱۱۰
- شکل ۵-۲۸- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار پس از برداشت نفت خام ۱۱۰
- شکل ۵-۳۰- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام ۱۱۱

فهرست

- شکل ۵-۳۱- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۲- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۳- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۴- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۵- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در کف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام..... ۱۱۱
- شکل ۵-۳۶- نمودار تعیین R_f با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره [۹۷]..... ۱۱۴
- شکل ۵-۳۷- رابطه بین کرنش بحرانی (ϵ_c) و کرنش شکست (ϵ_s) [۹۶]..... ۱۱۴
- شکل ۵-۳۸- رابطه کرنش بحرانی نسبت به مقاومت فشاری تک محوره [۹۷]..... ۱۱۵
- شکل ۵-۳۹- رابطه کرنش بحرانی نسبت به مدول تغییر شکل پذیری [۹۷]..... ۱۱۶
- شکل ۵-۴۰- کرنش برشی ایجاد شده بعد از ترخیص تنش..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۱- الف) مدل ایجاد شده در نرم افزار..... ۱۱۹
- شکل ۵-۴۱- ب) بحرانی ترین قسمت از غار رودافشان از نظر نیروهای موثر..... ۱۱۹
- شکل ۵-۴۲- نمودار جابجایی های قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی..... ۱۲۱
- شکل ۵-۴۳- نمودار جابجایی های افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی..... ۱۲۲
- شکل ۵-۴۴- نمودار جابجایی های قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی..... ۱۲۳
- شکل ۵-۴۵- اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی، برگسترش منطقه پلاستیک..... ۱۲۴
- شکل ۵-۴۶- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی..... ۱۲۶
- شکل ۵-۴۷- نمودار جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی..... ۱۲۷
- شکل ۵-۴۸- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی..... ۱۲۸
- شکل ۵-۴۹- اثر تغییر چسبندگی، برگسترش منطقه پلاستیک..... ۱۲۹
- شکل ۵-۵۰- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری..... ۱۳۱
- شکل ۵-۵۱- نمودار جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری..... ۱۳۲
- شکل ۵-۵۲- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری..... ۱۳۳
- شکل ۵-۵۳- اثر تغییر نسبت تنش ها (K)، برگسترش منطقه پلاستیک..... ۱۳۷
- شکل ۵-۵۴- نمودار جابجایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب های افقی متفاوت..... ۱۳۹
- شکل ۵-۵۵- نمودار جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب های افقی متفاوت..... ۱۴۰
- شکل ۵-۵۶- اثر تغییرات شتاب افقی، برگسترش منطقه پلاستیک..... ۱۴۲

فهرست

شکل ۶-۱: نمای سه بعدی از تاسیسات پرده آب در مغار ذخیره‌سازی بدون پوشش [۲۹].....	۱۴۸
شکل ۶-۲: نمایش چرخش آب در سیستم ذخیره‌سازی هیدروکربور در مغارهای بدون پوشش [۱۵].....	۱۴۸
شکل ۶-۳: مقطع عمودی از توزیع جریان هیدرولیکی اطراف مغارهای ذخیره‌سازی [۱۵].....	۱۴۹
شکل ۶-۴: اصول ذخیره‌سازی تحت فشار همراه با حاشیه اطمینان [۳۷].....	۱۵۲
شکل ۶-۵: گرادیان فشارهای داخلی [۳۷].....	۱۵۳
شکل ۶-۶: گرادیان فشارهای داخلی و خارجی [۳۷].....	۱۵۴
شکل ۶-۷: نمایش چگونگی کنترل نشت هیدروکربور در مغار سنگی [۲۱].....	۱۵۶
شکل ۶-۸: پرده‌های آب حفر شده از تونل‌های کوچک بالای مغار [۳۷].....	۱۵۷
شکل ۶-۹: طرح کلی از مغار در واحد آزمایشی صنعتی [۳۰].....	۱۵۹
شکل ۶-۱۰: ارائه الگوریتمی برای انتخاب روش بین مغارهای با پوشش و بدون پوشش [۱۰].....	۱۶۴
شکل ۶-۱۱: استفاده از الگوریتم انتخاب روش برای نحوه کنترل نشت غار رودافشان [۱۰].....	۱۶۶
شکل ۶-۱۲: ساختار اصلی دیواره غار رودافشان [۹۸].....	۱۶۸
شکل ۶-۱۳: چند نمونه از تقویت کننده [۸۷].....	۱۷۰

فصل اول:

کلیات

۱-۱- مقدمه

ایده ذخیره‌سازی محصولات نفتی در مغارهای سنگی زیرزمینی در اوایل سال ۱۹۳۰ در سوئد ارائه شد. این ایده زمانی مطرح شد که ارتش سوئد به دنبال روشی مطمئن، به منظور ذخیره‌سازی سوخت در شرایط جنگی بود [۶]. از دهه‌ی ۷۰ کشورهای متعددی در اروپا و دیگر بخش‌های دنیا شروع به استفاده از مغار برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری کردند. بحران نفت در سال ۱۹۷۳ باعث افزایش ساخت مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام شد و از آن به بعد پروژه‌هایی در مقیاس بزرگ در بسیاری از کشورها آغاز گردید که از آن جمله می‌توان به مخازن ذخیره‌سازی نفت خام با ظرفیت‌های چند میلیون بشکه‌ای در کشورهایمانند کره، ژاپن و امریکا اشاره کرد. مدت کوتاهی پس از آن ساخت مغارهای بزرگ برای ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی در عربستان نیز آغاز شد [۲۳]. از مزایای مهم مخازن زیرزمینی کم بودن تاسیسات روی سطح زمین است، به گونه‌ای که نسبت تاسیسات در این گونه مخازن نسبت به مخازن سطحی در حدود ۱ به ۱۰ می‌باشد [۳۲]. از دیگر مزایای مخازن زیرزمینی نسبت به سطحی صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه عملیاتی است. مثلاً برای یک مخزن ذخیره‌سازی نفت خام با ظرفیت ۳ میلیون مترمکعب، هزینه سرمایه‌گذاری و ساخت به صورت زیرزمینی در حدود ۹۰ میلیون دلار ارزان‌تر از مخزن سطحی با همان ظرفیت، برآورد شده است؛ که نشان می‌دهد هزینه ساخت مخزن زیرزمینی یک سوم هزینه ساخت مخازن سطحی با ظرفیت یکسان است [۳۲]. در نروژ هم سابقه ذخیره‌سازی نفت سوختی در نارویک^۱ به دوره‌ی ۱۹۵۴ تا ۱۹۵۵ برمی‌گردد. در اوایل دهه‌ی هفتاد، نروژ تنها دارای چند مغار ذخیره‌سازی نفت بود. این مغارها توسط شرکت‌های سوئدی احداث گردید. در سال

1 Narvik

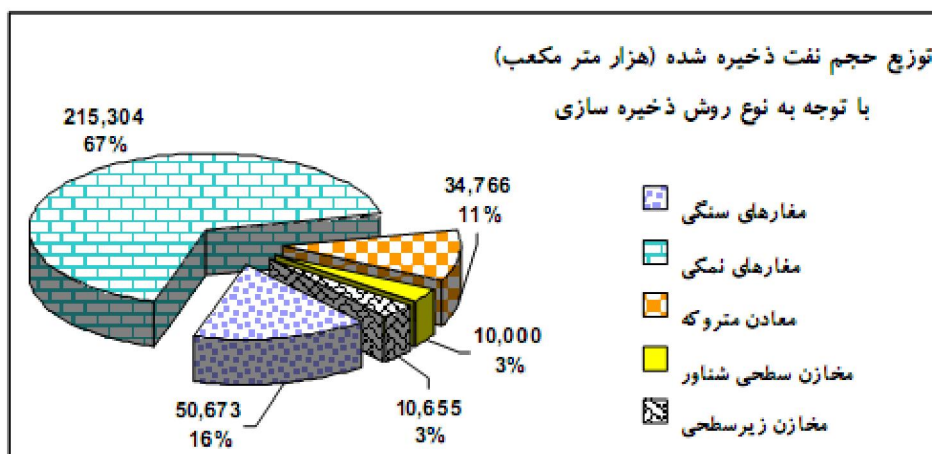
۱۹۷۵ اولین مغار بدون پوشش با نام مخزن ذخیره‌سازی سوخت اسوز^۱ با هدف ذخیره‌سازی نفت در هاورینگن^۲ در نروژ طراحی شد [۲۳].

طی سالیان ۱۹۴۷ تا ۱۹۵۰ دو معدن قدیمی در سوئد برای ذخیره‌سازی نفت سنگین کوره انتخاب شدند که هر دو زیر سطح ایستابی قرار داشتند. در طی دهه ۵۰ تا ۶۰ طیف وسیعی از مخازن زیرزمینی در سوئد برای نفت سوختی ساخته شدند. از آن به بعد به تدریج در دهه ۶۰ ذخیره‌سازی نفت خام، گاز مایع و گازوئیل در فنلاند نیز مورد توجه قرار گرفت [۲۳]. امروزه در کشور فنلاند مجتمع نستای پورو^۳ با ۳۵ مغار به ظرفیت کلی ۵/۲ میلیون مترمکعب وجود دارد که به تدریج طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۲ در ۲۲ واحد مجزا در سنگ‌هایی از جنس گرانیت و گنایس احداث شده و مواد نفتی در مغارهای بدون پوشش ذخیره شده‌اند [۴]. در فرانسه هم مغارهای ذخیره‌سازی گاز مایع تحت فشار در دهه‌ی ۶۰ آغاز گردید. اکثر این پروژه‌ها در سازندهای کرتاسه زیرین و یا آهک قرار دارند که عملیات حفر به طور مکانیکی بدون هیچ‌گونه حفاری و آتشیاری انجام شده است [۲۳]. همانطور که گفته شد بحران نفت در سال ۱۹۷۳ باعث افزایش ساخت مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام شد که پس از آن در بسیاری از کشورهای دیگر جهان پروژه‌های بزرگ مقیاس آغاز شد. بر اساس مطالعات انجام شده ۶۷ درصد نفت خام ذخیره شده جهان در مغارهای نمکی و ۱۶ درصد در مغارهای سنگی نگهداری می‌شود (شکل ۱-۱) [۶].

1 Essos

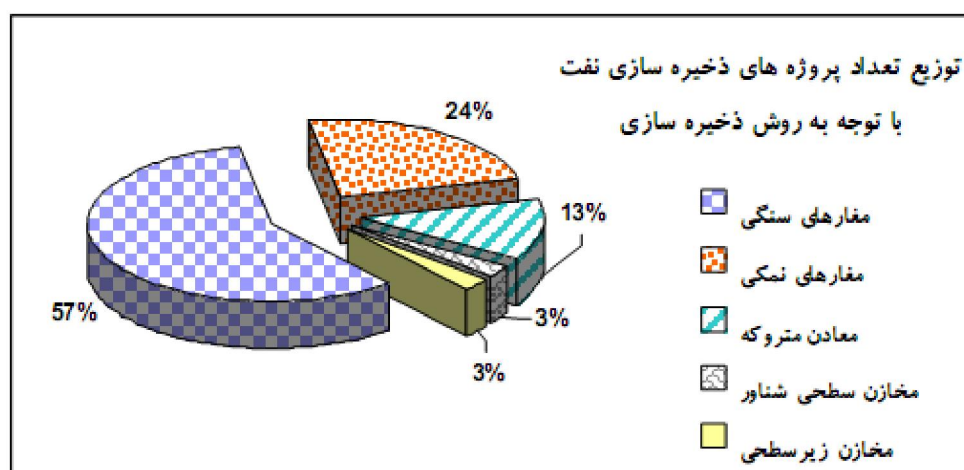
2 Hovringen

3 Neste Oy Poorvo



شکل ۱-۱: توزیع حجم نفت ذخیره شده با توجه به نوع روش ذخیره‌سازی [۶]

در شکل ۱-۲ توزیع تعداد پروژه‌های ذخیره سازی نفت خام، با توجه به روش ذخیره‌سازی ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تعداد پروژه‌های مربوط به مغاره‌های نمکی به علت احجام بسیار بزرگ این نوع مغارها نسبت به مغاره‌های سنگی کمتر است [۶].



شکل ۱-۲: توزیع تعداد پروژه‌های ذخیره‌سازی نفت با توجه به نوع روش ذخیره‌سازی [۶]

بحران مالی جهان در سال ۲۰۰۹ باعث افزایش قیمت بسیاری از کالاها از جمله نفت خام شده است. این اتفاق برای مواد استراتژیک از آن جنبه مورد توجه است که می‌تواند تاثیر زیادی بر توسعه‌ی اقتصادی ملی و قدرت دفاعی کشور داشته باشد. در کشوری مانند ایران، رشد اقتصادی نمی‌تواند جدا از عرضه مداوم و

بلند مدت نفت خام و فرآورده‌های نفتی باشد، زیرا ایران از یک سو نیازمند توسعه‌ی انرژی مورد نیاز و از سوی دیگر نیازمند افزایش حجم ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری است. افزایش حجم نفت خام ذخیره شده می‌تواند باعث فائق آمدن بر بحران‌های احتمالی در تولید نفت و نیز کاهش تاثیر بر نوسانات اقتصادی شود. بر همین اساس است که تقریباً اکثر کشورهای پیشرفته، دارای مغارهای زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوی می‌باشند. در مخازن سطحی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری، فائق آمدن بر نقاط ضعفی همچون مجهز بودن به تجهیزات عظیم آتش‌نشانی در طی عملیات مشکل است. همچنین مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوی، امن‌تر و نیز از نظر محیط زیست قابل قبول‌تر از مخازن سطحی می‌باشند. به همین دلیل است که طی ۵۰ سال اخیر در دنیا هیچ حادثه خطرناکی در مورد استفاده از مخازن زیرزمینی گزارش نشده است. از سوی دیگر مخازن سطحی زیادی در دنیا وجود دارند که این مخازن در مواجهه با بلایای طبیعی مانند سیل و یا در مواقع جنگ، بسیار ضعیف می‌باشند. رخ دادن این حوادث علاوه بر آسیب رساندن جدی به مخزن، باعث به خطر افتادن زندگی انسان‌های ساکن در نزدیکی آن می‌شود [۳۲]. به همین دلیل کشور انگلستان در سال ۱۹۴۰ و نیز در سال‌های جنگ جهانی دوم از مخازن زیرزمینی استفاده نمود [۱۴]. در حال حاضر ذخیره مواد نفتی در مغارهای سنگی در کشورهای حوزه اسکندیناوی بسیار معمول است [۴].

۱-۲- اهمیت ذخیره‌سازی در ایران

ایران از نظر اقتصادی وابستگی زیادی به تولید و صادرات انواع مواد هیدروکربوری شامل نفت خام، فرآورده‌های نفتی و گاز طبیعی دارد که امنیت حفظ تولید و میزان صادرات نقش بسیار مهمی در توسعه اقتصاد ملی و امنیت کشور دارا است. لازم به یادآوری است در حال حاضر تولید روزانه نفت خام در ایران در حدود ۳/۵ میلیون بشکه (حجم هر بشکه ۱۶۷/۸۵ لیتر) است. حال این سوال کارشناسی ممکن است

ذهن برخی مسئولین را به خود مشغول کند که با عنایت به اینکه ایران خود یکی از تولید کنندگان مواد هیدروکربوری همچون نفت خام است؛ دیگر چه نیازی به ذخیره سازی این مواد دارد و یا با توجه به اینکه میزان ذخایر نفتی ایران در حدود ۵۰ سال تخمین زده شده است؛ آیا نیازی به چنین مطالعات گسترده ای در زمینه ذخیره سازی این مواد می باشد. همچنین برخی معتقدند که ایران باید مانند سایر کشورهای پیشرفته به بهره برداری بیشتر از انرژی های نو (مانند انرژی خورشیدی و یا هسته ای) بپردازد. در جواب سوال اول باید گفت یکی از مزایای ساخت مخازن ذخیره سازی این است که در مواقع بحران اگر به هر دلیلی امکان استخراج نفت از میدان های تولیدی امکان پذیر نباشد؛ برای تامین خوراک اولیه پالایشگاه های داخلی و نیز از دست ندادن بازارهای جهانی (تا زمان رفع بحران) می توان از این مخازن بهره جست. به همین دلیل عربستان سعودی (با وجود اینکه خود یکی از تولید کنندگان عمده مواد هیدروکربوری است) در سال ۱۹۸۷ با شرکت های سوئدی قرارداد ساخت مخازن ذخیره سازی مواد هیدروکربوری را امضا کرد و در حال حاضر در خاورمیانه تنها کشوری است که دارای مزارع های ذخیره سازی هیدروکربوری می باشد. همچنین کشوری مانند روسیه علی رغم اینکه خود دارای بیشترین ذخایر گاز دنیاست؛ اما در زمینه ذخیره سازی گاز نیز یکی از کشورهای پیشرو می باشد. در جواب سوال دوم هم باید گفت که ذخایر نفتی قابل استحصال ایران با توجه به تکنولوژی و قیمت کنونی، حدود ۵۰ سال تخمین زده شده است و در سال های آینده احتمالاً با توسعه فن آوری های نوین اکتشاف و استخراج نفت و کاهش هزینه های استخراج از یک سو و نیز افزایش قیمت (به دلیل کاهش عرضه نفت) از سوی دیگر، میزان ذخیره قابل استحصال کشور افزایش خواهد یافت. ضمناً باید خاطر نشان نمود که ذخیره سازی مواد هیدروکربوری مانند نفت خام، نافی فعالیت در زمینه انرژی های نو نیست.

۱-۳- اهداف پایان نامه

در پروژه حاضر که تحت عنوان "تحلیل پایداری و نشت غار طبیعی به منظور امکان سنجی مقدماتی ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام" ارائه شده است ابتدا پس از بررسی غارهای طبیعی موجود در کشور با توجه به الزامات ذخیره سازی گزینه ی مناسب برای ذخیره سازی تعیین می شود. در مرحله بعد به تحلیل پایداری و نشت این غار طبیعی به منظور امکان سنجی مقدماتی ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام پرداخته خواهد شد. هدف از این پژوهش پاسخ گویی به سوالاتی زیر است.

- برای ذخیره سازی نفت خام کدام غار طبیعی با چه شکل و حجم هندسی و جنس سنگ دربرگیرنده ای مناسب می باشد.
- غارهای طبیعی که در طول عمر خود پایدار مانده اند آیا با انباشت نفت خام در آنها باز هم پایدار خواهند ماند.
- چگونه می توان نشت احتمالی نفت خام به توده سنگ را کنترل کرد.

۱-۴- روش انجام تحقیق

در این تحقیق هدف اصلی بررسی غارهای طبیعی موجود در کشور و ارزیابی پتانسیل آنها برای ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام است. نحوه کار بدین صورت است که در ابتدا بر اساس اطلاعات موجود، غارهای طبیعی بر اساس پارامترهایی همچون حجم غار، وضعیت آب، قوانین گردشگری و زیست محیطی و فاصله از خطوط لوله بررسی خواهند شد. سپس بر اساس کلیه این پارامترها، یک غار طبیعی به عنوان گزینه ای مستعد به منظور تبدیل به مخزن ذخیره سازی انتخاب خواهد شد. پس از انتخاب غار مورد نظر، ابتدا با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ که بر اساس روش تفاضل محدود عمل می کند، تحلیل پایداری غار

مورد نظر برای ذخیره‌سازی انجام خواهد گرفت. سپس تمهیداتی نظیر تعبیه پوشش‌هایی از جنس ژئوممبران به منظور کنترل نشت نفت خام از داخل غار به بیرون پیشنهاد خواهد شد.

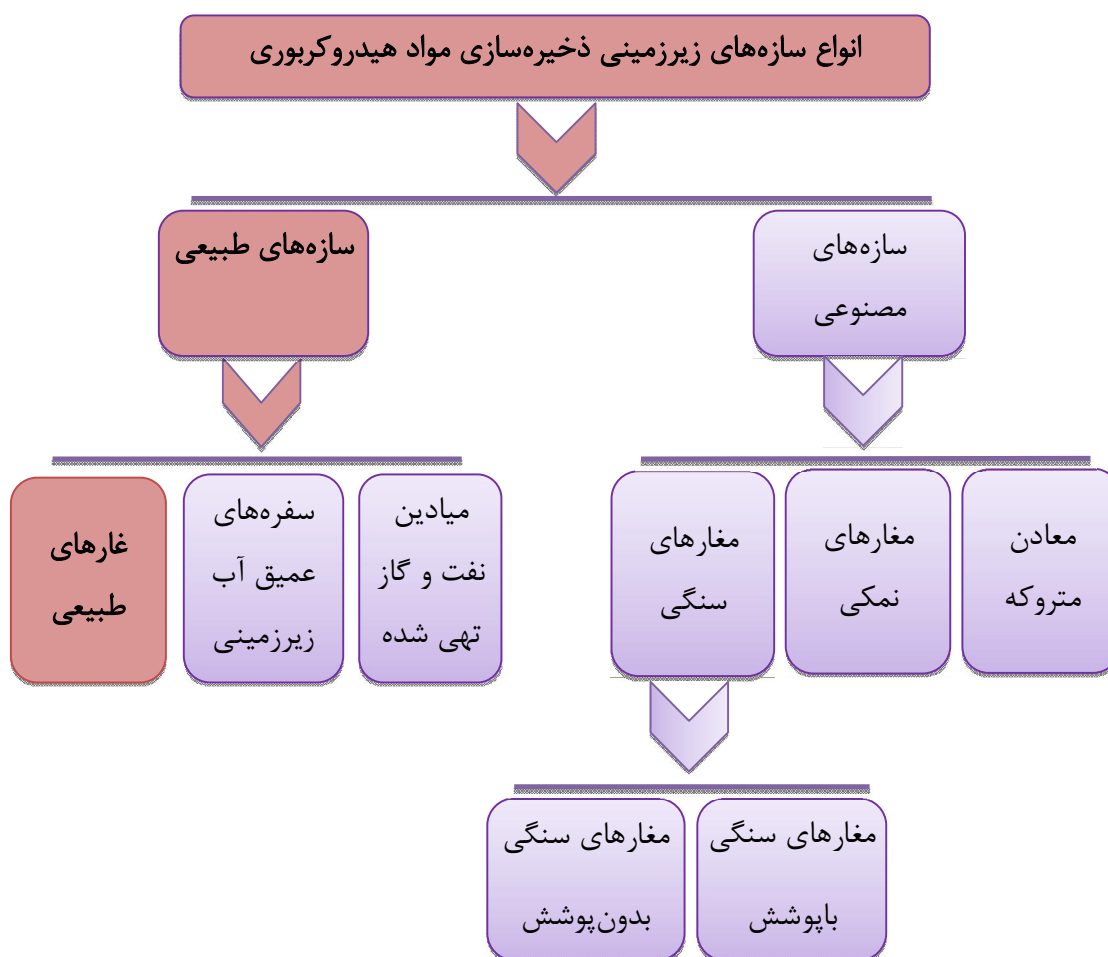
۱-۵- ضرورت انجام تحقیق

در راستای سیاست‌های راهروی کشور مبنی بر ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربنی به منظور مدیریت بحران‌های احتمالی ناشی از جنگ، خرابکاری، زلزله و غیره، پروژه ذخیره‌سازی نفت خام در غارهای طبیعی به دلیل عدم نیاز به حفر فضای زیرزمینی و در نتیجه کاهش و یا حذف هزینه‌ی ایجاد فضای زیرزمینی و همچنین هزینه ناچیز نگهداری به دلیل خودپایدار بودن، گزینه‌ای قابل بررسی محسوب می‌شود. در ضمن بررسی غارهای طبیعی و تعیین پتانسیل آنها برای ذخیره‌سازی، رویکردی نو در عرصه ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی می‌باشد.

۱-۶- بررسی انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی

یکی از مشکلات ساخت فضاهای زیرزمینی، پیش بینی رفتار پیچیده سنگ‌های دربرگیرنده آن است. در طی یک قرن اخیر و همزمان با پیشرفت دانش بشری در عرصه‌های گوناگون و به‌وجود آمدن نیازهای جدید، احداث و بهره‌برداری از فضاهای بزرگ زیرزمینی (مغارها) نیز روبه افزایش گذاشته است. عدم وابستگی به مسائل توپوگرافی و عدم محدودیت استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حملات هوایی و حوادث طبیعی (مانند توفان و زلزله) و امنیت در مقابل خرابکاری از جمله مزایایی است که باعث رویکرد استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی شده است. استفاده از مغارهای زیرزمینی در احجام بزرگ، از نظر اقتصادی قابل مقایسه با مخازن سطحی می‌باشد. مواد هیدروکربنی را می‌توان به روش‌های متنوعی ذخیره

سازی نمود. انواع سازه‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی ذخایر هیدروکربوری در شکل ۳-۱ نشان داد شده است.



شکل ۳-۱: انواع سازه‌های زیرزمینی

۱-۶-۱- سازه‌های مصنوعی

از ویژگی‌های اصلی سازه‌های مصنوعی این است که توسط بشر بر اساس نیازهای خاص ساخته می‌شوند. انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در سازه‌های مصنوعی عبارتند از: مغاره‌های سنگی، مغاره‌های نمکی، معادن متروکه [۶]. این سازه‌ها نسبت به سازه‌های طبیعی ذخیره‌سازی مواد

هیدروکربوری همچون سفره‌های عمیق آب زیرزمینی و یا میادین نفت و گاز تهی شده دارای عمق کمتری هستند. در ادامه به تشریح کامل‌تر سازه‌های مصنوعی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری پرداخته شده است.

۱-۶-۱-۱- مغارهای سنگی^۱

برای ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی زیرزمینی دو حالت وجود دارد: مغارهای باپوشش و بدون پوشش. روش‌های نگهداری، با توجه به نوع ماده ذخیره‌سازی شده با هم متفاوت است. مثلاً گاز نفتی مایع^۲ (LPG) و نفت خام هم در مغارهای سنگی بدون پوشش^۳ و هم در مغارهای سنگی باپوشش^۴ ذخیره می‌شوند؛ حال آنکه گاز طبیعی مایع^۵ (LNG) و همچنین گاز طبیعی فشرده^۶ (CNG) تنها درون مغارهای سنگی باپوشش ذخیره می‌شوند [۲۱]. در ادامه تاریخچه و نحوه توسعه هر یک از این روش‌ها به اختصار توضیح داده می‌شود.

الف: مغارهای سنگی با پوشش

فن‌آوری مغارهای دارای پوشش در سال ۱۹۸۷ در سوئد توسط یک کنسرسیوم بین‌المللی متشکل از شرکت گاز فرانسه و شرکت سیدکرافت^۷ به منظور ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی تحت فشار مطرح شد. شکل ۱-۴ نمایی از طرح ذخیره‌سازی گاز طبیعی با این فن‌آوری را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، این تاسیسات شامل یک مغار ذخیره‌سازی، یک چاه قائم و یک تونل است که مغار را به سطح زمین وصل می‌کند [۴۲]. این مغار دارای یک پوشش چند لایه شامل فولاد، بتن، پلاستیک

1 Rock Caverns

2 Liquid Petroleum Gas

3 Unlined Rock Caverns

4 Lined Rock Caverns

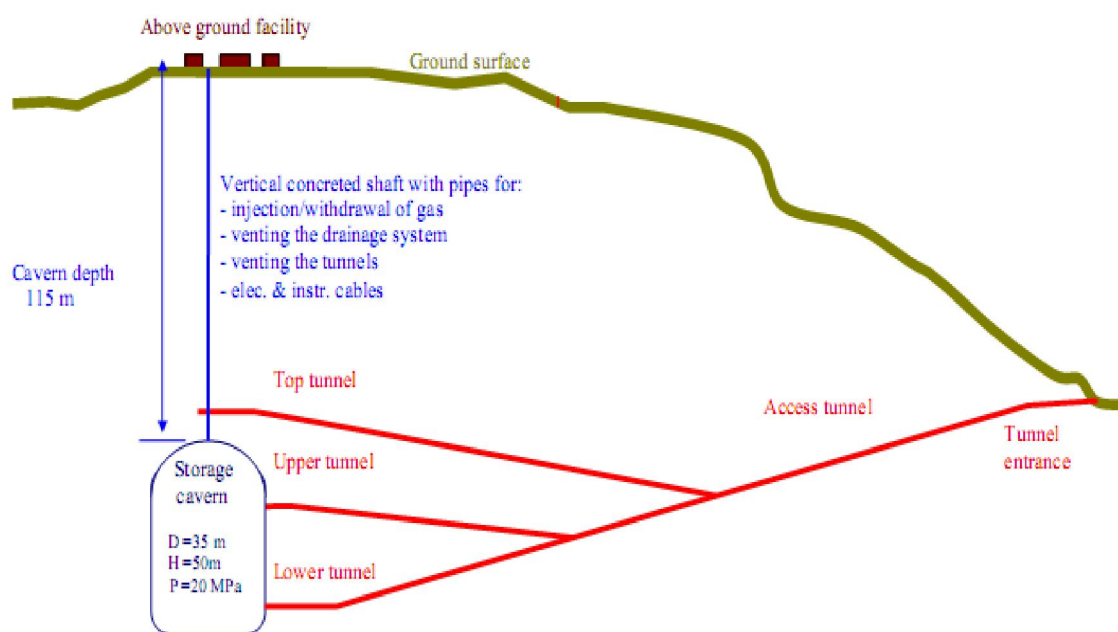
5 Liquid Natural Gas

6 Compress natural gas

7 Syd Kraft

فشرده و غیره می‌باشند. هدف از این پوشش چند لایه، جلوگیری از نشت سیال ذخیره شده و همچنین ایجاد تعادل بین فشارهای داخل ناشی از سیال و فشارهای خارجی ایجاد می‌شود [۱۲].

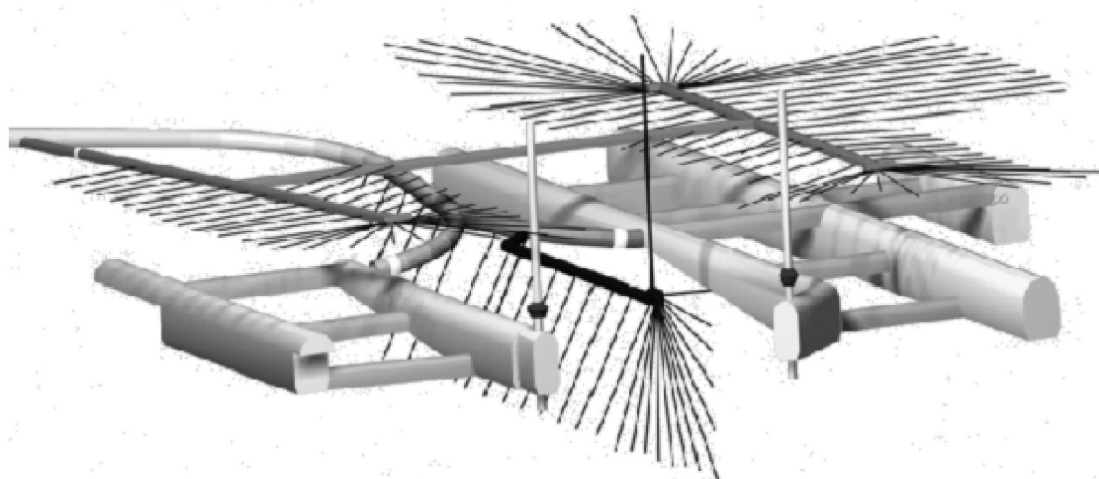
در ایران مغارهای سنگی به منظور احداث نیروگاه‌های برق‌آبی طراحی و ساخته شده است اما تکنولوژی طراحی و ساخت مغارهای ذخیره‌سازی بحثی جدید است. با توجه به اینکه ایران در یک ناحیه خشک و کم آب واقع است، روش بدون پوشش نمی‌تواند روش مناسبی برای بخش عمده‌ای از گستره سرزمینی ایران باشد. عوامل بسیار زیادی از جمله نوع و ترکیب شیمیایی سیال ذخیره شده، فشار ذخیره‌سازی، دمای ذخیره‌سازی و ابعاد سازه در طراحی پوشش مناسب برای مغار تاثیر گذارند که به دلیل پیچیدگی، خود نیازمند انجام تحقیقی مجزا است.



شکل ۴-۱: نمایی از طرح مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای باپوشش [۱۰۰]

ب: مغارهای سنگی بدون پوشش

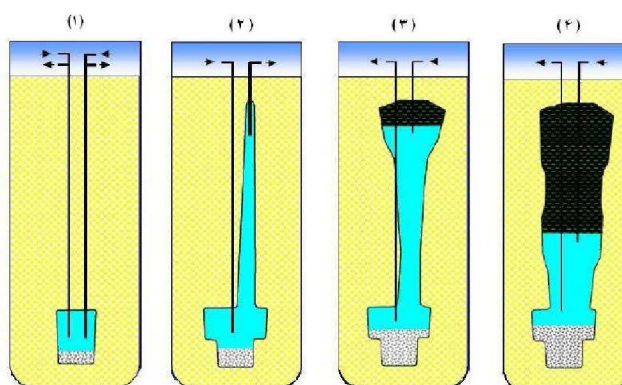
مغارهای سنگی بدون پوشش (URC) برای ذخیره‌سازی محدوده وسیعی از محصولات با فشار بخار پایین و به صورت مایع همچون نفت خام استفاده می‌شوند. قاعده کلی برای جلوگیری از نشت هیدروکربور طی فرآیند ذخیره‌سازی زیرزمینی در مغارهای سنگی بدون پوشش، استفاده از تعادل شرایط هیدرودینامیکی است. برای جلوگیری از نشت محصول ذخیره شده به بیرون، باید جریان آب از توده سنگ دربرگیرنده اطراف مغار به طور دائمی به طرف داخل مغار باشد. بنابراین مغار باید در عمق کافی قرار گیرد تا فشار هیدرولیکی آب در شکستگی‌های سنگ اطراف مغار به قدر کافی بیشتر از فشار بخار محصول ذخیره شده در داخل مغار شود. در مواقعی که فشار هیدرولیکی اطراف مغار کمتر از حد انتظار باشد؛ برای تامین فشار هیدرودینامیکی مورد نیاز، احداث پرده آب‌بند^۱ ضروری است [۲۱] و [۴۲]. سیستم زیرزمینی مغار شامل تونل دسترسی، پرده‌های آب‌بند، یک تونل تزریق آب و مغارهای ذخیره‌سازی است (شکل ۱-۵). همان طور که در شکل ۱-۵ مشخص است دستک‌های بادبزی شکل، از طریق چاه‌های کوچک (که گمانه‌های پرده آب‌بند نامیده می‌شوند)، تونل‌های تزریق آب را به پرده‌ی آب‌بند وصل می‌کنند؛ به‌طوری که آب از تونل دسترسی و تونل‌های تزریق آب می‌تواند به پرده آب‌بند ارسال گردد [۲۹].



شکل ۱-۵: نمای سه بعدی از تاسیسات مغار ذخیره‌سازی بدون پوشش [۲۱]

۱-۶-۲-۱ مغارهای نمکی

نفت خام سال‌هاست که در معادن بزرگ نمک و یا در مغارهای نمکی ذخیره می‌شود (خصوصاً در اروپا و آمریکا) [۱۴]. این روش از مناسب‌ترین گزینه‌های ذخیره‌سازی مقادیر بسیار زیاد مواد هیدروکربوری است. سازندهای نمکی تقریباً نفوذ ناپذیرند و آتش‌سوزی و یا انفجار در زیرزمین بسیار غیرمحتمل است، هرچند حوادث بسیار کمی (فوران، نشت محصولات و ناپایداری مغار) در گذشته به‌وقوع پیوسته است. مغارهای نمکی به وسیله یک چاه بلند (از حدود ۴۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر) به سطح زمین ارتباط دارند. این چاه بلند در درون سازند نمکی تا جایی که پاشنه چاه^۱ به قسمت بالایی سازند نمکی متصل شده است؛ ادامه پیدا می‌کند. پس از آن یک یا چند رشته لوله در چاه قرار می‌دهند تا بتوانند آب را به درون سازند تزریق نمایند. پس از انحلال دیواره‌های مغار توسط آب، شوراب^۲ حاصل از فضای میان لوله مرکزی^۳ و لوله جداری چاه^۴ به بیرون منتقل می‌شود. پس از یک سال یا بیشتر در شرایط معمولی، حجمی به اندازه ۱۰۰,۰۰۰ تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ متر مکعب در درون سازند نمکی ایجاد می‌شود. پس از آن با جایگزین کردن ماده هیدروکربوری مورد نظر بجای شوراب، فرآیند ذخیره‌سازی آغاز می‌گردد (شکل ۱-۶) [۳۶].



شکل ۱-۶: شروع عملیات انحلال پس از حفر چاه تا عمق مورد نظر [۱۷]

- 1 Casing-shoe
- 2 Brine
- 3 Tube
- 4 Casing

۱-۶-۱-۳- معادن متروکه

یکی از ارکان توسعه پایدار در هر کشور استفاده بهینه از سرمایه‌های موجود آن می‌باشد. در این راستا استفاده مجدد از معادن متروکه را می‌توان از مواردی دانست که از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. تعریف معدن متروکه در کشور ما، تا حدی با تعریف آن در کشورهای پیشرفته متفاوت است. در ایران متروکه شدن یک معدن عمدتاً به دلیل پایان پذیرفتن ذخیره آن نبوده بلکه عوامل دیگری همچون ضعف تکنولوژی، شرایط اقتصادی، مسائل فرهنگی و غیره نیز می‌تواند به این امر منجر شود. از آنجا که در گذشته در این معادن عملیات معدنکاری انجام می‌گرفته لذا در این معادن تسهیلاتی مانند راه، تونل، ریل، آب و غیره موجود است که جزو سرمایه‌های ملی محسوب شده و لازم است به منظور افزایش بهره‌وری و استفاده از این سرمایه‌های بلااستفاده، معادن متروکه مورد ارزیابی مجدد قرار گیرند. اولین مرحله احیاء مجدد این معادن، بازنگری و جمع‌آوری اطلاعات موجود آنها و ساماندهی به منظور ارائه و بررسی برای سرمایه‌گذاری می‌باشد. لازم به ذکر است حتی در صورت پایان پذیرفتن ذخیره کانسنگ در معادن، نباید به حال خود رها شوند، چرا که احتمال بروز خطرات فراوانی برای ساکنان منطقه و محیط‌زیست را به همراه دارند. معادن متروکه یک فضای زیرزمینی به وجود آمده هستند و نیازی به حفر مجدد ندارند، لذا می‌توان با صرف هزینه اندک به تصحیح شکل فضا، پایدارسازی و کنترل نشت دیواره به منظور تغییر کاربری و تبدیل آن به مخزن ذخیره‌سازی پرداخت. بر همین اساس برای اولین بار در سوئد در دوره ۱۹۴۷-۱۹۵۰ دو معدن قدیمی که زیر سطح ایستایی آب قرار داشتند برای ذخیره‌سازی نفت سنگین کوره انتخاب شدند [۹۹].

۱-۶-۲- ساختارهای طبیعی

ساختارهای متخلخل طبیعی شامل سفره‌های عمیق آب زیرزمینی و میادین تهی شده نفت و گاز می‌باشند. این ساختارهای طبیعی تنها در صورتی برای ذخیره‌سازی گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند که

اولاً به وسیله توده سنگی نفوذناپذیر محصور شده باشند، ثانیاً دارای یک ساختار تاقدیسی باشند تا امکان فرار و یا نشت گاز به حداقل برسد. در حالت کلی ساختارهای متخلخل طبیعی را می‌توان به دو دسته میدان‌های نفت و گاز تهی شده و سفره‌های عمیق آب زیرزمینی تقسیم‌بندی کرد. در ادامه به بررسی این روش‌ها پرداخته خواهد شد [۱۱].

۱-۲-۶-۱- میدان‌های نفت و گاز تهی شده

متداول‌ترین روش ذخیره‌سازی زیرزمینی، استفاده از مخازن تهی شده نفت و گاز است. مخازن تهی شده سازندهایی هستند که طی میلیون‌ها سال ماده هیدروکربوری را در خود نگهداری نموده‌اند. بهره‌برداری از این مخازن با استفاده از تجهیزات استخراج و انتقال امکان‌پذیر می‌باشد. وجود چنین شبکه استخراجی و انتقالی در محل، هزینه تغییر کاربری مخزن تخلیه شده را کاهش می‌دهد. مخازن تخلیه شده از آن نظر که خصوصیات زمین‌شناسی آنها از قبل شناخته شده است، بسیار مورد توجه می‌باشند. از لحاظ جغرافیایی مخازن تهی شده باید نسبتاً به مناطق مصرف و به زیر ساخت‌های شبکه انتقال شامل حمل‌ونقلی خطوط لوله اصلی و سیستم توزیع نزدیک باشند. در مناطقی که مخازن تهی شده وجود ندارد (مثلاً در اروپای مرکزی)، ذخیره‌سازی با استفاده از سایر روش‌ها از جمله مغارهای نمکی و سفره‌های عمیق آب زیرزمینی مورد توجه می‌باشد [۱۱].

۱-۲-۶-۲- سفره‌های عمیق آب زیرزمینی

سفره‌های آبدار^۱ به عنوان مخازن طبیعی آب زیرزمینی در سازندهای متخلخل و نفوذپذیر قرار دارند. سفره‌های آب زیرزمینی به دلایلی، در مقایسه با سایر روش‌های ذخیره‌سازی پرهزینه‌تر می‌باشد. از آنجایی که خصوصیات زمین‌شناسی سفره‌ها به طور کامل شناخته شده نیست، نیاز به صرف زمان و هزینه‌های زیاد برای کشف خصوصیات زمین‌شناسی و تعیین کیفیت آن برای تبدیل به مخزن ذخیره‌سازی دارند.

^۱ Aquifer

همچنین نیاز است مساحت، جنس توده سنگ، تخلخل و وجود فشار قبل از توسعه سازند بررسی شود. به منظور تبدیل سفره عمیق طبیعی آب به یک محل مناسب برای ذخیره سازی گاز طبیعی، باید تمامی زیر ساخت های لازم را ایجاد کرد. این زیر ساخت ها شامل حفر چاه ها، تجهیزات استخراج، خطوط لوله، رطوبت زدایی و فشرده کننده می باشد. از آنجایی که سفره های آبدار ذاتاً تحت فشارند، باید از تجهیزات قوی تزریق استفاده شود تا فشار تزریق مناسبی را تامین نمود و آب های موجود در سفره را از محل دور کرده و آن را با گاز طبیعی جایگزین ساخت. پس از استخراج گاز از سفره های آب، گاز قبل از انتقال، باید رطوبت زدایی شود. این کار نیازمند تجهیزات ویژه ای در سر چاه می باشد. سازندهای حاوی آب نمی توانند گاز را مانند مخازن تهی شده نگه دارند. این بدان معناست که مقداری از گازی که تزریق شده است، از سازند فرار می کند و باید توسط چاه های جمع کننده، جمع آوری و استخراج شوند. علاوه بر این به دلیل اینکه به طور طبیعی هیچ گازی در سفره های آبدار وجود ندارد تا به توان با آن مقدار، تزریق را شروع کرد، بنابراین مقداری از گاز تزریقی در نهایت غیرقابل بازیافت است. به این حجم گاز، گاز پایه می گویند. در واقع گاز پایه حجمی از گاز است که بایستی در تاپسیسات مخازن و خود مخزن باقی بماند؛ تا فشار مورد نیاز برای بیرون کشیدن گاز باقی مانده را تامین کند. در سفره های آبدار، گاز پایه مورد نیاز به مقدار ۸۰ درصد از کل حجم گاز است، در حالی که استخراج گاز پایه از مخازن تهی شده امکان پذیر است. اکثر مخازن به وجود آمده از سفره های آب، هنگامی توسعه داده شده اند؛ که قیمت گاز طبیعی کم بود، به طوری که هزینه گاز پایه بسیار ارزان تمام می شد. بنابراین با افزایش قیمت گاز طبیعی ایجاد مخازن از نوع سفره های آبی بسیار گران است [۱۱].

۱-۶-۲-۳- غارهای طبیعی

از بین روش های مختلف ذخیره سازی، روشی مناسب تر است که سازگاری بیشتری با شرایط منطقه ذخیره سازی داشته باشد. مثلاً در کشورهایی همچون سوئد و نروژ به دلیل وجود سنگ هایی با مقاومت

زیاد و نیز بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، اکثراً از روش مغارهای سنگی برای ذخیره‌سازی استفاده شده است. در ایران هم به دلیل وجود غارهای طبیعی بسیار، ایده ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در درون غارهای طبیعی جزء گزینه‌های قابل بررسی می‌باشد. اما باید توجه ویژه‌ای به مباحث زیست‌محیطی و گردشگری داشت. بدیهی است استفاده از غار طبیعی به عنوان مخزن ذخیره‌سازی، منجر به حذف هزینه و زمان احداث مغار در سنگ خواهد شد که از مهمترین مزایای این نوع ذخیره‌سازی است.

۱-۷- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر ۷ فصل به شرح زیر می‌باشد:

فصل حاضر شامل کلیات طرح اعم از سابقه ذخیره‌سازی و اهمیت آن در ایران می‌باشد.

فصل دوم تحت عنوان تحلیل غارهای طبیعی ایران با توجه به الزامات ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری است که در آن مهم‌ترین غارهای شناخته شده بر اساس استان محل قرارگیری آنها معرفی خواهند شد. در فصل سوم پس از تدوین معیارهای اولویت‌بندی غارهای مختلف به منظور ذخیره‌سازی، اولویت‌بندی مناسب‌ترین گزینه‌ها به منظور ذخیره‌سازی نفت خام صورت می‌گیرد.

پس از انتخاب گزینه ارجح در فصل سوم، اصلاحات لازم به منظور تصحیح ساختار هندسی و تحلیل پایداری غار پس از ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری، در فصل چهارم مورد بحث قرار خواهد گرفت.

سپس در فصل پنجم پس از پیشنهادات اصلاحات هندسی مورد نیاز، هندسه اصلاح شده با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مدل‌سازی شده و نتایج تحلیل پایداری آن ارائه خواهد شد.

فصل ششم تحت عنوان روش‌های کاهش نفوذپذیری و کنترل نشت مخزن است. در این فصل ابتدا روش‌های مختلف کنترل نشت ارائه شده و سپس برای کنترل نشت غار مورد نظر تمهیداتی اتخاذ می‌گردد.

در فصل هفتم نیز نتایج تحقیق جمع‌بندی شده و پیشنهادات مربوطه ارائه می‌گردد.

نحوه سازماندهی پایان‌نامه در شکل (۷-۱) نشان داده شده است.



شکل ۷-۱- فلوچارت سازماندهی پایان‌نامه

۸-۱- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا سابقه و اهمیت ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری بیان و سپس مزایای آن نسبت به مخازن سطحی بررسی شد. از جمله این مزایا می‌توان به قابل مقایسه بودن هزینه ذخیره‌سازی زیرزمینی نسبت به مخازن سطحی، کمتر بودن تاسیسات سطحی در روش زیرزمینی و همچنین ایمنی بیشتر مخازن زیرزمینی در برابر حوادثی مانند سیل و یا جنگ اشاره کرد [۳۲]. در پایان هم انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی در دنیا به اجمال مورد بررسی قرار گرفته و ساختار پایان‌نامه تشریح شد.

فصل دوم:

معرفی غارهای طبیعی ایران با توجه به الزامات

کلّی ذخیره سازی نفت خام

۲-۱- مقدمه

غارها فضاهای زیرزمینی هستند که در اثر فرآیندهای طبیعی به وجود آمده و به سطح زمین راه پیدا می‌کنند. همان‌گونه که بیان شد استفاده از غار طبیعی به عنوان مخزن ذخیره‌سازی، منجر به کاهش و یا حذف هزینه‌ی هنگفت حفر مغار در سنگ خواهد شد که این امر، مهمترین مزیت این نوع روش ذخیره‌سازی است. ایران به دلیل دارا بودن غارهای طبیعی متعدد، می‌تواند از پتانسیل بالای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام در غارهای طبیعی برخوردار باشد. غارهای موجود در ایران را از نظر نحوه پدید آمدن‌شان می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

غارهای اسید ساخته: در تمامی نقاط پوسته‌ی زمین درزه و ترک‌هایی وجود دارد. در ایجاد این درزه و ترک‌ها دو عامل نقش اساسی را ایفا می‌کنند: الف) عملکرد نیروهای درون زمین؛ ب) عملکرد عوامل فرسایش. وجود گاز دی‌اکسیدکربن در فضا و در لایه‌های سطحی زمین از یک طرف و بارش باران از طرف دیگر سبب تولید اسیدکربنیک می‌شود، این اسیدکربنیک تولید شده با نفوذ در پوسته‌ی زمین از درون درزه‌ها و گسل‌های متقاطع درونی گذشته و با حل کردن آهک‌های اطراف منافذ، سبب ایجاد فضاهای به هم پیوسته می‌شود که مقاطع آنها طی زمان‌های طولانی بزرگ‌تر می‌شوند. تداوم تماس آب اسیددار جاری با سطح داخلی فضاها طی میلیون‌ها سال تحت شرایط آب و هوایی خاص، فضاهای وسیعی را ایجاد می‌کند. چشمه‌ای که آب آن حاصل تجمع آب مجراهای درونی است چشمه‌ی غارساز نامیده می‌شود. هر غار ممکن است یک یا چند چشمه‌ی غار ساز داشته باشد. از ویژگی‌های چشمه‌های غارساز این است که خروجی چشمه لزوماً پایین‌تر از عمیق‌ترین نقطه‌ی غار است زیرا در غیر این صورت آب محتوی بی‌کربنات کلسیم از غار خارج نمی‌شود و فضایی هم شکل نمی‌گیرد [۱].

غارهای فرسایش ساخته: به آن دسته از غارهایی اطلاق می شود که عامل اصلی ایجاد آنها فعالیت های بیرونی طبیعت یا فرسایش است. این غارها ممکن است در کانی های آهکی و یا کانی های آتش فشانی ایجاد شوند [۱].

غارهای ماگما ساخته: غارهای ماگما ساخته غارهایی هستند که بر اثر بالا آمدن توده ای ماگما از درون زمین و هم جواری آن با بخش های آهکی پوسته و در نتیجه آزاد شدن اکسیژن و کربن موجود در کربنات کلسیم پوسته بر اثر حرارت و فشار ماگما، سبب ایجاد فضایی درون پوسته و راه یابی فضای ایجاد شده به بیرون شکل گرفته اند [۱].

به منظور تحلیل غارهای طبیعی ایران با توجه به الزامات ذخیره سازی، در این فصل فهرستی از غارهای شناخته شده بر اساس استان محل قرارگیری آنها ارائه شده است. بدیهی است آن دسته از غارهایی که حائز شرایط عمومی ذخیره سازی، مانند حجم مناسب، دسترسی مطلوب و وضعیت آب زیرزمینی نبوده اند؛ از این فهرست حذف شده اند. شایان ذکر است مطالعه بر روی اکثر غارهای طبیعی ایران تنها از جنبه گردشگری توسط گروه های مختلف غارنوردی انجام گرفته است.

۲-۲- غارهای واقع در استان آذربایجان شرقی

استان آذربایجان شرقی بزرگ ترین و پرجمعیت ترین استان ناحیه شمال غربی ایران محسوب می شود. این استان از سمت شمال با جمهوری های آذربایجان و ارمنستان همسایه است. مرکز استان آذربایجان شرقی، کلان شهر تبریز بوده که به دلیل جمعیت زیاد و سرمای هوا یکی از مهمترین مناطق مصرف کننده سوخت در ایران است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۲-۱- غار کبوتر

غار کبوتر (هامپویل) در ۸ کیلومتری جنوب شرقی مراغه در میانه‌ی کوهی صخره‌ای رو به جنوب قرار گرفته است و دارای ارتفاع ۱۶۰۰ متری از بستر رودخانه موردی‌چای است. اهمیت این غار به دلیل وجود چاه‌های عمیقی است که به صورت تالارهای بزرگ پدید آمده‌اند. در ابتدای ورودی غار میدان بزرگی وجود دارد که سقف آن لانه کبوتران است. پس از آن در تونل کم‌ارتفاعی که در سمت راست قرار دارد، میدان نسبتاً بزرگ دیگری نیز وجود دارد. در این میدان چهار حلقه چاه به عمق تقریبی ۱۰ تا ۱۲ متر قرار گرفته است که همه آن‌ها به یک میدان بزرگ در اعماق زمین منتهی می‌شوند. در این میدان صخره‌های بزرگی دیده می‌شود که تا خرداد ماه به دلیل ریزش آب‌های زیرزمینی سطح آن‌ها لغزنده است [۸۶].

۲-۲-۲- غار اسکندر

غار اسکندر به فاصله ۳۰ کیلومتری تبریز در روستای سعیدآباد شهرستان اهر واقع شده و دسترسی به آن از طریق جاده تبریز- تهران میسر است. این غار دارای دهانه‌ای به عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۵ متر بوده و در بین سنگ‌های رسوبی قرار گرفته است. غار اسکندر، غاری طبیعی و آهکی می‌باشد و در اثر انحلال به وجود آمده است. در درون غار تالاری نسبتاً بزرگی وجود دارد و در آن بوی گاز گوگرد استشمام می‌شود [۵۳].

۲-۲-۳- آغ بولاق

غار آغ بولاق در قسمت جنوبی روستای قره‌چمن شهرستان بستان آباد واقع شده است. این غار از نوع غارهای طبیعی و آهکی است و در اثر نفوذ آب به داخل طبقات آهکی به وجود آمده است. عرض دهانه غار در حدود دو متر می‌باشد [۵۳].

۲-۲-۴- غار دوگیجان

غار دوگیجان در شرق شهرستان مرند قرار داشته و دسترسی به آن از طریق راه آسفالت می باشد. غار دوگیجان دارای عرض دهانه ای در حدود ۵ متر است. این غار از نوع غارهای طبیعی و آهکی اسید ساخته است [۵۸].

۲-۲-۵- غار قدمگاه

غار قدمگاه در نزدیکی روستای قدمگاه (بادامیار) و در جنوب شهرستان آذرشهر واقع شده است. مقطع فضای غار دایره ای شکل و دارای قطری برابر ۱۵ متر است. در ادامه این غار دالانی به طول و عرض و ارتفاعی به ترتیب ۹، ۱/۵ و ۲/۵ متر وجود دارد که به دهلیز وسیع تری به طول و عرضی به ترتیب ۴/۵ و ۳/۲ متر و ارتفاع در حدود ۲/۵ تا ۴ متر می رسد. در نهایت این دهلیز به فضای گنبدی شکل غار که ارتفاعی در حدود ۱۲ متر دارد، مرتبط می شود [۷۸].

۲-۳-۳- غارهای واقع در استان آذربایجان غربی

استان آذربایجان غربی در شمال غربی ایران قرار دارد و از شمال به کشورهای جمهوری آذربایجان و ترکیه، از غرب به کشورهای ترکیه و عراق محدود است. این استان از نظر وسعت، سیزدهمین استان بزرگ کشور محسوب می شود. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۳-۱- غار سهولان

غار آبی و تاریخی سهولان در ۴۳ کیلومتری جنوب شرقی مهاباد و در مسیر جاده مهاباد به بوکان (جاده برهان) واقع شده که از شهر بوکان نزدیک به ۳۵ کیلومتر فاصله دارد. این غار به دلیل قرار گیری در میان رشته کوه های بلند و سر به فلک کشیده و همچنین دره های عمیق، کاملاً بکر و دست نخورده است. غار

سهولان دارای دو دهانه است که به سمت جنوب باز شده‌اند. یکی از این دهانه‌ها که بزرگ‌تر از دیگری است؛ به گونه‌کوثر مشهور است. آب و هوای این محل به دلیل قرار گرفتن در ارتفاع دو هزار متری از سطح دریا و محاط شدن در میان قله‌های بلند در تابستان‌ها خنک و در زمستان‌ها بسیار سرد و یخبندان است. هوای درون غار بسیار مرطوب و تاریک است که با کار گذاشتن صدها نورافکن امکان دید فراهم شده است. درجه حرارت در فصل تابستان و زمستان بین ۱۰ تا ۱۳ درجه سانتیگراد در نوسان است و رطوبت حاکم بر غار نیز بین ۷۰ تا ۸۰ درصد متغیر است. نخستین دریاچه درون غار حدود ۲۰۰ مترمربع وسعت دارد که دارای آبی زلال و صاف است. دالان بالای سر این دریاچه افزون بر ۵۰ متر ارتفاع دارد و در انتهای آن دو دالان باریک به عرض دو متر دیده می‌شود که به دریاچه‌ها و دالان‌های متعددی ختم می‌شوند. با گذر از دالان‌های تنگ و باریک سه حوضچه آبی بزرگ و کوچک دیده می‌شود و پس از آن چهارمین و بزرگ‌ترین دریاچه قرار گرفته است. این دریاچه در حدود ۵۰۰ متر مربع وسعت دارد. متوسط عمق آب این دریاچه ۲۵ متر است. بعد از دریاچه چهارم به دلیل باریک بودن تونل‌ها و نداشتن روشنایی ورود ممنوع اعلام شده است. غار سهولان پس از غار علیصدر همدان، دومین غار آبی بزرگ کشور است که تاکنون شناخته شده است. این غار از نوع غارهای آهکی بوده و در فهرست آثار طبیعی ملی ایران قرار دارد. ابعاد تالار اصلی غار سهولان ۵۸ در ۴۲ متر و ارتفاع سقف آن ۵۰ متر می‌باشد [۹۱].

