

دانشگاه صنعتی شهرود

دانشگاه مهندسی معدن، نفت و ژئوفزیک

کروه مکانیک نگ

## بررسی فناوری ساخت و تحلیل پایداری مغارهای آهکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به روش اتحالی

دانشجو: مسعود اسحقی

اساتید راهنمای:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر احمد رمضانزاده

استاد مشاور:

مهندس مهدی نوروزی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد



شماره :

تاریخ :

ویرایش :

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

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

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مسعود اسحقی رشتہ استخراج معدن... گرایش مکانیک سنج تحت عنوان بررسی فناوری ساخت و تحلیل پایداری مغاره‌های آهکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به روش اینجانلی که در تاریخ ۱۳۹۱/۷/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

 مردود دفاع مجدد قبول (با درجه: خوب

امتیاز ۱۶/۰۰)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادرهایما	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای	دکتر احمد رمضان زاده	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندس مهدی نوروزی	دانشجوی دکتری	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد عطایی	استاد	
۴- استاد معین	دکتر حسین میرزاپی	استادیار	
۵- استاد مستحسن	دکتر شکران زارع	استادیار	

رئیس دانشکده:



تقدیم به درودگرامی و خواهر و برادران عزیزم که همواره پشتیبان من بوده اند

## تقدیر و تشکر:

خداآوند را شاکر هستم که به من قدرت انجام این پایان نامه را عطا کرد . بر خود لازم می دانم از تمامی کسانی که در این راه به من کمک ارزانی داشته‌اند تشکر کنم، از پدر و مادر مهریان و دلسوز که همواره یار و یاور من در این راه بوده‌اند، از خواهر و برادران عزیزم که همواره مرا راهنمایی کرده‌اند و از اساتید راهنمای محترم دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر احمد رمضان‌زاده و همچنین استاد مشاور عزیزم مهندس مهدی نوروزی که همواره با راهنمایی‌های گراف‌درشان مسیر پر پیچ و خم انجام این پایان نامه را بر من آسان کرده‌اند و همچنین از مهندسی مهندسی مهدی بخفی و مندس خانم داوودآبادی که کمک‌های بسیاری را به این‌جانب ارزانی داشته‌اند .

فضاهای بزرگ زیرزمینی (مغارها) را می‌توان به طور کلی در پنج رده مختلف شامل نیروگاه‌های برق‌آبی، ذخیره سیالات، دفن پسماندهای هسته‌ای، سیستم‌های فاضلاب و کاربری‌های متفقه رده‌بندی کرد. امروزه ذخیره‌سازی گاز در مغارهای نمکی، سنگی، مخازن نفت و گاز تهی‌شده و معدن‌های متروکه انجام می‌شود. نبود سازندهای نمکی در نزدیکی بازارهای مصرف به همراه همگرایی زیاد مغارهای نمکی، هزینه حفر و نگهداری زیاد مغارهای سنگی، نیاز به گاز پایه و هزینه زیاد تبدیل مخازن نفت و گاز تهی‌شده و معادن متروکه به مغارهای ذخیره‌سازی، لزوم اجرای ذخیره‌سازی در سازند دیگری از جمله سازندهای کربناته را مطرح می‌کند. وجود تشکیلات سنگی کربناته در سراسر جهان و در نزدیکی بازارهای مصرف، پایداری فضاهای حفر شده در تشکیلات کربناته و مناسب بودن ساختارهای کربناته برای توسعه ظرفیت ذخیره‌سازی به حجم مورد نظر در نزدیکی نیروگاه‌ها از جمله مزایای این روش جدید است. روش پیشنهاد شده برای حفر مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته به صورت معدن‌کاری انحلالی با استفاده از اسید است. در همین راستا در این پژوهش، مناطقی از کشور ایران که دارای شرایط لازم برای ساخت مغار در تشکیلات کربناته در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین است، مشخص شده و همچنین به بررسی فنی و اقتصادی این روش جدید به همراه بررسی مشکلات عملیاتی و زیستمحیطی آن پرداخته شده است. با توجه به شرایطی مانند وجود تشکیلات کربناته در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین، نزدیکی به خطوط انتقال گاز و تکتونیک آرام، مناطقی از اطراف استان تهران، قم و قزوین برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات آهکی انتخاب شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار <sup>3D</sup>FLAC مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل پایداری چهار مغار، استوانه‌ای قائم با شعاع ۱۸ متر و دو نیم‌کره با شعاع ۱۸ متر در دو سطح مقطع آن، استوانه‌ای قائم با شعاع ۱۸ متر، استوانه‌ای قائم با شعاع ۲۰ متر و استوانه‌ای خوابیده (با محور افقی) با شعاع ۱۸ متر و دو نیم‌کره با شعاع ۱۸ متر در دو سطح مقطع آن، برای عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین و داخل ساختار آهکی انجام شده است. در این پژوهش

همچنین حد بالا و پایین فشار گاز داخل مغار که تحت آنها ناپایداری در مغار رخ می‌دهد، تعیین شده است. در تحلیل پارامتری انجام داده شده، مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش افقی به قائم و در تحلیل حساسیت انجام داده شده نیز عمق و ابعاد مغار بیشترین تاثیر را در میزان پایداری نشان داده است.

**كلمات کلیدی:** ذخیره‌سازی گاز، سازنده‌های کربناته، مشکلات زیستمحیطی، طراحی هندسی، مدل-سازی سه‌بعدی.

## لیست مقالات متحج از پایان نامه

بررسی آثار مخرب زیست محیطی احداث مغارهای ذخیره سازی گاز در سنگ آهک با استفاده از فناوری معدن کاری انحلالی - دانشگاه تهران - اردیبهشت ۱۳۹۱

## فهرست مطالب

۱	تقدیم پایان نامه
۲	تقدیر و تشکر
۳	تعهدنامه
۴	چکیده
۵	لیست مقالات مستخرج از پایان نامه
۶	فصل اول: کلیات
۷	۱-۱ مقدمه
۸	۱-۲ ضرورت انجام ذخیره سازی در ایران
۹	۱-۳ ضرورت انجام پایان نامه
۱۰	۱-۴ ویژگی ها و کاربری های مغاره ای آهکی ذخیره سازی گاز طبیعی
۱۱	۱-۵ پیشینه ذخیره سازی درون مغاره ای کربناته
۱۲	۱-۶ مراحل انجام تحقیق
۱۳	فصل دوم: مکان یابی مناطق مستعد برای احداث مغاره ای ذخیره سازی گاز طبیعی در سنگ آهک
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۵	۱-۲ تدوین شاخص ها
۱۶	۱-۲-۱ مبادی تولید گاز
۱۷	۱-۲-۲ مبادی مصرف
۱۸	۱-۲-۲-۱ گرمایشی
۱۹	۱-۲-۲-۲ صنعتی
۲۰	۱-۲-۲-۳ فاصله تا خطوط انتقال گاز
۲۱	۱-۲-۴ صادرات و واردات گاز
۲۲	۱-۳ الزامات کارفرمایی
۲۳	۱-۳-۱ انشعابات و مصرف کنندگان گاز طبیعی
۲۴	۱-۳-۲ امکانات زیربنایی

۳۷	۴-۲ تعیین مکان مناسب برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک .....
۴۹	۵-۲ نتیجه‌گیری: .....
۵۱	<b>فصل سوم: الزامات عملیاتی احداث و بهره‌برداری مغار</b>
۵۲	۱-۳ مقدمه .....
۵۲	۲-۳ الزامات احداث مغار .....
۵۳	۱-۲-۳ مقدار سنگ قابل انحلال .....
۵۴	۲-۲-۳ ویژگی‌های اسید و انحلال پذیری سنگ .....
۵۷	۱-۲-۲-۳ ثابت معادله واکنش انحلال .....
۵۸	۲-۲-۲-۳ قابلیت انحلال محصول انحلال .....
۶۰	۳-۲-۲-۳ هزینه‌های اسید .....
۶۲	۳-۳ سایر هزینه‌ها .....
۶۲	۱-۳-۳ تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت .....
۶۴	۲-۳-۳ تخمین هزینه‌های کلی ساخت .....
۶۶	۴-۳ روش‌های اجرا .....
۶۹	۵-۳ مقایسه هزینه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی .....
۷۱	۶-۳ خصوصیات مواد .....
۷۲	۷-۳ پیامدهای زیستمحیطی ساخت مغار در سنگ آهک .....
۷۳	۱-۷-۳ نشت اسید .....
۷۴	۲-۷-۳ گاز دی‌اکسیدکربن $\text{CO}_2$ .....
۷۷	۳-۷-۳ انتشار گاز سولفید هیدروژن $\text{H}_2\text{S}$ .....
۷۷	۴-۷-۳ سایر مخاطرات زیستمحیطی .....
۷۷	۱-۴-۷-۳ نشست زمین .....
۷۹	۲-۴-۷-۳ مشکلات همراه با دور ریختن باطله‌ها و تفاله‌های معدنی .....
۷۹	۸-۳ بررسی چگونگی کاهش اثرات مخرب زیستمحیطی .....
۸۰	۱-۸-۳ کنترل نشت گاز .....
۸۱	۲-۸-۳ کنترل نشت اسید .....
۸۲	۳-۸-۳ ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن .....

۱-۳-۸-۳ ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در ساختارهای زمین‌شناسی .....	۸۳
۲-۳-۸-۳ ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در اقیانوس.....	۸۳
۳-۳-۸-۳ ذخیره‌سازی سطحی در زیست‌توده‌ها یا کانی‌های کربناته .....	۸۴
۴-۸-۳ کاهش سولفید هیدروژن.....	۸۵
<b>فصل چهارم: برآورد پارامترهای هندسی مغار.....</b>	<b>۸۷</b>
۱-۴ شکل هندسی مقطع مغارهای ذخیره‌سازی .....	۸۸
۲-۴ عمق .....	۸۹
۳-۴ تعیین حجم مغار.....	۹۰
۴-۴ هندسه مغار.....	۹۳
۵-۴ کنترل شکل مغار.....	۹۴
<b>فصل پنجم: مدل‌سازی و تحلیل عددی.....</b>	<b>۹۸</b>
۱-۵ مقدمه .....	۹۹
۲-۵ خصوصیات سنگ آهک .....	۹۹
۳-۵ تعیین مدل رفتاری توده‌سنگ آهک .....	۱۰۰
۴-۵ خصوصیات تشکیلات آهکی .....	۱۰۱
۵-۵ ساز و کار نرم‌افزار FLAC <sup>3D</sup> .....	۱۰۲
۶-۵ مدل‌سازی مغار .....	۱۰۳
۷-۵ تنش برجا.....	۱۰۳
۸-۵ فشار داخلی مغار .....	۱۰۳
۹-۵ نیروی نامتعادل‌کننده .....	۱۰۴
۱۰-۵ تاریخچه جابجایی .....	۱۰۵
۱۱-۵ شاخص‌های پلاستیسیته .....	۱۰۶
۱۲-۵ کرنش بزرگ و کوچک .....	۱۰۶
۱۳-۵ تقارن مغار .....	۱۰۶
۱۴-۵ مدل شماره ۱ .....	۱۰۸
۱۵-۵ مدل شماره ۲ .....	۱۰۸
۱۶-۵ مدل شماره ۳ .....	۱۰۹

۱۰۹	۱۷-۵ مدل شماره ۴
۱۰۹	۱۸-۵ تحلیل عددی
۱۱۰	۱-۱۸-۵ نیروی نامتعادل کننده
۱۱۰	۲-۱۸-۵ جابجایی و کرنش
۱۱۸	۳-۱۸-۵ گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغارها
۱۱۹	۴-۱۸-۵ تنش‌ها
۱۲۲	۱۹-۵ انتخاب شکل مغار
۱۲۳	۲۰-۵ بیشترین و کمترین فشار گاز داخل مغار
۱۲۶	<b>فصل ششم: تحلیل حساسیت و تحلیل پارامتری</b>
۱۲۷	۱-۶ مقدمه
۱۲۷	۲-۶ تحلیل پارامتری
۱۲۷	۱-۲-۶ نسبت تنش افقی به قائم
۱۳۱	۲-۲-۶ چسبندگی
۱۳۳	۳-۲-۶ مدول شکل‌پذیری
۱۳۵	۳-۶ تحلیل حساسیت
۱۳۵	۱-۳-۶ عمق
۱۳۹	۲-۳-۶ ابعاد مغار
۱۴۱	۵-۶ نتیجه‌گیری
۱۴۲	<b>فصل هفتم: جمع‌بندی نتایج و ارایه پیشنهادها</b>
۱۴۳	۱-۷ جمع‌بندی
۱۴۵	۲-۷ پیشنهادها
۱۴۸	منابع
۱۴۹	منابع فارسی
۱۵۲	منابع لاتین

## فرست جداول

جدول (۱-۲): تعداد انشعابات نصب شده و تعداد مصرف کنندگان شرکت‌های گازرسانی ..... ۳۲
جدول (۱-۳): انرژی آزاد گیبس، تغییرات آنتالپی و ثابت تعادل برای چند واکنش انحلال اسیدی آهک ..... ۵۸
جدول (۲-۳): قابلیت انحلال بعضی از نمک‌های کلسیم متداول در آب در شرایط استاندارد (STP). ..... ۵۹
جدول (۳-۳): هزینه‌های اسید ..... ۶۱
جدول (۴-۳): هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت تخمین زده شده برای احداث مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی ..... ۶۳
جدول (۵-۳): تخمین هزینه‌های تهیه تجهیزات برای احداث مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی با استفاده از انحلال اسیدی آهک توسط اسید هیدروکلریک ..... ۶۴
جدول (۶-۳): هزینه آماده‌سازی تخمین زده شده برای احداث مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی با استفاده از انحلال اسیدی سنگ آهک با استفاده از اسید هیدروکلریک ..... ۶۵
جدول (۷-۳): هزینه‌های روش حفاری دو چاهی ..... ۶۸
جدول (۸-۳): خصوصیات فولاد و مشخصات لوله ..... ۷۲
جدول (۹-۳): خصوصیات اسید هیدروکلریک و نمک $\text{CaCl}_2$ ..... ۷۲
جدول (۱-۴): شکل هندسی و ابعاد مغارهای مدل شده ..... ۹۴
جدول (۱-۵): خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ آهک استفاده شده برای تحلیل پایداری مغار ..... ۱۰۲
جدول (۱-۵): مقادیر درصد آزادسازی تنش در قسمت‌های مختلف مغار (اعداد مثبت نشانگر آزادسازی تنش و اعداد منفی نشانگر تمرکز تنش هستند) ..... ۱۲۲
جدول (۳-۵): مقادیر درصد آزادسازی تنش در قسمت‌های مختلف مغار مدل شماره ۱ برای حد بالا و پایین فشار گاز داخلی ..... ۱۲۵

# فرست اشغال

..... شکل (۱-۱): مراحل انجام پایان نامه	۱۲
..... شکل (۱-۲): میدانهای گازی ایران	۲۶
..... شکل (۲-۲): مصرف گرمایشی (خانگی، تجاری و عمومی) گاز طبیعی کشور در سال ۱۳۸۹ به تفکیک استان‌ها	۲۸
..... شکل (۳-۲): مصرف صنعتی گاز طبیعی کشور در سال ۱۳۸۹ به تفکیک استان‌ها	۲۹
..... شکل (۴-۲): نقشه خطوط لوله اصلی انتقال گاز ایران	۳۰
..... شکل (۵-۲): نقشه خطوارهای تکتونیکی کشور ایران	۳۵
..... شکل (۶-۲): نقشه راههای کشور	۳۶
..... شکل (۷-۲): نقشه توپوگرافی کشور	۳۷
..... شکل (۷-۲): نقشه خطوارهای تکتونیکی در اطراف استان تهران، قم و قزوین	۳۹
..... شکل (۸-۲): منطقه واقع در نزدیکی کوه دماوند در شرق استان تهران با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۰
..... شکل (۹-۲): موقعیت سازند قم در استان قم	۴۱
..... شکل (۱۰-۲): منطقه واقع در تاقدیس کمرکوه در غرب استان قم با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۲
..... شکل (۱۱-۲): منطقه واقع در نزدیکی کوه دو برادران در جنوب شهر قم با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۳
..... شکل (۱۲-۲): منطقه‌ای واقع در شمال شرق شهر قزوین با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۴
..... شکل (۱۳-۲): منطقه‌ای واقع در جنوب شرق استان قزوین با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۵
..... شکل (۱۴-۲): منطقه‌ای واقع در شمال شرق استان قزوین با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۶
..... شکل (۱۵-۲): منطقه‌ای واقع در شمال استان سمنان با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین	۴۷
..... شکل (۱۶-۲): نقشه خطوط انتقال برق در اطراف استان تهران، قم، قزوین و سمنان	۴۸
..... شکل (۱-۳): مقدار سنگ آهکی که باید در اسید به منظور ساخت مغار با حجم معین برای ذخیره‌سازی حجم مشخصی از گاز، حل شود	۵۴
..... شکل (۲-۳): هزینه‌های احداث و تجهیز مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی در سنگ آهک با تخلخل ۰، ۵ و ۱۰ درصد در عمق‌های مختلف و در شمال غربی آمریکا	۶۵
..... شکل (۳-۳): نمودار فرایند انحلال اسیدی سنگ کربناته برای احداث مغار ذخیره‌سازی	۶۷

شکل (۴-۳): انواع روش‌های اجرای چاه برای احداث مغارذخیره‌سازی گاز با استفاده از انحلال اسیدی سنگ کربناته	۶۹
شکل (۵-۳): انواع روش‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی: (A) مغاره‌ای نمکی (B) معادن متروکه، (C) سفره‌های آب زیرزمینی، (D) مخازن نفت و گاز تهی شده و (E) مغاره‌ای سنگ سخت.....	۷۰
شکل (۶-۳): مقایسه هزینه روش‌های مختلف ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز. انحلال اسید برای (الف) MCM، ۲۸ MCM، بدون تخلخل، هزینه اسید نشان داده شده در جدول (۳-۳)، ۷۵٪ CaCl <sub>2</sub> فروخته شده، عمق ۲۴۴۰ متر (ب) ۲۸ MCM، ۱۰٪ تخلخل، هزینه اسید نشان داده شده در جدول (۳-۳)، ۷۵٪ CaCl <sub>2</sub> فروخته شده، عمق ۲۴۴۰ متر (ج) MCM ۲۸، ۷۱٪ تخلخل، ۶۵٪ هزینه اسید نشان داده شده در جدول (۳-۳)، ۷۵٪ CaCl <sub>2</sub> فروخته شده، عمق ۲۴۴۰ متر.....	۷۱
شکل (۷-۳): نمودار حالت برای گاز CO <sub>2</sub> .....	۷۶
شکل (۸-۳): مدل نشست ناشی از معدن کاری انحلالی به روش تک چاهی.....	۷۸
شکل (۹-۵): روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن.....	۸۳
شکل (۱-۴): نمودارهای دما- عمق برای ۶ ناحیه از ایران واقع در بیرون پهنه زاگرس- خلیج فارس، بر اساس دمای ته چاههای نفت.....	۹۱
شکل (۴-۴): وزن حجمی گازهای طبیعی .....	۹۲
شکل (۳-۴): تغییرات حجم مخزن مورد نیاز برای ذخیره‌سازی ۷ تا ۲۸ میلیون مترمکعب گاز طبیعی نسبت به عمق	۹۳
شکل (۴-۴): شکل هندسی مغاره‌ای مدل شده (شکل‌ها بدون مقیاس ترسیم شده است).....	۹۴
شکل (۵-۴): شکل هندسی و چگونگی ناپایداری یک مغار .....	۹۵
شکل (۴-۶): اثر ضربه قوچ آب.....	۹۶
شکل (۱-۵): نمودار بیشترین نیروی نامتعادل کننده.....	۱۰۵
شکل (۲-۵): تاریخچه جابجایی در راستای محور Y .....	۱۰۶
شکل (۳-۵): شکل هندسی مغاره‌ای مدل شده.....	۱۰۷
شکل (۴-۵): نمودار تغییرات بیشترین نیروی نامتعادل کننده برای مدل شماره ۱ .....	۱۱۰
شکل (۵-۵): جابجایی در راستای کف، سقف، گوشه بالا و گوشه پایین مغار مدل شماره ۱ .....	۱۱۱
د: جابجایی در راستای محور X مغار مدل شماره ۳ .....	۱۱۲
شکل (۶-۵): جابجایی کف، سقف، گوشه بالا و گوشه پایین مغارهای مدل شماره ۲ و ۳ .....	۱۱۲
شکل (۷-۵): جابجایی سقف، کف، گوشه بالا، گوشه پایین مغار مدل شماره ۴ .....	۱۱۳
شکل (۸-۵): کانتورهای جابجایی مغارها در راستای محورهای X و Z .....	۱۱۴
شکل (۹-۵): کانتور جابجایی در راستای Y مدل شماره ۴ .....	۱۱۵
شکل (۱۰-۵): کانتورهای کرنش برشی برای مدل‌های شماره ۱ تا ۴ در عمق ۱۳۰۰ متری زمین .....	۱۱۶
شکل (۱۱-۵): کانتورهای کرنش حجمی برای مدل‌های شماره ۱ تا ۴ در عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین .....	۱۱۷
شکل (۱۲-۵): گسترش ناحیه تسليیم در اطراف مغارهای مدل‌های ۱ تا ۴ .....	۱۱۹
شکل (۱۳-۵): کانتورهای تنیش افقی و قائم در اطراف مغارهای مدل‌های ۱ تا ۴ .....	۱۲۲
شکل (۱۴-۵): گسترش ناحیه تسليیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ برای فشارهای داخلی بیشتر و کمتر از فشار هیدرولاستاتیک .....	۱۲۴

شكل (۱-۶): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ با نسبت‌های مختلف تنش افقی به قائم	۱۲۹
شكل (۲-۶): نمودار تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم	۱۳۰
شكل (۳-۶): نمودار تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم	۱۳۱
شكل (۴-۶): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ برای مقادیر مختلف چسبندگی	۱۳۲
شكل (۵-۶): نمودار تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ در بازه چسبندگی $4/7$ تا $8/7$ مگاپاسکال	۱۳۲
شكل (۶-۶): نمودار تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ در بازه چسبندگی $4/7$ تا $8/7$ مگاپاسکال	۱۳۳
شكل (۸-۶): نمودار تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات مدول شکل‌پذیری	۱۳۴
شكل (۹-۶): نمودار تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات مدول‌های شکل‌پذیری	۱۳۵
شكل (۱۰-۶): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ در اعماق مختلف	۱۳۶
شكل (۱۰-۶): تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات عمق	۱۳۷
شكل (۱۱-۶): تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات عمق	۱۳۸
شكل (۱۲-۶): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ در عمق ۱۴۰۰ متری زمین	۱۳۸
شكل (۱۳-۶): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار برای ابعاد مختلف مغار	۱۴۰
شكل (۱۴-۶): تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار نسبت به تغییرات ابعاد مغار	۱۴۰
شكل (۱۵-۶): تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار نسبت به تغییرات ابعاد مغار	۱۴۰

فصل اول:

# کلمات

۸۰

## ۱-۱ مقدمه

ذخیره‌سازی ایمن و موثر مقادیر زیادی از سیالات و گازها اغلب مسائل و مشکلات پیچیده‌ای را به همراه دارد، به ویژه برای سیالات و گازهایی که خطراتی را برای مردم و محیط‌زیست (مانند آتش-سوzi) پدید می‌آورند. همچنین ذخیره‌سازی ایمن حجم زیاد گاز طوری که به لحاظ اقتصادی و عملیاتی امکان‌پذیر باشد، کاری است که تجارتی کمتری برای آن وجود دارد. علاوه بر این مشکلات، با افزایش جمعیت نیاز به ذخیره‌سازی گاز نیز افزایش پیدا می‌کند. فناوری‌های موجود برای ذخیره‌سازی گاز شامل ذخیره‌سازی سطحی و زیرزمینی گاز است. روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی مشتمل بر ذخیره‌سازی در میدان‌های نفت و گاز تهی شده، مخازن آبخوان و معادن متروکه است. علاوه بر روش‌های عنوان شده، ذخیره‌سازی گاز در مغارهای نمکی نیز در برخی از نقاط جهان انجام شده است (Castle, et al., 2007).

ساخت تعدادی مخزن و استفاده از کشتی برای ذخیره‌سازی سطحی، مشکلاتی را از نظر حملات تروریستی ایجاد می‌کند. همچنین مایع کردن گاز طبیعی برای ذخیره کردن در تانکرهای عایق شده بسیار هزینه‌بر است. ساخت و نگهداری این تانکرها نیز بسیار پرهزینه است. روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی موجود نیز مشکلاتی دارند. به عنوان مثال، تبدیل میدان‌های نفت و گاز و منابع آبخوان به مخازن ذخیره‌سازی و همچنین ساخت مغارهای نمکی در مکان‌های مناسب، مشکلاتی را از نظر نزدیک نبودن به بازارهای مصرف و مراکز حمل و نقل دارند. مغارهای نمکی نرخ‌های بهره‌برداری بالا و نفوذ‌پذیری کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارند، ولی این مغارها مشکلاتی را از بابت جریان نمک در دماهای بالا و یا همگرا شدن مغار در فشارهای بالا دارند (Castle, et al., 2007). بنابراین نیاز به فناوری‌ای که امکان ذخیره‌سازی گاز طبیعی را در نزدیکی بازارهای مصرف فراهم کند، مشکل همگرایی مغارهای نمکی را نداشته باشد و به لحاظ مسائل استراتژیک و پدافند غیرعامل نیز ایمن باشد، احساس می‌شود. بنابراین فناوری جدید ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای آهکی مطرح شده است.

با توجه به مطالب عنوان شده، هدف از ارایه این تحقیق، بررسی فناوری ساخت و تحلیل پایداری مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای آهکی است. منظور از بررسی فناوری ساخت، مسایل مربوط به طراحی و الزامات عملیاتی بهره‌برداری مغار و نیز فرایند کنترل شکل مغار در حین عملیات احداث آن است.

## ۱- ضرورت انجام ذخیره‌سازی در ایران

ایران با در اختیار داشتن حدود ۲۷ هزار میلیارد مترمکعب گاز طبیعی و مالکیت حدود ۱۵ درصد از ذخایر گاز طبیعی جهان، دومین رتبه (پس از روسیه) را در جهان به خود اختصاص داده است. نسبت ذخایر به تولید گاز و یا به عبارتی عمر ذخایر گاز طبیعی ایران بیش از ۱۰۰ سال برآورد شده است. این در حالی است که نسبت ذخایر به تولید یا عمر ذخایر گازی دنیا به طور متوسط در حدود ۶۵ سال برآورد شده است. بر پایه این برآوردها، ایران می‌تواند به راحتی اقتصاد خود را بر مبنای گاز سامان دهد (ترازانمه انرژی، ۱۳۸۹).

عمده منابع تولید گاز در کشور در مناطق جنوبی ایران متمرکز است و طول مسیر انتقال گاز از این منابع به مناطق شمالی و مبادی مصرفی و صادراتی آن، در هر خط انتقال متجاوز از ۱۰۰۰ کیلومتر است. در صورتی که به هر دلیل در سیستم خطوط انتقال نقصی به وجود آید، تامین گاز مصرفی مناطق شمالی، تهران و مبادی صادراتی کشور دچار مشکل خواهد شد. همچنین در فصول گرم سال که میزان مصرف گاز کمتر از ایام سرد سال است، به دلیل عدم برخورداری از صنعت ذخیره‌سازی گاز طبیعی، از تمام ظرفیت تولید استفاده نمی‌شود و بالعکس، در فصل سرما (بهویژه در روزهای سرد) که مصرف گاز افزایش چشم‌گیری می‌یابد، با وجود استفاده از حداکثر ظرفیت تولید گاز، کشور با حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد کمبود گاز مواجه می‌شود، لذا وزارت نفت می‌تواند با اجرای طرح ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مخازن زیرزمینی و برداشت از آن در فصل سرما یا دیگر موقع لازم، ضمن جبران بخشی از کمبود گاز مصرفی در ایام سرد سال از وقوع مشکلات دیگر نیز جلوگیری کند (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).

گاز طبیعی را می‌توان در مخازن طبیعی تخلیه شده گاز یا نفت، سفره‌های آب زیرزمینی، گنبدهای نمکی، معادن قدیمی زغال‌سنگ و یا سایر فضاهای معدنی ذخیره‌سازی نمود. در حال حاضر در ایران، اجرای طرح‌های ذخیره‌سازی به خصوص بررسی ذخیره‌سازی در مخازن هیدروکربوری تخلیه شده، حائز اهمیت است. شرکت ملی گاز ایران طرح‌های ذخیره‌سازی طاقدیس آبدار یورتشای ورامین، مخزن گاز سراجه قم و طرح طاقدیس آبدار تلخه گرم‌سار شامل: ایران مرکزی، سرخس و قزل‌تپه را در دست اجرا دارد. همچنین شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی، فعالیت‌هایی را برای شناسایی ساختارهای مناسب جهت ذخیره‌سازی گاز در میدان مخازن سوریجه در منطقه خانگیران و ایران مرکزی به مرحله اجرا گذاشته است (ترازانمه انرژی، ۱۳۸۹).

لزوم ذخیره‌سازی گاز را می‌توان از دیدگاه‌های زیر مورد بررسی قرار داد:

۱- افزایش توان رقابتی و حفظ استقلال سیاسی کشور در سطح منطقه و جهان و همچنین در

اختیار داشتن قدرت ذخیره‌سازی گاز به عنوان یک ابزار قدرت در اقتصاد سیاسی

۲- برآوردن اهداف پدافندی و حفظ ذخیره‌های استراتژیک گاز کشور در زمان وقوع جنگ و

عملیات‌های خرابکاری

۳- اهمیت برداشت گاز از میادین مشترک و تزریق آن به چاههای ذخیره‌سازی گاز و برداشت

نفت

۴- کسب جایگاه بین‌المللی بهتر از نظر توسعه‌یافتنگی

۵- ایفای نقش بازدارنده در هنگام سقوط بهای انرژی در سطح بین‌المللی

۶- ایجاد توان لازم برای دخالت در بازارهای جهانی انرژی و افزایش اعتماد در سرمایه‌گذاری

خارجی

۷- نقش ذخیره‌سازی در عرضه یکنواخت گاز و نیاز دنیا به تامین انرژی از گاز و لزوم عرضه

متناوب با تقاضا

۸- تجدیدناپذیر بودن منابع گاز و لزوم استفاده حداکثری از این منبع ملی

- ۹- تامین پایدار سوخت برای مصارف داخلی و امکان مدیریت بهتر بحران در موقع لزوم
- ۱۰- کاهش هزینه تنظیم رگولاتورهای گاز در مراکز صنعتی در اثر تغییر فشار گاز در فصول زمستان و تابستان
- ۱۱- رفع مشکلاتی نظری کاهش عرضه، مشکلات فنی پالایشگاهها و مشکلات فنی خطوط لوله انتقال که تامین و عرضه گاز را تهدید می‌کند.
- ۱۲- مشکلات امنیتی خطوط لوله انتقال گاز به دلیل طولانی بودن مسیر
- ۱۳- کنترل و ایجاد توازن میان عرضه و تقاضای گاز در فصل‌های گرم و سرد سال به دلیل اختلاف تقاضا در مصرف گاز (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).

### ۳- ضرورت انجام پایان‌نامه

همان‌طور که در قسمت (۱-۱) اشاره شد، روش‌های موجود ذخیره‌سازی گاز معايبی دارند. از مهم‌ترین این معايب، همگرا شدن مغارهای نمکی در اثر استفاده زیاد از این مغارهای نبود نمک در همه مناطق از جمله نزدیک بازارهای مصرف، هزینه زیاد حفر و نگهداری و نیز عمق محدود مغارهای سنگ سخت و همچنین هزینه زیاد و نیاز به گاز پایه زیاد منابع آبخوان، است (Foley, 2006).

روش جدید ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک تحت عنوان یک تحقیق در دانشگاه کلمسون<sup>۱</sup> آمریکا مطرح بوده است. حفر مغار در این روش جدید، شبیه معدن‌کاری انحلالی نمک است. مبنای این روش ساخت یک مغار در تشكیلات آهکی (یا دولومیت) بوسیله اسیدشوری است. مراحل ساخت شامل، حفر یک چاه در ساختار آهکی مناسب تا عمق مورد نظر، گردش اسید هیدروکلریک در داخل چاه برای حل شدن سنگ در اسید، پمپاژ محصولات واکنش به بیرون از زمین و استفاده از مغار حاصله برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی است (Foley, 2006).

در مقایسه با سایر روش‌ها، ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای کربناته مزایایی دارد. ساختارهای آهکی نسبت به گنبدهای نمکی و مخازن تهی شده، عمومیت و پراکندگی بیشتری دارند.

---

<sup>۱</sup> - Clemson university

نواحی دارای سنگ‌های کربناته مناسب برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در بیشتر مناطق ایران وجود دارد. این روش، ذخیره‌سازی بیشتر در نزدیکی بازارهای مصرف را ممکن می‌سازد. ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغار آهکی، نیاز به گاز پایه کمتر در مقایسه با مخازن تهی شده و یا آبخوان دارد ( Choi, 2011).

**۱- ویژگی‌ها و کاربری‌های مغارهای آهکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی**  
برخی از ویژگی‌ها و کاربری‌های مغارهای آهکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی ساخته شده توسط روش معدن کاری انحلالی در ادامه آورده شده است.

۱- عدم نیاز به هرگونه سیستم نگهداری متداول در حین معدن کاری، روش معدن کاری انحلالی را به یکی از موثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌های احداث مغارهای بزرگ تبدیل کرده است.

۲- امروزه نمونه‌های گوناگونی از انواع کاربری‌های فضاهای ایجاد شده در سنگ نمک توسط معدن کاری انحلالی موجود است که احتمال این کاربری‌ها در معدن کاری انحلالی توده‌سنگ آهک نیز متصور می‌شود.

۳- در حفرات آهکی ایجاد شده به روش معدن کاری انحلالی می‌توان مواد هیدروکربنی فرار مثل هیدروکربن‌های سبک شامل پروپان، بوتان، اتان، اتیلن و گاز طبیعی را ذخیره نمود.

۴- از مغارهای آهکی می‌توان برای ذخیره‌سازی هوای فشرده استفاده کرد. از ذخایر انرژی هوای فشرده شده می‌توان به مخزن ایجاد شده در گنبد نمکی مک‌اینتاش<sup>۱</sup> در امریکا اشاره نمود. این مجموعه برای تولید انرژی برق استفاده می‌شود. این نوع کاربری را نیز می‌توان برای مخزن آهکی محتمل دانست. در این مورد، مخزن نیاز به آببندی و پوششی مناسب دارد.

۵- فضاهای زیرزمینی ایجاد شده به روش معدن کاری انحلالی در سنگ آهک، به دلیل ایزوله بودن و عدم دسترسی آسان به آنها، محل‌های مناسبی برای انبار نمودن کالاهای و اشیای قیمتی محسوب می‌شوند.

<sup>1</sup> - McIntosh

۶- از مغارهای آهکی می‌توان به عنوان محل استقرار زیرساخت‌های حیاتی و استراتژیک در شرایط جنگ و بحران، استفاده کرد. این مجموعه‌ها از این‌منی پدافندی مناسب برخوردار هستند.

۷- می‌توان از مغارهای آهکی با توجه به همگرایی بسیار کم این نوع مغارها به عنوان فضاهایی برای ذخیره‌سازی جامدات و پناهگاه‌های ایمن استفاده نمود.

۸- فاصله‌ی زیاد این مغارها از سطح زمین، حفاظت مناسبی در برابر حملات هوایی دشمن، ارتعاشات حاصل از انفجارهای سطحی و بمب‌های الکترومغناطیسی (EMP) ارایه می‌کند.

۹- با آب‌بندی فضاهای زیرزمینی ایجاد شده در سنگ آهک می‌توان از این فضاهای برای دفع مواد زاید و خطرناک استفاده نمود و مشکلات زیستمحیطی و اقتصادی مربوط به نشت مواد و آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی را کاهش داد.

**۱-۵ پیشینه ذخیره‌سازی درون مغارهای کربناته**  
روش ارایه‌شده برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ساختارهای کربناته (آهک و دولومیت)، کاملاً جدید بوده و در مرحله تحقیقات و ایجاد نمونه‌های نیمه‌صنعتی است. بنابراین تاکنون به صورت بزرگ- مقیاس اجرا نشده است؛ ولی پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد و رساله‌های دکتری در این زمینه تعریف و انجام شده است، از جمله پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای جیمز فولی<sup>۱</sup> و رساله دکتری آقای جونگ- ون چوی<sup>۲</sup>. بر طبق گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا، ۶ ایالت ایندیانا<sup>۳</sup>، اهایو<sup>۴</sup>، کنتاکی<sup>۵</sup>، ویرجینیای غربی<sup>۶</sup>، پنسیلوانیا<sup>۷</sup> و نیویورک<sup>۸</sup> (با توجه به نزدیکی به خطوط لوله انتقال گاز و بازارهای مصرف و نیز وجود توده‌سنگ آهک در اعمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین) برای

<sup>1</sup>-James Michael Stephen Foley. "AN ANALYSIS OF CAVERN STABILITY AND HYDRAULIC FRACTURES IN RELATION TO NATURAL GAS STORAGE IN LIMESTONE FORMATIONS".

<sup>2</sup>-Jong-Won Choi. "GEOMECHANICS OF SUBSURFACE SAND PRODUCTION AND GAS STORAGE"

<sup>3</sup>- Indiana

<sup>4</sup>- Ohio

<sup>5</sup>- Kentucky

<sup>6</sup>- West Virginia

<sup>7</sup>- Pennsylvania

<sup>8</sup>- New York

ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ساختار آهکی، مناسب تشخیص داده شده است (Castle, et al., 2005)

هرچند تاکنون ذخیره‌سازی گاز درون مغارهای کربناته انجام نشده، ولی روش معدن‌کاری انحلالی برای ساخت مغارهای نمکی و نیز ذخیره‌سازی گاز درون مغارهای سنگی انجام شده است.

روش معدن‌کاری انحلالی تاکنون بارها در سراسر جهان برای استحصال نمک و احداث مغارهای عظیم زیرزمینی در لایه‌ها و گنبدهای نمکی با موفقیت استفاده شده است. معدن‌کاری انحلالی برای کانی‌هایی چون نمک، آهک، پتاس و ترونا بکار می‌رود. همچنین بعضی کانی‌های حاوی اورانیم، مس، طلا و نقره توسط لیچینگ برجا و با استفاده از معدن‌کاری انحلالی و با کاربرد اسید سولفوریک استخراج می‌شوند ( $H_2SO_4$ ). (Hartman L, et al., 2002)

بیش از ۲۰۰۰ سال پیش در چین، لوله‌هایی از جنس بامبو<sup>۱</sup> برای استخراج آب شور از زمین که نوعی معدن‌کاری انحلالی بوده، به کار برده می‌شده است. در سفرهای اروپاییان به چین در بین سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۷۰۰ میلادی، گزارش‌هایی از چال‌های تولید شورآب از اعماق ۴۵۰ تا ۱۲۰۰ متری سطح زمین موجود است. در سال ۱۸۳۰ میلادی بیش از ۶۰ چال استخراج شورآب در ناحیه Kanawha آمریکا گزارش شده است. در دهه ۱۹۰۰ میلادی، عملیات بزرگ مقیاس استخراج آب شور با استفاده از معدن‌کاری انحلالی در ایالت نیویورک آغاز شد (Warren, 2006).

ذخیره‌سازی گاز و سیالات در مغارهای نمک انحلالی در اوایل دهه ۱۹۴۰ میلادی و در طول جنگ جهانی دوم در کانادا گزارش شده است. ذخیره‌سازی میعانات گازی و هیدروکربن‌های سبک در مغارهای نمکی در شمال آمریکا و چند کشور اروپایی به سرعت گسترش یافته است. ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای نمکی ابتدا در انگلستان گزارش شده است. بسیاری از مغارهای ایجاد شده در گنبدهای نمکی در آمریکا و خلیج مکزیک، شورآب را به عنوان ماده اولیه پالایشگاه‌ها تامین می‌کنند و خود نیز به عنوان محلی برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

<sup>۱</sup> - Bamboo

تولیدکنندگان شورآب، از معدن کاری انحلالی کنترل شده برای تولید شورآب استفاده می‌کنند تا علاوه بر تولید شورآب، مغارهایی را که برای اهداف ذخیره‌سازی مناسب هستند، به وجود آورند (Thoms (and Gehle, 2000

فناوری LRC<sup>۱</sup> از سال ۱۹۸۷ توسط شرکت Sydcraft در کشور سوئد تحت بررسی و توسعه قرار گرفته است (Damjanac, et al., 2002). در ایران نیز از سال ۱۳۸۸ مطالعات و بررسی‌های مقدماتی بر روی فناوری LRC به عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی، توسط شرکت پایانه‌های نفتی آغاز شده است. از ابتدای سال ۱۳۸۹ با توجه به تشخیص وجود پتانسیل اولیه برای احداث مخزن ذخیره‌سازی LRC در ایران بر اساس مطالعات و بررسی‌های مقدماتی و همچنین اعلام نیاز شرکت ملی ذخیره‌سازی گاز ایران مبنی بر نیاز حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب ذخیره‌سازی گاز در شمال غرب کشور (دارای شرایط زمین‌شناسی مناسب برای احداث مخازن ذخیره‌سازی سنتی نمی‌باشد)، این موسسه با تمرکز بیشتری اقدام به بررسی و مطالعه پایه‌ای‌تر فناوری LRC و امکان‌سنجی فنی و اقتصادی آن پرداخته است (سعادت میرقدیم و کوچکی، ۱۳۹۰).