۲-۳-۲- غار قلاچی

غار قلاچی در ۹ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بوکان و در مجاورت محوطه باستانی قلعه قلاچی قرار گرفته و از دسته غارهای طبیعی و آهکی به شمار می‌آید که در اثر نفوذ آب در طبقات آهکی شکل گرفته است. این غار از جمله غارهای دارای چاه‌های عمیق در کشور است. دهانه غار با قطر ۸ متر در ارتفاع کوهی به همین نام قرار دارد. عمق غار تا کف تالار اول ۱۱۰ متر می‌باشد که برای رسیدن به آنجا

باید بر روی تپه‌ای به ارتفاع ۲۰ متر فرود آمد. این تپه از انباشته شده سنگ، فضولات و لاشه‌ی کبوترانی که تا عمق ۴۰ متری غار لانه کرده‌اند به وجود آمده است [۵۸].

۲-۳-۳- غار بورنیک بزرگ-مهاباد

غار بورنیک بزرگ در نزدیکی شهر مهاباد قرار داشته و طولش در حدود ۵۰۰ متر است. این غار از نوع غارهای طبیعی و آهکی بوده و در اثر نفوذ آب به داخل سنگ بستر و در نتیجه انحلال سنگ بستر بوجود آمده است. غار بورنیک بزرگ، دارای پرتگاه‌ها و چاه‌های درونی متعددی بوده، لذا تنها غارنوردان از این غار دیدن می‌کنند. در نزدیکی این غار، غار دیگری به نام بورنیک کوچک واقع شده است که دارای طول و عرضی کمتری نسبت به این غار است. درون غار بورنیک کوچک، سکوهایی به منظور دستیابی به انتهای آن ایجاد شده است [۸۳].

۲-۳-۴- غار میرداوود

این غار که در منطقه برادوست شهرستان ارومیه واقع شده است، از طرف سازمان میراث فرهنگی بعنوان یکی از غارهایی که در گذشته‌های دور زیستگاه انسان‌های اولیه بوده معرفی شده است. طول این غار در حدود ۵۱۰۰ متر است [۸۵].

۲-۳-۵- غار قلاتاسیان

این غار در فاصله ۲۰۰ متری شمال غرب روستای قلعه تاسیان از توابع بخش "گورک نعلین" شهرستان سردشت قرار دارد. ورود به غار تنها از یک باریکه به طول ۴ متر و به عرض ۳۰ الی ۵۰ سانتیمتر که بین صخره‌های دیواره‌ای ساحل رود زاب ایجاد شده، امکان پذیر است. اشیای سفالی موجود در این غار، حکایت از زندگی انسان در این غار در دوره پارت و ساسانی دارد [۸۵].

۲-۳-۶- غار چاه زندان

این چاه در نزدیکی تکاب و ۳ کیلومتری آثار باستانی تخت سلیمان در ارتفاع ۲۹۵۰ متری از سطح دریا واقع شده است. غار چاه زندان که در اثر عوامل آتشفشانی به وجود آمده است با تغییراتی به وسیله انسان‌ها در زمان گذشته به صورت زندان درآمده است. در اطراف این چاه تعدادی چشمه‌های آب گرم معدنی وجود دارد. این فضای طبیعی، مخروطی شکل بوده و دارای عمقی در حدود ۷۰ متر و دهانه‌ای به قطر ۴۰ متر است. در حال حاضر از این مکان به جز بازدیدهای اندک علاقمندان آثار تاریخی بهره‌برداری خاصی صورت نمی‌گیرد [۸۵].

۲-۴- غارهای واقع در استان اردبیل

استان اردبیل در شمال غربی کشور واقع شده است. مساحت این استان در حدود ۱۷۹۰۰ کیلومتر مربع (حدوداً ۱۰۰۹ درصد از مساحت کل کشور) و جمعیت آن بر اساس سرشماری سال ۱۳۸۵ برابر ۱/۲ میلیون نفر بوده است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۴-۱- غار هفت خانه

غار هفت خانه (یدی اولر) در جنوب غربی شهرستان خلخال و شمال روستای گرمخانه قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریا در حدود ۱۶۰۰ متر است. این غار از نوع غارهای طبیعی و آهکی اسید ساخته است. غار هفت خانه از ۷ تالار کوچک U شکل که به ترتیب و پشت سرهم قرار دارند تشکیل شده است. این غار دارای دو دهانه ورودی است. دهانه اصلی آن رو به شرق قرار دارد و چهار تالار از این دهانه به سهولت قابل دسترسی است. ارتفاع این تالارها به طور متوسط بیشتر از ۳ متر می‌باشد. مسیر ارتباطی به تالار پنجم از طریق یک راهرو به طول ۴ متر و به عرض ۷۰ و ارتفاع ۵۰ سانتیمتر که طرفین آن سنگ چین شده است

صورت می گیرد. دهانه دوم این غار به سمت جنوب است. این دهانه بر اثر کاوش های غیرمجاز در سال های اخیر ایجاد شده است که مستقیماً به تالار پنجم مربوط می شود [۷۹] و [۹۰].

۲-۴-۲- غار یخکان

غار یخکان در جنوب شرقی استان اردبیل، در ارتفاع ۲۵۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. این غار طبیعی و از نوع غارهای آهکی است. در دهانه ورودی آن که به سمت شرق است؛ آثار هوازدگی فیزیکی و خرد شدن سنگ ها به صورت واریزه به خوبی قابل مشاهده است. دهانه ورودی آن بسیار کوچک (۴۰ تا ۵۰ سانتیمتر) می باشد و از طریق یک راهرو تنگ و باریک به طول ۱۰ متر و به قطر حداکثر ۵۰ سانتیمتر به تالار وسیعی منتهی می شود. ابعاد این تالار ۳۶ در ۱۵ متر و حداکثر ارتفاع آن ۲۰-۱۵ متر می باشد. هوای داخل غار سرد و به شدت مرطوب و نمناک می باشد. حوضچه آبی در ضلع شرقی و در ارتفاع ۱/۵ متری از کف غار تشکیل شده است. آب آن از جمع شدن قطرات آب ناشی از تقطیر در اثر برخورد بخار آب با دیواره سرد تأمین می شود. تالار اصلی از جانب ضلع غربی به وسیله راهروهایی پیچ در پیچ به تالارهای کوچک مربوط می شود. از خصوصیات ویژه این بخش از غار جریان مداوم هوای مرطوب و تشکیل بلورهای یخ به صورت قندیل و ورقه های نازک در قسمت هایی از سطوح دیوارها و سقف می باشد. این غار به لحاظ خاصیت یخچالی آن است که به نام یخکان یا معدن یخ نامیده می شود [۵۹] و [۶۹].

۲-۵- غارهای واقع در استان اصفهان

استان اصفهان با مساحتی در حدود ۱۰۵,۹۰۰ کیلومتر مربع در مرکز ایران واقع شده است. این استان پهناور یکی از مراکز بزرگ جمعیتی در کشور نیز محسوب می شود. در حدود ۱۰ درصد از بیابان های ایران در استان اصفهان قرار دارند. پالایشگاه اصفهان یکی از پالایشگاه های بزرگ مصرف کننده نفت خام در ایران است، این پالایشگاه با مصرف ۳۷۵ هزار بشکه نفت خام در روز یکی از مراکز عمده مصرف در داخل

کشور می باشد. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۷۷].

۲-۵-۱- چاه دیو (چاه ارازه)

چاه دیو در قریه آبسنجد باقراآباد در چهل کیلومتری جاده مورچه خورت به نطنز در بالای کوهی قرار دارد. این چاه، طبیعی و از نوع چاه های آتشفشانی است که در اثر فوران مواد و گدازه های آتشفشانی تشکیل شده است. عمق چاه در حدود ۶۰ تا ۸۰ متر و قطر دهانه آن ۳۰ متر است. این چاه در میان طبقات رسوبی و آبرفتی به شکل یک استوانه تشکیل شده است. در بعضی از قسمت های دیواره آن با وجود گذشت میلیون ها سال حالت صیقلی که در نتیجه خروج مواد آتشفشانی است، مشاهده می شود [۵۸].

۲-۵-۲- غار قهرمان

غار قهرمان در ۱۲ کیلومتری یکی از بخش های شهرستان سمیرم به نام گُمِه و در جنوب شهرضا واقع شده و از نوع غار های طبیعی و آهکی اسید ساخته است. دهانه ی غار با ارتفاع و عرضی مشابه در حدود ۵ متر به سمت غرب باز شده است. در پشت دیواره های سنگی، آب انباری به ابعاد تقریبی ۹۷ در ۲۳۰ سانتی متر و به گودی ۲ متر در کف غار احداث شده است که با چند لایه ساروج بسیار تمیز و خوب اندود کاری شده و امروزه هم می توان از آن استفاده کرد. در سمت راست انبار، اتاقی قرار دارد که دارای ۵ متر طول و ۲/۴۰ متر عرض و تقریباً به حالت نیم استوانه است. بر لبه راست دهانه غار بخش دیگری از غار قرار دارد که برای رسیدن به آن باید از یک دیوار سنگی بالا رفت. اندازه تالار سنگی ۴/۱ در ۵/۵ متر و اتاق های دیگر یکی ۲/۲۵ در ۲/۵۶ و دیگری ۱/۵۰ در ۱/۶۴ متر و بلندی آن ۲ متر است. طول این غار ۹۵ متر می باشد [۸۵].

۲-۶- غارهای واقع در استان ایلام

استان ایلام در غرب کشور و در ناحیه ای کوهستانی و نیمه گرم قرار گرفته است. استان ایلام از غرب با کشور عراق هم مرز است. ایلام استانی نفت خیز بوده و دارای پالایشگاه گاز نیز می باشد. این استان ۱۱ درصد منابع گاز ایران را داراست و روزانه ۱۵۴ هزار بشکه نفت خام از چاه های نفتی دهلران استخراج و با لوله به پالایشگاه های جنوب کشور منتقل می شود. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۶-۱- غار زینه گان (غار بهشت ایلام)

غار زینه گان در پنج کیلومتری جنوب شرقی صالح آباد و در فاصله ۲۵ کیلومتری شهر ایلام قرار دارد. این غار که بیش از یک کیلومتر طول دارد از نوع غارهای طبیعی و آهکی می باشد. غار زنگینه دارای آب فراوان، دهلیزهای آب گیر و قندیل های متعددی است. هوای داخل غار بسیار سرد و مطبوع است در حالی که صالح آباد در منطقه ای گرم قرار دارد. اختلاف هوای بیرون غار با درون آن تقریباً ۵۰ درجه است و به همین دلیل آن را غار بهشت می نامند. این غار یکی از جاذبه های مهم گردشگری استان ایلام می باشد [۴۸].

۲-۶-۲- غار طلسم

غار طلسم در ضلع شرقی دهستان سراب ایوان در بالای کوه مانشت، قرار دارد. این غار، طبیعی و از نوع غارهای آهکی اسید ساخته است. در سقف این غار تعداد زیادی استالاگتیت یا چکنده دیده می شود. در عمق ۱۰۰ متری غار یک سه راهی وجود دارد که یکی از دهلیزهای آن دارای ۲۰ متر عمق است. پس از گذشتن از دهلیزی تنگ و باریک تا عمق ۲۰۰ متری، غار به صورت نیم دایره امتداد دارد. از ۲۶۰ متری به بعد عمق داخل مجرا باریک می شود. در این قسمت، داخل غار اندکی ریزش کرده است. جنس سنگ

غار، آهکی و قسمتی از کف آن خاکی و قسمت‌های دیگری از آن نیز سنگی می‌باشد. طول این غار از ورودی تا انتهای آن ۳۰۰ متر است که ۱۰۰ متر اول آن به صورت فضای باز است [۸۵].

۲-۶-۳- غار تایه گه

غار تایه گه در ۲ کیلومتری جنوب غربی روستای وری در میان دره‌ای که به رودخانه جنوب روستا منتهی می‌شود، قرار گرفته و تا مرکز بخش ملک‌شاهی ۱۵ کیلومتر فاصله دارد. این غار، طبیعی و از نوع غارهای آهکی اسید ساخته است. ارتفاع متوسط سقف غار نیز ۳۰ متر می‌باشد. کف غار از شن و سنگ پوشیده شده و استالاکتیت (چکنده) استالاکمیت (چکیده) که از رخسارهای برجسته غارهای آهکی هستند، در کف و سقف آن مشاهده می‌شوند. در فاصله ۱۰ متری ورودی غار استخر آبی قرار دارد که محل جمع شدن سیلاب‌های زمستانی است که معمولاً به داخل غار سرازیر می‌شود. ورودی این غار از تالاری بزرگ شروع می‌شود و انتهای آن کم‌کم باریک شده و به قسمت‌های نامعلومی که هنوز شناسایی نشده‌اند، ختم می‌شود. این غار مربوط به دوران دوم زمین شناسی است. طول دهانه غار ۲۵ متر و پهنای (تالار) آن ۱۲۰ متر می‌باشد [۵۸].

۲-۷- غارهای واقع در استان تهران

استان تهران به مرکزیت شهر تهران، دارای وسعتی در حدود ۱۲,۹۸۱ کیلومتر مربع می‌باشد. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب غربی به استان مرکزی، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود است. استان تهران با بیش از ۱۳ میلیون نفر جمعیت، ۱۹ درصد جمعیت کل کشور را در خود جای داده است. تهران در مناطق کوهستانی دارای آب و هوای معتدل و در دشت، نیمه بیابانی است [۸۶]. پالایشگاه تهران یکی از پالایشگاه‌های بزرگ مصرف کننده نفت خام در ایران است.

این پالایشگاه با مصرف ۲۵۰ هزار بشکه نفت خام در روز یکی از مراکز عمده مصرف در داخل کشور می باشد. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند.

۲-۷-۱- غار یخ مراد

غار یخ مراد در حوالی روستای کهنه ده در منطقه گچسر در جاده چالوس-تهران قرار دارد. فاصله این غار از تهران در حدود ۶۵ کیلومتر است. غار یخ مراد طبیعی و از نوع بادی-یخی است که در اثر فعالیت باد به وجود آمده است. این غار صرفاً به دلیل دارا بودن قندیل های یخی بزرگ قابل توجه است؛ در دهانه ورودی آن، سنگ بزرگی قرار دارد که برای ورود به غار باید آن را دور زد. پس از آن، تالاری در طی مسیر قرار دارد که یک سه راه از آن منشعب می شود. راه اول در سمت راست پس از حدود ۲۰ متر به انتها می رسد. راه میانی پس از ۵۰ متر به لبه پرتگاهی می رسد که برای داخل شدن به آن باید از وسایل فنی کوهنوردی استفاده کرد. راه سوم یا راهروی دست چپ که شاخه اصلی غار است، زیباترین قندیل ها را در ماه های سرد سال داراست. تالار دوم غار در ادامه راهرو قرار دارد. این تالار دو برابر تالار اول است. تالار سوم نیز از نظر طول و عرض کمی بزرگ تر از تالار دوم اما با ارتفاع سقف بسیار بیشتر از تالار دوم است. در پرتگاهی در انتهای این تالار برکه ای یخی و آبخاری از یخ وجود دارد. دهانه ورودی این غار در ارتفاعات کوه های منطقه واقع شده است و مسیر غار عموماً شیب دار و رو به پایین می باشد که نهایتاً با رسیدن به اعماق کوه، چشمه های یخ زده در کف زمین و استالاکتیت های اسفنجی غار قرار دارد. ارتفاع این غار از سطح دریا در حدود ۲۶۴۰ متر می باشد و دهانه این غار سه متر عرض و هشت متر ارتفاع دارد. نکته قابل توجه این غار طبقه ای بودن آن می باشد که در میان غارهای ایران کمتر دیده می شود. در بخشی از غار چهار طبقه با اختلاف ارتفاع بیش از ۳۰ متر دیده می شود. طول این غار از ابتدا تا انتهای آن نزدیک به ۲۵۰ متر می باشد [۸۶] و [۵۸].

۲-۷-۲- غار رودافشان

غار رودافشان در استان تهران در ۱۰۳ کیلومتری شهر تهران و ۶۲ کیلومتری شهر فیروزکوه و در مجاورت روستایی به همین نام واقع شده است. این غار، طبیعی و از نوع غارهای آهکی اسید ساخته است. دهانه غار بسیار وسیع و قوسی شکل است. نخستین تالار عظیم غار به قطر ۱۰۰ در ۸۰ متر و بلندی ۲۵ متر بعد از دهانه قرار دارد و تاقدیس بزرگی است. تالار نخست غار فاقد هر نوع غارسنگی نظیر استالاگمیت و یا استالاگمیت است. پس از تالار نخست، تالار دوم غار واقع است. تالار دوم تاقدیسی به ابعاد ۶۰ در ۵۰ متر و بلندی ۲۰ متر است. تالار سوم هم به ابعاد ۴۰ در ۵۰ متر و بلندی ۱۵ متر بعد از یک برجستگی سه متری قرار دارد. سرتاسر تالار سوم از چکیده های مخروطی دانه انگوری با قطرهای ۴۰ تا ۸۰ سانتی متر و حداکثر بلندی ۱ متر پوشیده شده است. سقف و دیوار این تالار پوشیده از چکنده های گل کلمی و نخودی است. ارتفاع انتهای غار ۱۷۵۰ متری سطح دریا و ۵۰ متر پایین تر از ارتفاع دهانه غار است. طول این غار در مسیر اصلی در حدود ۵۵۰ متر است [۵۸] و [۹۲].

۲-۷-۳- غار بورنیک هرانده

غار بورنیک در حاشیه جنوبی روستای هرانده در ۱۲۰ کیلومتری شرق تهران واقع شده است. این غار در ارتفاعات مشرف به دشت هرانده قرار گرفته و حدود ۱۵۰ متر از سطح دشت، بالاتر است. ارتفاع دهانه غار ۱۹۵۰ متر از سطح دریاست. دهانه غار بورنیک با بیش از ۱۸ متر ارتفاع و ۶۰ متر عرض، یکی از بزرگترین دهانه های غاری ایران است. بورنیک از نظر ساختاری، غاری تکتونیکی است و تالارهای بسیار بزرگ و بلندی دارد. سازنده های آهکی هم در جای جای این غار به چشم می خورد. این غار در زمره مناطق دارای آثار باستانی نیز محسوب می شود هرچند که نشان واضحی از دوران گذشته در آن به چشم نمی خورد [۵۷] و [۷۳].

۲-۸- غارهای واقع در استان چارمحال و بختیاری

استان چهارمحال و بختیاری از جمله مناطق کوهستانی فلات مرکزی ایران محسوب می شود. کوه زردکوه با چهار هزار و ۵۴۸ متری در این استان قرار دارد. این استان با وسعتی در حدود ۱۶,۰۰۰ کیلومتر مربع، بیست و دومین استان کشور محسوب می شود غار مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر است [۸۶].

۲-۸-۱- غار سراب

غار سراب در ۲۱ کیلومتری شمال غربی شهر فارسان و ۶ کیلومتری شهر باباحیدر در مجاورت روستای امیدآباد قرار دارد. برای وارد شدن به غار باید از باریک راهی به موازات دره ای که آبی در بستر آن جاری است به طرف سرچشمه عبور کرد. سرچشمه ای که از آن آب سرد خارج می شود در حقیقت دهانه دیگر غار سراب است. این غار به یک تالار منتهی می شود که ارتفاع کف غار تا سقف گاه تا ۱۵ متر می رسد. پس از دالان، غار به دو راهرو اصلی تقسیم می گردد که هر کدام از این راهروها خود به شاخه ها و حفره های دیگری منتهی می گردند. در حال حاضر بیش از ۶۰۰ متر از این دو دهانه قابل دسترسی نیست. از یکی از دهانه های غار، آب سرد خروشان بیرون می آید که در بستر غار به صورت چشمه آب سردی جاری است. این آب وارد دره ای که در پایین دست غار قرار دارد می شود [۸۶] و [۵۸].

۲-۹- غارهای واقع در استان های خراسان

استان خراسان تا سال ۱۳۸۳ بزرگترین استان ایران بود، اما پس از آن به ۳ استان خراسان شمالی، خراسان رضوی و خراسان جنوبی تقسیم شد. اصلاًحاً به مجموع این سه استان استان های خراسان هم گفته می شود. استان های خراسان در حدود یک پنجم مساحت ایران را تشکیل می دهند. این استان ها از

شمال و شمال شرق با جمهوری ترکمنستان و از شرق با کشور افغانستان، همسایه هستند. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان ها به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۹-۱- غار جوجه

غار جوجه در ۲۵ کیلومتری شرق قائن و ۵ کیلومتری جنوب غربی روستای خونیک علیا واقع شده است. این غار بزرگترین غار شناسایی شده در جنوب خراسان است. دهانه این غار در ارتفاع تقریبی ۸۰ متری از کف دره قرار دارد. ابعاد دهانه غار ۲/۳ در ۴ متر است. ارتفاع غار در داخل به ۴۰ متر نیز می رسد. عمق غار صدها متر و عرض متوسط آن نیز ۲۰ متر است [۸۶].

۲-۹-۲- غار خونیک

غار خونیک در ارتفاعات مشرف به شمال شرق روستای خورنیک، در ۲۰ کیلومتری جنوب قائن قرار دارد. این غار دارای دهانه ای در حدود ۲ متر و فضای داخلی به طول ۱/۵ و عرض ۳ متر می باشد. دیواره های آن از سنگ های تورقی تشکیل شده اند که زیبایی ویژه ای به محیط داخلی آن داده اند [۸۶].

۲-۹-۳- غار سلیمان

غار سلیمان، در غرب شهر شیروان، در نزدیکی روستای قشلاق کاوه و در کنار کوه پیکان در استان خراسان رضوی واقع شده است. این غار دارای دهانه وسیع و سقفی از سنگ یکپارچه به طول ۲۵ و عرض ۶ متر است. در انتهای آن سقف و کف غار به هم می رسند. طول این غار ۵۰ متر است و از نوع غارهای خشک بشمار می آید. [۸۶].

۲-۹-۴- غار مزدوران

غار مزدوران یا مزداوند، در ۲ کیلومتری شرق مزداوند - بین شهر سرخس و مشهد - در ارتفاعات چاهک و شورلق واقع شده است. عرض دهانه ورودی آن به ۲ متر و ارتفاع آن به ۲/۵ متر می‌رسد. قدمت این غار به هزاره دوم پیش از میلاد می‌رسد [۶۷].

۲-۹-۵- غار مغان

غار مغان در ۷۵ کیلومتری شهر مشهد و در جنوب روستای مغان واقع شده است. این غار، از جمله غارهای طبیعی و آهکی می‌باشد که در اثر انحلال سنگ بستر آهکی به وسیله جریان آب بوجود آمده است. ارتفاع غار مغان از سطح دریا ۲۹۰۰ متر می‌باشد. درون غار استالاکمیت‌ها، استالاکتیت‌ها و چندین حلقه چاه وجود دارد که عمق یکی از این چاه‌ها ۲۵ متر می‌باشد. در درون غار چشمه آبی نیز وجود دارد. این غار دارای دهلیزها و راه‌های پر پیچ‌وخم زیادی است که در صورت عدم آشنایی با محیط احتمال گم شدن در آن زیاد است [۸۶].

۲-۹-۶- غار کارده

غار کارده، در ۳ کیلومتری روستای کارده و در ۴۸ کیلومتری مشهد قرار دارد. دهانه این غار به صورت یک شکاف سنگی است. عرض آن ۳ متر و طول آن ۱۰۰ متر می‌باشد. این غار از نوع غارهای خشک و دارای پرتگاه‌های خطرناک است [۸۰].

۲-۹-۷- غار کنه گرم

غار کنه گرم، در نزدیکی روستای حسن زو، در ۵۰ کیلومتری غرب بجنورد و در کوه آلاداغ قرار دارد. این غار در منطقه‌ای موسوم به «درخان محمد» به صورت چاهی در دامنه کوه قرار گرفته است. در درون غار نیز ساختارهای استالاکمیتی و استالاکتیتی زیادی دیده می‌شود. طول این غار ۲۵۰ متر و عمق آن ۷۰ متر است [۸۶].

۲-۹-۸- غار چنشت

غار چنشت در دامنه کوهی مشرف به روستای چنشت در دهستان نهارجان بخش مود شهرستان سریشه واقع گردیده است. این غار از نوع غارهای طبیعی و تکتونیکی می باشد که بر اثر زمین لرزه بوجود آمده است. به این ترتیب که زمین لرزه بر روی زمین ایجاد شکاف کرده و سپس در اثر فرسایش غار ایجاد شده است. طول این غار در حدود ۶۰ متر می باشد [۵۸].

۲-۱۰-۱- غارهای واقع در استان زنجان

استان زنجان در شمال غربی فلات مرکزی ایران قرار گرفته است. جمعیت این استان بر اساس آخرین آمار در حدود یک میلیون نفر است. آب و هوای استان زنجان در زمستان بسیار سرد و در تابستان معتدل می باشد. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۱۰-۱-۱- غار گلجیک

غار گلجیک در ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان زنجان در ارتفاعات مشرف به روستای حاج آرش از توابع شهرستان زنجان واقع شده است. این غار از جمله غارهای طبیعی و آهکی می باشد که به طور طبیعی از فرسایش سنگ های آهکی موجود در غار پدید آمده است [۵۱].

۲-۱۰-۲- غار کتله خور

غار کتله خور در استان زنجان، در ۸۰ کیلومتری جنوب خدابنده و ۵ کیلومتری شهر کوچک گرماب واقع شده و راه دسترسی این غار از طریق جاده زنجان - گرماب است. این غار از جمله غارهای آهکی و خشکی-آبی بوده که به طور طبیعی از شسته شدن و فرسایش آهک و حرکات تکتونیکی ایجاد شده است. ابتدای غار تا عمق ۱۵۰ متری شبیه به راسته بازارهای معمولی است. کف این قسمت را لایه ای از خاک و خاکستر پر نموده است. از عمق ۱۵۰ متری تا عمق ۷۰۰ متری گشایش نسبتا زیادی در غار حاصل شده و

شعب متعددی بوجود آمده است. معبر غار پس از عمق ۷۰۰ متری به طول ۶۰ متر تنگتر و سقف آن کوتاهتر گردیده و به آبراه قنات شبیه است. در ضلع شرقی آن برکه آبی به ابعاد ۳۵ متر وجود دارد که دارای آب زلال و گوارا است. این غار دارای سه طبقه خشک است و از طبقه چهارم به بعد آب دار می شود. طبق تحقیقات زمین شناسان چهار طبقه دیگر نیز تا سفره آب زیرزمینی وجود دارد. در سال ۲۰۰۳ میلادی حدود ۳۰ کیلومتر از مسیرهای غار توسط زمین شناسان آلمانی و سوئیسی نقشه برداری شد و از سال ۱۳۷۲ تاکنون تقریباً ۲/۵ کیلومتر آن بصورت رفت و برگشت آماده بازدید شده است. زمان تشکیل این غار حدود ۱۲۰ میلیون سال پیش می باشد. طول این غار نیز در حدود ۱۰ کیلومتر است [۶۴].

۲-۱۱- غارهای واقع در استان سمنان

استان سمنان از نظر مساحت ششمین استان بزرگ ایران است. این استان با سه استانی که جزء مراکز بزرگ جمعیتی کشور محسوب می شوند همسایه می باشد؛ به طوری که از جنوب با استان اصفهان، از شرق با استان خراسان رضوی و از غرب با استان تهران هم مرز است. این استان دارای کمترین تراکم نسبی جمعیت در کشور است. غار مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر است [۸۶].

۲-۱۱-۱- غار دربند

غار دربند بزرگترین غار استان سمنان است که در دامنه های جنوبی بخش میانی رشته کوه البرز و ۲۱ کیلومتری شمال شهر سمنان و همچنین سه کیلومتری شمال مهدی شهر واقع شده است. این غار به علت عملکرد شدید نیروهای زمین ساختی منطقه و نیز پدیده انحلال توسط آب های نفوذی شکل گرفته است. دهانه ورودی غار دربند به عرض ۲/۷۵ متر و ارتفاع آن ۱/۳۵ متر است. پس از عبور از دهانه غار، دالانی به طول ۲۴ متر و عرض متوسط ۳ متر قرار دارد. این دالان، دهانه غار و تالار غار را به هم متصل می کند.

انتهای دالان به تدریج کوتاه می شود، تا این که به دهانه ای به ارتفاع ۸۰ سانتی متر می رسد، پس از عبور از دهانه مذکور تالار غار پیش رو قرار دارد. وضع داخلی غار نسبتاً ساده و بدون پیچ و خم است. فضای غار به صورت تالار بیضی شکلی به طول ۹۱ متر که عریض ترین قسمت آن ۳۶ متر و بلندترین نقطه سقف آن ۲۰ متر است. ساختمان غار از نظر زمین شناسی مربوط به دوران سوم و از نوع سنگ های رسوبی است که به مقدار فراوان آهک و املاح دارد. در این غار حداکثر ارتفاع سقف از کف در حدود ۳۰ متر می باشد. حجم تقریبی غار در بند ۵۰,۰۰۰ مترمکعب است [۷۶].

۱۲-۲- غارهای واقع در استان فارس

استان فارس در قسمت جنوبی کشور واقع شده و دارای مساحتی در حدود ۱۳۳,۰۰۰ کیلومتر مربع است. شهرستان شیراز که جزء یکی از کلان شهرهای ایران محسوب می شود با جمعیتی در حدود ۱/۷ میلیون نفر بیش از ۳۹ درصد جمعیت استان را در خود جای داده است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۱۲-۲-۱- غار کان گوهر

غار کان گوهر در مسیر جاده ده بید (بندر عباس به سوی سوریان) واقع شده است. دهانه غار به ابعاد ۳۰ در ۲۰ متر و در راس مثلث فرو افتاده ای قرار دارد. غار کان گوهر شامل دو بخش ریزش کرده و طبیعت ساخته می باشد. بعد از ورود به غار، تالاری مدور به شعاع ۳۰ متر قرار دارد. ارتفاع سقف در این محل حدود ۲۰ متر است، سپس وارد تالاری بیضی شکل به قطرهای ۴۰ در ۱۸۰ متر می شود که با شیبی ۶۰ درجه به سمت بالا می رود. با عبور از دالانی کوتاه، تالار دیگری به ابعاد ۱۰ در ۱۲ متر قرار دارد، درون این تالار پرتگاهی به بلندی هشت متر دیده می شود و در انتهای آن دهلیزی قرار گرفته است. دهلیز گوشه

تالار آخر، طبیعت ساخته و حدود دوازده متر است و به تالاری به ابعاد ۱۲ در ۱۵ متر وصل می شود. عمق این غار از ابتدای چاه طبیعت ساخته تا انتهای آن در حدود ۲۰۰ متر می باشد [۵۸].

۲-۱۲-۲- غار بلع زار

این غار در شهرستان شیراز، بخش ارژن، دهستان هفت برم کدیان، ۲ کیلومتری شمال روستای بلع زار و در ارتفاع ۲۲۲۵ متر از سطح دریا قرار گرفته است. غار بلع زار، از جمله غارهای غیرآهکی است. سازند سنگی این غار منشا رسوبی دارد. این سازند به صورت متوالی از لایه های آندریت (گچ بدون آب)، گچ مارن (رسوبات سنگ نشده ای متشکل از ۷۰٪ آهک و ۳۰٪ سیلیس)، ماسه سنگ و سنگ آهک تشکیل شده است. از نظر سن زمین شناسی، غار بلع زار به دوره میوسن زیرین تعلق دارد. این غار به دلیل فرسایش آبی به وجود آمده است. به طور دقیق تر می توان گفت که در مسیر یک آبراهه، توده عظیمی از تشکیلات گچساران در امتداد شیب زمین به پایین لغزیده و جلوی آبراهه را سد کرده است. این آبراهه با نفوذ در توده لغزیده مذکور، راه خود را در درون آن باز کرده است [۵۶].

۲-۱۲-۳- غار تادوان

این غار در ۱۲۰ کیلومتری شرق شیراز، در کنار رودخانه قره آغاج واقع شده است. دهانه غار تادوان در ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح رودخانه قره آغاج قرار دارد. ابعاد دهانه این غار در حدود ۲۰ در ۳۰ متر است و درون آن مسیرهای متعددی وجود دارد. پس از عبور از راهروی ورودی و دالانی باریک در سمت چپ، تالار بسیار بزرگی نمایان می شود که طول آن بیش از ۶۰ متر است. عمق یکی از شعبه های این غار که شعبه اصلی آن نیز می باشد، بیش از ۵۰۰ متر بوده و به یک باتلاق منتهی می شود [۵۸] و [۶۰].

۲-۱۲-۴- غار شاپور

غار شاپور در انتهای تنگ چوگان و در چهار کیلومتری شهر بیشاپور (مهمترین پایتخت ساسانیان) در ارتفاع حدود ۸۰۰ متری از سطح زمین اطراف قرار دارد. در دهانه این غار مجسمه شاپور قرار گرفته و به

همین دلیل این غار به نام شاپور معروف شده است. مجسمه شاپور با وجود گذشت ۱۷۰۰ سال همچنان پابرجا بوده و تنها مجسمه باقی مانده از دوران باستان است که حدود ۷ متر ارتفاع دارد. این مجسمه حاصل تراشیده شدن ستون سنگی موجود در غار است. بعد از ورود به غار مساحتی عریض تر از دهانه وجود دارد و هرچه به عمق نزدیک تر می شود، از عرض غار کاسته خواهد شد. این غار دارای طولی در حدود ۷۴۰ متر است [۶۵].

۲-۱۲-۵- غار مظفر سَهَلک

غار مظفر سَهَلک در ۱۸۰ کیلومتری شرق شهرستان داراب و در منطقه تنگه سَهَلک از توابع کوهستانی داراب واقع گردیده است. این غار ۳۳۰ متر عمق دارد و از یک دهلیز اصلی و چندین دهلیز منشعب تشکیل شده است و چندین آبشار و حوضچه زیبا و مجموعه ای از استالاکمیت ها و استالاکتیت های بی نظیر در اندازه ها و طرح های مختلف زیبایی این غار را تکمیل کرده است. غار سَهَلک دارای دو قسمت آبدار و بی آب است. قسمت آبدار غار تاریک بوده و خواجه تاریک نام دارد. اما قسمت بی آب غار روشن می باشد و به خواجه روشن معروف است [۴۷].

۲-۱۳- غارهای واقع در استان قم

استان قم دارای مساحتی حدود ۱۴,۵۰۰ کیلومتر مربع بوده که در حدود یک چهارم از این مساحت شامل مناطق کوهستانی و کوهپایه ای و باقی دشت است. جمعیت استان قم در سال ۱۳۸۵ در حدود یک میلیون نفر بوده است. تنها غار مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر است [۸۶].

۲-۱۳-۱- غار کهک

غار کهک در شرق روستای کهک در نزدیکی دلیجان و حد فاصل استان مرکزی و قم واقع شده است. این غار از جمله غارهای آهکی و طبیعی می باشد. غار کهک مانند چاه عظیمی به قطر ۳۰ متر و با زاویه ۴۵ است. این غار از تعدادی سکوی بزرگ متوالی که هر کدام به وسیله پرتگاهی ۱۰ تا ۲۰ متری از هم جدا می شود تشکیل شده که همه آنها از ابتدا تا انتها زیر تاقدیس مرتفع و عظیم غار قرار گرفته است. طول این غار در حدود ۳۵۰ متر است [۴۶] و [۷۴].

۲-۱۴-۱- غارهای واقع در استان کردستان

استان کردستان با وسعتی در حدود ۲۸۰۰۰ کیلومتر مربع در غرب ایران قرار دارد. این استان که در دامنه ها و دشتهای کوههای زاگرس قرار گرفته و از غرب با کشور عراق هم مرز می باشد. جمعیت استان کردستان بر اساس آخرین سرشماری در سال ۱۳۸۵ در حدود ۱/۵ میلیون نفر بوده است. تنها غار مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر است [۸۶].

۲-۱۴-۱-۱- غار کرفتو

غار کرفتو در ۷۲ کیلومتری شرقی شهرستان سقز و تقریباً با همین فاصله در شمال شهرستان دیوان دره و ۱۲ کیلومتری دهستان کرفتو قرار دارد. اصلی ترین راه دسترسی به آن از طریق جاده تکاب است. ورودی غار از دامنه کوه حدود ۲۵ متر فاصله دارد. این غار آهکی و طبیعی است. طول غار کرفتو در حدود ۷۵۰ متر است و راههای فرعی متعددی از آن منشعب می شوند. معماری این غار صخره ای، چهار طبقه در دل کوه است که از طرف گروه باستان شناسی مستقر در منطقه، طبقه چهارم این غار به تالار آرمیتاژ معروف شده که زیبایی خاصی دارد. سراسر سقف این تالار به صورت بسیار خاصی شکل گرفته و دلیل آن انحلال به صورت ناهمگن در بخش های مختلف سقف است. بر سر درب یکی از اتاق های طبقه سوم کتیبه ای

یونانی وجود دارد. نمونه سفال‌ها و اشیای به دست آمده، ادامه سکونت انسان را در طول دوران تاریخی اشکانی و ساسانی و دوران اسلامی یعنی قرون ششم تا هشتم هجری قمری قطعی می‌سازد [۴۹] و [۸۱].

۲-۱۵- غارهای واقع در استان کرمان

استان کرمان در جنوب شرقی ایران با مساحت در حدود ۱۸۳۰۰۰ کیلومتر مربع بوده و از لحاظ وسعت بزرگ‌ترین و پهناورترین استان کشور به محسوب می‌شود. این استان دارای جمعیتی در حدود ۳ میلیون نفر است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۱۵-۱- چاه دریا

عمیق‌ترین چاه ایران با نام دریا در شهر رفسنجان به عمق ۸۳ متر ثبت شده است. علاوه بر عمق چاه وجود دو تالار بزرگ و دالان‌ها، تونل‌ها، چکنده‌ها و چکیده‌ها به جرات می‌توان گفت که تمامی مشاهداتی که تاکنون در این نوع غارها یافت شده است را می‌توان در این مجموعه مشاهده کرد. تالار اول علاوه بر وجود چند ده استلاگمیت و استلاگتیت بزرگ دارای تونل‌هایی است که گاه بن‌بست و گاه به همدیگر مرتبط می‌باشند. این غار در قسمت جنوب غربی خود به حوضچه آبی زلال و روان ختم می‌شود که به دلیل درصد بالای آهک در آن، غیرقابل شرب می‌باشد. می‌توان تالار اول را با چند طبقه از صفحات سست و به هم مرتبط یکی از تالارهای منحصر به فرد در نوع خود دانست [۸۶].

۲-۱۵-۲- غار ترنگ

غار ترنگ، در مجاورت روستای ترنگ و کوه ترنگ در شهرستان بافت قرار دارد. این غار طولانی‌ترین غار استان کرمان بوده و از نوع غارهای آهکی و طبیعی است که بر اثر نفوذ آب درون گدازه‌های آتشفشانی و در نهایت به دلیل انحلال سنگ بستر، غار تشکیل شده است. دهانه غار حدود ۶ متر است و در ارتفاع تقریباً ۳۰۰۰ متری از سطح دریا واقع شده است. طول مسیر پیمایش شده غار، تقریباً ۵۰۰ متر بوده و

عرض راهروها و تالارهای آن بین ۱ تا ۱۵ متر متغیر است. در انتهای غار، حوضچه آبی نیز وجود دارد. این غار مربوط به دوره پلیستوسن (اوایل کواترنری) می باشد [۵۸].

۲-۱۵-۳- غار ایوب

غار ایوب در شهر بابک و در نزدیکی روستاهای دهج و طزر ج واقع شده است. این غار از نوع غارهای آذرین طبیعی می باشد. آب موجود در زیر گدازه های داسیتی بعد از به هم پیوستن و انفجار، چنین غار عظیمی را بوجود آورده است [۶۸].

۲-۱۶-۱- غارهای واقع در استان کرمانشاه

استان کرمانشاه در غرب ایران واقع شده و دارای وسعتی در حدود ۲۴,۵۰۰ کیلومتر مربع است. این استان از سمت غرب با کشور عراق هم مرز است. جمعیت استان کرمانشاه بنا بر آمار سال ۱۳۸۵ در حدود ۱/۹ میلیون نفر بوده که شهر کرمانشاه با جمعیتی در حدود ۸۰۰ هزار نفر مرکز این استان می باشد. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۱۶-۱-۱- غار پُراو

غار پُراو در جنوب منطقه ای به نام میدان پُراو در شمال شرقی کرمانشاه واقع شده است. ارتفاع دهانه غار پُراو ۳۵۰۰ متر از سطح دریاست و به خاطر این ارتفاع بالا به اورست غارهای جهان معروف است. این غار دارای عمق ۷۵۰ متر، طول ۱۴۵۰ متر و تعداد ۲۶ حلقه چاه می باشد و عمیق ترین چاه آن، دارای ۴۲ متر عمق می باشد. به دلیل قرار گیری این غار در ارتفاع بالا، برودت هوا در آن بسیار بالا است. بدنه و دیوار سنگی داخل غار بسیار خشن و متخلخل است. این غار، بزرگ ترین غار آهکی دنیا و یکی از سخت ترین و خطرناک ترین غارهای جهان است. برای پیمایش این غار نیاز به تجهیزات و وسایل پیشرفته می باشد. دهانه این غار یک سوراخ نسبتاً کوچک است که با شیب تندی به پایین می رود. تا حالا فقط در حدود

هفتاد نفر توانسته اند در این غار مرگ آور بچرخند و متأسفانه سه نفر هم بر سر پیمایش این غار جانشان را از دست داده اند. غار پُراو آهکی و طبیعی است. این غار مربوط به دوران سوم زمین شناسی است [۵۶].

۲-۱۶-۲- غار دواشکفت

غار دواشکفت در شمال شهر کرمانشاه، در دامنه کوه میوله و مشرف به پارک کوهستان قرار دارد و از کهن ترین بقایای سکونت انسان در شهر کرمانشاه است. با توجه به مطالعات باستان شناسی انجام شده این غار در دوران پارینه سنگی میانی (در ۱۲۰ تا ۴۰ هزار سال پیش) محل سکونت انسان بوده است. ارتفاع این غار در حدود ۱۶۰۰ متر از سطح دریاست. یکی از کهن ترین سکونت گاه های بشر در منطقه کرمانشاه غار دواشکفت در نزدیکی تاق بستان است [۵۸].

۲-۱۶-۳- غار قوری قلعه

غار قوری قلعه، بزرگترین غار آبی خاورمیانه است که در استان کرمانشاه قرار دارد. این غار در ۲۵ کیلومتری شهر روانسر و در کنار جاده روانسر-پاوه و مجاور روستایی به همین نام قرار گرفته است. این غار به عنوان یکی از هفت اثر طبیعی ملی ایران، به ثبت رسیده است. ژرفای حوضچه های این غار به ۱۴ متر می رسد همچنین دمای درون غار ۷ تا ۱۱ درجه است و در تمام فصول سال ثابت است. این اثر طبیعی دارای تالارهای زیبا در ۱۴۰۰ متری و ۵۰۰ متری به نام های تالار ریم، تالار کوهان شتر، تالار مسیر برزخ، تالار بلور و تالار عروس است. این غار یکی از زیباترین جاذبه های دیدنی شهرستان روانسر می باشد. غار قوری قلعه به دلیل انحلال گدازه ها بوسیله آب بوجود آمده است. عمق این غار ۱۴۰ متر می باشد [۵۰] و [۷۲].

۲-۱۷- غارهای واقع در استان گلستان

استان گلستان از استان های شمالی ایران است. مرکز این استان گرگان بوده و بر اساس سرشماری سال ۱۳۸۵ دارای جمعیتی بالغ بر ۱/۶ میلیون نفر است. این استان از شمال به جمهوری ترکمنستان، از غرب به استان مازندران و دریای خزر و از جنوب به استان سمنان محدود است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۱۷-۱- غار شیرآباد

غار شیرآباد در ۵۵ کیلومتری شرق گرگان، حد فاصل شهرهای علی آباد کتول و آزادشهر و در ۲۰ کیلومتری جنوب روستای شیرآباد از توابع بخش رامیان قرار گرفته است. ارتفاع این غار ۳۴۵ متر از سطح دریا می باشد. طول این غار در حدود ۲۳۵ متر و قطر دهانه آن نیز ۹ تا ۱۵ متر است. این غار زیستگاه مهمی برای بعضی از گونه ها از جمله سمندر کوهی است. در انتهای غار چشمه ای وجود دارد که منشا ایجاد غار در طی قرون گذشته است. در کف غار نیز آب سردی با دمایی در حدود ۱۰ درجه سانتیگراد جاری است که این آب به رودخانه شیرآباد در دامنه غار می ریزد. محیط بیرونی غار کوهستانی و جنگلی بوده و از درختان و درختچه های متنوعی پوشیده شده است [۵۵].

۲-۱۷-۲- غار کیارام

غار کیارام یا غار وسط دل دل در ۶ کیلومتری ضلع شرقی روستای فرنگ از توابع شهرستان مینودشت قرار گرفته است و در ارتفاع ۷۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. ارتفاع دهانه غار در بلندترین نقطه در حدود ۲۴۰ سانتیمتری و کمترین ارتفاع در انتهای آن حدود ۲۰ سانتیمتری است. عمق غار در حدود ۲۴ متر می باشد. نور کافی در داخل غار وجود دارد که تقریباً تا انتهای آن روشن است. این غار مورد سکونت گروه های شکار و جمع آورندگان غذا بوده است. غار وسط دل دل قدیمی ترین غار مسکونی در شمال کشور محسوب می شود [۵۲].

۲-۱۸- غارهای واقع در استان لرستان

لرستان استانی سراسر کوهستانی بوده و دارای مساحتی در حدود ۲۸۳۰۰ کیلومتر مربع است. جمعیت این استان در سرشماری سال ۱۳۸۵ در حدود ۱/۷ میلیون نفر گزارش شده است. لرستان تنها استان ایران است که به دلیل اهمیت فوق العاده تاریخی یکی از ۴ بخش اصلی موزه ملی ایران را به خود اختصاص داده است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۱۸-۱- غار کَلماکره

غار کَلماکره غاری با اهمیت تاریخی در استان لرستان در غرب ایران است. این غار در شهرستان پلدختر در جنوب استان لرستان واقع شده است. در غار کَلماکره آثار زیادی از ایران باستان به دست آمد که اکثراً از کشور خارج شده است. کاسه های ماهی بادامی این غار بسیار معروف می باشد. گفته می شود که این غار یکی از مهم ترین خزائن دولت های ایران باستان مثل ساسانیان بوده است. اطلاعات بدست آمده از اشیاء منسوب به غار کَلماکره حاکی از آن است که این مجموعه یکی از شش گنجینه بزرگ کشف شده در جهان است. مناظر و نمادهای بسیار بدیع و زیبای غار می تواند از میراث های ارزشمند طبیعی کشور به حساب آید [۸۲] و [۸۴].

۲-۱۸-۲- غار ماهی کور

این غار در شمال دهکده ی لون نزدیک ایستگاه راه آهن تنگ هفت قرار دارد. یک دریاچه زیرزمینی در زیر کوه لون قرار دارد که با عمقی زیاد از سطح زمین به صورت راکد می باشد ولی گاهی در فصل بهار به علت ازدیاد نزولات آسمانی و در نتیجه زیاد شدن آب دریاچه آب های اضافی طغیان کرده و از خروجی غار خارج می شوند. در این غار گونه ای ماهی وجود دارد که فاقد گوش و چشم است و فقط در آب غارها و محل های تاریک زندگی می کنند. این نوع از ماهیان برای تهیه غذا و فرار از خطرات از خطوط جانبی

وشاخک‌های حسی اطراف لب استفاده می‌کنند. ماهی کور از نادرترین گونه‌ی ماهیان جهان است. در دنیا در حدود ۴۰ گونه ماهی فاقد چشم در آب‌های شیرین شناسایی گردیده است [۸۶] و [۵۹].

۲-۱۹- غارهای واقع در استان مازندران

استان مازندران در شمال ایران و در کرانه‌های جنوبی دریای خزر قرار دارد. این استان با مساحت در حدود ۲۴۰۰۰ کیلومتر مربع و $\frac{۲}{۸}$ میلیون نفر جمعیت یکی از پرجمعیت‌ترین مناطق از لحاظ تراکم جمعیتی محسوب می‌شود. استان مازندران، از شمال به دریا خزر، از جنوب به استان‌های تهران محدود شده است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره‌سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۱۹-۱- غار الیاس تنگه

غار الیاس تنگه در استان مازندران، در ۸۵ کیلومتری شمال شرق تهران، ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان آمل و در روستای ییلاقی شاهان دشت واقع شده است. جنس سنگ‌های تشکیل دهنده کوه‌های این منطقه آهکی است. این غار در ارتفاع ۲۲۰۰ متری از سطح دریا واقع شده است. اختلاف ارتفاع دهانه غار و بستر رودخانه چلمه هراز در حدود ۲۰۰ متر است. دهانه بیرونی غار بسیار وسیع و قوسی شکل بوده و دارای عرضی در حدود ۱۵ متر و ارتفاع بیش از ۸ متر است. هوای درون غار مرطوب و دارای خنکی مطلوبی است. دهانه اصلی ورود به غار به دلیل ریزش سنگ به صورت حفره کوچکی درآمده و ورود به غار از میان آن به سختی صورت می‌گیرد. پس از دهانه ورودی، دهلیز تنگ و باریکی به طول ۳۰ متر قبل از دالان متصل به تالار اصلی قرار دارد. ریزش سنگ در گذشته موجب شده عبور از دهلیز به سختی و به طور خمیده میسر گردد. دالان متصل به دهلیز چندین متر طول دارد و به تالار اصلی غار ارتباط دارد. این تالار به ابعاد حدودی ۱۵ در ۲۰ متر و ارتفاع ۳۰ متر است که سقف آن در گذشته ریزش کرده و تخته سنگ‌های بزرگ کف تالار حاصل این ریزش می‌باشند [۵۸].

۲-۱۹-۲- غار اسپهبد خورشید

غار اسپهبد خورشید یا کرکیل دژ بر سر راه تهران به فیروزکوه در ناحیه دوآب شهرستان سواد کوه استان مازندران قرار دارد. این غار بر سینه خطیرکوه قرار داشته و در متون تاریخی به نام طاق عایشه گرگیلی دژ نیز خوانده شده است. طول قوس تاق طبیعی و عظیم غار چهل متر بوده و درون غار بصورت تالاری بیضی شکل به درازای ۷۵، عرض ۲۵ و ارتفاع ۱۵ متر است. در برابر غار دیواری با سنگ و ساروج چیده شده و تا دهانه ورودی آن ادامه دارد. بنای این دیوار به دوره ساسانیان باز می گردد. در مقابل غار پرتگاه مهیبی قرار دارد که ورود به آن را بسیار مشکل می سازد. به دلیل وجود آب آشامیدنی در غار، در گذشته امکان مقاومت به مدت طولانی در آن وجود داشته است [۸۶] و [۵۶].

۲-۱۹-۳- غار هوتو

غار هوتو در نزدیکی شهرستان بهشهر واقع شده است. این غار در دامنه کوه البرز و رو به دریا و در نزدیکی بهشهر قرار گرفته است. این غار و غار کمر بند که در فاصله پنجاه متری غار هوتو قرار دارد، به لحاظ کشف اسکلت انسان با قدمت هفتاد هزار سال معروفیت جهانی دارند. مهمترین این کشفیات اسکلت مادر ۱۶ ساله و نوزاد وی می باشد. این غار در حال حاضر دو ورودی در دو ارتفاع مختلف و یک سوراخ تهویه در سقف دارد [۸۶].

۲-۲۰- غارهای واقع در استان مرکزی

استان مرکزی با مساحتی معادل ۲۹۵۳۰ کیلومتر مربع از شمال به استان های تهران و قزوین، از غرب به استان همدان، از جنوب به استان های لرستان و اصفهان و از شرق به استان های تهران، قم و اصفهان محدود شده است. این استان دارای جمعیتی در حدود ۱/۳ میلیون نفر می باشد. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۸۶].

۲-۲۰-۱- غار چال نخجیر

غار ۷۰ میلیون ساله آبی-خاکی چال نخجیر در شکارگاهی به همین نام در ۸ کیلومتری شمال و شمال غربی شهر نراق در دامنه کوهی واقع شده است. این غار در سال ۱۳۶۸ شناسایی و گروه های کوه نوردی تا عمق ۲۰۰۰ متری آن پیش روی کرده اند. اخیراً نیز غارنوردان موفق شده اند با شناسایی دو مسیر انحرافی به انتهای اصلی غار دست یابند. ارتفاع این غار ۱۰ تا ۲۰ متر است. در انتهای این غار استخر آبی وجود دارد و تالارهای بزرگی نیز در کنار این استخر مشاهده شده است. تا ۶۰۰ متری نخست غار، مسیر مشترک و در امتداد جنوب به شمال است. پس از آن دارای دو انشعاب می شود یکی به سوی شمال شرق و دیگری به شمال غرب امتداد می یابد. طول کل هر کدام از شعب حدود ۱۳۰۰ متر است. سراسر مسیر این غار افقی است. حدود ۹۵٪ از بدنه غار پوشیده از چکنده و چکیده است و فقط ۵٪ باقیمانده سنگی است که این خود بر زیبایی چشم نواز غار می افزاید. غار چال نخجیر از تالارهای گوناگونی تشکیل شده که کوچکترین آن به ۲۰ متر در ۵ متر در ۳ متر و بزرگترین آن به ۱۲۰ متر در ۴۰ متر در ۳۰ متر وسعت دارد. پیش بینی می شود این غار ۸ تا ۱۰ کیلومتر عمق داشته باشد. زیباترین تالار آن، تالار چهل ستون نام دارد که با انواع چکیده و چکنده های گوناگون و رنگ های خیره کننده پوشیده شده است. از دیگر تالارهای این غار می توان تالار سفره عروس، دریاچه، برزخ، باغ وحش، چهل چراغ، آئینه، جانوران و تالار زیبایی ها را نام برد. عامل اصلی و اولیه بوجود آمدن این غار، گسل معکوسی می باشد که در منطقه عمل کرده است. در مرحله بعدی، آب های حاصل از ریزش های جوی خاصیت اسیدی پیدا کرده در شکستگی های سنگ ها نفوذ کرده و با انحلال کربنات کلسیم موجب گسترده تر شدن شکستگی ها شده است [۵۵].

۲-۲۰-۲- غار شاه زند

این غار در ۳۵ کیلومتری جنوب غربی اراک واقع شده است. غار شاه زند از دیرباز محل زیارت زرتشتیان ساکن در نواحی مختلف ایران و مورد احترام و تقدیس آنان بوده است و هر ساله حتی زائران زرتشتی

هندوستان نیز برای زیارت، به این محل می آیند. روی دیوارهای غار، اسامی ایرانی و زرتشتی مانند پولاد تیرانداز و سیاوش شهریار حک شده است. در نزدیکی روستای ایرج، روستایی به نام "گورا" وجود دارد که چندگور با سنگ قبرهای بزرگ هنوز در آن باقی مانده است که مورد احترام زرتشتیان است و ظاهراً این قبرها و یا مدفونین آنها با قداست غار ارتباط دارند. مردم بر این باورند که این گورها یا دلاوران مدفون در آنها به همراهان کی خسرو، قهرمان اسطوره ای داستان های شاهنامه فردوسی تعلق دارند [۸۵].

۲-۲۰-۳- غار شاه بلبل

این غار در کوه های شرقی شهرستان محلات بین خوره و دلیجان واقع شده است. این غار از نظر عقیدتی و مذهبی برای اهالی منطقه مکان مقدسی به شمار می آید. به این منظور برخی از مردم همراه با خانواده نذورات و قربانی های خود را به پیرامون این غار می برند و در آنجا بین نیازمندان تقسیم می کنند. در این غار چشمه کم آبی وجود دارد و اغلب مراجعین یک شبانه روز را در آنجا سپری می کنند [۸۵].

۲-۲۰-۴- غار خان آباد

غار خان آباد در ۴۰ کیلومتری غرب شهر خمین در کمرکش کوهی تقریباً منفرد و کوتاه مشرف بر جاده و نزدیکی آبادی خان آباد قرار دارد. این غار طبیعی و از نوع غارهای چاهی می باشد که بر اثر رسوب گذاری چشمه هایی با آب محتوی بی کربنات کلسیم بالاتر از حد اشباع، ساخته شده است در ایجاد این چاه ها، فرایند زایش از پایین به بالا و عکس فرایند زایش در چاه های طبیعی است. دهانه این غار به ارتفاع ۱۸۰ سانتیمتر و عرض ۱۵۰ سانتیمتر، رو به شمال قرار دارد. طول کلی غار در حدود ۷۰ متر است [۶۶].

۲-۲۰-۵- غار هیزج

غار هیزج در مسیر اراک - همدان در قریه «هیزج»، قرار گرفته و با «قلعه جوق» در حدود ۶ کیلومتر فاصله دارد. این غار از دسته غارهای طبیعی و آهکی به شمار می آید. پس از عبور از دهانه سنگ چین و دیواره کوتاه غار تالاری به طول ۱۲ متر ظاهر می شود و پس از آن این تالار به محوطه وسیعی ختم

می‌شود که یک راه فرعی در گوشه آن و تخته سنگ‌های عظیم ریزشی در قسمت دیگرش دیده می‌شود. غار به شکل دهلیزی ساده و بدنه‌ای تقریباً صاف و سفید با کمترین انحنا تا عمق ۱۵۰ متری ادامه دارد. پس از طی مسافتی پهنای غار قدری کمتر و سقف آن کوتاه‌تر می‌شود. در گوشه تالار، دهانه کوتاه، ولی عریضی است که به دهلیز وسیع و همواری راه دارد [۴۴].