غارهای بدون پوشش<sup>۲</sup> برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ میلادی در ایالت تگزاس آمریکا برای ذخیره‌سازی نفت خام مایع<sup>۳</sup> در سازندهای شیلی بکار گرفته شده است. در اروپا، اولین بار فرانسه در سال ۱۹۶۶ و بعد از آن سوئد از این مغارها جهت ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری استفاده کرده است. پس از آن تا دهه ۹۰ میلادی حدود ۷۰ مغار در آمریکا و ۲۰ مغار در اروپا (اکثرا در کشورهای اسکاندیناوی) احداث شده است (Johnson, 2003).

## ۶-۱ مراحل انجام تحقیق

فعالیت‌های انجام شده در این پایان‌نامه شامل ۷ فصل است که نتیجه‌گیری و گزارش نهایی در فصل ۷ ارایه شده است (شکل ۱-۱).

<sup>1</sup> - Lined Rock Cavern

<sup>2</sup> - URC

<sup>3</sup> - LPG

## **فصل اول: کلیات**

در این فصل، مطالب و کلیاتی در رابطه با ضرورت انجام ذخیره‌سازی در ایران، ضرورت انجام این پایان‌نامه، ویژگی‌ها و کاربری‌های مغارهای آهکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی و پیشینه ذخیره‌سازی درون مغارهای کربناته آورده شده است.

## **فصل دوم: مکان‌یابی مناطق مستعد برای احداث مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک**

در این فصل، سعی شده است تا با جمع‌آوری اطلاعات درباره‌ی میدان‌های گازی، میزان مصرف گاز استان‌ها در بخش صنعت و گرمایشی، میزان صادرات و واردات گاز کشور و نیز مکان خطوط لوله‌های انتقال گاز و امکانات زیربنایی، مناطقی از کشور که شرایط لازم برای ساخت مغار در تشکیلات آهکی دارند، شناسایی شوند.

## **فصل سوم: الزامات عملیاتی احداث و بهره‌برداری مغار**

در فصل سوم، اسیدهایی که می‌توانند در فرایند اسیدشویی سنگ آهک بکار روند و ویژگی‌های آنها و خواص انحلالی سنگ آورده شده است. در ادامه این فصل همچنین به قابلیت انحلال محصولات انحلال و هزینه‌های اسید و هزینه‌های کلی تجهیزات ساخت مغار در ساختارهای آهکی پرداخته شده است. انتخاب بهترین اسید برای معدن کاری انحلالی سنگ آهک، مقایسه اقتصادی روش‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی و پیامدهای زیستمحیطی ساخت مغارهای آهکی و راههای مقابله با آن نیز در این فصل آورده شده است.

## **فصل چهارم: برآورد پارامترهای هندسی مغار**

در فصل چهارم، عمقی که در آن، مغارها مدل شده‌اند تعیین شده است. همچنین با توجه به عمق، حجم مغارها نیز تعیین شده است. در این فصل همچنین، هندسه و ابعاد مغارها مشخص شده است. در نهایت به بررسی روش‌هایی برای کنترل شکل مغار در هنگام فرایند ساخت مغار پرداخته شده است.

### **فصل پنجم: مدل‌سازی و تحلیل عددی**

در این فصل، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک مورد نیاز برای مدل‌سازی مغار، آورده شده است. وضعیت جابجایی و کرنش، گسترش ناحیه تسلیم و تنش‌های القایی و به‌طور کلی وضعیت پایداری تحلیل و بررسی شده است. در این فصل همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، مناسب‌ترین شکل و ابعاد مغار و حد بالا و پایین فشار داخلی مجاز مغار تعیین شده است.

### **فصل ششم: تحلیل حساسیت و تحلیل پارامتری**

در فصل ششم، تحلیلی بر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ آهک شامل نسبت تنش افقی به قائم، مدول شکل‌پذیری، مقاومت برشی و پارامترهای طراحی و عملیاتی شامل عمق و ابعاد مغار آهکی ذخیره-سازی گاز طبیعی انجام شده است.

### **فصل هفتم: جمع‌بندی نتایج و ارایه پیشنهادها**

در فصل هفتم، نتایج حاصل از مدل‌سازی تمامی مغارها، تحلیل پارامترها و تحلیل حساسیت‌ها آورده شده است. در این فصل همچنین پیشنهادهایی برای کارهای آینده و نتایج بهتر ارایه شده است.



شکل (1-1): مراحل انجام پایان‌نامه

## فصل دوم:

مکان یابی مناطق مستعد برای احداث مغاره‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی در گزند

آهک

## ۱-۲ مقدمه

تشکیلات کربناته به میزان زیاد در نواحی مختلف کشور گسترده شده است. برای پیدا کردن مناطق مستعد برای احداث مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک باید چندین شاخص و پارامتر در نظر گرفته شوند که جزئیات مربوط به آن‌ها در ادامه آورده شده است.

## ۲-۱ تدوین شاخص‌ها

برای تعیین مناطقی از کشور که شرایط لازم برای ساخت مغار در ساختار کربناته در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری از سطح زمین را دارند، شاخص‌ها و نکاتی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

۱- مبادی تولید: شامل اطلاعاتی درباره میادین تولید گاز کشور، میزان تولید و ذخیره گاز آنها

است.

۲- مبادی مصرف (گرمایشی و صنعتی): شامل میزان مصرف گاز استان‌های کشور برای مصارف گرمایشی و صنعتی است. در این شاخص، همچنین پرمصرف‌ترین و کم‌صرف‌ترین استان‌های مصرف‌کننده گاز طبیعی در دو بخش گرمایشی و صنعتی مشخص شده است.

۳- صادرات و واردات: شامل میزان صادرات و واردات گاز کشور، کشورهای صادرکننده گاز به ایران و واردکننده گاز از ایران است. با مشخص شدن این کشورها، مسیر خطوط لوله گاز صادراتی و وارداتی کشور مشخص می‌شود. با ساخت مغار ذخیره‌سازی در تشکیلات کربناته در نزدیکی این خطوط، می‌توان گاز موجود در این لوله‌ها را ذخیره نمود.

۴- فاصله تا خطوط انتقال گاز: شامل فاصله استان‌ها تا خطوط انتقال گاز است. این شاخص تاثیر زیادی در تصمیم‌گیری درباره تعیین مکان مناسب برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته دارد.

## ۱-۲-۱ مبادی تولید گاز

میزان کل ذخایر قابل استحصال گاز طبیعی کشور از  $33/09$  هزار میلیارد متر مکعب در سال  $1388$  با  $1/6$  درصد افزایش به  $33/62$  هزار میلیارد متر مکعب در پایان سال  $1389$  رسیده است. ایران با این

میزان ذخیره گاز طبیعی پس از فدراسیون روسیه، در رتبه دوم جهان قرار دارد. در سال ۱۳۸۹ وزارت نفت توانست با اکشتاب حدود ۱۰۷۰ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی در مخازن شوریجه، مزدوران بالایی و پایینی و کشف رود میدان توسن، دهرم میدان‌های فروز (بی) و سفید، نیریز میدان آزادگان و دهرم پایینی و بالایی میدان خیام، به حجم ذخایر درجای اولیه کشور اضافه نماید. در همین سال نسبت ذخایر به تولید گاز و یا به عبارتی عمر ذخایر گاز طبیعی کشور، بیش از ۱۰۰ سال برآورد شده است (ترازname ارزی، ۱۳۸۹).

به گاز تولیدی از منابع نفت و گاز قبل از انجام فرآورش، گاز غنی گفته می‌شود، که به صورت "کلاهک"، سازندهای گازی همراه با نفت (مانند گاز منطقه آغازاری) و "گاز میادین مستقل" قابل دسترسی است. در سال ۱۳۸۹، تولید گاز غنی با رشد ۶ درصدی نسبت به سال گذشته به حدود ۶۱۷ میلیون متر مکعب در روز افزایش یافته است (ترازname ارزی، ۱۳۸۹). در ادامه، جانمایی برخی از میادین گازی کشور و میزان تولید آن‌ها به اختصار آورده شده است.

### میدان گازی پارس جنوبی

بزرگترین میدان گازی جهان است که در خلیج فارس و در آب‌های سرزمین ایران و قطر واقع شده است. این میدان گازی بین ایران و قطر مشترک است و در کشور قطر، میدان گازی گنبد شمالی نام دارد. مساحت این میدان ۹۷۰۰ کیلومتر مربع است که ۳۷۰۰ کیلومتر مربع آن در آب‌های کشور ایران و ۶۰۰۰ کیلومتر مربع آن در آب‌های کشور قطر واقع شده است. ذخیره بخش ایرانی میدان ایران و ۱۷ هزار میلیارد متر مکعب گاز درجا، ۱۰ هزار میلیارد متر مکعب گاز قابل برداشت و ۱۴ میلیارد بشکه میغانات گازی است که ۵۰ درصد ذخایر گازی ایران و ۸ درصد از ذخایر گازی جهان است. در پایان سال ۱۳۸۸ ایران توانست به میزان تولید ۱۷۱/۵ میلیون متر مکعب در روز در این میدان دست یابد (مصلح و همکاران، ۱۳۸۷).

## میدان گازی پارس شمالی

این میدان در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شهر بوشهر در آب‌های خلیج فارس و در سواحل شهرستان دیر و دشتی در استان بوشهر واقع شده است. این میدان در عمق ۴۰۰۰ متری زیر سطح دریا واقع شده و دارای مساحتی معادل  $21 \times 19$  کیلومتر مربع و به شکل گنبدی با شیب ملایم کمتر از ۲۰ درجه است. ذخیره میدان حدود ۱/۷ هزار میلیارد متر مکعب است که ۷۲ درصد آن در مخزن بالایی به نام کنگان و دالان فوقانی و ۲۸ درصد آن در مخزن زیرین به نام دالان تحتانی است. میزان تولید این میدان حدود ۱۰۲ میلیون متر مکعب گاز در روز در ۲ فاز است. فاز اول شامل ۳۴ میلیون متر مکعب گاز نمzdایی شده در روز برای تزریق در میدان‌های نفتی جنوب کشور و فاز دوم شامل تولید ۶۸ میلیون متر مکعب گاز ترش با انجام فراورش مورد نیاز (نمzdایی-شیرین‌سازی و گوگردزادایی) و سپس صدور و یا اضافه شدن به تولید داخلی کشور بوده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

## میدان فردوسی

این میدان گازی در حدود ۱۹۰ کیلومتری جنوب شهر بوشهر و ۸۵ کیلومتری سواحل خلیج فارس قرار دارد. در ۲۶ دسامبر ۲۰۰۷ (۵ دی ۱۳۸۶) قراردادی بین شرکت ملی نفت ایران و شرکت SKS Ventures مالزی برای توسعه و بهره‌برداری از این میدان به ارزش تقریبی ۲۰ میلیارد دلار به امضاء رسیده است. مدت این قرارداد ۶۶ ماه و از اهداف آن حفاری ۱۳ چاه استخراج، نصب یک سکوی تولید گاز در دریا، احداث یک خط لوله ۶۶ سانتی‌متری از زیر دریا جهت انتقال گاز به خشکی و احداث یک پالایشگاه در خشکی بوده است. میزان ذخیره گاز در جای این میدان حدود ۲۵۵ تا ۳۶۸ میلیارد متر مکعب است. (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۶).

## میدان گازی شانول

این میدان در شمال شرقی بخش علامرودشت، شهرستان لامرد در جنوب استان فارس قرار دارد. این میدان گازی به همراه میدان گازی هما تأمین کننده گاز پالایشگاه پارسیان است. میدان گازی شانول

دارای ۱۲ حلقه چاه با تسهیلات سرچاهی، خط لوله و مرکز جمع‌آوری است. گاز میدان گازی شانول و میدان گازی هما پس از ارسال به مرکز تفکیک که شامل لخته‌گیر، مخازن جداکننده، پمپ ارسال مایعات، سیستم ارسال و دریافت توپک است، به همراه مایعات گازی توسط دو رشته خط لوله ۹۲ و ۱۵ سانتی‌متری به طول ۴۱ کیلومتر به پالایشگاه پارسیان دو ارسال می‌شود. توان تولید روزانه این دو میدان در مجموع حدود ۳۴ میلیون متر مکعب و توان تولید مایعات گاز آنها حدود ۱۲۵۸۰ بشکه در روز است (شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، ۱۳۸۹).

### میدان گلشن

این میدان در ۱۸۰ کیلومتری جنوب شرقی بوشهر و ۶۵ کیلومتری ساحل خلیج فارس قرار دارد. حجم گاز موجود در مخزن این میدان بین ۱/۶ تا ۱/۲ هزار میلیارد متر مکعب است (شرکت نفت و گاز پارس، ۱۳۸۹).

### میدان گازی کنگان

این میدان در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرقی بوشهر و در نزدیکی شهرکنگان واقع شده و در زمرة بزرگترین میدین گازی خاورمیانه است. این میدان در سال ۱۳۵۱ کشف و پس از آن ۴۰ حلقه چاه در آن حفر شده است. توان تولید گاز و مایعات گازی این میدان به ترتیب حدود ۷۶/۶ میلیون متر مکعب و ۱۵۰۳۰ بشکه در روز است. میزان گاز قابل برداشت این میدان ۵۷۰ میلیارد متر مکعب است (شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، ۱۳۸۹).

### میدان گازی نار

میدان گازی نار در مجاورت میدان کنگان و در نزدیکی شهر جم در استان بوشهر است. توان تولید روزانه گاز و مایعات گازی این میدان به ترتیب ۳۸ میلیون متر مکعب و ۱۹۴۰ بشکه است. میدان نار دارای دو مخزن به نام دهرم بالایی و دلان پایینی است که ۲۴ حلقه از چاهها در دهرم بالایی و یک حلقه چاه در مخزن دلان پایینی قرار دارد. میزان ذخیره قابل برداشت این میدان ۳۷۰ میلیارد متر مکعب است (شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، ۱۳۸۹).

## میدان لاوان

این میدان گازی در سال‌های اخیر (۱۳۸۲) در جزیره لاوان خلیج فارس کشف شده است. این میدان ۳۴ کیلومتر طول و ۸ کیلومتر عرض دارد. حجم گاز موجود در این میدان ۲۵۱ میلیارد متر مکعب و مقدار گاز قابل استحصال آن ۱۷۶ میلیارد متر مکعب است. در این میدان ۴۴۲ میلیون بشکه مایعات و میعانات گازی وجود دارد که حداقل ۱۵۵ میلیون بشکه آن قابل استحصال است. از این میدان روزانه حدود ۲۰ میلیون متر مکعب گاز برداشت می‌شود که نزدیک به تولید یک فاز پارس جنوبی است (وبگاه پترونت، ۱۳۸۹).

## میدان تابناک

میدان تابناک در مرز استان‌های فارس، بوشهر و هرمزگان واقع شده است. این مخزن با حجم درجای اولیه ۸۵۷ میلیارد متر مکعب گاز درجا و ۵۴۵ میلیون بشکه مایعات گازی درجا، مقدار گاز قابل برداشت ۶۰۰ میلیارد متر مکعب و با پیش‌بینی ظرفیت تولید حدود ۵۷ میلیون متر مکعب در روز یکی از مخازن گاز شیرین است. از این میدان به ازای هر ۳۰ هزار متر مکعب گاز، ۳۰ بشکه مایعات گازی تولید می‌شود و روزانه ۲۶ میلیون متر مکعب گاز از آن استحصال و به شرکت ملی گاز تحويل داده می‌شود (وبگاه پترونت، ۱۳۸۹).

## میدان گازی آرش

میدان نفتی و گازی آرش با نفت خام درجای اولیه ۴۵۷ میلیون بشکه در سازند گدوان و حجم گاز درجای اولیه ۲۲/۵ میلیارد متر مکعب و ۸۳/۶ میلیون بشکه میعانات گازی در سازند فهلیان از مخازن کشف شده در سال ۱۳۷۹ است. میدان گازی آرش در مرز مشترک آبی ایران و کویت واقع شده و این میدان بین ۳ کشور ایران، کویت و عربستان مشترک است (وبگاه پترونت، ۱۳۸۸).

## مخزن گازی بی‌بی حکیمه

این میدان در ۲۱۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز و در جنوب میدان نفتی گچساران واقع شده است. مخزن نفتی این میدان در سال ۱۳۴۱ کشف شده و در همان سال به تولید رسیده است. در سال‌های

اخير از افق خامي اين ميدان، مخزن گازی کشف شده است. ميزان گاز در جای اين ميدان حدود ۶۸ ميليارد متر مکعب است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### ميدان گازی دی

ميدان گازی شيرين دی (۱۳۸۰) با حجم گاز در جای اوليه ۱۰۲ ميليارد متر مکعب و حجم ميعانات گازی ۴۳ ميليون بشكه در استان فارس واقع شده است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### ميدان رامين

ميدان نفتی رامين در ۳۰ کيلومتری شمال شهر اهواز واقع شده است. در اين ميدان حدود ۵۷۰۰ ميليون بشكه نفت درجا و ۲۴۲ ميليارد متر مکعب گاز وجود دارد (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### ميدان گازی سفید زاخور

اين ميدان در ناحيه گازخiz استان فارس، در فاصله ۱۶۰ کيلومتری جنوب شرق شيراز و در جنوب ميدان گازی آغار و در غرب ميادين گازی دلان و دی و در حدود ۳۰ کيلومتری جنوب شهرستان قير قرار دارد. ميزان گاز در جای اين ميدان ۳۲۰ ميليارد متر مکعب و ميزان گاز قابل برداشت آن ۲۴۰ ميليارد متر مکعب است. در صورت حفر ۱۷ حلقه چاه در اين منطقه، ۸۵۰ هزار متر مکعب گاز در روز از اين ميدان گازی استخراج خواهد شد (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### ميدان گازی کوه آسماري

اين ميدان گازی در نزديکي شهرستان هفتگل در شمال شرقی استان خوزستان و در لايه ژوراسيك منطقه مسجد سليمان با ظرفيت گاز در جای ۲۸ ميليارد متر مکعب کشف شده که ۲۰/۸ ميليارد متر مکعب آن قابل برداشت است. اين مخزن ۲۸ کيلومتر طول و نزديك به ۵ کيلومتر عرض دارد (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### ميدان گازی کيش

اين ميدان گازی تمام مساحت جزيره کيش را دربرگرفته است و مقداری از آن در دريا قرار دارد، به نحوی که اين ميدان بزرگتر از جزيره کيش است. اين مخزن در عمق ۴۳۰۰ متری دارای ۴ لايه کنگان، دلان فوقاني، نار و دلان تحتاني است که اصلی ترین لايه به کنگان تعلق دارد. ميزان گاز

درجای این میدان حدود ۱/۹ هزار میلیارد متر مکعب و مقدار گاز قابل برداشت آن حدود ۱/۴ هزار میلیارد متر مکعب است (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۸).

### میدان زیره

میدان گازی زیره در استان بوشهر (شمال میدان کنگان) قرار دارد و با حجم ۲۸ میلیارد متر مکعب گاز درجای اولیه و ۲/۸ میلیون بشکه مایعات گازی درجا و با پیش‌بینی ظرفیت تولید ۳/۲ میلیون متر مکعب در روز، امکان بهره‌برداری دارد (شرکت سیفکو، ۱۳۹۰).

### میدان گازی خانگیران

این میدان در منطقه خانگیران که در ۲۵ کیلومتری شمال غربی شهر مرزی سرخس است، قرار دارد. بالاترین لایه گازی مخزن (شنی/ ماسه‌ای شوریجه D) تخلخل و تراوایی بسیار خوب، لایه گازی میانی مخزن (سنگ ماسه‌ای سخت شوریجه B) تخلخل و تراوایی کم و لایه پایینی مخزن (سنگ آهکی شکافدار مزدوران) تخلخل کم و تراوایی زیادی دارد.

#### • مخزن مزدوران

این مخزن در سال ۱۳۴۷ کشف شده و بهره‌برداری از آن از زمستان سال ۱۳۶۲ آغاز شده است. در زمستان سال ۱۳۸۸، از ۳۰ چاه تولیدی مخزن مزدوران در موقع نیاز شرکت ملی گاز تا ۵/۴۸ میلیون متر مکعب گاز در روز بهره‌برداری شده است.

#### • مخزن شوریجه B

این مخزن در سال ۱۳۴۷ کشف و بهره‌برداری از آن از سال ۱۳۵۳ جهت گازرسانی به شهر مشهد آغاز شده است. در سال ۱۳۸۹ از چهار چاه این مخزن روزانه تا یک میلیون متر مکعب گاز تولید می‌شده است. ذخیره گاز قابل استحصال این مخزن حدود ۱۴۱/۲ میلیارد متر مکعب برآورد شده که نزدیک به ۷۲ درصد آن تا پایان سال ۱۳۸۴ برداشت شده است.

#### • مخزن شوریجه D

این مخزن سال‌ها پس از کشف و بهره‌برداری از دو مخزن عمیق‌تر، در سال ۱۳۶۶ کشف و از همان سال، بهره‌برداری از آن آغاز شده است. میزان مایعات گازی تولیدی در ظروف تفکیک اولیه، ۱۰ بشکه

به ازاء ۳۱۰ هزار متر مکعب گاز است. در سال ۱۳۸۹ از ۵ حلقه چاه تولیدی از این مخزن روزانه تا ۵ میلیون متر مکعب گاز تولید می‌شده است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### میدان گازی گنبدلی

این میدان در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان سرخس واقع شده است. حفاری در سال ۱۳۶۰ منجر به کشف ذخایر گازی این مخزن شده و بهره‌برداری از این مخزن از سال ۱۳۶۵ آغاز شده است. از مجموع ۹ چاه حفاری شده در این مخزن در سال ۱۳۸۹ از ۳ حلقه چاه در بهترین شرایط، روزانه ۱/۱ میلیون متر مکعب گاز بهره‌برداری می‌شده است. حجم گاز درجای این میدان ۱۳/۲۵ میلیارد متر مکعب برآورد می‌شود. تولید متوسط از این مخزن در سال ۱۳۸۴ روزانه ۷ میلیون متر مکعب بوده است. ذخیره گاز قابل استحصال این مخزن، کم و در حدود ۸/۷ میلیارد متر مکعب است که تا پایان سال ۱۳۸۴ قریب به ۹۱ درصد آن تولید شده است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### میدان سراجه

طاقدیس سراجه در ۴۵ کیلومتری جنوب شهر قم قرار دارد. گاز این میدان، شیرین فاقد  $H_2S$  و دارای حدود ۸۰ درصد متان و ۶ درصد اتان است. کل ذخیره درجای این میدان ۹/۵ میلیارد متر مکعب و ذخیره قابل استحصال آن حدود ۷ میلیارد متر مکعب گاز است. از این میدان روزانه ۳۰۰ هزار متر مکعب گاز شیرین و ۴۰۰ بشکه میعانات گازی استحصال می‌شود (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### میدان هما

میدان گازی شیرین هما در استان فارس واقع شده است. این میدان دارای حجم گاز درجای اولیه حدود ۱۹۲ میلیارد متر مکعب است. توان تولیدی روزانه این میدان در مجموع ۳۵/۶ میلیارد متر مکعب و توان تولید مایعات گاز آن ۱۲۷۹۰ بشکه در روز است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### میدان گردان

این میدان در استان فارس، جنوب شیراز با حجم گازی اولیه ۱۶۲/۸ میلیارد متر مکعب، میزان گاز قابل استحصال معادل ۱۲۵ میلیارد متر مکعب و ۲۶ میلیون بشکه مایعات گازی درجا، کشف شده است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### **میدان گازی کرنج (استان خوزستان)**

کشف گاز و میعانات گازی در سازند خامی میدان کرنج با ۸۱ میلیارد متر مکعب گاز درجا و ۱۰۹ میلیون بشکه میعانات گازی درجا، انجام شده است (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۸۸).

### **میدان آغار (استان فارس)**

میزان گاز قابل برداشت این میدان ۳۳۰ میلیارد متر مکعب است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۸).

### **میدان فارسی (ساخтарB) (استان خوزستان)**

میزان ذخیره قابل برداشت این میدان ۶۲۰ تا ۳۱۰ میلیارد متر مکعب است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۸).

### **میدان فوروز B (استان بوشهر)**

میزان گاز برجای این میدان ۷۹۰ میلیارد متر مکعب است (شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، ۱۳۹۰).

### **میدان یادآوران-لایه گازی (استان خوزستان)**

میزان گاز درجای این میدان حدود ۲۸۰ میلیارد متر مکعب است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۹).

### **میدان بلال-ساخtar دهرم (استان بوشهر)**

میزان گاز درجای این میدان، ۲۵۰ میلیارد متر مکعب است (شرکت نفت فلات قاره ایران، ۱۳۹۰).

### **میدان مارون-لایه گازی (استان خوزستان)**

میزان گاز برجای این میدان حدود ۱۸۰ میلیارد متر مکعب است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۸).

### **میدان بینک-لایه گازی**

این میدان در استان بوشهر قرار گرفته است. میزان گاز برجای این میدان ۱۰۰ میلیارد متر مکعب است (وبگاه پترونوت، ۱۳۸۸).

### **میدان گازی توس**

میزان گاز برجای این میدان گازی استان خراسان، ۶۰ میلیارد متر مکعب و میزان گاز قابل استحصال آن ۵۰ میلیارد متر مکعب است (شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۹).

### **میدان گازی خیرآباد**

این میدان در استان خوزستان و در سازند گدوان واقع شده است. میزان گاز برجای این میدان ۴/۸ میلیارد متر مکعب است (کوکبی، ۱۳۸۶).

## **میدان وراوی**

میدان گازی وراوی در کوه نر در جنوب بخش علامرودشت و در ۳۰ کیلومتری شرق لامرد واقع شده است. گاز این میدان بهوسیله یک خط لوله ۴۱ سانتی‌متری به طول ۱۶ کیلومتر به پالایشگاه پارسیان دو ارسال می‌شود. توان تولید روزانه گاز این میدان ۵/۸ میلیون متر مکعب و توان تولید مایعات گازی آن ۱۴۴۰ بشکه است (شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، ۱۳۸۹).

## **میدان گورزین**

این میدان در جزیره قشم واقع شده و از سال ۱۹۸۳ آغاز به کار کرده است. میزان گاز درجای این میدان حدود ۴۰ میلیارد متر مکعب است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

## **مخزن خامی منصوری**

عملیات حفاری اکتشافی این میدان در سال ۱۳۸۳ شروع و چاه تا عمق نهایی ۵۰۰۰ متری سطح زمین حفاری شده که اتمام عملیات حفاری و آزمایش لایه‌های گدوان- فهليان بالايی و پاييني منجر به کشف ۷۶۰/۳ میلیون بشکه نفت، ۳۸/۹ میلیارد متر مکعب گاز درجا و همچنین حدود ۱۱۴ میلیون بشکه میعانات گازی درجا شده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

## **میدان آذر**

عملیات حفاری در میدان مشترک آذر (در شهرستان مرزی مهران، مشترک با کشور عراق) در خرداد ماه ۱۳۸۳ آغاز شده است. تکمیل عملیات حفاری و آزمایش‌های لایه‌های مخزنی سروک بالايی و پاييني منجر به کشف ۲/۲ میلیارد بشکه نفت درجا، ۱۸۳/۶ میلیون بشکه میعانات گازی و ۵۳/۹ میلیارد متر مکعب گاز همراه درجا شده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

## **مخزن خامی میدان اهواز**

عملیات حفاری اکتشافی بسیار پیچیده چاه ۳۰۷ اهواز جهت ارزیابی افق خامی میدان نفتی اهواز در دی‌ماه ۱۳۸۳ شروع و چاه تا عمق نهایی ۵۱۵۸ متری سطح زمین با موفقیت حفاری شده است. تکمیل عملیات حفاری و انجام آزمایشات کامل افق‌های مخزنی خامی، منجر به کشف ۲۳/۲ میلیارد

متر مکعب گاز غنی درجا، ۳۵۷/۷ میلیون بشکه میعانات گازی درجا و ۳۵۰ میلیون بشکه نفت درجا در افق داریان شده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

### میدان پرنج

عملیات حفاری اکتشافی در میدان پرنج در آذر ماه ۱۳۸۵ آغاز و چاه تا عمق ۳۰۵۰ متری حفاری شده که اتمام عملیات حفاری و انجام آزمایشات کامل بر روی سازند آسماری منجر به کشف ۲۴۱۸ میلیون بشکه نفت درجا، ۴۸/۱ میلیارد متر مکعب گاز درجا و ۳۴۶ میلیون بشکه میعانات گازی به صورت درجا شده است. با توجه به نزدیکی این میدان به میادین بزرگ نفتی نظیر کرنج و پارسی و تولید نفت از لایه آسماری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

### مخزن گازی میدان فرزاد A و B و نفتی بینالود در بلوک فارسی

ذخیره درجای میدان گازی فرزاد B در حدود ۴۰۰ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی است. بخش بسیار ناچیزی از ساختمان فرزاد A - حصبه در قسمت ایرانی واقع شده است. در حالی که بخش اعظم ساختمان فرزاد B در آبهای ایران واقع شده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

### میدان نفت و گازی بالارود

حفر چاه اکتشافی بالارود- ۱ به منظور ارزیابی پتانسیل هیدروکربوری سازندهای آسماری در مهر ماه سال ۱۳۸۶ آغاز شده و حفاری چاه تا عمق نهایی ۳۷۳۷ متر ادامه یافته که در نتیجه منجر به کشف نفت به میزان حدود ۱/۱ میلیارد بشکه درجا شده است. همچنین در این میدان در لایه‌های سروک و آسماری، ۶۰ میلیارد متر مکعب گاز درجا کشف شده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی، ۱۳۸۸).

### میدان گازی سفید باغون

حفاری چاه اکتشافی سفید باغون- ۱ که بر روی تاقدیس سفید باغون قرار گرفته، در سال ۱۳۸۷ جهت ارزیابی پتانسیل هیدروکربوری لایه‌های مخزنی گروه دهرم آغاز و چاه تا عمق ۴۲۲۰ متر حفاری شده است. بر اساس مطالعات پتروفیزیکی، میزان ذخایر این میدان در حدود ۲۰۰ میلیارد متر مکعب گاز به صورت درجا برآورد شده است (شبکه اطلاع‌رسانی نفت و انرژی ، ۱۳۸۸).

## میدان گازی خیام

این میدان گازی در نزدیکی منطقه پارسیان در شرق عسلویه و ساحل خلیج فارس قرار دارد. ذخایر در جای این میدان گازی ۲۶۰ میلیارد متر مکعب است که ۲۱۰ میلیارد بشکه آن قبل استحصال است. با حفر ۱۸ تا ۲۰ حلقه چاه در این میدان می‌توان روزانه ۲۴ میلیارد متر مکعب گاز برداشت کرد. میزان ذخایر معیانات گازی در این میدان ۲۲۰ میلیون بشکه است که ۱۰۰ میلیون بشکه از این معیانات قابل برداشت است (پترونت، ۱۳۸۹).

## میدان سلمان

میدان سلمان از مخازن مشترک ایران با امارات متحده عربی است که این میدان در کشور همسایه به نام "ابولبخوش"، شناخته شده است. میدان سلمان (ساسان سابق) در سال ۱۳۴۴ در خلیج فارس و منطقه لاوان کشف شده است. ذخیره نفت خام میدان سلمان ۴۰۷۳ میلیون بشکه و ذخیره گاز آن حدود ۵/۲ میلیون متر مکعب گاز درجا است. بهره‌برداری از این میدان از سال ۱۳۴۷ آغاز شده است. بخش اعظم این میدان در آبهای ایرانی خلیج فارس واقع شده است. تولید این میدان نفتی مشترک حدود ۵۱ هزار بشکه در روز است (وبگاه پترونت، ۱۳۸۹).

## میدان هنگام

تنها میدان مشترک ایران با کشور عمان، میدان گازی هنگام است. در این میدان، حجم گاز درجا برابر با ۲۲/۴ میلیارد متر مکعب است (وبگاه پترونت، ۱۳۸۹).

## میدان مبارک

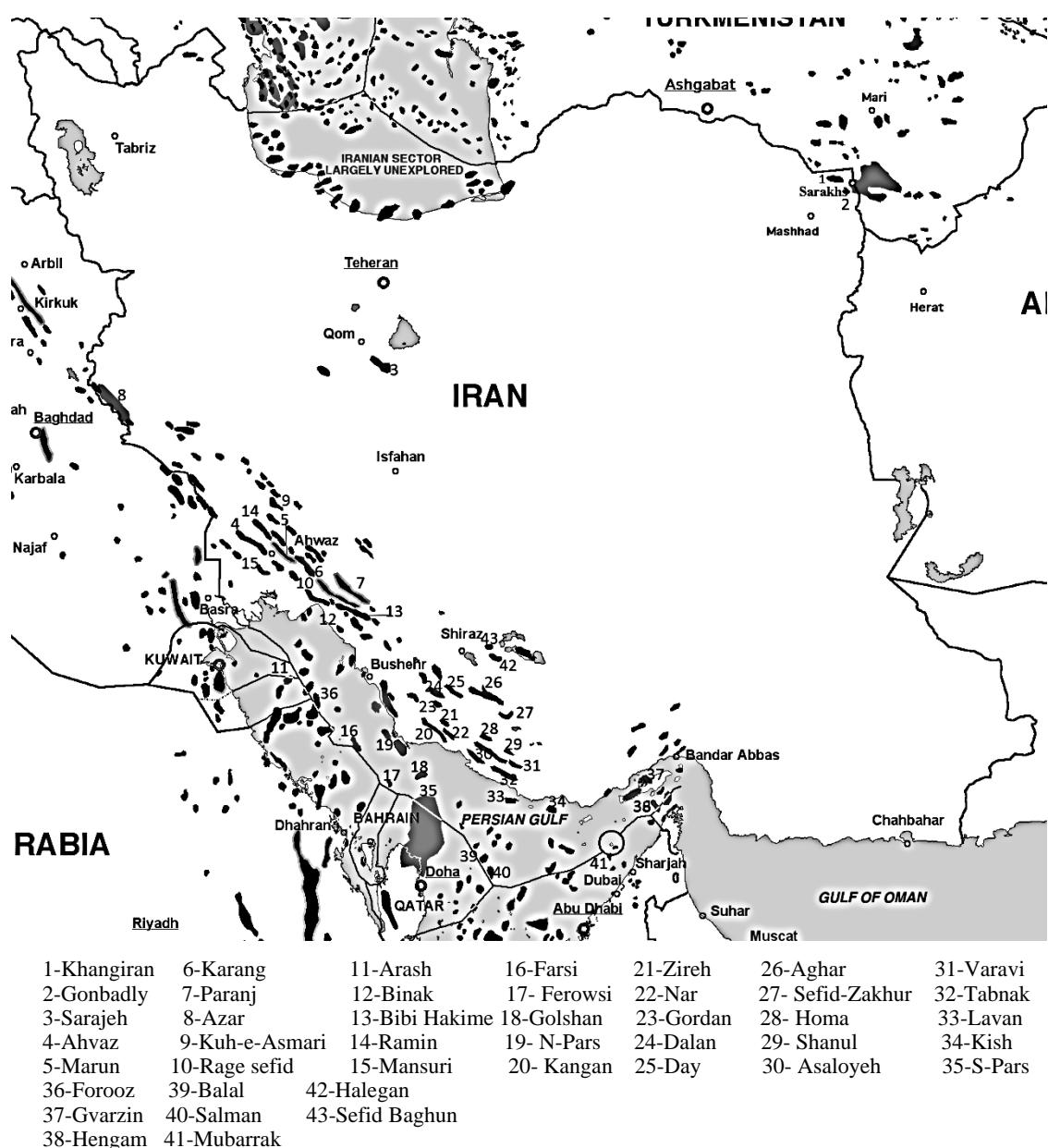
میدان دریایی مبارک با گاز درجای حدود ۱۴/۶ میلیارد متر مکعب و نفت درجای ۱۲۸ میلیون بشکه، با شارجه امارات مشترک است (پیک ایران، ۱۳۸۹).

## میدان هالگان

این میدان گازی در ۷۳ کیلومتری شمال عسلویه و ۲۵ کیلومتری جنوب میدان سفیدباغون و شمال میدان سفیدزاخور و دی (در جنوب استان فارس) قرار دارد. میدان گازی هالگان در ۱۷ بهمن ماه سال ۱۳۸۸ کشف شده است. میزان گاز در جای این میدان ۳۵۰ میلیارد متر مکعب است و پیش‌بینی

می‌شود که حدود ۲۵۳/۱ میلیارد متر مکعب آن، قابل استحصال باشد. همچنین حجم میانات گازی در جا در میدان گازی هالگان ۲۴۹ میلیون بشکه برآورد می‌شود. از این میزان حجم میانات گازی درجا، حدود ۹۸ میلیون بشکه قابل استحصال است. با توسعه این میدان گازی امکان تولید روزانه ۵۰ میلیون مترمکعب گاز به مدت ۲۰ سال فراهم می‌شود (نفت نیوز، ۱۳۸۸).

در مجموعه شکل (۱-۲) میدان‌های گازی و نفتی ایران نشان داده شده است.



شکل (۱-۲): میدان‌های گازی ایران (Stanford University libraries, 2011)

## ۲-۲-۲ مبادی مصرف

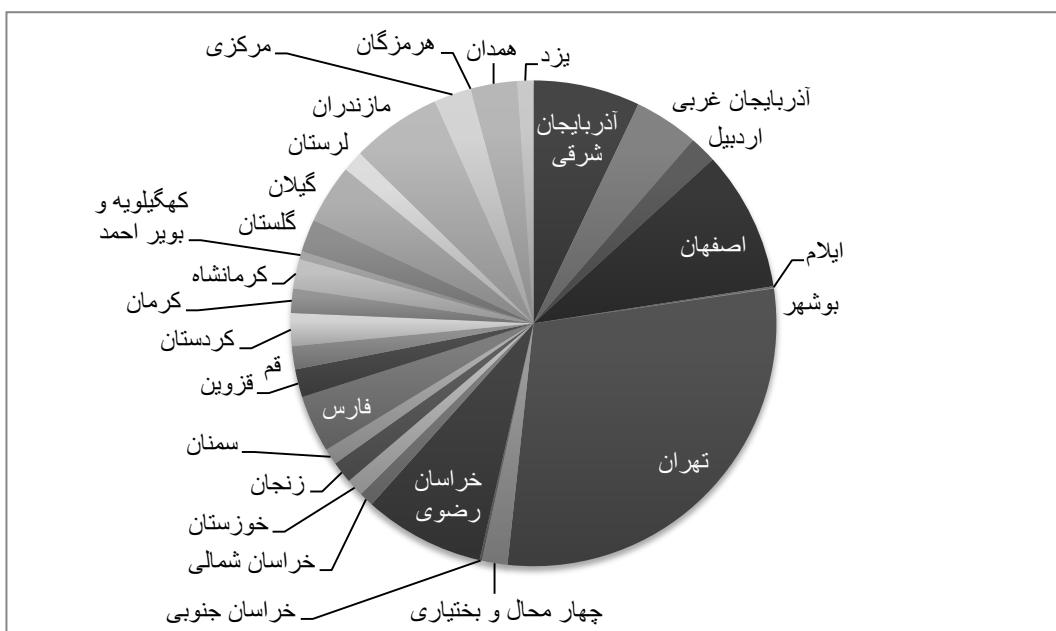
گاز طبیعی در دو بخش مصارف نهایی و مصارف بخش انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصارف نهایی گاز طبیعی به دو بخش مصارف نهایی انرژی و غیرانرژی تقسیم می‌شود. در مصارف نهایی انرژی از گاز طبیعی برای تامین انرژی مورد نیاز زیربخش‌های خانگی، تجاری و عمومی، صنعت، حمل و نقل، کشاورزی و ساخت پتروشیمی استفاده می‌شود. مصرف گاز طبیعی به عنوان خوراک پتروشیمی از جمله مصارف غیرانرژی است. به عبارت دیگر به توزیع گاز طبیعی به مصرف‌کنندگان برای فعالیتهایی غیر از تبدیل سوخت، مصرف نهایی گفته می‌شود. مصارف بخش انرژی گاز طبیعی نیز شامل سوخت پالایشگاه‌های نفت و گاز، ایستگاه‌های تقویت فشار، سوخت توربین‌ها و دیزل ژنراتورهای موجود در مسیر خط لوله و گاز مصرفی در نیروگاه‌ها است. در سال ۱۳۸۹ مصارف نهایی و مصرف بخش انرژی گاز طبیعی ۱۴۳۸۶۷ میلیون متر مکعب بوده که نسبت به سال قبل حدود ۵/۵ درصد افزایش داشته است. در این تحقیق کل مصرف گاز طبیعی به دو قسمت گرمایشی و صنعتی تقسیم شده که از موارد عنوان شده به استثنای بخش خانگی، تجاری و عمومی، سایر موارد در دسته صنعتی قرار گرفته است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹).