۲-۲۱- غارهای واقع در استان همدان

استان همدان با وسعتی در حدود ۱۹,۵۰۰ کیلومتر مربع، بیست و سومین استان کشور محسوب می‌شود. جمعیت آن بر پایه سرشماری سال ۱۳۸۵ بالغ بر ۱/۷ میلیون نفر بوده است. غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره‌سازی نفت خام در این استان به شرح زیر هستند [۴۵].

۲-۲۱-۱- غار علیصدر

غار علیصدر در نزدیکی شهرستان کبودرآهنگ در ۷۵ کیلومتری شمال غربی شهر همدان واقع شده است. غار علیصدر یکی از زیباترین جلوه‌های طبیعی ایران و جهان و پدیده‌ای منحصر به فرد در نوع خود می‌باشد. آب دریاچه غار بدون رنگ و بو است. پس از ورود به غار، محوطه نسبتاً وسیعی پیش‌رو قرار دارد که رسوبات کربنات کلسیم در سقف و دیوارهای آن، نمایانگر آن است که در گذشته در این محوطه آب وجود داشته است. محل فعلی آب درون غار حدود ۵۰ متر با این محوطه فاصله دارد و سطح آن چندین متر پایین‌تر از آن است. مجرای به عمق ۲ متر از محوطه ورودی تا محل آب کشیده شده است و تا چند ده متر به طرف عمق غار ادامه دارد و مشخص می‌کند که در گذشته برای استفاده از آب غار حفر شده است. سقف غار علیصدر که در پاره‌ای از قسمت‌ها تا حدود ۱۰ متر از سطح آب ارتفاع دارد، پوشیده از رسوبات کربنات کلسیم خالص و مخلوط با عناصر شیمیایی مختلف است که جریان آب از خارج به داخل غار آن را ایجاد کرده است. تمامی کانال‌های این غار هنوز کشف نشده است و گفته می‌شود که در یک یا

دو شبکه آن در حدود ۱۱ کیلومتر پیشروی شده است. غار علی صدر تنها غار تالابی ایران و از معدود غارهای آبی جهان است. زمین شناسان قدمت سنگ‌های این غار را به دوره ژوراسیک از دوران دوم زمین شناسی (۱۹۰-۱۳۶ میلیون سال قبل) نسبت می‌دهند [۵۸] و [۵۵] و [۶۱].

۲-۲۱-۲- غار بگلیجه

غار بگلیجه یا غار برگ‌لیجه در نزدیکی روستای سرخ‌آباد همدان واقع شده و به صورت چاهی است که برای ورود به آن باید از وسایل فنی استفاده کرد و بدون طناب، بازید از این غار میسر نیست. این غار طبیعی و از نوع غارهای چاهی می‌باشد. طول این غار در حدود ۵۰ متر است [۷۵].

۲-۲۱-۳- غار دره فراخ

این غار در شهرستان ملایر و در نزدیکی روستایی به نام «جوزان» قرار دارد. دهانه غار در ارتفاع ۲۲۲۰ متری از سطح دریا به سمت جنوب شرقی است و ابعاد آن ۸۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. در زیر دهانه، گلوگاه کوتاهی است که به دهلیزی به طول ۹ متر باز می‌شود. از سقف آن آب می‌چکد و کف آن پر از گل‌های لغزنده است. یکی دو حفره در کناره‌های دهلیز قرار دارد که کف آن‌ها، خاکی و نسبتاً خشک است [۸۵].

۲-۲۱-۴- غار سردکوه

این غار در شهرستان ملایر و در نزدیکی روستای «سلطان آباد» در ارتفاع ۲۲۴۰ متری سردکوه قرار دارد. دهانه غار ۲/۲۵ متر در ۱/۳۵ متر است که با شیب تندی پایین می‌رود. در انتهای شیب با عبور از مدخلی سنگی دهلیز اصلی غار ظاهر می‌شود. کناره راست دهلیز از طریق یک رف سنگی که تخته سنگ‌های واژگون روی آن فرو ریخته است، به شاخه فوقانی غار اتصال می‌یابد. شاخه فوقانی، دهلیز گشادی است به طول تقریباً ۴۰ متر و با سقفی که از ۳ متر تجاوز نمی‌کند. دهلیز اصلی غار که خمیدگی تندی دارد با انتهای غار ۴/۵ متر اختلاف سطح دارد. میانه غار وسیع و سقف آن بلند است و از معبر چاه ماندی با دو

پله سنگی طبیعی می‌گذرد و به محوطه‌ای می‌رسد که با زاویه تندی به سمت بالا ادامه دارد و کف آن ناهموار است. در کناره چپ این محوطه و به دنبال دهلیز، چند متر جلوتر یک گودال تنگ چاه مانند سر راه وجود دارد که در اثر ریزش تخته سنگ‌ها بر روی هم این راه زیرزمینی به وجود آمده است و دهلیز اصلی غار را تشکیل می‌دهد [۸۵].

۲-۲۱-۵- غار گاماسیاب

این غار در نزدیکی نهاوند و در مجاورت روستای تاریخی «باباقاسم» واقع شده است. دهانه غار همانند شکاف سنگی به عرض ۲ متر و ارتفاع ۸ متر است که در شیبی مشرف به رودخانه قرار دارد. کف غار به علت چکیدن آب از سقف خیس و پر گل و لای است. غار گاماسیاب شامل تالاری با عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۵ متر و دالانی در عمق ۴۰ متری است که به وسیله دهلیزها و راهروها با هم مرتبط می‌شود. در سمت چپ دهانه این غار دو لوحه کوچک و بزرگ در ارتفاع ۳ متری وجود دارد که در سال ۱۳۰۹ هجری قمری به فرمان ناصرالدین شاه قاجار نوشته شده است [۵۴] و [۶۰].

۲-۲۲- جمع‌بندی

پروژه‌ی ذخیره‌سازی نفت خام در درون غارهای طبیعی منجر به یافتن یک فضای زیرزمینی برای ذخیره‌سازی خواهد شد که به صورت طبیعی بوجود آمده و به دلیل خودایستایی نیازمند نگهداری با هزینه پایین است. این بدین معنی است که هزینه‌ی حفر فضا زیرزمینی که یکی از هزینه‌های اصلی احداث مخزن است، حذف می‌شود. بر این اساس برای بررسی غارهای طبیعی و تعیین پتانسیل آنها برای ذخیره‌سازی نفت خام نیازمند دسترسی به فهرستی از غارهای ایران با توجه به مشخصات مختلف آنها از قبیل محل قرارگیری، حجم و دیگر پارامترها وجود داشت. در این فصل غارها به ترتیب و بر اساس استان محل قرارگیری‌شان به صورت کلی معرفی شده‌اند. به این صورت که در ابتدا یک استان معرفی شده و در

گام بعدی، غارهای قابل بررسی برای ذخیره سازی در آن استان بررسی شده اند. ابتدا در جدول ۱-۲ این غارها به همراه مشخصات اصلی شان نشان داده شده اند و سپس در شکل ۱-۲ پراکندگی نسبی این غارها در کشور مشخص شده است.

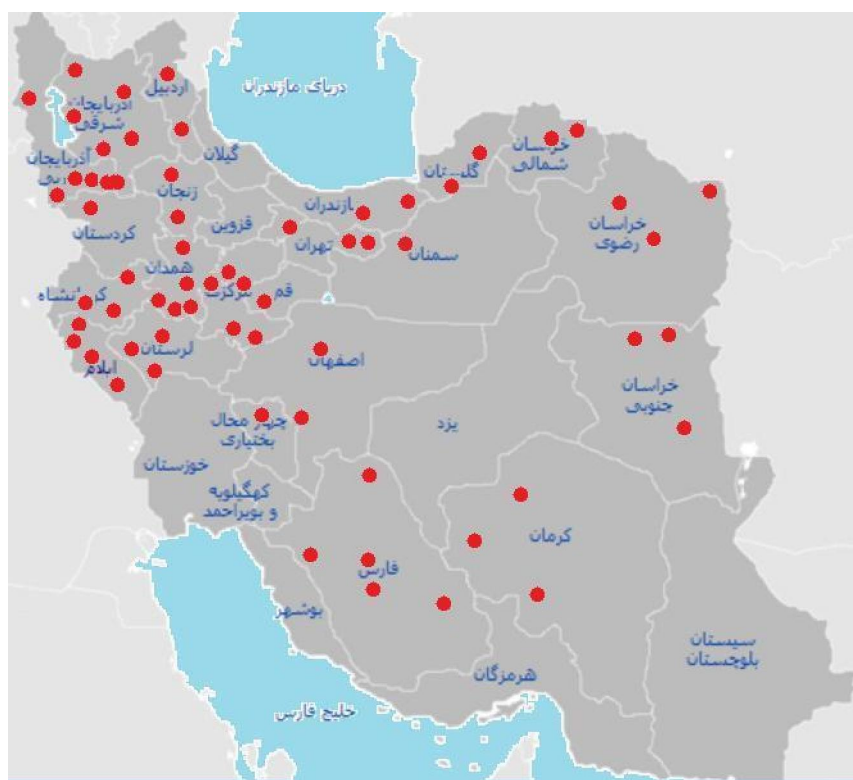
جدول ۱-۲- فهرست غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام بر اساس استان محل قرارگیری

ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره سازی حجم قابل (m^3)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره سازی حجم قابل (m^3)	نوع غار
۱	کبوتر	مراغه	-	آهکی	۱۳	هفت خانه	خلخال	-	آهکی
۲	اسکندر	اهر	-	آهکی	۱۴	یخگان	اردبیل	۸۰۰۰	آهکی
۳	آغ بولاق	بستان آباد	-	آهکی	۱۵	چاه دیو (ارازه)	نطنز	۱۶۰۰۰۰	غیر آهکی
۴	دو گیجان	مرند	-	آهکی	۱۶	قهرمان	اصفهان	۱۳۵	آهکی
۵	قدمگاه	آذرشهر	-	آهکی	۱۷	زنگینه	صالح آباد	-	آهکی
۶	سهولان	بوکان	۱۰۰۰۰۰	آهکی	۱۸	طلسم	ایوان	-	آهکی
۷	قلابچی	بوکان	-	آهکی	۱۹	تایه گه	ملک شاهی	-	آهکی
۸	بورنیک بزرگ	مهاباد	-	آهکی	۲۰	یخ مراد	تهران	۱۵۰۰۰	آهکی و نمکی
۹	بورنیک کوچک	مهاباد	-	آهکی	۲۱	رودافشان	فیروزکوه	۲۵۰۰۰۰	آهکی
۱۰	میرداوود	ارومیه	-	-	۲۲	بورنیک	فیروزکوه	۵۰۰۰۰	آهکی
۱۱	قلاتاسیان	سردشت	-	-	۲۳	سراب	فارسان	-	آهکی
۱۲	چاه زندان	تکاب	۳۰۰۰۰۰	غیر آهکی	۲۴	سلیمان	شیروان	-	آهکی

ادامه جدول ۱-۲- فهرست غارهای مورد بررسی به منظور ذخیره سازی نفت خام

ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m ³)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m ³)	نوع غار
۲۵	مزدوران	سرخس	-	-	۴۰	کپک	قم	-	آهکی
۲۶	جوجه	قائن	۲۰۰۰۰	-	۴۱	کرفتو	سقز	-	آهکی
۲۷	خونیک	قائن	-	-	۴۲	چاه دریا	رفسنجان	-	آهکی
۲۸	مغان	مشهد	۴۵۰۰	آهکی	۴۳	ترنگ	بافت	-	آهکی
۲۹	کارد	مشهد	-	آهکی	۴۴	ایوب	شهربابک	-	غیر آهکی
۳۰	کنه گرم	بجنورد	-	آهکی	۴۵	پُر آو	کرمانشاه	بالای ۳۰۰۰۰	آهکی
۳۱	چنشت	سربیشه	-	آهکی	۴۶	دواشکفت	کرمانشاه	-	-
۳۲	گلیجک	زنجان	۳۰۰۰۰	آهکی	۴۷	قوری قلعه	روانسر	-	-
۳۳	کته خور	گرماب	بالای ۳۰۰۰۰ مترمکعب	آهکی	۴۸	شیرآباد	علی آبادکتول	-	-
۳۴	در بند	مهدیشهر	۵۰۰۰	آهکی	۴۹	کیارام	مینودشت	-	آهکی
۳۵	کان گوهر	صفاشهر	۳۴۰۰۰	آهکی	۵۰	کَلماکره	پلدختر	-	آهکی
۳۶	بلع زار	شیراز	۱۰۰۰۰	غیر آهکی	۵۱	ماهی کور	خرم آباد	-	-
۳۷	تادوان	شیراز	۲۵۰۰۰	-	۵۲	الیاس تنگه	آمل	۷۰۰۰	آهکی
۳۸	شاپور	کازرون	-	آهکی	۵۳	اسپهبد خورشید	سوادکوه	۷۵۰۰۰	-
۳۹	مظفر سَهَلک	داراب	-	آهکی	۵۴	هوتو	بهشهر	-	-

ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره‌سازی (m ³)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره‌سازی (m ³)	نوع غار
۵۵	چال نخجیر	نراق	۶۰۰۰۰	آهکی	۶۰	علی‌صدر	کبودر آهنگ	-	آهکی
۵۶	شاه‌زند	اراک	-	-	۶۱	بگل‌یجه	همدان	-	آهکی
۵۷	شاه‌بلبل	محلات	-	-	۶۲	دره‌فراخ	ملایر	زیر ۱۰۰۰۰ مترمکعب	-
۵۸	خان‌آباد	خمین	-	آهکی	۶۳	سردکوه	ملایر	زیر ۱۰۰۰۰ مترمکعب	-
۵۹	هیزج	هیزج	زیر ۱۰۰۰۰ مترمکعب	آهکی	۶۴	گاماسیاب	نهادند	زیر ۱۰۰۰۰ مترمکعب	-



۵۶

فصل سوم:

تعیین گزینه مستعد بر اساس معیارهای

اولویت بندی مختلف به منظور ذخیره سازی

نفت خام

۳-۱- مقدمه

غارها به دلیل ماهیت طبیعی شان دارای شرایط متفاوتی نسبت به یکدیگر می باشند. به طور مثال یکی از مشخصه های غارهای طبیعی، تنوع زیاد در حجم و همچنین پیچیدگی شکل این گونه سازه ها است. از دیگر خصوصیات غارها که می توان به آن اشاره کرد، وضعیت آب های زیرزمینی در آنهاست. مثلاً غاری مانند علی صدر همدان در داخل خود دارای دریاچه ای از آب است، اما غاری مانند دربند سمنان جزء غارهای خشک ایران محسوب می شود. در فصل قبل فهرستی از غارهای طبیعی قابل بررسی برای تغییر کاربری با هدف ذخیره سازی نفت خام تهیه شده است. در این فصل ابتدا به منظور انتخاب غاری مناسب برای ذخیره سازی نفت خام، معیارهایی با توجه به الزامات ذخیره سازی تدوین شده و سپس بر اساس این معیارها غار و یا غارهای مستعد، اولویت بندی شده و برای بررسی های تکمیلی پیشنهاد می شوند.

۳-۲- تدوین معیارهای اولویت بندی

بر اساس بررسی های انجام گرفته و اطلاعات موجود از غارها چهار معیار تعیین کننده به منظور ارزیابی و انتخاب گزینه مناسب برای ذخیره سازی نفت خام در غارهای طبیعی تعیین شده و در جدول ۳-۱ آورده شده اند. از آنجا که این معیارها نقش اساسی در انتخاب غار مناسب را ایفا می کنند، لذا غار انتخاب شده باید دارای شرایطی قابل قبول از جهات مختلف باشد.

جدول شماره ۳-۱: معیارهای انتخاب غار مناسب

ردیف	معیارهای انتخاب غار مناسب، از نظر ذخیره سازی
۱	قوانین گردشگری و یا زیست محیطی
۲	وضعیت آب های زیرزمینی / وضعیت زمین شناسی
۳	حجم غار
۴	فاصله غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و پالایشگاه های بزرگ کشور

همان‌طور که گفته شد با توجه به نقش اساسی هر یک از معیارهای ذکر شده در جدول ۱-۳، غار مستعد به منظور ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام، باید دارای شرایطی قابل قبول از نقطه نظر کلیه معیارهای مطرح شده باشد. در واقع انتخاب غارهای مناسب در این مرحله به روش حذفی انجام می‌گیرد؛ یعنی اگر غاری فاقد حداقل شرایط لازم برای هر یک از این چهار معیار باشد، حذف می‌شود. در مرحله بعد از بین غارهای باقی‌مانده، بر اساس اولویت‌بندی نسبت به معیارها، غار مناسب انتخاب خواهد شد.

۳-۲-۱- قوانین گردشگری و یا زیست‌محیطی

ارزیابی اثرات زیست محیطی یکی از مناسب‌ترین معیارهای توسعه پایدار و مدیریت محیط زیست در کشورمان به شمار می‌رود. این ارزیابی یک دیدگاه تلفیقی عملیاتی شده و اجرایی به منظور توسعه پایدار است. در این دیدگاه هر نوع فعالیت در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی با یکدیگر مرتبط هستند و این مفهوم به بارزترین نحو و صریح‌ترین شکل در اصل پنجاهم قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران نیز بیان گردیده است. بر این اساس در مرحله اول غارهایی را که جزء مرکز مهم گردشگری بوده و یا از نظر زیست‌محیطی دارای اهمیت زیادی باشند (غارهای آورده شده در جدول ۲-۳)، از فهرست غارهای موجود در جدول ۱-۲ حذف می‌شوند.

جدول ۳-۲- فهرست غارهای مهم از نظر قوانین گردشگری و یا زیست محیطی

ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m ³)	نوع غار
۱	سهولان	بوکان	۱۰۰,۰۰۰	آهکی
۲	زنگینه	صالح آباد	-	آهکی
۳	یخ مراد	تهران	۱۵,۰۰۰	آهکی و نمکی
۴	کتله خور	گرماب	۳۰۰,۰۰۰ بالای	آهکی
۵	شاپور	کازرون	-	آهکی
۶	کرفتو	سقز	-	آهکی
۷	دواشکفت	کرمانشاه	-	-
۸	قوری قلعه	روانسر	-	-
۹	کلماکره	پلدختر	-	آهکی
ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m ³)	نوع غار
۱۰	ماهی کور	خرم آباد	-	-
۱۱	اسپهبد خورشید	سوادکوه	۷۵,۰۰۰	-
۱۲	هوتو	بهشهر	-	-
۱۳	چال نخجیر	نراق	۶۰۰,۰۰۰	آهکی
۱۴	شاهزند	اراک	-	-
۱۵	شاه بلبلی	محلات	-	-
۱۶	علیصدر	کبودر آهنگ	-	آهکی
۱۷	گاماسیاب	نهادند	زیر ۱۰,۰۰۰ مترمکعب	-

۳-۲-۲- وضعیت آبهای زیرزمینی

در مرحله دوم این مطالعه، غارها از نظر وضعیت آب مورد بررسی قرار می گیرند. در این مرحله آن دسته از غارهایی که در آنها آب جاری با دبی بالا وجود دارد و یا بر اساس سیلابهای فصلی آب در آن جاری

می شود به دلیل بالا بودن حجم تخلیه آب مخزن و در نتیجه افزایش هزینه، از فهرست کلی حذف می شوند. غارهای حذف شده در این مرحله در جدول ۳-۳ آورده شده اند.

جدول ۳-۳- فهرست غارهای مورد بررسی از نظر وضعیت آب های زیرزمینی

ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره سازی حجم قابل (m^3)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره سازی حجم قابل (m^3)	نوع غار
۱	تایه گه	ملک شاهی	-	آهکی	۶	ترنگ	بافت	-	آهکی
۲	سراب	فارسان	-	آهکی	۷	ایوب	شهربابک	-	غیر آهکی
۳	تادوان	شیراز	۲۵۰,۰۰۰	-	۸	پُرآو	کرمانشاه	بالای ۳۰۰,۰۰۰	آهکی
۴	مظفر سَهَلک	داراب	-	آهکی	۹	شیرآباد	علی آبادکتول	-	-
۵	چاه دریا	رفسنجان	-	آهکی					

۳-۲-۳- حجم غار

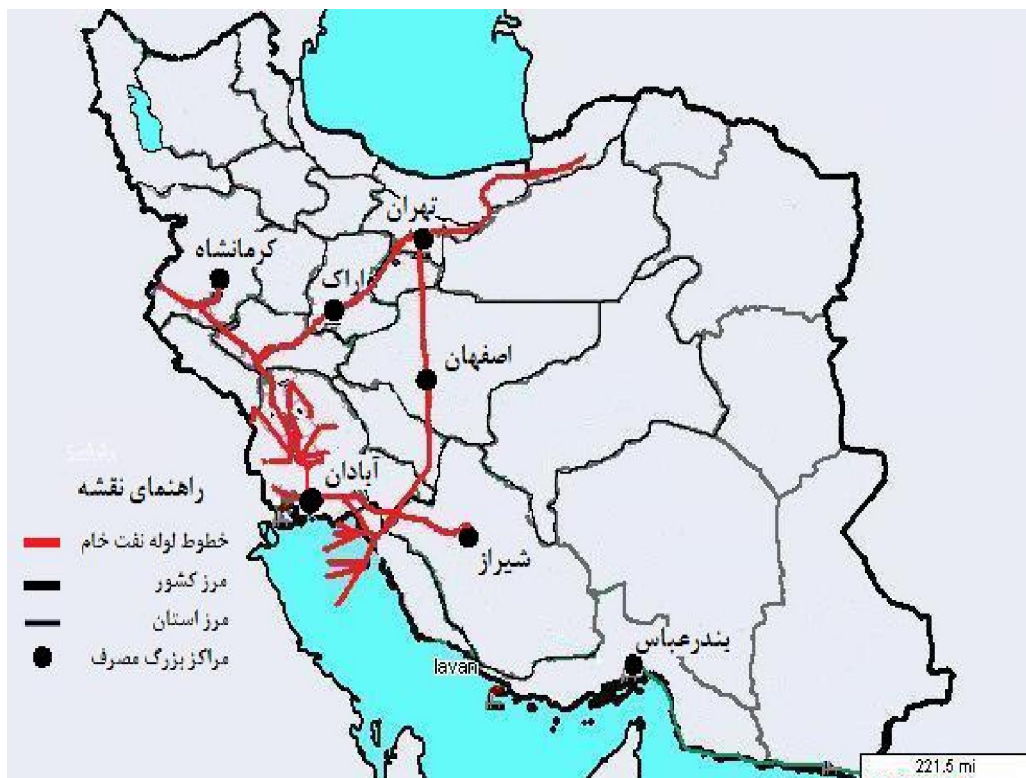
در مرحله سوم، غارها از نظر حجم مورد بررسی قرار می گیرند. واضح است غارهای دارای حجم پایین، برای ذخیره سازی مقرون به صرفه نیستند. در این مرحله نیاز است مبنایی برای حداقل حجم قابل قبول انتخاب شود، تا فرآیند ذخیره سازی که همراه با هزینه هایی از قبیل ایجاد تاسیسات سطحی به منظور پرکردن و تخلیه مخزن است، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. بر این اساس غارهایی که دارای حجمی کمتر از ۱۰,۰۰۰ مترمکعب باشند از فهرست غارهای باقی مانده از مرحله دوم حذف می شوند. غارهای حذف شده در این مرحله در جدول ۳-۴ آورده شده اند.

جدول ۳-۴- فهرست غارهای حذف شده به دلیل پایین بودن حجم

ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m ³)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m ³)	نوع غار
۱	قدمگاه	آذرشهر	-	آهکی	۷	الیاس تنگه	آمل	۷,۰۰۰	آهکی
۲	یخگان	اردبیل	۸,۰۰۰	آهکی	۸	خان آباد	خمین	-	آهکی
۳	قهرمان	اصفهان	۱۳۵	آهکی	۹	هیزج	هیزج	زیر ۱۰,۰۰۰ مترمکعب	آهکی
۴	طلسم	ایوان	-	آهکی	۱۰	بگلیجه	همدان	-	آهکی
۵	بلع زار	شیراز	۱۰,۰۰۰	غیر آهکی	۱۱	دره فراخ	ملایر	زیر ۱۰,۰۰۰ مترمکعب	-
۶	کیارام	مینودشت	-	آهکی	۱۲	سردکوه	ملایر	زیر ۱۰,۰۰۰ مترمکعب	-

۳-۲-۴- فاصله غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و نیز فاصله از پالایشگاه های بزرگ

در گام چهارم این تحقیق، غارها از نظر فاصله از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و نیز فاصله از پالایشگاه های بزرگ کشور مورد بررسی قرار می گیرند. شکل ۳-۱ مسیر خطوط لوله نفت خام کشور و نیز مراکز عمده مصرف نفت خام را نشان می دهد.



شکل ۳-۱- مسیر خطوط لوله نفت خام و نیز مراکز عمده مصرف نفت خام در کشور [۵۴]

به منظور اینکه پروژه ذخیره سازی از نظر اقتصادی توجیه پذیر باشد نیاز است محل غار در فاصله ای مناسب از خطوط لوله انتقال نفت خام قرار داشته باشد. بر این اساس غارهایی که دارای فاصله ای در حدود بیش از ۲۰۰ کیلومتر از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و همچنین دور از مراکز عمده مصرف در داخل کشور هستند، از فهرست غارهای باقی مانده از مرحله سوم حذف می شوند. غارهای حذف شده در این مرحله در جدول ۳-۵ آورده شده اند.

جدول ۳-۵- فهرست غارهای حذف شده به دلیل دوری از خطوط لوله و مراکز مصرف

ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره سازی حجم قابل (m ³)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	ذخیره سازی حجم قابل (m ³)	نوع غار
۱	کبوتر	مراغه	-	آهکی	۱۲	خفاش	دهلران	-	آهکی
۲	اسکندر	اهر	-	آهکی	۱۳	جوجه	قائن	۲۰۰,۰۰۰	-
۳	آغ بلاق	بستان آباد	-	آهکی	۱۴	خونیک	قائن	-	-
۴	دو گیجان	مرند	-	آهکی	۱۵	سلیمان	شیروان	-	آهکی
۵	قلایچی	بوکان	-	آهکی	۱۶	مزدوران	سرخس	-	-
۶	بورنیک بزرگ	مهاباد	-	آهکی	۱۷	مغان	مشهد	۴۵,۰۰۰	آهکی
۷	بورنیک کوچک	مهاباد	-	آهکی	۱۸	کارد	مشهد	-	آهکی
۸	میرداوود	ارومیه	-	-	۱۹	کنه گرم	بجنورد	-	آهکی
۹	قلاتاسیان	سردشت	-	-	۲۰	چنشت	سربیشه	-	آهکی
۱۰	چاه زندان	تکاب	۳۰۰,۰۰۰	غیر آهکی	۲۱	گلیجک	زنجان	۳۰۰,۰۰۰	آهکی
۱۱	هفت خانه	خلخال	-	آهکی	۲۲	بت خانه	کوه دشت	-	آهکی

پس از بررسی غارها بر اساس اطلاعات موجود در مرحله چهارم، گزینه های باقی مانده در جدول ۳-۶ آورده شده اند. بدیهی است برخی از غارهای به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی در جریان مطالعات اولیه حذف شده اند که در صورت امکان تکمیل اطلاعات ممکن است گزینه های قابل قبول در بین آنها یافت شود.

جدول ۳-۶- فهرست غارهای باقی مانده در پایان مرحله چهارم

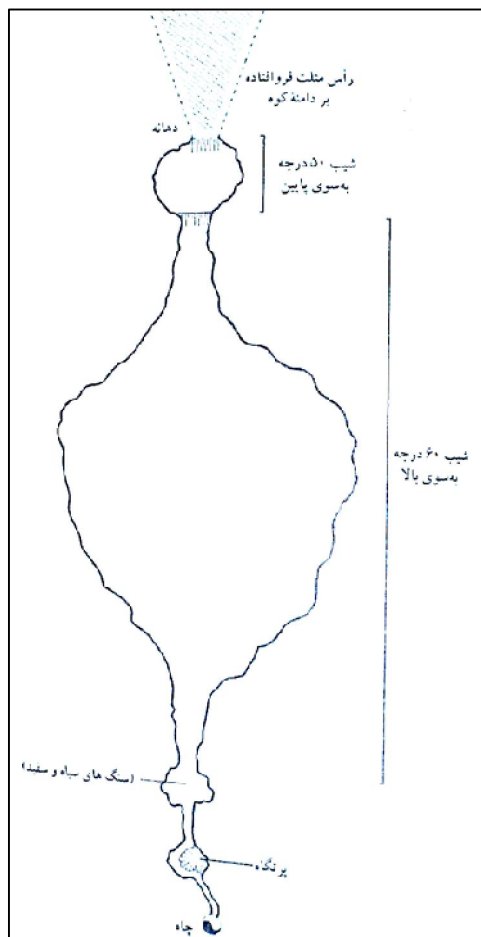
ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m^3)	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره سازی (m^3)	نوع غار
۱	چاه دیو (ارازه)	نطنز	۱۶۰,۰۰۰	غیر آهکی	۴	دربند	مهدیشهر	۵۰,۰۰۰	آهکی
۲	رودافشان	فیروزکوه	۲۵۰,۰۰۰	آهکی	۵	کان گوهر	صفاشهر	۳۴۰,۰۰۰	آهکی
۳	بورنیک	فیروزکوه	۵۰,۰۰۰	آهکی	۶	کپک	قم	-	آهکی

تا این مرحله از بین غارهای مورد بررسی تنها شش غار، شرایط قابل قبول برای هر چهار معیار مطرح شده در جدول ۳-۱ را دارا هستند. در مرحله بعدی بر اساس معیارهای مختلف از بین شش غار باقی مانده، غار مستعد برای ذخیره سازی نفت خام انتخاب خواهد شد.

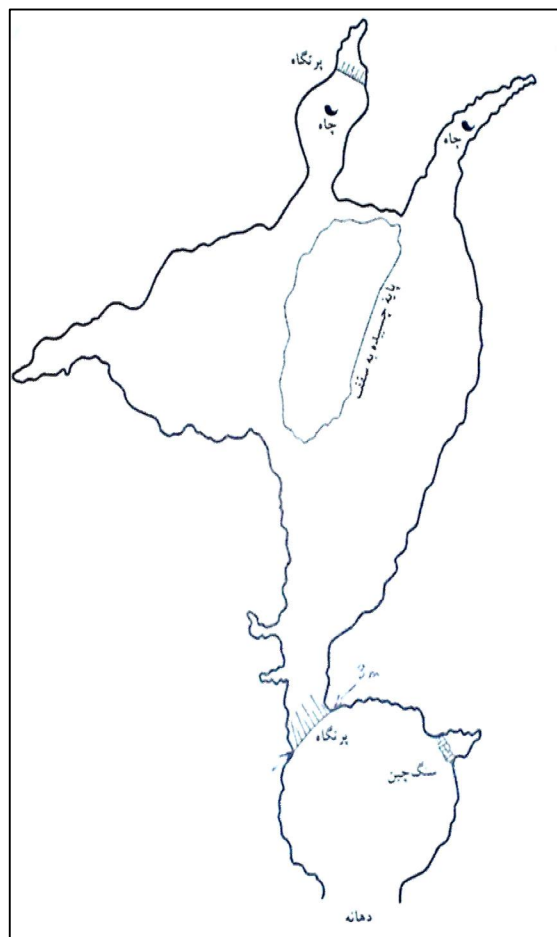
۳-۳- انتخاب غار مستعد از بین گزینه های باقی مانده

در این مرحله برای تعیین غار مستعد به منظور ذخیره سازی نفت خام باید، این شش گزینه آورده شده در جدول ۳-۶ را به صورت نسبی با هم مقایسه کرد. برای این کار ابتدا حجم هر یک از این غارها به صورت تقریبی محاسبه شده، سپس فاصله حدودی این غارها از خطوط اصلی انتقال نفت خام و نیز نزدیکترین مرکز بزرگ مصرف نفت خام در داخل کشور، تعیین شده است. در مرحله بعدی این غارها بر اساس نوع پیچیدگی شکل فضا، در یکی از سه دسته مناسب، متوسط و نامناسب قرار داده شده اند. به منظور درک بهتر، پلان برخی از این شش غار در شکل های ۳-۲ الی ۳-۵ آورده شده است. بر این اساس اگر غاری دارای پیچیدگی هندسی مناسب باشد، برای تصحیح شکل فضا به منظور ذخیره سازی، نیازمند هزینه ی

کمتری نسبت به غاری با پیچیدگی هندسی متوسط و هزینه بسیار پایینتری نسبت به غاری با پیچیدگی هندسی نامناسب می باشد. برای مقایسه راحت تر غارها نسبت به هم، تمامی عملیات این مرحله در جدول ۳-۷ آورده شده است.



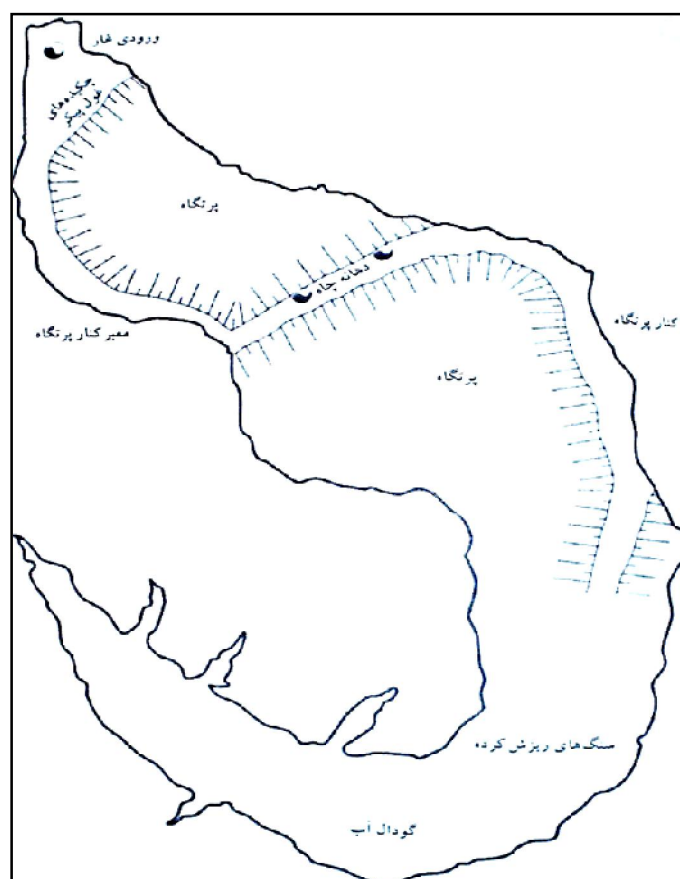
شکل ۳-۳- پلان کلی از غار کان گوهر [۱]



شکل ۳-۲- پلان تقریبی از غار بورنیک [۱]



شکل ۳-۴- پلانی تقریبی از غار رودافشان [۱]



شکل ۳-۵- پلانی تقریبی از غار کهک [۱]

جدول ۳-۷- مقایسه نسبی گزینه های باقی مانده بر اساس معیارهای مختلف

اسم غار	فاصله تقریبی از خطوط لوله (Km)	فاصله تقریبی از مراکز بزرگ مصرف (Km)	حجم تقریبی غار (m ³)	پیچیدگی شکل غار
چاه دیو ارازه	۲۰	۱۵۰	۱۵۰,۰۰۰	مناسب
رودافشان	۶۰	۱۰۰	۲۵۰,۰۰۰	مناسب
بورنیک (هرانده)	۹۰	۱۳۰	۵۰,۰۰۰	متوسط
در بند	۱۹۰	۲۳۰	۵۰,۰۰۰	متوسط
کان گوهر	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰,۰۰۰	نامناسب
کَهک	۵۰	۲۱۰	۱۵۰,۰۰۰	مناسب

بر اساس جدول ۳-۷ به نظر می رسد غار رودافشان، غاری مناسب برای ذخیره سازی نفت خام می باشد، زیرا این غار علی رغم اینکه یکی از غارهای بزرگ در بین شش غار مذکور است، بلکه جزء یکی از غارهای نزدیک به خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و مرکز بزرگ مصرف نفت خام در داخل کشور نیز محسوب می شود. همچنین این غار از نظر پیچیدگی شکل هندسی دارای وضعیت مناسبی است. به این دلایل می توان نتیجه گرفت، غار رودافشان از بین غارهای حاضر، غاری مناسب برای ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام است. در ادامه غار رودافشان به صورت کامل تر، معرفی خواهد شد.

۳-۴- غار رودافشان

۳-۴-۱- راه های ارتباطی

این غار در ۱۰۳ کیلومتری شمال شرق تهران و ۶۲ کیلومتری شهرستان فیروزکوه قرار دارد. در مسیر جاده تهران به فیروزکوه بعد از دوراهی دماوند جاده فرعی آسفالته ای به سمت روستای رودافشان، قرار

دارد. برای دسترسی به دهانه غار، نیاز به کوه‌پیمایی مسیری نسبتاً پرشیب در حدود ۱۵ تا ۲۰ دقیقه است. مسیر دیگری نیز برای رسیدن به این غار وجود دارد که البته کمی دشوار است. این مسیر از روستای ولی‌چای آغاز شده و در امتداد مسیر رودخانه ولی‌چای قرار دارد. شکل ۳-۶ موقعیت غار رودافشان را بر روی نقشه استان تهران نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶- موقعیت غار بر روی نقشه استان تهران

۳-۴-۲- دهانه غار رودافشان

دهانه غار رودافشان در ۳۵ درجه عرضی و ۵۲ درجه شمالی و در ارتفاع ۱۸۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. ارتفاع دهانه غار نسبت به بستر رودخانه ولی‌چای تقریباً ۲۰۰ متر است، ظاهراً دهانه غار و بستر رودخانه هم سطح بوده و در زمان طغیان رودخانه، آب به داخل غار نفوذ می‌کرد و این عامل دلیلی برای افزایش وسعت و ارتفاع دهانه غار بوده است. با گذشت زمان رودخانه بستر خود را فرسایش داده و به ۲۰۰ متر پایین‌تر از سطح غار رسیده و این فرسایش، هنوز هم ادامه دارد. شکل ۳-۷ نمای عمومی دهانه غار بر

روی دامنه کوه را نشان می دهد. دهانه غار رودافشان بسیار وسیع و به شکل دوکی است. طول دهانه این غار ۴۰ متر و ارتفاع آن ۱۲ متر می باشد. اشکال ۳-۸ و ۳-۹ نمایی از دهانه ورودی غار را نشان می دهند.



شکل ۳-۷- نمای عمومی دهانه غار بر روی دامنه کوه

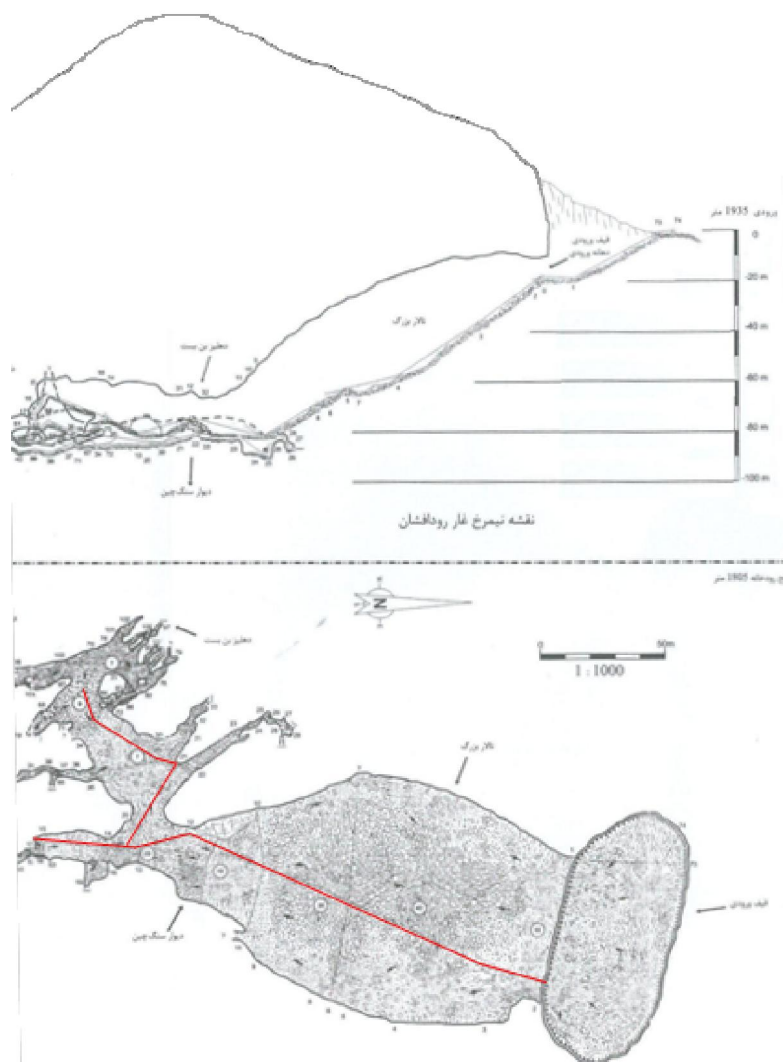


شکل ۳-۸- نمایی از دهانه غار رودافشان



شکل ۳-۹- نمای دیگری از دهانه غار رودافشان

غار رودافشان دارای بزرگترین تالار در میان غارهای ایران است، این تالار به عرض ۵۰ متر و طول ۱۸۰ متر است. این غار دارای ۳ تالار بوده که در ادامه تشریح می شوند. در شکل ۳-۱۰ نقشه و مقطعی از غار رودافشان آورده شده است.



شکل ۳-۱۰- مقطع و پلان غار رودافشان [۱]

۳-۴-۲-۱- تالار اول

در ابتدای ورود به غار رودافشان، اولین تالار غار قرار دارد که از بزرگترین تالارها در غارهای ایران است. این تالار تاق‌دیس بزرگی است که به دلیل استحکام لایه‌های آن، هیچ نشانی از شکستگی در آن دیده نمی‌شود. ابعاد این تالار حدوداً ۸۰ در ۱۰۰ متر و ارتفاع تقریبی آن ۲۵ متر در بلندترین بخش سقف است. هیچ گونه غارسنگی در این تالار وجود ندارد [۷۰].

۳-۴-۲- تالار دوم

پس از تالار اول، تالار دوم قرار دارد. بین تالار اول و دوم دیوار سنگچینی با طول ۸ متر و پهنای ۱/۵ متر قرار دارد که هم اکنون بخشی از آن تخریب شده است. ورودی تالار دوم درگاهی با عرض ۲ متر می باشد. در این قسمت تاقیدیس کوچکی با ارتفاع ۸ متر وجود دارد که ابتدای تالار دوم است. تالار دوم دارای تاقیدسی با ابعاد ۵۰ در ۶۰ متر و ارتفاع تقریبی ۲۰ متر است. در دیواره این تالار، یک شکاف بزرگ وجود دارد که فاقد تزئینات آهکی است [۷۰].

۳-۴-۳- تالار سوم

تالار سوم دارای ابعاد ۵۰ در ۴۰ متر و ارتفاعی در حدود ۱۵ متر است. تزئینات آهکی زیادی در این تالار وجود دارد که روی سقف و دیوار این تالار استالاکتیت گل کلمی و نخودی دیده می شود، تمام تالار پوشیده از استالاکمیت های مخروطی دانه انگوری است. در سمت غربی، دالانی به طول ۱۰ متر وجود دارد که به اتاقی منتهی شده است. دیوارها و سقف این اتاق دارای تزئینات خوشه انگوری، گل کلمی، ستون های سنگی و آبشار سنگ است. شکل ۳-۱۱ یک نمونه از این غار سنگ ها را نشان می دهد. در انتهای تالار سوم راهرویی به عرض ۲ متر و ارتفاع ۶ متر وجود دارد که پس از طی ۵۰ متر، استالاکمیت بزرگی دیده می شود [۷۰].



شکل ۳-۱۱- نمونه از غارسنگ ها در غار رودافشان

۳-۴-۳- اطلاعات هواشناسی منطقه

از نظر ویژگی های آب و هوایی و اقلیمی، این منطقه دارای زمستان بسیار سرد به گونه ای که از سردترین نقاط کشور محسوب می شود و در تابستان معتدل و خنک است. متوسط بارندگی سالانه شهرستان فیروزکوه ۲۰۰ میلیمتر است. [۸۶]

۳-۴-۴- اطلاعات زمین شناسی منطقه

بی شک یکی از پارامترهای اساسی در طراحی و اجرای طرح ها و پروژه های کوچک و بزرگ، بررسی های زمین شناسی است. این امر بدین دلیل مورد اهمیت می باشد که کلیه سازه های مهندسی به نوعی با زمین اطراف خود در ارتباط هستند بنابراین ویژگی های زمین تاثیر مستقیم بر نوع سازه (از نظر شکل سازه، اندازه سازه و جنس مصالح مورد استفاده) خواهد داشت. در این بخش سعی می شود به طور مختصر موقعیت جغرافیایی و شرایط زمین شناسی منطقه مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۴-۴-۱- موقعیت زمین شناسی منطقه

ساختر اصلی در این ناحیه گسل فیروزکوه است که دارای امتداد ۶۰ درجه و شیبی به سمت جنوب شرق است [۵۴]. کوه‌های این منطقه که قسمتی از رشته کوه‌های البرز هستند، از نظر زمین‌شناسی بخشی از قسمت شمالی کوه‌زایی آلپ-هیمالیا در آسیای غربی می‌باشند. رشته کوه‌های البرز با روند تقریباً شرقی‌غربی، طی کوه‌زایی آلپ پایانی، به صورت فعلی درآمده است. این کوه‌ها در ایران از آذربایجان تا خراسان کشیده شده‌اند و از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی به یک برجستگی پرکامبرین در شمال شرق گرگان محدود می‌شوند. از نظر جغرافیایی، آن قسمت از رشته کوه‌های البرز که منطبق بر تحدب جنوبی دریای خزر می‌باشد؛ البرز مرکزی نام دارد. این قسمت از سمنان تا قزوین ادامه دارد. بخش شمالی این ناحیه واحد زمین‌شناسی جداگانه‌ای بوده و به آن ناحیه البرز شمالی و یا گرگان-رشت می‌گویند. و بخش جنوبی آن غالباً با نام البرز مرکزی خوانده می‌شود. گسل بزرگ البرز، مرز شمالی البرز مرکزی با ناحیه گرگان-رشت و گسل سمنان، مرز جنوبی این ناحیه با ایران مرکزی می‌باشد [۳]. البرز مرکزی حاصل یک مرزبندی جغرافیایی است. این منطقه از نظر زمین‌شناسی، مشابه البرز غربی و آذربایجان است و با آنها مجموعاً یک ناحیه تحت عنوان ناحیه البرز-آذربایجان را تشکیل می‌دهند. غار رودافشان در بخش شرقی البرز مرکزی قرار دارد.

۳-۴-۲- گسل مُشا - فشم

گسل مُشا - فشم که جزء گسل‌های البرز است، در دامنه جنوبی البرز و درحد فاصل آبیگ - فیروزکوه - شاهرود قرار دارد. این گسل از نوع راندگی است که دست کم از زمان زمین‌شناسی تریاس تاکنون، بر حوضه رسوبی و به ویژه شکل زمین‌ساخت امروزی البرز اثر در خور توجه‌ای داشته است. گسل مُشا - فشم، راندگی اصلی جنوبی، راندگی میگون - مشاء، راندگی اصلی و گسل آبیگ - فیروزکوه - شاهرود نام‌های متفاوتی است، که به این گسل داده شده است. گسل مورد نظر در حقیقت یک پهنه گسلی به پهنای حدود ۱۰ کیلومتر و طول حدود ۴۰۰ کیلومتر است. این گسل در بخش مرکزی به تدریج خمیده

می‌شود ولی در شرق، روند شرق - غربی دارد. شیب صفحه گسلی، متناسب با نوع سنگ‌های مجاور، بین ۳۵ تا ۷۰ درجه به سمت شمال متغیر است. در حوالی لواسان (شرق تهران)، گسل شمال تهران به این گسل می‌رسد و به صورت واحد، به سمت شرق ادامه می‌یابد (شکل ۳-۱۲). در مورد گسل مُشا - فشم این نکته مورد توجه است که اشتوکلین در سال ۱۹۶۸ میلادی، آخرین حرکت این گسل را به سن زمین‌شناسی پلیوسن - پلیستوسن می‌داند [۳].



شکل ۳-۱۲ - گسل مُشا-فشم (آبیک-فیروزکوه-شاهرود)-گسل شمال تهران و بهم رسیدن این دو در ناحیه لواسان [۳]

۳-۴-۴-۳- سنگ‌شناسی منطقه

شرایط رسوبگذاری در شمال گسل مُشا - فشم عمق بیشتری داشته و رسوبات تورونین به آرامی به سنگ‌آهک‌های میکرایتی متوسط تا سترلایه خاکستری تبدیل شده است، اما در غرب فیروزکوه (منطقه رودافشان)، ضمن کاهش ژرفا، سنگ‌آهک‌های فاقد چرت انتهایی تورونین جای خود را به یک متر ماسه‌سنگ‌آهکی و سپس به سنگ‌آهک‌هایی می‌دهد که در محیط دریایی با شرایط فروکشندی تا نیمه عمیق شکل گرفته‌اند. در جنوب گسل مُشا - فشم، در منطقه سه پایه و دربندک، ضخامتی از رسوبات تخریبی متشکل از ماسه‌سنگ‌آهکی، آهک ماسه‌ای، ماسه‌سنگ و سیلت سنگ، با روندهای تکراری همراه با آثاری مانند موج‌نقش، نقش‌شیار و گاه چینه‌بندی متقاطع همراه با روزنه‌داران پلانکتون و کفزی نهشته

شده که تفکیک آنها از رسوبات تخریبی ساتونین ممکن نیست. سرانجام در اواخر دوره ماستریشیتین، مناطق شمالی گسل مُشا - فشم تحت تأثیر فاز کوهزایی لارامین قرار گرفته و به خشکی تبدیل شده است. آثار این پدیده به صورت دگرشیبی زاویه‌دار آشکاری برجا مانده است، به گونه‌ای که در تخت علی و سیدآباد در زیر کنگلومرای فجن و دربندک و جنوب زره در زیر رسوبات تخریبی دوره پالئوسن - ائوسن قرار گرفته است [۳].

۳-۵- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا غارها با توجه به معیارهایی همچون قوانین گردشگری و یا زیست‌محیطی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، حجم غار و فاصله غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و پالایشگاه‌های بزرگ کشور مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور در هر مرحله اگر غاری فاقد هر کدام از معیارهای مذکور بود و یا آن را به قدر کافی ارضا نمی‌نمود، از لیست غارهای مناسب برای ذخیره‌سازی نفت خام حذف شد. پس از اینکه این کار برای هر چهار معیار انجام گرفت، تنها غارهای دربند، کهک، بورنیک، رودافشان، کان‌گوهر و چاه دیواراز در لیست غارهای قابل بررسی قرار گرفتند که از حداقل‌های لازم برای کلیه معیارهای مذکور برخوردار بودند. سپس در مرحله بعدی، برای تعیین غار مستعد به منظور ذخیره‌سازی نفت خام، این شش غار به صورت نسبی با هم مقایسه شدند. به این منظور برای هر غار حجم تقریبی، فاصله حدودی از خطوط اصلی انتقال نفت خام و فاصله از نزدیکترین مرکز بزرگ مصرف نفت خام در داخل کشور تعیین شده و نیز هر غار بر اساس پیچیدگی شکل فضا دسته‌بندی شدند. در این مرحله از بین غارهای حاضر، غار رودافشان گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام انتخاب و اطلاعات موجود در زمینه ساختار زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه نیز در پایان فصل ارائه شد.

فصل چهارم:

روش‌های تحلیل پایداری فضاها^ی زیرزمینی

و برآورد پارامترهای مورد نیاز توده سنگ

۴-۱- مقدمه

بررسی و تحلیل پایداری یکی از اصول مهندسی مکانیک سنگ در پروژه‌های زیرزمینی و یا هر سازه احداث شده در سنگ است. به این منظور همواره پژوهش‌گران به دنبال دستیابی به روش‌هایی برای بررسی‌های ایمنی و اقتصادی در پروژه‌های عظیم زیرزمینی بوده‌اند و گاهی از روی تجربه نیز اصولی برای بررسی‌های پایداری در سازه‌های زیرزمینی ارائه شده است.

آن چه در این فصل ارائه می‌شود به طور کلی انواع روش‌های بررسی پایداری حفاریات زیرزمینی است. در ادامه توضیحاتی در مورد روش به کار گرفته شده در این تحقیق داده می‌شود.

۴-۲- روش‌های تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی

هدف از تحلیل پایداری آن است که بتوان پیش‌بینی کرد که قسمت‌های مختلف یک سازه از نظر پایداری در کدام یک از رده‌های زیر قرار می‌گیرد [۲۶].

کاملاً پایدار است

نسبتاً پایدار است

ناپایدار است

روش‌هایی که برای ارزیابی و تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی به کار می‌روند به چند دسته کلی تقسیم می‌شوند که در این جا به طور مختصر شرح داده شده‌اند [۲۶].

۴-۲-۱- روش‌های تجربی

این روش‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل آماری پایداری حفاریات زیرزمینی که در نقاط مختلف احداث شده، بنا شده است. روش‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها، از جمله بهترین روش‌های تجربی شناخته شده برای ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی هستند. از جمله شاخص‌ترین شیوه‌های تجربی

بررسی پایداری فضاها و زیرزمینی می‌توان به رده‌بندی ترزاقی، رده‌بندی بر مبنای زمان پابرجایی لوفر، رده‌بندی بر مبنای شاخص کیفیت توده سنگ (Q) ارائه شده توسط بارتن و همکاران در سال ۱۹۷۳، رده‌بندی بر مبنای ساختار سنگ (RSR) که در سال ۱۹۷۲ توسط ویکهام^۱ و همکارانش، رده‌بندی ژئومکانیکی (RMR) که توسط بینیاوسکی در سال ۱۹۷۳، شاخص توده سنگ (RMI) که در سال ۱۹۹۵ توسط پالمستر^۲ و اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI) که توسط هوک و همکارانش در طی سال‌های ۱۹۹۴، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸ معرفی شده است، اشاره کرد [۴۰].

۴-۲-۲- روش‌های مشاهده‌ای

این روش‌ها بر مبنای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و برجا استوار می‌باشند. طراحی تونل‌ها و فضاها و زیرزمینی با روش‌های مشاهده‌ای شامل تفسیر داده‌های رفتار سنجی در مدت ساخت و اجرا است. بنابراین روش طراحی مشاهده‌ای، طراحی همراه با پیشرفت کار می‌باشد. در این روش‌ها تا حدودی از روش‌های تجربی کمک گرفته می‌شود ولی به طور کلی اساس تحلیل و قضاوت مهندسی در مورد نحوه اجرای سازه و سیستم نگهداری بر اساس ابزاربندی و رفتار سنجی سازه مورد نظر است. در این مورد می‌توان روش تونلسازی جدید اتریشی (NATM)، روش همگرایی - همجواری و روش محاسبه مستقیم کرنش (DSET) را نام برد که همه این روش‌ها تأکید بر رفتار سنجی فضای زیرزمینی در طول اجرا دارند [۴۰].

۴-۲-۳- روش‌های تحلیلی

در این روش‌ها از تحلیل تنش‌ها و دگرشکلی‌ها در اطراف تونل استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل تکنیک‌هایی از قبیل جواب‌های فرم بسته و روش‌های عددی می‌باشد. از روش‌های فرم بسته برای تحلیل پایداری فضاها و فضاها که شکل هندسی ساده‌ای همچون دایره یا بیضی دارند، می‌توان استفاده

1 Wickham
2 Palmstrom

نمود. این روش‌ها اکثراً برای حالت‌هایی که در آن رفتار سنگ، الاستیک خطی است، قابل استفاده می‌باشد. به عنوان مثال می‌توان به کاربرد تئوری الاستیسیته و روابط کیریچ^۱ اشاره نمود. اما از آنجایی که فضا‌های زیرزمینی به ندرت دارای شکل هندسی ساده هستند این روش کمتر قابل استفاده می‌باشد.

۴-۲-۴- روش‌های عددی

کاربرد روش‌های عددی در ژئومکانیک را می‌توان به زمان پیدایش روش المان محدود در دهه ۵۰ میلادی نسبت داد. به طوری که این نوع از مدل‌سازی به طور موردی در آن سال‌ها مورد توجه قرار گرفته‌است. با پیدایش کامپیوترهای سریع، کاربرد روش‌های عددی در ژئومکانیک وارد مرحله‌ی تازه‌ای شدند، به طوری که امروزه متناسب با روش‌های متعدد عددی برنامه کامپیوتری مرتبط با آن نیز وجود دارد [۲۷]. پایداری سنگ‌های اطراف یک جبهه کار، به تنش و شرایط ساختاری در توده سنگ و در محدوده چند ده متری مرز فضا‌های زیرزمینی بستگی دارد. تنش‌های موضعی تحت تاثیر عواملی همچون تغییرات تنش، وجود پدیده‌های ساختاری و میزان صدمات ناشی از آتشباری قرار دارد. عموماً سازه‌های زیرزمینی، مجموعه‌ای از حفریات نزدیک به هم می‌باشند که شکل پیچیده‌ای از اشکال سه بعدی را به وجود می‌آورند. به علاوه به علت حضور عوارض زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و توده‌های نفوذی، ویژگی‌های کل توده سنگ بندرت یکنواخت می‌باشد. لذا روش فرم بسته دارای محدودیت در محاسبه تنش‌ها، جابه‌جایی‌ها و گسیختگی‌ها در توده سنگ پیرامون این حفاری‌ها می‌باشد. در چند دهه اخیر روش‌های کامپیوتری بر اساس روش‌های عددی گسترش یافته است. این روش‌ها یک راه حل تقریبی و نزدیک به پاسخ واقعی را ارائه می‌دهند [۳۴].

بر اساس پیوستگی و یا ناپیوستگی محیط توده سنگ، روش‌های عددی تحلیل تنش به دو دسته محیط‌های پیوسته و محیط‌های ناپیوسته تقسیم می‌شوند.

^۱ kirsch

۴-۲-۴-۱ محیط‌های پیوسته

محیط پیوسته، به محیط‌های همگن و همسانگرد و بدون حضور هرگونه ناپیوستگی‌های ساختاری اطلاق می‌شود. در مدل‌سازی این گونه محیط‌ها، توده سنگ به المان‌های ساده هندسی تفکیک می‌شود.

روش‌های تحلیل محیط‌های پیوسته را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

(الف) روش المان‌های محدود (FEM)^۱

(ب) روش المان‌های مرزی (BEM)^۲

(ج) روش تفاضل محدود (FDM)^۳

(د) روش حجم محدود

(ج) روش تفاضل محدود

روش تفاوت (تفاضل) محدود در بسیاری از مسائل مهندسی کاربرد دارد. این روش برای مدل نمودن تغییر مکان‌ها و کرنش‌های بزرگ توده سنگ ابزار مناسبی است. به همین دلیل کاربرد آن در مسائل مهندسی مکانیک سنگ عمومیت دارد. در این روش اصولاً محیط را پیوسته در نظر می‌گیرند. ولی باید توجه نمود که با تمهیداتی می‌توان ناپیوستگی را در آن وارد نمود [۷].

در این روش توده سنگ مورد مطالعه به تعدادی منطقه چهار گوشه تقسیم می‌شود. تعداد و شکل این مناطق دلخواه است. با توجه به معادلات اساسی در مورد هر قلمرو معین، معادلات متفاوت نوشته می‌شود. در مرحله بعد بخشی از توده سنگ در نقاط مرسوم به گره از سایر مناطق جدا می‌گردند، سپس معادلات حرکت گره‌ها برای تمام مناطق نوشته می‌شود. این روش مدل‌سازی عددی شبیه روش المان محدود است و تنها تفاوتی که در این روش با روش المان محدود وجود دارد در حل

^۱ Finite Element Method

^۲ Boundary Element Method

^۳ Finite Difference Method

مسائل به صورت واضح^۱ می باشد. بدین معنی که در بازه زمانی بسیار کوتاه، آشفتگی که بر یک نقطه از شبکه بندی وارد می شود، توسط ناحیه های مجاور آن تحمل می گردد. مفهوم فیزیکی آن بدین معنی است که بازه زمانی خیلی کوچکتر از زمانی است که آشفتگی در محیط گسترش می یابد. ویژگی روش تفاضل محدود در این است که در این روش ماتریسی تشکیل نمی شود، بنابراین زمان پردازش و میزان حافظه کمی تخصیص می یابد. به علاوه مزیت دیگر استفاده از راه حل بدون ماتریس، تحلیل جابه جایی های بسیار بزرگ می باشد [۷]. در عمل این روش با استفاده از پیش پردازشگرها و پس پردازشگرها و توسط تحلیل های پارامتری حوزه تاثیر تنش های تعیین شده و شرایط مرزی خارج از حوزه تاثیر در نظر گرفته می شود. زمان مورد نیاز برای این فرآیند در قبال زمان کل تحلیل قابل صرف نظر کردن می باشد. به صورت کلی می توان گفت روش تفاضل محدود تحلیل را با تقریب ناحیه مورد نظر به صورت شبکه گره هایی که با فاصله یکنواخت از هم قرار گرفته اند شروع می کند. سپس در هر یک از این گره ها هر مشتق را به وسیله معادله دیفرانسیل حاکم توسط عبارت جبری که به نقاط گرهی مجاور مربوط می شود تقریب می زند و در مرحله بعد دستگاه معادلات جبری را با محاسبه عبارت های بالا در هر یک از گره های شبکه به دست می آورد، آنگاه دستگاه معادلات را برای مقدار متغیر وابسته در هر گره حل می کند. از مزایای روش تفاضل محدود می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- به دلیل استفاده از روش حل صریح، تحلیل مساله آسان می گردد که این کار باعث تحلیل گام به گام مکانیزم های شکست احتمالی را فراهم می کند.
- از آنجایی که در این روش حل نیاز به تشکیل ماتریس وجود ندارد، لذا به منظور پردازش و ذخیره سازی اطلاعات نیازمند کامپیوتری با حافظه نچندان بالا دارد.
- امکان تحلیل جابه جایی های بزرگ بدون افزایش قابل توجه زمان حل وجود دارد.
- جزء کارآمدترین روش ها برای محاسبات دینامیکی است.

از نقاط ضعف روش تفاضل محدود نیز می‌توان به این نکته اشاره کرد که اگر از این روش در حل مسائل استاتیکی استفاده شود، ممکن است نیازمند زمان محاسبه بیشتری نسبت به سایر روش‌های عددی باشد [۹۵].

۴-۲-۴ محیط‌های ناپیوسته

در محیط ناپیوسته، سنگ به عنوان یک توده ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود. به طوری که بلوک‌ها می‌توانند به صورت صلب یا تغییر شکل پذیر باشند. یکی از مهمترین روش‌های تحلیل محیط‌های ناپیوسته، روش المان مجزا می‌باشد.

روش المان مجزا^۱

این روش برای مدل‌سازی توده‌سنگ‌هایی استفاده می‌شود که در آنها بلوک‌های گوه‌ای بر اثر برخورد درزه‌ها، وجود داشته باشد، به طوری که به توان آن بلوک‌ها را صلب در نظر گرفت. در چنین شرایطی این قطعات مستقل می‌توانند آزادانه بچرخند و یا تغییر مکان دهند لذا تغییر شکلی که در تماس‌های بلوکی رخ می‌دهد بیشتر از تغییر شکل سنگ بکر است. [۸].

۴-۲-۴-۳ انتخاب مناسب‌ترین روش عددی

هر یک از روش‌های عددی ذکر شده دارای معایب و مزایایی هستند که باید برای هر مورد خاص و برای هدف مطالعاتی مورد نظر، بهترین روش مورد استفاده قرار گیرد. اهمیت شناخت محیط‌های ناپیوسته و پیوسته، تاثیر بسیار زیادی در فرآیند شبیه‌سازی و مدل‌سازی مساله خواهد گذاشت. بر این اساس اگر توده‌سنگ کم درزه و دارای حفاری‌های نسبتاً بزرگی باشد به طوری که تغییر شکل پذیری توده‌سنگ بیش از تغییر شکل پذیری در امتداد درزه‌ها باشد، در چنین حالتی می‌توان مدل را پیوسته فرض نمود و بنابراین فرضیه پیوستگی مناسب خواهد بود. در نتیجه روش تفاضل محدود و روش المان محدود مفید واقع خواهد شد. اما در صورتی که تغییر شکل پذیری در امتداد درزه‌ها بیشتر از

^۱ Discrete Element Method (DEM)

تغییر شکل پذیری درون بلوک باشد، تئوری محیط های ناپیوسته بسیار مناسب خواهد بود [۴۱]. در پروژه مورد مطالعه، به دلیل عدم وجود دسته درزه های متعدد کنترل کننده مکانیسم شکست، باید مدل سازی برای یک محیط پیوسته انجام گیرد. بنابراین نیاز است تحلیل پایداری با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ که بر اساس تفاضل محدود به حل مساله می پردازد انجام شود.

۴-۳- برآورد پارامترهای مورد نیاز در تحلیل عددی

پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل عددی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ عبارتند از: جرم حجمی، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت کششی. چنانچه هر یک از این پارامترها در این نرم افزار تعریف نشود، برنامه مقدار صفر را برای آن منظور می کند. برای محاسبه این پارامترها ابتدا باید چهار پارامتر مقاومت فشاری تک محوره سنگ، شاخص مقاومت زمین شناسی^۱، ثابت ماده سنگ^۲ و درجه آشفستگی توده سنگ را تعیین کرد سپس به وسیله این پارامترها، سایر پارامترهای مورد نیاز بر اساس معیار هوک-براون محاسبه می شود.

۴-۳-۱- تعیین مقاومت فشاری تک محوره^۳ سنگ با استفاده از چکش اشمیت^۴

آزمایش چکش اشمیت را می توان روی سطح ناپیوستگی و یا روی سطح قطعه ای از سنگ بکر برای تعیین مقاومت فشاری تک محوره انجام داد. در این آزمایش یک چکش نوع L (که در آزمایش بتن نیز به کار می رود) به وسیله یک فنر تحت کشش، نیروی مشخصی را بر بخشی از چکش که در مجاورت نمونه قرار داده شده، وارد می کند (انرژی حاصل برابر 0.75 kg.m است). مقدار انرژی که از سنگ به چکش در محل فصل مشترک شان وارد شده با توجه به مقدار واجهش چکش اندازه گیری می شود. این آزمایش را می توان در آزمایشگاه یا به طور برجا (در صحرا) و در همه جهات انجام داد. در این

¹ Geological Strength Index (GSI)

² Intact rock constant

³ Uniaxial Compressive Strength

⁴ Schmidt Hammer

آزمایش سطح مورد بررسی، حداقل در محدوده ای که چکش به کار می رود، باید عاری از ذرات سست و جدا شده باشد. اگر عکس العمل ناشی از برخورد فنر رها شده چکش سطح مورد بررسی را جابجا کند، نتایج به دست آمده کمتر از مقدار واقعی خواهد بود. چنین مواردی را می توان از روی صدای غیر عادی و طبل گونه برخورد چکش تشخیص داد و از نتایج بدست آمده صرف نظر نمود. با توجه به نکات فوق، انجام این آزمایش بر روی سنگ های حاوی ناپیوستگی های با فاصله کم توصیه نمی شود. در چنین مواردی بهتر است قطعه ای از سنگ را جدا کرد و پس از استقرار آن در یک پایه محکم، آزمایش را انجام داد. هر سطح مورد نظر باید چندین بار مورد آزمایش قرار گیرد تا نتایج واقعی تری بدست آید. باید توجه داشت که پس از هر آزمایش، چکش باید به نقطه جدیدی منتقل شده و آزمایش بعدی انجام شود. در هر دسته ۱۰ تایی آزمایش، از پنج قرائتی که کمترین مقادیر را دارند صرف نظر می شود و میانگین پنج قرائت باقیمانده ($\bar{x}$) گزارش می شود [۵]. مقادیر واجهش حاصل از آزمایش چکش اشمیت دامنه ای از ۱۰ تا ۶۰ دارد. اعداد کوچک تر معرف سنگ های ضعیف ($\sigma_c < 20 \text{ MPa}$) و اعداد بزرگ تر نمایش گر سنگ های بسیار محکم ($\sigma_c > 150 \text{ MPa}$) هستند. سنگ های خیلی ضعیف را نمی توان با چکش اشمیت نوع L آزمود.

در شرایط آزمایش مساوی، مقدار واجهش به دست آمده در شرایطی که چکش به طور قائم و رو به پایین به کار می رود (بازتاب در خلاف جهت نیروی گرانش) کمترین مقدار را دارد و در شرایطی که به طور قائم ولی به سمت بالا به کار می رود، بیشترین مقدار را نشان می دهد که باید تصحیح مربوطه بر اساس گراف ارائه شده بر روی چکش اعمال شود.

در جدول ۴-۱ چگونگی انجام این آزمایش آورده شده است.

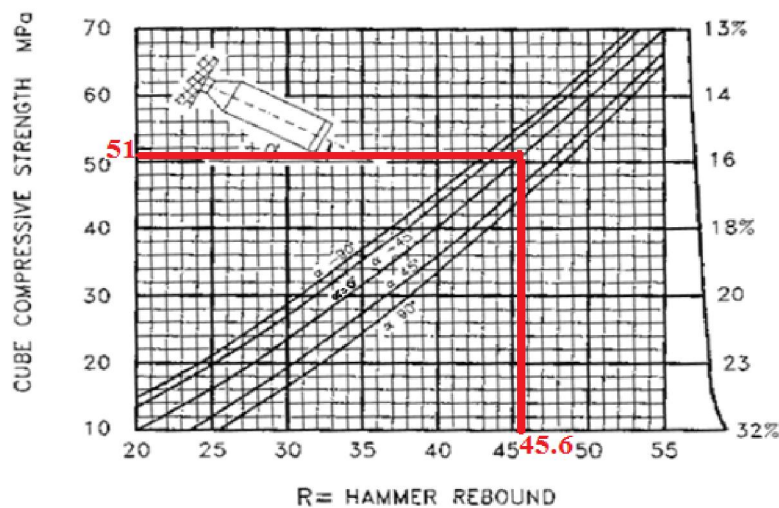
جدول ۱-۴- اعداد قرائت شده توسط چکش اشمیت در حالت افقی چکش

مقادیر برداشت شده										نوع مقادیر
۳۰	۴۶	۲۶	۴۰	۴۲	۳۴	۴۸	۵۲	۲۲	۲۸	مقدار برداشت صحرایی
-	۴۶	-	۴۰	۴۲	-	۴۸	۵۲	-	-	پنج قرائت با ارزش تر از بین ۱۰ قرائت
$I = 228 \div 5 = 45.6$ → تعداد نمونه / مقدار تصحیح شده $I = (\sum)$										عدد واجهش چکش اشمیت (I)

بر اساس جدول ۱-۴ عدد واجهش چکش اشمیت ۴۵/۶ بدست آمده است. حال بر اساس میانگین

مقادیر حاصل از بازتاب چکش اشمیت (I)، مقدار مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از شکل ۱-۴

که برگرفته شده از کاتالوگ چکش اشمیت مورد استفاده می باشد، بدست می آید.



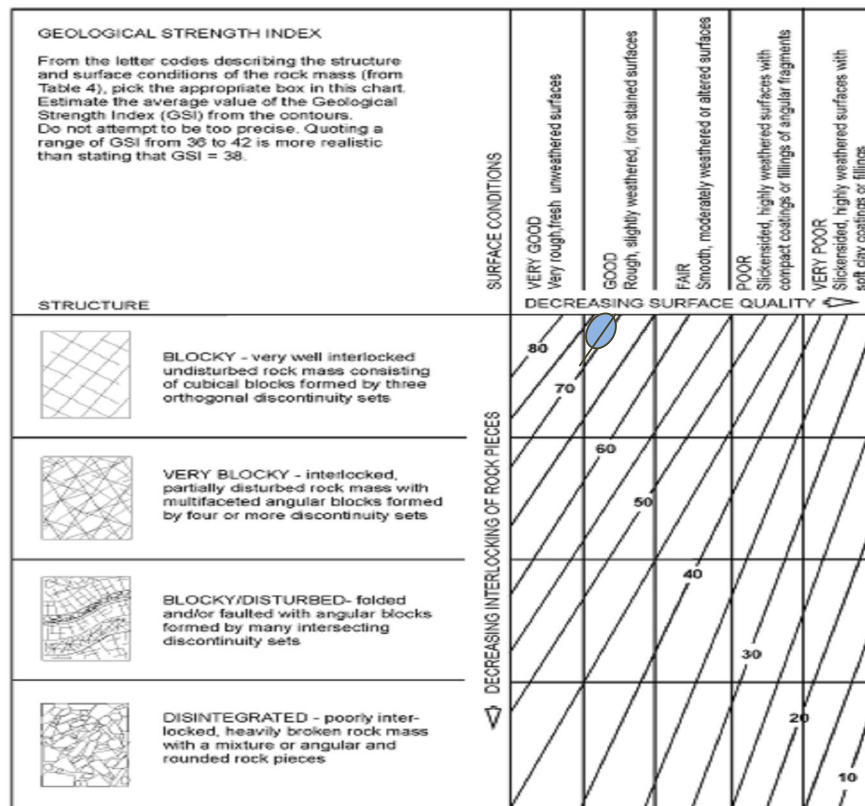
شکل ۱-۴- نمودار همبستگی میان مقاومت فشاری سنگ و عدد واجهش چکش اشمیت (برگرفته شده از کاتالوگ چکش اشمیت مورد استفاده)

بر اساس شکل ۱-۴ مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ در برگیرنده غار رودافشان تقریباً ۵۱ MPa می باشد.

۴-۳-۲- اندیس مقاومت زمین شناسی

اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI) توسط هوک و همکارانش در طی سال های ۱۹۹۴ الی ۱۹۹۸

معرفی شده است [۲۵]. اندیس مقاومت زمین شناسی بر مبنای عوامل ساختار توده سنگ و شرایط سطح درزه استوار است. این دو عامل (ساختار و شرایط سطح درزه ها) بر اساس مشاهدات صحرایی مشخص شده و سپس بوسیله نمودار شکل ۴-۲ مقدار عددی GSI تعیین می شود.



شکل ۴-۲- مقدار GSI برای توده سنگ [۲۵]

بر اساس نتایج حاصل از این بررسی (شکل ۴-۲)، توده سنگ مورد مطالعه دارای مقدار $GSI = 68-74$ بوده و در رده سنگ های بلوکی با شرایط درزه متوسط تا محکم قرار می گیرد.

۴-۳-۳- ثابت ماده سنگ (m_i)

برای تعیین ثابت ماده سنگ از مقادیر پیشنهادی هوک و همکارانش استفاده شده است (جدول ۴-۲).

بر اساس جدول ۴-۲ و همچنین بر اساس بازدید عملی از منطقه، ثابت ماده سنگ برای توده سنگ در

جدول ۴-۲- جدول تعیین ثابت ماده سنگ (m_i) [۲۸]

نوع سنگ	رده	گروه	بافت		
			درشت	متوسط	بسیار ریز
رسوبی	لایه ای		کنگومرا (۲۱±۳)	ماسه سنگ (۱۷±۴)	سیلت ستون (۷±۲)
			برش (۱۹±۵)	-	گریوک (۱۸±۳)
			-	-	مارن (۷±۲)
	غیر لایه ای	کربناتی	سنگ آهک بلوری (۱۲±۳)	سنگ آهک اسپاریتی (۱۰±۲)	سنگ آهک میکربیتی (۹±۲)
		تبخیری	-	ژئیس (۸±۲)	انیدریت (۱۲±۲)
		آلی	-	-	کالک (۷±۲)
دگرگونی	غیر ورقه ای		مرمر (۹±۳)	هورن فلس (۱۹±۴)	کوارزیت (۲۰±۳)
			-	متا سندستون (۱۹±۳)	-
	ورقه ای کم		مگماتیت (۲۹±۳)	آمفیبولیت (۲۶±۶)	-
			گنایس (۲۸±۵)	شیست (۱۲±۳)	فیلیت (۷±۳)
آذرین	آذرین درونی	روشن	گرانیت (۳۲±۳)	دیوریت (۲۵±۵)	-
		تیره	گرانودیوریت (۲۹±۳)		-
			گابرو (۲۷±۳)	دولریت (۱۶±۵)	-
	آذرین میانی		نوریت (۲۰±۵)	-	-
			پورفیریت (۲۰±۵)	-	دیابازالت (۱۵±۵)
			-	-	پریدوریت (۲۵±۵)
	آذرین بیرونی	گدازه	-	ریولیت (۲۵±۵)	دسیت (۲۵±۳)
			-	آندسیت (۲۵±۵)	بازالت (۲۵±۵)
		آذرآواری	اگلومریت (۱۹±۳)	برشا (۱۹±۵)	توف (۱۳±۵)

برگیرنده غار رودافشان برابر با ۷ در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۴- درجه آشفستگی^۱ توده سنگ (D)

ضریب D عاملی است که به درجه آشفستگی توده سنگی که در معرض انفجار و یا رهایی تنش قرار گرفته، بستگی دارد. مقدار D از یک، برای توده های سنگی دست خورده به دلایل حفاری و یا آزادسازی تنش بر اثر برداشتن بیش از حد روباره تا صفر برای توده های سنگی دست نخورده و بکر تغییر می کند. در غار رودافشان به دلیل بکر بودن توده سنگ و عدم تغییر در وضعیت منطقه مورد مطالعه، درجه آشفستگی برابر صفر در نظر گرفته می شود.

۴-۴-۴- برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ

پارامترهای مقاومتی توده سنگ از قبیل، ثابت های هوک- براون، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، از جمله ضروری ترین داده های مورد نیاز در مراحل اولیه طراحی فضا های زیر زمینی می باشند. در این مطالعه به منظور برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ از معیار هوک- براون استفاده شده است. معیار تعمیم یافته هوک- براون به صورت زیر است.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1-4)$$

در معادله ۱-۴، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش های اصلی و فرعی در زمان گسیختگی، σ_{ci} مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر و m_b نیز مقدار کاهش یافته ثابت ماده سنگ (m_i) می باشد. که از رابطه ۲-۴ بدست می آید.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2-4)$$

¹ Degree of Disturbance

برای برآورد مقادیر s و a نیز (ثابت های توده سنگ) به ترتیب از روابط ۴-۶ و ۴-۷ استفاده شده است.

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \rightarrow s = 0.04 \quad (3-4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp\left(\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right] \rightarrow a = 0.5 \quad (4-4)$$

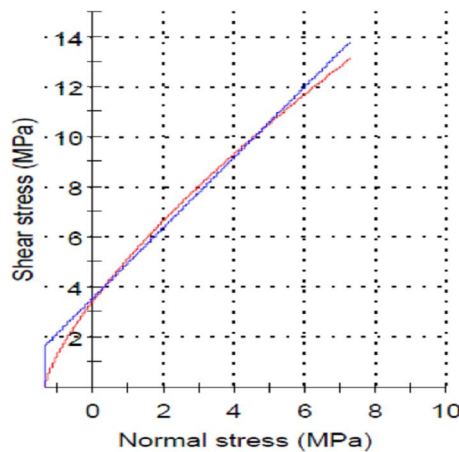
همچنین برای برآورد مدول تغییر شکل توده سنگ (E_m) از رابطه ۴-۵ که توسط هوک و همکاران در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شده است می توان استفاده کرد.

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI - 10}{40}\right)} \quad (5-4)$$

۴-۵-۴- برآورد پارامترهای مقاومتی مور- کلمب

از آنجایی که در اغلب نرم افزارهای ژئوتکنیکی، معیار شکست مور- کلمب مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین برقرارنمودن رابطه ای بین پارامترهای غیر خطی هوک - براون (s و m) و پارامترهای خطی موهر-کلمب (c و ϕ) لازم می باشد. بر این اساس، مشخص گردید که کاربردی ترین راه حل این است که مجموعه ای از آزمون های آزمایشگاهی انجام شده و نتایج حاصل از آنها با استفاده از معیار غیر خطی هوک- براون شبیه سازی شود. سپس تابع مور- کلمب توسط تحلیل رگرسیون خطی بر روی منحنی هوک- براون در محدوده ای از مقادیر تنش های اصلی کوچک (σ_3)، برازش گردد. نمودار تنش های برشی و نرمال (نمودار بین τ_n و σ_n) براساس معیار هوک- براون و معیار برازش شده مور- کلمب، برای توده سنگ اطراف غار رودافشان در شکل ۴-۳ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، نمودار مور- کلمب بر روی نمودار هوک- براون برازش شده است. در نموداری

که بر اساس تنش برشی و تنش نرمال رسم شده است و بر اساس تطبیق (برازش) دو منحنی مقادیر زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و مقاومت چسبندگی (c) با کاربرد معادلات ۴-۶ و ۴-۷ و با استفاده از نرم افزار راکلب^۱ تعیین می شوند.



شکل ۴-۳- نمودار تنش برشی- نرمال و برازش نمودار مور-کلمب بر روی منحنی هوک- براون

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6 \cdot a \cdot m_b (s + m_b \cdot \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6 \cdot a \cdot m_b (s + m_b \cdot \sigma_{3n})^{a-1}} \right] \rightarrow \phi = 46 \quad (4-6)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \cdot \sigma_{3n}] \cdot (s + m_b \cdot \sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \cdot \sqrt{1 + \left\{ \left[(6 \cdot a \cdot m_b) (s + m_b \cdot \sigma_{3n})^{a-1} \right] / [(1+a)(2+a)] \right\}}} \rightarrow C = 1.87 \times 10^6 \quad (4-7)$$

۴-۴-۵- معرفی پارامترها

مقدار $\sigma_{3\max}$ که حد بالایی تنش های محصور کننده (σ_3) است، برای هر مورد خاص باید تعیین و محاسبه گردد. به عبارت دیگر، روابط $\sigma_{3\max}$ برای فضای زیرزمینی و یا دامنه های شیبدار متفاوت است. مقدار $\sigma_{3\max}$ برای فضاهای زیرزمینی که مقدار روباره آنها بیشتر از سه برابر دهانه فضای زیرزمینی باشد از رابطه (۴-۸) محاسبه می شود [۲۴].

¹ Roclab

$$\frac{\sigma_{3 \max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left[\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right]^{-0.94} \quad (۸-۴)$$

در معادله فوق، σ'_{cm} ، مقاومت کلی توده سنگ بوده که توسط رابطه ۹-۴ تعریف شده است، γ وزن مخصوص توده سنگ و H ، ارتفاع روباره می باشد. در مواردی که تنش افقی بیشتر از تنش قائم باشد، مقادیر تنش افقی باید به جای γH جایگزین گردد [۲۴].

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (۹-۴)$$

مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ دربرگیرنده غار رودافشان در جدول ۳-۴ ارائه شده است. بر اساس مطالعه نمونه های مختلف سنگ آهک ضریب پواسون توده سنگ مورد مطالعه ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. مدول بالک (K) و مدول برشی (G) نیز بر اساس فرمول های ۱۰-۴ و ۱۱-۴ بدست می آیند.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۱۰-۴)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۱۱-۴)$$

مقدار زاویه اتساع عموماً از طریق آزمایش سه محوری و یا آزمایش برشی تعیین می شود و این مقدار عموماً کمتر از زاویه اصطکاک داخلی است. برای توده سنگی مشابه توده سنگ مورد مطالعه بر اساس تحقیقات ورمر و دی بورست^۱ در سال ۱۹۸۴ مقدار زاویه اتساع تقریباً بین ۰ تا ۵ درجه است [۲۸]. همچنین بر اساس مطالعه نمونه های مختلف سنگ آهک چگالی توده سنگ مورد مطالعه 2700 kg/m^3 در نظر گرفته شده است.

1 Vermeer and de Borest

جدول ۳-۴- مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ دربرگیرنده غار رودافشان

پارامتر	مقدار
مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	51
اندیس مقاومت زمین شناسی (GSI)	68-74
ثابت ماده سنگ (m_i)	7
عامل درجه آشفته گی توده سنگ (D)	0
مدول الاستیسیته Em(GPa)	23.921
نسبت پواسون ν	0.25
مدول برشی Gm(GPa)	9.57
مدول بالک k(GPa)	15.95
چسبندگی C(MPa)	1.87
زاویه اصطکاک داخلی ϕ (°)	46
زاویه اتساع ψ (°)	3
مقاومت کششی T(Pa)	8.18×10^5
دانسیته γ (kg/m ³)	2700

۴-۵- نتیجه گیری:

در این فصل ابتدا انواع روش‌های تحلیل پایداری حفریات زیرزمینی به طور کلی بیان شد و سپس مناسب‌ترین روش و نرم‌افزار مورد نظر برای تحلیل در پروژه حاضر انتخاب گردید. بر این اساس به منظور تحلیل پایداری غار رودافشان نرم‌افزار ^{3D}FLAC¹ که بر اساس روش تفاضل محدود عمل می‌کند انتخاب شد. سپس پارامترهای ورودی نرم‌افزار با استفاده از معیار هوک-براون انجام گرفت. در فصل بعد بر اساس پارامترهای ذکر شده در جدول ۳-۴ تحلیل پایداری غار رودافشان انجام خواهد شد.

¹ Fast Lagrangian Analysis of Continua

فصل پنجم:

تحلیل پایداری غار رودافشان

۵-۱- مقدمه

در این فصل مدل سازی و تحلیل عددی غار رودافشان، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و به وسیله نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام گرفته است. نحوه کار به این صورت است که پس از مدل سازی محیط دربرگیرنده غار، مدل به تعادل اولیه رسانده می شود و در ادامه تاثیرات ناشی از انباشت و برداشت نفت خام از مخزن و همچنین پایداری غار در شرایط مختلف بارگذاری مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۵-۲- مدل سازی و تحلیل فضاهای زیرزمینی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$

در مدل سازی، ابعاد مدل به اندازه ای در نظر گرفته شده است که محدوده غار تحت اثر مرزها قرار نگیرد. در واقع برای حذف اثر اندازه ابعاد مدل بر روی نتایج حاصل از مدل سازی عددی، ابعاد آن تا جایی که اثر شرایط مرزی بر روی تعادل اولیه مدل از میان برود، گسترش داده شده است. برای در نظر گرفتن رفتار پلاستیک مصالح نیز، از مدل رفتاری موهر- کلمب استفاده شده است. با توجه به اصول مدل سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل سازی به ترتیب زیر صورت گرفته است.

۱. انتخاب محدوده ای مناسب، ترسیم هندسه و شبکه بندی مدل مورد مطالعه

۲. انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

۳. اعمال شرایط مرزی و اولیه

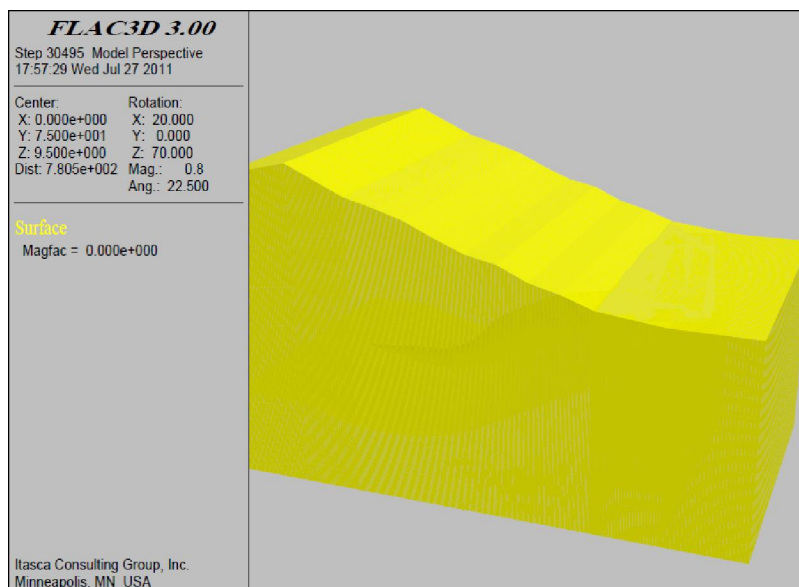
۴. حل مدل و به تعادل رساندن آن

۵. حل مدل در حالت وارد کردن نفت خام به داخل غار و بررسی تغییرات ناشی از آن

۶. حل مدل در حالت برداشت نفت خام از داخل غار و بررسی تغییرات ناشی از آن

۵-۲-۱- انتخاب محدوده‌ی مناسب، ترسیم هندسه و شبکه‌بندی مدل مورد مطالعه

اگر ابعاد مدل حدود ۳ برابر ابعاد غار باشد، تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطا به حداقل ممکن کاهش خواهد یافت. ابعاد مدل ساخته شده با طولی برابر ۲۰۰ متر و عرضی برابر ۳۵۰ متر در نظر گرفته شده است. به دلیل اینکه مدل ساخته شده در نرم‌افزار، به مدل واقعی نزدیک‌تر شود سطح توپوگرافی در بالای غار نیز، مدل‌سازی شده است. شبکه‌بندی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به صورت اتوماتیک انجام شده است. تعداد نواحی مدل و شکل شبکه با توجه به هندسه غار تعیین شده است. شکل ۵-۱ این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱- مدل ایجاد شده در نرم‌افزار

سپس بر اساس نقشه در دسترس از غار و تکمیل آن پس از بازدید میدانی، شکل پیچیده‌ی غار به صورت تقریبی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مدل‌سازی شد. ترتیب مراحل این کار به صورت زیر است:

۵-۲-۱-۱- تصحیح شکل غار رودافشان پس از بازدید میدانی

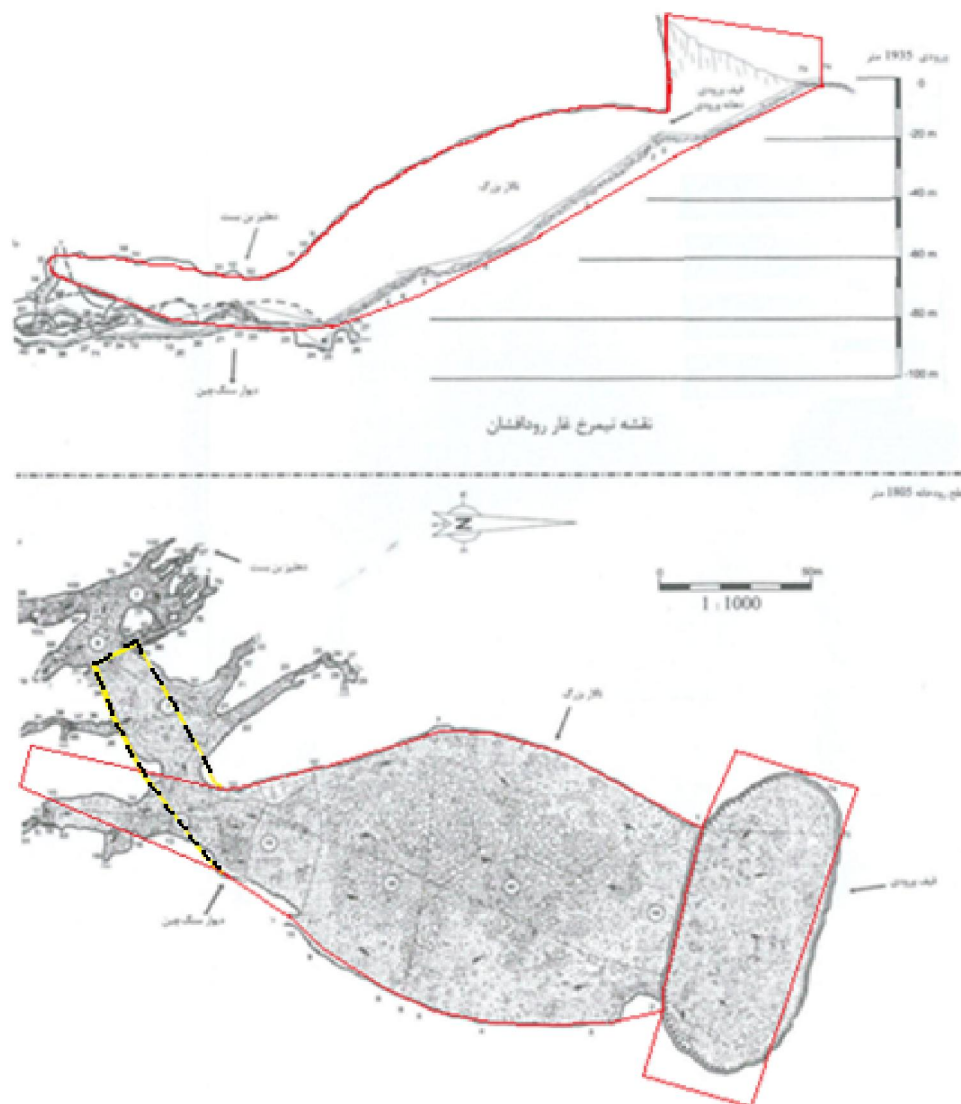
به منظور تصحیح شکل غار رودافشان قبل از مدل‌سازی در نرم‌افزار نیاز است اقدامات زیر صورت پذیرد:

الف: کف غار رودافشان به ضخامتی در حدود یک متر پوشیده از قطعات سنگی با ابعاد مختلف می‌باشد. به منظور تصحیح کف غار نیاز است این سنگ‌ها به همراه ضخامتی از کف که هوازده است، برداشته شود. پیشنهاد می‌شود که قطعات سنگی برداشت شده از کف به قسمت‌های انتهایی غار و در جایی که برای ذخیره‌سازی مناسب نبوده و باید مسدود گردد، انتقال داده شوند؛ تا از آنها به عنوان مصالحی برای پرکردن فضاها استفاده شود.

ب: سنگ‌ها و قندیل‌هایی که بر اثر فرآیند غارزایی به وجود آمده‌اند برداشته شود. از این نوع غارسنگ‌ها می‌توان به استلاگمیت‌ها و استلاگنیت‌های موجود در کف و سقف غار اشاره کرد.

ج: در مرحله سوم قسمت‌هایی از بدنه غار، که به صورت یک برآمدگی نسبت به سایر سطوح اطراف خود جلوتر بوده، باید برداشته شود. همچنین نیاز است در قسمت‌هایی که فضاهایی به صورت یک حفره کوچک بر روی دیواره به وجود آمده با بتن پر شود، به گونه‌ای که پس از پایان این مرحله سطح بدنه غار تقریباً هموار شود.

د: پس از تصحیحات هندسی ذکر شده نیاز است لایه‌ای از بتن پاشیده بر دیواره، کف و سقف غار پاشیده شود تا سطحی هموار بر روی کل بدنه غار به وجود آید. این کار برای نصب پوشش‌هایی که به منظور کنترل نشت در غار قرار داده می‌شود، سطحی هموار را فراهم می‌کند. شکل ۵-۲ شمایی از تصحیح مقطع و پلان غار رودافشان را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲- مقطع و پلان تصحیح شده غار رودافشان [۱]

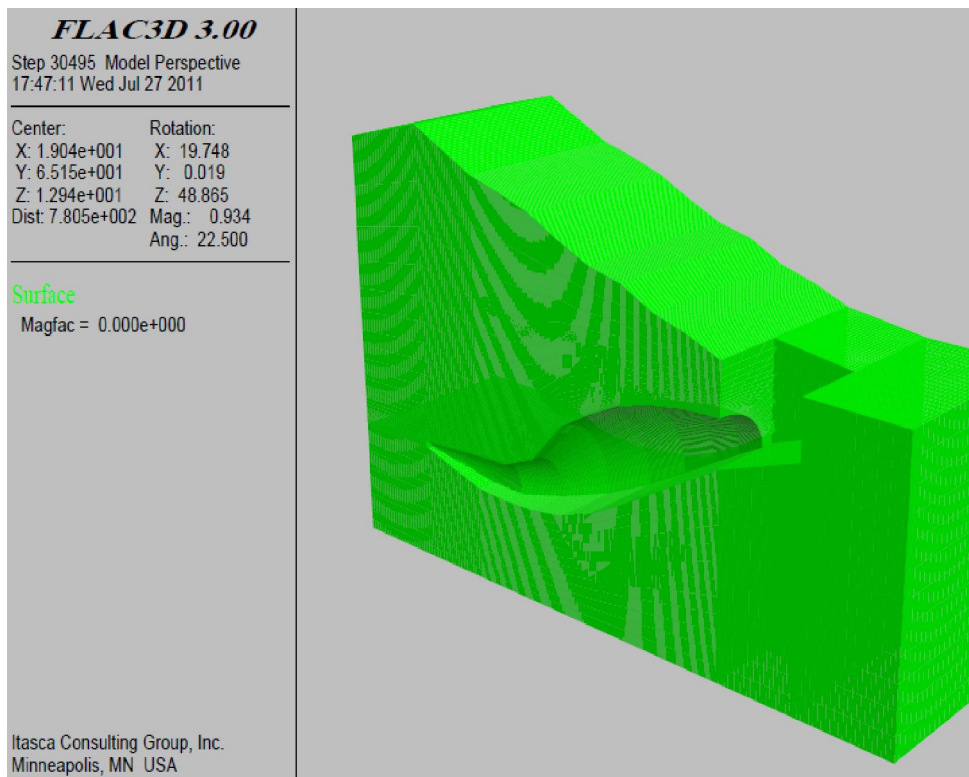
شایان ذکر است به منظور ساده سازی مدل، کل غار با یک محور امتدادی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر قسمت انتهایی غار که در شکل ۵-۲ به صورت خطچین مشخص شده، در نرم افزار $FLAC^{3D}$ هم محور سایر قسمت اصلی غار در نظر گرفته شده است.

۵-۲-۱-۲- تعیین مختصات نقاط با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD

به دلیل پیچیدگی شکل مقطع و هندسه مسأله و عدم امکان ایجاد آن با استفاده از دستورهای موجود در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ نقشه تقریبی غار وارد نرم‌افزار AutoCAD شده تا نقاط رأسی مورد نیاز برای شبکه‌بندی بازیابی شود.

۵-۲-۱-۳- ایجاد شکل مورد نظر در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

پس از برداشت نقاط مرزی از روی نرم‌افزار AutoCAD و کدنویسی آنها در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ که در پیوست ۱ آمده است، شکل پیچیده غار رودافشان ایجاد شده است. برای درک بهتر از نحوه مدل‌سازی غار رودافشان در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مقطعی از مدل ایجاد شده در شکل ۵-۳ آورده شده است.



شکل ۵-۳- مقطعی از مدل ایجاد شده

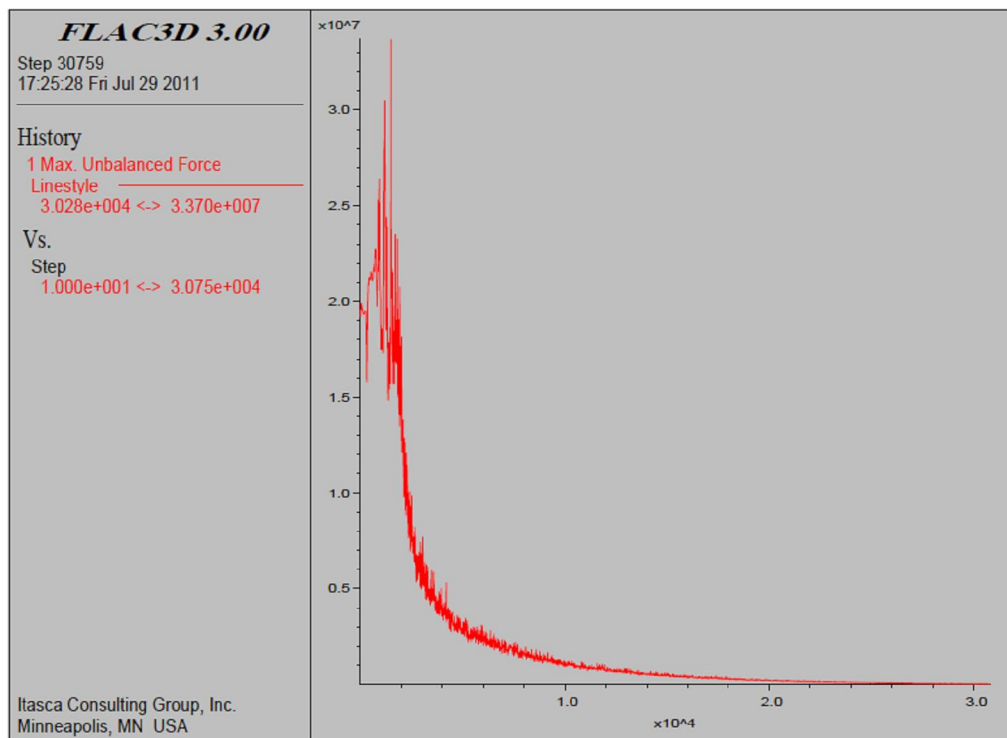
۵-۲-۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

چندین مدل رفتاری در نرم افزار $FLAC^{3D}$ پیش‌بینی شده است که بسته به شرایط مساله می‌توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. یکی از این مدل‌های رفتاری، مدل پلاستیک موهر- کلمب است. این مدل نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند. این مدل رفتاری در مکانیک سنگ، برای حالت پلاستیک، مدل مرسومی است [۲۸]. همانگونه که در فصل قبل نیز بیان شد، پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر- کلمب عبارتند از: جرم حجمی، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت کششی. چنانچه هر یک از این پارامترها تعریف نشوند، برنامه مقدار صفر را برای آن منظور می‌کند.

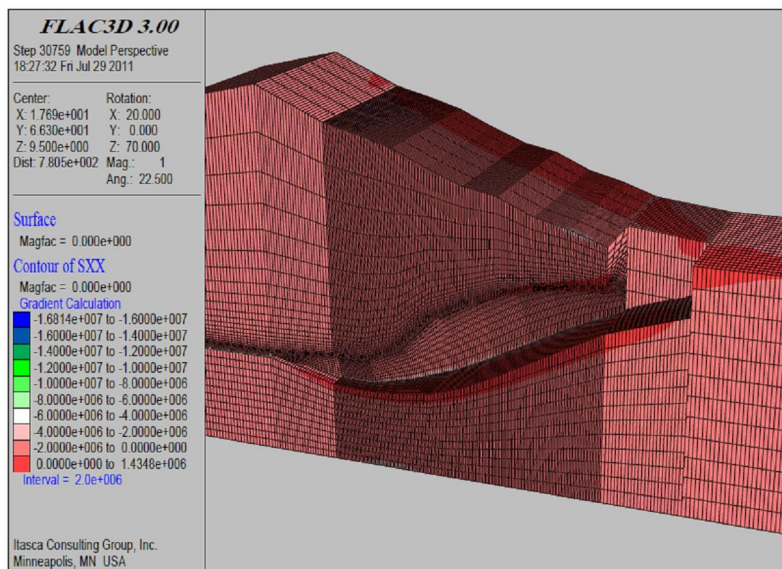
۵-۲-۳- ایجاد شرایط مرزی و به تعادل رساندن نیروهای نامتعادل کننده

گام اول در حل مدل‌های عددی بر این اصل استوار است که فرآیند باید مطابق با روند موجود در طبیعت روی دهد و شرایط مدل نزدیک به واقعیت شبیه‌سازی شود. این عمل برای نشان دادن شرایط تعادل در مدل است. در نتیجه لازم است ابتدا در مدل، خصوصیات ژئومکانیکی شرایط مرزی اعمال شود. نحوه اعمال شرایط مرزی در مدل مورد بررسی طوری است که صفحه پایینی مدل در راستای Z ثابت شده است، اما در راستاهای دیگر امکان جابجایی وجود دارد. در صفحات جانبی مدل نیز در راستای عمود بر صفحات امکان جابجایی وجود ندارد اما در راستای موازی با صفحات جانبی مدل امکان جابجایی وجود خواهد داشت. در گام دوم باید قبل از هر گونه تغییری، مدل تحلیل شود. در این حالت مدل به تعادل اولیه رسیده و شرایط طبیعی زمین را دارا خواهد بود. لذا باید در مرحله بعد جابه‌جائی‌ها در گره‌ها صفر شود تا شرایط موجود در طبیعت بر روی مدل اعمال گردد. برای اطمینان از به تعادل رسیدن مدل تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده در شکل ۵-۴ آورده شده است. در حالت تعادل، نسبت نیروهای نامتعادل باید کمتر از 10^{-5} باشد. با توجه به شکل ۵-۴ نیروهای نامتعادل در نهایت به صفر میل می‌کند.

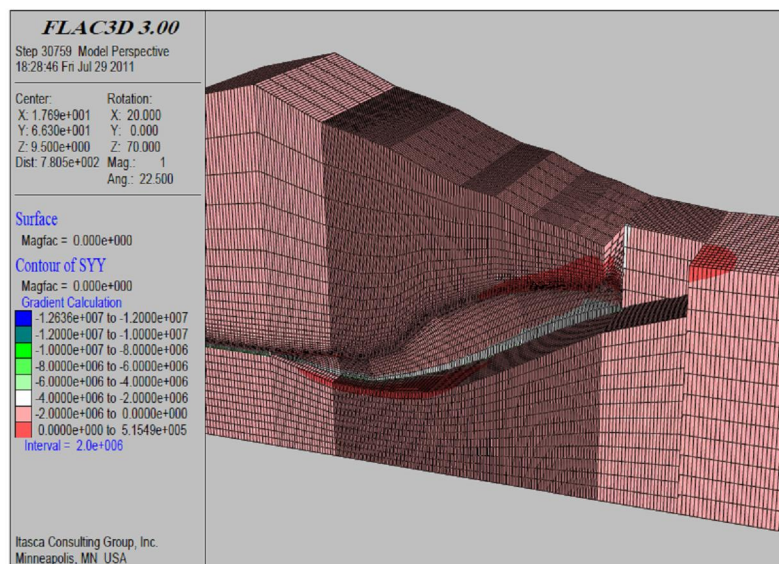
البته این مقدار به صفر نمی‌رسد ولی باید مقادیر نیروهای نامتعادل کننده بعد از حل مدل در مقابل نیروهای نامتعادل کننده اولیه قابل چشم‌پوشی باشد. شکل ۴-۵ نحوه به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل کننده را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۵-۵)، (۶-۵) و (۷-۵) به ترتیب کنتورهای تنش در راستای X، راستای Y و راستای Z با توجه به شرایط مرزی و اعمال شرایط اولیه مشاهده می‌شود.



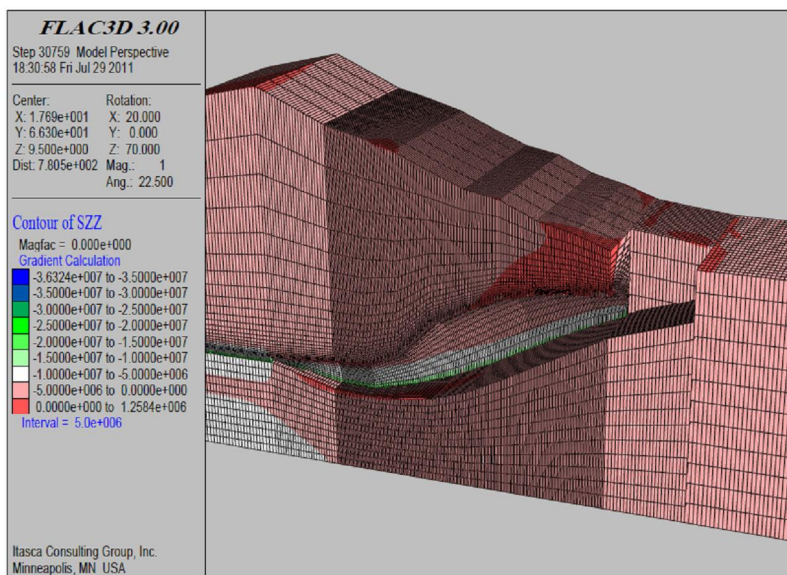
شکل ۴-۵- نمودار متعادل شدن نیروهای نامتعادل



شکل ۵-۵- کنتور تنش در راستای X قبل از انباشت نفت در داخل غار

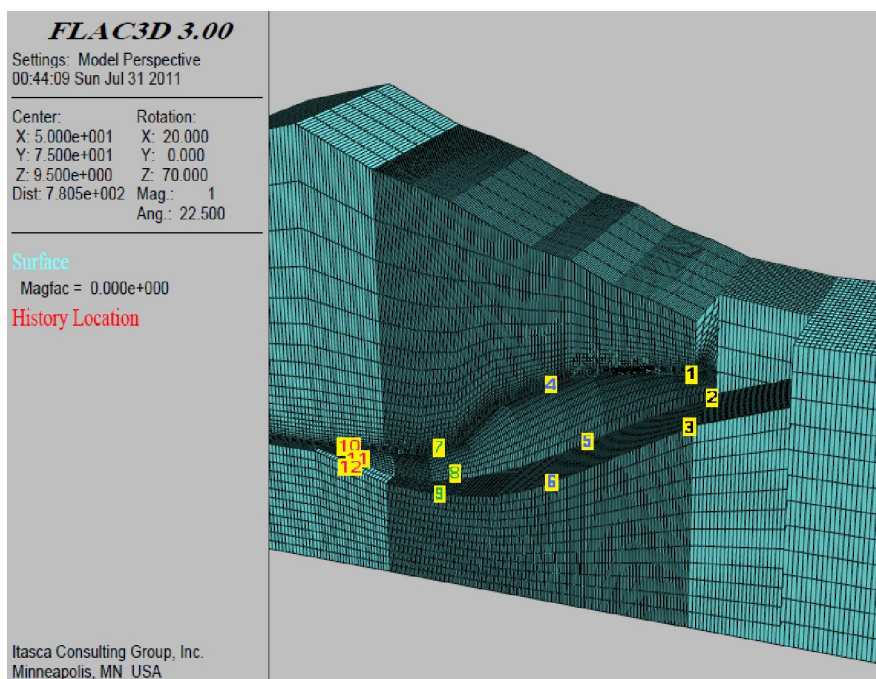


شکل ۵-۶- کنتور تنش در راستای Y قبل از انباشت نفت در داخل غار



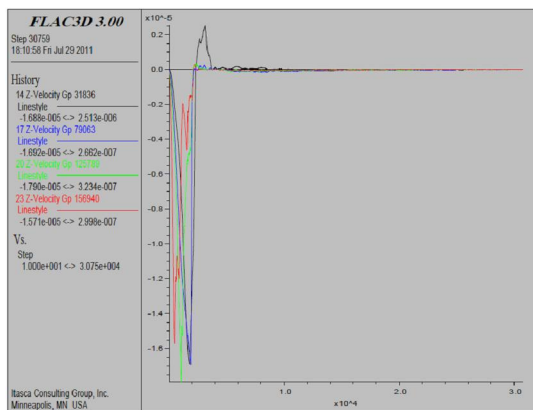
شکل ۵-۷- کنتور تنش در راستای Z قبل از انباشت نفت در داخل غار

برای قضاوت درست در مورد پایداری غار رودافشان، تاریخچه جابجایی، تاریخچه سرعت و تاریخچه تنش، در نقاطی معلوم از غار که در شکل ۵-۸ آمده‌اند ثبت شده است.

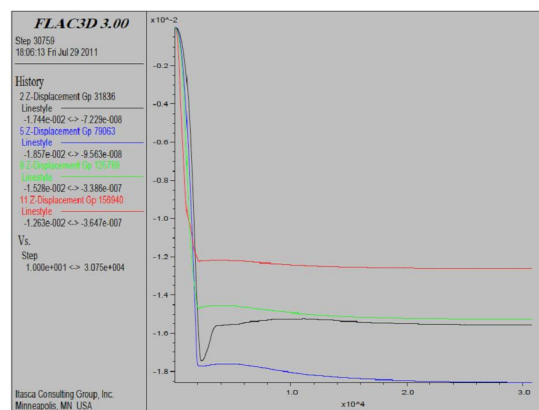


شکل ۵-۸- نقاط مورد بررسی از لحاظ جابجایی و تنش در غار رودافشان

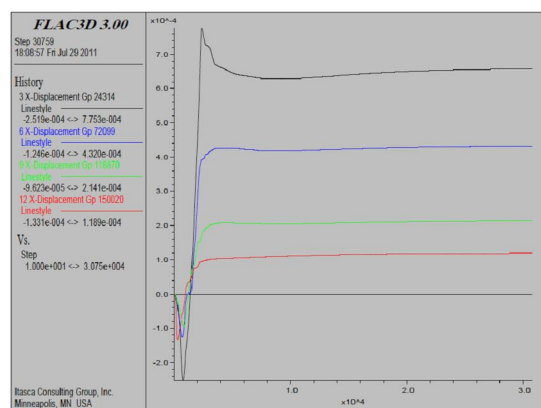
برای اطمینان از به تعادل رسیدن مدل باید جابه‌جایی و سرعت گره‌ها را در مدل کنترل کرد. برای این کار از تاریخچه سرعت و تاریخچه جابه‌جایی می‌توان بهره برد. در صورتی که مدل به تعادل میل کند، باید سرعت در همه این نقاط به صفر برسد و جابه‌جایی‌ها ثابت شوند. نمودارهای ۵-۸ الی ۵-۱۷ تاریخچه جابجایی، تاریخچه سرعت و تنش چهار نقطه در سقف، چهار نقطه در دیواره و چهار نقطه در کف غار را نشان می‌دهند. در این اشکال نمودارهای سیاه رنگ تاریخچه نقاط واقع در دهانه غار، نمودارهای به رنگ آبی تاریخچه نقاط واقع در ۷۰ متری دهانه غار، نمودارهای سبز رنگ تاریخچه نقاط واقع در ۱۳۰ متری دهانه غار و نمودارهای قرمز رنگ تاریخچه نقاط واقع در ۱۸۰ متری دهانه غار را نشان می‌دهند.