## ۲-۲-۱ گرمایشی

مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی در سال ۱۳۸۹ به تنها می‌باشد بالغ بر ۴۰۸۶۷ میلیون متر مکعب بوده که این میزان مصرف در مقایسه با سال قبل  $1/3$  درصد کاهش داشته است. بخش خانگی با مصرف ۴۶ درصد از کل مصرف نهایی، عمدترين مصرف‌کننده گاز طبیعی در بخش مصرف نهایی بوده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹).

بخش تجاری و عمومی شامل تجارتی عمومی، تجارتی ویژه، ورزشی، آموزشی، مذهبی، خیریه و همچنین اماکن و تاسیسات دولتی است. در سال ۱۳۸۹ کل مصرف گاز طبیعی در بخش‌های تجاری و عمومی بالغ بر ۵۹۲۵ میلیون متر مکعب بوده که در حدود  $4/4$  درصد نسبت به سال قبل افزایش

داشته است. در شکل (۲-۲)، مصرف گرمایشی (خانگی، تجاری و عمومی) کشور به تفکیک استان‌ها نشان داده شده است (تراز نامه ابردی، ۱۳۸۹).



شکل (۲-۲): مصرف گرمایشی (خانگی، تجاری و عمومی) گاز طبیعی کشور در سال ۱۳۸۹ به تفکیک استان‌ها (تقریباً، ۱۳۸۹)

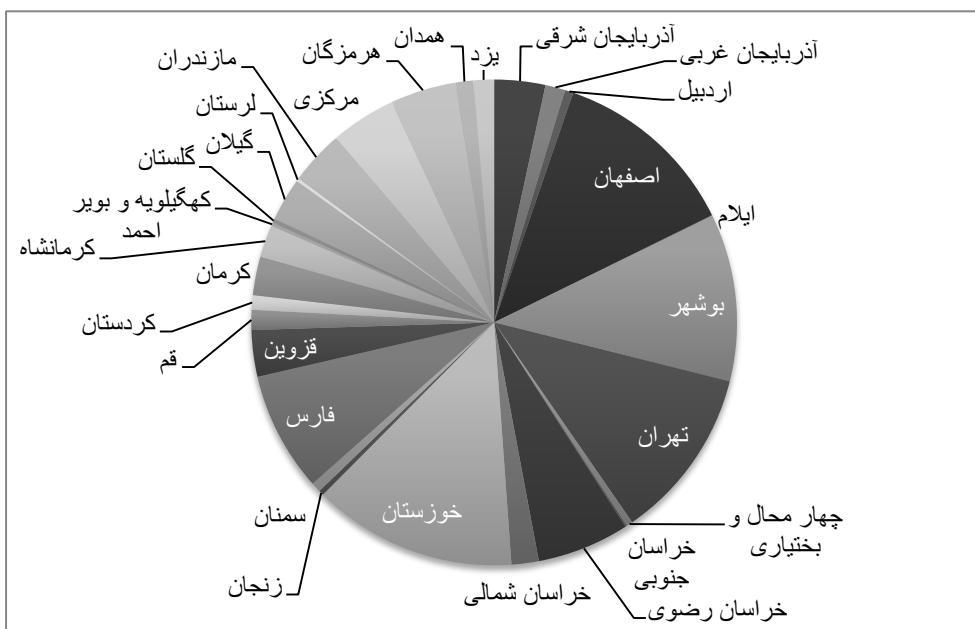
با توجه به شکل (۲-۲) مشاهده می‌شود که استان تهران، خراسان رضوی، اصفهان و آذربایجان شرقی بیشترین میزان و ایلام و هرمنگان کمترین میزان مصرف گرمایشی را در سال ۱۳۸۹ داشته‌اند.

٢-٢-٢-٢ صنعتی

حدود ۶۶ درصد از انرژی مصرفی بخش صنعت کشور بوسیله گاز طبیعی تامین می‌شود. در سال ۱۳۸۹ بخش صنعت ۱۹۹۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی مصرف کرده که در حدود ۱۳/۷ درصد نسبت به سال قبل رشد داشته است. مصرف گاز طبیعی در بخش حمل و نقل به خودروهای گازسوز و یا دوگانه‌سوز اختصاص دارد که مصرف این بخش در سال ۱۳۸۹ بالغ بر ۵۵۴۳ میلیون متر مکعب بوده که نسبت به سال قبل از آن ۶۱ درصد رشد داشته است. مصرف گاز طبیعی در بخش کشاورزی در سال ۱۳۸۹ حدود ۴۲۲ میلیون متر مکعب بوده که نسبت به سال قبل از آن ۵/۱ درصد رشد داشته است. در سال ۱۳۸۹ پالایشگاه‌های نفت، گاز، تلمبه‌خانه‌ها، واحدهای هیدرولیکسازی و

ایستگاههای تقویت فشار، ۹۷۲۰ میلیون متر مکعب گاز طبیعی مصرف کرده‌اند که نسبت به سال قبل از آن ۲ درصد کاهش داشته‌اند. گاز طبیعی مصرفی نیروگاه‌ها نیز در سال ۱۳۸۹ به ۴۴۸۹۰ میلیون مترمکعب رسیده که نسبت به سال قبل از آن  $\frac{3}{4}$  درصد افزایش داشته است. در سال ۱۳۸۹ کل گاز مصرفی در صنایع پتروشیمی نیز بالغ بر ۱۵۸۳۹ میلیون متر مکعب بوده که نسبت به سال قبل از آن ۱۲/۸ درصد افزایش داشته است. واحدهای کوره‌بلند با هدف تبدیل سوخت طراحی نمی‌شوند، بلکه هدف آنها تولید آهن است که بخش عمدۀ این آهن به فولاد تبدیل می‌شود. با این حال، برای اهداف آماری بخش انرژی، این واحداً به عنوان قسمتی از بخش تبدیل در نظر گرفته می‌شوند (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹). در شکل (۳-۲) مقایسه‌ی بین مصرف گاز استان‌های کشور در بخش صنعت در سال ۱۳۸۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳-۲) مشخص است که بیشترین میزان مصرف گاز طبیعی در بخش صنعت مربوط به استان‌های خوزستان، تهران، اصفهان، بوشهر و کمترین میزان مصرف مربوط به استان‌های ایلام، زنجان، گلستان و کهگیلویه و بویر احمد بوده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹).

.(۱۳۸۹)



شکل (۳-۲): مصرف صنعتی گاز طبیعی کشور در سال ۱۳۸۹ به تفکیک استان‌ها (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹)

### ۳-۲-۲ فاصله تا خطوط انتقال گاز

یک عامل مهم در تعیین مکان مناسب برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز در تشکیلات آهکی، فاصله تا خطوط انتقال گاز است. نقشه خطوط انتقال گاز کشور در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲): نقشه خطوط لوله اصلی انتقال گاز ایران (Omidvar, 2007)

با توجه به شکل (۴-۲)، مشاهده می‌شود که تمرکز خطوط لوله اصلی انتقال گاز در اطراف استان تهران زیاد است. یکی از دلایل این تمرکز خطوط لوله گاز، مصرف زیاد گاز استان تهران برای مصارف صنعتی و گرمایشی است. خطوط لوله گاز از میدان‌های کنگان، اهواز، سراجه و دلان از اطراف تهران عبور می‌کنند. خطوط لوله گاز میدان‌های خانگیران و گنبدلی نیز از اطراف استان تهران عبور می‌کنند. بنابراین با توجه به مصرف زیاد گاز استان تهران، می‌توان بخشی از گاز این خطوط لوله را در فصل‌هایی که مصرف و تقاضای گاز کمتر است، ذخیره کرد. بنابراین اطراف استان تهران، قم و یا قزوین می‌تواند از جمله گزینه‌های محل ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ساختار آهکی باشد.

## ۴-۲ صادرات و واردات گاز

در سال ۱۳۸۹، ایران از ترکمنستان و آذربایجان گاز طبیعی وارد و به ترکیه، نخجوان و ارمنستان گاز طبیعی صادر نموده است. در این سال واردات گاز طبیعی کشور به حدود ۹ میلیارد متر مکعب و صادرات آن به ۸/۵ میلیارد متر مکعب رسیده است. در پایان سال ۱۳۸۹ میزان واردات از دو کشور ترکمنستان و آذربایجان به حدود ۳۴۵/۶ و ۸۶۵۱/۶ میلیون متر مکعب و در مجموع به ۸۹۹۷/۲ میلیون متر مکعب رسیده که در مقایسه با سال ۱۳۸۸، افزایش ۵۵/۴ درصدی داشته است. ترکیه، ارمنستان و نخجوان، عمدت‌ترین واردکنندگان گاز از ایران محسوب می‌شوند. برای انتقال گاز ایران به ارمنستان، خط لوله‌ای حد فاصل تبریز تا مرز ارمنستان، احداث و به بهره‌برداری رسیده است. میزان صادرات گاز طبیعی به ترکیه، نخجوان و ارمنستان در سال ۱۳۸۹ به ۷۹۰/۴، ۲۵۹/۲ و ۳۲۷/۸ میلیون متر مکعب و در مجموع به ۸۴۹۱/۱ میلیون متر مکعب رسیده که نسبت به سال قبل از آن افزایش ۲۵/۱ درصدی داشته است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹).

کشورهای ارمنستان و ترکیه (کشورهای واردکننده گاز از ایران) در مرزهای شمالی کشور ایران قرار دارند. انتقال گاز طبیعی از طریق خطوط لوله در مسافت‌های طولانی، دشوار و پرهزینه است. خطوط انتقال گاز از میدان‌های گازی جنوب کشور به کشورهای ارمنستان و ترکیه از اطراف استان تهران و قزوین عبور کرده و به سمت تبریز امتداد یافته‌اند (شکل ۴-۲). کشورهای ارمنستان و آذربایجان نیز به ترتیب در شمال غرب و شمال شرق کشور ایران قرار گرفته‌اند. تنها از دیدگاه موقعیت کشورهای صادرکننده گاز به ایران (شمال شرق کشور) و واردکننده گاز از ایران (شمال غرب کشور)، ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در منطقه‌ای مانند اطراف استان تهران که به این کشورها، دسترسی دارد معقولانه به نظر می‌رسد.

## ۳-۲ الزامات کارفرمایی

تامین گاز مورد نیاز مردم در بخش تجاری، صنعتی و خانگی به‌ویژه در فصل سرد، یکی از اهداف ذخیره‌سازی گاز طبیعی است. از جمله شرایط انتخاب منطقه‌ای برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز

طبیعی در تشکیلات کربناته، تعداد مصرف کنندگان گاز طبیعی و مناسب بودن وضعیت زیربنایی آن منطقه است. ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در تشکیلات آهکی باید در نزدیکی مناطق با مصرف-کنندگان بیشتر باشد. بنابراین اطلاع از تعداد مصرف کنندگان، به تعیین و تشخیص مکان مناسب برای ساخت مغار ذخیره‌سازی کمک می‌کند. وضعیت زمین، نزدیک بودن به جاده‌های دسترسی و نیز خطوط برق رسانی، عواملی کلیدی در تعیین مکان مناسب برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته هستند. این شرایط (تعداد مصرف کنندگان و الزامات زیربنایی) تحت عنوان الزامات کارفرمایی در این تحقیق معرفی شده که در ادامه توضیح شده است.

### ۱-۳-۲ انشعبابات و مصرف کنندگان گاز طبیعی

شرکت‌های گاز استانی تا پایان سال ۱۳۸۹ تعداد ۸,۱۰,۹۸۱ انشعباب برای مشترکان خود در بخش‌های مختلف خانگی، تجاری و صنعتی نصب کردند. تعداد انشعباب‌های نصب شده در سال ۱۳۸۹ نیز حدود ۴۹۶ هزار انشعباب بوده است. این میزان، حدود ۶/۲ درصد از مجموع انشعباب‌های اجرا شده تا پایان سال ۱۳۸۹ است. در این سال، شرکت‌های گازرسانی استان‌های خوزستان، خراسان رضوی و فارس به ترتیب با ۴۷۷۵۵، ۴۳۸۵۰ و ۳۸۸۰۵ انشعباب جدید در سطح کشور، بالاترین عملکرد را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین عملکرد این سال نیز مربوط به شرکت گازرسانی هرمزگان و سیستان و بلوچستان با ۷۴۷ و ۲۲۵۶ انشعباب بوده است (جدول ۱-۲) (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹).

جدول (۱-۲): تعداد انشعبابات نصب شده و تعداد مصرف کنندگان شرکت‌های گازرسانی (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹)

شرکت گازرسانی استانی	تعداد انشعبابات		تعداد مصرف کنندگان	
	در سال ۱۳۸۹	تا پایان سال ۱۳۸۹	در سال ۱۳۸۹	تا پایان سال ۱۳۸۹
آذربایجان شرقی	۱۱۷۰۱۲۴	۷۹۹۷۷	۴۹۹۰۳۹	۱۵۷۳۹
آذربایجان غربی	۵۱۸۴۹۲	۴۶۹۹۱	۲۶۹۲۵۲	۱۶۱۷۲
اردبیل	۲۵۵۱۶۲	۲۵۰۹۶	۱۴۵۵۱۲	۱۰۳۰۸
اصفهان	۹۰۳۶۲۵	۴۹۶۳۷	۸۴۵۱۱۵	۳۲۲۵۰
ایلام	۴۸۶۴۰	۱۶۵۵۸	۳۵۲۳۵	۸۲۸۳

۲۲۰۸۷	۸۴۶۷	۴۰۸۸۸	۱۶۵۹۱	بوشهر
۲۳۸۹۵۷۱	۱۵۱۱۵۹	۱۳۴۵۲۷۲	۲۶۷۶۲	تهران
۱۹۵۵۹۴	۱۵۶۷۱	۱۳۷۳۰۲	۵۹۰۸	چهار محال و بختیاری
۸۰۹۳۶	۲۹۹۶۵	۴۹۱۶۴	۱۶۰۱۶	خراسان جنوبی
۱۳۱۷۸۹۳	۱۰۸۷۹۹	۶۱۱۰۰۲	۴۳۸۵۰	خراسان رضوی
۱۵۴۷۷۳	۱۵۵۹۳	۹۴۴۵۷	۱۰۰۳۸	خراسان شمالی
۵۴۴۱۹۶	۶۲۸۰۵	۴۴۵۹۵۴	۴۷۷۵۵	خوزستان
۱۶۹۲۶۳	۱۶۵۶۱	۱۰۶۱۷۱	۸۰۲۴	زنجان
۱۷۲۴۲۵	۱۱۵۷۴	۹۴۶۳۷	۳۶۵۳	سمنان
-	-	۲۲۵۶	۲۲۵۶	سیستان و بلوچستان
۷۹۴۲۶۸	۷۹۵۳۲	۵۱۶۱۵۱	۳۸۸۰۵	فارس
۲۴۰۰۶۶	۲۴۰۷۵	۱۳۹۲۴۳	۱۰۹۳۴	قزوین
۲۵۸۱۰۳	۱۶۰۷۲	۱۴۶۰۵۹	۳۴۶۱	قم
۲۵۰۶۱۸	۳۷۵۹۰	۱۵۹۷۹۱	۲۲۳۶۴	کردستان
۳۲۷۲۲۷	۳۳۴۹۶	۲۱۹۸۸۴	۲۴۸۳۱	کرمان
۳۲۶۶۶۵	۳۱۳۷۰	۱۷۳۹۹۷	۹۵۲۳	کرمانشاه
۸۵۶۹۰	۱۳۲۹۸	۶۹۱۹۸	۷۳۴۰	کهگیلویه و بویر احمد
۳۲۳۹۲۵	۳۰۹۴۲	۲۰۶۰۸۲	۱۳۶۵۲	گلستان
۵۶۰۷۵۲	۵۰۰۵۳	۳۵۰۷۴۷	۲۵۶۳۳	گیلان
۲۸۶۹۹۶	۲۴۳۹۲	۱۵۴۴۴۱	۹۸۵۴	لرستان
۸۰۷۸۴۶	۶۷۶۷۲	۵۳۹۹۴۵	۳۱۱۴۰	مازندران
۳۳۹۷۵۸	۳۴۱۴۶	۲۰۶۰۳۱	۱۲۱۳۱	مرکزی
۳۷۵۰	۳۲۱۰	۱۸۸۹	۷۴۷	هرمزگان
۳۹۰۹۹۴	۲۳۷۶۰	۲۵۳۳۹۹	۱۰۶۷۵	همدان
۲۴۷۴۴۹	۲۳۴۲۸	۱۵۲۸۶۸	۱۱۶۲۰	یزد
۱۳۲۰۱۸۸۸	۱۱۳۲۳۸۹	۸۰۱۰۹۸۱	۴۹۶۳۱۵	جمع

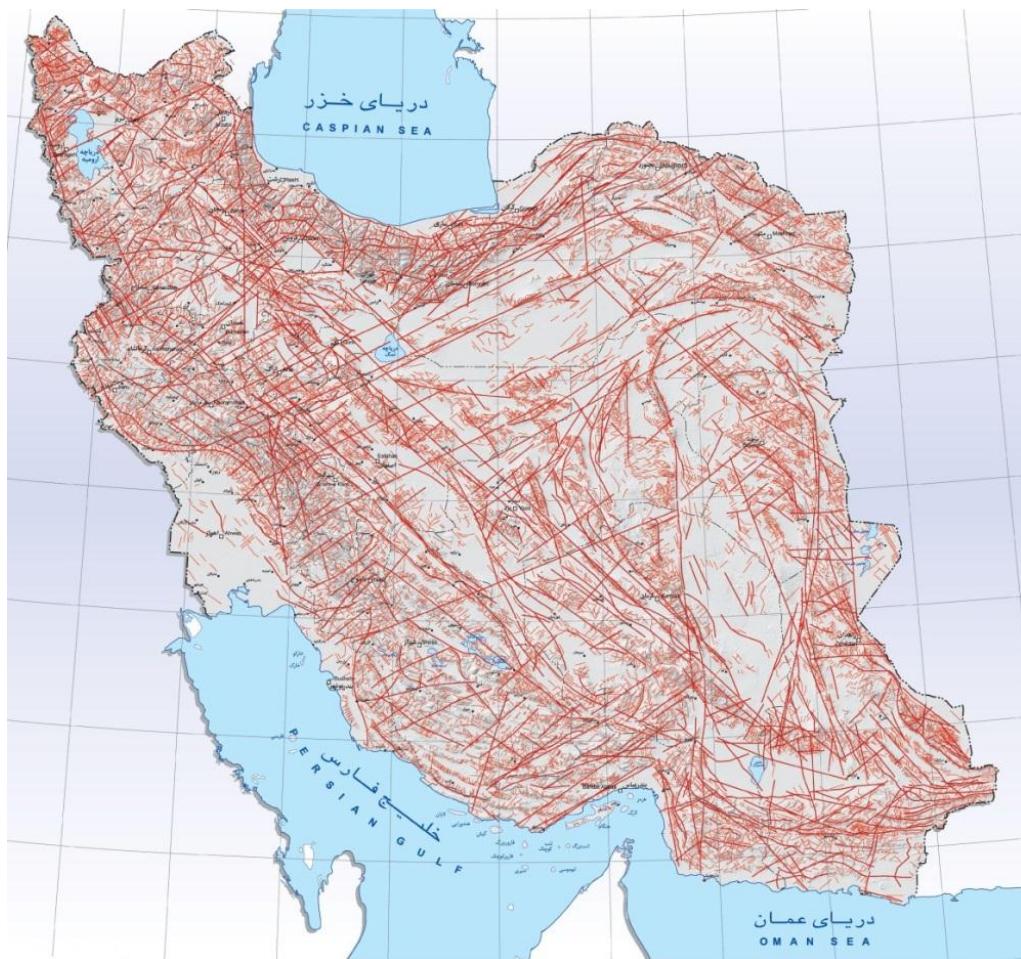
به ازاء هر انشعاب گاز طبیعی نصب شده در کشور تا پایان سال ۱۳۸۹، حدود ۱/۶۵ مصرف‌کننده وجود داشته است. به طور کلی از حدود ۸ میلیون انشعاب، حدود ۱۳/۲ میلیون مصرف‌کننده استفاده نموده است. در سال ۱۳۸۹ نیز در مجموع، حدود ۱۱۳۲ هزار مصرف‌کننده جدید از شبکه گاز کشور بهره-مند شده‌اند. در سال ۱۳۸۹، استان‌های تهران و خراسان رضوی به ترتیب با حدود ۱۵۱ و ۱۰۹ هزار مصرف‌کننده جدید، بالاترین تعداد در نرخ بهره‌مندی از گاز طبیعی را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین میزان مصرف‌کننده جدید نیز مربوط به شرکت‌های گازرسانی هرمزگان و بوشهر به ترتیب با ۳۲۱۰ و ۸۴۶۷ مصرف‌کننده بوده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹)

### ۲-۳-۲ امکانات زیربنایی

ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در تشکیلات آهکی باید در منطقه‌ای انجام شود که به لحاظ تکتونیک، وضعیت آرامی داشته باشد. پیش‌بینی شرایط و اجرای یک مغار در داخل سازند کردن‌ها در منطقه‌ای با تکتونیک آرام، بسیار راحت‌تر است. در صورت وجود تکتونیک فعال و شدید در منطقه ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی، ممکن است توزیع لایه‌ها دچار تغییر شده و در نتیجه لایه‌های سنگی غیر قابل انحلال در محلول اسیدی مورد استفاده در ناحیه ساخت مغار قرار گیرند. علاوه بر این، حتی اگر سازند کردن‌ها همگن نیز باشد، ممکن است تنש‌های زیادی در اثر فعالیت تکتونیکی بوجود آید که باعث تغییر شکل مغار شود.

ساخت مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کردن‌ها در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین انجام می‌شود. ممکن است، جهت بیشترین تنش فشاری بر دیواره مغار در اثر فعالیت‌های تکتونیکی تغییر کند. فعالیت‌های تکتونیکی برای عمق‌های کمتر از ۲۰۰۰ متر، باعث افقی شدن جهت تنش‌ها می‌شود (Foley, 2006). عامل تکتونیکی همچنین بیشترین نقش را در توزیع نامنظم شکستگی‌ها در مقاطع عمودی دارد. تنوع مراکز تکتونیکی تنش (به لحاظ شدت و مکان) دلیل اصلی توزیع نامنظم آنومالی شکستگی‌ها است.

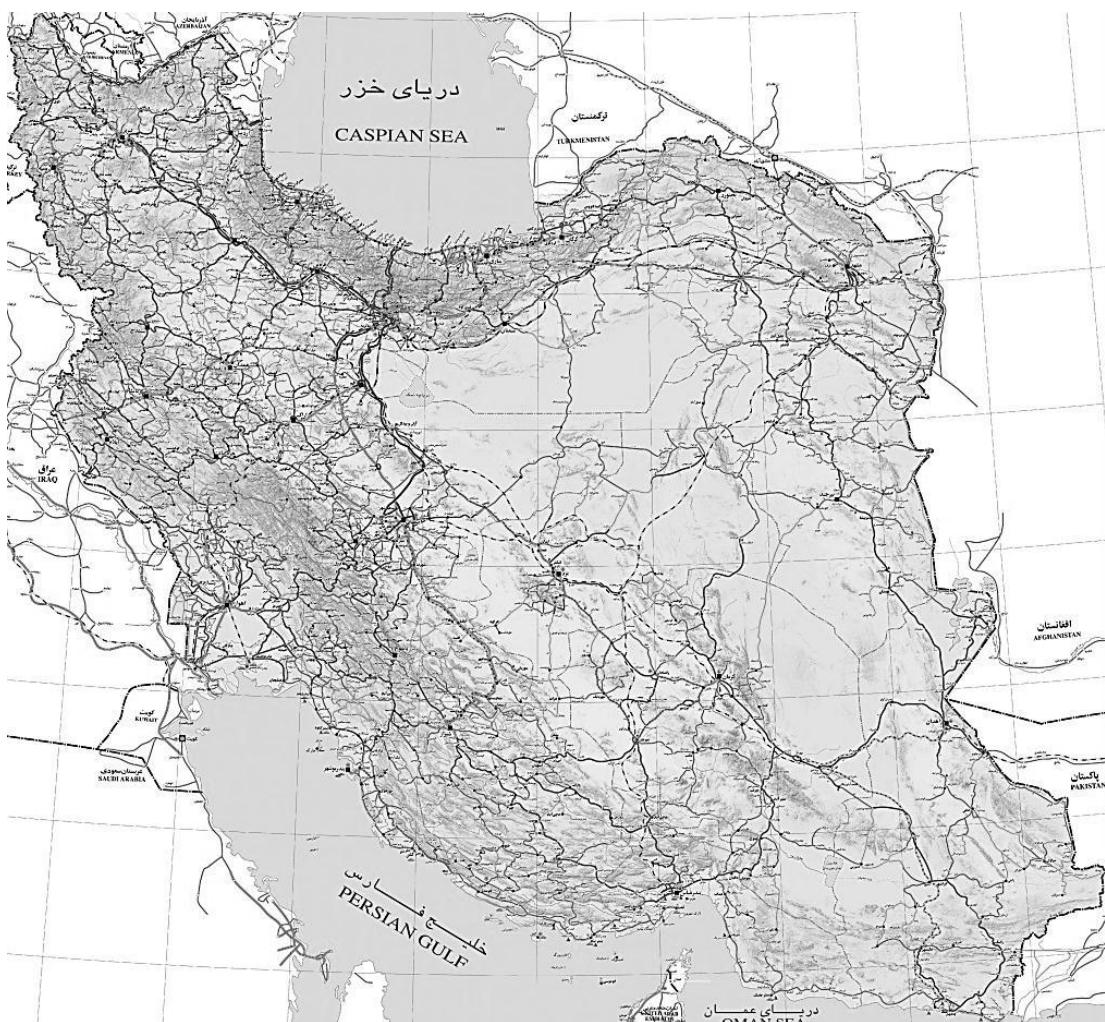
نقشه شکل (۵-۲) وضعیت تکتونیکی در استان‌های ایران را نشان می‌دهد. در این شکل، دو نوع خطواره نشان داده شده است. خطوط پررنگ‌تر و ضخیم‌تر نشان‌دهنده خطواره‌های اصلی و خطوط کم‌رنگ‌تر و نازک‌تر نشان‌دهنده خطواره‌های فرعی هستند (شکل ۵-۲).



شکل (۵-۲): نقشه خطواره‌های تکتونیکی کشور ایران. خطوط پررنگ‌تر و ضخیم‌تر نشان‌دهنده خطواره‌های اصلی و خطوط کم‌رنگ‌تر و نازک‌تر نشان‌دهنده خطواره‌های فرعی هستند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور).

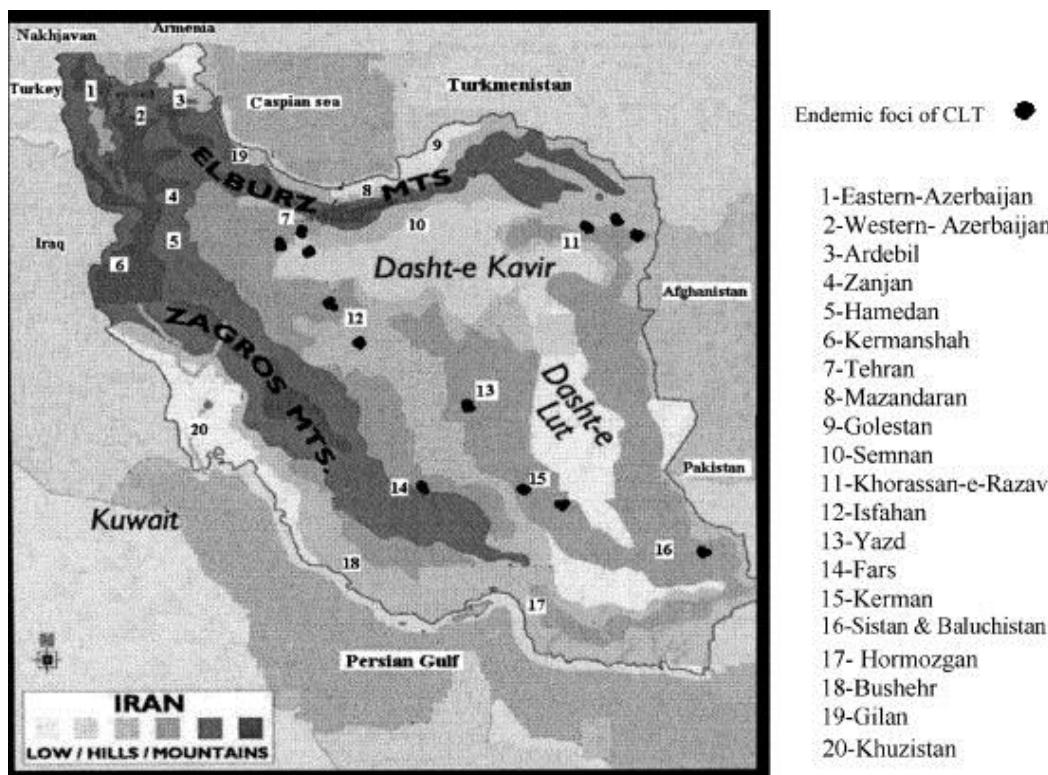
با دقت در شکل (۵-۲) مشاهده می‌شود که بخش‌هایی از استان تهران، سمنان، قم، اهواز و همچنین قسمت‌هایی از استان قزوین و کرمان، در منطقه بدون خطواره‌های تکتونیکی یا خطواره‌های فرعی قرار گرفته‌اند و بنابراین این استان‌ها در منطقه تکتونیک آرام قرار گرفته‌اند.

برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشكیلات کربناته، لازم است که اسید و تجهیزات خریداری شده نظری پمپ تزریق اسید به داخل تشكیلات کربناته، لوله‌های انتقال اسید، تجهیزات ذخیره‌سازی و سایر تجهیزات لازم به مکان ساخت مغار منتقل شوند. از آنجایی که احداث راهها و جاده‌های دسترسی برای انتقال تجهیزات ذخیره‌سازی به محل ساخت مغار هزینه‌بر است بنابراین نزدیک بودن به جاده‌ها و خطوط راه‌آهن موجود عامل مهم دیگری در انتخاب مکان ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشكیلات کربناته است. در شکل (۶-۲) نقشه راه‌های کشور نشان داده شده است.



شکل (۶-۲): نقشه راه‌های کشور (موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، ۱۳۹۰)

فرایند ساخت مغار در تشکیلات کربناته نیاز به تجهیزات و تاسیسات زیادی دارد. در محل احداث مغار باید تجهیزاتی مانند تجهیزات ذخیره‌سازی، ایستگاه پمپاژ اسید، پالینده برای تبخیر آب و جمع‌آوری محصول  $\text{CaCl}_2$ ، برج جذب برای برداشت مقادیر باقیمانده اسید استفاده نشده و تجهیزات ثانویه به‌سازی باطله ایجاد شود. بنابراین باید مکان موردنظر تا حد امکان سطح هموار و پستی و بلندی‌های کمتری داشته باشد. در شکل (۷-۲) نقشه توپوگرافی کشور نشان داده شده است. مناطق پرنگ‌تر نشان داده شده در شکل (۷-۲) دارای ارتفاع بیشتری از سطح دریا هستند.



شکل (۷-۲): نقشه توپوگرافی کشور (Tajedin, et al., 2009)

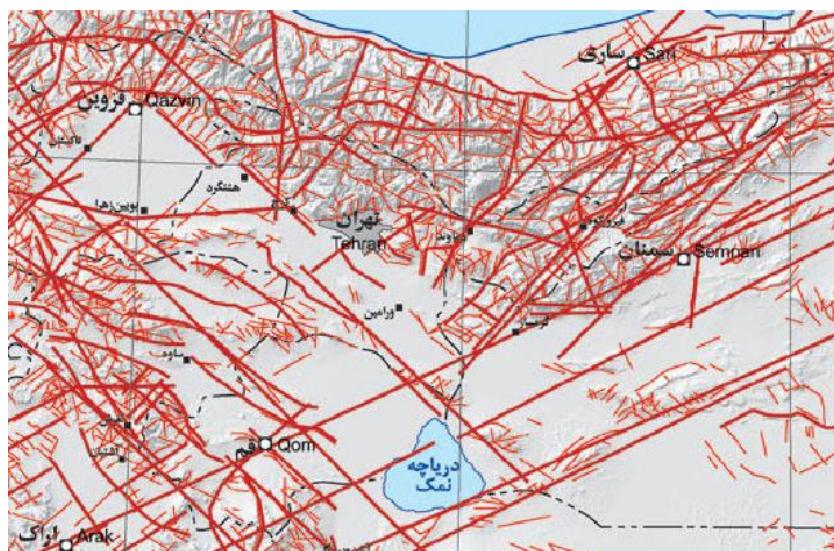
**۴-۲ تعیین مکان مناسب برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک**  
تقاضای گاز طبیعی در بسیاری از کشورها به صورت فصلی است. در زمستان تقاضای گاز افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار زیادی به بخش‌های تولید و انتقال گاز وارد می‌آید. کاربرد تجهیزات ذخیره‌سازی برای تامین نیازهای فصلی یا تامین نیازهای حداکثر (پیک) است. از جمله سیاست‌های کشور، ایجاد

مخازن ذخیره‌سازی گاز برای تنظیم مصرف، کاهش ضریب بار و کاهش سرمایه‌گذاری برای تاسیسات تولید فشار حداکثر گاز طبیعی است. به همین دلیل، پروژه‌هایی برای انجام فرایند ذخیره‌سازی در تاقدیس یورتشای ورامین، مخزن گازی سراجه در قم و شوریجه در سرخس در دست بررسی است (ترازnamه انرژی، ۱۳۸۹). ولی در صورت تقاضای زیاد گاز در فصول سرد در استان‌های سردسیر کشور و همچنین به لحاظ پدافند غیرعامل، نیاز به ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغاره‌ای ذخیره‌سازی احساس می‌شود و با توجه به این که توده‌سنگ آهک در نقاط مختلف کشور وجود دارد و نیز به دلیل همگرایی کم و شرایط خوب مغاره‌ای آهکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به لحاظ پدافند غیرعامل (به دلیل عمق زیاد این مغارها)، ذخیره‌سازی گاز در سنگ آهک مفید به نظر می‌رسد.

با توجه به جمعیت زیاد استان تهران و همچنین مصرف زیاد گاز طبیعی در بخش گرمایشی و صنعتی آن (شکل ۲-۲ و ۳-۲)، تمرکز خطوط لوله اصلی انتقال گاز طبیعی در اطراف این استان و نیز امکانات برق و آب، ساخت مغار آهکی در اطراف تهران (و یا نزدیک قم و قزوین) معقولانه به نظر می‌رسد. جمعیت زیاد استان تهران و در نتیجه تقاضای زیاد گاز مردم این استان شرکت‌های گازرسانی را ملزم به ایجاد انشعابات گاز بیشتری کرده است. استان تهران همچنین به میدان‌های گازی سراجه و میدان تازه کشف شده سردار جنگل در شمال ایران نزدیک است که می‌تواند برای ذخیره‌سازی گاز این مخازن استفاده شود. یکی از راه‌های صادرات و واردات گاز کشور، انتقال گاز از طریق خطوط لوله گاز است که این نوع انتقال گاز، ساده‌ترین راه انتقال گاز است. این روش انتقال گاه به دلیل طولانی بودن مسیر انتقال، استفاده نمی‌شود و در نتیجه گاز طبیعی به صورت مایع شده<sup>۱</sup> انتقال داده می‌شود. طبیعتاً مایع کردن گاز طبیعی هزینه‌هایی را به همراه خواهد داشت. در سال ۱۳۸۹ تنها پروژه ایران ال. ان. جی فعال بوده و سایر پروژه‌ها به حالت تعليق درآمده است. بنابراین می‌توان گاز طبیعی را در فصل‌های گرم سال که تقاضای گاز کمتر است، ذخیره کرد. از آن جایی که کشورهای صادرکننده گاز طبیعی به ایران و نیز کشورهای واردکننده گاز طبیعی از ایران، در مرزهای شمالی کشور ایران واقع

<sup>۱</sup> - LNG

شده‌اند، بنابراین از این منظر، می‌توان مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشكیلات کربناته را در نواحی نزدیک به مرزهای شمالی ایران احداث کرد. با توجه به میزان مصرف گاز برای مصارف گرمایشی و صنعتی و نیز عبور خطوط لوله گاز صادراتی و وارداتی از نزدیکی استان تهران، اطراف این استان و استان‌های نزدیک به آن برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشكیلات کربناته مناسب به نظر می‌رسد. به لحاظ تکتونیک نیز قسمت‌هایی از این استان و همچنین استان‌های اطراف آن مثل استان قم و قزوین در منطقه بدون خطواره‌های تکتونیکی یا در منطقه خطواره‌های فرعی قرار گرفته‌اند (شکل ۷-۲).



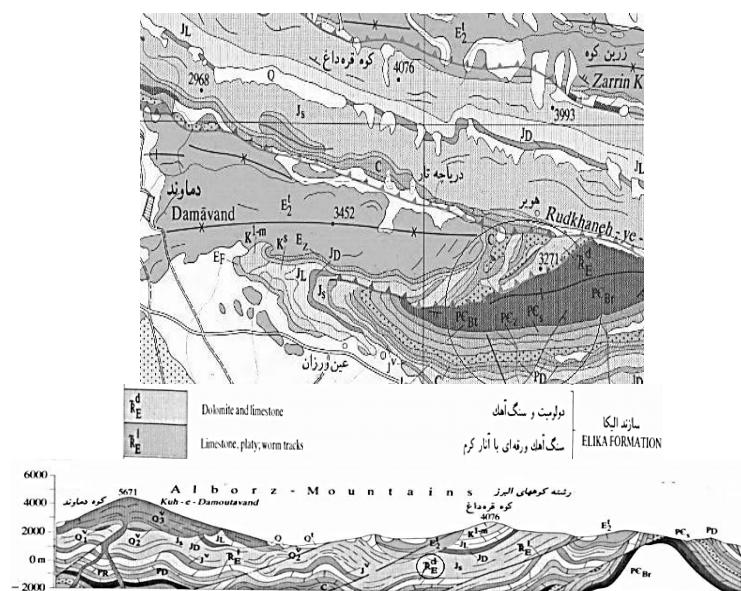
شکل (۷-۲): نقشه خطواره‌های تکتونیکی در اطراف استان تهران، قم و قزوین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

با توجه به این‌که اطلاعات چندانی از وضعیت ساختار درون زمین در دسترس نیست، بنابراین با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی و مقاطع ارائه شده (شکل‌های ۸-۲ تا ۱۵-۲)، تا حدودی می‌توان نواحی دارای پتانسیل آهک عمقی را مشخص کرد.

بیش از ۵۰ درصد از سطح چهارگوش تهران از نهشته‌های دوران کواترنر پوشیده شده است که در ۷ واحد شامل، آبرفت رودخانه‌ای، پوشش کویری رسی-نمکی و دریاچه نمک، آبرفت تهران، تراس‌های آبرفتی، زمین‌لغزش و سنگریزش، کنگلومراهای دانه‌ریز و ماسه‌های سازند که‌ریزک منتب به پیلو-

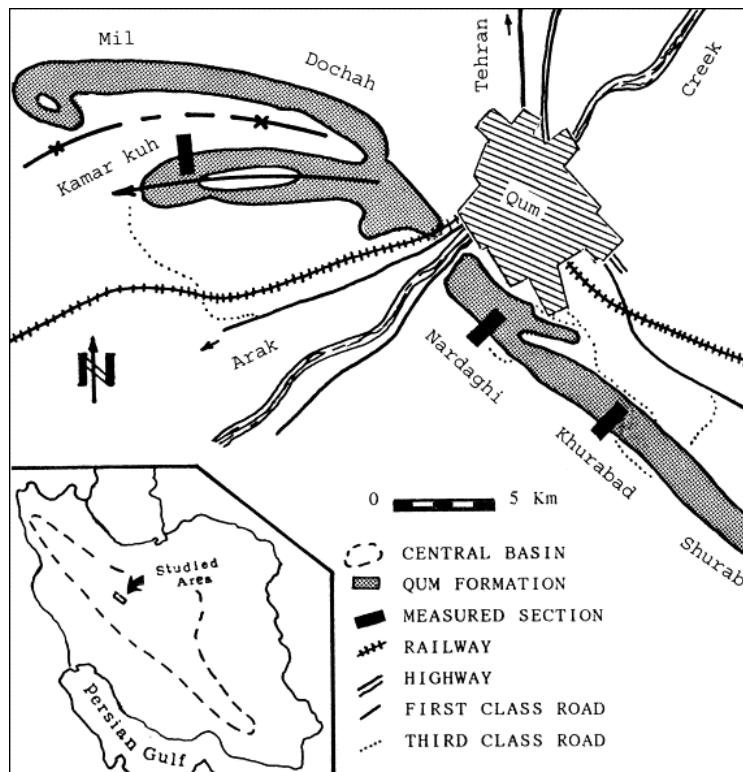
پیلوستوسن و کنگلومرای سازند هزار دره منتب به میوپلیوسن، تقسیم‌بندی شده‌اند. سنگ‌های ولکانیکی کوه دماوند نیز در مجموعه سنگ‌های پلیو-کواترنر قرار می‌گیرند (وب‌گاه سازمان زمین‌شناسی کشور). سنگ بستر زمین در نواحی کوهستانی شمال تهران بیشتر به صورت تشکیلات ترشیاری و إؤسن است. سنگ‌های رسوبی جوان‌تر بر روی این سنگ میزبان تشکیل شده‌اند. سنگ میزبان زمین در ارتفاعات شرقی استان تهران از نوع دولومیت و سنگ آهک مربوط به دوران زمین-شناصی تریاسه و کرتاسه است (Atlas of Tehran metropolis, 2012).

نقشه‌های زمین‌شناسی حاوی مقاطعی هستند که وضعیت تشکیلات و لایه‌های سنگی درون زمین را اغلب تا اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین نشان می‌دهند (شکل ۲-۸). نوع توده‌سنگ‌های نشان داده شده در لایه‌های این مقاطع را می‌توان با استفاده از راهنمای نقشه تشخیص داد. در نقشه زمین‌شناسی استان تهران، مقطعی از شرق استان ارایه شده است. با توجه به مقطع و راهنمای نقشه ارایه شده، لایه‌ای از سنگ آهک (لایه صورتی رنگ  $R_E^d$ ) (سازند الیکا) در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین، در شرق استان تهران و در نزدیکی کوه دماوند مشاهده می‌شود. این لایه تا ناحیه کوه قره‌داغ گسترش یافته است (شکل ۲-۸).



شکل (۲-۸): منطقه واقع در نزدیکی کوه دماوند در شرق استان تهران با احتمال وجود توده‌سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

استان قم در زون ایران مرکزی واقع شده است. بیشتر تشکیلات زمین‌شناسی این قسمت، سنگ رسوی و اغلب از نوع آهکی است و سنگ‌های آذربین و دگرگونی کمتر در آن دیده می‌شود. سازند قم که در این استان واقع شده است، ضخامتی به طول ۱۲۰۰ متر دارد (شکل ۹-۲).



شکل (۹-۲): موقعیت سازند قم در استان قم (Okhravi and Amini, 1998)

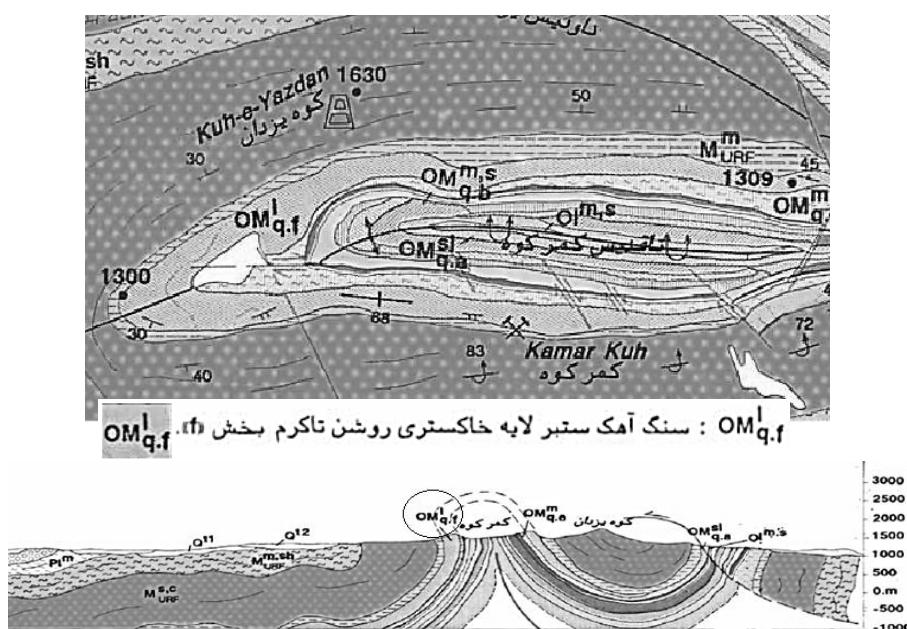
سازند قم از ۹ بخش تشکیل شده است. این بخش‌ها از بیشترین عمق تا کمترین عمق به صورت زیر است:

- ۱- بخش a: شامل آهک‌های آلی تخریبی قهوه‌ای ضخیم با ضخامت حدود ۸۰ متر است.
- ۲- بخش b: شامل مارن، مارن ماسه‌های و ماسه‌سنگ با ضخامت ۱۴۹ تا ۳۱۹ متر است.
- ۳- بخش C<sub>1</sub>: شامل تنابی از آهک‌های آلی و مارن با ضخامت ۱۳۰ تا ۲۸۰ متر است.
- ۴- بخش C<sub>2</sub>: شامل شیل قرمز و خاکستری، ماسه‌سنگ و ژیپس با ضخامت ۶ تا ۱۵ متر است.
- ۵- بخش C<sub>3</sub>: شامل آهک بریوزو با ضخامت حدود ۳۰ تا ۷۰ متر است.
- ۶- بخش C<sub>4</sub>: بیشتر شامل آهک است ولی کمی شیل‌های آهکی و آهک ریفی نیز دارد.

- ۷- بخش d: شامل ژیپس و کمی شیل قرمز با ضخامت حدود ۲۰ تا ۴۰ متر است.
- ۸- بخش e: شامل مارن، کمی ژیپس و مقداری آهک رسی با ضخامت کلی ۸۰ تا ۶۵۰ متر است.
- ۹- بخش f: شامل آهک کرمرنگ و مارن‌های سبزرنگ بخش e به مقدار بسیار کم و در حالت بین‌لایه‌ای با ضخامت کلی ۱۸۰ تا ۳۲۰ متر است.

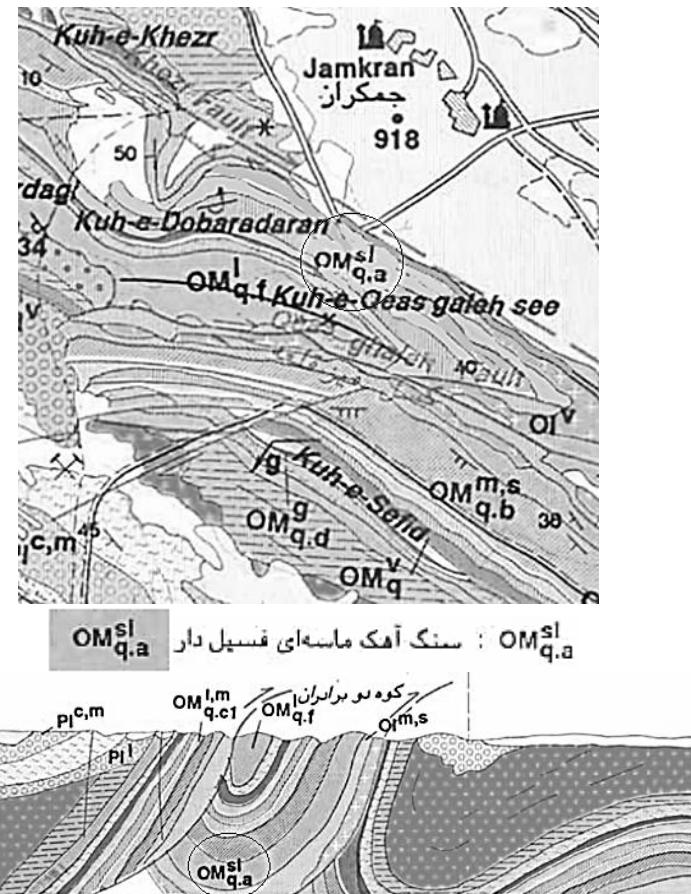
حفر دو چاه شماره ۵ البرز برای اکتشاف نفت در شمال قم به طول ۷۰۰ متر و چاه سراجه در جنوب قم در تاقدیس سراجه به طول ۱۰۰۰ متر، بخش‌های گوناگون سازند قم را به خوبی نشان داده‌اند (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، ۱۳۸۶).

در نقشه زمین‌شناسی استان قم، مقطعی از قسمت جنوب غربی- شمال شرقی این استان نشان داده شده است. در قسمت غربی استان قم، در نزدیکی کمرکوه، تاقدیس کمرکوه وجود دارد. در نزدیکی این تاقدیس، لایه‌ای از توده سنگ آهک در سطح مشاهده می‌شود (سنگ آهک ستبر لایه خاکستری روشن تا کرم نوع "f" که با نام  $OM_{q,f}^1$  و رنگ سبز در نقشه و مقطع ارایه شده، نشان داده شده است). با دقت در مقطع نقشه زمین‌شناسی، مشاهده می‌شود که این لایه با ضخامت کافی تا عمقی بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین نیز گسترش یافته است (شکل ۱۰-۲).



شکل (۱۰-۲): منطقه واقع در تاقدیس کمرکوه در غرب استان قم با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعمق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافاتمعدنی کشور)

در جنوب شهر قم و در نزدیکی کوه دو برادران لایه‌ای از توده‌سنگ آهک ماسه‌ای فسیل دار (با رنگ زرد و به نام  $OM_{q.a}^{sl}$  در راهنمای نقشه و مقطع ارایه شده، مشخص شده است) مشاهده می‌شود. با توجه به مقطع زمین‌شناسی ارایه شده، مشاهده می‌شود این لایه تا اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین نیز گسترش یافته است (شکل ۱۱-۲).

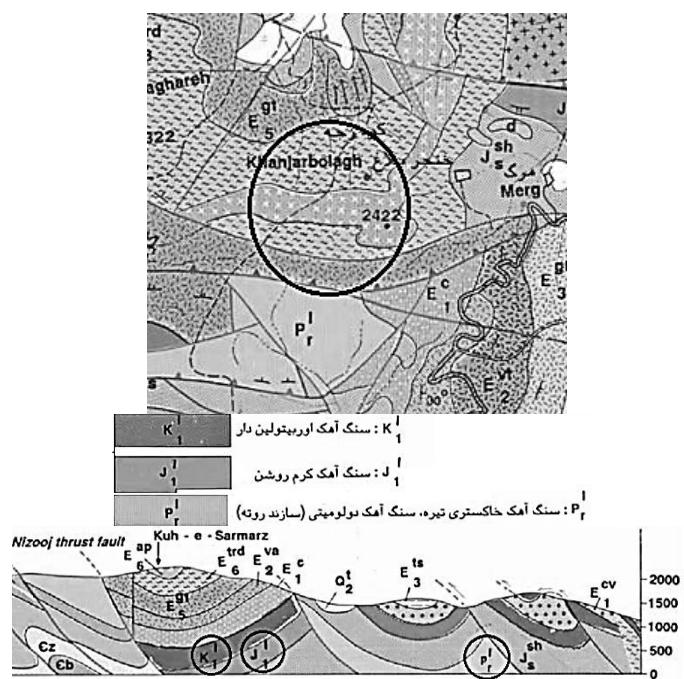


شکل (۱۱-۲): منطقه واقع در نزدیکی کوه دو برادران در جنوب شهر قم با احتمال وجود توده‌سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

با توجه به امتداد شمال غربی-جنوب شرقی سازند قم، انتظار می‌رود که در ناحیه این سازند، توده‌سنگ آهک در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین وجود داشته باشد. توده‌سنگ‌های آهک و دولومیت موجود در استان قزوین بیشتر مربوط به دوران مژوزوئیک و پالئوزوئیک هستند. به طور کلی کهن‌ترین رخنمون از سنگ‌های شناخته شده پالئوزوئیک در منطقه

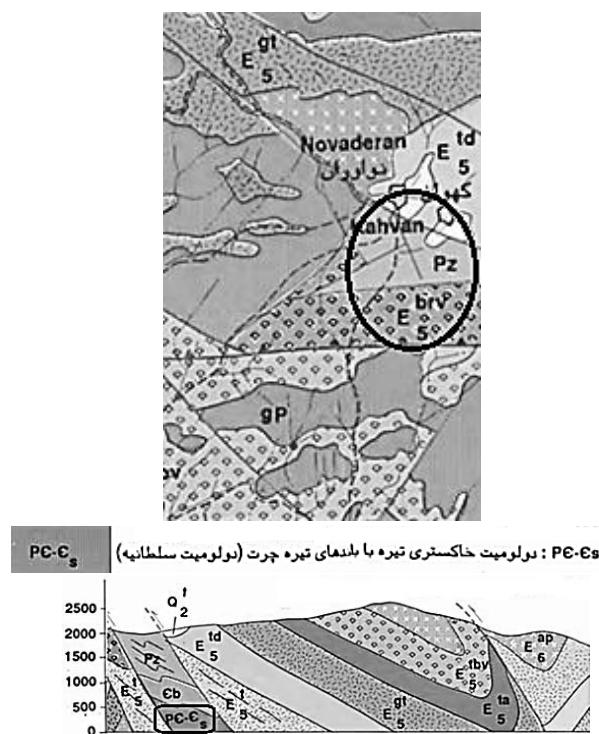
مورد بررسی را سنگ‌های دولومیتی تیره‌رنگ چرت‌دار سلطانیه، تناوب دولومیت و شیل‌های تیره‌رنگ بازالت همراه با شیل‌های میکاسه زاگون و سرانجام ماسه‌سنگ، سنگ آهک و سنگ آهک دولومیت پر مین، پدید آورده است.

در شمال شرق شهر قزوین و در ناحیه کوه سرمرز لایه‌ای از آندزیت پورفیری (در نقشه شکل ۱۲-۲) مشخص شده است) مشاهده می‌شود. در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین در این ناحیه، لایه‌ای از سنگ آهک اوربیتولین دار با ضخامت زیاد مشاهده می‌شود (با نام  $K_1^I$  و با رنگ سبز پرنگ در راهنمای نقشه و مقطع ارایه شده، نشان داده شده است) (شکل ۱۲-۲). در زیر این لایه و هم‌مرز با آن لایه‌ای از سنگ آهک با ضخامت زیاد مشاهده می‌شود (با نام  $J_1^I$  و با رنگ آبی در راهنمای نقشه و مقطع ارایه شده، نشان داده شده است) (شکل ۱۲-۲). در مجاورت این لایه‌ها، لایه‌ای بسیار ضخیم از سنگ آهک خاکستری سازند روته تا عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین گسترش یافته است (با نام  $P_r^I$  و با رنگ نارنجی در راهنمای نقشه و مقطع ارائه شده، نشان داده شده است) (شکل ۱۲-۲).

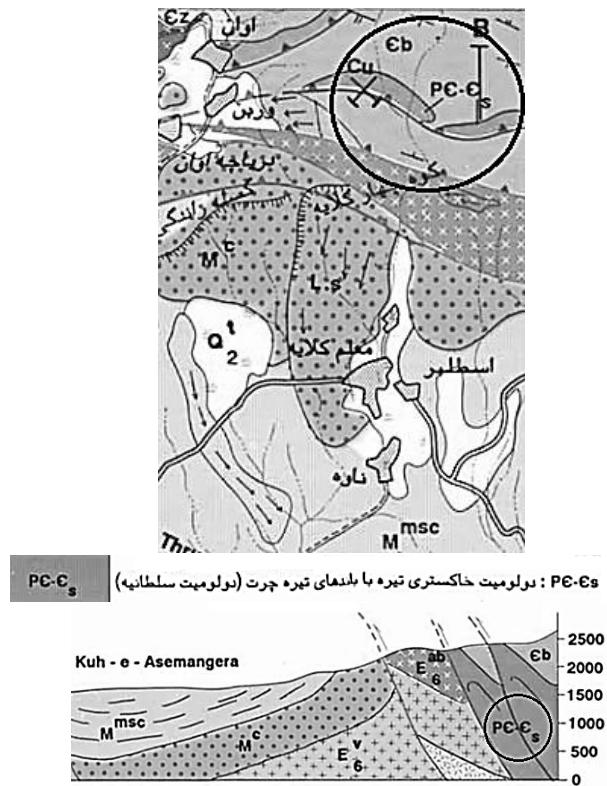


شکل (۱۲-۲): منطقه‌ای واقع در شمال شرق شهر قزوین با احتمال وجود توده‌سنگ آهک در اعمق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

در جنوب شرقی استان قزوین و در نزدیکی منطقه نوادران، لایه‌ای از کنگلومرای خاکستری قرار گرفته است (با نام PZ در نقشه نشان داده شده است). با توجه به مقطع و راهنمای نقشه ارایه شده، مشاهده می‌شود که در این ناحیه و در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین، لایه‌ای بسیار ضخیم از دولومیت خاکستری تیره سازند سلطانیه قرار گرفته است (با نام PC-Es و با رنگ آبی پرنگ در نقشه، راهنمای نقشه و مقطع ارایه شده، نشان داده شده است) (شکل ۱۳-۲). این لایه با ضخامت بسیار زیاد در شمال شرق استان قزوین و در نزدیکی کوه چهارکلایه نیز مشاهده می‌شود. این لایه تا اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین نیز گسترش یافته است (شکل ۱۴-۲).

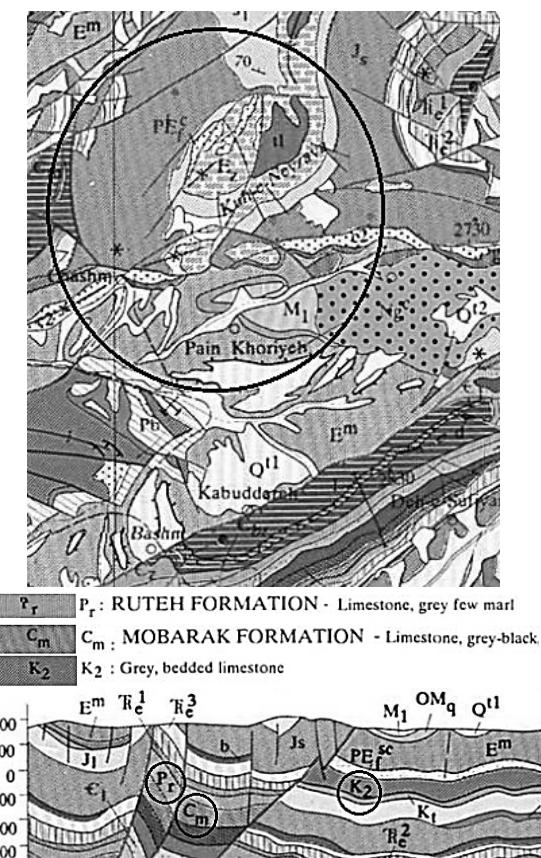


شکل (۱۳-۲): منطقه‌ای واقع در جنوب شرق استان قزوین با احتمال وجود توده سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)



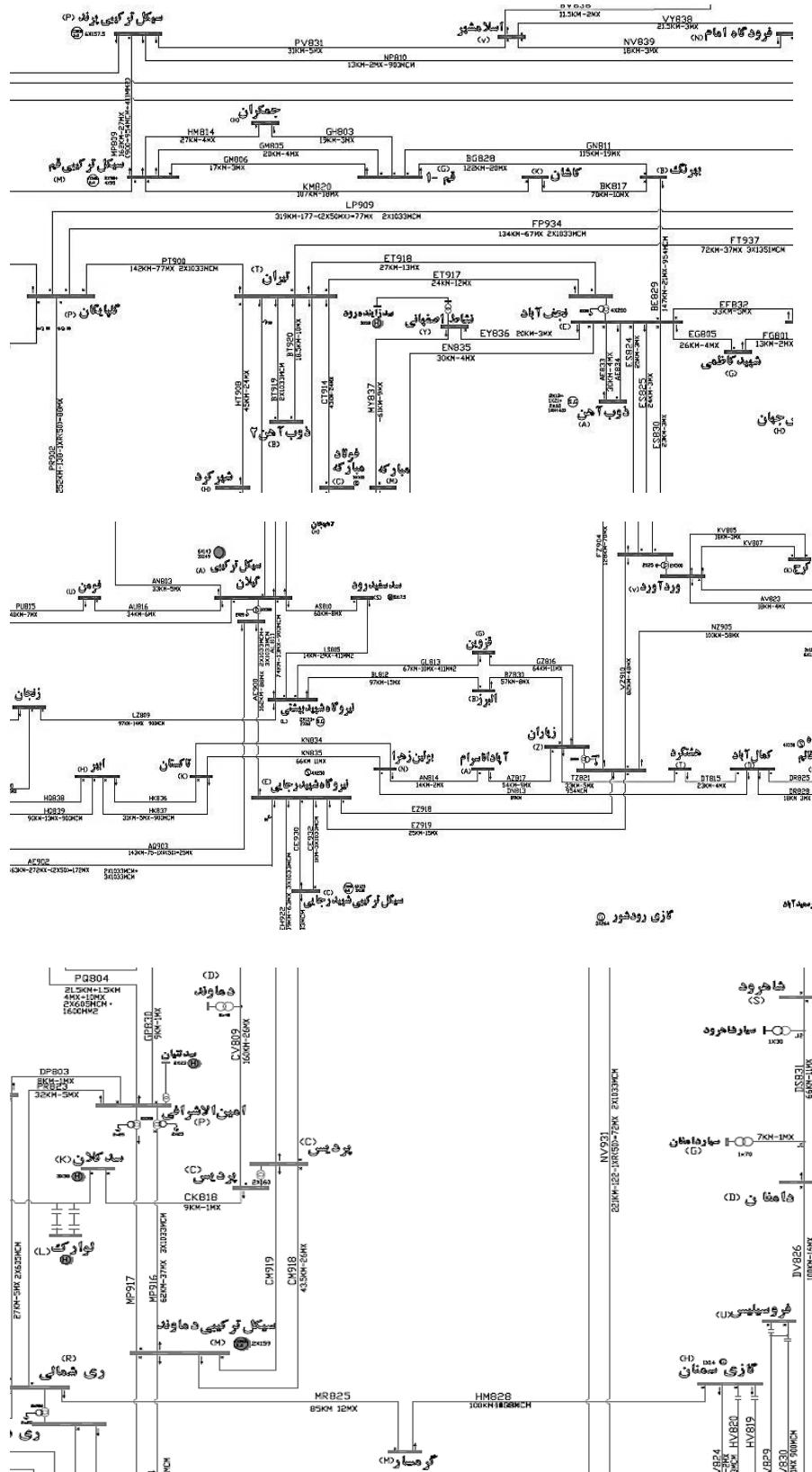
شکل (۱۴-۲): منطقه‌ای واقع در شمال شرق استان قزوین با احتمال وجود تودهسنگ آهک در اعمق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

در شمال استان سمنان و در نزدیکی کوه نیزوا، تشکیلات شمشک (با نام  $J_2$  و به رنگ آبی در نقشه نشان داده شده است) قرار گرفته است. با توجه به مقطع این قسمت مشاهده می‌شود که در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین این قسمت، سنگ آهک سازند روته (با نام  $P_r$  و به رنگ قهوه‌ای روشن در نقشه نشان داده شده است) و سنگ آهک سازند مبارک (با نام  $C_m$  و به رنگ آبی روشن در نقشه نشان داده شده است) قرار گرفته است. در این مقطع و در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین، همچنین تودهسنگ آهک سازند البرز (با نام  $K_2$  و به رنگ سبز در نقشه نشان داده شده است) با ضخامت کافی و گسترش زیاد مشاهده می‌شود (شکل ۱۵-۲).



شکل (۱۵-۲): منطقه‌ای واقع در شمال استان سمنان با احتمال وجود توده‌سنگ آهک در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

در فرایند ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته، پمپاژ اسید به داخل تشکیلات آهکی و نیز پمپاژ محصولات اسیدشویی به خارج از مغار با استفاده از نیروی برق انجام می‌شود. بنابراین دسترسی داشتن به امکاناتی نظیر برق در تعیین مکان مناسب برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته بسیار مهم است. در مجموعه شکل (۱۶-۲) تصویری از شبکه سراسری انتقال برق برای استان‌های تهران، قم، قزوین و سمنان نشان داده شده است.



شکل (۱۶-۲): نقشه خطوط انتقال برق در اطراف استان تهران، قم، قزوین و سمنان (شرکت مدیریت شبکه برق ایران، ۱۳۸۸)

## ۲-۵ نتیجه‌گیری:

در این تحقیق برای انتخاب مناسب‌ترین مکان برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته برای عمق‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین، شرایطی در نظر گرفته شده است. از جمله این شرایط، میزان مصرف گاز طبیعی استان‌های کشور در سال ۱۳۸۹ و تا پایان این سال بوده است. با توجه به آمارهای ارایه شده وزارت نیرو پیرامون مصرف گاز طبیعی کشور، استان‌های تهران، اصفهان، خراسان رضوی و آذربایجان شرقی بیشترین میزان مصرف گاز طبیعی را برای مصارف گرمایشی (شامل مصرف خانگی، تجاری و عمومی) داشته‌اند. در بخش مصرف صنعتی گاز طبیعی کشور نیز، استان‌های تهران، خوزستان، بوشهر و اصفهان، بیشترین میزان مصرف گاز طبیعی را داشته‌اند. استان تهران همچنین بیشترین میزان انشعابات و تعداد مصرف‌کننده گاز طبیعی را در سال ۱۳۸۹ و تا پایان این سال داشته است. ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته همچنین باید در نزدیکی خطوط انتقال گاز باشد تا هزینه‌ها و مشکلات انتقال گاز در فواصل طولانی را نداشته باشد. همان‌طور که مشاهده شد، تمرکز خطوط اصلی انتقال گاز در جنوب کشور و نیز اطراف استان تهران زیاد است. بیشتر صادرات و واردات گاز طبیعی کشور با کشورهای واقع‌شده در مرزهای شمالی کشور ایران است. صادرات گاز میدان‌های گازی جنوب کشور از طریق خطوط لوله به کشورهای واقع‌شده در مرزهای شمالی ایران به دلیل طولانی بودن مسیر انتقال گاز مشکل است. با ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته در مکانی نزدیک به مرزهای شمالی، می‌توان گاز طبیعی ذخیره‌شده در این فضاهای زیرزمینی را صادر کرد. از این فضای زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز طبیعی می‌توان برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی وارد شده نیز استفاده کرد. برای رسیدن به این هدف، استان تهران و استان‌های نزدیک به آن در موقعیت مکانی خوبی قرار دارند. اطلاع از وضعیت تکتونیکی زمین نیز در تعیین مکان ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته، بسیار مهم است. همان‌طور که مشاهده شد، وضعیت تکتونیکی اطراف استان تهران، قزوین، قم، سمنان، کرمان و خوزستان، آرام است. با توجه به نتایج بدست‌آمده از میزان مصرف گاز طبیعی،

نزدیکی به خطوط انتقال گاز، تعداد مصرف کنندگان گاز طبیعی، موقعیت جغرافیایی کشورهای صادرکننده گاز طبیعی به ایران و واردکننده گاز طبیعی از ایران و وضعیت تکتونیکی زمین، استان تهران و استان‌های نزدیک به آن مانند استان‌های سمنان، قم و قزوین برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته انتخاب شده است. بنابراین شناسایی واحدهای کربناته برای عمق‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در محدوده این استان‌ها انجام شده است. در این تحقیق برای شناسایی واحدهای کربناته برای عمق‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین، از نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده شده است. با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، تشکیلات کربناته در قسمت‌هایی از شرق استان تهران (در مجاورت کوه دماوند تا کوه قره‌داغ)، غرب استان (در مجاورت تاقدیس کمرکوه) قم، جنوب (در نزدیکی کوه دوبرادران) شهر قم، جنوب شرق (در نزدیکی منطقه نوادران) و شمال شرق (در مجاورت کوه چهارکلایه) استان قزوین، شمال شرق شهر قزوین و نیز شمال استان سمنان (در نزدیکی کوه نیزوا)، مشاهده شده است. باید توجه شود که سازند قم از شمال غرب تا جنوب شرق استان قم امتداد یافته است و بنابراین احتمال وجود توده‌سنگ آهک در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین در این مناطق وجود دارد. با توجه به نتایج بدست آمده از نقشه‌های زمین‌شناسی، وضعیت تکتونیکی زمین و تمرکز خطوط لوله‌های انتقال گاز، مناطق واقع در جنوب شرق و شمال شرق استان قزوین، غرب استان و جنوب شهر قم، مناسب‌تر به نظر می‌رسند. از بین مناطق عنوان شده در استان قم و قزوین، جنوب شرق و شمال شرق استان قزوین به دلیل وضعیت تکتونیکی بهتر و نزدیک‌تر بودن به خطوط انتقال گاز، مناسب‌تر به نظر می‌رسند.

## فصل سوم:

### الزمات علميّة احداث وبرهانه بداری مغار

### ۱-۳ مقدمه

موضوع احداث و بهره‌برداری از مغارهای آهکی با فناوری اسیدشوبی کاملاً جدید بوده و هم‌اکنون روش مورد نظر در مرحله تحقیق و توسعه است. این روش در سال ۲۰۰۴ برای ایجاد مغارهای ذخیره‌سازی گاز در تشکیلات آهکی با استفاده از اسیدشوبی و روش معدن‌کاری انحلالی (همانند آنچه برای نمک بکار می‌رود) ارایه شده است. در آن زمان عوامل بسیاری مانند پایداری مخزن، مقاومت مخزن در برابر گاز و تولید زیاد گاز  $\text{CO}_2$  که از انحلال آهک حاصل می‌شود، کاملاً مبهم و مورد سوال بوده است .(Castle, et al., 2004a)

این روش شامل حفاری یک یا چند چاه، پمپاژ اسید به داخل تشکیلات و سپس برداشت و بهسازی سیال باطله است. برای تسهیل انتقال اسید به داخل تشکیلات، ممکن است سنگ قبل از پمپاژ اسید به صورت هیدرولیکی شکافته شود (Castle, et al., 2004a).

### ۲-۳ الزامات احداث مغار

مهم‌ترین عواملی که در طراحی فرایند احداث مغار باید مورد نظر قرار گیرد عبارت است از: وزن سنگی که باید در اسید حل شود، فشار، دما و حجم ذخیره‌سازی گاز در عمق (در فصل ۴ توضیح داده شده است)، انحلال‌پذیری محصولات واکنش اسید-سنگ، مواد مایع، جامد و گاز حاصل از فرایند و هزینه‌های تامین اسید.

الزامات طراحی و محاسبات اقتصادی نشان داده‌اند که این روش به طور سودمندی برای تشکیلات کربناته عمیق‌تر از ۴۰۰۰ فوت (حدود ۱۲۵۰ متر) و کمتر از ۹۰۰۰ فوت (حدود ۲۷۵۰ متر) می‌تواند بکار رود. در سال ۲۰۰۴ برای تشخیص مکان‌های دارای پتانسیل برای کاربرد این روش در ایالات متحده آمریکا، اطلاعات از شش ایالت ایندیانا<sup>۱</sup>، اهایو<sup>۲</sup>، کنتاکی<sup>۳</sup>، ویرجینیا<sup>۴</sup>، پنسیلوانیا<sup>۵</sup> و نیویورک<sup>۶</sup> توسط دانشگاه کلمبیا<sup>۷</sup> آمریکا گردآوری شده است. بر اساس آنالیز GIS.

<sup>۱</sup> - Indiana

<sup>۲</sup> - Ohio

<sup>۳</sup> - Kentucky

<sup>۴</sup> - West Virginia

<sup>۵</sup> - Pennsylvania

<sup>۶</sup> - New York

<sup>۷</sup> - Clemson university

نواحی زیادی از ویرجینیا غربی، پنسیلوانیا و نیویورک به عنوان مکانی با پتانسیل مناسب برای ایجاد مخازن ذخیره‌سازی گاز در سنگ‌های کربناته به روش معدن کاری انحلالی شناخته شده است. نواحی کوچکتری نیز که ممکن است برای این منظور مناسب باشند در ایالات ایندیانا، اهایو و کنتاکی تشخیص داده شده است (Castle, et al., 2004b).

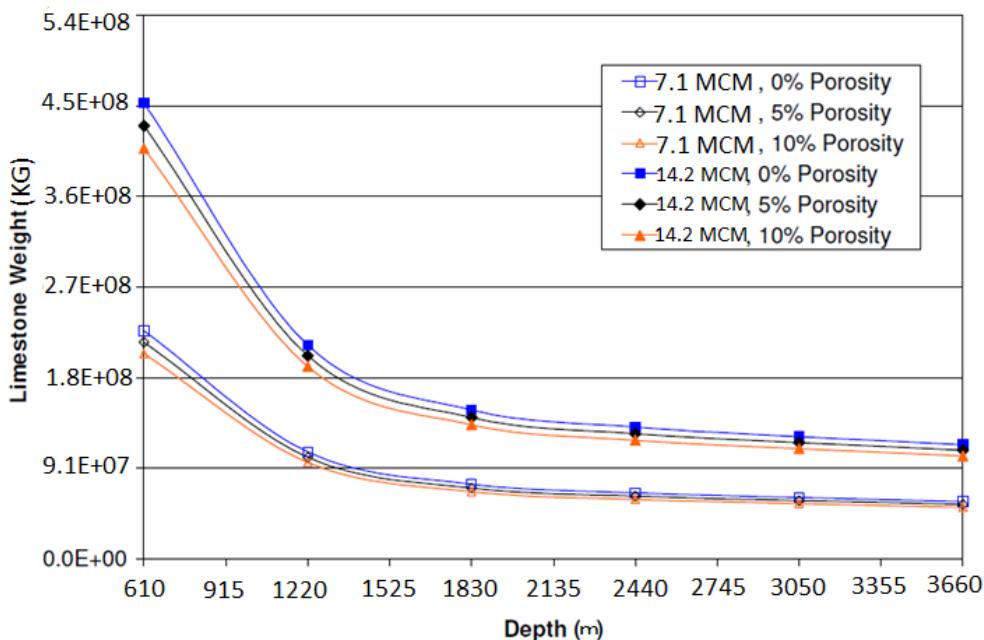
پتانسیل کاربرد این روش به تحلیل اقتصادی اولیه‌ای که هزینه‌های سرمایه‌ای، گزینه‌های طراحی چاه و هزینه‌های آن، گزینه‌های بهسازی باطله و مقایسه هزینه‌ها با دیگر روش‌هایی که ذخیره‌سازی گاز را در نظر می‌گیرد، وابسته است.

### ۱-۲-۳ مقدار سنگ قابل انحلال

برای ساخت مغار با هندسه و ابعاد مشخص، حجم مشخصی از سنگ آهک باید در اسید حل شود. این حجم ( $V_{Rock}$ ) تابعی از حجم گاز طبیعی برای ذخیره‌سازی در مغار ( $V_{gas}$ ، وزن حجمی گاز طبیعی ( $\rho_{gas}$ ) در عمق ساخت مغار ( $depth$ ) و تخلخل تشکیلات سنگی کربناته ( $Rock Porosity$ ) است (معادله (1-۳)).

$$V_{Rock} (ft^3) = \left[ \frac{V_{gas} (STP, ft^3) \cdot \rho_{gas} \left( depth, \frac{lb}{ft^3} \right)}{\rho_{gas} \left( STP, \frac{lb}{ft^3} \right)} \right] \left( 1 - \frac{\% Rock Porosity}{100} \right) \quad (1-3)$$

جرم سنگ معادل این حجم ( $V_{Rock}$ ) به سادگی از حاصل ضرب حجم سنگ آهک (با احتساب تخلخل سنگ) در وزن حجمی آن بدست می‌آید. این جرم (حاصل ضرب حجم سنگ و وزن حجمی کربنات کلسیم که تقریباً برابر با  $2700 \text{ kg/m}^3$  است) با عمق مغار، تخلخل سنگ آهک و حجم گاز طبیعی مورد نیاز تغییر می‌کند (شکل (1-۳)). در شکل (1-۳) مقدار سنگ آهکی (بر حسب کیلوگرم) که باید در محلول اسیدی برای ذخیره‌سازی ۱/۷ تا ۲/۱۴ میلیون مترمکعب (MCM) گاز طبیعی، حل شود، برای اعمق مختلف نشان داده شده است.



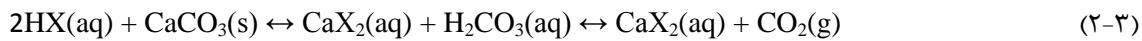
شکل (۳-۱): مقدار سنگ آهکی که باید در اسید به منظور ساخت مغار با حجم معین برای ذخیره‌سازی حجم مشخصی از گاز، حل شود (Castle, et al., 2004a)

### ۲-۲-۳ ویژگی‌های اسید و انحلال‌پذیری سنگ

به منظور انحلال مقدار زیادی آهک با استفاده از اسید، دو عامل اساسی باید بررسی شوند: تعادل و جنبش<sup>۱</sup> واکنش. جنبش واکنش، نرخی که در آن انحلال می‌تواند اتفاق بیافتد را تعیین می‌کند و تعادل واکنش در ترکیب با قابلیت انحلال در آب محصول، از لحاظ نظری، بازده و بیشترین غلظت اجزای خروجی از فرایند انحلال را تعیین می‌کند. بهتر است نرخ واکنش انحلال سریع باشد و تعادل واکنش به سمت تشکیل محصولات با قابلیت انحلال زیاد در آب پیش رود. بدلیل طبیعت مرسوم و قابل پیش‌بینی واکنش‌دهنده‌های درگیر در فرایند انحلال، اطلاعات مربوط به جنبش، تعادل و قابلیت انحلال محصولات، اندازه‌گیری شده و در متون فنی موجود است (Castle, et al., 2004a).

نهشته‌های آهکی را می‌توان در محیط آبی با کاربرد اسید مناسب بر اساس مکانیزم واکنشی که در رابطه (۲-۳) نشان داده شده است، حل کرد.

<sup>۱</sup>-Kinetics



چند پارامتر مهم برای انتخاب اسید بهینه به منظور احداث مغارهای ذخیره‌سازی کربناته باید در نظر گرفته شوند. این پارامترها عبارتند از:

- ۱- هزینه اسید و در دسترس بودن آن
  - ۲- قابلیت انحلال نمک‌های کلسیم حاصله در آب
  - ۳- سمیت نمک حاصله و یا اسید
  - ۴- ملاحظات مربوط به کنترل باطله
  - ۵- ویژگی‌های خورنده‌گی اسید مورد استفاده
  - ۶- نیاز به کنترل تبخیر و یا سوختن (برای اسیدهای آلی)
  - ۷- نرخ واکنش انحلال
  - ۸- ثابت معادله واکنش انحلال
  - ۹-  $\text{pKa}$  برای انحلال اسید در آب (اسیدهای با  $\text{pKa}$  بالاتر انحلال‌پذیری بیشتری در آب دارند)
  - ۱۰- کاربری پیشین در ارتباط با کاربردهای نفت و گاز.
- معیارهای ۱، ۲، ۴ و ۸، عوامل اولیه قابل کاربرد برای شناسایی اسیدهای آلی و غیر آلی ای هستند که از لحاظ اقتصادی و شیمیایی برای فرایند انحلال مناسب هستند. هر چند، ممکن است معیارهای دیگری نیز در نظر گرفته می‌شوند، ولی تاثیر کمتری بر روی امکان‌پذیری فرایند انحلال دارند (Castle, et al., 2004a).

برای آسان‌تر شدن فرایند حفر، بهتر است محلول اسیدی مورد استفاده به طور کلی یک محلول با ویسکوزیته پایین باشد. بدین منظور، محلول اسیدی می‌تواند تنها شامل آب و یک یا تعداد بیشتری اسید باشد. می‌توان مواد اضافی که مناسب برای فرایند حفر هستند را نیز به محلول اضافه کرد. برای مثال می‌توان مواد درزگیر<sup>۱</sup> را هم علاوه بر آب و اسید به محلول اضافه کرد. در بعضی از موارد، می‌توان

---

<sup>۱</sup>-Sealant

از محلول اسیدی با ویسکوزیتهای کمتر از  $5 \text{ cp}$  (سانتی پویز) استفاده کرد، البته در مواردی ممکن است این مقدار به کمتر از  $2 \text{ cp}$  نیز تقلیل یابد (Castle, et al., 2007).

بر پایه نوع و ترکیب اسیدهای استفاده شده در محلول اسیدی مورد استفاده در فرایند ساخت و همچنین ویژگی‌های فرایند ساخت مغار مانند میزان ناخالصی‌های غیرقابل انحلال در اسید مورد استفاده در تشکیلات آهکی، سرعت واکنش انحلال و میزان انحلال‌پذیری محصولات واکنش، قدرت محلول اسیدی تغییر می‌کند. برای مثال، در بعضی از شرایط مانند زمانی که اسیدی در واکنش اسیدشویی بکار می‌رود که ثابت تعادل آن پایین است، یا زمانی که محصولات واکنش بسیار انحلال-پذیر هستند، و یا زمانی که تولید محصولات با سرعت بسیار بالا مد نظر است، محلول اسیدی با غلظت بالا می‌تواند استفاده شود در حالی که در سایر موارد، محلول‌هایی با غلظت کمتر معمولاً ترجیح داده می‌شوند. برای مثال، یک محلول اسید هیدروکلریک با قدرتی حدود  $35\% \text{ wt}$  درصد وزن محلول را اسید هیدروکلریک تشکیل داده است، غلظت اسید هیدروکلریک) می‌تواند استفاده شود. با انتخاب سایر اسیدها برای پروژه اسیدشویی، برای مثال، اسید استیک، اسید سولفوریک، اسید فسفوریک (و اسیدهایی مانند این اسیدها)، می‌توان آنها را با هر گونه غلظت و با قدرتی از حدود  $1\% \text{ wt}$  تا حدود  $100\% \text{ wt}$  استفاده کرد (Castle, et al., 2007).