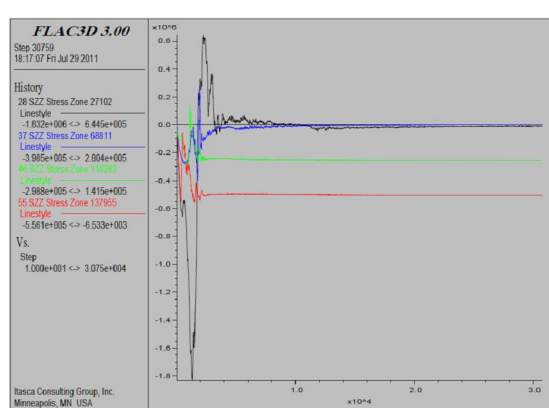
شکل ۵-۹- تاریخچه سرعت چهار نقطه معلوم در سقف غار



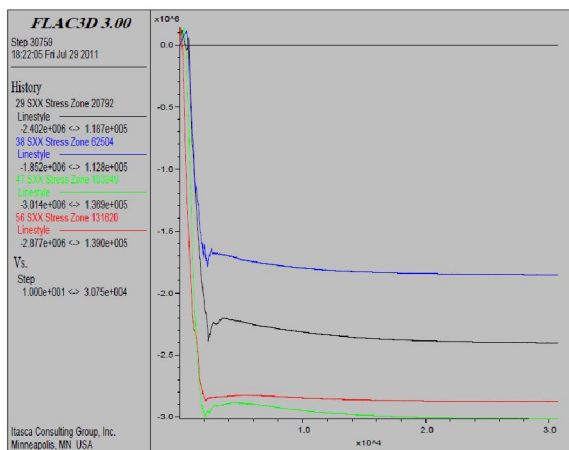
شکل ۵-۸- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار



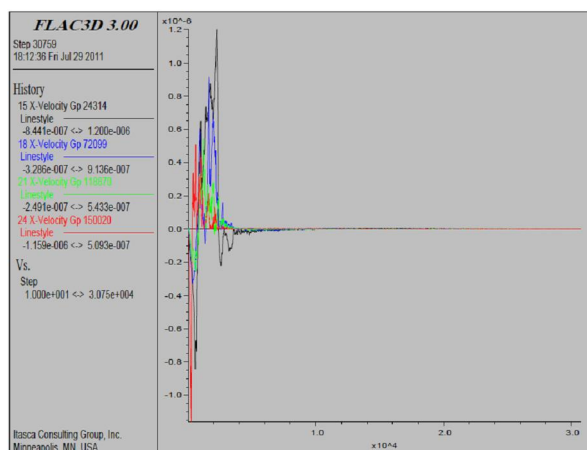
شکل ۵-۱۱- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار



شکل ۵-۱۰- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار



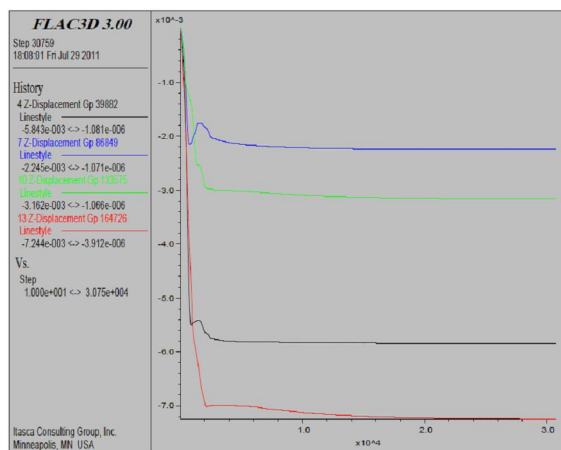
شکل ۵-۱۳- تاریخچه تنش در راستای x برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار



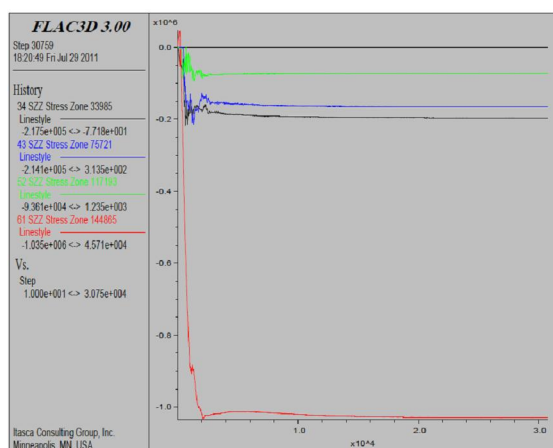
شکل ۵-۱۲- تاریخچه سرعت چهار نقطه معلوم در دیواره غار



شکل ۵-۱۵- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار

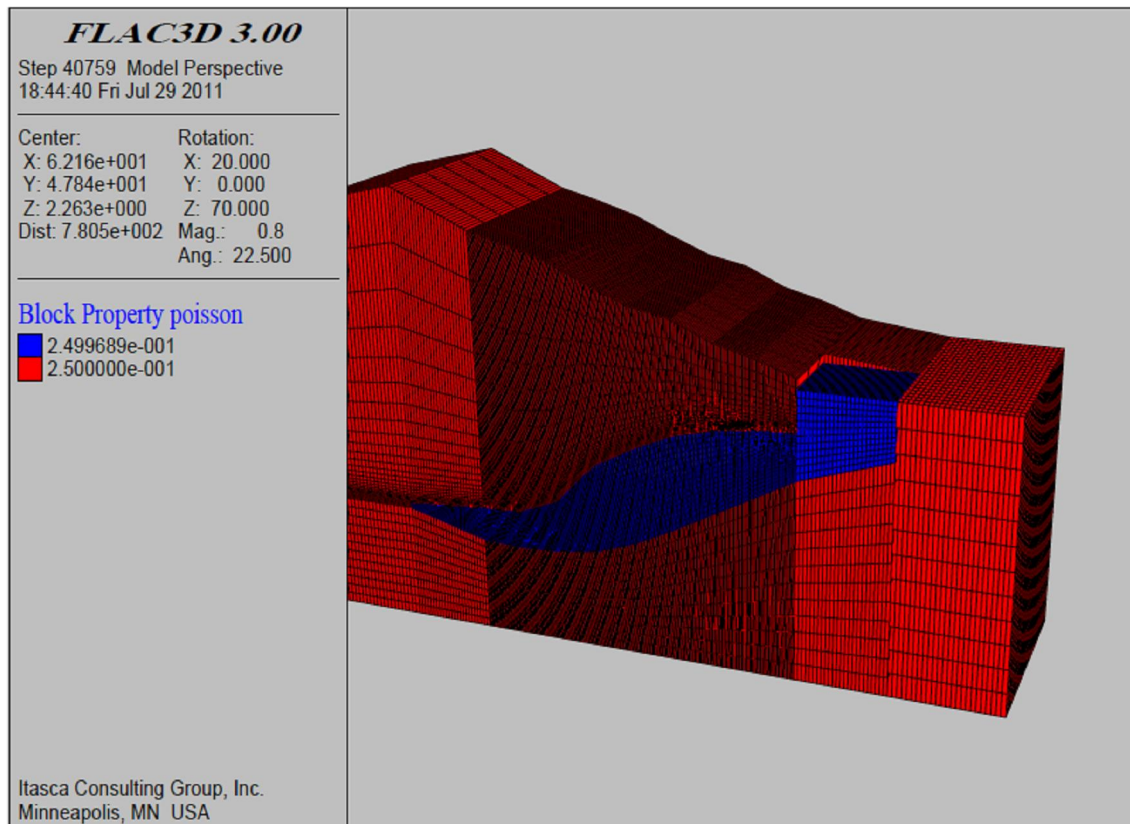


شکل ۵-۱۴- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار

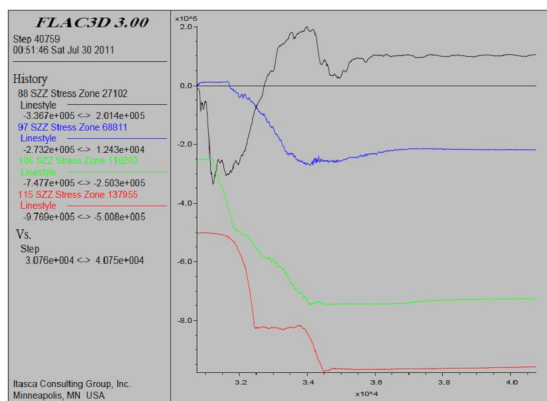


شکل ۵-۱۶- تاریخچه تنش در راستای z برای چهار نقطه معلوم در کف غار

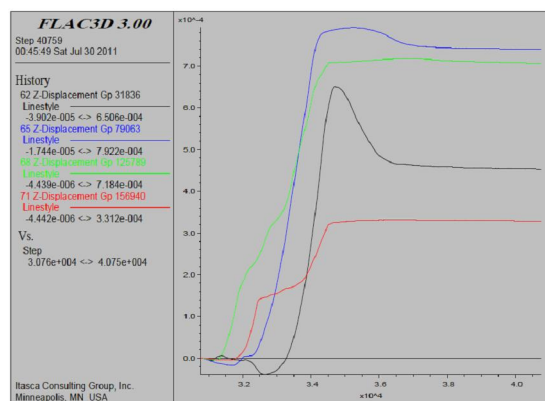
۵-۲-۴- حل مدل در حالت وارد کردن نفت خام به داخل غار و بررسی تغییرات ناشی از آن همان گونه که در مرحله قبل مشاهده شد مدل ایجاد شده به تعادل اولیه رسید. به عبارت دیگر در مرحله قبل نیروهای نامتعادل کننده تقریباً به صفر رسید (شکل ۵-۴). حال باید بررسی شود با انباشت نفت خام چه تغییری در پایداری غار ایجاد می شود. برای این کار به جای فضای خالی در مدل به صورت کامل نفت خام قرار داده می شود (شکل ۵-۱۷). این تغییر (انباشت نفت خام در غار) منجر به جابجایی هایی در دیواره، سقف و کف غار خواهند شد. برای مشاهده این تغییرات، جابجایی های اتفاق افتاده در نقاط معلومی از دیواره، سقف و کف غار (نقاط تعیین شده در شکل ۵-۸) مشخص شده اند. این جابجایی ها در نمودارهای ۵-۱۸ الی ۵-۲۳ آورده شده اند.



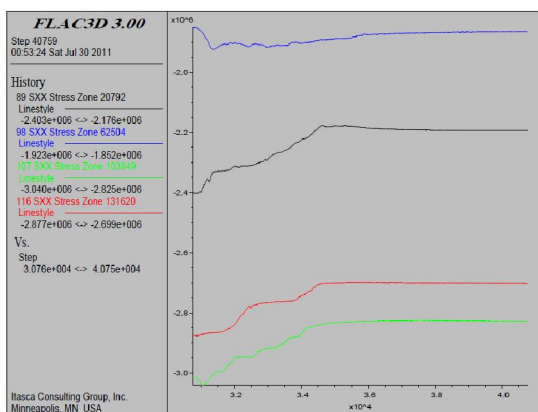
شکل ۵-۱۷- شمایی از مدل ساخته شده در حالت انباشت نفت خام در غار



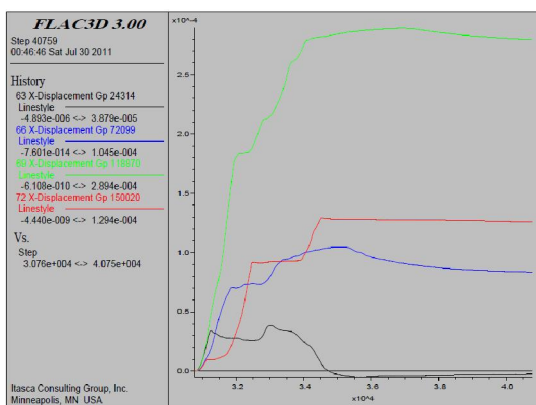
شکل ۵-۱۹- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از انباشت نفت خام



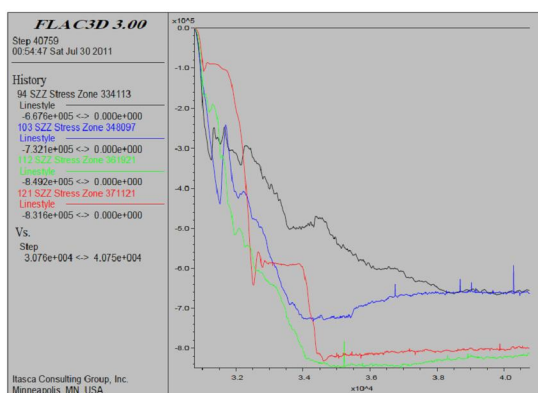
شکل ۵-۱۸- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از انباشت نفت خام



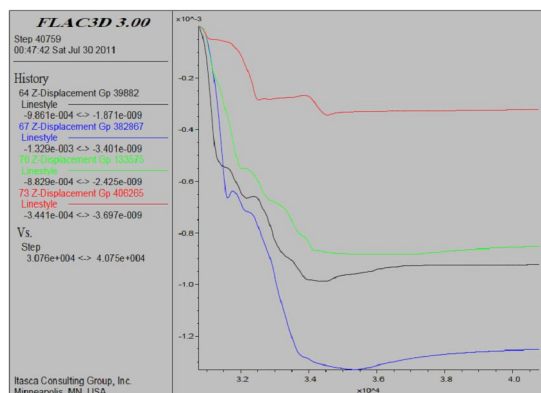
شکل ۵-۲۱- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از انباشت نفت خام



شکل ۵-۲۰- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از انباشت نفت خام

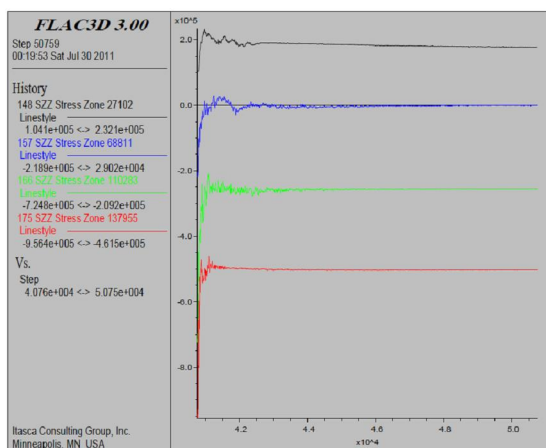


شکل ۵-۲۳- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از انباشت نفت خام

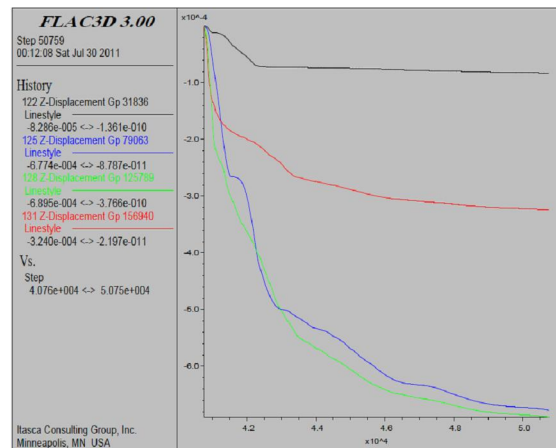


شکل ۵-۲۲- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار پس از انباشت نفت خام

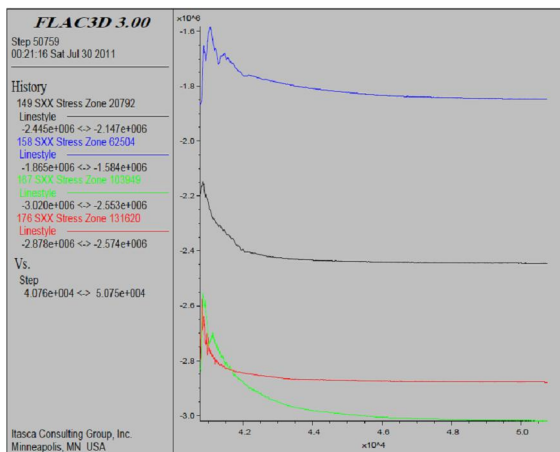
۵-۲-۵- حل مدل در حالت برداشت نفت خام از داخل غار و بررسی تغییرات ناشی از آن بر اساس آنچه که در مراحل قبل مشاهده شد، مدل ایجاد شده‌ی به تعادل رسیده، با انباشت نفت خام متحمل تغییراتی شده است. حال باید بررسی شود که با برداشت نفت خام چه تغییری در پایداری غار ایجاد می‌شود. برای این کار ابتدا نفت خام از مدل حذف شده و سپس مدل حل می‌شود. بر اثر این تغییر (برداشت کردن نفت خام از غار) این بار نیز دیواره، سقف و کف غار جابجایی‌هایی جدیدی انجام می‌دهند. برای مشاهده این تغییرات و نیز قضاوت صحیح مهندسی جابجایی‌های اتفاق افتاده در همان نقاط معلومی که در شکل ۵-۸ تعیین شده‌اند، دوباره بررسی می‌شوند. این جابجایی‌ها در نمودارهای ۵-۲۴ الی ۵-۲۹ آورده شده‌اند.



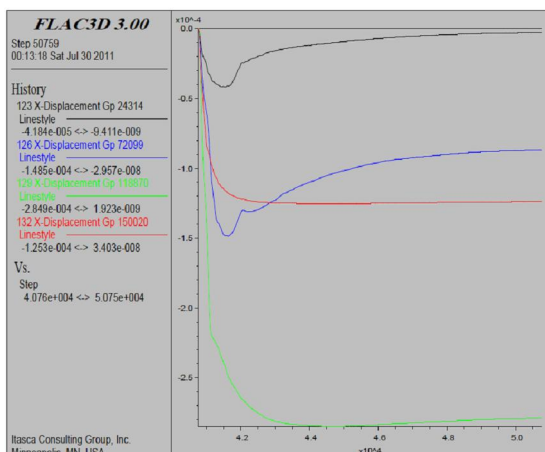
شکل ۵-۲۵- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از برداشت نفت خام



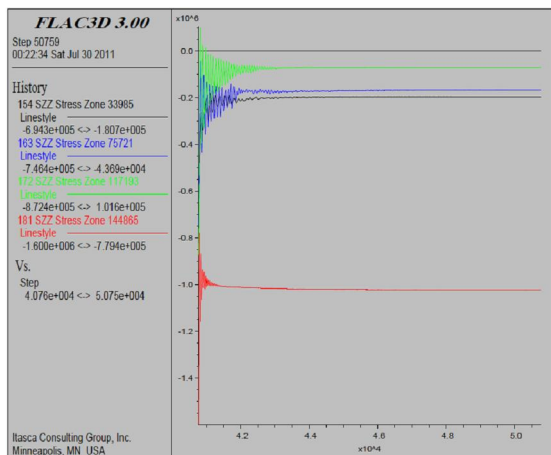
شکل ۵-۲۴- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار پس از برداشت نفت خام



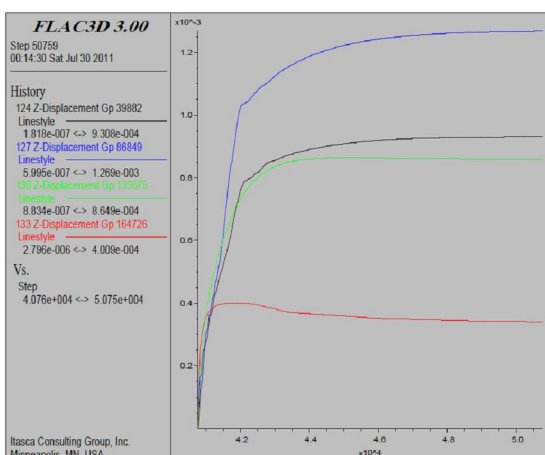
شکل ۵-۲۷- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از برداشت نفت خام



شکل ۵-۲۶- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار پس از برداشت نفت خام



شکل ۵-۲۹- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در کف غار پس از برداشت نفت خام

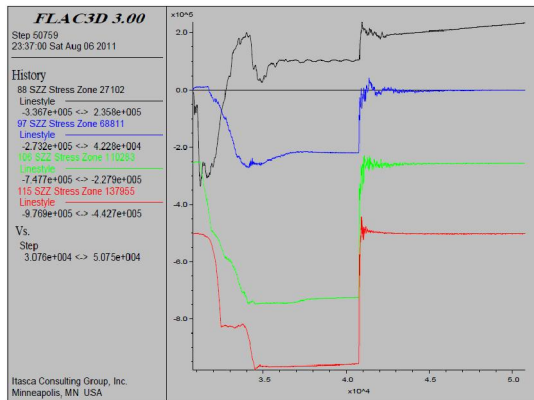


شکل ۵-۲۸- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار پس از برداشت نفت خام

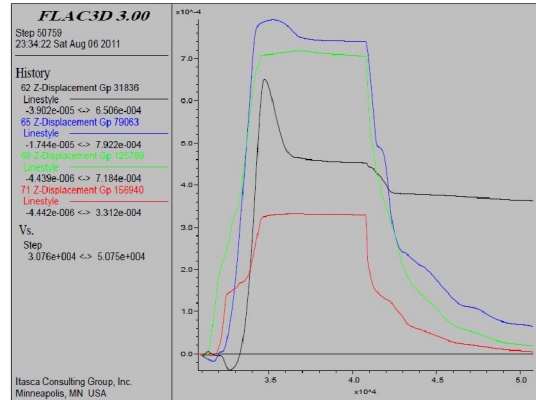
۵-۲-۶- تفسیر تحلیل پایداری غار رودافشان بر اثر تغییرات انباشت و برداشت نفت خام

در تحقیق حاضر هدف بررسی تاثیر انباشت و برداشت سریع نفت خام از غار رودافشان است. در این بررسی مشخص شد که پس از انباشت نفت خام به داخل غار بر اثر به وجود آمدن فشارهای داخلی، سقف، دیواره و کف غار به اندازه بسیار کمی به عقب برده شده‌اند. سپس در مرحله بعد بر اثر تخلیه سریع بدنه غار

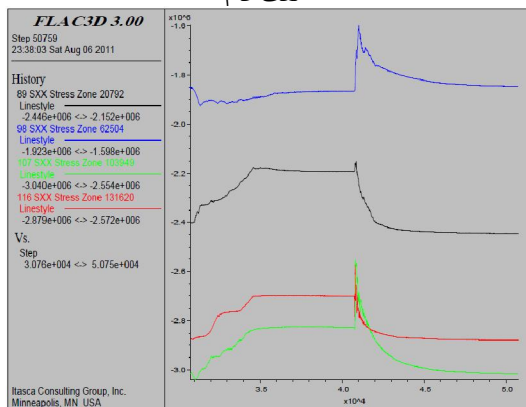
تقریباً به حالت اولیه بر می‌گردد. برای درک بهتر این موضوع اشکال ۵-۳۰ الی ۵-۳۵ جابجایی و تنش در راستاهای مختلف را هم در زمان انباشت و هم در زمان برداشت نشان می‌دهند.



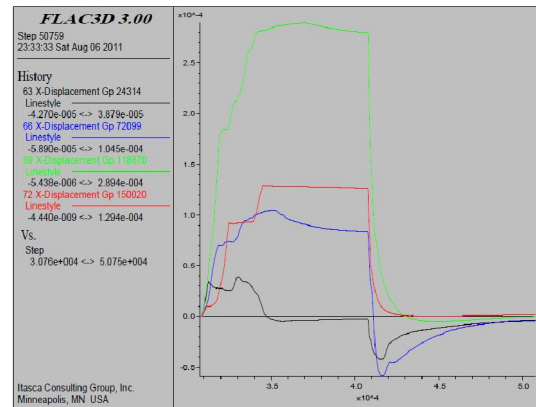
شکل ۵-۳۱- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در سقف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام



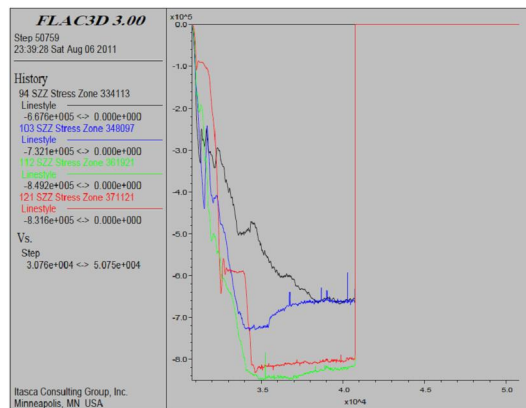
شکل ۵-۳۰- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در سقف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام



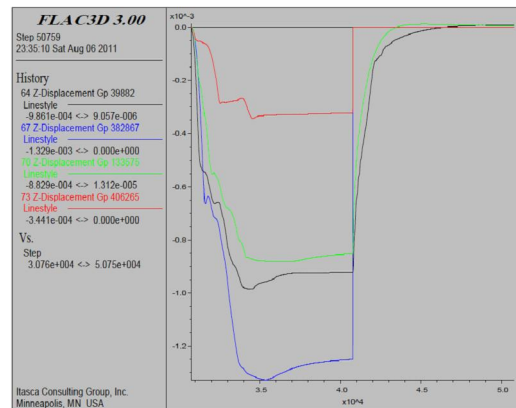
شکل ۵-۳۳- تاریخچه تنش در راستای X برای چهار نقطه معلوم در دیواره غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام



شکل ۵-۳۲- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در دیواره غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام



شکل ۵-۳۵- تاریخچه تنش در راستای Z برای چهار نقطه معلوم در کف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام



شکل ۵-۳۴- تاریخچه جابجایی چهار نقطه معلوم در کف غار از زمان انباشت تا زمان برداشت نفت خام

بر اثر انباشت و برداشت نفت خام، در بدنه (سقف، دیواره و کف) غار جابجایی‌های صورت می‌گیرد. همان‌گونه که از شکل‌های ۵-۳۰، ۵-۳۲ و ۵-۳۴ مشخص است در مرحله انباشت، بدنه غار بر اثر فشار ناشی از نفت خام به سمت توده سنگ در برگیرنده جابجا می‌شود. لازم به ذکر است در راستای محور غار هر چه فاصله از دهانه بیشتر شود به دلیل شیب‌دار بودن غار و در نتیجه افزایش ارتفاع هیدرولیکی نفت خام فشار افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود با بیشتر شدن فاصله از دهانه غار جابجایی انجام گرفته در سقف، دیواره و کف بیشتر شود اما در نمودارهای آورده شده که جابجایی در چهار فاصله مختلف از دهانه غار را نشان می‌دهد، شرایط به گونه‌ی دیگری است. یعنی به طور مثال در انتهای غار جابجایی سقف کمتر از جابجایی سقف در وسط غار است. دلیل این امر تغییرات سطح مقطع از ابتدای دهانه ورودی تا انتهای غار است. در واقع اگر به جای جابجایی‌های صورت گرفته نسبت جابجایی به سطح مقطع در نظر گرفته شود مشخص خواهد شد که این نسبت با دور شدن از دهانه غار (افزایش فشار هیدرولیکی ناشی از نفت خام) بیشتر می‌شود. بر اساس نمودارهای آورده (اشکال ۵-۲۴ الی ۵-۲۹) شده، در مرحله برداشت نفت خام نیز جابجایی انجام گرفته به گونه‌ای است که بدنه غار به شکل اولیه باز خواهد گشت. لازم به یادآوری است حجم نفت انباشت شده در غار مذکور در حدود ۲۵۰،۰۰۰ متر مکعب است.

۵-۳- تحلیل پایداری غار بعد از باربرداری بر اثر برداشت نفت خام

برای بررسی پایداری غار بعد از برداشت نفت خام و باربرداری ناشی از تخلیه غار از رابطه‌ای که توسط ساکورایی ارائه شد، استفاده شده است. این رابطه کرنش بحرانی (ϵ_{cr}) در حالت فشاری محصور نشده در اطراف غار را بر اساس مدول یانگ سنگ بکر محیط بیان می‌کند. از آن جا که زمین تحت تنش سه محوره قرار دارد، برای ارزیابی پایداری فضا نیاز به استفاده از بیشترین کرنش برشی است. ساکورایی^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۴ رابطه‌ی (۵-۱) را برای محاسبه کرنش بحرانی در حالت سه محوری (γ_c) با استفاده از

^۱ Sakurai

کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده (ε_c) و نسبت پواسون (ν) پیشنهاد کردند [۹۷].

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_c \quad (۱-۵)$$

کرنش بحرانی بر اساس نسبت بین مقاومت فشاری تک محوری (σ_c) و مدول یانگ سنگ بکر (E) به صورت رابطه (۲-۵) تعریف می‌شود [۳۹].

$$\varepsilon_{Critical} = \frac{\sigma_c}{E} \quad (۲-۵)$$

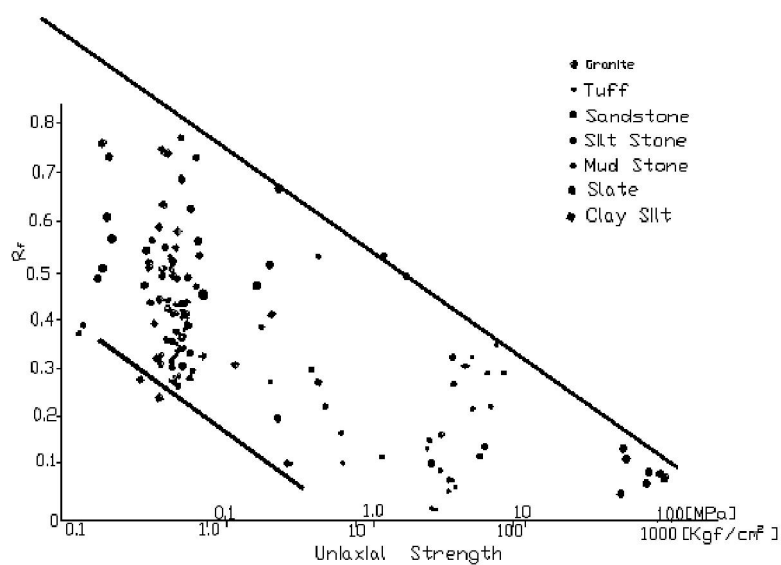
در روش کنترل مستقیم کرنش^۱ (DSCT) که توسط ساکورایی ارائه شده، ابتدا کرنش بحرانی تعیین و سپس پارامتر R_f (پارامتر نشان دهنده مقاومت شکست که از شکل (۳۶-۵) مقدار آن به دست می‌آید) مشخص می‌شود. سپس با استفاده از رابطه (۳-۵) کرنش شکست تک محوری^۲ (ε_f) محاسبه می‌شود. با تعیین مقدار M که به وسیله آزمایشات سه محوره به دست می‌آید، کرنش شکست سه محوره قابل محاسبه است. نکته قابل ذکر آن است که اثر تنش محصور کننده در افزایش کرنش شکننده در ضریب بحرانی M لحاظ شده است [۳۹]. باید توجه نمود که عموماً کرنش بحرانی با کرنش در ناحیه شکست (ε_f) تفاوت دارد، اما برای مواد شکننده که در آن‌ها رابطه تنش و کرنش تقریباً خطی است کرنش بحرانی تقریباً برابر با کرنش در نقطه شکست در نظر گرفته می‌شود [۹۶].

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cr}}{1 - R_f} \quad (۳-۵)$$

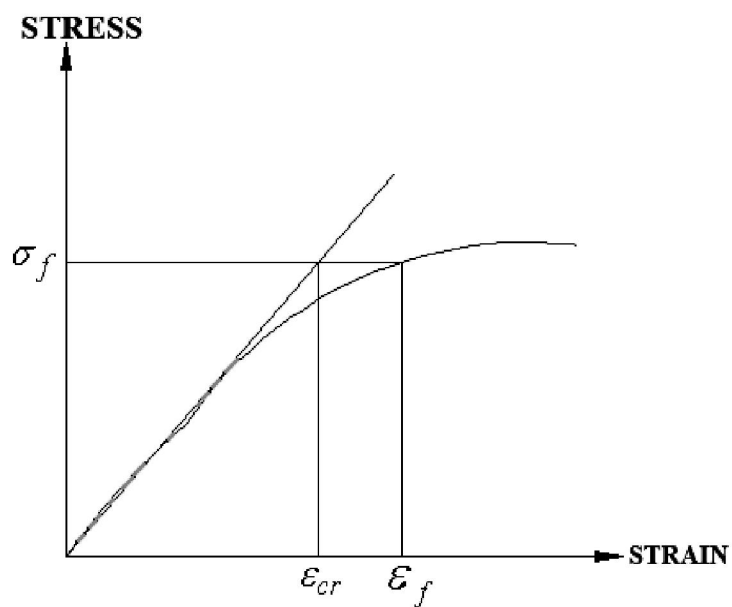
در شکل (۳۷-۵) رابطه بین کرنش بحرانی و شکست نشان داده شده است.

^۱ Direct Strain Control Technique

^۲ Failure uniaxial Strain



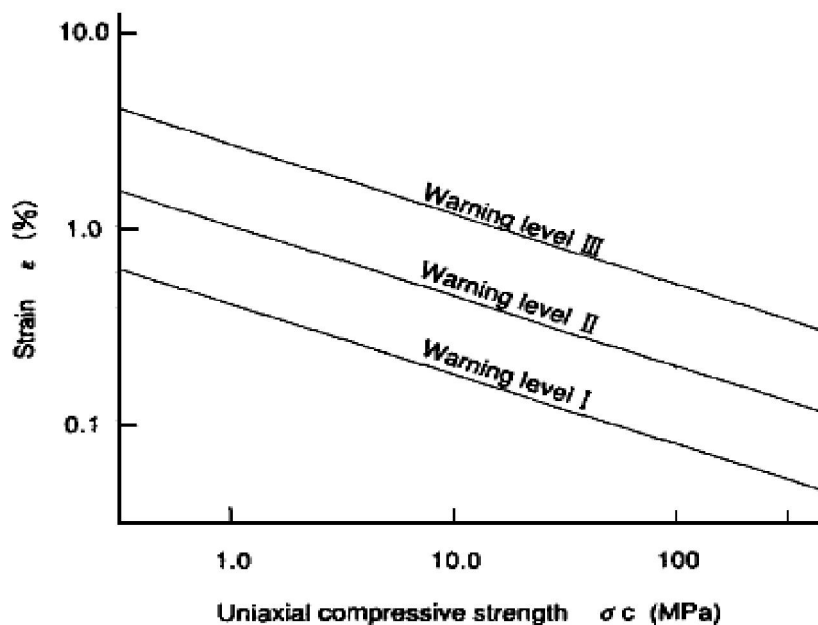
شکل ۵-۳۶- نمودار تعیین R_f با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره [۹۷]



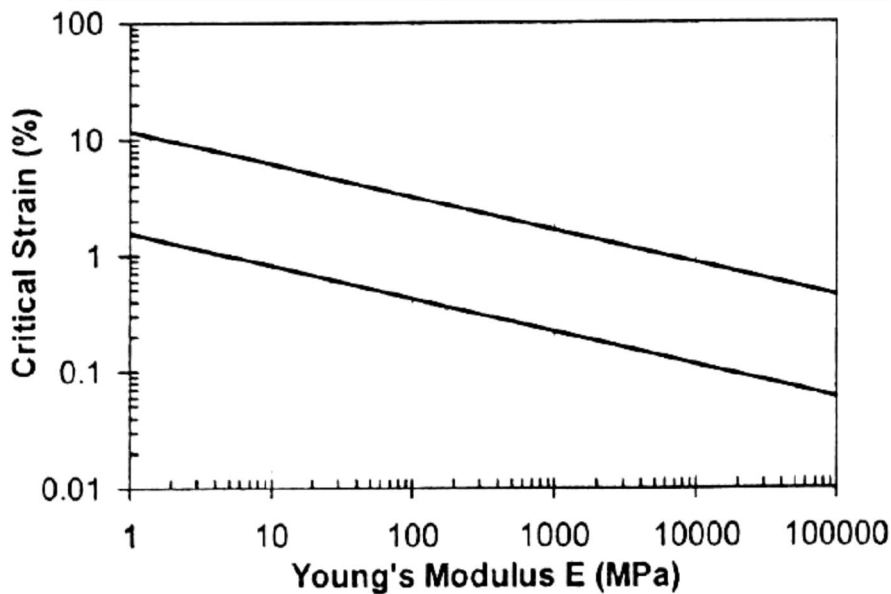
شکل ۵-۳۷- رابطه بین کرنش بحرانی (ϵ_{cr}) و کرنش شکست (ϵ_f) [۹۶]

۳-۱- تراز هشدار خطر

ساکورایی نموداری بر اساس کرنش بحرانی نسبت به مقاومت فشاری تک محوره و مدول یانگ سنگ بکر، که شامل سه تراز هشدار خطر که برای بررسی پایداری فضاهای زیرزمینی است را پیشنهاد داد. این نمودارها در شکل (۵-۳۸) و (۵-۳۹) نشان داده شده است. بر اساس نمودار ارائه شده، ساکورایی پیشنهاد نمود زمانی که کرنش‌های ایجاد شده در سازه کمتر از تراز هشدار خطر I باشد، فضای زیرزمینی هیچ گونه مشکلی از لحاظ پایداری نداشته و ایمن است. در صورتی ساخت فضای زیرزمینی با مشکل جدی مواجه می‌شود که کرنش‌های ایجاد شده در سازه بیشتر از تراز هشدار III باشد [۹۷]. در چنین شرایطی باید تمهیدات ویژه‌ای در طراحی سیستم نگهداری مورد نیاز منظور نمود.



شکل ۵-۳۸- رابطه کرنش بحرانی نسبت به مقاومت فشاری تک محوره [۹۷]



شکل ۵-۳۹- رابطه کرنش بحرانی نسبت به مدول تغییر شکل پذیری [۹۷]

ساکورایی معتقد است که کرنش بحرانی تقریباً مستقل از درزه‌ها، محتوای آب و دما است. ساکورایی و آدئوچی^۱ در سال ۱۹۸۸ بر اساس مطالعات تجربی انجام گرفته بر روی فضا‌های زیرزمینی مختلف ترازهای هشدار خطر را به صورت روابط (۴-۵) ارائه کرده‌اند [۹۴].

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85$$

تراز هشدار خطر III

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22$$

تراز هشدار خطر II (۴-۵)

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59$$

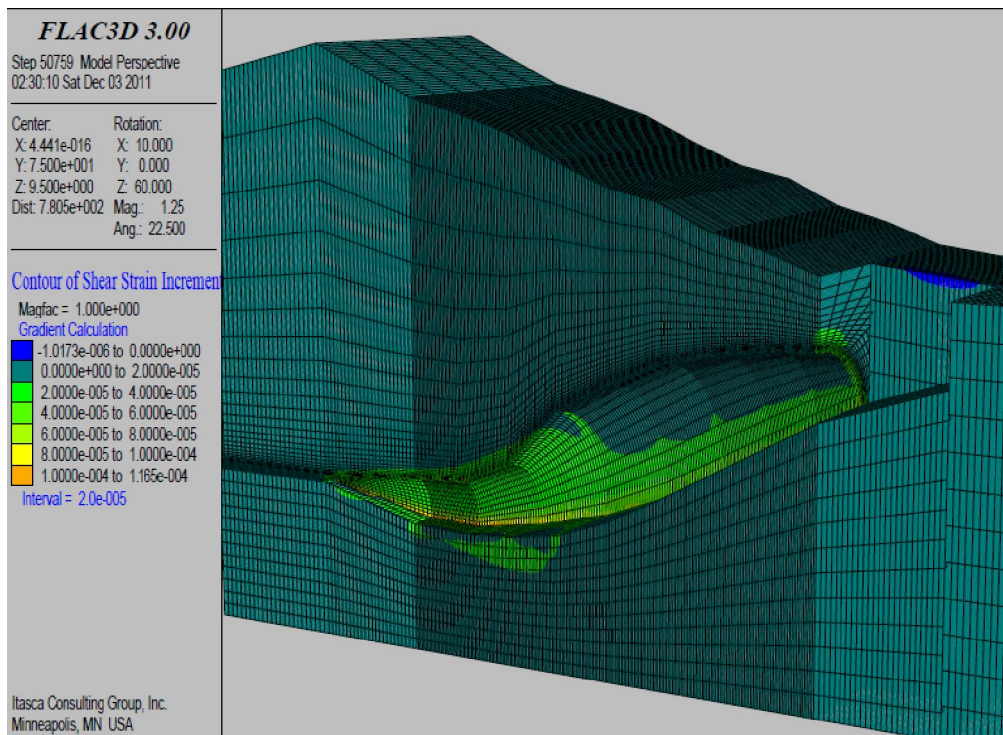
تراز هشدار خطر I

در روابط ارائه شده توسط ساکورایی و آدئوچی، E مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی (ε_c) بر اساس درصد است.

^۱ Adaeochi

۵-۳-۲- تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی

مقدار حداکثر کرنش برشی حاصل از آزادسازی تنش در غار رودافشان در شکل (۵-۴۰) نشان داده شده است. برای سنجش پایداری غار و قرار دادن آن در یکی از ترازهای هشدار، ضروری است مقادیر کرنش برشی با استفاده از روابط (۵-۴) و (۵-۱) محاسبه شده که در جدول (۵-۱) این مقادیر ارائه شده است.



شکل ۵-۴۰- کرنش برشی ایجاد شده بعد از ترخیص تنش

جدول ۵-۱- مقادیر محاسبه شده کرنش بحرانی توسط روابط ساکورایی

روابط ساکورایی	تراز هشدار خطر	ϵ_c	γ_c
$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 0.85$	III	$3.56e-4$	$4.49e-4$
$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22$	II	$1.53e-4$	$1.92e-4$
$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.59$	I	$6.54e-5$	$8.17e-5$

همان طور که مشاهده می شود مقدار کرنش برشی حداکثر بوجود آمده در غار برابر $10^{-4} \times 1/165$ است (که در شکل ۵-۴۰ آورده شده است) که در بین تراز هشدار I و II قرار می گیرد. به این ترتیب طبق رابطه ساکورایی غار پایدار بوده که این امر با مشاهدات محل نیز سازگار است.

۵-۳-۳- تعیین ضریب ایمنی

ضریب ایمنی به صورت نسبت مقدار نیروی های مقاومت به مقدار نیروهای اعمالی و یا موثر (معادله ۵-۶)، تعریف می شود. در پروژه حاضر، ضریب ایمنی غار رودافشان برای قسمتی از بدنه که بیشترین نیروی موثر به آن قسمت وارد می شود، محاسبه شده است. این قسمت از بدنه غار در شکل ۵-۴۱ نشان داده شده است. برای انجام این کار، نیروی مقاوم به وسیله معیار شکست هوک-بروان (معادله ۵-۵) تعیین شده است. در این معادله σ_3 از خروجی نرم افزار تعیین شده است.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{0.5} \quad 5-5$$

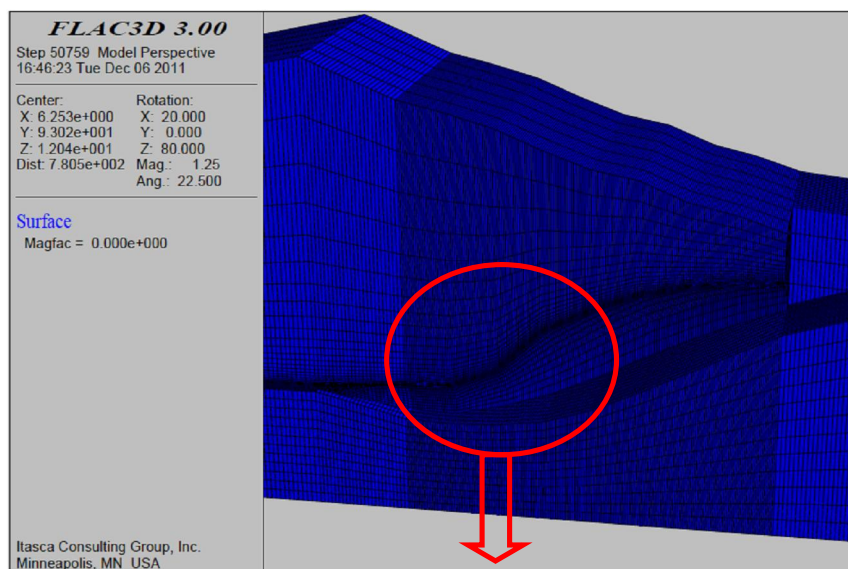
$$\sigma_1 = (1.87 \times 10^7) + \{(2.485 \times 51 \times 10^6 \times 1.87 \times 10^7) + [0.04 \times (51 \times 10^6)^2]\}^{0.5} \rightarrow \sigma_1 = 67.38 \times 10^6 \text{ Pa}$$

۵-۶

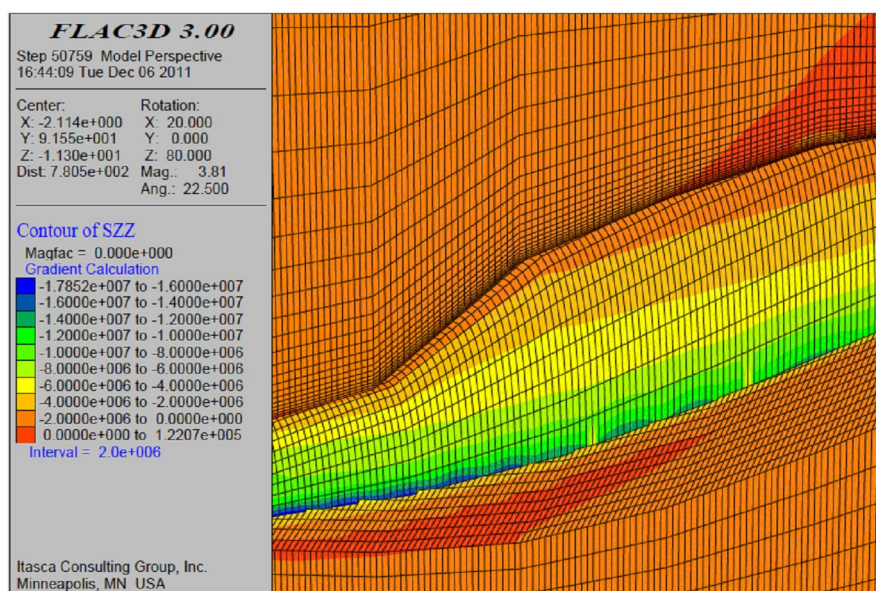
$$\text{ضریب ایمنی} = \frac{\text{نیروی مقاوم}}{\text{نیروی موثر (تنش محاسبه شده به وسیله نرم افزار)}}$$

$$\text{ضریب ایمنی} = \frac{67.38 \times 10^6}{17.85 \times 10^6} = 3.78$$

با توجه به ضریب ایمنی ۳/۷۸ که برای قسمتی از غار که دارای بیشترین نیروی موثر است، بدست آمده، نتیجه می شود که غار رودافشان پس از برداشت نفت خام پایدار خواهد ماند.



شکل ۴۱-۵ (الف) مدل ایجاد شده در نرم افزار



شکل ۴۱-۵ (ب) بحرانی ترین قسمت از غار رودافشان از نظر نیروهای موثر

۴-۵- تحلیل پارامترهای ورودی مدل عددی

یکی از مهمترین کاربردهای روشهای عددی تحلیل حساسیت و تحلیل پارامتری است. در تحلیل حساسیت با فرض ثابت بودن پارامترهای ورودی توده سنگ، ویژگیهای سازه از قبیل شکل هندسی، ابعاد (طول، عرض و ارتفاع) و دیگر ویژگیهای سازه تغییر داده می شود تا تاثیر هر یک از آنها بر پایداری سازه

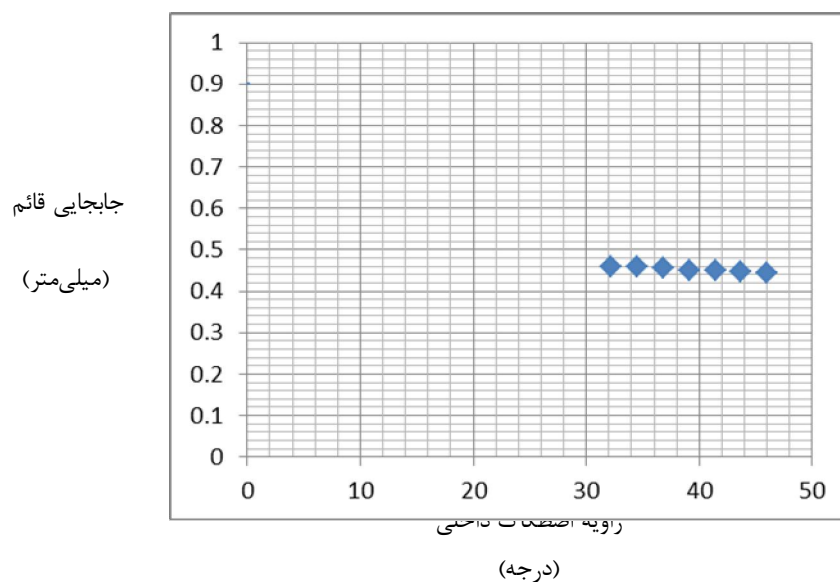
مورد ارزیابی قرار گیرد. اما در تحلیل پارامتری با ثابت گرفتن ویژگی‌های سازه، پارامترهای مکانیکی از قبیل زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مدول دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ در بر گیرنده مدل تغییر داده می‌شود تا اثر هر یک از آنها بر روی رفتار مدل ایجاد شده بررسی شود. در واقع این کار تعیین می‌کند که کدام یک از پارامترهای انتخاب شده اثر بیشتری بر روی پایداری سازه احداث شده دارد [۹]. در این تحقیق به دلیل ثابت بودن ویژگی‌های سازه مورد بررسی (شکل هندسی و ابعاد غار رودافشان)، هدف تنها تحلیل پارامتری است تا مشخص شود برای مطالعات دقیق‌تر کدامیک از پارامترها باید با دقت بیشتری تعیین شوند. از آنجا که در هنگام انباشت به دلیل اینکه تنها نیروی اعمالی به بدنه غار، نیروی وزن و نیروی شناوری نفت‌خام است و امکان ناپایداری احتمالی غار تنها در زمان برداشت سریع نفت‌خام وجود دارد لذا در تحلیل پارامتری، تنها مرحله‌ی پس از برداشت نفت‌خام مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۴-۱- تحلیل پارامتری زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ

در این بخش با تغییر در مقدار زاویه اصطکاک داخلی مدل، حساسیت مدل در رفتار سه ناحیه از غار (سقف، کف و دیواره) پس از برداشت نفت‌خام بررسی می‌شود. برای این کار، تنها پارامتر زاویه اصطکاک داخلی سنگ تغییر داده خواهد شد و سایر پارامترهای تاثیرگذار در رفتار توده‌سنگ ثابت می‌مانند. نتایج این تحلیل در نمودارهای ۵-۲ الی ۵-۴ و شکل‌های ۵-۴۲ الی ۵-۴۵ آورده شده است.

جدول ۵-۲- جابجایی‌هایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

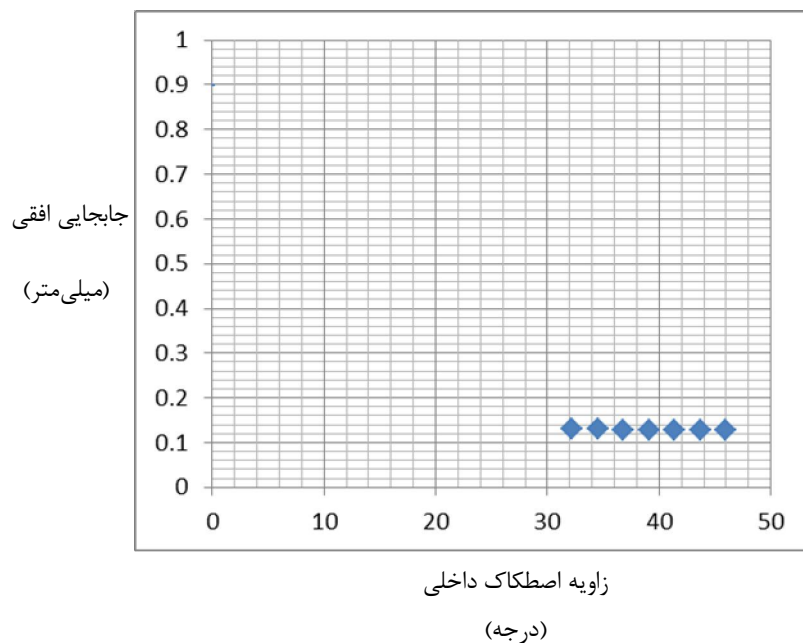
مقادیر مختلف پارامتر زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	جابجایی قائم سقف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم سقف غار (mm)
۳۲/۲	۰/۱	۰/۶۹	۰/۷	۰/۳۵	۰/۴۶
۳۴/۵	۰/۱	۰/۶۹	۰/۷	۰/۳۵	۰/۴۶
۳۶/۸	۰/۱	۰/۶۹	۰/۷	۰/۳۵	۰/۴۵۸
۳۹/۱	۰/۰۹	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۴	۰/۴۵
۴۱/۴	۰/۰۹	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۴	۰/۴۵
۴۳/۷	۰/۰۹	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۶
۴۶	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵



شکل ۵-۴۲- نمودار جابجایی‌های قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

جدول ۵-۳- جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

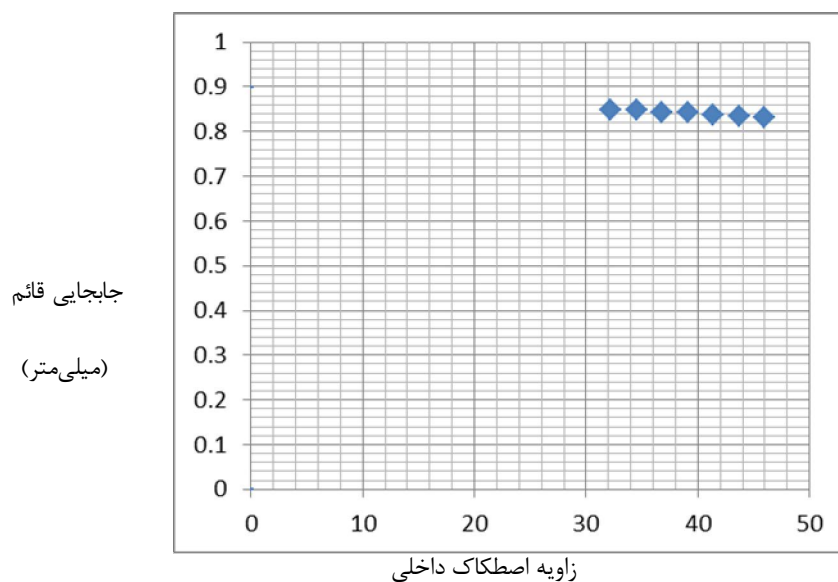
مقادیر مختلف پارامتر زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	جابجایی افقی دیواره غار در دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره در فاصله ۷۰ متری غار از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی افقی دیواره غار (mm)
۳۲/۲	۰/۰۱۰	۰/۰۹۱	۰/۲۸۵	۰/۱۳۲	۰/۱۲۹۵
۳۴/۵	۰/۰۱۰	۰/۰۹۱	۰/۲۸۴	۰/۱۳۲	۰/۱۲۹۳
۳۶/۸	۰/۰۱۰	۰/۰۹۱	۰/۲۸۳	۰/۱۳۱	۰/۱۲۸۸
۳۹/۱	۰/۰۱۰	۰/۰۹۱	۰/۲۸۳	۰/۱۳۱	۰/۱۲۸۸
۴۱/۴	۰/۰۱۰	۰/۰۹۰	۰/۲۸۲	۰/۱۳۱	۰/۱۲۸۳
۴۳/۷	۰/۰۱۰	۰/۰۹۰	۰/۲۸۱	۰/۱۳۱	۰/۱۲۸
۴۶	۰/۰۱۰	۰/۰۹۰	۰/۲۸۰	۰/۱۳۰	۰/۱۲۷۵



شکل ۵-۴۳- نمودار جابجایی‌های افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

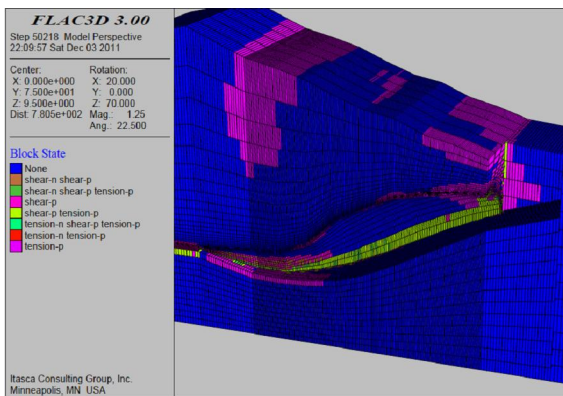
جدول ۴-۵- جابجایی پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی

مقادیر مختلف پارامتر زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	جابجایی قائم کف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم کف غار (mm)
۳۲/۲	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۹	۰/۳۵	۰/۸۴۸
۳۴/۵	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۹	۰/۳۵	۰/۸۴۸
۳۶/۸	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۸	۰/۳۴	۰/۸۴۳
۳۹/۱	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۸	۰/۳۴	۰/۸۴۳
۴۱/۴	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۷	۰/۳۳	۰/۸۳۸
۴۳/۷	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۶	۰/۳۳	۰/۸۳۵
۴۶	۰/۹	۱/۲۵۰	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۳

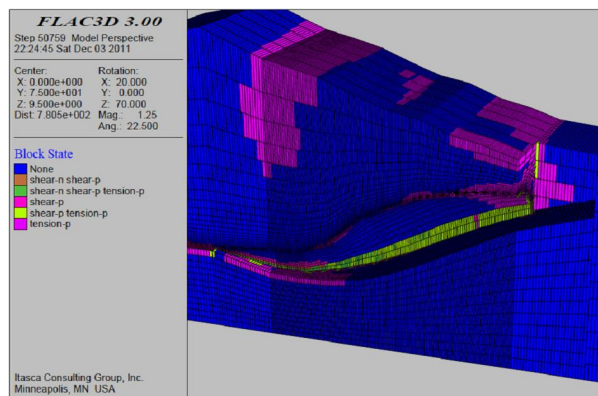


شکل ۴-۵- نمودار جابجایی‌های قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی (درجه)

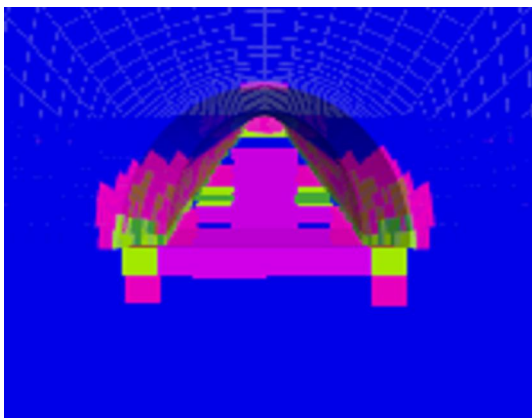
همان‌طور که در جداول و نمودارهای این قسمت دیده می‌شود، تغییرات میزان جابه‌جایی در سه ناحیه سقف، دیواره و کف غار به ازای تغییر مقدار زاویه اصطکاک داخلی بسیار ناچیز است. شایان ذکر است تغییر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی باعث تغییر در ناحیه پلاستیک نیز شده است. شکل ۵-۴۵ اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی، برگسترش منطقه پلاستیک را نشان می‌دهد.



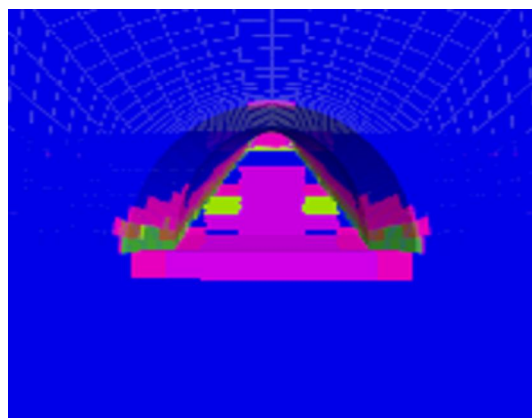
ب) ۷۰٪ زاویه اصطکاک (۳۲ درجه)



الف) اندازه اصلی زاویه اصطکاک (۴۶ درجه)



د) مقطعی به فاصله ۱۳۰ متری از دهانه غار برای ۷۰٪ زاویه اصطکاک (۳۲ درجه)



ج) مقطعی به فاصله ۱۳۰ متری از دهانه غار برای اندازه اصلی زاویه اصطکاک (۴۶ درجه)

شکل ۵-۴۵- اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی، برگسترش منطقه پلاستیک

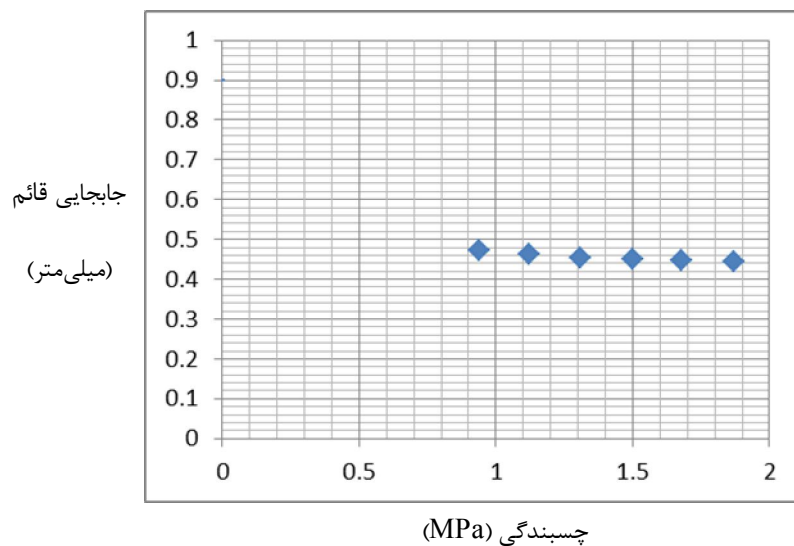
همان گونه که از اشکال ۵-۴۵ مشخص است با کم شدن مقدار زاویه اصطکاک داخلی، منطقه پلاستیک در برخی نقاط مدل گسترده می شود. به طور مثال در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه غار، گسترش ناحیه پلاستیک در محل اتصال دیواره به کف غار (شکل ۵-۴۵-ج) برای حالت مقدار اولیه زاویه اصطکاک داخلی برابر ۴ متر و برای مقدار ۷۰ درصد زاویه اصطکاک داخلی در همان ناحیه برابر ۸ متر (شکل ۵-۴۵-د) می باشد.

۵-۴-۲- تحلیل پارامتری چسبندگی

پارامتر دومی که به منظور انجام تحلیل پارامتری مورد بررسی قرار گرفته است، چسبندگی توده سنگ می باشد. در این قسمت با تغییر در مقادیر چسبندگی (در بازه ای که بر اساس مطالعات نمونه های مختلف سنگ آهک انجام گرفته است [۵]) تأثیرات آن بر روی میزان جابه جایی نقاط مختلف غار رودافشان در مرحله ای که نفت خام از غار خارج می شود، مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این مرحله نیز، همانند تحلیل پارامتری زاویه اصطکاک داخلی تنها پارامتر چسبندگی سنگ تغییر داده خواهد شد و سایر پارامترهای تأثیرگذار در رفتار توده سنگ ثابت می مانند. نتایج این تحلیل در نمودارهای ۵-۵ الی ۵-۷ و شکل های ۵-۴۶ الی ۵-۴۹ آورده شده است.

جدول ۵-۵- جابجایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی

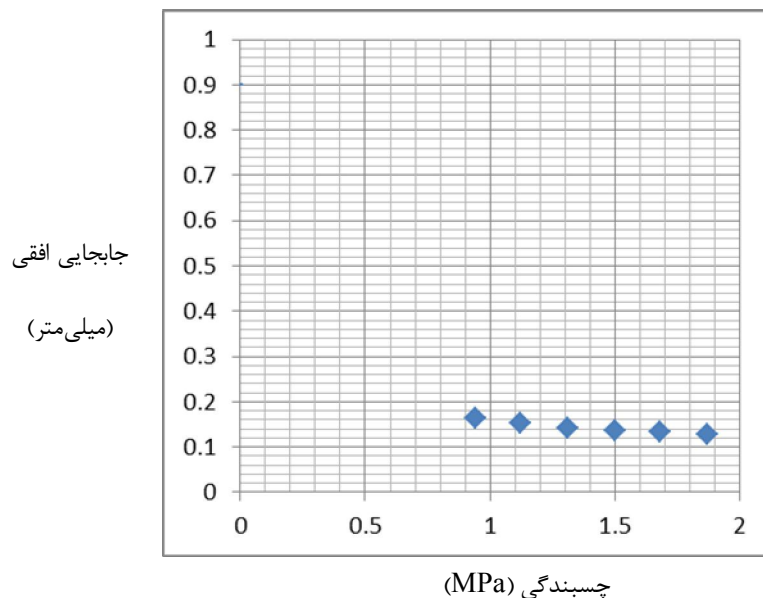
مقادیر مختلف پارامتر چسبندگی (MPa)	جابجایی قائم سقف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم سقف غار (mm)
۰/۹۴	۰/۱۲	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۳۶	۰/۴۷۳
۱/۱۲	۰/۱۰	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۳۵	۰/۴۶۳
۱/۳۱	۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۳۴	۰/۴۵۵
۱/۵۰	۰/۰۹	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۳۳	۰/۴۵
۱/۶۸	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۳۳	۰/۴۴۸
۱/۸۷	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵



شکل ۵-۴۶- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی

جدول ۵-۶- جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی

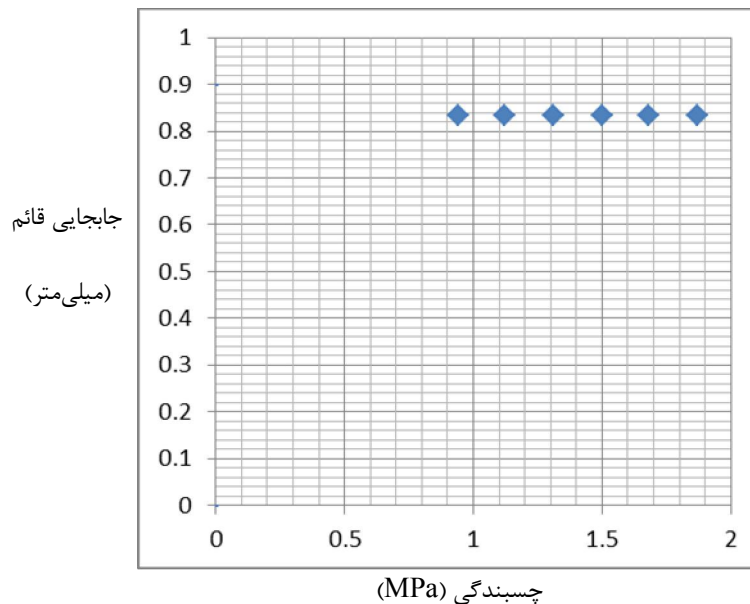
مقادیر مختلف پارامتر چسبندگی (MPa)	جابجایی افقی دیواره غار در دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره در فاصله ۷۰ متری غار از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی افقی دیواره غار (mm)
۰/۹۴	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۳۳	۰/۱۵	۰/۱۶۳
۱/۱۲	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۱۵۳
۱/۳۱	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۱۴۳
۱/۵۰	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۲۹	۰/۱۴	۰/۱۳۸
۱/۶۸	۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۳۳
۱/۸۷	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸



شکل ۵-۴۷- نمودار جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی

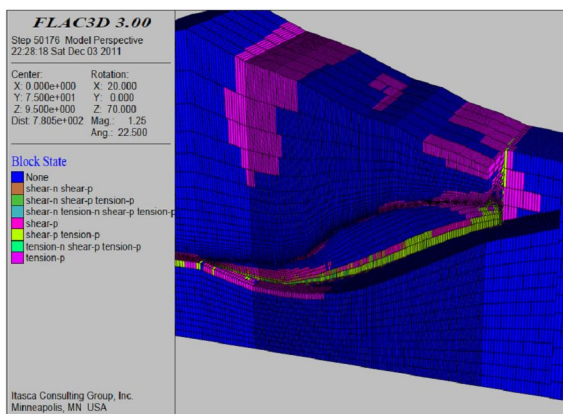
جدول ۵-۷- جابجایی پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی

مقادیر مختلف پارامتر چسبندگی (MPa)	جابجایی قائم کف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم کف غار (mm)
۰/۹۴	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳
۱/۱۲	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳
۱/۳۱	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳
۱/۵۰	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳
۱/۶۸	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳
۱/۸۷	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳

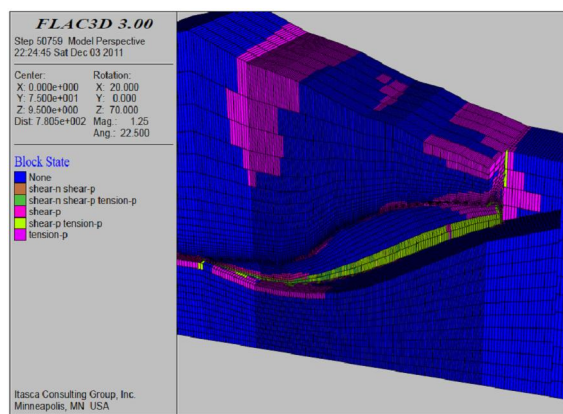


شکل ۵-۴۸- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر چسبندگی

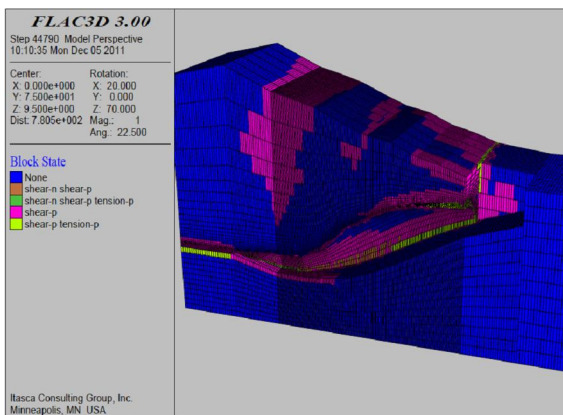
بر اساس آنچه که از جداول و نمودارهای این بخش مشاهده شد، حساسیت سقف غار رودافشان به تغییرات پارامتر چسبندگی توده سنگ ناچیز است. جابجایی دیواره و کف غار نیز در بازه تغییرات اتخاذ شده تغییری بسیار ناچیزی انجام می‌دهد. اما تغییر این پارامتر نیز همچون پارامتر زاویه اصطکاک داخلی باعث تغییر در ناحیه پلاستیک شده است. شکل ۵-۴۹ اثر تغییر چسبندگی، برگسترش منطقه پلاستیک را نشان می‌دهد.



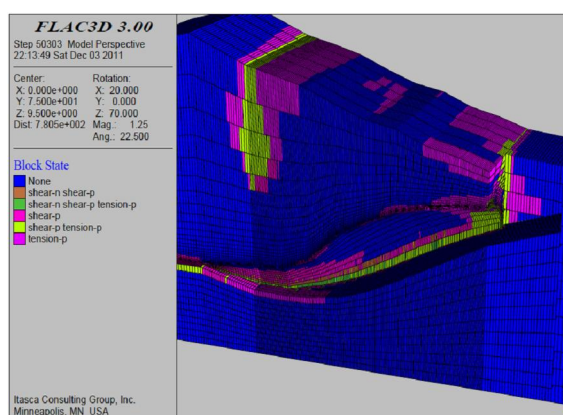
ب) مقدار اصلی چسبندگی ۰/۸۵



الف) اندازه اصلی چسبندگی

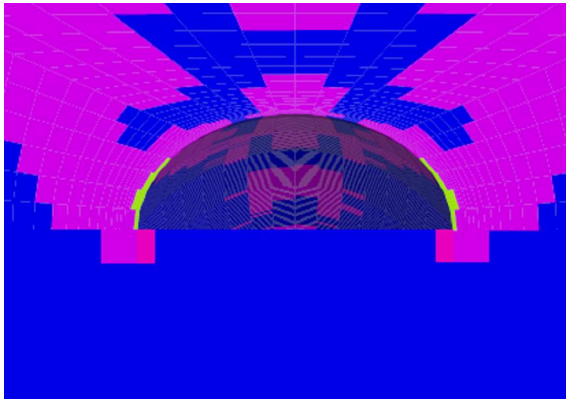


د) مقدار اصلی چسبندگی ۰/۵

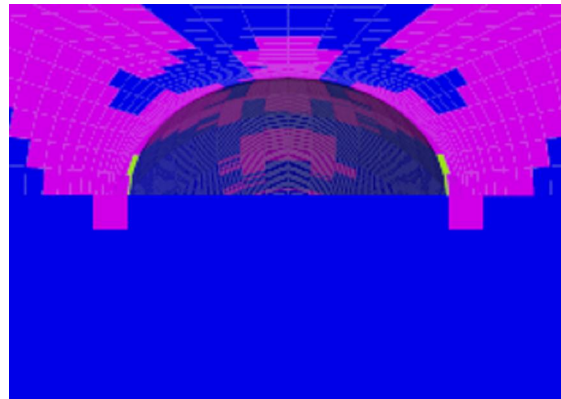


ج) مقدار اصلی چسبندگی ۰/۷

شکل ۵-۴۹- اثر تغییر چسبندگی، برگسترش منطقه پلاستیک



ه) مقطعی به فاصله ۱۰ متری از دهانه غار برای ۷۰٪ چسبندگی



و) مقطعی به فاصله ۱۰ متری از دهانه غار برای اندازه اصلی چسبندگی

ادامه شکل ۵-۴۹- اثر تغییر چسبندگی، برگسترش منطقه پلاستیک

همان گونه که از اشکال ۵-۴۹ مشخص است با کم شدن مقدار چسبندگی، منطقه پلاستیک در برخی نقاط مدل گسترده می شود. به طور مثال در فاصله ۱۰ متری از دهانه غار، گسترش ناحیه پلاستیک در قسمت محل اتصال دیواره به کف غار (شکل ۵-۴۹-و) برای حالت مقدار اولیه چسبندگی وجود ندارد اما برای مقدار ۷۰ درصد چسبندگی در همان ناحیه تا عمق ۶ متر (شکل ۵-۴۵-ه) گسترش یافته است.

۵-۴-۳- تحلیل پارامتری مدول دگرشکل پذیری توده سنگ

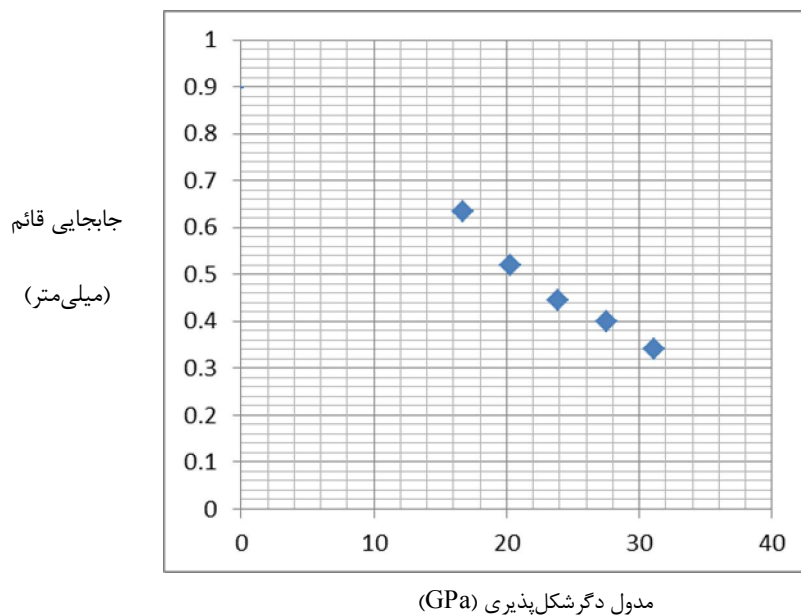
مدول دگرشکل پذیری توده سنگ یکی از مهمترین پارامترهای کنترل کننده در رفتار تغییرشکل پذیری توده سنگ است. تحلیل پارامتری مدول دگرشکل پذیری از لحاظ ماکروسکوپی بیان کننده رفتار تغییرشکل پذیری یک حجم از توده سنگ تحت شرایط باربرداری^۱ است. در این قسمت نیز با تغییر در مقادیر مدول دگرشکل پذیری (در بازه $\pm 30\%$) و بررسی جابه جایی های اتفاق افتاده سعی در پی بردن به میزان حساسیت شرایط پایداری در مقابل تغییر این پارامتر است. در تحلیل پارامتری مدول دگرشکل پذیری این نکته قابل ذکر است که با تغییر مدول دگرشکل پذیری دو پارامتر ورودی در نرم افزار

1-Unloading Condition

FLAC^{3D} یعنی مدول بالک و مدول برشی که از پارامترهای تاثیرگذار مقاومتی هستند، دست خوش تغییر خواهند شد. نتایج این تحلیل در نمودارهای ۵-۸ الی ۵-۱۰ و شکل های ۵-۵۰ الی ۵-۵۲ آورده شده است.

جدول ۵-۸- جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری

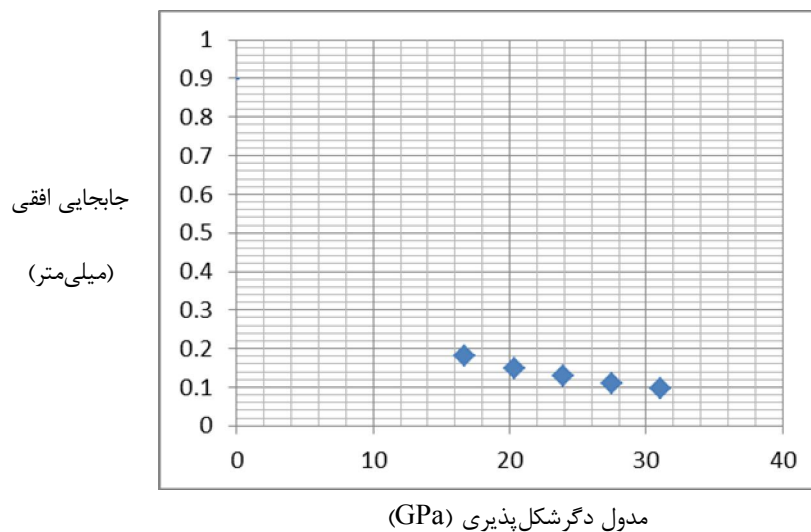
مقادیر مختلف پارامتر مدول دگرشکل پذیری (GPa)	جابجایی قائم سقف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم سقف غار (mm)
۱۶/۷۴۵	۰/۱۱	۰/۹۶	۱	۰/۴۷	۰/۶۳۵
۲۰/۳۳۳	۰/۱	۰/۷۹	۰/۸۱	۰/۳۸	۰/۵۲
۲۳/۹۲۱	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵
۲۷/۵۰۹	۰/۰۸	۰/۵۹	۰/۶	۰/۳۳	۰/۴
۳۱/۰۹۷	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۲۵	۰/۳۴



شکل ۵-۵۰- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری

جدول ۵-۹- جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری

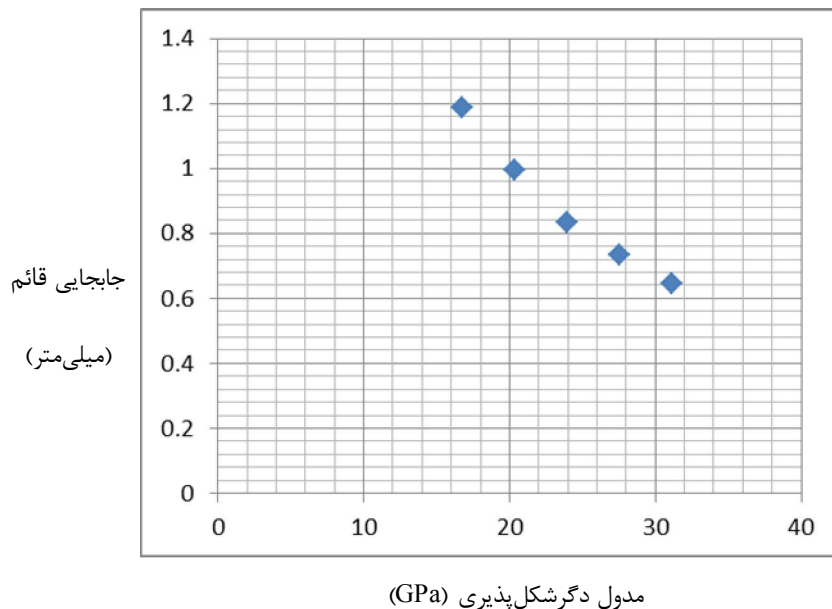
مقادیر مختلف پارامتر مدول دگرشکل پذیری (GPa)	جابجایی افقی دیواره غار در دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره در فاصله ۷۰ متری غار از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی افقی دیواره غار (mm)
۱۶/۷۴۵	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۴	۰/۱۸	۰/۱۸
۲۰/۳۳۳	۰/۰۱	۰/۱۱	۰/۳۳	۰/۱۵	۰/۱۵
۲۳/۹۲۱	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸
۲۷/۵۰۹	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۱۱
۳۱/۰۹۷	۰	-۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۱	۰/۰۹۵



شکل ۵-۵- نمودار جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری

جدول ۵-۱۰- جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری

مقادیر مختلف پارامتر مدول دگرشکل پذیری (GPa)	جابجایی قائم کف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم کف غار (mm)
۱۶/۷۴۵	۱/۳	۱/۸	۱/۲	۰/۴۵	۱/۱۸۷۵
۲۰/۳۳۳	۱/۱	۱/۵	۱	۰/۳۸	۰/۹۹۵
۲۳/۹۲۱	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۲۵
۲۷/۵۰۹	۰/۸	۱/۱	۰/۷۴	۰/۲۹	۰/۷۳۲۵
۳۱/۰۹۷	۰/۷	۰/۹۸	۰/۶۵	۰/۲۵	۰/۶۴۵



شکل ۵-۵۲- نمودار جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر تغییر پارامتر مدول دگرشکل پذیری

بر اساس آنچه که از جداول و نمودارهای این بخش مشاهده می‌شود، تغییرات مدول دگرشکل‌پذیری نسبت به دو پارامتر قبلی بررسی شده، تاثیر بیشتری بر پایداری غار می‌گذارد. البته همان‌گونه که از نمودار شکل ۵-۵۰ این تاثیر در سقف غار بسیار ملموس‌تر از دیواره و کف است. در نتیجه با توجه به بازه تغییرات این پارامتر و همچنین نداشتن دید روشنی از آن پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی نسبت به تعیین مدول دگرشکل‌پذیری آزمایش‌های کامل‌تری صورت گیرد.

۵-۴-۴- تحلیل حساسیت نسبت به تنش‌های توده‌سنگ (K)

به طور کلی در نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی متداول در ژئومکانیک، پارامترهای ورودی به دو دسته کلی خصوصیات توده‌سنگ و شرایط تنش منطقه‌ای تقسیم می‌شوند. در این پروژه پس از تحلیل پارامتری خصوصیات توده‌سنگ، باید تاثیر پارامتر نسبت تنش‌های برجای توده‌سنگ مورد بررسی قرار گیرد. با در نظر گرفتن این موضوع که در این پروژه، آزمایش‌های برجا برای محاسبه نسبت تنش‌ها انجام نشده است، در نتیجه باید این پارامتر به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. مقدار پارامتر نسبت تنش‌ها بر اساس پیش‌فرض نرم‌افزار برابر ۱ در نظر گرفته شده است. حال نیاز است میزان جابجایی‌های صورت گرفته و همچنین میزان گسترش منطقه پلاستیک برای نسبت تنش‌های ۱.۲، ۱.۵، ۱.۷ و ۲ تعیین شوند. در این قسمت میزان جابه‌جایی سقف، دیواره و کف غار با توجه به تغییر مقادیر نسبت تنش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵-۱۱- جابجایی قائم پدید آمده در سقف غار رودافشان پس از برداشت نفت خام بر اثر تغییر نسبت تنش‌ها

مقادیر مختلف نسبت تنش‌های افقی به قائم	جابجایی قائم سقف غار در دهانه (cm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (cm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (cm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (cm)	میانگین جابجایی قائم سقف غار (cm)
۱	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵
۱/۲	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵
۱/۵	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵
۱/۷	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵
۲	۰/۰۸	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۴۴۵

جدول ۵-۱۲- جابجایی افقی پدید آمده در دیواره غار رودافشان پس از برداشت نفت خام بر اثر تغییر پارامتر نسبت تنش‌ها

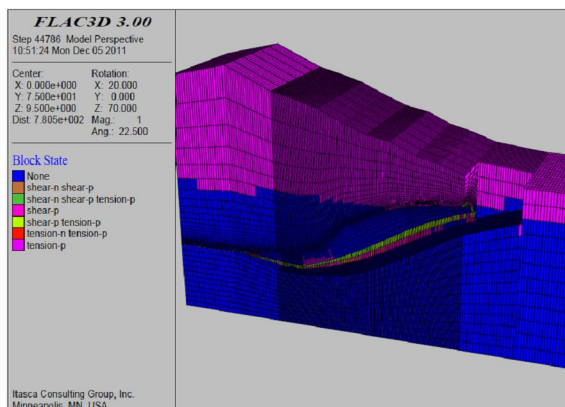
مقادیر مختلف نسبت تنش‌های افقی به قائم	جابجایی افقی دیواره غار در دهانه (cm)	جابجایی افقی دیواره غار از ۷۰ متری غار از دهانه (cm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (cm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (cm)	میانگین جابجایی افقی دیواره غار (cm)
۱	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸
۱/۲	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸
۱/۵	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸
۱/۷	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸
۲	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۲۸

جدول ۵-۱۳- جابجایی قائم پدید آمده در کف غار رودافشان پس از برداشت نفت خام بر اثر تغییر پارامتر نسبت

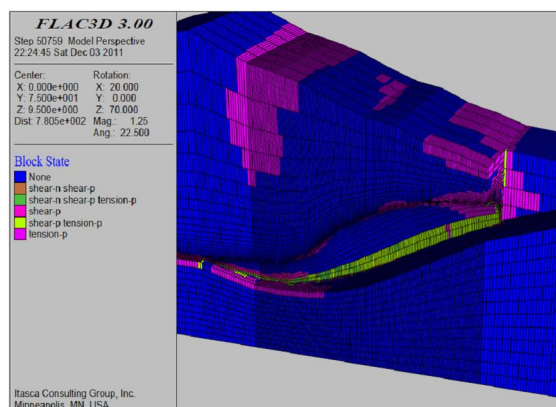
تنش‌ها

مقادیر مختلف نسبت تنش‌های افقی به قائم	جابجایی قائم کف غار در دهانه (cm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (cm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (cm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (cm)	میانگین جابجایی قائم کف غار (cm)
۱	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۲۵
۱/۲	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۲۵
۱/۵	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۲۵
۱/۷	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۲۵
۲	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۳	۰/۸۳۲۵

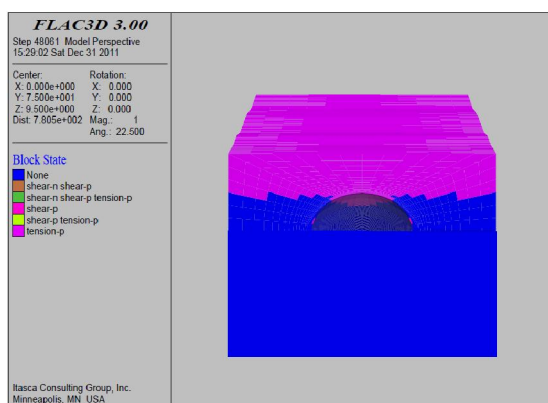
بر اساس آنچه که از جداول این بخش مشاهده شد، تغییرات نسبت تنش‌ها هیچ تاثیری بر جابجایی بدنه غار پس از برداشت نفت خام نمی‌گذارد. شایان ذکر است تعیین نسبت تنش‌ها در منطقه نیازمند تطبیق اطلاعات خروجی از نرم‌افزار و اطلاعات حاصل از رفتارسنجی و انجام آزمایش برجا در آنالیز برگشتی آن می‌باشد. شکل ۵-۵۳ اثر تغییر نسبت تنش‌ها، برگسترش منطقه پلاستیک را نشان می‌دهد.



ب) $K=2$

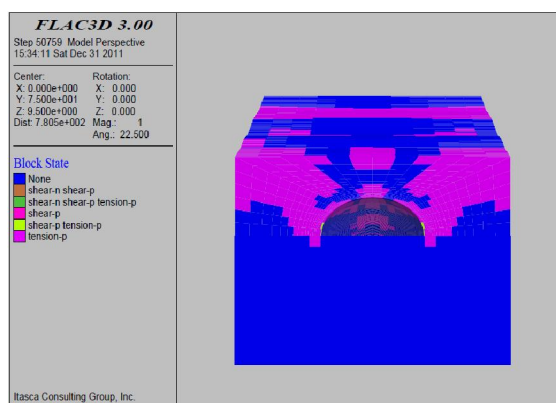


الف) $K=1$



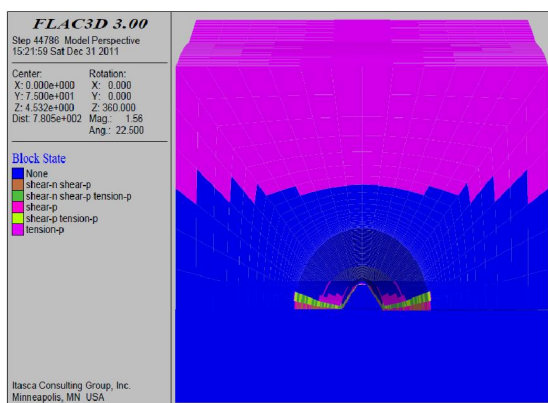
د) مقطعی به فاصله ۱۰ متری از

دهانه غار برای نسبت تنش ۱/۵



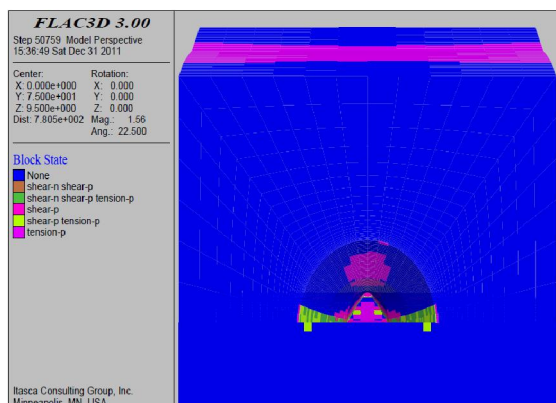
ج) مقطعی به فاصله ۱۰ متری از دهانه غار

برای نسبت تنش ۱



ه) مقطعی به فاصله ۱۰۰ متری از دهانه غار

برای نسبت تنش ۲



و) مقطعی به فاصله ۱۰۰ متری از دهانه غار

برای نسبت تنش ۱

شکل ۵-۳- اثر تغییر نسبت تنش ها (K) ، برگسترش منطقه پلاستیک

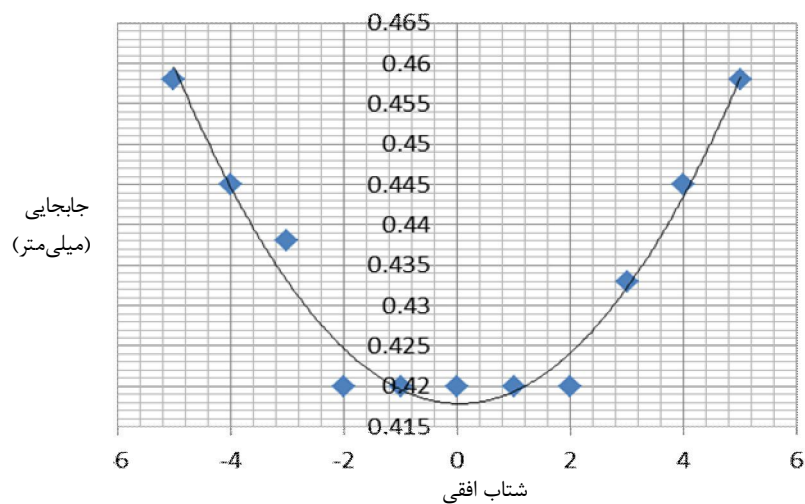
همان گونه که از اشکال ۵-۵۳ مشخص است با افزایش نسبت تنش‌ها، منطقه پلاستیک در نقاط مختلف مدل گسترده می‌شود. به طور مثال در فاصله ۱۰ متری از دهانه غار، گسترش ناحیه پلاستیک در قسمت بالای غار (شکل ۵-۵۳ ج) برای حالت نسبت تنش ۱ به صورت محدود و منطقه‌ای گسترش یافته اما برای حالت نسبت تنش ۱/۵ در همان ناحیه تا سطح زمین (شکل ۵-۵۳ د) گسترده شده است. و یا گسترش ناحیه پلاستیک در مقطعی به فاصله ۱۰۰ متری از دهانه غار برای نسبت تنش ۱ (شکل ۵-۵۳ و) بسیار ناچیزتر از همان مقطع برای نسبت تنش ۲ (شکل ۵-۵۳ ه) است. با توجه به تحلیل عددی مدل، گسترش ناحیه پلاستیک در این حالت منجر به ناپایداری غار نمی‌شود.

۵-۵- تحلیل شبه‌استاتیکی غار رودافشان در برابر زلزله

همان طور که مشخص است زلزله باعث لرزه و ایجاد شتاب در راستاهای مختلف می‌شود. در این تحقیق به منظور تحلیل شبه‌استاتیکی غار رودافشان تاثیر شتاب در راستای افقی مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس با تغییرات شتاب افقی و تاثیرات ناشی از این شتاب در جابجایی نقاطی معلوم بررسی می‌شود، تا حساسیت در شدت زلزله، نسبت به تغییر در پایداری غار سنجیده شود. برای این کار با ثابت در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مورد بررسی غار رودافشان و با تغییر شتاب افقی (از $0/5g$ تا $0/5g$ + به طوری که در هر مرحله شتاب در راستای محور X ها به مقدار $0/1g$ تغییر می‌کند) تاثیر این تغییرات تعیین شده است. تغییرات اتفاق افتاده در جابجایی در نقاط معلومی که در شکل ۵-۸ تعیین شده‌اند در جداول ۵-۱۴ الی ۵-۱۶ آورده شده است.

جدول ۵-۱۴- جابجایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت

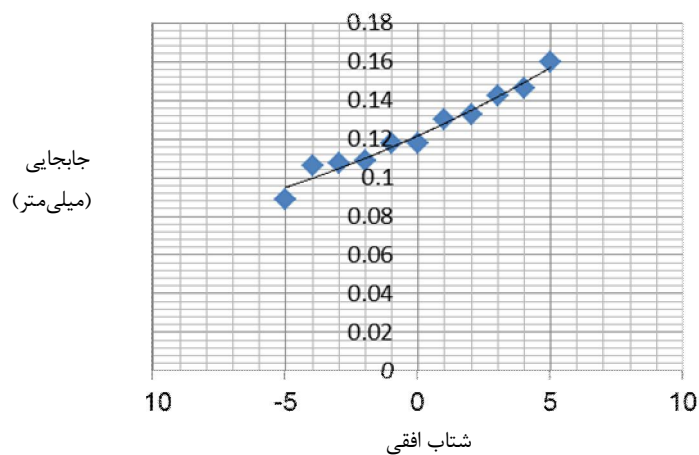
مقادیر مختلف شتاب افقی	جابجایی قائم سقف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم سقف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم سقف غار (mm)
-۰/۵g	۰/۲	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۵۸
-۰/۴g	۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۴۵
-۰/۳g	۰/۱	۰/۶۵	۰/۷	۰/۳	۰/۴۳۸
-۰/۲g	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۲
-۰/۱g	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۲
۰	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۲
+۰/۱g	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۲
+۰/۲g	۰/۰۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۲
+۰/۳g	۰/۱	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۳۳
+۰/۴g	۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۴۵
+۰/۵g	۰/۲	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۳	۰/۴۵۸



شکل ۵-۵۴- نمودار جابجایی پدید آمده در سقف غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت

جدول ۵-۱۵- جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت

مقادیر مختلف شتاب افقی	جابجایی افقی دیواره غار در دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره در فاصله ۷۰ متری غار از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی افقی دیواره غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی افقی دیواره غار (mm)
-۰/۵g	۰/۰۱	۰/۰۴۵	۰/۲	۰/۱	۰/۰۸۹
-۰/۴g	۰/۰۲	۰/۰۴۵	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۱۰۶
-۰/۳g	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۱۰۸
-۰/۲g	۰/۰۲	۰/۰۵۵	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۱۰۹
-۰/۱g	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۱۲	۰/۱۱۸
۰	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۱۲	۰/۱۱۸
+۰/۱g	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۳	۰/۱۳	۰/۱۳
+۰/۲g	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۳	۰/۱۳	۰/۱۳۳
+۰/۳g	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۱۴۳
+۰/۴g	۰/۰۴۵	۰/۰۸	۰/۳۲	۰/۱۴	۰/۱۴۶
+۰/۵g	۰/۰۵	۰/۱	۰/۳۴	۰/۱۵	۰/۱۶

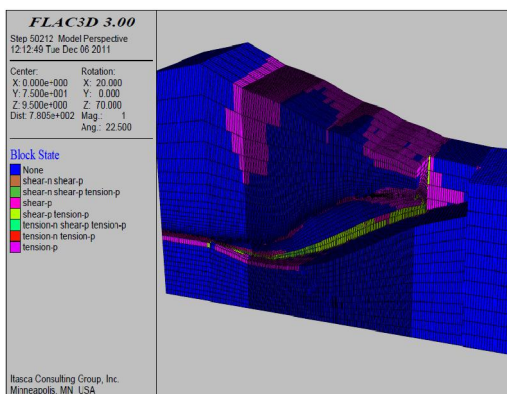


شکل ۵-۵۵- نمودار جابجایی پدید آمده در دیواره غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت

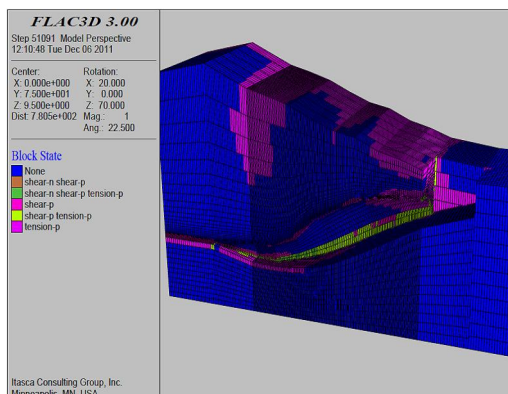
جدول ۵-۱۶- جابجایی پدید آمده در کف غار رودافشان بر اثر اعمال شتاب‌های افقی متفاوت

مقادیر مختلف شتاب افقی	جابجایی قائم کف غار در دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۷۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۳۰ متری از دهانه (mm)	جابجایی قائم کف غار در فاصله ۱۸۰ متری از دهانه (mm)	میانگین جابجایی قائم کف غار (mm)
-۰/۵g	۰/۹۵	۱/۲۵	۰/۸	۰/۳۵	۰/۸۴
-۰/۴g	۰/۸۵	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۴	۰/۸۴
-۰/۳g	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸	۰/۴	۰/۸۴
-۰/۲g	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۸۴
-۰/۱g	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸	۰/۴	۰/۸۴
۰	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸	۰/۴	۰/۸۴
+۰/۱g	۰/۹	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۸۴
+۰/۲g	۰/۹۵	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۸۵
+۰/۳g	۰/۹۵	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۸۵
+۰/۴g	۰/۹۵	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۸۵
+۰/۵g	۰/۹۵	۱/۲۵	۰/۸۵	۰/۳۵	۰/۸۵

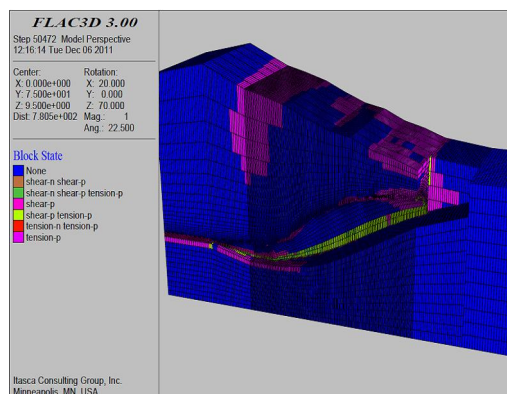
در این قسمت با تغییر در شتاب افقی حاصل از زلزله و بررسی جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده سعی شده میزان حساسیت پایداری غار در مقابل شتاب‌های افقی متفاوت تعیین شود. به این منظور و بر اساس آنچه که از جداول و نمودارهای این بخش مشاهده می‌شود، تاثیر این تغییرات (شتاب‌های افقی مختلف) در سقف، دیواره و کف غار بسیار ناچیز است. این رویداد چندان دور از ذهن نیز نبود زیرا غار رودافشان از زمان به‌وجود آمدنش تاکنون (هزاران سال) در برابر زلزله‌های اتفاق افتاده پایدار مانده است. البته موارد متعددی ناپایداری به ویژه بر اثر کنترل ساختاری در بازدید مشاهده شده است. اما در تحقیق حاضر تنها تحلیل پایداری بر اثر تنش‌های موجود در منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵-۵۶ اثر تغییر شتاب افقی، برگسترش منطقه پلاستیک را نشان می‌دهد.



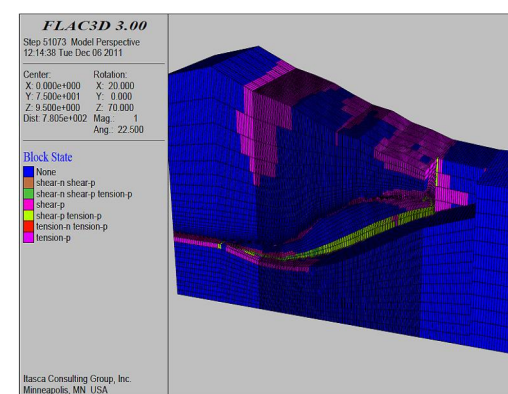
ب) $g = 0.3$



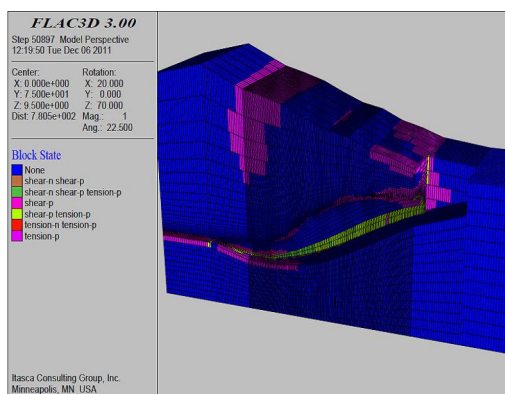
الف) $g = 0.4$



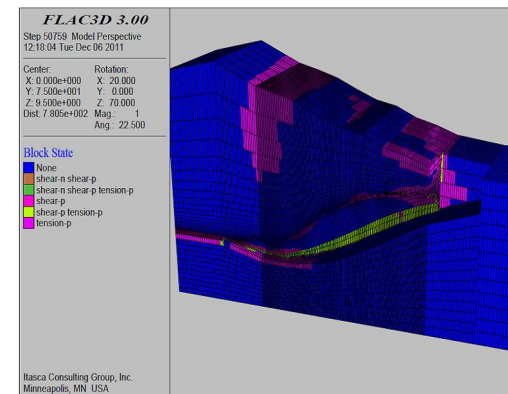
د) $g = 0.1$



ت) $g = 0.2$

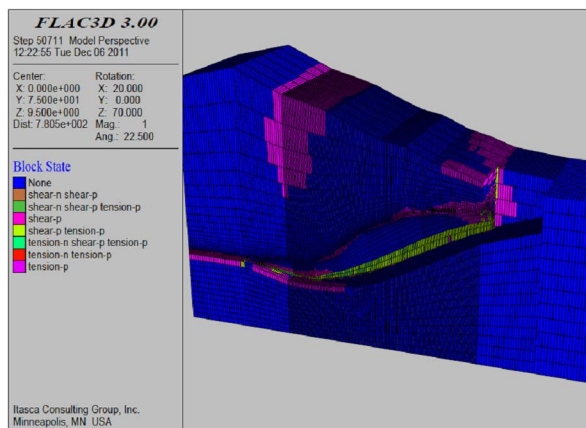


س) $g = 0.1$

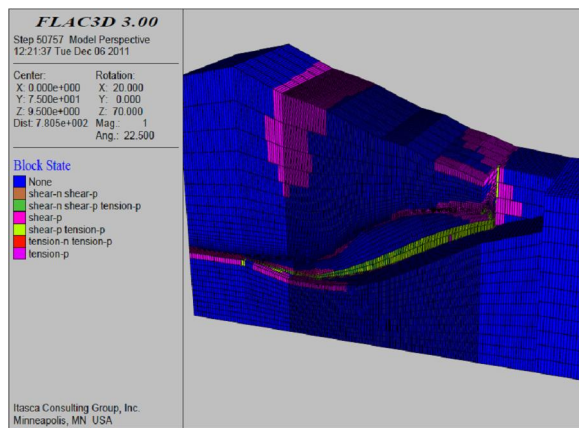


ر) بدون شتاب افقی

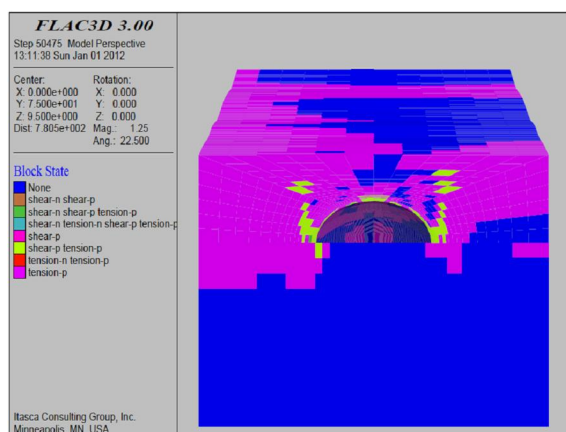
شکل ۵-۵۶- اثر تغییرات شتاب افقی، برگسترش منطقه پلاستیک



ک) $g + 0.3$

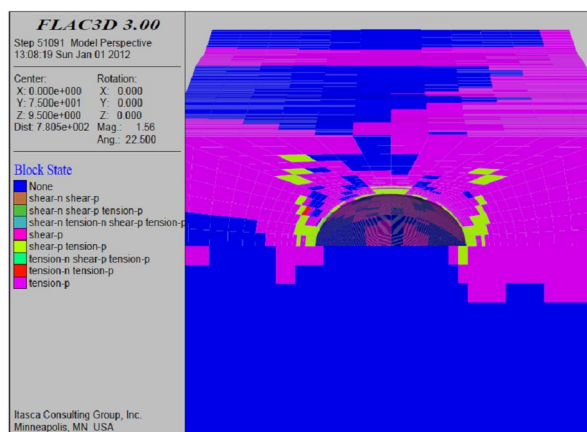


ش) $g + 0.2$

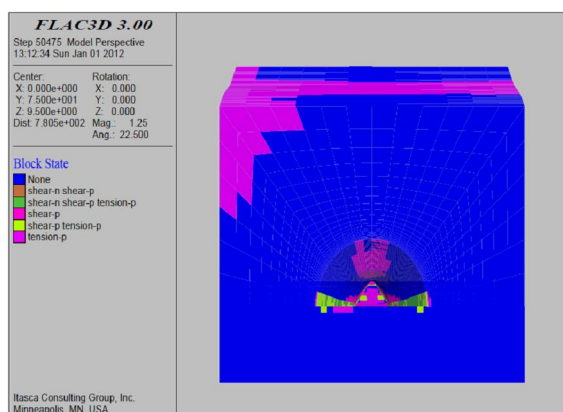


ل) مقطعی از دهانه غار برای مقدار

شتاب $g + 0.4$

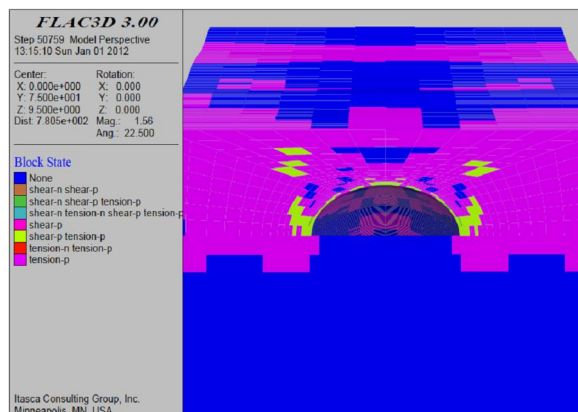


گ) مقطعی از دهانه غار برای مقدار شتاب $g - 0.4$



ن) مقطعی به فاصله ۱۰۰ متری از

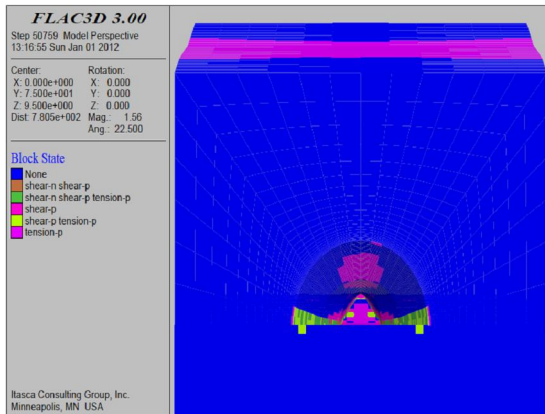
دهانه غار برای مقدار شتاب $g + 0.4$



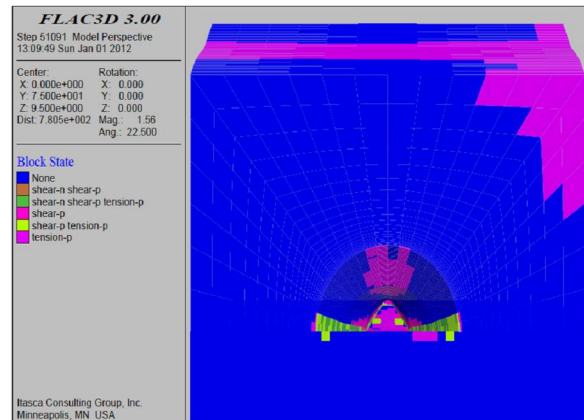
م) مقطعی از دهانه غار برای مقدار بدون

شتاب افقی

ادامه شکل ۵-۵۶- اثر تغییرات شتاب افقی، برگسترش منطقه پلاستیک



ه) مقطعی به فاصله ۱۰۰ متری از دهانه غار برای مقدار بدون شتاب افقی



و) مقطعی به فاصله ۱۰۰ متری از دهانه غار برای مقدار شتاب $0.4g$

ادامه شکل ۵-۵۶- اثر تغییرات شتاب افقی، برگسترش منطقه پلاستیک

۵-۶- جمع بندی

برای تحلیل پایداری غار رودافشان، ابتدا شکل غار رودافشان به منظور مدل سازی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ تصحیح و سپس بر اساس شکل تصحیح شده و پارامترهای مکانیکی موجود، مدل هندسی در نرم افزار مذکور ساخته شد. در مرحله بعد اثر انباشت و برداشت نفت خام در غار رودافشان مورد بررسی قرار گرفت. سپس تحلیل پارامتری نسبت به پارامترهای مختلف همچون زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مدول دگرشکل پذیری و نسبت تنش ها انجام شد. تحلیل پارامتری نشان می دهد که تغییرات دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، بر جابجایی نقاط مختلف غار تاثیر بسیار ناچیزی می گذارند. اما تغییرات مدول دگرشکل پذیری بر خلاف دو پارامتر نام برده تاثیر بیشتری بر جابجایی نقاط مختلف بدنه غار ایجاد می کند. در انتها نیز تحلیل حساسیت نسبت به شتاب های افقی ناشی از زلزله صورت گرفت و مشخص شد تغییرات شتاب بر اثر زلزله، در جابجایی بدنه غار تغییر ناچیزی اعمال کرده و باعث تغییر در ناحیه پلاستیک مدل می شود

فصل ششم:

روش های کاهش نفوذ پذیری و نشست مخزن

۶-۱- مقدمه

ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی زیرزمینی به دو صورت مغارهای سنگی باپوشش و مغارهای سنگی بدون پوشش انجام می‌گیرد. انتخاب هر یک از این روش‌ها بر اساس نوع ماده ذخیره شده، وضعیت ژئومکانیکی توده سنگ، وضعیت آبهای زیرزمینی و دیگر شرایط صورت می‌گیرد. مثلاً گاز نفتی مایع^۱ و نفت خام هم در مغارهای سنگی بدون پوشش^۲ و هم در مغارهای سنگی باپوشش^۳ ذخیره می‌شوند؛ حال آنکه گاز طبیعی مایع^۴ و همچنین گاز طبیعی فشرده^۵ تنها درون مغارهای سنگی باپوشش ذخیره می‌شوند [۲۱]. در فصل حاضر ضمن معرفی تفصیلی دو روش مغارهای سنگی باپوشش و بدون پوشش به بررسی و تحلیل عوامل موثر در روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی پرداخته خواهد شد.

۶-۲- بررسی مسایل ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی بدون پوشش

مغارهای سنگی بدون پوشش برای ذخیره‌سازی محدوده وسیعی از محصولات با فشار بخار پایین همچون نفت خام استفاده می‌شوند. قاعده کلی برای کنترل نشت مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی بدون پوشش، شرایط نگهداری هیدرودینامیکی است [۴۲]. در این روش، برای عدم نشت مواد هیدروکربوری به خارج مغارهای بدون پوشش، وجود سطح ایستایی آب طبیعی و یا مصنوعی مانند پرده آب‌بند اجباری است. مثلاً در کشور نروژ فشار هیدرودینامیکی محصور کننده مغارهای بدون پوشش هرگز نباید کمتر از مجموع بخار فشار ماده هیدروکربوری ذخیره شده و ۲۰ متر ستون آب باشد. مغارهای بدون پوشش علی‌رغم فضای ذخیره‌سازی، شامل قسمت‌های دیگری همچون، خطوط لوله انتقال، خطوط لوله پمپاژ آب، تجهیزات اندازه‌گیری ارتفاع سطح

1 Liquified Petroleum Gas

2 Unlined Rock Caverns

3 Lined Rock Caverns

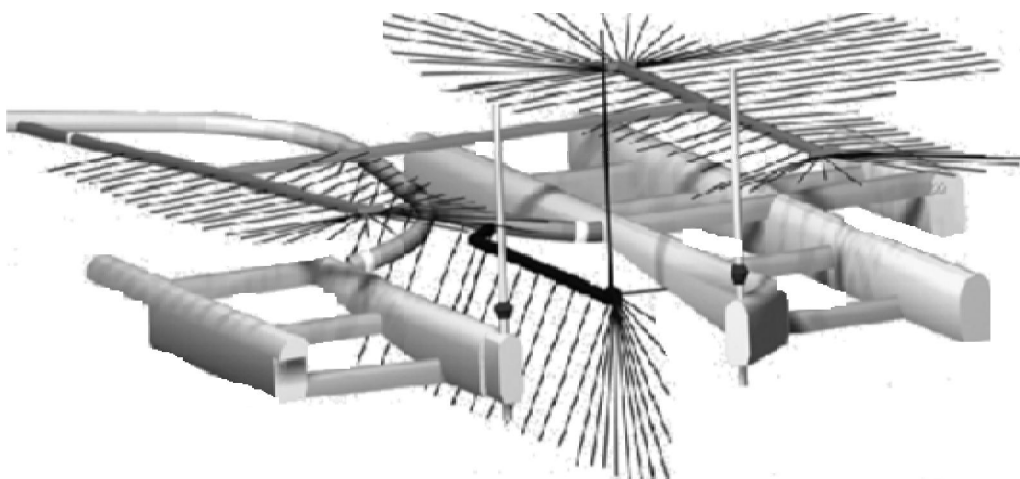
4 Liquified Natural Gas

5 Compresssd Natural Gas

محصول، تاسیسات سطحی، تجهیزات نظارتی، ادوات تصفیه و غیره می‌باشند. آسترهایی هم برای خطوط لوله خروجی و ورودی مغار طراحی و اجرا می‌شود.