اسیدهای آبی (محلول در آب) بسیاری (هم آلی و هم غیرآلی) وجود دارند که برای استفاده در فرایند ساخت به صورت تنها و یا در ترکیب با سایر اسیدها، مفید هستند. به عنوان مثال، اسید ارتوفسفریک<sup>۱</sup>، اسید سولفوریک<sup>۲</sup>، اسید هیدروکلریک<sup>۳</sup>، اسید نیتریک<sup>۴</sup>، اسید فرمیک<sup>۵</sup>، اسید استیک<sup>۶</sup>، اسید تری هیدروکسی پروپیونیک<sup>۷</sup>، اسید سیتریک<sup>۸</sup>، اسید هیدروبرمیک<sup>۹</sup> یا ترکیبی از اسیدهای آبدار

<sup>1</sup> - Orthophosphoric acid

<sup>2</sup> - Sulfuric acid

<sup>3</sup> - Hydrochloric acid

<sup>4</sup> - Nitric acid

<sup>5</sup> - Formic acid

<sup>6</sup> - Acetic acid

<sup>7</sup> - 3-Hydroxypropionic acid

<sup>8</sup> - Citric acid

<sup>9</sup> - Hydrobromic acid

برای این منظور مناسب هستند. اسیدی که برای هر مورد خاص استفاده می‌شود متفاوت است  
(Castle, et al., 2007).

### ۱-۲-۲-۳ ثابت معادله واکنش انحلال

تعادل واکنش (رابطه (۲-۳))، حد ترمودینامیکی که در آن واکنش‌دهنده‌ها می‌توانند به محصولات تبدیل شوند را تعیین می‌کند و این حد ترمودینامیکی با استفاده از انرژی آزاد تشکیل گیبس<sup>۱</sup> برای واکنش دهنده‌ها و محصولات محاسبه می‌شود. انرژی آزاد تشکیل گیبس کمیتی ترمودینامیکی است که میزان خود به خود انجام شدن یک واکنش را نشان می‌دهد. این کمیت با  $G$  نمایش داده می‌شود. انجام یک فرایند به لحاظ ترمودینامیکی زمانی امکان‌پذیر است که تغییرات انرژی آزاد گیبس برای آن فرایند منفی باشد. انرژی آزاد گیبس به آنتالپی سیستم بستگی دارد. تغییرات آنتالپی واکنش، تغییرات انرژی سیستم در فشار ثابت در حین انجام واکنش است. یک واکنش از نظر انرژی زمانی انجام‌پذیر است که در اثر انجام واکنش، انرژی سیستم کاهش یابد و به عبارتی سیستم پایدارتر شود. در این صورت تغییرات آنتالپی منفی خواهد بود. تغییرات آنتالپی واکنش به فاز (جامد، مایع و گاز) واکنش‌دهنده‌ها و محصولات بستگی دارد. باید توجه شود که با وجود فشار بالا در عمق‌های زیاد، مقداری  $CO_2$  در فاز گازی وجود خواهد داشت. هرچند فرض می‌شود تمام  $CO_2$  تا زمانی که محصولات نمکی به سطح پمپ می‌شوند، در محلول باقی خواهند ماند. علاوه بر این، تغییرات در آنتالپی واکنش می‌تواند از طریق خصوصیات اجزای خالص مشابه، محاسبه شود. این اطلاعات و واکنش‌های وابسته مربوط به آنها در جدول (۱-۳) و معادلات (۳-۳) و (۴-۳) بیان شده است. این محاسبات نشان می‌دهد که ثابت تعادل واکنش برای همه اسیدها، به جز اسید استیک، بالا و در حد مطلوب است. علاوه بر این، همه واکنش‌های انحلال، گرمایش هستند. بنابراین گرم شدن می‌تواند نرخ انحلال آهک را افزایش دهد (Castle, et al., 2004a).

<sup>۱</sup> - Gibbs free energy of formation

محاسبه انرژی آزاد گیبس واکنش از طریق مقادیر انرژی آزاد تشکیل گیبس واکنشدهندها ( $G_{f,i}^0$ ) و محصولات ( $G_{f,j}^0$ ) در رابطه (۳-۳) نشان داده شده است.  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب موازنی واکنش هستند.

$$\Delta G_{rxn}^0 = \sum_{products} \beta_j G_{f,j}^0 - \sum_{reactants} \alpha_i G_{f,i}^0 \quad (3-3)$$

محاسبه ثابت تعادل واکنش ( $K_{eq}$ ) با استفاده از انرژی آزاد گیبس واکنش در رابطه (۴-۳) نشان داده شده است.  $R$  ثابت جهانی گاز و  $T$  دمای واکنش بر حسب کلوین (K) است.

$$-\Delta G_{rxn}^0 = RT \ln K_{eq} \quad (4-3)$$

اگر ثابت تعادل بسیار کوچک باشد (کمتر از  $10^{-10}$ )، انجام واکنش غیرممکن است. اگر ثابت تعادل کوچک باشد (کمتر از ۱)، تعادل به سمت چپ واکنش است یعنی مقدار بسیار کمی از واکنشدهنده‌ها به محصولات تبدیل شده‌اند. اگر ثابت تعادل بزرگ باشد واکنش کامل و تعادل به سمت راست واکنش است یعنی مقدار قابل توجهی از واکنشدهندها به محصولات تبدیل شده‌اند.

جدول (۱-۳): انرژی آزاد گیبس، تغییرات آنتالپی و ثابت تعادل برای چند واکنش اتحادی آهک (Castle, et al., 2004a). واکنش‌های مطلوب سایه زده شده است

$K_{eq}$	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta G$ (kJ/mol)	واکنش
$2.02 \times 10^{-10}$	-۸/۷	-۵۸/۸	$H_2SO_4(aq) + CaCO_3(s) \leftrightarrow CaSO_4(s) + H_2CO_3(aq)$
$2.46 \times 10^{-8}$	-۳۵/۵	-۴۷/۹	$2HCl(aq) + CaCO_3(s) \leftrightarrow CaCl_2(s) + H_2CO_3(aq)$
$2.45 \times 10^{-8}$	-۱۰/۴	-۴۷/۸	$2HNO_3(aq) + CaCO_3(s) \leftrightarrow Ca(NO_3)_2(aq) + H_2CO_3(aq)$
۱۵/۵	-۳۸/۶	-۶/۷۹	$2CH_3COOH(aq) + CaCO_3(s) \leftrightarrow Ca(CH_3COO)_2(aq) + H_2CO_3(aq)$

## ۲-۲-۲-۳ قابلیت اتحاد محصول اتحاد

قابلیت اتحاد نمک کربناته حاصل از اتحاد نیز یک عامل مهم در تعیین اسید ایدهآل برای فرایند اسیدشویی سنگ کربناته است. قابلیت اتحاد پایین نمک کلسیم، منجر به لزوم پمپاژ مقادیر بیشتری

آب (و اسید) به داخل تشکیلات زیرزمینی به منظور جلوگیری از رسوب محصولات نمکی می‌شود.

اطلاعات مربوط به قابلیت انحلال اسیدهای انتخاب شده در جدول (۳-۲) درج شده است.

جدول (۳-۲): قابلیت انحلال بعضی از نمک‌های کلسیم متداول در آب در شرایط استاندارد (STP) (Castle, et al., 2004a) اسیدهایی که منجر به محصولاتی با قابلیت انحلال مورد قبول می‌شوند، سایه زده شده‌اند.

قابلیت انحلال نمک کلسیم در آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ( $\frac{g}{l}$ )	نمک کلسیم حاصله	اسید
۱۲۱۲	کلسیم نیترات ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ )	اسید نیتریک ( $\text{HNO}_3$ )
۱۰۰۰	کلسیم هیدروکسی پروپیونات ( $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3)_2$ )	اسید تری هیدروکسی پروپیونیک ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ )
۷۴۵	کلسیم کلرید ( $\text{CaCl}_2$ )	اسید هیدروکلریک ( $\text{HCl}$ )
۳۷۴	کلسیم استات ( $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ )	اسید استیک ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )
۱۶۲	کلسیم فرمات ( $\text{Ca}(\text{CHO}_2)_2$ )	اسید فرمیک ( $\text{HCOOH}$ )
۱۸	کلسیم اورتوفسفات ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	اسید اورتوفسفوکیک ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )
۲	کلسیم سولفات (anhydrite, $\text{CaSO}_4$ )	اسید سولفوریک ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

اطلاعات موجود در جدول (۳-۲) نشان می‌دهند که اکثر اسیدهای غیرآلی تک پروتونی (مثل اسید هیدروکلریک و اسید نیتریک) بجز اسید اورتوفسفوکیک، به نمک‌های کلسیمی با قابلیت انحلال در آب بالا منجر می‌شوند. در مقایسه نمک‌های کلسیم، اسیدهای دو پروتونی (مثل اسید سولفوریک) و اسیدهای سه پروتونی (مثل اسید سیتریک- نشان داده نشده است) قابلیت انحلال خیلی پایینی در آب دارند. در نهایت، واکنش اسیدهای آلی تک پروتونی منجر به تشکیل نمک‌های کلسیمی می‌شود که قابلیت انحلال متوسط (مثل استات کلسیم، فرمات کلسیم) تا بالایی (مثل هیدروکسی پروپیونات کلسیم) در آب دارند. به طور خلاصه، قابلیت انحلال نمک‌های کلسیم مشتق شده از واکنش‌های اسید سولفوریک و اورتوفسفوکیک بسیار پایین‌تر از آن هستند که منجر به فرایند انحلال مناسب شوند. بنابراین، تنها بر اساس قابلیت انحلال نمک‌های کلسیم، هر اسیدی که منجر به تشکیل نمک کلسیم با

قابلیت انحلال بزرگتر از ۱۰۰ گرم بر لیتر شود، قابل پذیرش است. هرچند، قابلیت انحلال بالاتر، مناسب‌تر است (Castle, et al., 2004a).

### ۳-۲-۳ هزینه‌های اسید

چندین اسید برای فرایند انحلال تشکیلات آهکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعضی از مزایای کاربرد اسید هیدروکلریک شامل، هزینه کم، قابلیت انحلال زیاد اسید، نرخ واکنش زیاد با سنگ کربناته و قابلیت انحلال زیاد محصولات (کلرید کلسیم) است که اجازه می‌دهد باطله کلسیم به راحتی از چاه برداشته شود. همچنین بازار تجاری برای محصول کلرید کلسیم وجود دارد (Castle, et al., 2007). اسید هیدروکلریک، همچنین خورنده تجهیزات حفاری است و منجر به محصولات باطله‌ای می‌شود که نیاز به عملیات بهسازی بیشتری دارد. سایر اسیدهایی که برای انحلال آهک استفاده شده‌اند، اسید استیک و اسید فرمیک هستند. این دو اسید، اسیدهای آلی با انحلال‌پذیری بسیار زیاد در آب هستند، ویسکوزیته پایینی دارند، دوستدار محیط‌زیست بوده و کمتر خورنده تجهیزات حفاری هستند. کاربرد اسید استیک و اسید فرمیک معایبی مانند، نرخ واکنش متوسط با کربنات‌ها (بدلیل  $pKa$  پایین‌تر اسیدها در آب)، قابلیت انحلال کمتر محصولات نمک کلسیم و هزینه‌های نسبتاً زیاد اسید را به همراه دارد. با وجود این‌که اسیدهای آلی مزایای بیشتری نسبت به اسیدهای غیرآلی دارند، اما هزینه کاربرد تمام اسیدهای آلی زیاد است (Castle, et al., 2004a). اسید تری‌هیدروکسی‌پروپیونیک نیز می‌تواند برای واکنش اسید شویی استفاده شود. این اسید آلی از ذرت و با استفاده از فرایند تخمیر بدست می‌آید و نمک‌های کلسیمی را تشکیل می‌دهد که بسیار در آب انحلال‌پذیر، حتی انحلال‌پذیرتر از کلسیم هستند. هزینه این اسید ممکن است یک تاثیر منفی بر روی انتخاب بهترین اسید برای فرایند اسید شویی داشته باشد (Castle, et al., 2007). بنابراین اسید هیدروکلریک مناسب‌ترین اسید برای کاربرد در فرایند انحلال است (Castle, et al., 2004a).

بر پایه کارهای انجام شده درباره امکان سنجی ذخیره سازی گاز در ساختارهای سنگی کربناته، نشان داده شده است که اسید هیدروکلریک مناسب ترین اسید برای فرایند ساخت معار در این سازندها است. بنابراین تمرکز اصلی بر روی این اسید است (Castle, et al., 2004a).

قیمت های فروش کلی اسیدهای مورد نظر (بر مبنای قیمت های سال ۲۰۰۴) در جدول (۳-۳) نشان داده شده است. البته اسیدهایی با خلوص بالا برای فرایند انحلال مورد نیاز نیستند. قیمت های اسید و خلوص آنها، که در جدول (۳-۳) نشان داده شده، برای محاسبه هزینه انحلال یک پوند (حدود ۰/۴۵ کیلوگرم) آهک بکار رفته است که معیاری مستقیم برای مقایسه امکان پذیری اقتصادی استفاده از اسیدهای مختلف را فراهم می کند. تنها بر اساس هزینه ها، هر اسید غیرآلی متداول، انتخاب معقولی برای فرایند انحلال به نظر می رسد، در حالی که هزینه اکثر اسیدهای آلی بسیار زیاد است.

جدول (۳): هزینه های اسید. اسیدهای با هزینه مناسب تر سایه زده شده اند (Castle, et al., 2004a)

هزینه تهیه اسید برای شستن ۱ پوند (۰/۴۵ kg) سنگ آهک (دلار آمریکا)	غلظت <small>وزن اسید وزن محلول اسید</small>	قیمت فروش <small>دلار آمریکا وزن اسید (تن)</small>	اسید
۰/۰۰۵	۵۲٪	۲/۷	اسید اور توفسفیریک ( $H_3PO_4$ )
۰/۰۱۲	۱۰۰٪	۲۵	اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ )
۰/۰۷۵	۲۲° Be , ۳۴٪	۶۸	اسید هیدروکلریک (HCl)
۰/۱۹۹	۴۰° Be , ۶۸٪	۲۱۵	اسید نیتریک ( $HNO_3$ )
۰/۲۴۴	۸۵٪	۴۵۱	اسید فرمیک (HCOOH)
۰/۵۷۵	۹۵٪	۹۱۰	اسید استیک ( $CH_3COOH$ )
۰/۹۱۸	۹۵٪	۱۱۰۰	اسید تری هیدروکسی پروپیونیک ( $C_3H_6O_3$ )

درجه بومه (°Be) اندازه وزن مخصوص بر اساس محلول ۱۰ درصد NaCl است که ارزش ۱۰ دارد. وزن مخصوص (خالص) در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد برای سیالی چگال تر از آب با رابطه مقابل بیان شود sp.gr.=145/(145-Baume)

### ۳-۳ سایر هزینه‌ها

روش اصلی پیشنهاد شده برای احداث مغارهای ذخیره‌سازی کربناته، حفاری به عمق مورد نظر، شکستن لایه‌های سنگی کربناته در صورت نیاز و ساخت مغار با استفاده از اسید مایع برای انحلال سنگ کربناته است. سپس با حذف محلول باطله حاصله، مغار زیرزمینی ایجاد می‌شود که می‌تواند برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی بکار رود. وجود تشكیلات سنگی کربناته بسیار در سراسر جهان، این روش را برای صنایع و مصرف کنندگان جذاب می‌سازد، بهویژه وقتی که بتوان تجهیزات را در نزدیکی بازارهای بزرگ گاز، جایی که ذخیره گاز کنونی پاسخگوی تقاضای موجود نیست، ایجاد نمود. مزیت دیگر مغار ذخیره‌سازی کربناته، مناسب بودن آن برای توسعه ظرفیت ذخیره‌سازی تا رسیدن به یک حجم خاص در نزدیکی تأسیسات صنعتی یا کارخانجات تولید نیرو است (Choi, 2011).

دو عامل اولیه وجود دارد که امکان‌پذیری احداث مخزن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی را به روش انحلال اسیدی سنگ کربناته تعیین می‌کند، هزینه مرتبط با انحلال مقادیر زیاد آهک توسط محلول‌های اسیدی (هزینه‌های انحلال) و وجود تشكیلات سنگی کربناته در مکان و عمق مناسب (زمین‌شناسی) (در فصل ۲ توضیح داده شده است) (Castle, et al., 2004a).

احداث مغارها در تشكیلات کربناته با کاربرد روش جدید دارای این مزیت است که در بسیاری از نواحی مختلف به دلیل وجود گسترده سنگ‌های کربناته، قابل کاربرد است و همچنین نیاز به حجم پایینی از گاز پایه دارد. این روش پتانسیل بالایی برای تجاری شدن به دلیل ذخیره‌سازی گاز در نزدیکی بازارهای اصلی مصرف گاز دارد. از آن جا که مخازن گازی تهی شده و تشكیلات نمکی تقریباً در بسیاری از نواحی موجود نیستند، احداث مغارها در سنگ‌های کربناته جایگزین مناسبی برای روش‌های متداول ذخیره‌سازی گاز است (Castle, et al., 2004a).

### ۳-۳-۱ تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت

هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت شامل هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم است. این هزینه‌ها برای ساخت مخازن ذخیره‌سازی گاز به حجم ۰/۵ تا ۱ میلیارد فوت مکعب (حدود ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب) با

استفاده از انحلال آهکی که از طریق اسید هیدروکلریک انجام می‌شود، تخمین زده شده است. هزینه‌های مختلف با کاربرد ضریب ارتباط لانگ<sup>۱</sup> توسط دانشگاه کلمسون محاسبه شده است. این ضریب، هزینه‌های ساخت را به هزینه‌های نهایی تجهیزات خریداری شده مرتبط می‌کند (جدول ۴-۳). به طور مثال ۳۹ درصد از هزینه ابزارآلات در تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای استفاده شده است. برای این تخمین، هزینه تجهیزات خریداری شده برای تخمین هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت استفاده شده که این مقادیر در جدول (۳-۵) نشان داده شده است. تجهیزات اصلی شامل پمپ‌های مقاوم در برابر خوردگی، تانک‌های نگهداری اسیدهیدروکلریک (タンک‌های ۲۰۰۰ گالنی)، جداکننده و جذب کننده محصولات کلرید کلسیم و ناحیه بهسازی باطله (آب باطله) برای حذف اسید کربنیک است. این محاسبات اقتصادی منجر به برآورد هزینه‌های سرمایه‌ای در حدود ۳,۲۷۰,۰۰۰ دلار آمریکا برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته شده است (Castle, et al., 2004a).

جدول (۴-۳): هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت تخمین زده شده برای احداث مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی (Castle, et al., 2004a). هزینه تجهیزات خریداری شده از جدول (۳-۶) اقتباس شده است.

عنوان	فاکتور لانگ (%)	هزینه (دلار آمریکا)
هزینه‌های مستقیم		
تجهیزات خریداری شده	۱۰۰	۷۹۹,۶۴۰
نصب تجهیزات	۳۹	۳۱۱,۸۶۰
ابزارآلات	۱۳	۱۰۳,۹۵۳
لوله‌کشی	۳۱	۲۴۷,۸۸۸
برق	۱۰	۷۹,۹۶۴
احداث ساختمان‌ها	۲۹	۲۳۱,۸۹۶
توسعه محوطه	۱۰	۷۹,۹۶۴
امکانات خدماتی	۵۵	۴۳۹,۸۰۲
آماده‌سازی زمین	۲	۱۵,۹۹۳
هزینه‌های غیرمستقیم		
مهندس و مشاور	۳۲	۲۵۵,۸۸۵
ساخت	۳۴	۲۷۱,۸۷۸
پیمان‌کار	۱۸	۱۴۳,۹۳۵
پیش‌بینی نشده	۳۶	۲۸۷,۸۷۱
هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت کلی	۴۰۷	۳,۲۷۰,۵۲۹

<sup>۱</sup> - Lang

جدول (۵-۳): تخمین هزینه‌های تهیه تجهیزات برای احداث مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی با استفاده از انحلال اسیدی آهک توسط اسید هیدروکلریک (Castle, et al., 2004a).

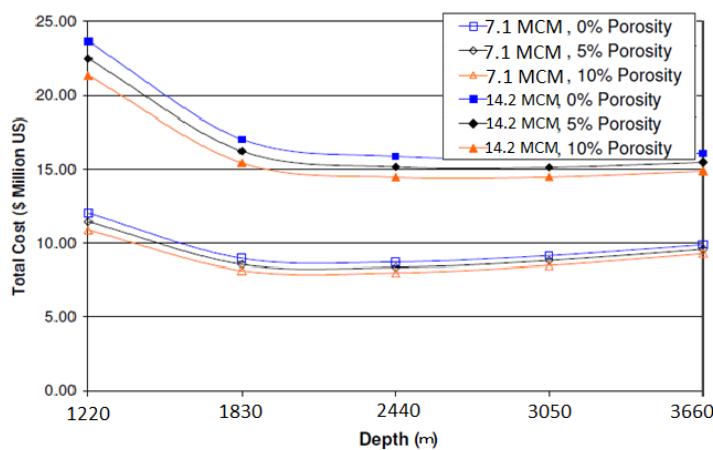
تجهیزات خریداری شده	قیمت (دollar Amerika)
جدا کننده و جذب کننده محصولات کلرید کلسیم	۴۹۹,۶۴۰
مواد درزگیر و پمپ‌های مقاوم در برابر خوردگی	۸۵,۰۰۰
タンک‌های نگهدارنده اسید	۲۶۵,۰۰۰
ناحیه بهسازی باطله	۳۰,۰۰۰
هزینه‌های کلی تجهیزات خریداری شده	۷۹۹,۶۴۰

### ۲-۳-۳ تخمین هزینه‌های کلی ساخت

هزینه‌های کلی برای احداث مغار زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز با استفاده از انحلال اسیدی سنگ آهک برابر اختلاف بین درآمد کلی بدست آمده از فروش نمک‌های کلرید کلسیم و هزینه‌های ساخت است. هزینه‌های ساخت مخازن ذخیره‌سازی گاز با استفاده از مجموع هزینه‌های تولید مستقیم، هزینه‌های ثابت و مجموع هزینه‌های مربوط به تجهیزات تخمین زده می‌شود. مقدار این هزینه‌ها، تابعی از هزینه اسید هیدروکلریک و هزینه‌های سرمایه‌ای کلی است که به صورت درصدی از هزینه نهایی در جدول (۶-۳) آورده شده است. هزینه کلی ساخت مغار ذخیره‌سازی ۱۴/۲ تا ۷/۱ میلیون متر مکعب گاز طبیعی در سنگ آهک به عنوان تابعی از تخلخل در عمق سنگ آهک در شکل (۲-۳) نشان داده شده است. هزینه‌های مربوط به انحلال دولومیت تقریباً ۶ درصد بیشتر از انحلال تشکیلات آهکی است. این موضوع اصولاً بدلیل وزن حجمی بیشتر سنگ دولومیت در مقایسه با سنگ آهک است (Castle, et al., 2004a).

جدول (۶-۳): هزینه آماده‌سازی تخمین زده شده برای احداث مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی با استفاده از انحلال اسیدی سنگ آهک با استفاده از اسید هیدروکلریک (Castle, et al., 2004a).

عنوان	هزینه (%)
هزینه‌های تولید مستقیم	
مواد خام	۴۹
کارگر	۱۴
سایر خدمات مانند تلفن	۸
تعمیر و نگهداری	۳
هزینه‌های ثابت	
هزینه‌های سرمایه‌ای ثابت	۹
مالیات	۱/۵
بیمه	۰/۵
هزینه‌های بالاسری تجهیزات	۸
هزینه‌های کلی	
هزینه‌های اداری	۲
هزینه‌های توزیع و فروش کالا	۵
مجموع	۱۰۰



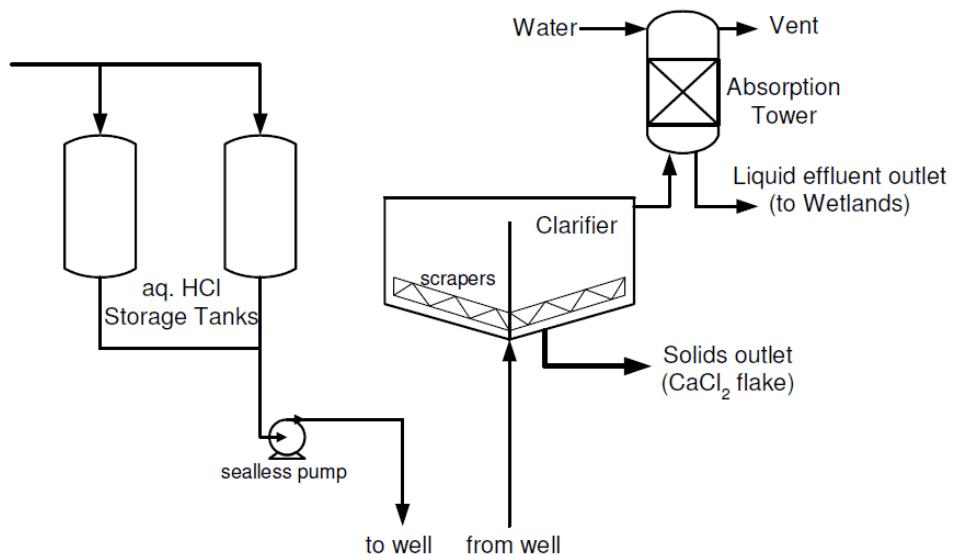
شکل (۲-۳): هزینه‌های احداث و تجهیز مغار ذخیره‌سازی ۱۴ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی در سنگ آهک با تخلخل ۰، ۵ و ۱۰ درصد در عمق‌های مختلف و در شمال غربی آمریکا (Castle, et al., 2004a).

### ۴-۳ روش‌های اجرا

در این روش پس از انجام کارهای اکتشافی و ارزیابی اولیه، اقدام به حفاری چاه تزریق (پمپاژ) می‌شود. این چاه به کمک روش‌ها و تجهیزات رایج در صنعت حفاری تا عمق مورد نظر حفر و در هر مرحله نیز از لوله‌گذاری دیواره و سیمانه کردن آن به بدن برای حفظ پایداری چاه در ترازهای مختلف استفاده می‌شود. هم‌محور با لوله‌گذاری‌های بدن، از رشتہ لوله‌های دیگری نیز برای ایجاد فضای حلقوی در محور چاه استفاده می‌شود. از این فضا در گام بعدی برای تزریق و یا پمپاژ (بسته به روش و مراحل ایجاد فضا) استفاده خواهد شد (Hartman, 2002). در ادامه، با پمپاژ اسید به داخل تشکیلات و سپس بیرون کشیدن سیال حاصله، فرایند احداث فضای زیرزمینی توسط معدن‌کاری انحلالی کامل می‌شود. برای تسهیل انتقال اسید به داخل تشکیلات، می‌توان قبل از پمپاژ اسید، ترکهای هیدرولیکی در سنگ ایجاد نمود.

فرایندی که برای احداث مغار ذخیره‌سازی در سنگ کربناته پیشنهاد شده، همان‌طور که در شکل (۳-۵) نشان داده شده، شامل پمپاژ اسید هیدرولیک به داخل تشکیلات کربناته است که منجر به واکنش سریع اسید با سنگ کربناته و در نتیجه انحلال سنگ کربناته می‌شود. محصولات این واکنش، کلرید کلسیم و اسید کربنیک است که به مقدار زیاد در آب قابل حل هستند. بعضی از اجزای اصلی تجهیزات ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته شامل موارد زیر است (Castle, et al., 2004a):

- ۱ - مجموعه اسید و تجهیزات ذخیره‌سازی آن
- ۲ - ایستگاه پمپاژ اسید
- ۳ - یک پالاینده برای تبخیر آب و جمع‌آوری محصول  $\text{CaCl}_2$  خام
- ۴ - برج جذب برای برداشت مقادیر باقیمانده اسید استفاده نشده
- ۵ - تجهیزات ثانویه بهسازی باطله و
- ۶ - تجهیزات بسته بندی  $\text{CaCl}_2$  (نشان داده نشده است).



شکل (۳-۳): نمودار فرایند انحلال اسیدی سنگ کربناته برای احداث مغار ذخیره‌سازی (Castle, et al., 2004a)

چند گزینه برای تعداد و جانمایی چاههای فرایند انحلال اسیدی برای احداث مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ کربناته وجود دارد. طراحی یک چاهی، تنها می‌تواند منجر به ایجاد شکل کروی و یا استوانه‌ای مغار ذخیره‌سازی گاز شود (شکل ۴-۳ الف). با این طراحی، همانند پمپاژ آب در ایجاد مغارهای نمکی، اسید تازه از فضای بین لوله جداری<sup>۱</sup> خارجی و داخلی چاه به داخل آن پمپ خواهد شد. محصولات نمک محلول هم با کاربرد لوله‌های جداری کوچکتر از چاه برداشت خواهند شد. طراحی‌های دوچاهی و چندچاهی نیز وجود دارند که می‌توانند برای احداث سریع‌تر مغار ذخیره‌سازی گاز استفاده شوند. در طراحی‌های دوچاهی، یک چاه برای پمپاژ اسید تازه به داخل تشکیلات استفاده می‌شود، در حالی که چاه دیگر برای برداشت محصولات اسید باقیمانده بکار خواهد رفت (شکل ۴-۳ ب). طراحی‌های دوچاهی بر حسب این‌که کanal جریان آب چگونه بین دو چاه توسعه داده می‌شود، متفاوت هستند. به عنوان مثال ممکن است، سنگ کربناته شکسته شود (شکستگی‌های عمودی در اعماق بیشتر از ۲۰۰۰ متر از سطح زمین) و یا این‌که در حالت دیگر چاههای افقی برای اتصال دو چاه، حفر شوند. دو روش ذکر شده برای طراحی دوچاهی در ادامه توصیف شده است:

<sup>1</sup>-Casing

### حالت اول: دو چاه با شکست عمودی:

در این روش ابتدا دو چاه حفر و سپس شکستگی‌های عمودی برای اتصال دو چاه ایجاد می‌شود. پس از حفاری چاه اول، پیمایش، انجام آزمایش‌های تزریق و ایجاد ریزشکستگی‌ها، حفر چاه دوم و شکست در سنگ بین دو چاه انجام می‌شود.

در این روش مقدار کمی تخلخل اولیه (حداقل ۲ درصد) برای شکست سنگ مورد نیاز است.

### حالت دوم: طراحی دوچاهی با حفاری افقی:

در این روش ابتدا دو چاه حفر و سپس چاه افقی برای اتصال دو چاه ایجاد می‌شود. پس از حفاری چاه اول، پیمایش، حفر چاه دوم و سرانجام حفر چاه افقی برای اتصال دو چاه انجام می‌شود.

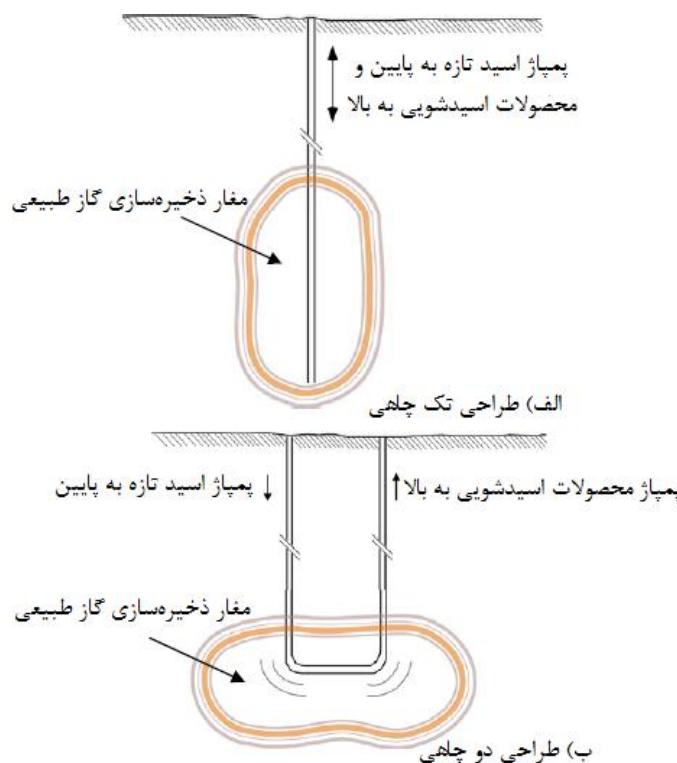
در این روش، انحلال بیشتر احتمالاً در گوشده‌ها اتفاق خواهد افتاد. فاصله بین چاه‌ها بستگی به ظرفیت ذخیره‌سازی دارد. تخلخل اولیه مورد نیاز نیست (Castle, et al., 2004a).

برای تخمین هزینه، طراحی دوچاهی با شکست عمودی انتخاب شده است و میزان هزینه برای این نوع طراحی در جدول (۷-۳) برای اعماق مختلف آورده شده است.

جدول (۷-۳): هزینه‌های روش حفاری دو چاهی (Castle, et al., 2004a)

تخمین هزینه‌ها (هزار دلار آمریکا)				عمق (متر)	
هزینه‌های تكمیلی			چاه برداشت	چاه تزریق	
اتصال دهنده افقی	شکافت هیدرولیکی	اسید	محصول	اسید	
۳۰	۲۰	۵۰	۱۵۰	۲۵۰	۱۲۲۰
۷۵	۱۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۴۴۰
۲۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۰۰۰	۲۵۰۰	۳۶۶۰

قطر چاه تزریق حدود ۱۸ سانتی‌متر، قطر چاه برداشت کمتر از قطر چاه تزریق و حدود ۱۱ سانتی‌متر، ۵۰۰۰ گالن اسید ژل شده برای شروع فرایند احداث مغار و شکست هیدرولیکی با پروپانت (Proppant) برای شروع یا تسريع فرایند احداث مغار، فرض شده است.

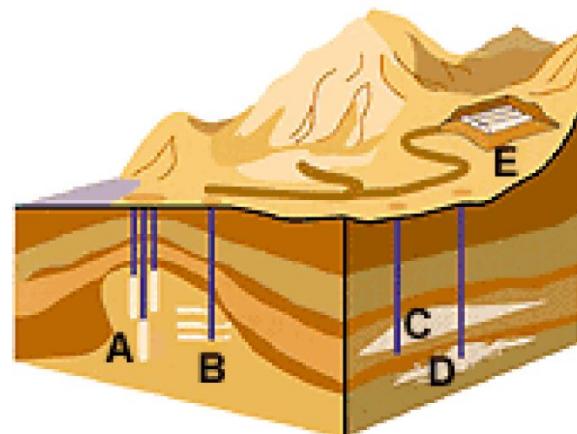


شکل (۴-۳): انواع روش‌های اجرای چاه برای احداث مغار ذخیره‌سازی گاز با استفاده از احلال اسیدی سنگ کربناته (Castle, et al., 2004a)

### ۵-۳ مقایسه هزینه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

چندین گزینه برای انجام فرایند ذخیره‌سازی گاز طبیعی در نزدیکی بازارهای مصرف اصلی وجود دارد. بعضی از این گزینه‌ها (همان‌طور که در شکل (۵-۳) نشان داده شده است) به صورت ساخت مخازن جدید سطحی با اندازه‌های متغیر، استفاده از معادن متروک به عنوان فضاهای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی، تبدیل سفره‌های آب موجود به فضاهای ذخیره‌سازی گاز، تبدیل مخازن نفت و گاز تهی-شده به مخزن ذخیره‌سازی و ایجاد فضاهای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز جدید با استفاده از احلال سنگ‌های کربناته یا نمک، است. برای هر کدام از این روش‌ها ملاحظات ایمنی و اقتصادی وجود دارد. ساخت تعداد زیادی مخزن گاز سطحی، خطر قابل توجهی را از لحاظ مسایل خراب‌کارانه ایجاد می-کند. محتمل‌ترین روش برای ذخیره‌سازی سطحی گاز، مایع کردن آن و ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع شده (LNG) در تانک‌های پوشش‌دار است که بسیار پرهزینه است (Castle, et al., 2004b).

از معایب تبدیل معادن متروک به فضاهای ذخیره‌سازی گاز، امکان نزدیک نبودن این معادن به خطوط لوله و یا مراکز پرجمعیت است. همچنین، این معادن ممکن است بدلیل بسیاری از موارد محدود کننده نظریه درزه و شکافدار بودن سنگ‌های اطراف، برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی مناسب نباشند (Castle, et al., 2004b).

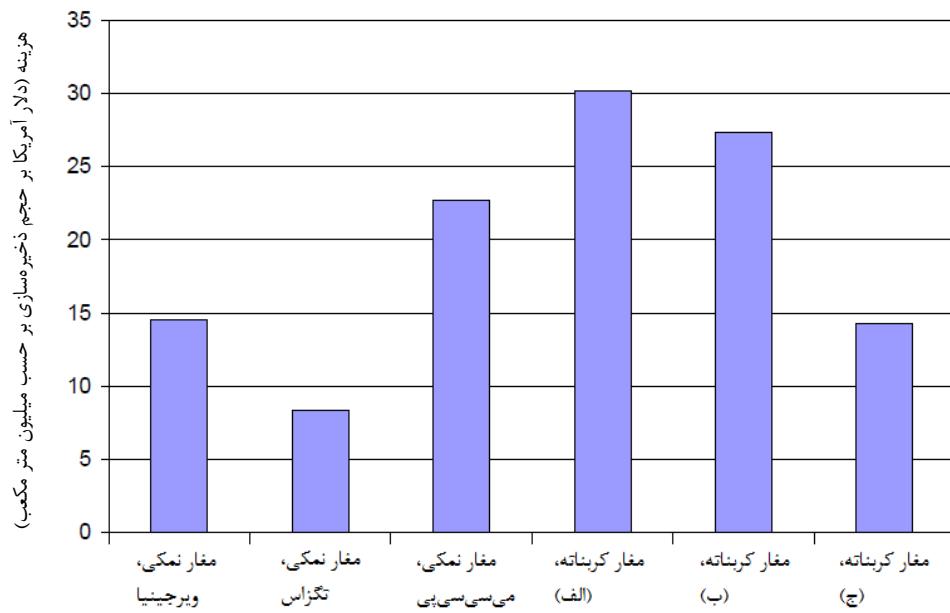


شکل (۵-۳): انواع روش‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی: (A) مغارهای نمکی (B) معادن متروک، (C) سفره‌های آب زیرزمینی، (D) مخازن نفت و گاز تهی شده و (E) مغارهای سنگ سخت  
(Castle, et al., 2004b)

برای کمک به ارزیابی امکان‌پذیری اقتصادی ایجاد مغار با فرایند احلال سنگ آهک، مقایسه هزینه برای تجهیزات ذخیره‌سازی گاز موجود انجام شده است. شکل (۶-۳) مقایسه هزینه بین ذخیره‌سازی گاز در سنگ نمک و مغار کربناته احداث شده به روشن احلال اسیدی را نشان می‌دهد. تحلیل هزینه-درآمد ناخالص کلی نشان می‌دهد که کاهش در هزینه‌ها با افزایش در تخلخل سنگ بدست می‌آید و بسیار تحت تاثیر قیمت هیدروکلریک اسید و کلرید کلسیم است (Castle, et al., 2004a).

اگر اسید هیدروکلریک ارزان‌تر از قیمت‌های عنوان شده در جدول (۳-۳) تهیه شود، فرایند ارایه شده در این فصل برای احداث مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی با توجه به سایر هزینه‌ها و شرایط ساخت، نسبت به دیگر روش‌ها مناسب‌تر خواهد شد. چنین کاهشی در قیمت اسید، به دلیل مقدار

اسیدی که باید خریداری شود و همچنین توانایی کاربرد اسید هیدروکلریک با خلوص پایین‌تر، بسیار محتمل است.



شکل (۳-۶): مقایسه هزینه روش‌های مختلف ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز. انحلال اسید برای (الف)  $\text{CaCl}_2$  ۲۴۴۰ متر (ب) ۲۸٪ تخلخل، هزینه اسید نشان داده شده در جدول (۳-۳)، عمق  $\text{CaCl}_2$  فروخته شده، عمق ۲۴۴۰ متر (ج) ۲۸٪ تخلخل، هزینه اسید نشان داده شده در جدول (۳-۳)، عمق  $\text{CaCl}_2$  فروخته شده، عمق ۲۴۴۰ متر (Castle, et al., 2004a).

### ۶-۳ خصوصیات مواد

جنس لوله‌ای که برای تزریق اسید به داخل تشکیلات آهکی در نظر گرفته می‌شود، فولاد است. خصوصیات فولاد و مشخصات لوله تزریق در جدول (۳-۸) نشان داده شده است. خصوصیات اسید هیدروکلریک و محلول نمک حاصله نیز در جدول (۳-۹) آورده شده است (Castle, et al., 2004b).

جدول (۸-۳): خصوصیات فولاد و مشخصات لوله (Castle, et al., 2004b)

مشخصات فولاد و لوله	مقدار
مدول یانگ فولاد	۲۰۰ GPa
نسبت پوآسون فولاد	۰/۲۸
قطر داخلی لوله	۰/۰۴ m
ضخامت دیواره لوله	۰/۰۰۵ m
سختی دیواره لوله	$۴/۶ \times 10^{-5}$ m

جدول (۹-۳): خصوصیات اسید هیدروکلریک و نمک  $\text{CaCl}_2$  (Castle, et al., 2004a)

$\text{CaCl}_2$	اسید هیدروکلریک	خصوصیات اسید و $\text{CaCl}_2$
۱۲۳۰	۱۱۸۰	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ چگالی
۲/۳۵	۲/۷۲	مدول حجمی (GPa)
$۴/۹ \times 10^{-7}$	$۱/۹ \times 10^{-3}$	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.Sec)

### ۷-۳ پیامدهای زیستمحیطی ساخت مغار در سنگ آهک

امروزه انرژی به عنوان موتور محرک توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع، جایگاه ویژه‌ای یافته است.

ولی فرایند تولید تا مصرف انرژی، منجر به ایجاد اثرات منفی بر محیط زیست از طریق ایجاد انواع آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای گردیده است. فعالیت‌های معدن‌کاری نیز خدمات زیادی را به محیط زیست وارد کرده است. فعالیت‌های معدن‌کاری مختلف، اثرات زیستمحیطی مختلفی را بر جای می‌گذارند. ساخت مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته، معایبی دارد. از جمله این معایب، اثرات مخرب زیستمحیطی مانند، نشت اسید، انتشار گاز، نشت زمین و مشکلات همراه با دور ریختن باطله‌ها و تفاله‌های معدنی است.

### ۳-۷-۱ نشت اسید

بر اساس هدف استفاده از مغار ساخته شده، ساختارهای مشخصی برای احداث مغار ترجیح داده می-شوند. مهم‌ترین معیارهای انتخاب ساختار، معیارهایی چون میزان ناخالصی‌ها، نفوذپذیری، تخلخل و درزه و شکستگی‌های طبیعی سنگ آهک است.

نفوذپذیری، توانایی و ظرفیت سنگ در انتقال سیال است که با ویسکوزیته سیال، فشار هیدرواستاتیکی و اندازه بازندها تغییر می‌کند. اگر فضاهای خالی بسیار کوچک باشند، سنگ ممکن است تخلخل بالا اما نفوذپذیری پایینی به دلیل سخت بودن مسیر عبور اسید از میان بازنده‌ها داشته باشد. سنگ‌های آهکی دارای درزه و شکست معمولاً نفوذپذیر هستند. نفوذپذیری زیاد تشکیلات کربناته به دلیل امکان نشت، ویژگی نامطلوبی برای احداث مغار ذخیره‌سازی به روش انحلال اسیدی است (Hamblin and Christiansen, 2007).

برای مثال، بسیاری از ساختارهای آهکی، نفوذپذیری بسیار زیادی دارند. نفوذپذیری زیاد این ساختارها ممکن است یک خاصیت نامطلوب برای ذخیره‌سازی سیال باشد، چرا که امکان نشت مواد ذخیره شده به خارج از مغار وجود دارد. با وجود نامطلوب بودن نفوذپذیری برای ذخیره‌سازی سیال، در بعضی موارد، مقداری نفوذپذیری ممکن است قابل قبول باشد. زیرا ممکن است اسید کمتری برای فرایند اسیدشویی سنگ کربناته لازم باشد (Hamblin and Christiansen, 2007).

تخلخل و نفوذپذیری یک سنگ، در سطح وسیعی، مقدار اسید (و در نتیجه نشت اسید) را تعیین می‌کنند.

وجود تخلخل مزیتی برای بالا بردن ظرفیت ذخیره‌سازی است. وجود حداقل مقدار کمی تخلخل می‌تواند در القای شکافت اولیه کمک کند. شکافت‌های اولیه با کاربرد فناوری شکافت مناسب ایجاد می‌شوند. شکافت‌های طبیعی در سنگ به دلیل احتمال ایجاد نشت مطلوب نیستند.

به‌طور کلی سه نوع فضای خالی در سنگ وجود دارد: ۱- فضاهای بین ذرات ۲- درزه و شکستگی‌ها ۳- حفره‌های محلول. تقریباً تمامی سنگ‌ها حاوی درزه و شکستگی‌هایی هستند که این

درزه و شکستگی‌ها بخش مهمی از فضاهای خالی را تشکیل می‌دهند. بعضی از سنگ‌های آهکی تخلخل بسیار زیادی دارند، به طوری که اسید می‌تواند در طول درزه‌ها و صفحات لایه‌بندی موجود در سنگ به راحتی حرکت کند و در نتیجه باعث گسترش درزه و شکستگی‌ها شود که این باعث تسهیل حرکت اسید و در نتیجه نشت آن خواهد شد. ساختارهای آهکی مناسب برای ساخت مغار با روش Hamblin and Christiansen, ۳۰ درصد داشته باشند (بررسی شده می‌توانند تخلخلی در حدود ۰,2007).

زمانی که اسید به خارج از محدوده مورد نظر نشد می‌کند، در صورتی که سنگ‌های احاطه کننده دارای درزه و شکستگی و نفوذپذیری زیادی باشند و نیز مقاومت پایینی در برابر اسید داشته باشند در نتیجه اسید بر آنها اثر کرده و آنها را می‌شوید. نتیجه این نشت اسید بر سنگ‌های اطراف ممکن است باعث نشست زمین در آن منطقه و یا بروز ناپایداری در مغار شود.

به طور کلی معیارهای انتخاب سنگ‌های کربناته مطلوب برای کاربرد روش انحلال اسیدی، نفوذپذیری پایین، حداقل مقدار کمی تخلخل و شکاف‌های طبیعی اندک هستند.

بنا به دلایلی که در بالا به آن اشاره شد (نفوذپذیری و تخلخل) اسید ممکن است به خارج از محدوده در نظر گرفته شده برای ساخت مغار نشد کند. اگر در ناحیه مورد نظر آب زیرزمینی وجود داشته باشد ممکن است اسید با آب زیرزمینی تماس پیدا کند. نشت اسید در آب‌های زیرزمینی باعث تغییر pH آب می‌شود و می‌تواند آن را تا زیر ۵ نیز کاهش دهد. سفره آب اسیدی شده ممکن است اثرات زیستمحیطی فراوانی داشته باشد، مثلاً اگر از این آب برای مصارف کشاورزی استفاده شود نشت اسید به این آب‌ها مشکلات عدیدهای را برای کشاورزان ایجاد می‌کند.

## ۲-۷-۳ گاز دی‌اکسیدکربن $\text{CO}_2$

واکنش اسید هیدروکلریک با سنگ‌های کربناته به خوبی شناخته شده است. واکنش سنگ آهک با این اسید مطابق فرمول (۳-۵) است:



بر پایه فرمول (۳-۵)، دو مول از اسید هیدروکلریک (HCl) با یک مول از سنگ آهک واکنش می‌دهد تا یک مول کلرید کلسیم ( $\text{CaCl}_2$ )، یک مول دی‌اسیدکربن ( $\text{CO}_2$ ) و یک مول آب تولید شود (Castle, et al., 2004b).

نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که برای هر کیلوگرم از سنگ آهک حل شده، ۷۲۸/۷ گرم اسید هیدروکلریک مصرف می‌شود،  $110.9 \text{ g CO}_2 / 439 \text{ g CaCl}_2$  و  $180 \text{ g water} / 10.9 \text{ g HCl}$ . در این آزمایش‌ها همچنانی توان حل کردن اسید هیدروکلریک بر اساس قدرت اسید و چگالی سنگ آهک نشان داده شده است. اگر چگالی سنگ آهک  $2710 \text{ kg/m}^3$  و غلظت اسید ۳۰ درصد باشد، توان حل کردن اسید  $175 \text{ g HCl} / 10 \text{ g CaCl}_2$  خواهد بود. بنابراین هر لیتر محلول اسید قادر به حل کردن  $17/5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  مکعب سنگ آهک است. باید توجه شود که حضور پسماندهای غیر قابل انحلالی مثل سیلیکا نیز بر فرایند انحلال تاثیر می‌گذارد (Castle, et al., 2004b).

توده عظیم  $\text{CO}_2$  که از واکنش (۳-۵) بدست می‌آید به عنوان یک سیال فوق بحرانی در زیر سطح زمین حضور دارد. بسته به فاز و ترکیب سیالات، چگالی‌های سیالات در طول فرایند اسیدشویی سنگ کربناته بسیار متغیر خواهد بود. در فشار  $20/8 \text{ MPa}$  (در حدود  $3000 \text{ psi}$ ) و دمای ۳۸ درجه سانتی‌گراد،  $\text{CO}_2$  فوق بحرانی چگالی معادل  $863 \text{ kg/m}^3$  دارد و می‌تواند در آب با غلظت ۶۰ تا ۷۰ کیلوگرم بر  $1000 \text{ kg}$  آهک حل شود. اسید هیدروکلریک تزریق شده، با غلظت ۳۰ درصد وزنی، چگالی معادل  $1149 \text{ kg/m}^3$  دارد و نمک محلول  $\text{CaCl}_2$  که از این واکنش نتیجه می‌شود چگالی معادل  $1360 \text{ kg/m}^3$  دارد (Castle, et al., 2004b).

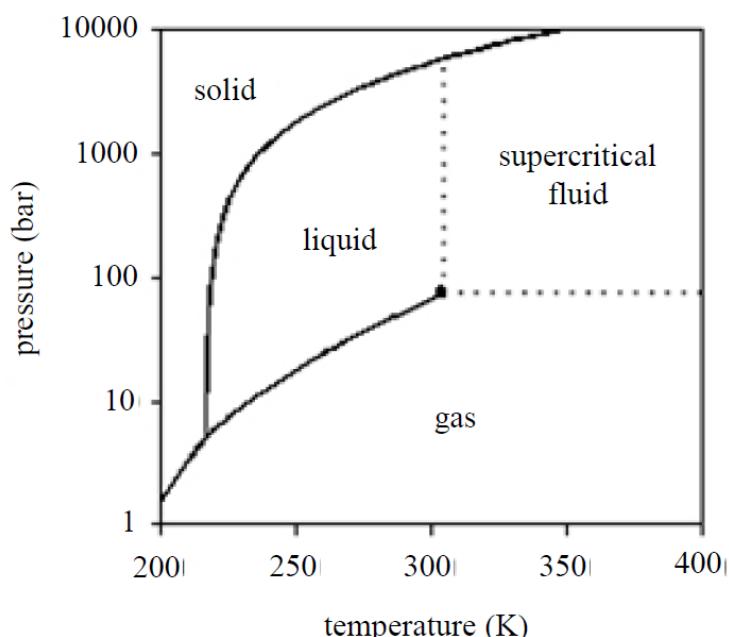
خصوصیات فیزیکی گاز دی‌اسیدکربن به دما و فشار آن بستگی دارد. اگر دما و فشار آن بیشتر از مقدار بحرانی باشد، این گاز به صورت یک سیال فوق بحرانی عمل می‌کند. سیال فوق بحرانی ماده‌ای است که هم خصوصیات گاز و هم خصوصیات مایع را دارد. خصوصیات مایع را دارد، زیرا چگالی آن بیشتر از گاز است و خصوصیات گاز را دارد، زیرا همچنان نسبت به مایع تراکم‌پذیرتر است. نقطه بحرانی گاز دی‌اسیدکربن  $31/1 \text{ درجه سانتی‌گراد} \text{ and } 7/3 \text{ MPa}$  (در حدود  $1063 \text{ psi}$ ) است (شکل ۳-۳).

۷). در این نقطه، چگالی و تراکم‌پذیری دی‌اکسیدکربن به ترتیب  $320 \text{ kg/m}^3$  و  $9/4 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$  است (Choi, 2011).

برای مثال اگر مغار در عمق بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین قرار گرفته باشد و فشار هیدرواستاتیکی  $9/8 \text{ MPa}$  باشد، با فرض گرادیان زمین‌گرمایی  $25^\circ\text{C/km}$  و دمای سطح  $12^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد، دما در این عمق  $37^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد خواهد بود. بنابراین  $\text{CO}_2$  در این عمق در حالت فوقبحارانی است. در این حالت چون دی‌اکسیدکربن فوقبحارانی، گاز کامل نیست، بنابراین چگالی آن طبق رابطه (۷-۳) محاسبه می‌شود.

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{p M_{\text{CO}_2}}{ZRT} = 621 \text{ kg/m}^3 \quad (7-3)$$

در رابطه (۷-۳)،  $M_{\text{CO}_2} = 44/1 \text{ g/mol}$ ,  $\text{CO}_2$  فشار جزئی  $P = 9/8 \text{ MPa}$ ,  $\text{CO}_2$  ژرمولکولی  $Z = 0/27$ ,  $\text{CO}_2$  ثابت جهانی گاز و  $R = 8/314 \text{ J/(mol.K)}$  در عمق ساخت مغار با فرض گرادیان زمین‌گرمایی  $25^\circ\text{C/km}$  و دمای  $T = 310 \text{ K}$  ( $37^\circ\text{C}$ ) سطح  $12^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد است (Choi, 2011).



شکل (۷-۳): نمودار حالت برای گاز  $\text{CO}_2$  (Choi, 2011)

### **H<sub>2</sub>S انتشار گاز سولفید هیدروژن**

سولفید هیدروژن گاز بسیار خطرناکی است که با مقادیر و غلظت‌های مختلفی در گاز طبیعی وجود دارد. این گاز به عنوان یک محصول جانبی در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی حاصل از فرایندهای صنعتی نیز تولید می‌شود (ربانی و یونسی، ۱۳۸۴).

سولفید هیدروژن (H<sub>2</sub>S) یک ترکیب غیرمطلوب در مخازن گازی است که نه تنها سهم اقتصادی هیدروکربن‌های بالارزش مخازن گازی را کم می‌کند بلکه دارای اثرات سمی است و باعث خوردگی تجهیزات بهره‌برداری مخازن می‌شود. بنابراین توانایی پیش‌بینی وجود سولفید هیدروژن در میادین حفاری نشده، کمک بسیار بزرگی به کاهش ریسک اکتشاف و تولید است (ربانی و یونسی، ۱۳۸۴). سولفید هیدروژن در مخازن گاز طبیعی، غلظت‌های متفاوتی دارد و از صفر تا ۹۸ درصد حجمی (حجم گاز طبیعی) متغیر است. معمولاً واژه "گاز ترش" برای بیان گازی که شامل بیش از ۱۰ درصد سولفیدهیدروژن باشد، استفاده می‌شود (ربانی و یونسی، ۱۳۸۴).

### **۴-۷-۳ سایر مخاطرات زیستمحیطی**

بسته به نوع عملیات معدن‌کاری، اثرات زیستمحیطی مختلفی بر جای گذاشته می‌شود. اثرات کلیدی‌ای که در هنگام استخراج مواد معدنی و همچنین پس از آن به طور معمول به وجود می‌آید، عبارت‌ست از: (۱) نشست زمین؛ (۲) مشکلات همراه با دور ریختن و مدیریت باطله‌ها و تفاله‌های معدنی

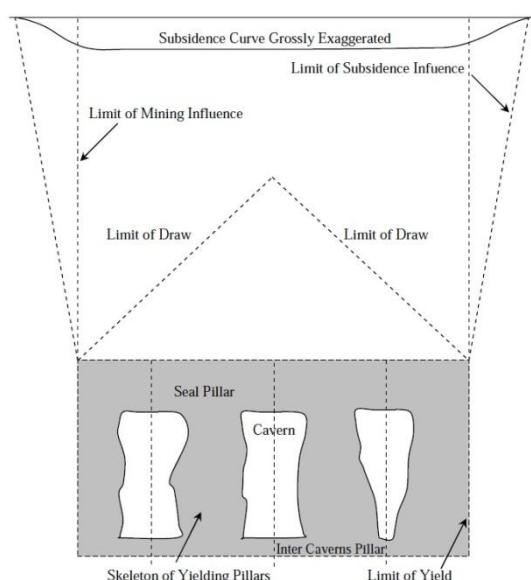
### **۳-۴-۱ نشست زمین**

نشست زمین پیامد مستقیم برداشت مواد معدنی زیرزمینی است و ممکن است به صورت کنترل شده یا کنترل نشده رخ دهد. پدیده نشست، می‌تواند موجب پایین رفتن سطح زمین شود یا از سوی دیگر، در صورتی که معدن نزدیک سطح زمین باشد، فرورفتگی گرد یا چاله‌ای تاجی‌شکل ایجاد کند (Vattanasak, 2006).

نشست در اثر معدن کاری انحلالی، به ویژه در مورد معدن کاری انحلالی کنترل نشده یکی از مشکلات پیچیده مکانیک سنگ است. با درنظر گرفتن گسترش نشست به عنوان تابعی از زمان، سه نوع نشست با توجه به روش معدن کاری انحلالی مورد بحث است (Vattanasak, 2006).

#### الف) نشست در اثر معدن کاری تک چاهی

Jeramic (1994)، نشان داد که نشست ناشی از روش معدن کاری انحلالی می‌تواند طراحی و کنترل شود. این نوع نشست مشابه نشست در معدن کاری اتاق و پایه است، زیرا مغار، مشابه اتاق‌های نامنظم است که توسط پایه‌ها نگهداری می‌شود. برای کنترل نشست، باید ضخامت پایه‌های آستانه<sup>۱</sup> (پایه‌های قرار گرفته در بالای مغار) و ضخامت مورد نیاز برای پایه‌های بین مغارها، به درستی طراحی شود. پایه‌ها به صورت یکنواخت تغییر شکل می‌دهند تا این‌که در بلوکی که مغارها قرار گرفته‌اند، نشست رخداد (شکل ۸-۳). تخریب مغار، در مواردی که مخزن در عمق کم قرار دارد موجب آسیب دیدن سطح زمین می‌شود و در این شرایط به دلیل تشکیل گودال‌های بزرگ، آسیب واردہ غیر قابل جبران است. با افزایش عمق (بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین)، صرف نظر از حالات فروپاشی مغار، تخریب در سطح زمین بسیار کم و یا غیرممکن است (Vattanasak, 2006).



شکل (۸-۳): مدل نشست ناشی از معدن کاری انحلالی به روش تک چاهی (Vattanasak, 2006)

<sup>۱</sup> - Sill pillar

### **ب) نشست ناشی از معدن کاری انحلالی با دو چاه**

در این روش به علت ایجاد گالری بین دو چاه، گالری یا مغار در معرض تمرکز تنفس بیشتری قرار می- گیرد. در این حالت مغار به وسیله سنگ‌هایی که مقاومت آنها به علت میزان رطوبت زیاد ناشی از فرایند انحلال، کاهش یافته، احاطه شده است (Vattanasak, 2006).

### **ج) نشست ناشی از معدن کاری انحلالی کنترل نشده**

مهم‌ترین نشست‌های ثبت شده ناشی از معدن کاری انحلالی، نشست‌های کنترل نشده، یا آنهایی که از Vattanasak, ابتدا به صورت کنترل نشده آغاز شده‌اند و یا به این روش تغییر یافته‌اند، بوده است (2006).

### **۲-۴-۷-۳ مشکلات همراه با دور ریختن باطله‌ها و تفاله‌های معدنی**

همواره یکی از مشکلات معدن کاری انحلالی، دور ریختن و یا مدیریت باطله‌ها و تفاله‌های معدنی بوده است (Vattanasak, 2006). در این روش معدن کاری نیز در اثر واکنش اسید با سنگ آهک مقداری نمک و گاز تولید می‌شود که مدیریت و کنترل این مقدار نمک و گاز از مشکلات معدن کاری انحلالی در سنگ آهک است. گاز تولید شده را با روش‌های مختلفی می‌توان مهار کرد که یکی از انواع این روش‌ها ذخیره‌سازی آن است. همچنین بازار تجاری برای  $\text{CaCl}_2$  حاصل از واکنش اسیدشوابی وجود دارد.

### **۸-۳ بررسی چگونگی کاهش اثرات مخرب زیست محیطی**

پیشرفت‌های شگرفی تاکنون در بخش صنعت و توسعه به مفهوم استفاده حداقلی از توان منابع طبیعی با اتكاء به فناوری‌های نوین و منابع ارزان قیمت انرژی انجام شده است. ولی پیامدهای این توسعه ناپایدار به صورت افزایش میزان انتشار انواع آلودگی‌ها در محیط زیست و تغییر اقلیم، کلیه ابعاد زندگی جوامع انسانی را تحت تاثیر قرار داده است. از این‌رو دست‌یابی به مفهوم توسعه پایدار در تلاقی سه حیطه انرژی، اقتصاد و محیط زیست، در گرو تغییر نحوه نگرش برنامه‌ریزان بخش انرژی کشور در حوزه محیط زیست خواهد بود. بنابراین با توجه به رشد فراینده در مصرف انرژی و فعالیت-های معدن کاری کشور و تبعات آن بر محیط زیست (ایجاد انواع آلودگی‌های آب، خاک، هوا، تاثیر بر

پدیده تغییر اقلیم و غیره) لازم است با انجام اقداماتی، آثار منفی وارد شده به محیط زیست ناشی از مصرف بی‌رویه انرژی و فعالیت‌های معدن‌کاری را کاهش داد.

### ۱-۸-۳ کنترل نشت گاز

به دلیل نفوذپذیری نسبتاً بالای سنگ آهک، لازم است فضاهای ایجاد شده در سنگ آهک را به کمک روش‌های خاصی آب‌بندی نمود به‌طوری که در صورت ذخیره‌سازی گاز طبیعی، مشکلات زیست-محیطی و اقتصادی مربوط به نشت سیال، آلودگی آب‌های زیرزمینی و غیره، رخ ندهد. روش‌های آب-بندی در سه مبحث کلی پرده آب‌بند، تزریق و مصالح ژئوسنتیک<sup>۱</sup> بررسی می‌شوند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

از روش پرده آب‌بند در مواردی که ماده ذخیره‌شده نفت، فراورده‌های نفتی یا گاز به حالت مایع باشد به منظور آب‌بندی استفاده می‌شود. در این روش، جریان دائمی آب با فشاری بیشتر از فشار ماده ذخیره‌شده پیرامون مغار ساخته شده ایجاد می‌شود. پایداری مغارها نیز با محاسبات ژئومکانیکی دقیق بررسی می‌شود. در این روش همچنین، سطح آب زیرزمینی باید از مجموع فشار بخار ماده ذخیره‌شده و ۲۰ متر هد آب برای رعایت ایمنی، بیشتر باشد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

در روش تزریق، ماده تزریق به خلل و فرج و درزه و شکاف یا حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی تزریق می‌شود. در اثر تزریق، نفوذپذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و تغییرشکل پذیری تشکیلات کم می‌شود. بسته به هدف از انجام تزریق و مشخصات سنگ و خاک مکان مورد نظر برای انجام تزریق، از مواد مختلفی برای تزریق استفاده می‌شود (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

روش دیگر برای آب‌بندی مغار به منظور کنترل نشت استفاده از مصالح ژئوسنتیک شامل ژئوتکستایل‌ها<sup>۲</sup>، ژئوممبراین‌ها<sup>۳</sup> و لایه‌های پلیمری است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

ژئوتکستایل پارچه‌ای از جنس پلی‌استر یا پلی‌پروپیلن است. مهم‌ترین خصوصیت ژئوتکستایل، مقاومت کششی بالا و همچنین سازگاری با انواع خاک و دوام بلندمدت آن در انواع خاک‌ها است. ژئوتکستایل-

<sup>1</sup> - Geosynthetic

<sup>2</sup> - Geotextile

<sup>3</sup> - Geomembrane

ها در زیرسازی و رو سازی جاده ها، زیرسازی خط آهن، سد سازی و خطوط انتقال نفت و گاز کاربرد دارند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

ژئوممبراین ورقه ای از جنس پلی اتیلن یا پی وی سی است. از ژئوممبراین ها برای عایق کاری انواع سطوح بدون نیاز به زیرسازی استفاده می شود. ژئوممبراین باعث افزایش مقاومت سطوح در برابر نفوذ انواع سیالات (مانند آب، مواد شیمیایی و نفتی) می شود. از مهم ترین کاربردهای ژئوممبراین ها، استفاده از آنها به عنوان عایق ثانویه برای مخازن ذخیره سازی نفت و گاز، مواد سوختی و شیمیایی جهت جلوگیری از نشت به داخل خاک و آلودگی محیط زیست است (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

لایه های پلیمری با نام SPC DRAIN به بازار عرضه می شود. کانال های موجود بین برآمدگی های لایه SPC DRAIN سبب سهولت جریان آب و انتقال آب از محیط خاک اطراف به داخل لایه و در نتیجه تسريع عمل زهکشی آب از محیط اطراف و نهایتا هدایت آن به کانال های زهکشی می شود. وجود لایه HPDE نیز مانع انتقال آب از محل زهکشی به محیط پشت آن می شود (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۰).

### ۲-۸-۳ کنترل نشت اسید

یکی از پارامترهای سنگ که به مقدار بسیار زیاد میزان نشت اسید در فرایند ساخت مغار ذخیره سازی گاز در تشکیلات کربناته را کنترل می کند، نفوذپذیری است. در صورتی که نفوذپذیری سنگ کربناته زیاد باشد، اسید به راحتی به خارج از محدوده مغار نشت می کند. برای ساخت مغار در سنگ کربناته با استفاده از روش معدن کاری انحلالی، ابتدا یک یا چند چاه داخل سنگ آهک حفر می شود. این چاه ها ارزیابی از میزان تخلخل، نفوذپذیری و میزان درزه و شکستگی های سنگ آهک ارایه می کنند. بنابراین می توان از میزان نشت اسید و در نتیجه آلودگی آب های زیرزمینی تا حدودی آگاه شد.

ممکن است در تشکیلات کربناته، ترکیبات غیر قابل انحلال در محلول اسید مورد استفاده وجود داشته باشد. در صورت وجود این گونه ناخالصی ها، ساخت مغار با هندسه مورد نظر مشکل

خواهد بود. از سوی دیگر، این ناخالصی‌ها مانعی در برابر نشت اسید هستند. بنابراین، این گونه ناخالصی‌ها از نشت اسید به خارج از محدوده معار جلوگیری می‌کنند. به منظور دست یافتن اطلاعاتی پیرامون ترکیب شیمیایی تشکیلات کربناته، می‌توان نمونه‌هایی از سنگ کربناته را از طریق کرگیری تهیه نمود. به منظور تعیین مقدار محصولات غیرقابل انحلال در محلول اسید هیدروکلریک، می‌توان قسمت‌هایی از نمونه‌ها را در معرض محلول اسید هیدروکلریک (با غلضت ۳۵ درصد وزنی) قرار داد. در نتیجه، زمان تقریبی برای انحلال هر نمونه سنگی بدست می‌آید. در صورتی که مواد انحلال نیافته در اسید هیدروکلریک پس از قرار گرفتن در آب مقطار، به مدت ۲۴ ساعت در معرض دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند و سپس نمونه‌ها دوباره وزن شوند، درصد سنگ کربناته (قابل انحلال در محلول اسید هیدروکلریک)، ناخالصی‌های غیرقابل انحلال در محلول اسیدی مورد استفاده و نمک‌های حاصله (قابل انحلال در آب مقطار و محلول اسید هیدروکلریک) در نمونه‌های سنگی از طریق اختلاف وزن قبل و بعد از آزمایش تعیین خواهد شد.

### ۳-۸-۳ ذخیره‌سازی دی‌اسیدکربن

جداسازی و ذخیره‌سازی دی‌اسیدکربن تنها راه برای کاهش این گاز گلخانه‌ای است. این روش راهی کم‌هزینه و ایمن برای کاستن دی‌اسیدکربن در مقیاس بزرگ است. مکانیسم اصلی ذخیره‌سازی بدین صورت است که فضای خالی بین شکستگی‌ها در زیر زمین حاوی ذرات و کانی‌هایی است که بین آن‌ها پر از سیال (بیشتر آب، نفت و گاز) است. از این‌رو تزریق دی‌اسیدکربن به داخل این فضاهای سبب حل شدن آن در این سیالات، مخلوط شدن با این سیالات و یا واکنش با ذرات کانی‌ها به صورت بر جا می‌شود (Rubin, 2006). نکته قابل توجه در تزریق دی‌اسیدکربن به اعمق زمین این است که با افزایش عمق تزریق، چگالی دی‌اسیدکربن افزایش می‌یابد و به یک سیال فوق بحرانی برای اعماق زیر ۰/۸ کیلومتر تبدیل می‌شود. سیالات فوق بحرانی فضای کمتری نسبت به گازها اشغال می‌کنند (Thomson, 2009).

به طور کلی سه روش عمده برای ذخیره‌سازی دی‌اسیدکربن وجود دارد که عبارتند از:

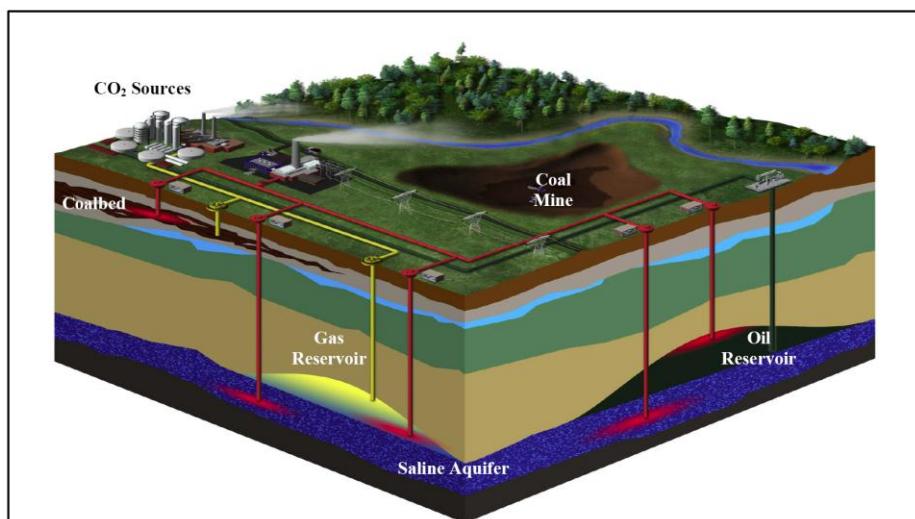
۱- ذخیره‌سازی در ساختارهای زمین‌شناسی

۲- ذخیره‌سازی در اقیانوس

۳- ذخیره‌سازی سطحی در زیست توده‌ها یا کانی‌های کربناته (Lund, 2009)

### ۳-۸-۱-۱ ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در ساختارهای زمین‌شناسی

تجربیات حاصل شده از تحقیقات دانشمندان در مورد ذخیره‌سازی زیرزمینی بیان‌گر آن است که ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در زیر زمین، بهترین روش با درنظر گرفتن هزینه‌ها و مسایل زیست-محیطی است. بیشتر مقادیر دی‌اکسیدکربن ذخیره‌شده در ساختارهای زمین‌شناسی تا ۱۰۰۰ سال قابل حفظ شدن هستند. سازندهای شور بیشترین پتانسیل ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن را دارند (Lund, 2009). قابلیت دسترسی بالا، ظرفیت مناسب، تزریق‌پذیری و امنیت ذخیره در آن از اصلی‌ترین خصوصیات یک منبع ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن است. در شکل (۹-۵) روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن در ساختارهای زمین‌شناسی نشان داده شده است.



شکل (۹-۵): روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی دی‌اکسیدکربن (Lund, 2009)

### ۳-۸-۲-۲ ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در اقیانوس

دو روش کلی برای ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن در اقیانوس وجود دارد که عبارتند از: تزریق در کف دریا و تزریق به صورت ستون آب (Lund, 2009).

### **الف- تزریق در کف دریا**

برای اعمق بیشتر از ۳۰۰۰ متر از سطح زمین، دیاکسیدکربن مایع، چگال‌تر از آب در برگیرنده آن است و در کف دریا تهنشین می‌شود و تشکیل دریاچه‌ای از دیاکسیدکربن را می‌دهد. در این حالت دیاکسیدکربن به آرامی در آب دریا حل می‌شود. عمر این دریاچه‌ها ممکن است هزاران سال باشد (Lund, 2009).

### **ب- تزریق ستون آب**

ذخیره‌سازی دیاکسیدکربن در اعمق کمتر از ۲۵۰۰ متر در داخل دریا، به دلیل کمتر بودن چگالی آن از آب در برگیرنده، سبب می‌شود که دیاکسیدکربن به سمت بالا حرکت کند. همان‌طور که دیاکسیدکربن به سمت بالا حرکت می‌کند، در آب دریا حل می‌شود. یک روش برای به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی منطقه‌ی تزریق دیاکسیدکربن به داخل آب دریا، این است که دیاکسیدکربن مایع از داخل یک کشتی متحرک توسط خطوط لوله تزریق شود. این چنین سیستمی می‌تواند باعث توزیع کم دیاکسیدکربن در بخشی از آب دریا شود (Lund, 2009).

### **۳-۸-۳-۳ ذخیره‌سازی سطحی در زیست‌توده‌ها یا کانی‌های کربناته**

تبدیل گاز دیاکسیدکربن به کانی‌های کربناته به صورت مرسوم، شامل در تماس قرار دادن آن با اکسیدهای فلزی (اکسید منیزیم و اکسید کلسیم) است. واکنش‌های شیمیایی بین دیاکسیدکربن و سنگ در برگیرنده آن سبب تولید کربنات منیزیم و کربنات کلسیم می‌شود که با نام سنگ آهک شناخته شده است. این ترکیبات کربناته تا زمان‌های طولانی پایدار باقی می‌مانند، بنابراین می‌توان از این ترکیبات در معادن سیلیکاته مدفون و یا در ساختمان سازی استفاده نمود. بعد از تبدیل شدن به سنگ کربناته، دیاکسیدکربن قادر به رها شدن در هوا نیست. فرایند کانی‌های کربناته مستلزم عملیات استخراج، سنگ‌شکنی و آسیا کردن سنگ‌های کربناته و حمل و انتقال آن‌ها به کارخانه فرآوری جداسازی برای در تماس قرار گرفتن با بخار دیاکسیدکربن است. تبدیل شدن به کانی‌های

کربناته نیاز به  $1/6$  تا  $3/7$  تن سنگهای سلیکاته برای واکنش با یک تن دی اکسید کربن دارد تا از این فرایند  $2/6$  تا  $4/7$  تن مواد حاوی دی اکسید کربن تولید شود که در آن دی اکسید کربن به صورت کربنات جامد است (Bakker, et al, 2008).

#### ۴-۸-۳ کاهش سولفید هیدروژن

سولفید هیدروژن گاز بسیار خطرناکی است که با مقادیر و غلظت‌های مختلفی در گاز طبیعی وجود دارد و به عنوان یک محصول جانبی در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی حاصل از فرایندهای صنعتی، تولید می‌شود. روش‌های مختلفی برای حذف و جدا کردن این گاز از مخلوط گازها وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به استفاده از محلول‌های آلکانول‌آمین یا مواد قلیایی قوی اشاره نمود، ولی در هر دو این فرایندها گاز سولفید هیدروژن عملاً حذف نشده، بلکه تنها از محیط مورد نظر خارج می‌شود. در مورد محلول‌های آمین، سولفید هیدروژن جدا شده باید یا سوزانده شود و یا در واحدهای شیمیایی لازم است و نهایتاً دفع این محلول‌ها، معضلات زیستمحیطی را به همراه دارد (ربانی و یونسی، ۱۳۸۴).

سولفیران فرایندی است که با استفاده از کاتالیست محلول کیلات آهن ( $\text{Fe}^{+3}$ ), سولفید هیدروژن را از جریان گازی حذف و به گوگرد عنصری تبدیل می‌کند. به این نوع فرایندها در صنعت پالایش گاز، فرایندهای Liquid Redox اطلاق می‌شود. این فناوری، با این ماهیت در ایران و در پژوهشگاه صنعت نفت ابداع شده است. با استفاده از این فناوری می‌توان بسیاری از گازهای ترش را با توجه به جنبه‌های اقتصادی تصفیه کرد. سولفیران می‌تواند سولفید هیدروژن را بصورت صد درصد از گاز حذف نماید (ربانی و یونسی، ۱۳۸۴).

محلول مورد استفاده در فرایند سولفیران از نوع مایعات ردوكس<sup>۱</sup> است، یعنی مایعاتی که قابلیت اکسید و احیاء شدن را دارند. یک خانواده از مایعات ردوكس و از بهترین و مهم‌ترین آنها کیلات‌های

<sup>۱</sup> - Liquid Redox

آهن هستند که در فرایند سولفیران انتخاب و استفاده می‌شوند. این محلول قلیائی است و آهن در این محلول به صورت هموژن و پایدار حضور دارد و رسوب نمی‌کند. همچنین، محلول فرایند سولفیران یک کاتالیزور هموژن از نوع هموژن آبی است. کاتالیست واکنش، اکسید شدن هیدروژن‌سولفید توسط اکسیژن را بسیار سریع می‌کند، آنچنان که می‌توان گفت سرعت این اکسید شدن آنی است. این محلول مصرف نمی‌شود بلکه مرتب‌احياء و اکسید می‌شود (فرصت و همکاران، ۱۳۸۹).

در این فرایند، یک محلول کیلات آهن به عنوان جاذب کاتالیستی استفاده می‌شود. این محلول که حاوی یون‌های آهن بصورت فریک و فرو است، نقش اصلی را در تصفیه گاز به عهده دارد. در بخش جذب، ابتدا یون‌های فریک با هیدروژن‌سولفید تماس پیدا کرده و واکنش اکسید و احياء انجام می‌شود (فرمول ۶-۳). به این صورت که هیدروژن‌سولفید اکسید شده و به گوگرد عنصری تبدیل می‌شود و یون‌های فریک به فرو احياء می‌شوند. محلولی که حاوی یون‌های فرو و گوگرد عنصری است در ادامه وارد یک تانک احياء می‌شود. در این تانک با تزریق هوا به درون محلول، یون‌های فرو دوباره به حالت فریک تبدیل می‌شوند و به این صورت محلول بازیابی و احياء می‌شود (فرمول ۷-۳). بخشی از محلول حاوی گوگرد جهت جدا شدن گوگرد از محلول به سیستم جداسازی گوگرد هدایت می‌شود (فرصت و همکاران، ۱۳۸۹).



## فصل چارم:

برآوردها ایام مغار

#### ۴-۱ شکل هندسی مقطع مغارهای ذخیره‌سازی

انتخاب شکل و ابعاد یک سازه‌ی زیرزمینی به عوامل متعددی مانند کاربری، شرایط زمین‌شناسی ساختگاه، مقدار و جهت میدان تنش بر جا و روش حفاری بستگی دارد. پایداری مغار بستگی زیادی به هندسه آن دارد. مغارهایی که برای ذخیره‌سازی گاز در نمک استفاده می‌شوند، تنوع زیادی در هندسه دارند. هندسه معمول این مغارها، استوانه‌ای با ارتفاعی بزرگتر از قطر آن است، هرچند که مغارهایی با ارتفاعی برابر یا کوچکتر از قطر آن نیز وجود دارد. در تحقیقاتی که پیش از این درباره امکان ذخیره‌سازی گاز در امیننس<sup>۱</sup> و می‌سی‌سی‌پی<sup>۲</sup> انجام شده، نشان داده شده است که مغارهای کروی پایداری زیادی دارند ولی مغارهای کروی به دلیل سطح مخصوص زیاد حجم اسید زیادی را نیاز دارد. بعضی از مغارهای ذخیره‌سازی در فرانسه به صورت استوانه‌هایی هستند که محور طولی آنها افقی است. در صورتی که برای ساخت مغار از دو چاه که به صورت افقی در عمق زمین به هم متصل شده‌اند استفاده شود، شکل مغار مشابه تونل (استوانه خوابیده) است (Foley, 2006).

اندازه و شکل مغار می‌تواند باعث تمرکز تنش پیرامون آن شود که این تمرکز تنش ممکن است از مقاومت سنگ تجاوز کرده و در نتیجه باعث شکست سنگ شود. بنابراین تنش مماسی در محیط مغار افزایش می‌یابد. با دور شدن از دیواره مغار (به فاصله تقریباً ۳ برابر شعاع مغار) تنش مماسی کاهش پیدا می‌کند و برابر با حالت اولیه (قبل از حفر) می‌شود. راه حل‌های تحلیلی برای توزیع تنش پیرامون فضاهای بیضوی‌شکل، بادامی‌شکل، مربعی و مستطیلی مانند وجود دارد (Obert and Duvall, 1967; Johnson, 1970; Hoek and Brown, 1980; Lekhnitskii, 1981; Cristescu and Paraschiv, 1995; Gercek, 1997). هر چند که این راه حل‌ها برای تخمین‌های ابتدایی مهم و مفید هستند، اما راه حل‌های عددی با توجه به شکل و خصوصیات محیط داخل فضا انعطاف‌پذیرتر هستند (Roth, et al., 2001).

<sup>1</sup> - Eminence

<sup>2</sup> - Mississippi

در این تحقیق به بررسی پایداری چهار نوع مغار با سطح مقطع متفاوت پرداخته شده است. این مدل‌ها شامل، دو مغار استوانه‌ای قائم با ابعاد متفاوت، استوانه‌ای قائم با دو نیم‌کره در دو انتهای آن و استوانه‌ای افقی با محور افقی (خوابیده) با ۲ نیم‌کره در دو انتهای آن است. سطح مقطع دایره‌ای (و در شرایط سه‌بعدی، مقطع کروی)، سبب توزیع مناسب‌تر نیروهای فشاری و گشتاورهای خمشی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود.

#### ۴-۲ عمق

عمق درنظر گرفته شده در این تحقیق برای مدل‌سازی مغار، ۱۳۰۰ متری سطح زمین در نظر گرفته شده و ۴ نوع مغار ذکر شده با هندسه مشخص، برای ذخیره‌سازی ۱۴ میلیون متر مکعب گاز در این عمق مدل‌سازی شده است، ولی برای بررسی تاثیر تغییرات در تنش که در عمق‌های متفاوت اتفاق می‌افتد، پایداری مغار در عمق‌های بیشتر از این مقدار (در بازه ۱۳۰۰ تا ۲۷۰۰ متر) نیز بررسی شده است (در فصل هفتم و در قسمت ۳-۷، توضیح داده شده است). اگر چه در عمق‌های دیگر، حجم گازی را که می‌توان در مغارها ذخیره کرد متفاوت است، اما اندازه مغار ثابت در نظر گرفته شده و تنش بر جا به دلیل تغییر عمق، تنها پارامتری است که در مدل‌سازی تغییر کرده است.