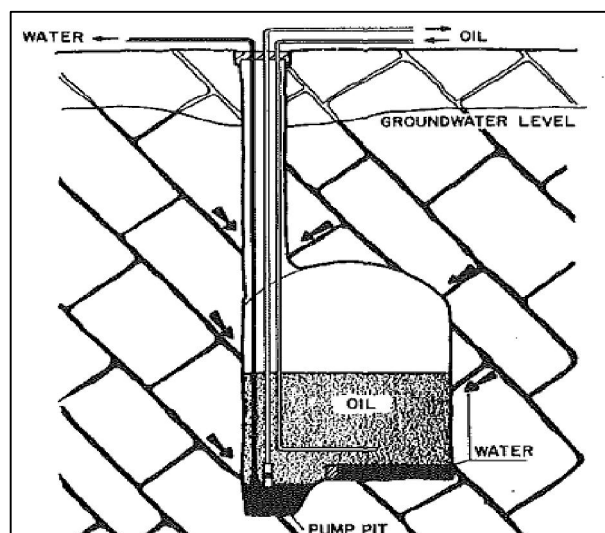
آب‌های نفوذی به داخل مغار نیز ابتدا در محل‌هایی در کف آن، جمع‌آوری شده و سپس به تصفیه‌خانه پمپ می‌شوند. در این مغارها سنگ و یا قطعات فلزی به هیچ وجه نباید در داخل گودال‌هایی که برای پمپاژ مواد ته‌نشین شده تعبیه شده‌اند، بیفتند. زیرا این اتفاق باعث صدمه زدن به پمپ‌ها، قسمت‌های موضعی لوله‌ها (مانند زانوهای لوله‌ها) و یا ابزار کابلی می‌شود؛ بنابراین برای حل این مشکل یک صفحه به عنوان سرند در بالای پمپاژ قرار داده می‌شود. در زمان ساخت این‌گونه مغارها مسیرهای دسترسی، به وسیله‌ی چاه‌هایی است. این مسیرها دارای ساختاری هستند که مانع از خروج گاز به بیرون می‌شود؛ به طوری که قبل از انباشت مواد هیدروکربوری در داخل مغار، توسط بتن مسدود شده (پلاگ‌این^۱)، تا از نشت مواد از داخل این تونل‌ها جلوگیری شود. هنگام تزریق اولیه در ناحیه مسدود شونده تونل، موفقیت تزریق وابسته به محل اتصال سنگ و بتن بعد از خشک شدن بتن در محل انسداد است. به‌خصوص زمانی که ماده ذخیره شده یک ماده شیمیایی غیر از نفت خام باشد. خروجی لوله ورود و نیز ورودی لوله خروج از مغار باید در جایی قرار گیرد که بیشترین گردش ماده ذخیره‌شده را در طی پر یا خالی کردن مغار ایجاد کند [۳۵]. در مواقعی که فشار هیدرودینامیکی اطراف مغار کمتر از حد انتظار است، باید به صورت مصنوعی فشار هیدرودینامیکی اطراف مغار را افزایش داد. این کار با روشی به نام پرده آب‌بند انجام می‌گیرد. سیستم پرده آب‌بند شامل تونل پرده آب و گمانه‌های پرده آب است. این گمانه‌ها که به صورت دسته‌های بابزنی شکل هستند به تونل‌های پرده آب‌بند وصل می‌باشند؛ بطوری که آب از تونل‌های پرده آب‌بند به گمانه‌های پرده آب‌بند ارسال می‌گردد (شکل ۶-۱) [۲۹].

^۱ Plug

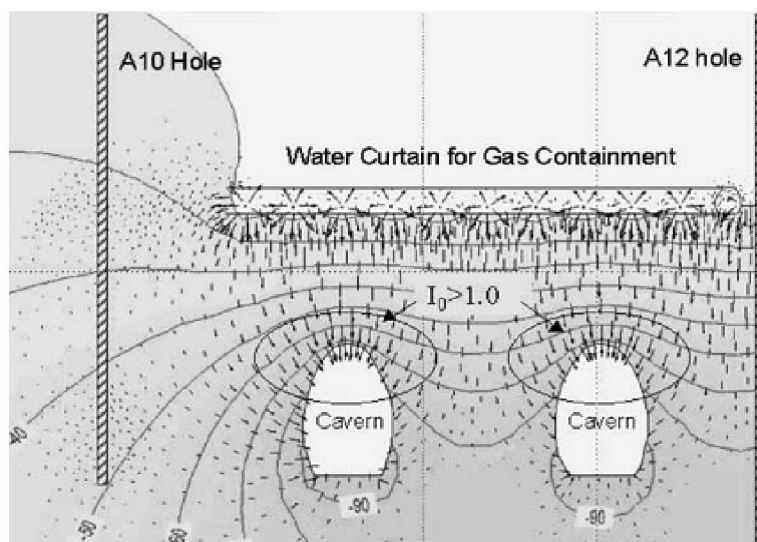


شکل ۶-۱- نمای سه بعدی از تاسیسات پرده آب در مغار ذخیره‌سازی بدون پوشش [۲۹]

آب‌های نفوذی به داخل مغار نیز، در محلی جمع‌آوری شده و از آنجا به سطح زمین پمپاژ می‌شود (شکل ۶-۲). در هنگام ساخت مغار، با انتخاب درست قسمت‌های نفوذپذیر و تزریق سیمان کنترل‌کننده در آن قسمت، نشست آب به صورتی قابل قبولی کنترل می‌گردد [۱۶]. در مدت بهره‌برداری از مغار ذخیره‌سازی ماده هیدروکربوری، گرادیان هیدرولیکی عمودی اطراف مغار باید بزرگتر از یک نگه داشته شود (شکل ۶-۳). این گرادیان با استفاده از گمانه‌های پرده آب در راستای شکستگی‌های اطراف مغار برقرار می‌شود [۱۵].



شکل ۶-۲: نمایش چرخش آب در سیستم ذخیره‌سازی هیدروکربور در مغارهای بدون پوشش [۱۵]



شکل ۳-۶: مقطع عمودی از توزیع جریان هیدرولیکی اطراف مغارهای ذخیره سازی [۱۵]

۶-۲-۱- نوع ماده هیدروکربوری ذخیره سازی در مغارهای بدون پوشش

برای ذخیره سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی بدون پوشش باید شرایطی ویژه از نظر دما و فشار برقرار باشد. مثلاً برای ذخیره سازی موادی با فشار ذخیره سازی بالا همچون CNG به دلیل مقرون به صرفه نبودن تامین فشار هیدرودینامیکی محصورکننده نمی توان از مغارهای سنگی بدون پوشش، استفاده کرد. همچنین دمای ماده ذخیره سازی نباید همچون LNG خیلی پایین باشد زیرا در این دما (حدوداً ۱۶۰-) رفتار توده سنگ اطراف مغار به دلیل قرارگیری در چنین شرایطی، بسیار متفاوت با رفتار قابل انتظار آن می باشد. در کل می توان گفت که مغارهای سنگی بدون پوشش اکثراً برای ذخیره سازی نفت خام، نفتا و دیگر مواد هیدروکربوری که در دما و فشار معمولی به صورت مایع می باشند، مورد استفاده قرار می گیرد.

۶-۲-۲- رشد باکتری ها

همانطور که گفته شد برای کنترل نشست در مغارهای سنگی بدون پوشش از پرده های آب بند استفاده می شود. پرده های آب بند باید قبل از انباشت ماده هیدروکربوری در مغار اجرا شوند. نمونه هایی وجود دارند که نشان می دهند پرده های آبی که بعد از انباشت محصول در داخل مغار اجرا شده اند، به وسیله رشد باکتری ها مسدود شده اند. باکتری های مصرف کننده ماده هیدروکربوری که در مرز بین آب و ماده هیدروکربوری وجود دارند، قسمت های از ماده هیدروکربوری را به پلیمر آلی تبدیل می کنند؛ این ماده لجنی شکل باعث گرفتگی چاه های حفاری شده و بازدهی سیستم پرده آب را کاهش می دهد. این ماده در اغلب مغارهای ذخیره سازی نفت خام و سایر مواد هیدروکربوری اکثرا در بستر آبی (مرز آب و ماده هیدروکربوری در کف مغار) قابل مشاهده می باشند [۳۷].

توانایی حیات و رشد میکرو ارگانیسم ها وابسته به آبی است که در آن قرار دارند. پس باید به دنبال روش هایی بود که سطح مشترک بین محصول و آب کاهش یابد. یکی از این روش ها این است که با ایجاد شیبی به سمت مجراهای باریک موجود در کناره دیواره ها در کف بتنی مغار، ارتباط محصول با آب در کف تونل به مقدار زیادی کاهش می یابد. این شیب اکثرا در راستای طولی مغار ایجاد می شود. در زیر سقف مغار نیز، تاسیسات چتری شکل نصب می گردد، تا آب های چکه ای را جمع آوری و به سمت مجراهای موجود در کف منتقل کنند [۳۷].

۶-۲-۳- ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ و مغار بدون پوشش

در اینجا به روش ذخیره سازی در مغارهای سنگی بدون پوشش پرداخته می شود؛ که به نوبه ی خود روشی کاربردی در کشورهایی همچون سوئد و نروژ به حساب می آید. بحث ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی بدون پوشش در مطالعات و مقالات متعدد، نشان دهنده عملی بودن این روش در دامنه وسیعی از شرایط زمین شناسی متفاوت است. تعدادی از اصول بکار رفته در تعیین مناسب بودن شرایط زمین برای ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون پوشش به اختصار در ادامه ارائه شده است:

- سنگ ها نباید دارای کانی های اکسیژن دار باشند تا هنگام تماس با ماده ذخیره شده در آن حل نشده و با آن واکنش شیمیایی ندهند.

- کیفیت توده سنگ باید به گونه ای باشد که بتوان در آن با روش های معمولی، تونل حفر کرد و در روش های حفاری مختلف نیازی به عملیات زیر نباشد.

الف: اقدامات وسیع و گسترده در تقویت سیستم نگهداری مغار

ب: کنترل آب زیرزمینی با تزریق بیش از اندازه دوغاب سیمان در توده سنگ (به منظور آب بندی)

- شرایط اساسی توده سنگ برای ذخیره سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی بدون پوشش به صورت زیر باشد.

الف: نگهداری و توانایی ذخیره سازی سیال

ب: نگهداری مواد ذخیره شده و جلوگیری از نشت آنها

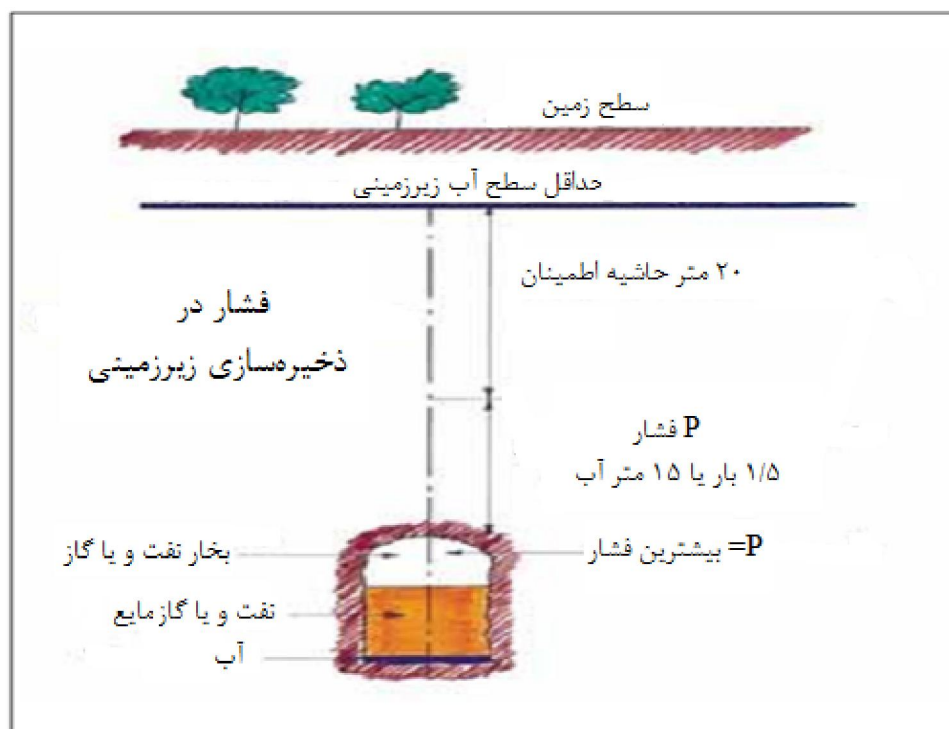
ج: شرایط مناسب زمین و توده سنگ برای ساخت مغار

اصول بالا بر اساس این واقعیت است که اکثر غریب به اتفاق فضاهای ذخیره سازی مواد هیدروکربوری در نروژ به صورت بدون پوشش ساخته شده اند؛ بطوری که هیچ گونه نیازی به پوشش فلزی یا انواع دیگر پوشش های قالبی مانند بتون، فولاد و انواع مشابه نمی باشد [۲۰].

۴-۲-۶- اصول نگهداری مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون پوشش

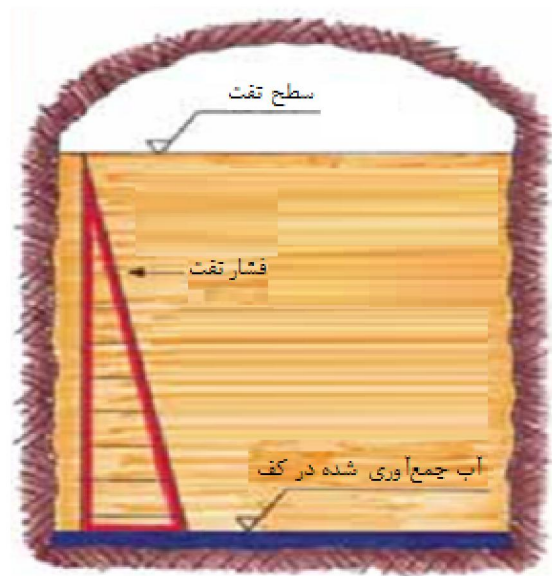
امروزه مغارهای ذخیره سازی نفت خام و برخی از فرآورده های نفتی معمولاً برای فشار بین ۰/۵ تا ۱/۵ بار که در اکثر مواقع مقدار بهینه بوده است، طراحی می شوند. برای بیشینه فشار عملیاتی یعنی ۱/۵ بار (۱۵ متر ارتفاع آب) مغار باید حداقل در عمق ۳۵ متر زیر سطح آب قرار گیرد (شکل ۴-۶) [۳۷].

با وجود یک مغار بسته و فشار بیشینه، داشتن یک بالشتک گاز که بتواند در هنگام تغییر سطح محصول ذخیره شده و در نتیجه تغییر فشار درون مغار انقباض و یا انبساط یابد، ضروری است.



شکل ۴-۶: اصول ذخیره سازی تحت فشار همراه با حاشیه اطمینان [۳۷]

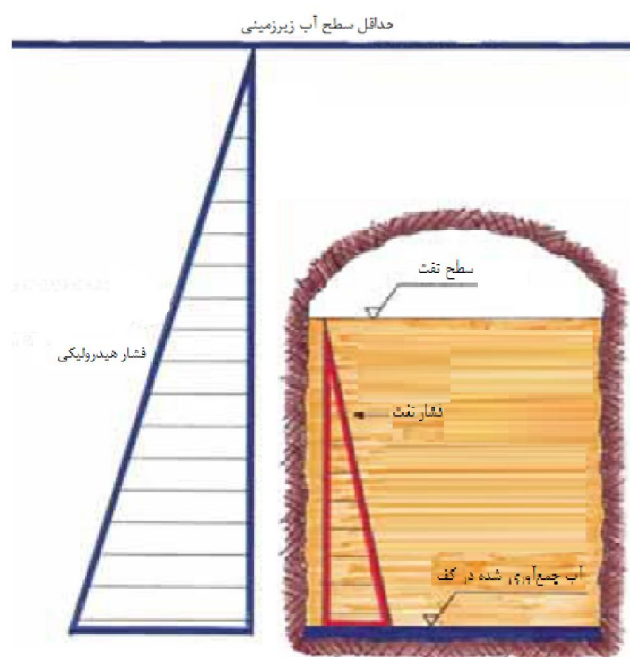
هر چند بخار محصولات نفتی جزء گازهای ایده آل محسوب نمی شود، اما بخار محصولات با فشار بخار پایین تقریباً از قانون گازهای ایده آل تبعیت می کند. محصولاتی با فشار بخار بالا مانند پروپان، به هیچ وجه از قانون گازهای ایده آل تبعیت نمی کنند و زمانی که تغییر کمی در فشار و یا دما رخ دهد، باعث تغییر یا چگالش آنی می شود. به طور کلی می توان گفت هر چه فشار بخار محصول ذخیره شده بیشتر باشد، لازم است در عمق بیشتری زیر سطح آب زیرزمینی ذخیره گردد [۳۷]. در مغارهای بدون پوشش اگر فشار داخلی در سقف برابر با یک فرض شود، فشار داخلی بصورت گرادیانی از سقف تا کف افزایش می یابد (شکل ۵-۶). بر این اساس می توان گفت در مغارهای بدون پوشش، ماده ذخیره شده بر پایداری مغار تاثیرگذار است. فشارهای داخلی ناشی از وزن سیال از داخل به مرزهای مغار فشار وارد می کند و تا حدودی از جابجایی این مرزها بر اثر فشارهای خارجی ایجاد شده، می کاهد [۳۷].



شکل ۶-۵: گرادیان فشارهای داخلی [۳۷]

شرایط لازم برای ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی بدون پوشش در ارتباط با آب عبارتند از:

- مواد باید دارای وزن مخصوصی کمتر از آب یعنی کمتر از 1 gr/cm^3 باشد.
 - مواد ذخیره شده باید در آب نامحلول باشند.
 - سطح آب زیرزمینی باید در کل منطقه ایستا یا پایدار باشد.
 - کیفیت و نفوذپذیری توده سنگ باید برای مغار با دهانه ی معین مناسب باشد.
- پایین تر بودن سطح محصولات داخل مغار نسبت به سطح آب های زیرزمینی از آن نظر مورد توجه است که جریان آرام آب از توده سنگ به داخل مغار باعث جلوگیری از نشت سیال ذخیره سازی شده به خارج از مغار و نیز کنترل خروج بخار گاز و رسیدن آن به سطح زمین می شود. شکل ۶-۶ نمایانگر گرادیان فشار ماده ذخیره سازی شده در داخل مغار و همچنین گرادیان فشار سطح آب زیرزمینی و یا پرده آب بند محصور کننده می باشد [۳۱].



شکل ۶-۶: گرادین فشارهای داخلی و خارجی [۳۷]

آب نفوذ کرده داخل مغار با محصولات مخلوط نمی‌شود، اما در زیر مغار جمع‌آوری شده و سپس به خارج مغار پمپ می‌شود و در نهایت پس از تصفیه، به طبیعت باز گردانده می‌شود [۳۷].

۶-۲-۵- کنترل نشت هیدرودینامیکی

قاعده کلی نشت نفت از مغارهای سنگی بدون پوشش بر اساس یک قانون ساده فیزیکی است. محصول ذخیره‌شده که از آب سبک‌تر هستند، به وسیله آب زیرزمینی که فشاری بالاتر از فشار داخل مغار دارد محصور خواهد شد. در این حالت همیشه آب به داخل مغار نفوذ می‌کند و ماده هیدروکربوری به دلیل فشار هیدرواستاتیکی آب محصورکننده نمی‌تواند به خارج از توده سنگ نفوذ کند. مغارهای سنگی بدون پوشش بر اساس این اصل یعنی کاربرد پرده آب محصورکننده طراحی می‌شوند. فشار بخار مواد هیدروکربوری ذخیره شده در داخل مغارها به عنوان تابعی از سطح تراز ماده درون مخزن‌های مختلف از ۰/۵ تا ۳ بار تغییر می‌کند. بسته به نوع ماده هیدروکربوری، فشار داخل مغار می‌تواند در درازمدت به تدریج افزایش یابد. در این صورت بخشی از

بخارات ناشی از تصعید ماده ذخیره سازی شده در حال افزایش، خارج خواهد شد [۳۳]. بر همین اساس برای هیدروکربورهای مختلف بر اساس دما و فشار ذخیره سازی، روش های متفاوتی وجود دارد. مثلاً گازهایی مانند پروپان ممکن است برای مایع نگهداشتن، به شکل فشار بالا و یا دمای پایین ذخیره شوند. دمای اشتعال نیز در انتخاب روش ذخیره سازی موثر است. برای نمونه در ذخیره سازی موادی با دمای اشتعال پایین مانند نفت خام^۱، بنزین^۲ و نفتا (بنزین سنگین)^۳ باید از ورود هوا به فضای داخل مغار و تشکیل مخلوط های گازی قابل اشتعال جلوگیری به عمل آید. تلاش های اولیه برای ذخیره سازی نفت در مغارهای سنگی بدون پوشش، مربوط به ذخیره سازی نفت سوختی در معادن قدیمی بود که در آن مغارها همراه با یک مسیر تهویه ساخته شده بودند؛ بنابراین هنگامی که درون مغار را با نفت پر می کردند بخارات نفت از داخل مغار خارج می شدند و زمان پمپاژ نفت به خارج، هوا به درون مغار وارد شده تا پایین رفتن سطح نفت و عملاً کاهش فشار در مغار جبران گردد. این روش به شرطی که هیچ گونه ترکیب انفجاری از هوا و بخارهای نفتی در مغار نباشد قابل انجام است [۳۷].

۶-۲-۵-۱- کنترل طبیعی نشست هیدرودینامیکی

بر اساس آنچه که گفته شد ماده هیدروکربوری در داخل مغار، به وسیله جریان مداوم آب زیرزمینی جاری به داخل مغار، که از طریق درزه و شکاف های توده سنگ انجام می شود، محصور می باشد. به طوری که باید سقف مغار در عمقی زیر سطح ایستابی قرار گیرد، به طوری که حداقل فشار بخار داخل مغار برابر فشار آب زیرزمینی باشد. در صورتی که میزان جریان آب زیرزمینی به داخل مغار قابل توجه باشد، لازم است توسط روش های مختلف کاهش نفوذپذیری توده سنگ مانند تزریق بتن، میزان جریان آب ورودی به داخل مغار کاهش داده شود. زیرا این امر باعث افزایش هزینه های جمع آوری و پمپاژ آب ورودی به داخل مغار می شود. در شرایطی هم که فشار آب زیرزمینی مورد نیاز به طور طبیعی قابل تامین نباشد ضروری است با نصب و راه اندازی سیستم پرده آب مصنوعی، فشار آب ورودی به داخل مغار را با احداث تونل های تزریق و چال های مربوطه تامین کرد [۱۸].

1 Crude oil

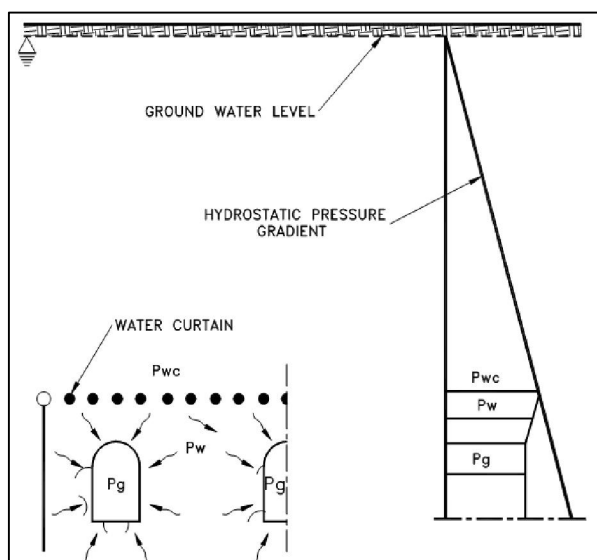
2 Petrol

3 Naphtha

درک بهتر این مفهوم یک مطالعه موردی بررسی می شود. در پروژه ذخیره سازی نفت اکبرگ^۱ نفت با فشاری به اندازه ی ۱۰ متر هیدرواستاتیکی پایین تر از سطح دریا ذخیره می شود. در این پروژه مغارها تقریباً تا بالا پر می شوند و فقط حجم کوچکی از سطح بالای ماده ذخیره شده را هوا اشغال می کند. در بالای مغار یک دریچه ی باریک با سطح مقطع ثابت وجود دارد. این دریچه برای به حداقل رساندن کاهش ارتفاع سطح نفت و نیز خارج شدن بخار نفت تعبیه شده است. هنگامی محصولات نفتی برداشت می شوند که قبل از آن آب کف مغار به بیرون پمپ شوند. این کار برای جلوگیری از آلوده شدن مواد نفتی است. برای حصول اطمینان آب پمپ شده قبل از رهاسازی در محیط می بایست تصفیه شده تا محیط زیست را آلوده نکند [۲۲].

۶-۵-۲- کنترل مصنوعی نشت هیدرو دینامیکی

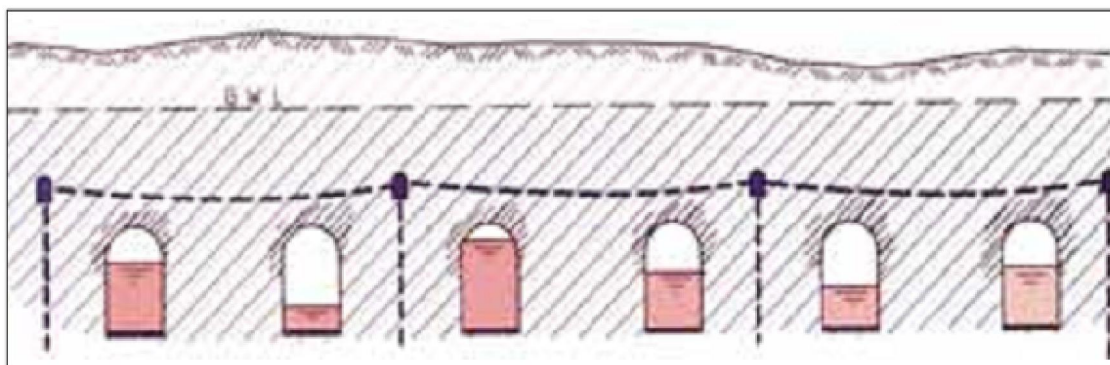
با وجود مجاورت مغار با بخش های آبدار، هدایت هیدرولیکی متغیر در توده سنگ اطراف مغار باعث تغییر هد آب در اطراف مغار می شود. پس مغارهای ذخیره سازی نیازمند پیاده سازی سیستمی موسوم به پرده آب بند در اطراف خود می باشند. شکل ۶-۷ مفهوم کنترل نشت یک مغار سنگی بدون پوشش با پرده آب بند را نشان می دهد.



شکل ۶-۷: نمایش چگونگی کنترل نشت هیدروکربور در مغار سنگی [۲۱]

^۱ Ekeberg

این سیستم از کاهش شرایط اشباع توده سنگ در طول مدت ساخت مغار جلوگیری کرده و باعث توزیع پتانسیلی همگن و پایدار در اطراف مغار ذخیره سازی در شرایط بهره برداری می شود. بطور خلاصه، هدف پرده های آب بند تامین و تغذیه آب مصنوعی در توده سنگ برای افزایش هد آب و برقراری یک پتانسیل هیدرولیکی بالا در مجاورت مغار ذخیره سازی می باشد. لازم به ذکر است فشار در چاه های پرده آب بند باید در حد امکان برابر فشار استاتیکی قبل از ساخت مغار نگه داشته شود [۲۱]. برای یک مغار که در عمق کمی پایین تر از سطح آب زیرزمینی قرار دارد و فشار داخلی آن در حدود فشار اتمسفر است، آب بالای مغار به صورت طبیعی به داخل مغار نفوذ می کند. در زمانی که ذخیره سازی در حالت تحت فشار باشد، نگهداشتن آب بالای مغار در یک سطح مناسب به گونه ای که از بالا آمدن ناگهانی گاز جلوگیری کند، ضروری است. برای این کار، پرده آب افقی از تونل های کوچک بالای مغارها و یا از سطح زمین حفر می شوند (شکل ۶-۸). پرده های آب برای جلوگیری از نشت محصول ذخیره شده به مغارهای مجاور نیز بکار می روند. فاصله بین چاه های پرده های آب بستگی به نفوذ پذیری سنگ و تجربه طراح دارد [۳۷].



شکل ۶-۸: پرده های آب حفر شده از تونل های کوچک بالای مغار [۳۷]

هنگامی که پرده آب تعبیه می شود، آب از بالای سقف مغار به داخل آن نفوذ می کند و توزیع فشار آب زیرزمینی از حالت طبیعی آن خارج می شود. این کار فشار بحرانی گاز درون مغار را افزایش می دهد و در نتیجه، ظرفیت

ذخیره سازی افزایش می یابد. در کل می توان گفت حالت بهینه، برای مغارهای بدون پوشش دارای پرده آب در عمق های خیلی کم اتفاق می افتد [۳۱].

هنگامی که نرخ آب نفوذی از پرده آب به مغارهای مجاور از نرخ نفوذی آب زیرزمینی از اطراف به داخل تونل دسترسی و پرده آب بیشتر باشد، آب می تواند بصورت مصنوعی از یک مخزن سطحی به تونل دسترسی منتقل شود [۲۹].

۶-۲-۶- مسایل زیست محیطی

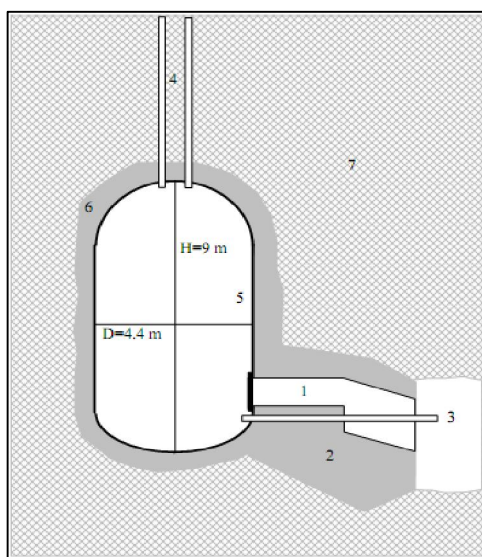
معمولاً در مغارهای سنگی بدون پوشش بر روی پمپ تعبیه شده در داخل مغار، پوششی قرار گرفته است تا از ورود شن و ماسه و ناخالصی های شدید در نفتی که به بیرون پمپ می شود جلوگیری به عمل آید. جنس ماده پوشاننده مغار به نوع و خصوصیات محصول داخل مخزن ارتباط دارد. مثلاً نفت خام قبل از خروج از مخزن دارای حرارت است. این حرارت به دلیل ذخیره سازی نفت خام در یک مدار بسته می باشد و به وسیله یک سیستم گرمایی که در بالای مغار قرار دارد گرم می شود. تا با این حرارت در حالت مومی شکل باقی بماند و تغییر در حالت و فرمول شیمیایی اش ایجاد نشود. لوله کشی در مغار باید به صورتی باشد که امکان چرخش (به هم زدن) نفت خام را بهتر فراهم کند. در آنجا همیشه باید بخار نفت (مواد فرار نفت)^۱ وجود داشته باشد و جز در مواقع اضطراری نیازی به خارج کردن مواد فرار از داخل مخزن نمی باشد. روش معمول جابجایی مواد فرار در مغار پر و خالی کردن مواد داخل مخزن است [۳۵].

اخیراً مغارهای سنگی بدون پوشش برای فرآورده های نفتی مانند گازوئیل، نفت سبک و نفت سنگین طراحی شده اند. برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست تماس بین مواد هیدروکربوری و آب باید به حداقل برسد. مقدار ورود آب به داخل مغار باید از طریق تزریق زیاد و بستن درزه و ترک سنگ به حداقل برسد و همچنین باید از نشست دوغان به داخل پرده آب بند جلوگیری کرد [۳۵].

1 Volatile Oil Components (VOC)

۳-۶- بررسی مسایل ذخیره سازی در مغارهای سنگی با پوششش

ایده ذخیره سازی محصولات نفتی در مغارهای سنگی زیرزمینی در اوایل سال ۱۹۳۰ در سوئد ارائه شد. این ایده زمانی مطرح شد که ارتش سوئد به دنبال روشی به منظور ذخیره سازی مطمئن سوخت در شرایط جنگی بود [۶]. برای اولین بار محصولات نفتی در نروژ هم در طول جنگ جهانی دوم (۱۹۳۹-۱۹۴۵) به صورت زیرزمینی ذخیره شد. دلیل این کار ایمن بودن مخازن زیرزمینی، در برابر بمب گذاری و یا سایر خطرات جنگ بود. در این ذخیره سازی ها دیواره مغار با صفحات فولادی پوشیده شده بود [۲۳]. شکل ۶-۹ یک نمونه از این مغار را نشان می دهد.



شکل ۶-۹: طرح کلی از مغار در واحد آزمایشی صنعتی (۱- لوله دسترسی ۲- سدهای بتنی ۳- محل انباشت آب ۴- محل انباشت گاز ۵- پوشش فولادی (۶ میلی متر) ۶- پوشش های بتنی ۶۰ سانتیمتر ۷- توده سنگ) [۳۰]

در واقع در ابتدا این روش برای رفع نیاز ذخیره سازی در سوئد ابداع گردید؛ اما بعدها اثبات شد که ذخیره سازی گاز در سرتاسر دنیا را می توان به این روش اجرا کرد. در سال ۱۹۹۶-۱۹۹۷ شرکت گاز فرانسه^۱ و شرکت

1 Gaz de France

سیدکرفت^۱ کنسرسیومی در مورد سرمایه گذاری برای ساخت یک مخزن ذخیره سازی نیمه صنعتی (ساخت مغار نیمه صنعتی) تشکیل دادند. حجم زیادی از مطالعات انجام شده؛ با هدف ارزیابی فنی و اقتصادی، ریسک و نیز عوامل بالقوه وابسته پیشنهادی برای پروژه های عملی بود. بر اساس نتایج مثبت حاصل از انجام مطالعات امکان سنجی، کنسرسیوم در سال ۱۹۹۸ تصمیم به ساخت واحد صنعتی LRC گرفت [۳۰].

۶-۳-۱- نوع ماده هیدروکربوری ذخیره شده و عوامل وابسته به آن

مغارهای دارای پوشش اکثراً برای ذخیره سازی مواد هیدروکربوری با حالت گازی همچون گاز طبیعی و پروپان مورد استفاده قرار گرفته اند. البته این بدین معنی نیست که نتوان از این نوع مغارها برای ذخیره سازی نفت خام و یا دیگر فرآورده های مایع استفاده کرد. آنچنان که حدود ۵۰ سال پیش در کشور نروژ مغار دارای پوششی برای ذخیره سازی نفت خام ساخته شده است.

دلیل اینکه اکثر ذخیره سازی های نفت خام و یا دیگر فرآورده های مایع در مغارهای بدون پوشش انجام گرفته، این است که کشورهای پیشرو در صنعت ذخیره سازی همچون سوئد، نروژ و فنلاند دارای ساختار زمین شناسی هستند که در آن سطح آب زیرزمینی بالا بوده و جنس سنگ ها محکم و کم درزه می باشد. به همین دلیل برای ذخیره سازی مواد هیدروکربوری مایع از روش بدون پوشش استفاده می کنند. اما در ذخیره سازی مواد هیدروکربوری گازی به دلیل فشار بالای داخل مغار و یا درجه حرارت پایین روش بپوشش را مورد استفاده قرار می دهند. مثلاً در پروژه آزمایشی LRC که در سوئد انجام گرفته، گاز داخل مغار با فشاری معادل ۲۰۰ بار ذخیره شده است.

حال برای کشورهایی همچون ایران که در ناحیه ای خشک و کم آب قرار گرفته اند؛ ذخیره سازی مواد هیدروکربوری مایع (به دلیل عدم تامین آب مورد نیاز برای روش بدون پوشش و همچنین پیچیدگی دانش فنی و تکنولوژی کنترل نشست) به روش بپوشش، روشی مناسب تر به نظر می رسد. آنچنان که کشور عربستان (که

1 Sydkraft

مانند ایران در یک ناحیه‌ی کم آب قرار دارد) دارای پنج سایت ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری مایع با استفاده از فناوری مغارهای سنگی دارای پوشش می‌باشد.

۶-۳-۲- ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ و نحوه ساخت مغار در آن

ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای باپوشش به دلیل وجود پوشش بر روی محیط مغار، وابستگی کمتری از سطح آب زیرزمینی و وجود درزه و ترک در توده‌سنگ دارد. در این روش پوشش روی دیواره مغار، نقش اصلی را در کنترل نشت ایفا می‌کند. در نهایت می‌توان گفت به دلیل وجود پوشش، روش ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای باپوشش دارای مشکلات زیست‌محیطی کمتری نسبت به مغارهای بدون پوشش است. همچنین پوشش بر روی دیواره مغار باعث می‌شود تا این روش ذخیره‌سازی وابستگی کمی به شرایط زمین‌شناسی داشته باشد.

۶-۴- انتخاب روش مناسب به منظور کنترل نشت در غار رودافشان

انتخاب تکنولوژی کنترل نشت ماده هیدروکربوری، یکی از مهمترین سوالات اصلی یک پروژه ذخیره‌سازی ماده هیدروکربوری در مغارهای سنگی است. این انتخاب به مجموعه‌ای از مسایل فنی مهندسی مرتبط می‌شود که شامل قوانین زیست محیطی، شرایط توده‌سنگ از نظر مقاومت، درزه‌داری، نفوذپذیری، وضعیت آب زیرزمینی و از همه مهم‌تر، نوع ماده هیدروکربوری ذخیره شده (فشار درون مخزن) است. پیچیده بودن این فرآیند و تعدد عوامل موثر در این تصمیم‌گیری، ضرورت تهیه یک الگوریتم برای انتخاب روش‌های ذخیره‌سازی را بیش از پیش روشن می‌سازد. در این قسمت برای انتخاب روشی مناسب از بین مغارهای سنگی باپوشش و بدون پوشش نیاز است ابتدا با مزایا و معایب این دو روش بررسی شده و در ادامه برای درک بهتر انتخاب روش مناسب در شرایط مختلف یک الگوریتم ارائه می‌شود.

۶-۴-۱- معایب و مزایای مغارهای سنگی باپوشش و بدون پوشش

انتخاب روشی مناسب به منظور کنترل نشت در غار رودافشان نیازمند آشنایی کامل با نقاط ضعف و قوت روش های مغارهای سنگی باپوشش و بدون پوشش است. برای مقایسه راحت تر این دو روش نسبت به هم، در جدول ۶-۱ مزایا و معایب این دو روش آورده شده است.

جدول ۶-۱: مزایا و معایب روش های URC و LRC [۱۰]

مزایا	معایب	
(۱) از نظر هزینه ذخیره سازی قابل مقایسه با مخازن سطحی	(۱) پیچیدگی تکنولوژی کنترل نشت در این روش	مغارهای سنگی بدون پوشش (URC)
(۲) به دلیل عدم فشار بالا احتمال حادثه کمتر از LRC	(۲) هزینه بالای آماده سازی و عملیات بهره برداری	
(۳) برای ذخیره سازی موادی همچون نفت خام در شرایط زمین شناسی که، سنگ مقاوم بوده و نیز سطح آب زیرزمینی بالا باشد روشی مناسب است.	(۳) دارای مشکلات زیست محیطی به دلیل احتمال نشت مواد به خارج از مغار و یا آلودگی آب به دلیل ورود آن به داخل مغار	
(۴) به علت زیرزمینی بودن، مقاوم در برابر حملات هوایی و یا سایر حوادث مانند سیل	(۴) وابستگی زیاد به شرایط زمین شناسی مانند شرایط ژئومکانیکی و نیز سطح آب های زیرزمینی	
(۵) سرعت برداشت مناسب	(۵) احتمال افت ماده ذخیره سازی شده به علت نشت	
(۶) بومی بودن احداث فضاهای بزرگ زیرزمینی	(۶) احتمال ریزش سنگ از روی دیواره به داخل	
(۱) توانایی ذخیره سازی مواد در فشار بالا	(۱) هزینه اولیه به دلیل ساخت چندین لایه بر روی دیواره مغار بالا است	مغارهای سنگی باپوشش (LRC)
(۲) به علت عدم تماس با محیط بیرون دارای مشکلات زیست محیط ناچیز است.	(۲) منحصر بودن تجربه و دانش فنی تنها در بین چند کشور	
(۳) وابستگی کم به عوامل زمین شناسی	(۳) قرار گیری در عمق پایین تری نسبت به روش URC برای ذخیره سازی گاز و یا مایع با دمای پایین	
(۴) قابلیت ذخیره سازی انواع بیشتری از مواد هیدروکربوری	(۴) به دلیل فشار بالا در ذخیره سازی برخی مواد هیدروکربوری احتمال وقوع حادثه	
(۵) بومی بودن احداث فضاهای بزرگ زیرزمینی	(۵) مدیریت چنین پروژه های مشکل است	

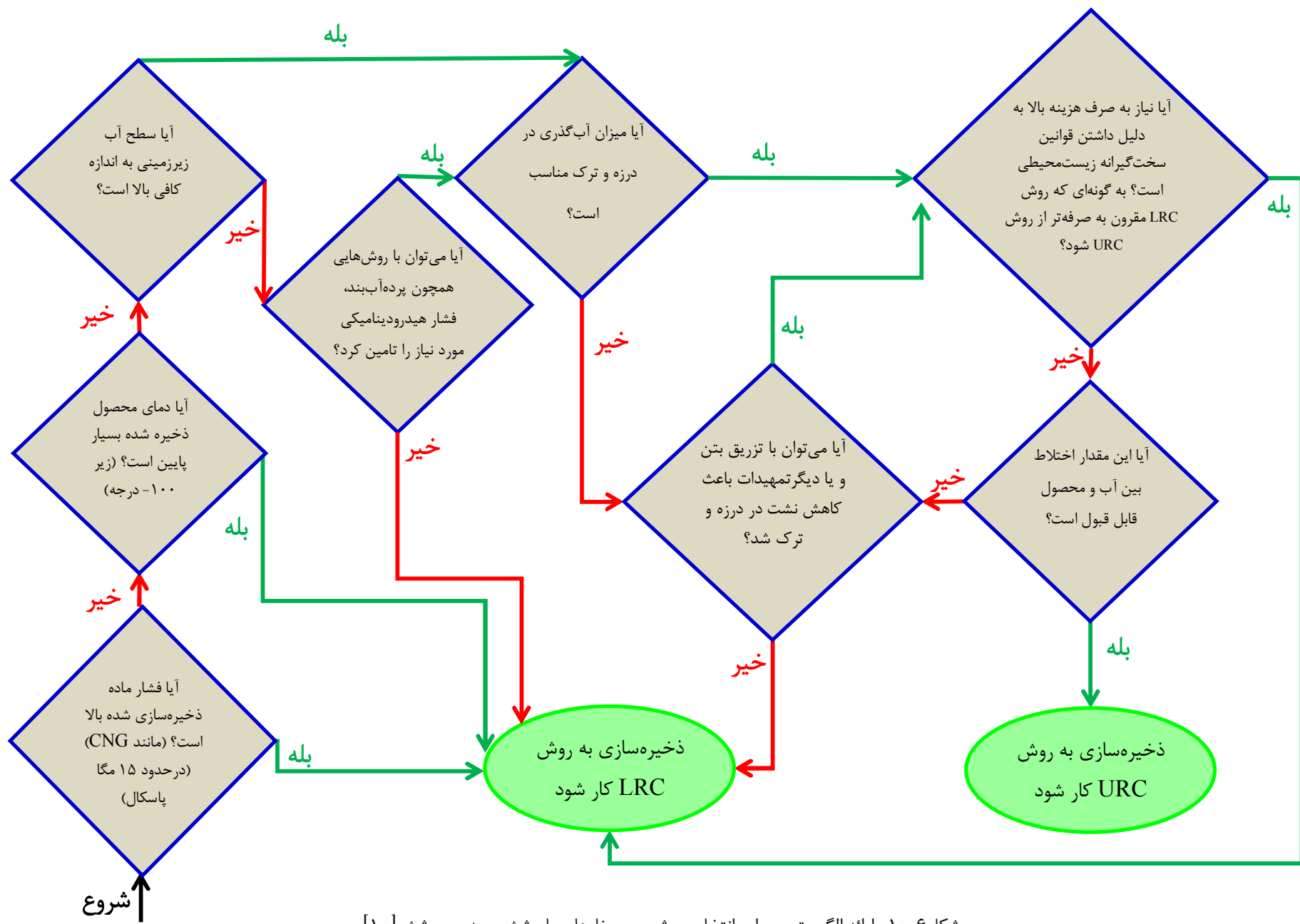
۶-۵-ارائه الگوریتمی برای انتخاب روش بین مغارهای باپوشش و بدون پوشش

در الگوریتمی که در شکل شماره ۶-۱۳ نشان داده شده، فرض بر این است حجم مشخصی از یک ماده هیدروکربوری معین در یک مغار سنگی در اعماق متوسط (کمتر از ۲۵۰ متر) ذخیره سازی می شود. با کمک این

الگوریتم با توجه به بررسی پارامترهای مختلف بین دو روش URC و LRC گزینه مناسب پیشنهاد می شود. نحوه کار این الگوریتم بدین صورت است که:

نخست باید معیار اول با عنوان " آیا فشار ماده ذخیره سازی شده بالا است؟ (مانند CNG) (در حدود ۱۵ مگا پاسکال) " کنترل شود. در صورت مثبت بودن جواب این معیار (بله) باید برای ذخیره سازی، از روش LRC استفاده شود. زیرا همانطور که در فصول قبلی گفته شد به دلیل عدم مقرون به صرفه بودن تامین فشار بالای آب محصور کننده مغار، روش LRC به روش URC ترجیح داده می شود. اما در صورت منفی بودن جواب معیار اول (خیر)، الگوریتم معیار دوم را با عنوان " آیا دمای محصول ذخیره شده بسیار پایین است (زیر ۱۰۰- درجه) " را بررسی می کند. در این مرحله در صورت پایین بودن بیش از حد دمای ماده ذخیره سازی (بله) مانند روش قبلی الگوریتم روش LRC را پیشنهاد می دهد. اما در شرایطی که دمای ماده ذخیره سازی خیلی پایین نباشد (خیر) معیار سوم با عنوان " آیا سطح آب زیرزمینی به اندازه کافی بالا است " کنترل می شود. این معیار جزء ارکان اساسی روش URC است. در صورتی که سطح آب زیرزمینی مناسب باشد (بله) معیار چهارم با عنوان " آیا میزان آب گذاری در درزه و ترک مناسب است؟ " مورد بررسی قرار می گیرد. اما اگر سطح آب زیرزمینی پایین باشد (خیر) معیار جدیدی که معیار پنجم می باشد با عنوان " آیا می توان با روش هایی همچون پرده آب بند، فشار هیدرودینامیکی مورد نیاز را تامین کرد؟ " بررسی می شود. در صورت منفی بودن جواب این معیار (خیر) الگوریتم، روش LRC برای ذخیره سازی پیشنهاد می دهد. اما اگر بتوان با سیستم آب بند، پایین بودن کمبود فشار هیدرودینامیکی را جبران کرد (بله) معیار پنجم نیز مانند معیار سوم به معیار چهارم منتهی می شود. در معیار چهارم، که همانند معیار سوم جزء ارکان اساسی روش URC است، میزان درزه و ترک موجود در سنگ بررسی می شود و در صورت مناسب بودن سنگ (بله) معیار ششم با عنوان " آیا نیاز به صرف هزینه بالا به دلیل داشتن قوانین سخت گیرانه زیست محیطی است به گونه ای که روش LRC مقرون به صرفه تر از روش URC شود " کنترل می شود. اما در صورت منفی بودن (خیر) معیار چهارم به معیار هفتم با عنوان " آیا می توان با تزریق بتن

باعث کاهش نشست شد" بررسی می شود، در واقع این کار با استفاده از روش های بهسازی زمین مانند تزریق دوغاب و انجماد توده سنگ انجام می گیرد. حال پس از کنترل این معیار در صورت منفی بودن جواب (خیر) ، الگوریتم روش LRC را برای ذخیره سازی پیشنهاد می دهد؛ اما در صورتی که بتوان با تزریق بتن باعث کاهش نشست شد (بله) معیار هفتم نیز مانند معیار چهارم به معیار ششم ختم می شود. در معیار ششم اگر نیاز به صرف هزینه بالا به دلیل داشتن قوانین سخت گیرانه زیست محیطی نباشد (خیر) معیار هشتم با عنوان "آیا این مقدار اختلاط بین آب و محصول قابل قبول است" کنترل می شود. اما در صورت مثبت بودن (بله) جواب معیار ششم، الگوریتم روش LRC را برای ذخیره سازی پیشنهاد می دهد. در بررسی معیار هشتم اگر که مقدار اختلاط بین آب و محصول غیر قابل قبول باشد (خیر) این معیار به معیار هفتم برمی گردد؛ اما در صورت قابل قبول بودن میزان اختلاط آب و ماده هیدروکربوری (بله) الگوریتم، روش URC را برای ذخیره سازی پیشنهاد می دهد. در شکل شماره ۶-۱۰ نمای فلوچارتی این الگوریتم نمایش داده شده است.

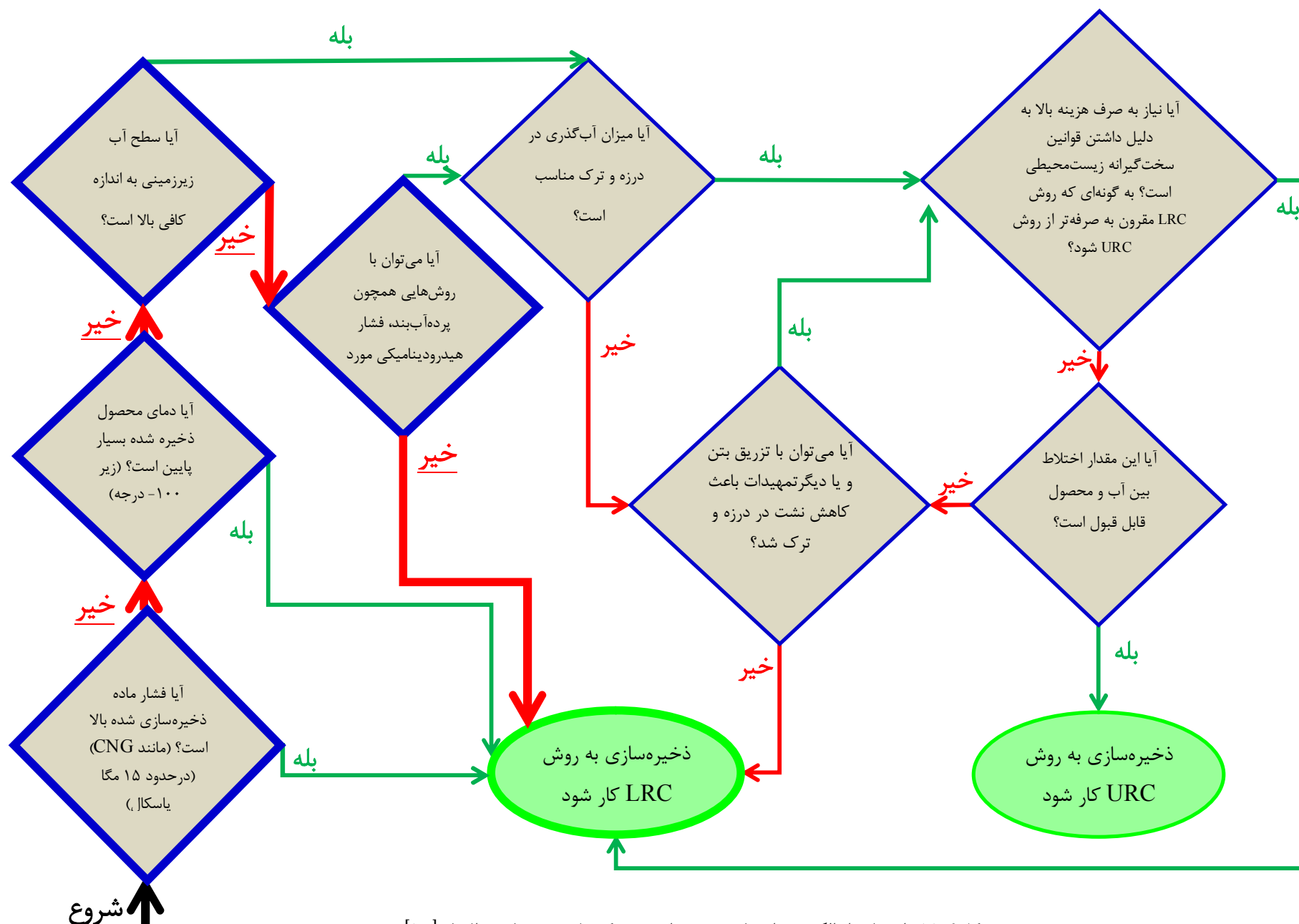


شکل ۶-۱۰- ارائه الگوریتمی برای انتخاب روش بین مغارهای باپوشش و بدون پوشش [۱۰]

۶-۵-۱- استفاده از الگوریتم انتخاب روش برای نحوه کنترل نشت غار رودافشان

برای انتخاب روشی مناسب به منظور کنترل نشت غار رودافشان نیاز به یادآوری دو نکته وجود دارد. اول اینکه غار رودافشان غاری خشک محسوب می شود (بر اساس مطالب ارائه شده در قسمت ۳-۲-۲ فصل سوم) و ثانیاً ماده هیدروکربوری ذخیره سازی شده، نفت خام است. این بدین معنی است که دما و فشار ذخیره سازی در حدود دما و فشار محیط می باشد. حال نحوه انتخاب روش مناسب، بر اساس الگوریتمی که در شکل ۶-۱۳ آمده است به صورت زیر خواهد بود:

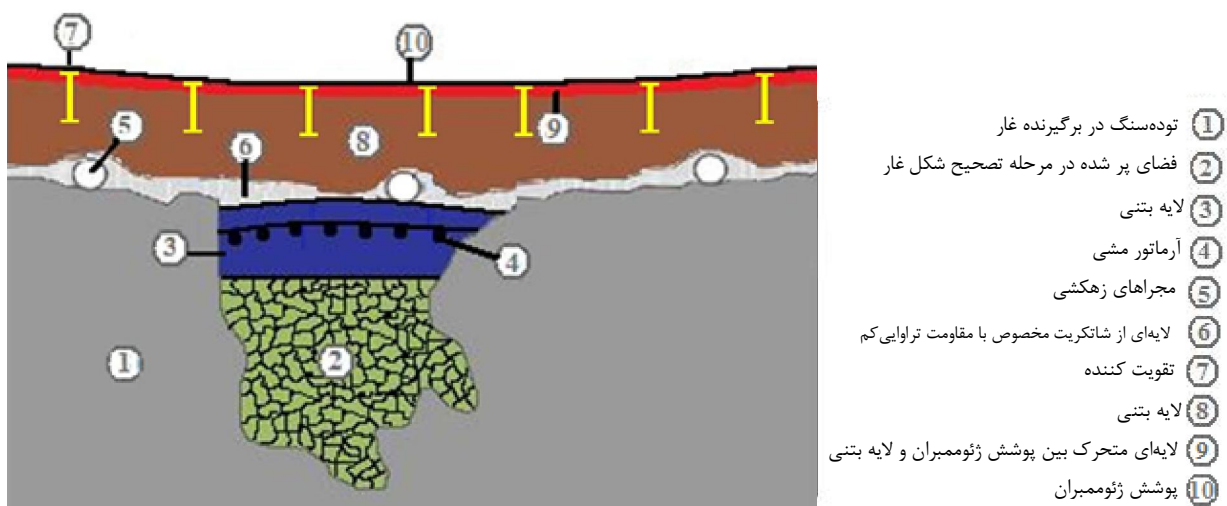
نخست باید معیار اول با عنوان "آیا فشار ماده ذخیره سازی شده بالا است؟ (در حدود ۱۵ مگا پاسکال)" کنترل شود. در این مرحله به دلیل اینکه ماده هیدروکربوری ذخیره سازی، نفت خام بوده و نفت خام دارای فشار ذخیره سازی در حد فشار محیط است؛ جواب الگوریتم منفی است. بنابراین باید معیار دوم با عنوان "آیا دمای محصول ذخیره شده بسیار پایین است (زیر ۱۰۰- درجه)" بررسی شود. در این مرحله نیز به دلیل اینکه دمای ذخیره سازی نفت خام تقریباً برابر دمای محیط بوده؛ جواب الگوریتم منفی است و باید معیار سوم با عنوان "آیا سطح آب زیرزمینی بالا است" کنترل شود. این معیار جزء ارکان اساسی در روش URC است. در بررسی این معیار بر اساس قسمت ۳-۲-۲ در فصل سوم، جواب الگوریتم منفی (خیر) است. پس در گام بعدی نیاز است معیاری با عنوان "آیا می توان با روش هایی همچون پرده آب بند، فشار هیدرودینامیکی مورد نیاز را تامین کرد؟" بررسی شود. در این مرحله نیز به دلیل خشک بودن غار رودافشان و عدم مقرون به صرفه بودن تامین فشار هیدرودینامیکی به وسیله روش پرده آب بند جواب الگوریتم منفی (خیر) است و در نتیجه الگوریتم، روش LRC برای ذخیره سازی پیشنهاد می دهد. در شکل شماره ۶-۱۱ نمای فلوچارتی از انتخاب روش کنترل نشت غار رودافشان به وسیله الگوریتم نمایش داده شده است.