#### ۴-۳ تعیین حجم مغار

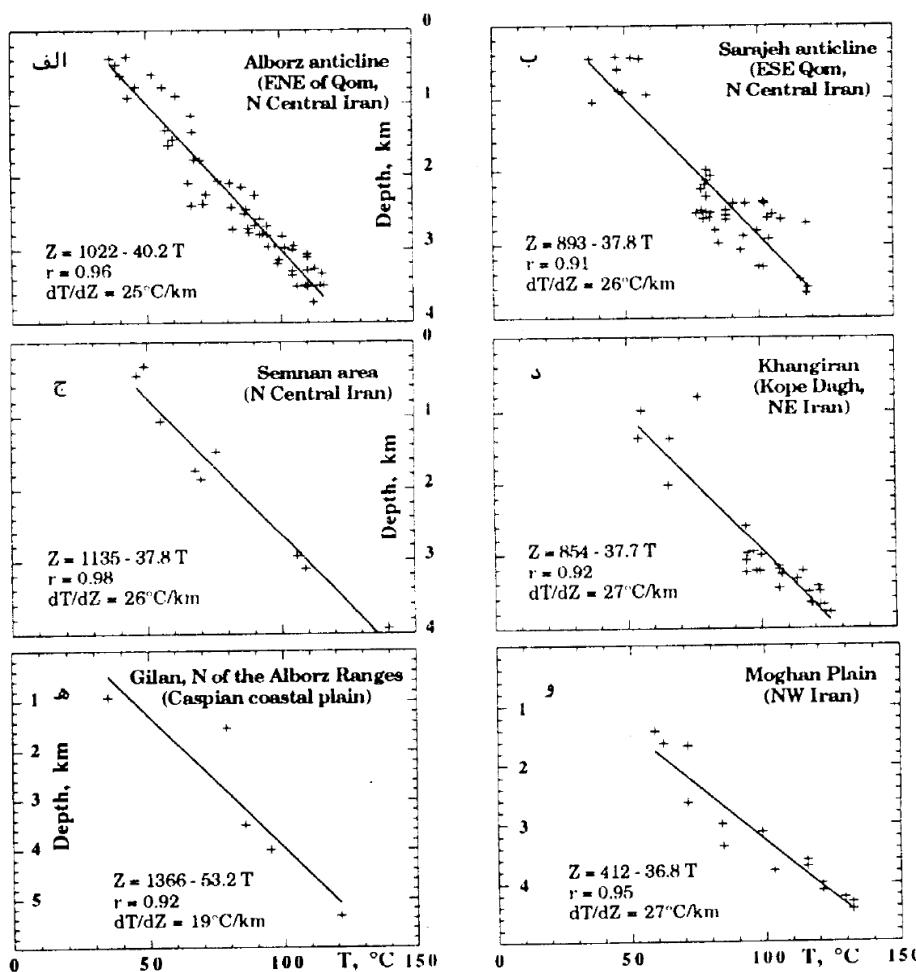
برای تعیین حجم مغار باید عواملی مانند حجم گاز مورد نیاز برای ذخیره‌سازی، عمق مغار ذخیره‌سازی، فشار وارد بر سقف مغار ناشی از وزن پوشان سنگ و دمای زمین در عمق مورد نظر، بررسی شوند. تعیین مشخصات فیزیکی گاز طبیعی ذخیره شده در مخزن ذخیره‌سازی و نیز هزینه تولید این مخزن به روش انحلال اسیدی، عواملی بحرانی در فرایند ساخت مغار هستند. پارامترهای کلیدی مورد نیاز برای تعیین ویژگی‌های گاز در عمق، فشار و دما هستند. برای تمام محاسبات بیان شده در این تحقیق، ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن ۵٪ میلیارد فوت مکعب (BCF) (حدود ۱۴ میلیون متر مکعب) گاز در شرایط اتمسفر (STP)، فشار و دمای استاندارد در نظر گرفته شده است. عمق‌های بررسی شده برای تعیین بازه تغییرات حجم مغار، در بازه ۱۳۰۰ متر تا ۲۷۰۰ متر از سطح زمین قرار دارند. در

تخمین فشار و دمای مخزن از گرادیان ژئوفیزیکی استفاده شده است که به طور منطقی انتظار می‌رود دقیق باشند زیرا به دلیل فعالیت تکتونیکی کم نواحی مورد نظر، تنش تکتونیکی پایین است. گرادیان فشار  $9/81 \text{ kPas/m}$  برای تعیین فشار هیدرواستاتیک بکار برده شده است. همچنین، وزن مخصوص پوشان سنگ در این تحقیق  $2600 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است (Castle, et al., 2004a). برای شرایط ذخیره‌سازی مورد نظر در این تحقیق، فرض شده است که مغارهای ذخیره‌سازی بتوانند با مقادیر بیشتر از فشار هیدرواستاتیک در عمق و کمتر از فشار مورد نیاز برای شکست سنگ، تحت فشار قرار گیرند. همان‌طور که در شکل (۱-۴) نشان داده شده، گرادیان زمین‌گرمایی ناحیه‌ای در شمال و مرکز ایران تا حدودی یکنواخت و نزدیک  $25^\circ\text{C/km}$  و یا اندکی بیشتر است. بنابراین گرادیان زمین‌گرمایی  $25$  درجه سانتی‌گراد در هر کیلومتر برای پیش‌بینی دمای مخزن استفاده شده است. گرادیان‌های زمین‌گرمایی مشابهی (اغلب خطی) در قسمت‌های مختلف ایران موجود است (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۷۷). با کاربرد این گرادیان‌های زمین‌گرمایی، می‌توان شرایط مخزن را تعیین و در نتیجه رفتار فیزیکی گاز طبیعی مخزن را پیش‌بینی و حجم مورد نیاز مغار را محاسبه نمود.

گاز طبیعی ترکیبی با قابلیت فشرده‌سازی زیاد است و وزن حجمی آن به طور قابل توجهی با دما و فشار تغییر می‌کند. مطلوب است از داده‌های تجربی که از طریق قانون گاز کامل یا معادلات پیچیده-تر حالت بدست آمده است برای تعیین وزن حجمی گاز طبیعی استفاده کرد. اطلاعات تجربی برای وزن حجمی گاز در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. ترکیب گاز طبیعی بکار برده شده برای تمام محاسبات شامل  $90$  درصد متان و  $10$  درصد اتان است که این منجر به وزن مولکولی متوسط گاز برابر با  $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3 17/3 \text{ g/mol}}$  شده است. وزن حجمی گاز طبیعی در این پژوهش،  $0/781 \text{ Kg/m}^3$  در شرایط استاندارد در نظر گرفته شده است. دمای سطح نیز در این تحقیق  $12$  درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۲-۴) و معادله (۱-۴) و با استفاده از گرادیان زمین‌گرمایی  $\frac{^\circ\text{C}}{\text{Km}}$  و  $25$  همچنین گرادیان تغییر فشار  $\frac{\text{KPa}}{\text{m}}$   $12/4$ ، حجم مغار برای ذخیره‌سازی  $7$  تا  $28$  میلیون متر مکعب گاز طبیعی در تشکیلات کربناته بدست خواهد آمد (شکل ۳-۴) (Castle, et al., 2004a).

$$\frac{V(STP, m^3)}{\rho(STP, kg/m^3)} = \frac{V(storageT and P, m^3)}{\rho(storageT and P, kg/m^3)} \quad (1-4)$$

به طور مثال اگر در رابطه (1-4)، وزن حجمی در حالت استاندارد را معادل  $\frac{Kg}{m^3}$  و وزن حجمی گاز داخل استاندارد را معادل  $\frac{Kg}{m^3}$  در عمق ۱۸۳۰ متری زمین معادل  $\frac{Kg}{m^3}$  قرار دهیم، حجمی حدود ۶۲۰۰۰ متر مکعب برای مخزن ذخیره‌سازی بدست خواهد آمد.

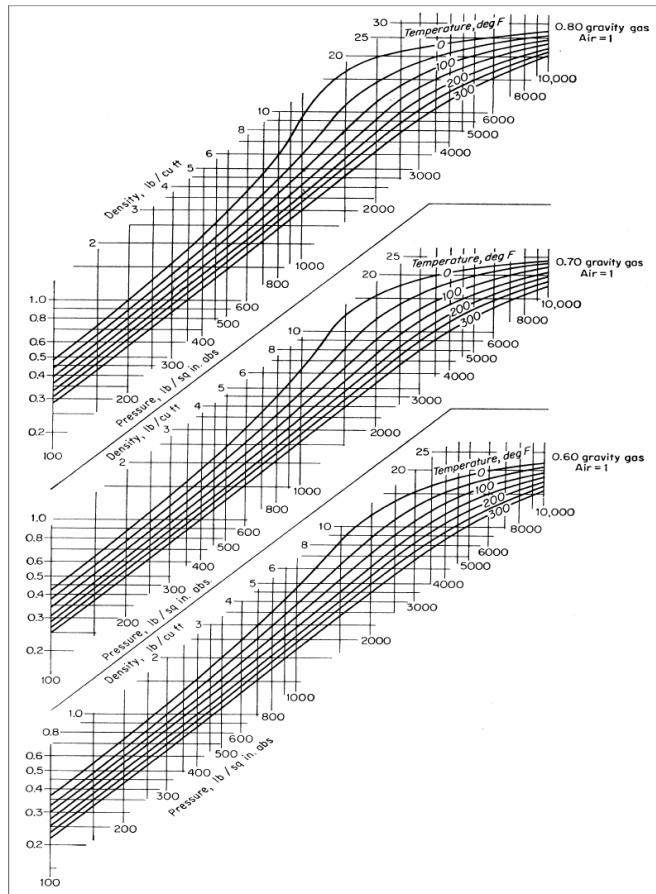


شکل (1-۴): نمودارهای دما-عمق برای ۶ ناحیه از ایران واقع در بیرون پهنه زاگرس- خلیج فارس، بر اساس دمای ته چاههای نفت (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۷۷). اطلاعات مندرج در داخل هر نمودار به ترتیب عبارت است از: معادله خط راست برآورده به داده‌ها به روش کمترین مربعات، ضریب همبستگی و گرادیان زمین‌گرمایی (عکس شیب خط).

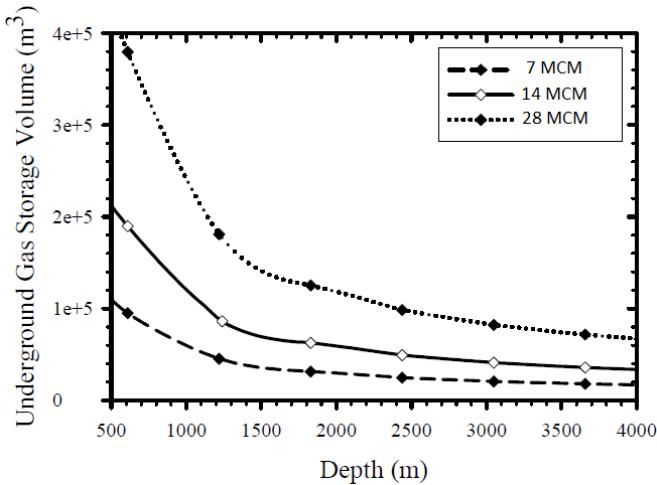
همانطور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده، قابلیت فشردهسازی زیاد گاز طبیعی مزیتی برای احداث مغار ذخیرهسازی گاز طبیعی در اعمق بیشتر از ۱۲۲۰ متری (۴۰۰۰ فوت) و کمتر از ۱۸۳۰ متری (۶۰۰۰ فوت) سطح زمین است. در عمق‌هایی کمتر از ۱۲۲۰ متری سطح زمین، افزایش وزن حجمی گاز طبیعی با عمق به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. علیرغم مزیت افزایش وزن حجمی گاز در اعماق بیشتر از ۱۸۳۰ متری سطح زمین، هزینه‌های بالای عملیاتی و حفاری نیز وجود دارد که در طرف مقابل این مزايا است (Castle, et al., 2004b).

با توجه به شکل (۳-۴)، عمق قرارگیری مغارها و حجم گاز ۱۴ میلیون متر مکعب، حجمی در حدود ۷۷۰۰۰ متر مکعب برای مغارهای مورد نظر در این تحقیق، در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل (۱-۴) مشاهده می‌شود ضریب همبستگی از ۹۱/۰ تا ۹۸/۰ تغییر کرده و این بیان‌گر کیفیت مطلوب داده‌ها است.



شکل (۲-۴): وزن حجمی گازهای طبیعی (Castle, et al., 2004b)



شکل (۴-۳): تغییرات حجم مخزن نیاز برای ذخیره‌سازی ۷ تا ۲۸ میلیون متر مکعب گاز طبیعی نسبت به عمق (Castle, et al., 2004b).

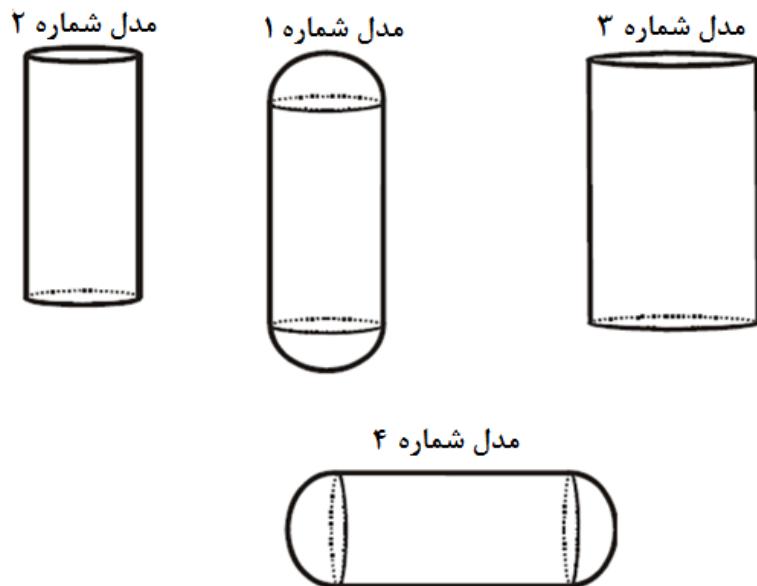
#### ۴-۴ هندسه مغار

در این تحقیق چهار مغار با هندسه متفاوت و با حجم‌های تقریباً یکسان برای بررسی تاثیر هندسه بر روی پایداری مغار مدل‌سازی شده است (جدول ۴-۱). این مغارها برای ذخیره‌سازی ۱۴ میلیون متر مکعب گاز در عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین در نظر گرفته شده‌اند. مغار اصلی مد نظر در این تحقیق برای مدل‌سازی به صورت یک استوانه قائم با ارتفاع ۵۱ متر و شعاع ۱۸ متر (نسبت ارتفاع به قطر ۱/۴۲) و دو نیم کره در دو سطح مقطع آن با شعاع ۱۸ متر است (شکل ۴-۴). مغار دوم به صورت یک استوانه قائم با ارتفاع ۵۱ متر و شعاع ۱۸ متر (نسبت ارتفاع به قطر ۱/۴۲) در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۴). مغار سوم به صورت یک استوانه قائم با ارتفاع ۶۲ متر و شعاع ۲۰ متر (نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵۵) (شکل ۴-۴) و مغار چهارم به صورت یک استوانه خوابیده (با محور افقی) با طول ۵۱ متر (بخش استوانه‌ای) و شعاع ۱۸ متر (نسبت طول به قطر ۱/۴۲) و دو نیم کره با شعاع ۱۸ متر در دو سطح مقطع آن منظور شده است (شکل ۴-۴).

تمامی مغارهای ذکر شده در عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین و در تشکیلات آهکی با شرایط مشخص و در یک نسبت تنش افقی به قائم (K) معادل  $0.8$ ، مدل‌سازی شده‌اند که نتایج حاصل از این مدل‌سازی‌ها در فصل ۶ آورده شده است.

جدول (۴-۱): شکل هندسی و ابعاد مغارهای مدل شده

مدل	شکل مغار	عرض (m)	ارتفاع (m)	طول (m)	بیشترین حجم ( $m^3$ )
۱	استوانه‌ای با گنبدهای انتهایی	۳۶	۵۱	۳۶	۷۶۳۵۲
۲	استوانه‌ای با سقف و کف تخت	۳۶	۵۱	۳۶	۵۱۸۸۵
۳	استوانه‌ای با سقف و کف تخت	۴۰	۶۲	۴۰	۷۷۸۷۲
۴	استوانه‌ای خوابیده با گنبدهای انتهایی	۳۶	۳۶	۸۷	۷۶۳۵۲



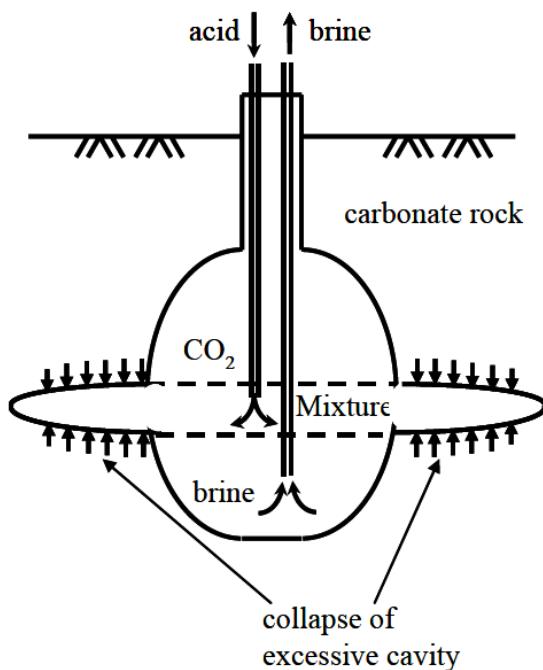
شکل (۴-۴): شکل هندسی مغارهای مدل شده (شکل‌ها بدون مقیاس ترسیم شده است).

#### ۴-۵ کنترل شکل مغار

موقعیت نقطه‌ی تزریق اسید در لوله تزریق اسید در فرایند کنترل شکل مغار بسیار مهم است. برای مثال اگر اسید، تنها در یک عمق ثابت تزریق شود، یک حفره بسیار بزرگ شکل خواهد گرفت (شکل

۴-۵)، از آن جا که این چنین حفره بزرگی به طور کلی پایدار نیست، ممکن است ریزش کند و در نتیجه پایداری کل مغار را به خطر اندازد. بنابراین، عمق تزریق اسید باید به طور مداوم تغییر کند تا شکل مغار لازم را تشکیل دهد (شکل ۴-۵) (Choi, 2011).

برای کنترل کردن عمق نقطه تزریق و نرخ احلال و در نتیجه دستیابی به شکل مناسب مغار، لازم است از مکان اتصال و برخورد سطح مخلوط (مخلوط گاز دیاکسیدکربن، اسید و محلول نمک) با محلول نمک (محصولات نمک تشکیل شده) حاصله اطلاع حاصل شود. بیشترین شسته شدن سنگ کربناته ممکن است در منطقه مخلوط و نواحی مجاور اتفاق بیافتد زیرا تمرکز اسید در این مناطق زیاد است (Choi, 2011).



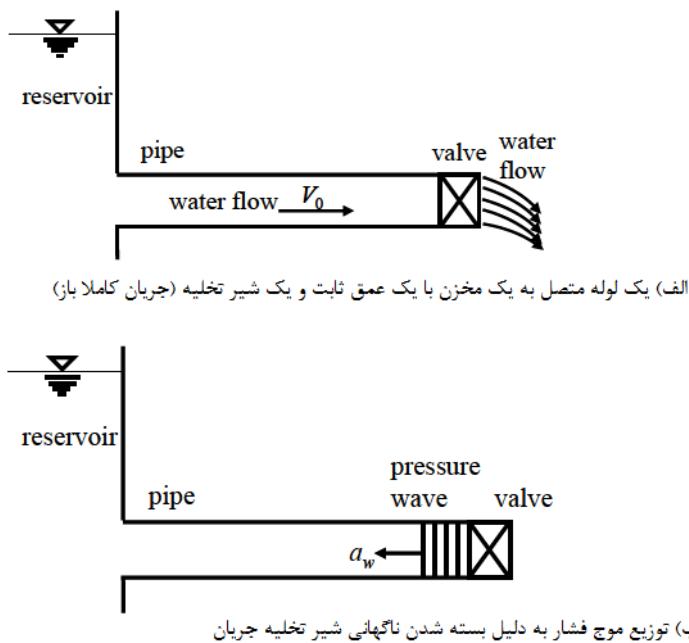
شکل (۴-۵): شکل هندسی و چگونگی ناپایداری یک مغار (Choi, 2011)

جريان ناپایدار<sup>۱</sup> به شرایط جريانی که با زمان تغییر می‌کند، اشاره دارد. اين پدیده می‌تواند با اثر ضربه قوچ آب نشان داده شود. برای تشریح این پدیده، لوله‌ای متصل به یک مخزن با عمق ثابت در شکل ۶-۴-الف) نشان داده شده است. در ابتدا، شیر جريان انتهای لوله باز است، در نتیجه سیال با سرعت

<sup>۱</sup> - Transient Fluid

$V_0$  جریان دارد (شکل ۴-۶-الف). وقتی که دریچه بسته می‌شود یک موج فشار به وجود می‌آید که این موج با سرعت  $a_w$  به سمت مخزن حرکت می‌کند (شکل ۴-۶-ب). جریان ناپایدار می‌تواند برای تعیین خصوصیات هیدرولیک شکستگی‌ها استفاده شود. با تولید یک موج و اندازه‌گیری طول موج و دیگر خصوصیات موج انکسار و انعکاس یافته، ثابت انعکاس بدست می‌آید. این ثابت به صورت اندیس هیدرولیک شکستگی و اندیس هیدرولیک چاه بیان می‌شود. اندیس هیدرولیک شکستگی‌ها تابعی از هندسه شکستگی‌ها است. بنابراین با اطلاع از ثابت انعکاس، اطلاعاتی درباره هندسه هیدرولیک شکستگی‌ها بدست خواهد آمد. به این روش، روش آزمایش امپدانس هیدرولیک<sup>۱</sup> (HIT) گفته می‌شود

.(Choi, 2011)



شکل (۴-۶): اثر ضربه قوچ آب (Choi, 2011)

در حین فرایند تزریق اسید به داخل چاه برای ساخت مغارهای ذخیره‌سازی گاز، سه سیال مختلف در چاه و مغار وجود دارد. همچنین هندسه چنین مغارهایی با هندسه هیدرولیک شکستگی‌ها در چاه‌ها به دلیل اختلاف در توزیع موج فشار متفاوت است. بنابراین نمی‌توان از HIT به صورت مستقیم در این روش استفاده نمود. بنابراین از قوانین مربوط به توزیع موج فشار در حین فرایند تزریق اسید، استفاده

<sup>۱</sup> - Hydraulic Impedance Testing Method

می‌شود. توزیع موج فشار از طریق بدست آوردن و حل کردن معادلات حاکم برای جریان ناپایدار در سیستم لوله-غار، تعیین می‌شود. برای رسیدن به این منظور، با تغییر در نرخ تزریق اسید یک آشفتگی در جریان اسید ایجاد می‌شود. موج فشار ایجاد شده در سرتاسر اسید انتشار می‌یابد. اگر موج ایجاد شده به سبب آشفتگی به سطحی مانند سطح مخلوط برخورد کند، انعکاس موج در سطح اتصال رخ می‌دهد.

با استفاده از تحلیل خصوصیات امواج انتقال (در سر چاه و از طریق لوله خروج محلول نمک حاصله) و انعکاس یافته (مثل سرعت موج) در سر چاه (از طریق لوله تزریق اسید)، هندسهٔ غار ذخیره‌سازی گاز تعیین می‌شود. بنابراین با دانستن سرعت موج در هر سیال ( $\text{CO}_2$ ، اسید، نمک و مخلوط آنها) و همچنین تاثیر تغییر قطر (اختلاف قطر لوله تزریق اسید و غار) در تغییر خصوصیات امواج انعکاس و انتقال یافته، می‌توان هندسهٔ غار در حال ساخت را کنترل کرد (Choi, 2011).

## فصل پنجم:

# مدل سازی و تحلیل عددی

## ۱-۵ مقدمه

از آن جا که بیشتر سازه‌های زیرزمینی شکل منظم و ساده‌ای ندارند و همچنین به علت وجود ناپیوستگی‌ها و نبود شرایط همسان‌گر، همگن و الاستیک در توده‌سنگ، روش‌های فرم بسته ریاضی برای تعیین میدان تنش‌ها، جابجایی‌ها و گسیختگی‌ها در توده‌سنگ با محدودیت مواجه هستند. بنابراین از چند دهه گذشته روش‌های عددی به طور گسترده‌ای در مدل‌سازی توده‌سنگ‌ها بکار گرفته شده است. در مدل‌های عددی از روابط ریاضی بین تنش و کرنش برای توضیح رفتار مواد استفاده می‌شود. تقسیم‌بندی اساسی روش‌های عددی بر اساس نوع محیط مورد استفاده است. این روش‌ها طی سال‌های گذشته بر مبنای تئوری محیط‌های پیوسته و ناپیوسته توسعه داده شده‌اند. مهم‌ترین روش‌های عددی بر مبنای تئوری محیط‌های پیوسته و ناپیوسته عبارتند از، روش المان محدود<sup>۱</sup> (FEM)، روش المان مرزی<sup>۲</sup> (BEM)، روش تفاضل محدود<sup>۳</sup> (FDM)، روش المان مجزا<sup>۴</sup> (DEM) و روش ترکیبی<sup>۵</sup> (Itasca, 2009).

## ۲-۵ خصوصیات سنگ آهک

سنگ آهک، یک نوع سنگ رسوبی است که از کربنات کلسیم تشکیل شده است. دولومیت نیز که سنگی کربناته است از کربنات منیزیم و کلسیم تشکیل شده است. سنگ آهک معمولاً خاکستری، زرد یا قهوه‌ای رنگ است. سنگ آهک به راحتی در اسید هیدروکلریک می‌جوشد (Partanen, 2004). سنگ‌ها به صورت یک ماده الاستیک-پلاستیک تغییر شکل می‌دهند و در فشارهای بیشتر از مقاومت‌شان دچار تسلیم و شکست می‌شوند که این تسلیم‌شدگی بستگی به عوامل زیادی از جمله میدان تنش و خصوصیات سنگ دارد. رفتار الاستیک زمانی اتفاق می‌افتد که در صورت باربرداری، سنگ تغییر شکلی نداشته و مانند حالت اولیه (پیش از بارگذاری) آن باشد. رفتار پلاستیک نیز زمانی اتفاق می‌افتد که تنش‌ها از حدود الاستیک سنگ تجاوز کرده است و در صورت باربرداری، تغییر شکل

<sup>1</sup> - Finite Element Method

<sup>2</sup> - Boundary Element Method

<sup>3</sup> - Finite Difference Method

<sup>4</sup> - Discrete Element Method

<sup>5</sup> - Hybrid Mrthod

پایداری در سنگ مشاهده شود. اگر تنش‌ها از حد مقاومت سنگ بیشتر شوند، شکستگی‌هایی در سنگ اتفاق خواهد افتاد (Goodman, 1980). برای پیش‌بینی و تعیین رفتار الاستیک-پلاستیک سنگ، مقاومت سنگ باید شناخته شده باشد.

سنگ‌های آهکی خصوصیات قابل تشخیصی مانند رگه‌ها یا لکه‌های کلسیت، ساختارهای فسیلی، سوراخ‌های گود و به صورت چاله، ساختارهای باریک و نی‌مانند، رگه‌های بافتی باز، ساختارهای لانه-زنبوری، لکه‌های آهنی و ساختارهای تراورتن‌مانند، دارند. بعضی از این خصوصیات بر بافت سنگ تأثیر می‌گذارند (Partanen, 2004).

### ۳-۵ تعیین مدل رفتاری توده‌سنگ آهک

خصوصیات مهندسی که مقاومت توده سنگ را بیان می‌کنند شامل، مدول یانگ ( $E$ )، نسبت پواسون ( $\nu$ )، مدول برشی ( $G$ ، مدول حجمی ( $K$ ، چسبندگی یا مقاومت برشی ذاتی سنگ ( $c$ )، مقاومت کششی ( $T_0$ ) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ ) توده سنگ است. مدول برشی یا مدول سختی به صورت نسبت بین تنش برشی به کرنش برشی تعریف و از طریق رابطه (۱-۵) محاسبه می‌شود:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1-5)$$

مدول حجمی نیز از طریق رابطه (۲-۵) بدست می‌آید:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2-5)$$

معیار شکست موهر-کولمب یکی از عمومی‌ترین معیارها برای شرح رفتار شکست ترد سنگ‌ها است. این مدل برای موادی بکار می‌رود که تحت بارگذاری برشی تسلیم می‌شوند. این مدل و نیز مدل دراگر-پراگر نسبت به سایر مدل‌های پلاستیک، نیاز به حافظه و زمان کمتری برای انجام محاسبات تحلیلی و عددی دارند. باید دقت کرد که کرنش پلاستیک در مدل موهر-کولمب به طور مستقیم قابل محاسبه نیست. در صورتی که کرنش پلاستیک و مطالعات بعد از شکست حائز اهمیت باشد، استفاده

از این مدل توصیه نمی‌شود. بنا به دلیلی که به آن اشاره شد و نیز به دلیل عمق زیاد مغارهای ذخیره-سازی، از مدل کرنش سخت شونده- نرم شونده استفاده می‌شود. این معیار مبتنی بر مدل موهر-کولمب و مناسب برای موادی است که افزایش یا کاهش در مقاومت برشی هنگامی که فراتر از محدوده شکست اولیه بارگذاری می‌شوند، نشان می‌دهند. تفاوت مدل کرنش سخت شونده- نرم شونده با مدل موهر- کولمب در این است که تمام خواص در مدل موهر- کولمب ثابت فرض می‌شود در حالی که در مدل کرنش سخت شونده- نرم شونده، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و اتساع به صورت توابع پله‌ای- خطی تغییر می‌کنند. در حقیقت، رفتار کرنش نرم شونده و سخت شونده بوسیله تغییرات در زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و اتساع به صورت تابعی از کرنش برشی پلاستیک کنترل می‌شود (Itasca, 2009).

#### ۴-۵ خصوصیات تشكیلات آهکی

غارهای مورد نظر در این تحقیق در یک ساختار آهکی ایزوتropیک و با یک گسترش افقی نامحدود مدل شده‌اند. خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ آهک در نظر گرفته شده در برنامه FLAC<sup>3D</sup> برای این تحقیق در جدول (۱-۵) نشان داده شده است. در اینجا فرض شده است که توده‌سنگ آهک از مدل کرنش نرم شونده- سخت شونده تبعیت می‌کند. بر اساس مطالعات هاثوی و کرش<sup>۱</sup>، اشمیت<sup>۲</sup>، اتکینسون و مردیث<sup>۳</sup>، حدود ۴۰ درصد از مقادیر مدول شکل‌پذیری توده‌سنگ آهک در بازه ۲۷ تا ۶۰ گیگاپاسکال و حدود ۵۰ درصد از مقادیر نسبت پوآسون سنگ آهک در بازه ۰ تا ۰/۵ قرار گرفته است. بر پایه گزارش سازمان زمین‌شناسی آمریکا<sup>۴</sup>، وزن حجمی متوسط و استاندارد برای توده‌سنگ آهک حدود  $2700 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ، زاویه اصطکاک داخلی حدود ۴۲ درجه، متوسط چسبندگی و مقاومت کششی توده‌سنگ آهک به ترتیب حدود  $6/72 \text{ MPa}$  و  $1/58 \text{ MPa}$  برآورد شده است.

<sup>1</sup>-Hatheway and Kiersch (1989)

<sup>2</sup>-Schmidt (1976)

<sup>3</sup>-Atkinson and Meredith (1987)

<sup>4</sup>-Department of Geological Sciences, (2005)

جدول (۱-۵): خصوصیات مکانیکی توده سنگ آهک استفاده شده برای تحلیل پایداری مغار

$2700 \text{ Kg/m}^3$	وزن حجمی
$28/4 \text{ GPa}$	مدول یانگ
$22/6 \text{ GPa}$	مدول بالک
$11 \text{ GPa}$	مدول برشی
$6/72 \text{ MPa}$	چسبندگی
$1/58 \text{ MPa}$	مقاومت کششی
$0/29$	نسبت پوآسون
$42^\circ$	زاویه اصطکاک
$0^\circ$	زاویه اتساع

## ۵-۵ ساز و کار نرم افزار $\text{FLAC}^{3D}$

روش تفاضل محدود قدیمی‌ترین روش عددی برای حل معادلات دیفرانسیلی است که در آن مقادیر اولیه و شرایط مرزی مشخص است. برای حل معادلات در این روش به ازای هر مشتقی که در معادلات وجود دارد، عبارتی جبری بر حسب متغیرهای مساله مثل تنش و جابجایی می‌تواند جایگزین شود. روش تفاضل محدود به دو صورت صریح<sup>۱</sup> و ضمنی<sup>۲</sup> است. در روش ضمنی هیچ ماتریسی تشکیل نمی‌شود، بنابراین محدودیت‌های کمتری دارد و همچنین اجازه تحلیل جابجایی‌های بزرگ را می‌دهد. نرم‌افزاری که بر اساس روش تفاضل محدود کار می‌کند،  $\text{FLAC}^{3D}$  است که بر اساس یک طرح محاسباتی لاغرانژی است (Itasca, 2009).

در تحلیل لاغرانژی نرم  $\text{FLAC}^{3D}$ ، شبکه اجزا به همراه ماده‌ی تعریف‌شده، تغییر شکل داده و حرکت می‌کند، در حالی که در تحلیل اویلری، ماده نسبت به یک شبکه ثابت تغییر شکل می‌دهد. برای مدل‌سازی در این نرم‌افزار، ابتدا هندسه مدل تعریف و شبکه اجزا منفرد ایجاد می‌شود. در گام

<sup>1</sup> - explicit  
<sup>2</sup> - implicit

بعدی، حالت رفتاری ماده، شرایط اولیه و محدودیت‌های مرزی تعیین و پس از متعادل شدن مدل، پاسخ مجموعه بررسی می‌شود (Itasca, 2009).

#### ۶-۵ مدل‌سازی مغار

فضای مورد نظر برای مدل‌سازی در این تحقیق به صورت یک مغار استوانه‌ای است که در سنگ آهک حفر و با آب در فشار هیدرواستاتیک پر شده است. برای نشان دادن آب و گاز داخل مغار، فشار داخلی در داخل مغار اعمال شده است. فشار داخلی به دلیل نشان دادن پر شدن مغار با یک حجم رو به افزایش گاز، در طول مدل‌سازی تغییر می‌کند. به منظور مدل‌سازی پایداری مغار، خصوصیات سنگ آهک، میدان تنش برجا، هندسه مغار و فشارهای داخلی آن در برنامه FLAC<sup>3D</sup> تعریف شده است. در این مدل از معیار کرنش نرمی استفاده شده است.

#### ۷-۵ تنش برجا

تنش عمودی که از وزن پوشان سنگ نتیجه می‌شود، با توجه به وزن مخصوص متوسط سنگ  $k = (2600 \text{ kg/m}^3)$  محاسبه شده است. تنش‌های افقی مساوی و با یک نسبت  $k$  با تنش عمودی  $(\frac{\sigma_h}{\sigma_v})$  در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی تاثیر تنش برجا بر روی پایداری مغار، مدل‌سازی‌ها برای هر مغار برای نسبت‌های تنش افقی به قائم برابر با  $0/4$ ،  $0/6$ ،  $0/8$ ،  $1/6$  و  $1/4$  انجام شده است.

#### ۸-۵ فشار داخلی مغار

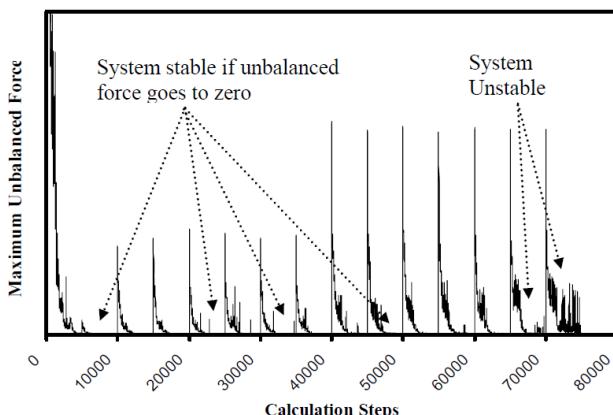
فشار داخلی مغار در نتیجه حضور سیال داخل مغار، پایداری مغار را افزایش می‌دهد. پایداری مکانیکی مغارهای حفر شده به روش انحلالی بستگی زیادی به فشار داخلی آنها دارد. برای فشار داخلی مغار، حد بالا و حد پایینی وجود دارد. حد پایین فشار در مغارهای آهکی معمولاً به اندازه فشار هیدرواستاتیکی آب در عمق مغار است. در فشارهای کمتر از فشار حداقل، ممکن است پدیده ورقه ورقه شدن سنگ سقف یا ریزش سقف مغار رخ دهد. در فشارهای بیشتر از فشار حداکثر نیز ممکن است شکستگی‌هایی در سقف مغار رخ دهد و باعث نشت گاز به خارج از مغار شود. مغارهای ذخیره-سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته پس از حفر و پیش از تزریق گاز طبیعی به داخل آنها، با آب

در فشار هیدرواستاتیکی پر می‌شوند. در چهار مغار مدل شده در این تحقیق نیز از فشار هیدرواستاتیکی معادل عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین برای پر کردن ابتدایی مغار استفاده شده است. در این تحقیق فرض شده است که مغار به طور آنی با گاز پر شده است. فشار هیدرواستاتیکی داخل مغار به منظور بررسی پایداری آن در فشارهای بیشتر به طور متناوب و با گامهای  $P^*/1$  (نسبت فشار گاز داخل مغار به فشار هیدرواستاتیک است) و  $P^*/2$  (در صورتی که تغییرات بیشتر در فشار برای نشان دادن ناپایداری نیاز باشد) افزایش یافته است. این افزایش فشار تا زمانی که ناپایداری در سیستم مشاهده شود، ادامه یافته است. سپس فشار داخلی در مغار به منظور بررسی پایداری مغار در فشارهای کمتر از فشار هیدرواستاتیک، با همان گام کاهش پیدا کرده است.

فشارهای داخلی در این نرمافزار به صورت فشار مکانیکی وارد شده است. این فشار در نتیجه فرستادن گاز به داخل مغار است.

#### ۹-۵ نیروی نامتعادل‌کننده

اولین شاخص برای بررسی پایداری مغار در نرمافزار  $\text{FLAC}^{3D}$ ، بیشترین نسبت نیروی نامتعادل‌کننده است (شکل ۱-۵) (Itasca, 2009). این نسبت یک برآورد از نیروهایی است که بر روی یک المان از مدل اعمال می‌شوند. زمانی که این نسبت به صفر میل می‌کند، نیروها متعادل و تمامی المان‌ها پایدار هستند (شکل ۱-۵). ولی زمانی که نیروهای نامتعادل‌کننده به عددی به غیر از صفر میل می‌کنند، نشان‌دهنده این است که قسمت‌هایی از مدل در حال حرکت و عدم تعادل است. نیروهای نامتعادل‌کننده همچنین ممکن است با گام‌هایی که نشان‌دهنده شکست در بعضی از قسمت‌های مدل است نوسان پیدا کنند (Foley, 2006).

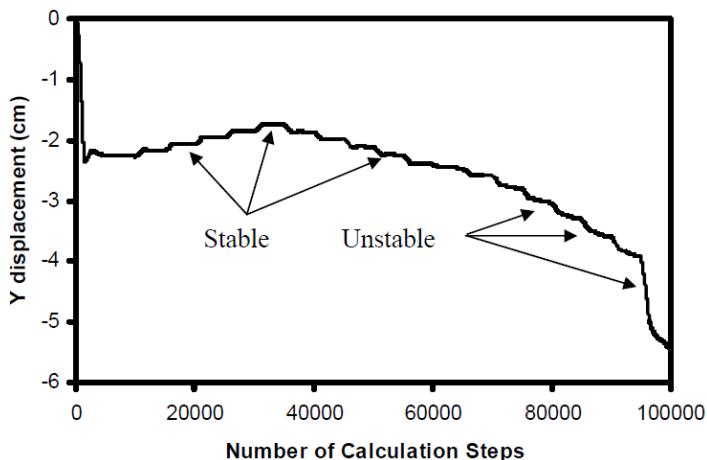


شکل (۱-۵): نمودار بیشترین نیروی نامتعادل کننده (Foley, 2006)

یک مدل زمانی به تعادل می‌رسد که بردار نیروی گرهی خالص در هر گره به صفر میل کند. این نیروها در روش‌های عددی هرگز کاملاً صفر نمی‌شوند. ولی وقتی مقدار این نیروها خیلی کوچک باشد فرض می‌شود که مدل به تعادل رسیده است. اگر مقدار نیروی نامتعادل کننده به صفر نرسد و در یک مقداری ثابت بماند، ممکن است بیان‌گر این مطلب باشد که جریان پلاستیک و شکست در مدل در حال اتفاق افتادن است (Itasca, 2009).