شکل ۶-۱۱- استفاده از الگوریتم انتخاب روش برای نحوه کنترل نشت غار رودافشان [۱۰]

۶-۶- طراحی پوشش مخزن

همان طور که مشخص شد ذخیره سازی در غار رودافشان، باید به روش LRC انجام گیرد. در این روش، پوشش روی دیواره، سقف و کف غار باعث جلوگیری از نشت نفت خام به بیرون از مخزن می شود. طراحی پوششی که انجام گرفته، نتیجه مطالعه بر روی کارهای مختلف است (شکل ۶-۱۲). این شکل لایه های مختلف را بر اساس اختلاف جنس مواد و ترکیبشان نشان می دهد. در واقع ساختار پوشش بر دیواره، سقف و کف غار بر اساس برهم کنش لایه های مختلف طراحی شده است.



شکل ۶-۱۲: ساختار اصلی دیواره غار رودافشان [۹۸]

توضیح هر یک از شماره های شکل بالا به صورت زیر می باشد:

(۱) توده سنگ محصور کننده غار می باشد.

(۲) فضایی از غار که برای ذخیره سازی مناسب نبوده و در مرحله تصحیح هندسی، به وسیله سنگ های واریزه ای برداشت شده از کف غار پر شده است.

۳) لایه بتنی که حدواسط بین فضای پر شده و لایه شاتکریت با مقاومت تراوایی کم می باشد. این لایه به صورت قوسی است و از اهداف اصلی آن توزیع یکنواخت تنش می باشد [۹۸].

۴) یک آرماتور مشی بهم پیوسته در لایه بتونی است که باعث توزیع کرنش های مماسی در درزه های بسیار کوچک بتن می شود [۹۸].

۵) سیستم زهکشی که شامل مجراهای زهکشی می باشد. این مجراها با زاویه ی مایل نسبت به درزه های افقی و قائم در بتون و سنگ قرار دارند. وجود سیستم زهکشی باعث کاهش فشار آب وارد بر لایه ژئوممبران، در هنگام کاهش فشار داخل غار می شود. همچنین در طی عملیات با توجه به فشار آب مجراهای زهکشی می توان از فشار درون غار مطلع شد. باید توجه داشت که سطح آب پشت غار نباید بالا بیاید و باید بطور مداوم زهکشی انجام گیرد [۹۸].

۶) یک لایه شاتکریت مخصوص با مقاومت تراوایی کم، که بر سطح توده سنگ پاشیده شده است. هدف این لایه فراهم کردن مقدمات سیستم زهکشی است که باعث بهبود تماس آب در سیستم زهکشی شود. همچنین این لایه باعث کاهش در هم رفتگی بین لایه بتنی و سطح توده سنگ است [۹۸].

۷) تقویت کننده^۱ وسیله ای برای چسباندن ژئوممبرن به بتن است. شکل ۶-۱۳ چند نمونه از تقویت کننده را نشان می دهد [۸۷].

1 stiffer



شکل ۶-۱۳- چند نمونه از تقویت کننده [۸۷]

۸) لایه بتنی لایه‌ای حدواسط بین پوشش ژئوممبران و توده سنگ می‌باشد. از اهداف اصلی تقسیم یکنواخت تغییر شکل می‌باشد. همچنین بتن‌پاشی می‌تواند باعث فراهم شدن سطحی هموار برای پوشش ژئوممبران باشد [۹۸].

۹) این لایه، لایه‌ای متحرک بین لایه بتن و پوشش ژئوممبران بوده و هدف اصلی آن کاهش اصطکاک است. اصطکاک‌های ثانویه باعث جلوگیری از فرسودگی ژئوممبران شده و همچنین سطح بتن را در برابر نشت نفت خام آب‌بندی می‌کند. این لایه از جنس ژئوتکستایل (که بر پایه پلی‌استر و پلی‌پروپیلن و ترکیبی از سایر مواد پلیمری) است [۸۸].

۱۰) در واقع می‌توان گفت از دلایل نشت مخزن‌ها اغلب کهنگی، سوراخ شدگی بر اثر عوامل مکانیکی و خوردگی بر اثر عوامل شیمیایی است. این پدیده به نوبه‌ی خود عواقب ویرانگر زیست‌محیطی و منفی اقتصادی را در پی دارد. همانطور که اشاره شد از جمله‌ی کارکردهای ژئوسنتتیک، نقش پوششی آن در مخازن محتوی مواد شیمیایی چون نفت و مواد مشتق شده از آن است. ژئوسنتتیک خاص بر پایه

ترکیبی از ژئوتکستایل و ژئوممبران بر اساس ویژگی های زیر می توانند نقش خود را به عنوان یک عایق به خوبی ایفا کنند؛

- استحکام و دوام در برابر عوامل مکانیکی چون سوراخ شدگی و پارگی

- مقاومت در برابر مایعات خطرناک

- قابلیت عدم نفوذ پذیری [۸۸]

لایه ژئوممبران که به منظور غیرقابل نفوذ شدن سطح بدنه غار نصب می شود. این غشاء بر پایه پلی اتیلن یا پی وی سی (غیر حلال در نفت خام) است. از مزایای ژئوممبران ها مقاومت کششی مناسب در برابر نیروهای وارده، انعطاف پذیری خوب در برابر تنش های وارده و سرعت نصب بالا را می توان نام برد. شایان ذکر است ژئوممبران مورد استفاده باید از نوعی انتخاب شود که با نفت خام واکنش شیمیایی نداده و در آن حل نشود [۲]. تنوع ضخامت در ژئوممبران ها بستگی به نوع کاربرد آنها برای جلوگیری از حرکت مایعات و گازها در محل دفن پسماندها، تونل سازی و مهندسی هیدرولیک دارد. عموماً ژئوممبران ها با فرمول های متفاوت پلی اتیلن (با چگالی متفاوت از قبیل پلی اتیلن چگالی بالا^۱، پلی اتیلن چگالی پایین^۲، پلی پروپیلن^۳ و پلی وینیل کلراید^۴) ساخته می شوند. معمولاً ضخامت ژئوممبران از ۰/۵ تا ۵ میلی متر متغیر است. ژئوممبران ها توسط گروه نصاب به صورت صفحه ای در کنار هم قرار می گیرند [۸۹]. در ایران ورقه های ژئوممبرانی تولید می شود که غالباً از ۹۷ درصد پلی اتیلن ۲/۵ درصد کربن سیاه و ۰/۵ درصد آنتی اکسیدان تشکیل شده اند. این ورق ها بصورت رول در طول ۱۰۰ الی ۱۵۰ متر و به عرض ۲/۲۰ الی ۹ متر

1 HDPE

2 LDPE

3 PP

4 PVC

می باشند. ضخامت این ورق ها نیز ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر است. از مشخصات عمومی این ورقه ها می توان به موارد زیر اشاره کرد.

الف) این ورق ها در برابر دمای ۴۰- الی ۷۰ درجه سانتی گراد مقاوم هستند.

ب) در برابر فشارهای غیر متمرکز مقاوم هستند.

ج) در برابر نشست به دلیل مقاومت کششی بالا مقاوم هستند.

د) با هیچ ماده شیمیایی حتی با پایه هیدروکربوری همچون نفت خام ترکیب نمی شود [۹۳].

۶-۷- جمع بندی

در فصل حاضر که با عنوان روش های کاهش نفوذپذیری و نشت مخزن بیان گشت؛ به نحوه ذخیره سازی در مغارهای با پوشش و بدون پوشش پرداخته شد. در این بررسی ها مبانی تئوری و عملی مانند شرایط زمین شناسی مورد نیاز، شرایط آب و همچنین اصول پایداری و نگهداری در مغارها بیان شده و تاثیر پارامترها نیز بررسی شد. سپس برای انتخاب روش مناسب از بین مغارهای سنگی با پوشش و بدون پوشش بر اساس معیارهایی همچون فشار و دمای ماده هیدروکربوری ذخیره سازی، سطح آب زیرزمینی، مقاومت سنگ های دربرگیرنده، شرایط نفوذپذیری سنگ و نیز قوانین زیست محیطی فلوچارتی ارائه شد. در مرحله بعد بر اساس فلوچارت ارائه شده روش LRC برای کنترل نشت غار رودافشان انتخاب شد. در انتها هم، با توجه به اینکه در مغارهای با پوشش نشت مواد هیدروکربوری به وسیله پوشش روی دیواره کنترل می شود؛ لذا لایه های مختلف این پوشش با نمایش یک شکل ساده توضیح داده شد.

فصل ہفتم:

نتیجہ گیری و پیشہادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

ایده ذخیره‌سازی محصولات نفتی در مغارهای سنگی زیرزمینی در اوایل سال ۱۹۳۰ در سوئد ارائه شد [۶]. از دهه‌ی ۷۰ نیز کشورهای متعددی در اروپا و دیگر بخش‌های دنیا شروع به استفاده از مغار برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری کردند. از مزایای مهم مخازن زیرزمینی کم بودن تاسیسات روی سطح زمین است، به گونه‌ای که نسبت تاسیسات در این گونه مخازن نسبت به مخازن سطحی در حدود ۱ به ۱۰ می‌باشد [۳۲]. از دیگر مزایای مخازن زیرزمینی نسبت به سطحی صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه عملیاتی، امنیت بالاتر این مخازن در برابر حوادثی مانند سیل و یا جنگ نسبت به مخازن سطحی می‌باشد. بر اساس مطالعات انجام شده ۶۷ درصد نفت خام ذخیره شده جهان در مغارهای نمکی و ۱۶ درصد در مغارهای سنگی نگهداری می‌شود [۶]. در کشوری مانند ایران، رشد اقتصادی نمی‌تواند جدا از عرضه مداوم و بلند مدت نفت خام و فرآورده‌های نفتی باشد، زیرا ایران از یک سو نیازمند توسعه‌ی انرژی مورد نیاز و از سوی دیگر نیازمند افزایش حجم ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری است. افزایش حجم نفت خام ذخیره شده می‌تواند باعث فائق آمدن بر بحران‌های احتمالی در تولید نفت و نیز کاهش تاثیر بر نوسانات اقتصادی شود. در بحث ذخیره‌سازی، استفاده از غار طبیعی به عنوان مخزن ذخیره‌سازی، منجر به کاهش و یا حذف هزینه‌ی هنگفت حفر مغار در سنگ خواهد شد که این امر، مهمترین مزیت این نوع روش ذخیره‌سازی است. غارها فضاهای زیرزمینی هستند که در اثر فرآیندهای طبیعی به وجود آمده و به سطح زمین راه پیدا می‌کنند. ایران به دلیل دارا بودن غارهای طبیعی متعدد، می‌تواند از پتانسیل بالای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام در غارهای طبیعی برخوردار باشد. به منظور بررسی غارهای طبیعی و تعیین پتانسیل آنها برای ذخیره‌سازی نفت خام در این تحقیق فهرستی از غارهای ایران با توجه به مشخصات مختلف آنها از قبیل محل قرارگیری، حجم و دیگر پارامترها ارائه شدند. سپس به منظور انتخاب غار مناسب، غارها با توجه به معیارهایی همچون قوانین گردشگری و یا

زیست‌محیطی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، حجم غار و فاصله غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت خام و پالایشگاه‌های بزرگ کشور مورد بررسی قرار گرفتند. در این بررسی، در هر مرحله اگر غاری فاقد هر کدام از معیارهای مذکور بود و یا آن را به قدر کافی ارضا نمی‌نمود، از لیست غارهای مناسب برای ذخیره‌سازی نفت خام حذف شد. پس از اینکه این کار برای هر چهار معیار انجام گرفت، تنها شش غار در لیست غارهای قابل بررسی قرار گرفتند که از حداقل‌های لازم برای کلیه معیارهای مذکور برخوردار بودند. در مرحله بعد، برای تعیین غار مستعد به منظور ذخیره‌سازی نفت خام، این شش غار به صورت نسبی با هم مقایسه شدند. به این منظور برای هر غار حجم تقریبی، فاصله حدودی از خطوط اصلی انتقال نفت خام و فاصله از نزدیکترین مرکز بزرگ مصرف نفت خام در داخل کشور تعیین شده و نیز هر یک از غارها بر اساس پیچیدگی شکل فضا دسته‌بندی شدند. در نهایت غار رودافشان گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام انتخاب شد. در فصل بعد به منظور تحلیل پایداری که یکی از اصول مهندسی مکانیک سنگ در پروژه‌های زیرزمینی و یا هر سازه احداث شده در سنگ است، ابتدا انواع روش‌های تحلیل پایداری حفريات زیرزمینی به طور کلی بیان شد و سپس مناسب‌ترین روش و نرم‌افزار مورد نظر برای تحلیل در پروژه حاضر انتخاب گردید. بر این اساس به منظور تحلیل پایداری غار رودافشان نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ انتخاب و پارامترهای ورودی نرم‌افزار تعیین شدند. در فصل بعد تحلیل پایداری غار رودافشان به این صورت انجام گرفت که ابتدا مدل‌سازی در نرم‌افزار انجام گرفته و تاثیرات انباشت و برداشت نفت خام در غار رودافشان مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد تحلیل پارامتری نسبت به پارامترهای مختلف همچون زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مدول دگرشکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها انجام گرفت. بر اثر این بررسی‌ها معلوم شد که تغییرات دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، بر جابجایی نقاط مختلف غار تاثیر بسیار ناچیزی می‌گذارند. اما تغییرات مدول دگرشکل‌پذیری بر خلاف دو پارامتر نام برده تاثیر بیشتری بر جابجایی نقاط مختلف بدنه غار ایجاد می‌کند. در انتها نیز تحلیل حساسیت نسبت به

شتاب‌های ناشی از زلزله صورت گرفت. در فصل آخر نیز ابتدا به نحوه ذخیره‌سازی در مغارهای باپوشش و بدون پوشش پرداخته شد. در این بررسی‌ها مبانی تئوری و عملی مانند شرایط زمین‌شناسی مورد نیاز، شرایط آب و همچنین اصول پایداری و نگهداری در مغارها بیان شده و تاثیر پارامترها نیز بررسی شد. سپس برای انتخاب روش مناسب از بین مغارهای سنگی باپوشش و بدون پوشش بر اساس معیارهایی همچون فشار و دمای ماده هیدروکربوری ذخیره‌سازی، سطح آب زیرزمینی، مقاومت سنگ‌های دربرگیرنده، شرایط نفوذپذیری سنگ و نیز قوانین زیست‌محیطی فلوجارتی ارائه شد. در مرحله بعد بر اساس فلوجارت ارائه شده روش LRC برای کنترل نشت غار رودافشان انتخاب شد. در انتها هم، با توجه به اینکه در مغارهای باپوشش نشت مواد هیدروکربوری به وسیله پوشش روی دیواره کنترل می‌شود؛ لذا لایه‌های مختلف این پوشش با نمایش یک شکل ساده توضیح داده شد.

۷-۲-پیشنهادهات

- تحقیق حاضر تنها یک امکان‌سنجی مقدماتی بوده و می‌توان در مطالعات بعدی پارامترهای اصلی توده‌سنگ و نیز شرایط کنترل ساختاری را بر اساس برداشت‌های کامل‌تر و همچنین آزمایش‌های مکانیک‌سنگی به صورت دقیق‌تری تعیین کرد.
- تعیین غار رودافشان بر اساس اطلاعات موجود صورت گرفته است لذا بدیهی‌است در صورت کامل‌تر شدن اطلاعات، غارهای دیگری نیز وجود دارند که قابل بررسی هستند.
- در پروژه حاضر هدف ذخیره‌سازی نفت خام می‌باشد، حال می‌توان بنابه نیاز کشور این بررسی‌ها را برای سایر مواد هیدروکربوری نیز انجام داد.
- در گام‌های بعدی امکان‌سنجی ذخیره‌سازی نفت خام غار رودافشان می‌توان این پروژه را از نظر فنی‌اقتصادی و یا اجرایی نیز بررسی کرد.

پیوست ۱:

کدهای نوشته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$

new

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 40 -45 -100 p1 100 -45 -100 p2 40 0 -100 p3 40 -45 43 p4 100 0 -100 &

p5 40 0 48 p6 100 -45 43 p7 100 0 48 group brick20

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 -45 -100 p1 40 -45 -100 p2 0 0 -100 p3 0 -45 15 p4 40 0 -100 &

p5 0 0 0 p6 40 -45 15 p7 40 0 0 group brick10

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 -100 -100 p1 100 -100 -100 p2 0 -45 -100 p3 0 -100 43 p4 100 -45 -100 &

p5 0 -45 43 p6 100 -100 43 p7 100 -45 43 group brick0

; group tunnel 1

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 0 0 p1 100 0 0 p2 0 20 -11 p3 0 0 48 p4 100 20 -11 p5 0 20 55 p6 100 0 48 &

p7 100 20 55 p8 33 0 0 p9 0 0 23 p10 42 20 -11 &

p11 0 20 22 group tunnel1

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 0 -100 p1 100 0 -100 p2 0 20 -100 &

p3 0 0 0 p4 100 20 -100 p5 0 20 -11 p6 100 0 0 p7 100 20 -11 group brick1

; group tunnel 2

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 20 -11 p1 100 20 -11 p2 0 40 -22 p3 0 20 55 p4 100 40 -22 p5 0 40 60 p6 100 20 55 &

p7 100 40 60 p8 42 20 -11 p9 0 20 22 p10 47 40 -22 &

p11 0 40 19 group tunnel2

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 20 -100 p1 100 20 -100 p2 0 40 -100 &

p3 0 20 -11 p4 100 40 -100 p5 0 40 -22 p6 100 20 -11 p7 100 40 -22 group brick2

; group tunnel 3

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 40 -22 p1 100 40 -22 p2 0 60 -33 p3 0 40 60 p4 100 60 -33 p5 0 60 69 p6 100 40 60 &

p7 100 60 69 p8 47 40 -22 p9 0 40 19 p10 49 60 -33 &

p11 0 60 14 group tunnel3

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 40 -100 p1 100 40 -100 p2 0 60 -100 &

p3 0 40 -22 p4 100 60 -100 p5 0 60 -33 p6 100 40 -22 p7 100 60 -33 group brick3

; group tunnel 4

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 60 -33 p1 100 60 -33 p2 0 80 -43 p3 0 60 69 p4 100 80 -43 p5 0 80 73 p6 100 60 69 &

p7 100 80 73 p8 49 60 -33 p9 0 60 14 p10 45 80 -43 &

p11 0 80 5 group tunnel4

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 60 -100 p1 100 60 -100 p2 0 80 -100 &

p3 0 60 -33 p4 100 80 -100 p5 0 80 -43 p6 100 60 -33 p7 100 80 -43 group brick4

; group tunnel 5

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 80 -43 p1 100 80 -43 p2 0 100 -50 p3 0 80 73 p4 100 100 -50 p5 0 100 81 p6 100 80 73 &

p7 100 100 81 p8 45 80 -43 p9 0 80 5 p10 36 100 -50 &

p11 0 100 -6 group tunnel5

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 80 -100 p1 100 80 -100 p2 0 100 -100 &

p3 0 80 -43 p4 100 100 -100 p5 0 100 -50 p6 100 80 -43 p7 100 100 -50 group brick5

; group tunnel 6

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 100 -50 p1 100 100 -50 p2 0 120 -53 p3 0 100 81 p4 100 120 -53 &

p5 0 120 90 p6 100 100 81

p7 100 120 90 p8 36 100 -50 p9 0 100 -6 p10 23 120 -53 &

p11 0 120 -27 group tunnel6

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 100 -100 p1 100 100 -100 p2 0 120 -100 &

p3 0 100 -50 p4 100 120 -100 p5 0 120 -53 p6 100 100 -50 p7 100 120 -53 group brick6

; group tunnel 7

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 120 -53 p1 100 120 -53 p2 0 140 -54 p3 0 120 90 p4 100 140 -54 p5 0 140 96 p6 100 120 90 &

p7 100 140 96 p8 23 120 -53 p9 0 120 -27 p10 12 140 -54 &

p11 0 140 -35 group tunnel7

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 120 -100 p1 100 120 -100 p2 0 140 -100 &

p3 0 120 -53 p4 100 140 -100 p5 0 140 -54 p6 100 120 -53 p7 100 140 -54 group brick7

; group tunnel 8

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 140 -54 p1 100 140 -54 p2 0 160 -53 p3 0 140 96 p4 100 160 -53 p5 0 160 101 p6 100 140 96 &

p7 100 160 101 p8 12 140 -54 p9 0 140 -35 p10 11 160 -53 &

p11 0 160 -36 group tunnel8

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 140 -100 p1 100 140 -100 p2 0 160 -100 &

p3 0 140 -54 p4 100 160 -100 p5 0 160 -53 p6 100 140 -54 p7 100 160 -53 group brick8

; group tunnel 9

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 160 -53 p1 100 160 -53 p2 0 200 -42 p3 0 160 101 p4 100 200 -42 p5 0 200 119 p6 100 160 101 &

p7 100 200 119 p8 11 160 -53 p9 0 160 -36 p10 3 200 -42 &

p11 0 200 -39 group tunnel9

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 160 -100 p1 100 160 -100 p2 0 200 -100 &

p3 0 160 -53 p4 100 200 -100 p5 0 200 -42 p6 100 160 -53 p7 100 200 -42 group brick9

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 fill &

p0 0 200 -42 p1 100 200 -42 p2 0 250 -42 p3 0 200 119 p4 100 250 -42 p5 0 250 107 p6 100 200 119 &

p7 100 250 107 p8 3 200 -42 p9 0 200 -39 &

p10 3 250 -42 p11 0 250 -39 group brick30

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 200 -100 p1 100 200 -100 p2 0 250 -100 &

p3 0 200 -42 p4 100 250 -100 p5 0 250 -42 &

p6 100 200 -42 p7 100 250 -42 group brick40

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -40 0 -100 p1 -100 0 -100 p2 -40 -45 -100 &

p3 -40 0 48 p4 -100 -45 -100 p5 -40 -45 43 p6 -100 0 48 p7 -100 -45 43 group brick200

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 0 -100 p1 -40 0 -100 p2 0 -45 -100 &

p3 0 0 0 p4 -40 -45 -100 p5 0 -45 15 p6 -40 0 0 p7 -40 -45 15 group brick100

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 -45 -100 p1 -100 -45 -100 p2 0 -100 -100 &

p3 0 -45 43 p4 -100 -100 -100 p5 0 -100 43 p6 -100 -45 43 p7 -100 -100 43 group brick00

; group tunnel 11

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 20 -11 p1 -100 20 -11 p2 0 0 0 p3 0 20 55 p4 -100 0 0 p5 0 0 48 p6 -100 20 55 &

p7 -100 0 48 p8 -42 20 -11 p9 0 20 22 p10 -33 0 0 &

p11 0 0 23 group tunnel11

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 20 -100 p1 -100 0 -100 p2 0 20 -100 p3 -100 20 -11 p4 0 0 -100 &

p5 0 20 -11 p6 -100 0 0 p7 0 0 0 group brick11

; group tunnel 12

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 40 -22 p1 -100 40 -22 p2 0 20 -11 p3 0 40 60 p4 -100 20 -11 p5 0 20 55 p6 -100 40 60 &

p7 -100 20 55 p8 -47 40 -22 p9 0 40 19 p10 -42 20 -11 &

p11 0 20 22 group tunnel12

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 40 -100 p1 -100 20 -100 p2 0 40 -100 p3 -100 40 -22 p4 0 20 -100 &

p5 0 40 -22 p6 -100 20 -11 p7 0 20 -11 group brick12

; group tunnel 13

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 60 -33 p1 -100 60 -33 p2 0 40 -22 p3 0 60 69 p4 -100 40 -22 p5 0 40 60 p6 -100 60 69 &

p7 -100 40 60 p8 -49 60 -33 p9 0 60 14 p10 -47 40 -22 &

p11 0 40 19 group tunnel13

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 60 -100 p1 -100 40 -100 p2 0 60 -100 p3 -100 60 -33 p4 0 40 -100 &

p5 0 60 -33 p6 -100 40 -22 p7 0 40 -22 group brick13

; group tunnel 14

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 80 -43 p1 -100 80 -43 p2 0 60 -33 p3 0 80 73 p4 -100 60 -33 p5 0 60 69 p6 -100 80 73 &

p7 -100 60 69 p8 -45 80 -43 p9 0 80 5 p10 -49 60 -33 &

p11 0 60 14 group tunnel14

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 80 -100 p1 -100 60 -100 p2 0 80 -100 p3 -100 80 -43 p4 0 60 -100 &

p5 0 80 -43 p6 -100 60 -33 p7 0 60 -33 group brick14

; group tunnel 15

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 100 -50 p1 -100 100 -50 p2 0 80 -43 p3 0 100 81 p4 -100 80 -43 p5 0 80 73 p6 -100 100 81 &

p7 -100 80 73 p8 -36 100 -50 p9 0 100 -6 p10 -45 80 -43 &

p11 0 80 5 group tunnel15

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 100 -100 p1 -100 80 -100 p2 0 100 -100 p3 -100 100 -50 p4 0 80 -100 &

p6 -100 80 -43 p5 0 100 -50 p7 0 80 -43 group brick15

; group tunnel 16

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 120 -53 p1 -100 120 -53 p2 0 100 -50 p3 0 120 90 p4 -100 100 -50 p5 0 100 81 p6 -100 120 90 &

p7 -100 100 81 p8 -23 120 -53 p9 0 120 -27 p10 -36 100 -50 &

p11 0 100 -6 group tunnel16

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 120 -100 p1 -100 100 -100 p2 0 120 -100 p3 -100 120 -53 p4 0 100 -100 &

p5 0 120 -53 p6 -100 100 -50 p7 0 100 -50 group brick16

; group tunnel 17

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 140 -54 p1 -100 140 -54 p2 0 120 -53 p3 0 140 96 p4 -100 120 -53 p5 0 120 90 p6 -100 140 96 &

p7 -100 120 90 p8 -12 140 -54 p9 0 140 -35 p10 -23 120 -53 &

p11 0 120 -27 group tunnel17

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 140 -100 p1 -100 120 -100 p2 0 140 -100 p3 -100 140 -54 p4 0 120 -100 &

p5 0 140 -54 p6 -100 120 -53 p7 0 120 -53 group brick17

; group tunnel 18

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 160 -53 p1 -100 160 -53 p2 0 140 -54 p3 0 160 101 p4 -100 140 -54 p5 0 140 96 p6 -100 160 101 &

p7 -100 140 96 p8 -11 160 -53 p9 0 160 -36 p10 -12 140 -54 &

p11 0 140 -35 group tunnel18

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 160 -100 p1 -100 140 -100 p2 0 160 -100 p3 -100 160 -53 p4 0 140 -100 &

p5 0 160 -53 p6 -100 140 -54 p7 0 140 -54 group brick18

; group tunnel 19

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 200 -42 p1 -100 200 -42 p2 0 160 -53 p3 0 200 119 p4 -100 160 -53 p5 0 160 101 p6 -100 200 119 &

p7 -100 160 101 p8 -3 200 -42 p9 0 200 -39 p10 -11 160 -53 &

p11 0 160 -36 group tunnel19

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 -100 200 -100 p1 -100 160 -100 p2 0 200 -100 p3 -100 200 -42 p4 0 160 -100 &

p5 0 200 -42 p6 -100 160 -53 p7 0 160 -53 group brick19

gen zone radcyl size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 fill &

p0 0 250 -42 p1 -100 250 -42 p2 0 200 -42 p3 0 250 107 p4 -100 200 -42 &

p5 0 200 119 p6 -100 250 107 p7 -100 200 119 &

p8 -3 250 -42 p9 0 250 -39 p10 -3 200 -42 &

p11 0 200 -39 group brick300

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 250 -100 p1 -100 250 -100 p2 0 200 -100 p3 0 250 -42 p4 -100 200 -100 &

p5 0 200 -42 p6 -100 250 -42 p7 -100 200 -42 group brick400

model mohr range group brick20

model mohr range group brick10

model mohr range group brick0

model mohr range group tunnel1

model mohr range group brick1

model mohr range group tunnel2

model mohr range group brick2

model mohr range group tunnel3

model mohr range group brick3

model mohr range group tunnel4

model mohr range group brick4

model mohr range group tunnel5

model mohr range group brick5

model mohr range group tunnel6

model mohr range group brick6

model mohr range group tunnel7

model mohr range group brick7

model mohr range group tunnel8

model mohr range group brick8

model mohr range group tunnel9

model mohr range group brick9

model mohr range group brick200

model mohr range group brick100

model mohr range group brick00

model mohr range group tunnel11

model mohr range group brick11

model mohr range group tunnel12

model mohr range group brick12

model mohr range group tunnel13

model mohr range group brick13

model mohr range group tunnel14

model mohr range group brick14

model mohr range group tunnel15

model mohr range group brick15

model mohr range group tunnel16

model mohr range group brick16

model mohr range group tunnel17

model mohr range group brick17

model mohr range group tunnel18

model mohr range group brick18

model mohr range group tunnel19

model mohr range group brick19

model mohr range y 200 250

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick20

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick10

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick0

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel1

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick1

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel2

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick2

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel3

[illegible]

prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick15
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel16
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick16
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel17
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick17
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel18
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick18
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group tunnel19
prop bulk 15.95e9 shea 9.57e9 cohesion 1.87e6 friction 46 dilation 3 tension 8.18e5 range group brick19
ini dens 2700 range group brick20
ini dens 2700 range group brick10
ini dens 2700 range group brick0
ini dens 2700 range group tunnel1
ini dens 2700 range group brick1
ini dens 2700 range group tunnel2
ini dens 2700 range group brick2
ini dens 2700 range group tunnel3
ini dens 2700 range group brick3
ini dens 2700 range group tunnel4
ini dens 2700 range group brick4
ini dens 2700 range group tunnel5
ini dens 2700 range group brick5
ini dens 2700 range group tunnel6
ini dens 2700 range group brick6
ini dens 2700 range group tunnel7
ini dens 2700 range group brick7

ini dens 2700 range group tunnel8

ini dens 2700 range group brick8

ini dens 2700 range group tunnel9

ini dens 2700 range group brick9

ini dens 2700 range group brick200

ini dens 2700 range group brick100

ini dens 2700 range group brick00

ini dens 2700 range group tunnel11

ini dens 2700 range group brick11

ini dens 2700 range group tunnel12

ini dens 2700 range group brick12

ini dens 2700 range group tunnel13

ini dens 2700 range group brick13

ini dens 2700 range group tunnel14

ini dens 2700 range group brick14

ini dens 2700 range group tunnel15

ini dens 2700 range group brick15

ini dens 2700 range group tunnel16

ini dens 2700 range group brick16

ini dens 2700 range group tunnel17

ini dens 2700 range group brick17

ini dens 2700 range group tunnel18

ini dens 2700 range group brick18

ini dens 2700 range group tunnel19

ini dens 2700 range group brick19

ini dens 2700 range y 200 250

attach face group brick0 & group brick10
 attach face group brick0 & group brick20
 attach face group tunnel1 & group brick20
 attach face group brick10 & group brick1
 attach face group tunnel1 & group brick1
 attach face group tunnel2 & group brick2
 attach face group tunnel3 & group brick3
 attach face group tunnel4 & group brick4
 attach face group tunnel5 & group brick5
 attach face group tunnel6 & group brick6
 attach face group tunnel7 & group brick7
 attach face group tunnel8 & group brick8
 attach face group tunnel9 & group brick9
 attach face group brick30 & group brick40
 attach face group tunnel9 & group brick30
 attach face group brick00 & group brick100
 attach face group brick00 & group brick200
 attach face group tunnel11 & group brick200
 attach face group brick100 & group brick11
 attach face group tunnel11 & group brick11
 attach face group tunnel12 & group brick12
 attach face group tunnel13 & group brick13
 attach face group tunnel14 & group brick14
 attach face group tunnel15 & group brick15
 attach face group tunnel16 & group brick16
 attach face group tunnel17 & group brick17

attach face group tunnel18 & group brick18
attach face group tunnel19 & group brick19
attach face group brick300 & group brick400
attach face group tunnel19 & group brick300
fix x range x -100 -99
fix x range x 99 100
fix y range y -100 -99
fix y range y 249 250
fix z range z -100 -99
set grav 0,0,-10
hist unbal
hist gp zdisp 0.5,1.67,23.7
hist gp xdisp 36.17,1.67,1.35
hist gp zdisp 0.5,1.67,-1.87
hist gp zdisp 1.5,70,10.13
hist gp xdisp 49,70,-36.36
hist gp zdisp 1.5,70,-39
hist gp zdisp 0.5,130,-30
hist gp xdisp 19,130,-52
hist gp zdisp 0.5,130,-54
hist gp zdisp 0.5,180,-36.5
hist gp xdisp 7.89,180,-46.5
hist gp zdisp 0.5,180,-48.2
hist gp zvel 0.5,1.67,23.7
hist gp xvel 36.17,1.67,1.35
hist gp zvel 0.5,1.67,-1.87

hist gp zvel 1.5,70,10.13

hist gp xvel 49,70,-36.36

hist gp zvel 1.5,70,-39

hist gp zvel 0.5,130,-30

hist gp xvel 19,130,-52

hist gp zvel 0.5,130,-54

hist gp zvel 0.5,180,-36.5

hist gp xvel 7.89,180,-46.5

hist gp zvel 0.5,180,-48.2

hist zone sxx 0.5,1.67,23.7

hist zone syy 0.5,1.67,23.7

hist zone szz 0.5,1.67,23.7

hist zone sxx 36.17,1.67,1.35

hist zone syy 36.17,1.67,1.35

hist zone szz 36.17,1.67,1.35

hist zone sxx 0.5,1.67,-1.87

hist zone syy 0.5,1.67,-1.87

hist zone szz 0.5,1.67,-1.87

hist zone sxx 1.5,70,10.13

hist zone syy 1.5,70,10.13

hist zone szz 1.5,70,10.13

hist zone sxx 49,70,-36.36

hist zone syy 49,70,-36.36

hist zone szz 49,70,-36.36

hist zone sxx 1.5,70,-39

hist zone syy 1.5,70,-39

hist zone szz 1.5,70,-39

hist zone sxx 0.5,130,-30

hist zone syy 0.5,130,-30

hist zone szz 0.5,130,-30

hist zone sxx 19,130,-52

hist zone syy 19,130,-52

hist zone szz 19,130,-52

hist zone sxx 0.5,130,-54

hist zone syy 0.5,130,-54

hist zone szz 0.5,130,-54

hist zone sxx 0.5,180,-36.5

hist zone syy 0.5,180,-36.5

hist zone szz 0.5,180,-36.5

hist zone sxx 7.89,180,-46.5

hist zone syy 7.89,180,-46.5

hist zone szz 7.89,180,-46.5

hist zone sxx 0.5,180,-48.2

hist zone syy 0.5,180,-48.2

hist zone szz 0.5,180,-48.2

save build.sav

solve

save buildsolve.sav

ini xdis=0 ydis=0 zdis=0

ini xvel=0 yvel=0 zvel=0

; group oil 0

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 -45 15 p1 40 -45 15 p2 0 0 0 p3 0 -45 43 &

p4 40 0 0 p5 0 0 43 p6 40 -45 43 p7 40 0 43 group oil0

; group oil 1

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 0 0 p1 33 0 0 p2 0 20 -11 p3 0 0 23 &

p4 42 20 -11 p5 0 20 22 group oil1

; group oil 2

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 20 -11 p1 42 20 -11 p2 0 40 -22 p3 0 20 22 &

p4 47 40 -22 p5 0 40 19 group oil2

; group oil 3

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 40 -22 p1 47 40 -22 p2 0 60 -33 p3 0 40 19 &

p4 49 60 -33 p5 0 60 14 group oil3

; group oil 4

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 60 -33 p1 49 60 -33 p2 0 80 -43 p3 0 60 14 p4 45 80 -43 &

p5 0 80 5 group oil4

; group oil 5

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 80 -43 p1 45 80 -43 p2 0 100 -50 p3 0 80 5 p4 36 100 -50 &

p5 0 100 -6 group oil5

; group oil 6

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 100 -50 p1 36 100 -50 p2 0 120 -53 p3 0 100 -6 p4 23 120 -53 &

p5 0 120 -27 group oil6

; group oil 7

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 120 -53 p1 23 120 -53 p2 0 140 -54 p3 0 120 -27 p4 12 140 -54 &

p5 0 140 -35 group oil7

; group oil 8

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 140 -54 p1 12 140 -54 p2 0 160 -53 p3 0 140 -35 p4 11 160 -53 &

p5 0 160 -36 group oil8

; group oil 9

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 160 -53 p1 11 160 -53 p2 0 200 -42 p3 0 160 -36 p4 3 200 -42 &

p5 0 200 -39 group oil9

; group oil 10

gen zone brick size 24 24 12 rat 1.0 1.0 1.0 &

p0 0 0 0 p1 -40 0 0 p2 0 -45 15 p3 0 0 43 p4 -40 -45 15 p5 0 -45 43 &

p6 -40 0 43 p7 -40 -45 43 group oil10

; group oil 11

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 20 -11 p1 -42 20 -11 p2 0 0 0 p3 0 20 22 p4 -33 0 0 &

p5 0 0 23 group oil11

; group oil 12

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 40 -22 p1 -47 40 -22 &

p2 0 20 -11 p3 0 40 19 p4 -42 20 -11 p5 0 20 22 group oil12

; group oil 13

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 & &

p0 0 60 -33 p1 -49 60 -33 &

p2 0 40 -22 p3 0 60 14 p4 -47 40 -22 p5 0 40 19 group oil13

; group oil 14

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 80 -43 p1 -45 80 -43 &

p2 0 60 -33 p3 0 80 5 p4 -49 60 -33 p5 0 60 14 group oil14

; group oil 15

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 100 -50 p1 -36 100 -50 &

p2 0 80 -43 p3 0 100 -6 p4 -45 80 -43 p5 0 80 5 group oil15

; group oil 16

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 120 -53 p1 -23 120 -53 &

p2 0 100 -50 p3 0 120 -27 p4 -36 100 -50 p5 0 100 -6 group oil16

; group oil 17

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 140 -54 p1 -12 140 -54 &

p2 0 120 -53 p3 0 140 -35 p4 -23 120 -53 p5 0 120 -27 group oil17

; group oil 18

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 160 -53 p1 -11 160 -53 &

p2 0 140 -54 p3 0 160 -36 p4 -12 140 -54 p5 0 140 -35 group oil18

; group oil 19

gen zone cylinder size 16 24 12 24 rat 1.0 1.0 1.0 1.2 &

p0 0 200 -42 p1 -3 200 -42 &

p2 0 160 -53 p3 0 200 -39 p4 -11 160 -53 p5 0 160 -36 group oil19

model mohr range group oil0

model mohr range group oil1

model mohr range group oil2

model mohr range group oil3

model mohr range group oil4

model mohr range group oil5

model mohr range group oil6

model mohr range group oil7

model mohr range group oil8

model mohr range group oil9

model mohr range group oil10

model mohr range group oil11

model mohr range group oil12

model mohr range group oil13

model mohr range group oil14

model mohr range group oil15

model mohr range group oil16

model mohr range group oil17

model mohr range group oil18

model mohr range group oil19

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil0

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil1

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil2

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil3

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil4

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil5

prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil6
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil7
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil8
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil9
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil10
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil11
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil12
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil13
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil14
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil15
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil16
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil17
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil18
prop bulk 22.33e-3 shea 13.40e-3 cohesion 0 friction 0 dilation 0 tension 0 range group oil19
ini dens 800 range group oil0
ini dens 800 range group oil1
ini dens 800 range group oil2
ini dens 800 range group oil3
ini dens 800 range group oil4
ini dens 800 range group oil5
ini dens 800 range group oil6
ini dens 800 range group oil7
ini dens 800 range group oil8
ini dens 800 range group oil9
ini dens 800 range group oil10
ini dens 800 range group oil11

ini dens 800 range group oil12

ini dens 800 range group oil13

ini dens 800 range group oil14

ini dens 800 range group oil15

ini dens 800 range group oil16

ini dens 800 range group oil17

ini dens 800 range group oil18

ini dens 800 range group oil19

attach face group oil1 & group brick1

attach face group oil2 & group brick2

attach face group oil3 & group brick3

attach face group oil4 & group brick4

attach face group oil5 & group brick5

attach face group oil6 & group brick6

attach face group oil7 & group brick7

attach face group oil8 & group brick8

attach face group oil9 & group brick9

attach face group oil11 & group brick11

attach face group oil12 & group brick12

attach face group oil13 & group brick13

attach face group oil14 & group brick14

attach face group oil15 & group brick15

attach face group oil16 & group brick16

attach face group oil17 & group brick17

attach face group oil18 & group brick18

attach face group oil19 & group brick19

hist gp zdisp 0.5,1.67,23.7

hist gp xdisp 36.17,1.67,1.35

hist gp zdisp 0.5,1.67,-1.87

hist gp zdisp 1.5,70,10.13

hist gp xdisp 49,70,-36.36

hist gp zdisp 1.5,70,-39

hist gp zdisp 0.5,130,-30

hist gp xdisp 19,130,-52

hist gp zdisp 0.5,130,-54

hist gp zdisp 0.5,180,-36.5

hist gp xdisp 7.89,180,-46.5

hist gp zdisp 0.5,180,-48.2

hist gp zvel 0.5,1.67,23.7

hist gp xvel 36.17,1.67,1.35

hist gp zvel 0.5,1.67,-1.87

hist gp zvel 1.5,70,10.13

hist gp xvel 49,70,-36.36

hist gp zvel 1.5,70,-39

hist gp zvel 0.5,130,-30

hist gp xvel 19,130,-52

hist gp zvel 0.5,130,-54

hist gp zvel 0.5,180,-36.5

hist gp xvel 7.89,180,-46.5

hist gp zvel 0.5,180,-48.2

hist zone sxx 0.5,1.67,23.7

hist zone syy 0.5,1.67,23.7

hist zone szz 0.5,1.67,23.7

hist zone sxx 36.17,1.67,1.35

hist zone syy 36.17,1.67,1.35

hist zone szz 36.17,1.67,1.35

hist zone sxx 0.5,1.67,-1.87

hist zone syy 0.5,1.67,-1.87

hist zone szz 0.5,1.67,-1.87

hist zone sxx 1.5,70,10.13

hist zone syy 1.5,70,10.13

hist zone szz 1.5,70,10.13

hist zone sxx 49,70,-36.36

hist zone syy 49,70,-36.36

hist zone szz 49,70,-36.36

hist zone sxx 1.5,70,-39

hist zone syy 1.5,70,-39

hist zone szz 1.5,70,-39

hist zone sxx 0.5,130,-30

hist zone syy 0.5,130,-30

hist zone szz 0.5,130,-30

hist zone sxx 19,130,-52

hist zone syy 19,130,-52

hist zone szz 19,130,-52

hist zone sxx 0.5,130,-54

hist zone syy 0.5,130,-54

hist zone szz 0.5,130,-54

hist zone sxx 0.5,180,-36.5

hist zone syy 0.5,180,-36.5

hist zone szz 0.5,180,-36.5

hist zone sxx 7.89,180,-46.5

hist zone syy 7.89,180,-46.5

hist zone szz 7.89,180,-46.5

hist zone sxx 0.5,180,-48.2

hist zone syy 0.5,180,-48.2

hist zone szz 0.5,180,-48.2

save build&oil1.sav

step 10000

save build&oilsolve.sav

ini xdis=0 ydis=0 zdis=0

ini xvel=0 yvel=0 zvel=0

m null range group oil0

m null range group oil1

m null range group oil2

m null range group oil3

m null range group oil4

m null range group oil5

m null range group oil6

m null range group oil7

m null range group oil8

m null range group oil9

m null range group oil10

m null range group oil11

m null range group oil12

m null range group oil13

m null range group oil14

m null range group oil15

m null range group oil16

m null range group oil17

m null range group oil18

m null range group oil19

hist gp zdisp 0.5,1.67,23.7

hist gp xdisp 36.17,1.67,1.35

hist gp zdisp 0.5,1.67,-1.87

hist gp zdisp 1.5,70,10.13

hist gp xdisp 49,70,-36.36

hist gp zdisp 1.5,70,-39

hist gp zdisp 0.5,130,-30

hist gp xdisp 19,130,-52

hist gp zdisp 0.5,130,-54

hist gp zdisp 0.5,180,-36.5

hist gp xdisp 7.89,180,-46.5

hist gp zdisp 0.5,180,-48.2

hist gp zvel 0.5,1.67,23.7

hist gp xvel 36.17,1.67,1.35

hist gp zvel 0.5,1.67,-1.87

hist gp zvel 1.5,70,10.13

hist gp xvel 49,70,-36.36

hist gp zvel 1.5,70,-39

hist gp zvel 0.5,130,-30

hist gp xvel 19,130,-52

hist gp zvel 0.5,130,-54

hist gp zvel 0.5,180,-36.5

hist gp xvel 7.89,180,-46.5

hist gp zvel 0.5,180,-48.2

hist zone sxx 0.5,1.67,23.7

hist zone syy 0.5,1.67,23.7

hist zone szz 0.5,1.67,23.7

hist zone sxx 36.17,1.67,1.35

hist zone syy 36.17,1.67,1.35

hist zone szz 36.17,1.67,1.35

hist zone sxx 0.5,1.67,-1.87

hist zone syy 0.5,1.67,-1.87

hist zone szz 0.5,1.67,-1.87

hist zone sxx 1.5,70,10.13

hist zone syy 1.5,70,10.13

hist zone szz 1.5,70,10.13

hist zone sxx 49,70,-36.36

hist zone syy 49,70,-36.36

hist zone szz 49,70,-36.36

hist zone sxx 1.5,70,-39

hist zone syy 1.5,70,-39

hist zone szz 1.5,70,-39

hist zone sxx 0.5,130,-30

hist zone syy 0.5,130,-30

hist zone szz 0.5,130,-30

hist zone sxx 19,130,-52

hist zone syy 19,130,-52

hist zone szz 19,130,-52

hist zone sxx 0.5,130,-54

hist zone syy 0.5,130,-54

hist zone szz 0.5,130,-54

hist zone sxx 0.5,180,-36.5

hist zone syy 0.5,180,-36.5

hist zone szz 0.5,180,-36.5

hist zone sxx 7.89,180,-46.5

hist zone syy 7.89,180,-46.5

hist zone szz 7.89,180,-46.5

hist zone sxx 0.5,180,-48.2

hist zone syy 0.5,180,-48.2

hist zone szz 0.5,180,-48.2

save nulloil.sav

step 10000

save nulloil&solve.sav

pl surf

منابع:

- (۱) مصطفی صلاحی، ۱۳۸۷، "غارهای ایران"، نشر نی
- (۲) الیاسیان ایمان "کاربرد ترکیب ژئوممبران و ژئوتکستایل در ایزولاسیون مخازن بتنی"
- (۳) آقا نباتی علی ۱۳۸۳ "زمین شناسی ایران"
- (۴) غفارزاده، رضا ۱۳۸۲ "کاربری و طراحی فضاهای بزرگ زیرزمینی" ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- (۵) فهمی فر احمد "مروری بر آزمایشات مکانیک سنگ"
- (۶) کریمی نسب سعید، جلالی فر حسین و رنجبر حجت اله، ۱۳۸۸ "مبانی ذخیره سازی مواد هیدروکربوری و ضرورت احداث مخازن زیرزمینی نفت خام در ایران" سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، انجمن مهندسی معدن ایران، دانشگاه یزد و شرکت سنگ آهن مرکزی ایران
- (۷) مدنی ح.، ۱۳۷۹، "تونل سازی جلد سوم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر
- (۸) هوک، کیسر، بارون، (۱۳۸۰)، "نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ های سخت"، مترجمین: قارونی نیک، اصائلو م.، ابیازانی م.، تهران، موسسه علمی و فرهنگی نص، چاپ اول.
- (۹) احمد رمضان زاده ۱۳۷۶ "طراحی و تحلیل پایداری مغار نیروگاه هیدروالکتریک کارون ۳" رساله دوره کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس
- (۱۰) امیر سلطان علیزاده ۱۳۸۹ "بررسی روش های URC و LRC از لحاظ کنترل نشت برای ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری" سمینار دوره کارشناسی ارشد
- (۱۱) رفیعی، ح.، ۱۳۸۷. ذخیره سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی، ارتباط هندسه مغار، پارامترهای عملیاتی و رفتار مکانیکی، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه باهنر کرمان، ۸۲ ص.

12) Bergman, S. M., M. ASCE; 1983, "Underground Storage of Oil and Gas, *Journal of Energy Engineering*", Vol. 110, No 3

13) Bieniawski Z.T., (1984), "Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling", A.A. Balkema publishing co.

- 14) Cha, Sung-Soo, Lee, J. Y., Lee, D. H., Amantini, E., and Lee, K. K.; 2006 ,
“Engineering Characterization of Hydraulic Properties in a Pilot Rock Cavern for Underground LNG Storage”, Engineering Geology, Vol. 84, pp. 229–243
- 15) Chung, I. M., Cho, W., Heo, J. H.; 2003, **“Stochastic hydraulic safety factor for gas containment in underground storage caverns; Journal of Hydrology”**, 284, 77–91
- 16) Chung, I.M., Kim, T., Lee, K.K. and Han, I.Y.; 2009, **“Efficient Method for Estimating Groundwater Head in the Vicinity of the Underground Gas Storage Caverns in Fractured Media; Journal of Hydrologic Engineering”**, Vol. 14, No. 3, 261-270
- 17) David F. JohnsonDirector, 2004 **“Underground oil storage technology“** Director, Planning & Engineering OfficeStrategic Petroleum ReserveU.S. Department of EnergyDavid Energy
- 18) David.C.willett, 1990, **“Storage and power generation”** Chapter 24.2, Mining engineering handbook
- 19) Dunncliff J., Green Gordon E., (1988), **“Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field”**, performance, J. Wiley & Sons.
- 20) Grøv.Eivind, 2007 **“Geological requirements and challenges for underground hydrocarbon storage”** Norwegian tunneling society, publication no.16
- 21) Eric, A., François, C., Anne, M.; **“Groundwater management during the construction of underground hydrocarbon storage in rock caverns”**, 9th international mine water congress
- 22) Føsker, A., 2007, **“Ekeberg Petroleum Storage Facility Experience from the Ekeberg Oil Storage and Ekeberg Tank”**, Publication No. 16: Underground Constructions for the Norwegian Oil and Gas Industry, Norwegian Tunnelling Society, Oslo, Norway, ISBN-NR. 978-82-92641-08-8.
- 23) Haug, S.M. and Broch, E. ; 2007, **“Storage of Oil and Gas in Rock Caverns:- History and Development”**, Norwegian Tunnelling Society, Publication No. 16
- 24) E.Hock, Carranza-Torres C., Corkum B.,(2002),**“Hock- Brown Failure Criterion- 2002 Edition”**, In: Hammah R., Bawden W., Curran J., Telesnicki M., Proceeding of NARMSTAC2002, Mining Innovation and Technology. Toronto, 10 Julay 2002, University Toronto, pp. 267-273.
- 25) Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1995. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Balkema, Rotterdam, p. 215.

- 26) Hudson J.A., (1992), "**Comprehensive rock engineering**", p.543-562, Japan, Railway Construction Public, (1996), "**Evaluation of Mechanical Stability of Underground Excavation**".
- 27) Huton D.V., (2004), "**Fundamentals of Finite Element Analysis**" McGrawhill pub.
- 28) Itasca, (1999), FLAC, "**Fast Lagrangian Analysis of Continua**", Version 4.0.307, User's Manual. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, <http://itascacg.com>
- 29) Kim, T., Lee, K. K., Ko, K. S., Chang, H. W.; 2000, "**Groundwater flow system inferred from hydraulic stresses and heads at an underground LPG storage cavern site**"; Journal of Hydrology, 236, 165–184
- 30) L. Mansson and P.Marion, 2004, "**The LRC concept and the demonstration plant in Sweden-a new approach to commercial gas storage**" Sydkraft Gas AB, Sweden and Gaz de France, France
- 31) Lindblom, U. E.; 1994, "**Design criteria for the Brooklyn union gas storage caverns at JFK airport, New York; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**", 34:3-4
- 32) Liu Cheng, Yang Zhao, Pan Xiaoming and Wang Laigui, 2009 "**Design of Water Curtain Control System of Underground Water Seal Oil Cavern**" Department of Geotechnical Engineering Tongji University Shanghai, China and Department of mechanics engineering Liaoning Technical University Fuxin, China
- 33) Olva.N midtlien, 2007, "**cavern storage excavation–sture**" Norwegian tunneling society, publication no.16
- 34) Otter J.R.H., Cassell A.C. and Hobbs R.E., 1966," **Dynamic Relaxation. Proc. Instn Civ.**", Engrs 35, 635-665
- 35) P.arne dahi, 2007, "**The clients design requirements**" Norwegian tunneling society, publication no.16
- 36) R.L. Thoms and R.M. Gehle, 2000, "**A brief history of salt cavern use**" AGM, INC. P.O. Box 10358, College Station, Texas, U.S.A.
- 37) S.Martin Haug, 2007 , "**Storage of oil and gas in rock caverns below the ground water table general design development**" Norwegian tunneling society, publication no.16
- 38) Sakurai S., (1993), "**Back Analysis in Rock Engineering**", Comprehensive Rock Engineering, Vol. 4, ed J.A. Hudson, (pergamon), pp.453- 469, pergamon press, London.

- 39) Sakurai S., Takeuchi K., (1983), "***Back Analysis in Measurements in Tunneling***", Rock Mechanics ock Eng. 16, 173-180.
- 40) Sigh, Bhawani, Goel, Rajnish K.,(2006), "***Tunneling in Weak Rocks***", UK., Elsevier Geo. Engineering Book Series, Vol.5,pp. 230- 235.
- 41) Sinha R.S., (1989), "***Underground Structure Design and Instrument***", University of Michigan, Publisher Be Elsevier geoscience, London.
- 42) Sofregaz US Inc., LRC; S-20509 Malmö Sweden; November 1999, "***Commercial Potential of Natural Gas Storage in Lined Rock Caverns (LRC)***"
- 43) www.bahaneh.ir
- 44) www.caving-in-iran.org
- 45) www.daneshnameh.roshd.ir
- 46) www.darab313.parsiblog.com
- 47) www.darab-rezaei.blogfa.com
- 48) www.dpp.irib.ir
- 49) www.fa.wikipedia.org
- 50) www.forum.parsiking.com
- 51) www.forums.mihandownload.com
- 52) www.gardoonehmehr.bravehost.com
- 53) www.grcir.net
- 54) www.gsi.ir
- 55) www.hamshahrionline.ir
- 56) www.hamtanab.com
- 57) www.hoghoogh87.blogfa.com
- 58) www.irancaves.com
- 59) www.irandeserts.com
- 60) www.irangpsmap.com

- 61) www.iranisalam.com
- 62) www.irkeshvaram.mihanblog.com
- 63) www.javanroodi.blogsky.com
- 64) www.katalekhkhourcave.com
- 65) www.kazeroonnema.ir
- 66) www.khanabadd.com
- 67) www.kh-tdc.com
- 68) www.majarajoo.com
- 69) www.maroof-a.blogfa.com
- 70) www.mebook.ir
- 71) www.mountainzone.ir
- 72) www.persianblog.ir
- 73) www.persianecotourist.com
- 74) www.sartanab.mihanblog.com
- 75) www.satrap.org
- 76) www.semnanymihanblog.com
- 77) www.shana.ir
- 78) www.tabrizcity.ir
- 79) www.tanineyas.ir
- 80) www.tebyan.net
- 81) www.tirozh.com
- 82) www.touristconsult.mihanblog.com
- 83) www.trec.co.ir
- 84) www.vefagh.co.ir
- 85) www.vista.ir

86) www.wikipedia.org

87) www.seaproof.com

88) www.geosynthetics.blogfa.com

89) www.ngp-co.com

90) www.4eghlim.com

91) www.afarinesh-daily.com

92) www.aftabir.com

93) www.eforosh.com

94) Hock E., Carranza-Torres C., Corkum B., (2002), "**Hock- Brown Failure Criterion- 2002 Edition**", In: Hammah R., Bawden W., Curran J., Telesnicki M., Proceeding of NARMSTAC2002, Mining Innovation and Technology. Toronto, 10 July 2002, University Toronto, pp. 267-273.

95) R.S.Sinha; 1989, "Underground Structures: Design And Instrumentation" Elsevier Science Publishers B.V ; ISBN 0-444-41662-5 (Series)

96) Sakuraie S., (1990), "**Interpretation of Field Measurement in Tunneling Practice**", 9th ISRM Conference on Rock Mechanics, Paris.

97) Sakuraie S., (1997), "**Lesson Learned from Field Measurements in Tunneling**", Tunneling and underground space technology, Volume 12, Issue 4, page 453-460.

98) Johansson Jan. ; 2003, "**High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns CAVERN WALL DESIGN PRINCIPLES**", Licentiate Thesis Division of Soil & Rock Mechanics Royal Institute of Technology; Stockholm, Sweden

99) Ehgartner, Brian L و Munson, Darrell E., 2005 "**Final Report on Weeks Island Monitoring Phase**" ۱۹۹۹ through, Sandia National Laboratories.

100) *Stora bergum i Sverig LRC gaslager i Halmstad*; Per Tengborg, FB Engineering AB

Abstract

Present study aims to stability and permeability analysis of Iranian natural cave for feasibility study of underground crude oil storage. It is quite clear that utilizing the natural cave as a storage reservoir can result in decreasing of associated cost of excavating a cavern in the rocks. To achieve this purpose it is essential to prepare a list of known caves and select the appropriate cave regarding the criteria considered. At the end, based on the criteria mentioned, Sultabel cave was selected for oil storage. After determination of the proper options, stability analysis was carried out using numerical modeling. In this regard, static analysis has been done firstly and then possible side effects of injection of crude oil in the cave have been evaluated in diverse conditions. Finally, after description of different types of storage in rock caves, the best option to store the oil has been introduced and various approaches to control the permeability have been offered.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

for feasibility natural cavern permeability analysis of Iran and Stability
Storage study of underground Crude oil

Amir Soltanalizadeh

Supervisor(s):

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali

Jan 2012