#### ۱۰-۵ تاریخچه جابجایی

شاخص دیگر برای بررسی شرایط پایداری مغار، جابجایی یک نقطه از مدل در راستای X, Y یا Z است. در برنامه FLAC<sup>3D</sup>, امکان علامت‌گذاری یک نقطه به منظور ردیابی جابجایی‌اش در طول مدل-سازی وجود دارد. زمانی که سیستم به تعادل رسیده و پایدار است، تاریخچه جابجایی برای یک نقطه به صورت یک خط افقی است (شکل ۲-۵). ولی زمانی که سیستم ناپایدار است و شکست رخ داده است، تاریخچه جابجایی برای یک نقطه چندین شیب خواهد داشت (شکل ۲-۵). شیب زیاد نشان-دهنده جابجایی سریع نقطه است و بنابراین شکست محتمل‌تر است (Itasca, 2009).



شکل (۲-۵): تاریخچه جابجایی در راستای محور Y (Foley, 2006)

### ۱۱-۵ شاخص‌های پلاستیسیته

در نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> ممکن است المان‌هایی از مدل در جریان مدل‌سازی تحت تاثیر تنش کششی یا برشی تسلیم شوند. وقتی که تنش‌ها در یک بخش از توده‌سنگ به مقاومت کششی ماده آن سنگ برستند، تسلیم در کشش اتفاق خواهد افتاد. ولی زمانی که تنش‌ها در یک بخش از توده‌سنگ باعث مماس شدن دایره موهر سنگ با پوش شکست موهر-کولمب سنگ شود، تسلیم در برش اتفاق خواهد افتاد. بخش‌هایی از مغار که تحت تاثیر تنش کششی یا برشی تسلیم شده‌اند، در معرض شکست قرار دارند (Hart, 2005).

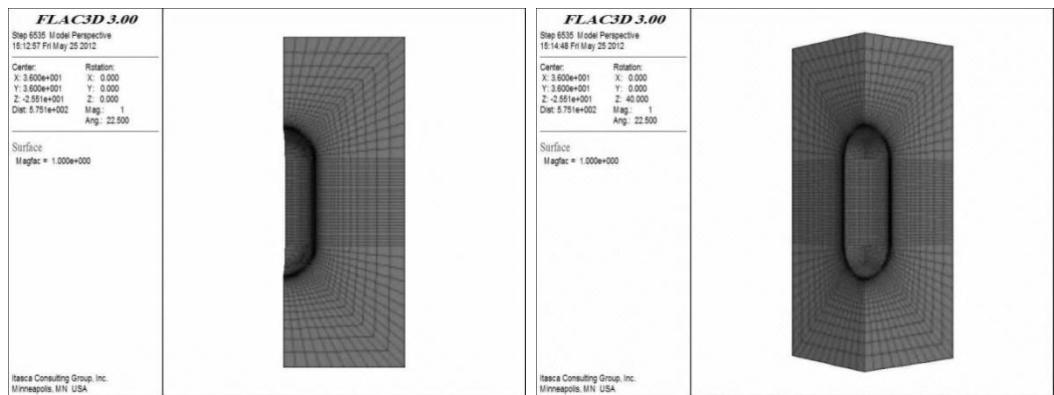
### ۱۲-۵ کرنش بزرگ و کوچک

نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> به طور پیش‌فرض با کرنش کوچک کار می‌کند. در حالت کرنش کوچک مختصات گره‌ها حتی با وجود جابجایی بزرگ نیز عوض نمی‌شود. در حالت کرنش بزرگ مختصات گره‌ها در هر چرخه با توجه به جابجایی‌ها عوض می‌شود. در حالت کرنش بزرگ هندسه غیرخطی امکان‌پذیر است (Itasca, 2009). در این پژوهش از کرنش بزرگ در فرایند مدل‌سازی استفاده شده است.

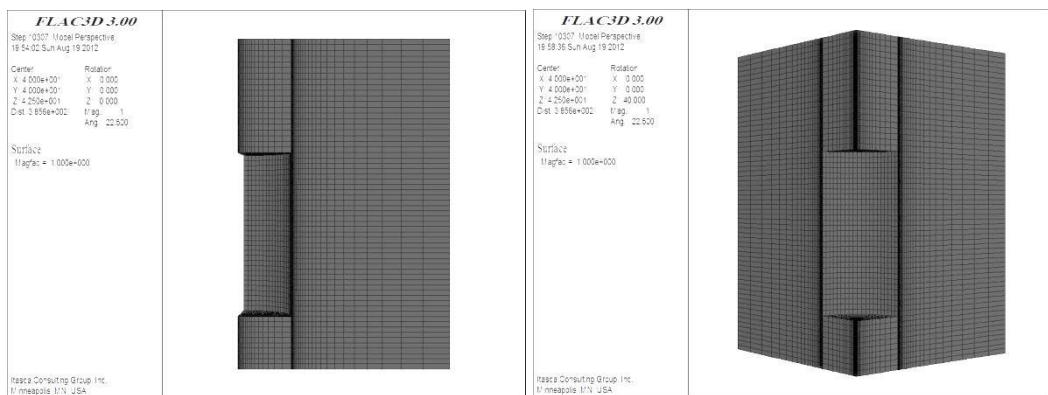
### ۱۳-۵ تقارن مغار

در این تحقیق، برای ساده‌تر شدن مدل‌سازی مغارها از تقارن استفاده شده است. به این صورت که، مغارهای شماره ۱، ۲ و ۳ (جدول ۴-۱) نسبت به محور x و y متقارن هستند، بنابراین تنها یک‌چهارم

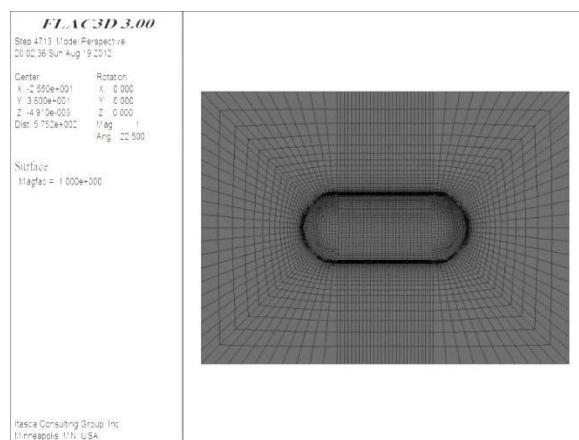
آنها مدل شده است. ولی مغار شماره ۴ (جدول ۴-۱)، با وجود تقارن نسبت به تمامی محورها به دلیل نیاز به تعیین تنش و جابجایی در دو نیم کره انتهای آن در جهت محور  $y$ ، تقارن تنها نسبت به محور  $x$  در نظر گرفته شده است (شکل ۳-۵).



(الف): مغار شماره ۱ (استوانهای قائم با دو نیم کره در دو انتهای آن) (یک‌چهارم مغار مدل شده است)



(ب): مغار شماره ۲ و ۳ (استوانهای قائم) (یک‌چهارم مغار مدل شده است)



(ج): مغار شماره ۴ (استوانه افقی با دو نیم کره در دو انتهای آن) (یک‌دوم مغار مدل شده است)

شکل (۳-۵): شکل هندسی مغارهای مدل شده

## ۱۴-۵ مدل شماره ۱

این مغار به صورت استوانه‌ای قائم با شعاع ۱۸ متر و ارتفاع ۵۱ متر با دو دربیوش نیم‌کره‌ای به شعاع ۱۸ متر متصل به دو انتهای استوانه طراحی شده است (شکل ۴-۴). شبکه مدل به صورت مکعب با طول و عرضی به اندازه ۷۲ متر و ارتفاعی به اندازه ۱۹۵ متر است که یک‌چهارم مغار در آن مدل شده است (شکل ۳-۵ الف). کل مغار در سنگ آهک قرار گرفته است. مرزهای جانبی شبکه مدل در فاصله‌ای به اندازه ۴ برابر شعاع مغار از مرکز استوانه مغار در نظر گرفته شده‌اند. مرزهای بالا و پایین شبکه مدل نیز در فاصله‌ای به اندازه ۴ برابر شعاع مغار از مرکز قسمت کروی سقف و کف مغار قرار گرفته‌اند. تنש‌های افقی ۰/۸ برابر تنش‌های عمودی در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در بخش (۸-۵) عنوان شد، مغارها ابتدا با آب پر می‌شوند. بنابراین فشار داخلی مغار پس از حفر و قبل از تزریق گاز معادل با وزن ستون آب در عمق مورد نظر است. از آنجایی که ممکن است تمام لوله تزریق سیال (آب یا گاز) از آب پر نشود و یا از سیالات سبک‌تر از آب به همراه آن استفاده شود، بنابراین فشاری معادل ۰/۹ وزن ستون آب به داخل مغار اعمال شده است.

## ۱۵-۵ مدل شماره ۲

این مغار به صورت استوانه‌ای قائم با شعاع ۱۸ متر و ارتفاع ۵۱ متر طراحی شده است (شکل ۴-۴). شبکه مدل به صورت مکعب با طول و عرضی به اندازه ۷۲ متر و ارتفاعی به اندازه ۱۱۱ متر است که یک‌چهارم مغار در آن مدل شده است (شکل ۴-۶ ب). کل مغار در سنگ آهک قرار گرفته است. مرزهای جانبی شبکه مدل در فاصله شده‌اند. مرز بالای شبکه مدل در فاصله ۴۰ متری از سقف مغار و مرز پایین شبکه مدل نیز در فاصله ۲۰ متری از کف مغار در نظر گرفته شده است. تنش‌های افقی ۰/۸ برابر تنش‌های عمودی در نظر گرفته شده است. فشار داخلی ابتدایی مغار نیز معادل ۰/۹ وزن ستون آب در نظر گرفته شده است.

### ۱۶-۵ مدل شماره ۳

این مغار به صورت استوانه‌ای قائم با شعاع ۲۰ متر و ارتفاع ۶۲ متر طراحی شده است (شکل ۴-۴). شبکه مدل به صورت مکعب با طول و عرضی به اندازه ۸۰ متر و ارتفاعی به اندازه ۱۲۵ متر است که یک‌چهارم مغار در آن مدل شده است (شکل ۴-۶ ب). کل مغار در سنگ آهک قرار گرفته است. مرزهای جانبی شبکه مدل در فاصله‌ای به اندازه ۴ برابر شعاع مغار از مرکز استوانه مغار در نظر گرفته شده‌اند. مرز بالای شبکه مدل در فاصله ۴۳ متری از سقف مغار و مرز پایین شبکه مدل نیز در فاصله ۲۰ متری از کف مغار در نظر گرفته شده است. تنش‌های افقی  $8/0$  برابر تنش‌های عمودی در نظر گرفته شده است. فشار داخلی ابتدایی مغار نیز معادل  $9/0$  وزن ستون آب در نظر گرفته شده است.

### ۱۷-۵ مدل شماره ۴

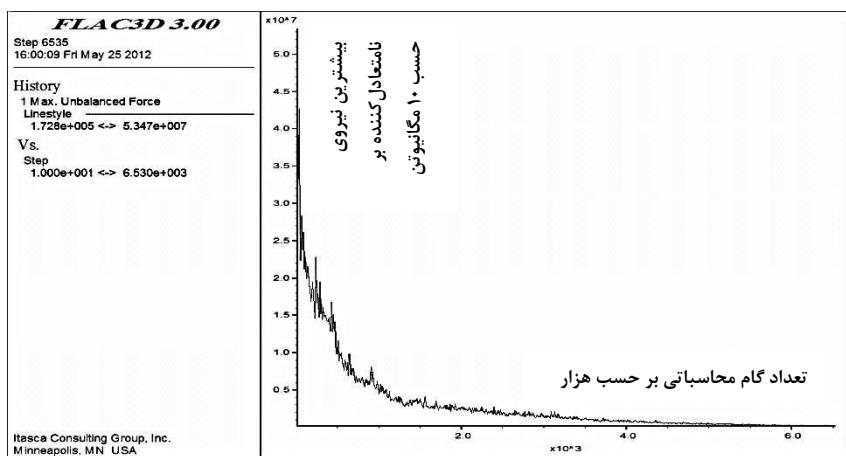
این مغار به صورت استوانه‌ای خوابیده با شعاع ۱۸ متر و طول ۵۱ متر با دو درپوش نیم‌کره‌ای به شعاع ۱۸ متر متصل به دو انتهای استوانه طراحی شده است (شکل ۴-۴). شبکه مدل به صورت مکعب با طول ۱۹۵ متر، عرض ۷۲ متر و ارتفاع ۱۴۴ متر است که یک‌دوم مغار در آن مدل شده است (شکل ۴-۳ ج). کل مغار در سنگ آهک قرار گرفته است. مرزهای جانبی شبکه مدل در فاصله‌ای به اندازه ۴ برابر شعاع مغار از مرکز قسمت کروی مغار در نظر گرفته شده‌اند. مرزهای بالا و پایین شبکه مدل نیز در فاصله‌ای به اندازه ۴ برابر شعاع مغار از مرکز قسمت استوانه‌ای مغار قرار گرفته‌اند. تنش‌های افقی در فاصله‌ای به اندازه  $4/0$  برابر شعاع مغار از مرکز قسمت استوانه‌ای مغار قرار گرفته‌اند. تنش‌های عمودی در نظر گرفته شده است. فشار داخلی ابتدایی مغار نیز معادل  $9/0$  وزن ستون آب در نظر گرفته شده است.

### ۱۸-۵ تحلیل عددی

پس از متعادل شدن هر مدل، مقادیر جابجایی‌ها، گسترش ناحیه تسليم و بزرگی تنش‌های القایی در نقاط شاهد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نقاط شاهد در سقف، گوشه‌های بالا و پایین، دیواره و کف مغار انتخاب شده است.

## ۱-۱۸-۵ نیروی نامتعادل‌کننده

به منظور بررسی وضعیت تعادل مدل، می‌توان نمودار تغییرات بیشترین نیروی نامتعادل‌کننده را بررسی نمود. در شکل (۴-۵) به عنوان نمونه، نمودار تغییرات بیشترین نیروی نامتعادل‌کننده برای مدل شماره ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود، نمودار تغییرات بیشترین نیروی نامتعادل‌کننده برای مدل شماره ۱ به سمت صفر میل کرده که به معنای به تعادل رسیدن مدل است.



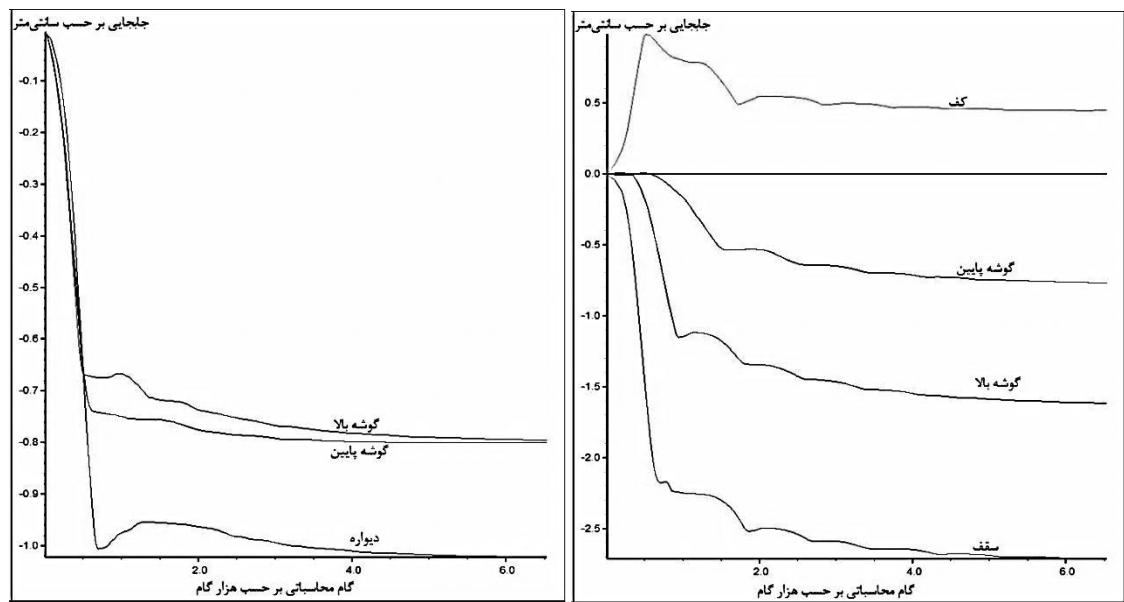
شکل (۴-۵): نمودار تغییرات بیشترین نیروی نامتعادل‌کننده برای مدل شماره ۱

## ۲-۱۸-۵ جابجایی و کرنش

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل پایداری هر سازه‌ی زیرزمینی، مقدار جابجایی در جداره آن سازه است. در شکل‌های شماره (۵-۵)، (۵-۶) و (۵-۷)، مقدار جابجایی در راستای محورهای X و Z برای مدل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که تغییر شکل در سقف و کف مغار بیشتر تابعی از جابجایی قائم، تغییر شکل در گوشه‌های مغار حاصل از برآیند جابجایی‌های افقی و قائم و تغییر شکل دیواره مغار بیشتر متاثر از جابجایی افقی در آن نقطه است.

در شکل (۵-۵) نمودار جابجایی در راستای محور X و Z برای مدل شماره ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۵-۵ الف) مشاهده می‌شود سقف با جابجایی نهایی در حدود ۲/۷ سانتی‌متری به طرف داخل مغار بیشترین جابجایی و کف مغار با جابجایی نهایی حدود ۰/۵ سانتی‌متر کمترین

میزان جابجایی در راستای Z را داشته است. با توجه به شکل (۵-۵ ب) مشاهده می‌شود که دیواره با حدود ۱ سانتی‌متر جابجایی به سمت داخل مغار بیشترین جابجایی در راستای X را داشته است. گوشه‌های بالا و پایین به یک میزان و در حدود  $8/0$  سانتی‌متر در راستای محور X به طرف داخل مغار جابجایی داشته‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود مغار به میزان کمی همگرا شده است.

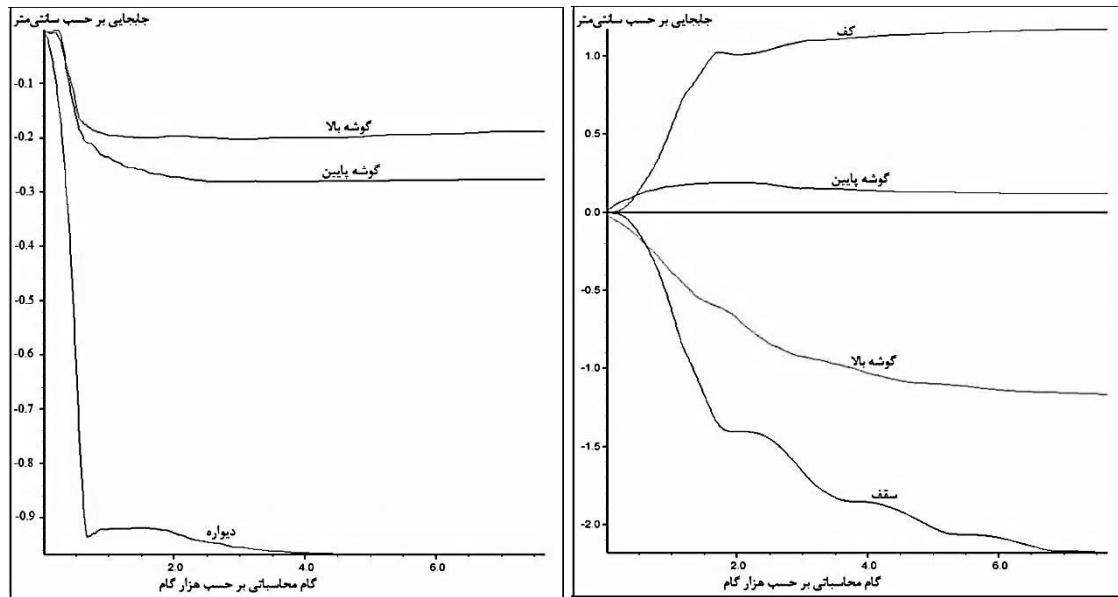


الف) جابجایی در راستای محور Z  
ب) جابجایی در راستای محور X

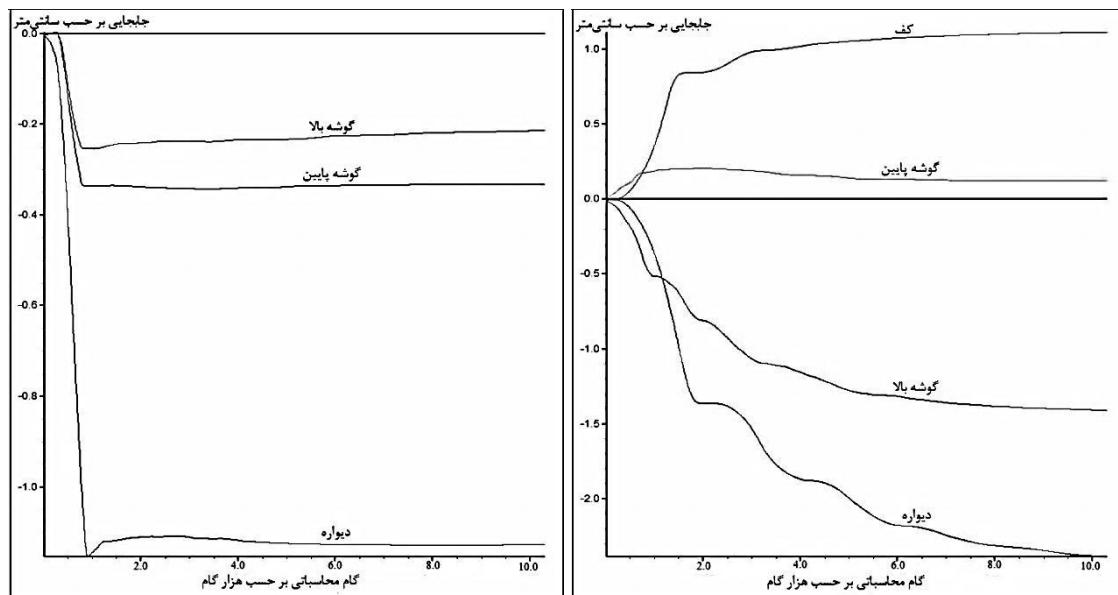
شکل (۵-۵): جابجایی در راستای کف، سقف، گوشه بالا و گوشه پایین مغار مدل شماره ۱

در شکل (۵-۶)، جابجایی در راستای محورهای X و Z برای مدل‌های شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه شکل (۵-۶ الف) مشاهده می‌شود که سقف مغار مدل شماره ۲ بیشترین جابجایی را در راستای محور Z و در حدود  $2/3$  سانتی‌متر و گوشه پایین با کمتر از حدود  $0/2$  سانتی‌متر، کمترین میزان جابجایی را داشته است. در جهت محور X (شکل ۵-۵ ب)، دیواره با حدود  $0/97$  سانتی‌متر و گوشه بالا با حدود  $0/2$  سانتی‌متر کمترین میزان جابجایی را داشته‌اند. با توجه به جهت جابجایی‌ها می‌توان همگرایی مغار را به مقدار کم در مدل شماره ۲ مشاهده کرد. در مدل شماره ۳ نیز، سقف مغار با حدود  $2/5$  سانتی‌متر بیشترین میزان جابجایی و گوشه پایین با حدود  $0/2$  سانتی‌متر کمترین میزان جابجایی را در جهت محور Z داشته است. در جهت محور X نیز، دیواره با حدود  $1/13$  سانتی‌متر بیشترین و گوشه بالا با حدود  $0/23$  سانتی‌متر کمترین میزان جابجایی را داشته است. همان‌طور

که مشاهده می‌شود، میزان جابجایی‌های نقاط شاهد در راستای محورهای X و Z برای مدل شماره ۳ بیشتر از مدل شماره ۲ بوده است.



الف): جابجایی در راستای محور Z مغار مدل شماره ۲

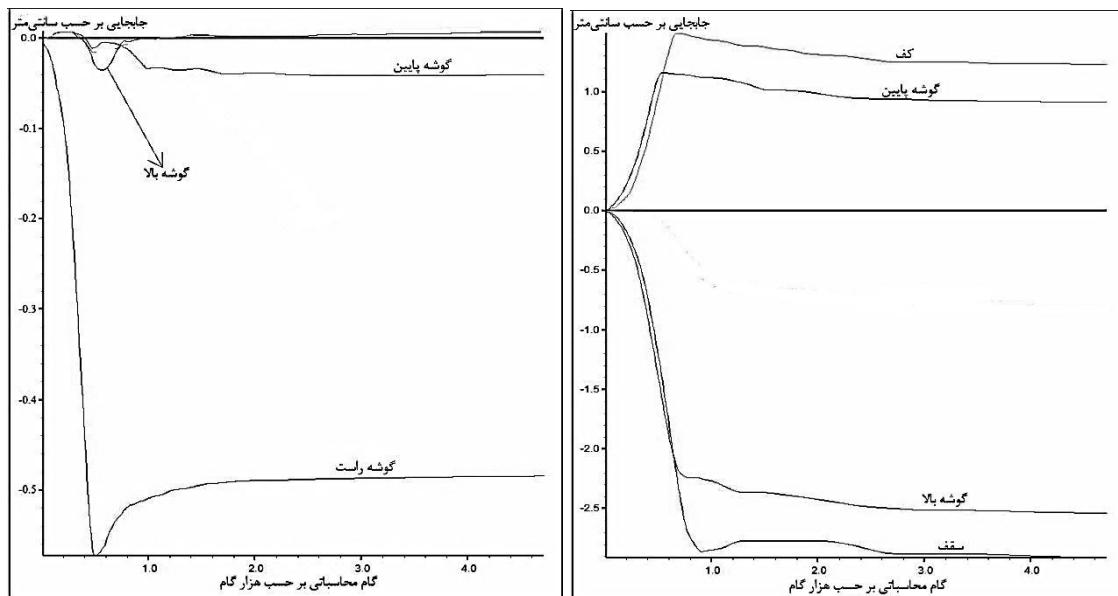


ج): جابجایی در راستای محور Z مغار مدل شماره ۳

شکل (۶-۵): جابجایی کف، گوشه بالا و گوشه پایین مغارهای مدل شماره ۲ و ۳

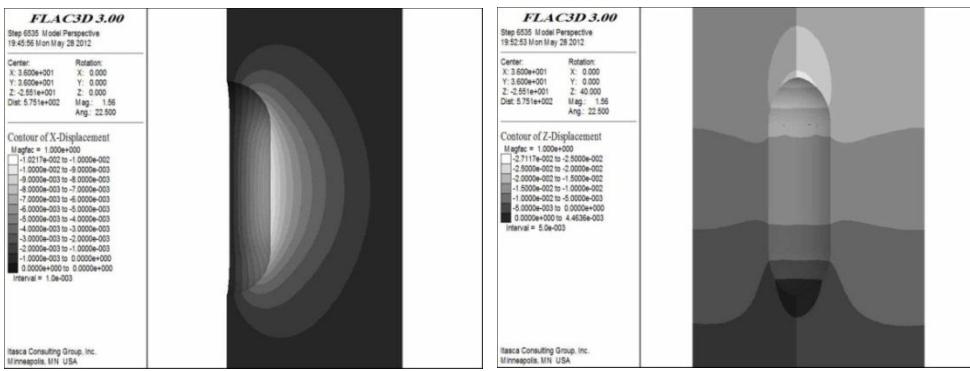
در شکل (۷-۵)، میزان جابجایی در راستای محورهای X و Z برای نقاط شاهد مدل شماره ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷-۵ الف) مشاهده می‌شود، سقف مغار مدل شماره ۴ با

جابجایی نهایی در حدود ۲/۶ سانتی‌متر بیشترین میزان جابجایی و گوشه افقی مغار با جابجایی در حدود ۷۶/۰ سانتی‌متر، کمترین میزان جابجایی را در راستای محور Z داشته‌اند. در راستای محور X به استثنای گوشه راست با جابجایی نهایی حدود ۴۸/۰ سانتی‌متر سایر نقاط جابجایی اندکی داشته‌اند.

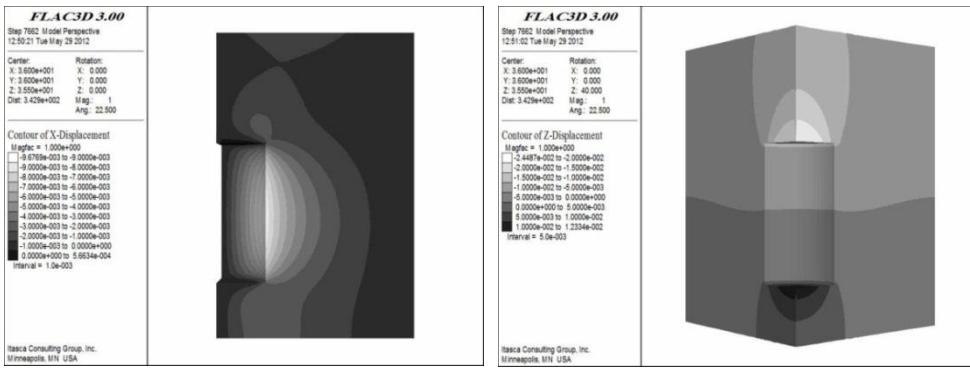


شکل (۷-۵): جابجایی سقف، کف، گوشه بالا، گوشه پایین مغار مدل شماره ۴ (گوشه راست نقطه‌ای واقع بر راس قسمت کروی است)

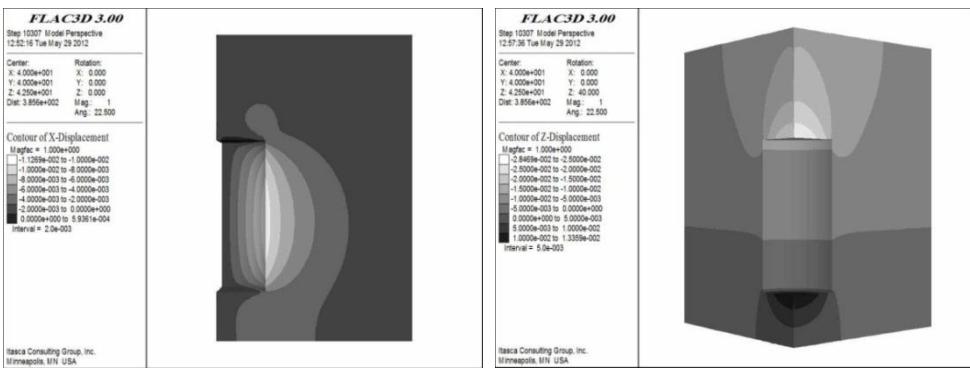
در شکل (۸-۵) کانتورهای جابجایی در راستای محورهای X و Z برای مدل‌های شماره ۱ تا ۴ نشان داده شده است. در شکل (۹-۵) کانتور جابجایی در راستای محور Y برای مدل شماره ۴ نشان داده است. با توجه به شکل (۸-۵ الف تا د) مشاهده می‌شود که دیواره مغار بیشترین و سقف مغار کمترین میزان جابجایی را در راستای محور X داشته است. در راستای محور Z نیز سقف و کف مغار بیشترین و دیواره مغار کمترین میزان جابجایی را داشته‌اند. گوشه‌های بالا و پایین نیز در جهت محورهای X و Z جابجایی اندکی داشته‌اند.



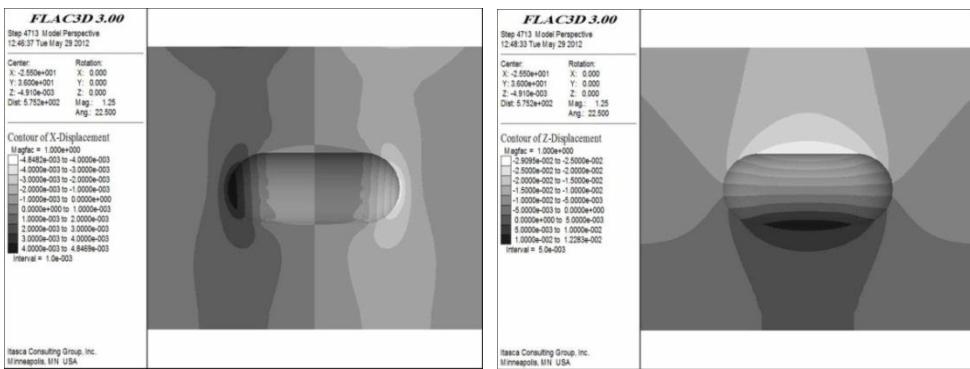
الف) مدل شماره ۱ (تصویر سمت چپ کانتور جابجایی در راستای X و تصویر سمت راست کانتور جابجایی در راستای Z است)



ب) مدل شماره ۲ (تصویر سمت چپ کانتور جابجایی در راستای X و تصویر سمت راست کانتور جابجایی در راستای Z است)

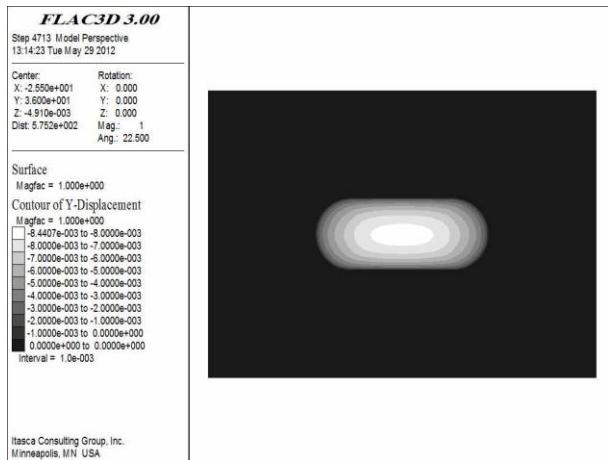


ج) مدل شماره ۳ (تصویر سمت چپ کانتور جابجایی در راستای X و تصویر سمت راست کانتور جابجایی در راستای Z است)



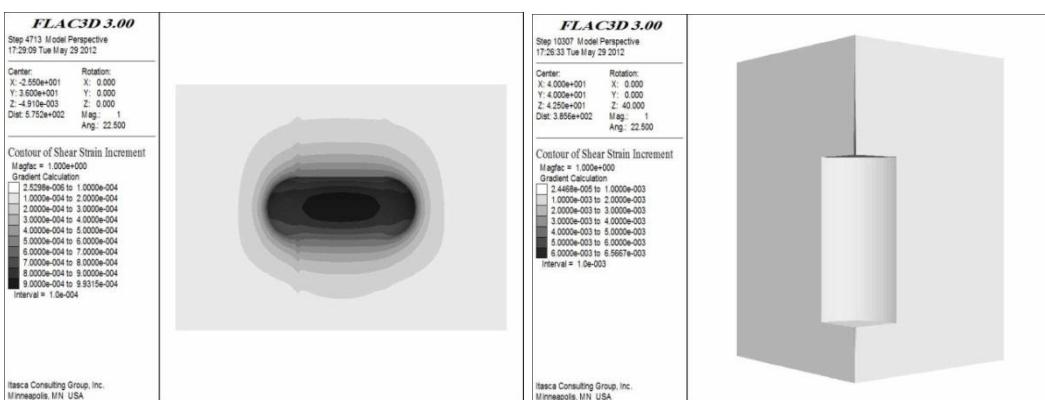
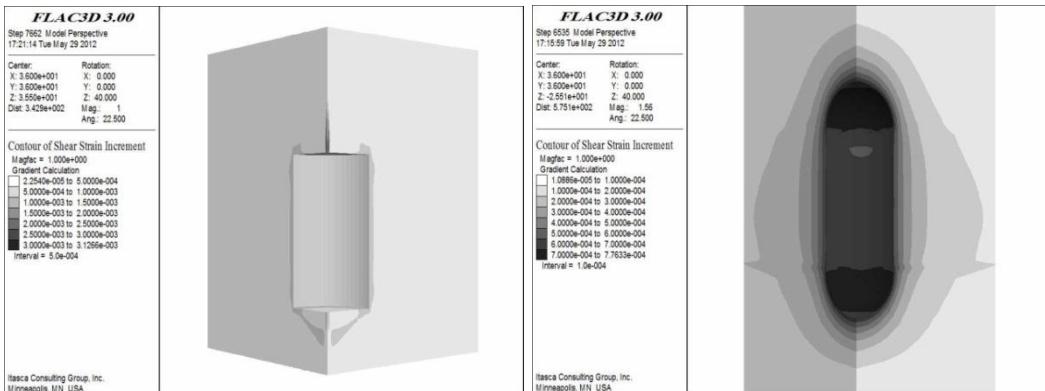
د) مدل شماره ۴ (تصویر سمت چپ کانتور جابجایی در راستای X و تصویر سمت راست کانتور جابجایی در راستای Z است)

شکل (۸-۵): کانتورهای جابجایی مغارها در راستای محورهای X و Z



شکل (۹-۵): کانتور جابجایی در راستای Y مدل شماره ۴

در شکل (۱۰-۵)، کانتورهای کرنش برای مدل‌های شماره ۱ تا ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۰-۵ الف) مشاهده می‌شود، بیشترین کرنش برای مغار مدل شماره ۱ مربوط به قسمت‌های کروی و در نزدیکی سقف و کف مغار و در حدود ۷/۰۰ تا ۸/۰۰ درصد و کمترین مقدار کرنش برای در دیوارهای مغار و در حدود ۵/۰۰ تا ۶/۰۰ درصد است. همان‌طور که در شکل (۱۰-۵ ب) نیز مشاهده می‌شود، بیشترین کرنش برای مغار مدل شماره ۲ در قسمت سقف و کف مغار و در حدود ۳/۰۰ تا ۴/۰۰ درصد و کمترین کرنش برای مغار و در حدود ۳/۰۰ تا ۵/۰۰ درصد است. با دقت در شکل (۱۰-۵ ج) مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش برای مغار مدل شماره ۳ در قسمت سقف و کف مغار و در حدود ۶/۰۰ تا ۷/۰۰ درصد است. در مغار مدل شماره ۴ (شکل ۱۰-۵ د) نیز بیشترین کرنش برای در دیواره مغار و در حدود ۹/۰۰ تا ۱۱/۰۰ درصد و کمترین مقدار کرنش برای در قسمت‌های بالایی و نزدیک به سقف مغار و در حدود ۵/۰۰ تا ۶/۰۰ درصد است. با توجه به نتایج بدست‌آمده از شکل (۱۰-۵)، فهمیده می‌شود که بیشترین میزان کرنش در اطراف مغار مربوط به مدل شماره ۳ و در قسمت سقف و کف مغار است. کمترین میزان کرنش پیرامون محیط مغار نیز مربوط به دیواره مغار مدل شماره ۲ است.



شکل (۵-۱۰): کانتورهای کرنش برشی برای مدل‌های شماره ۱ تا ۴ در عمق ۱۳۰۰ متری زمین

در شکل (۱۱-۵)، کانتورهای کرنش حجمی برای تمام مدل‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل

(۱۱-۵ الف) مشاهده می‌شود که بیشترین کرنش حجمی در جداره مغار مدل شماره ۱ مربوط به

گوشه‌های بالا و پایین مغار و در حدود ۰/۰۳ تا ۰/۰۰۲ درصد است. میزان کرنش حجمی در قسمت

سقف مغار مدل شماره ۱ در حدود ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۰۲ درصد است. میزان کرنش حجمی در کف این مغار

نیز کمتر از این مقدار و در حدود ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۰۱ درصد است. کمترین میزان کرنش حجمی در مغار

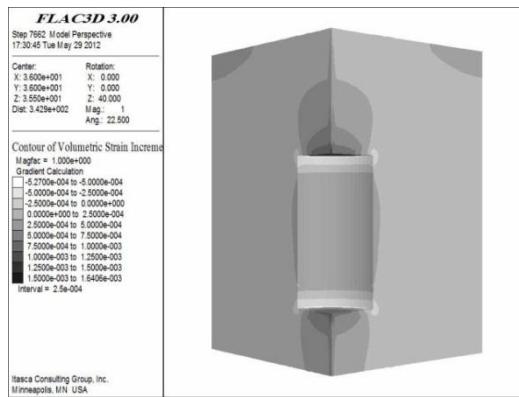
مدل شماره ۱ مربوط به دیوارهای مغار و در حدود ۰/۰۰۵ درصد است. همانطور که در شکل (۱۱-۵

ب) مشاهده می‌شود، بیشترین کرنش حجمی مغار مدل شماره ۲ در قسمت سقف و کف مغار و در

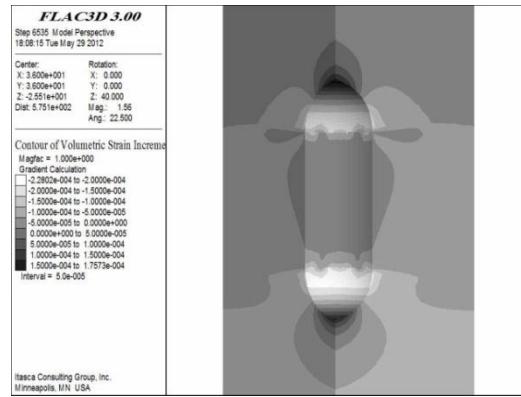
حدود ۰/۰۱۶ تا ۰/۰۰۰ درصد و کمترین کرنش حجمی در قسمت دیوارهای مغار و در حدود ۰/۰۰۳

درصد است. با توجه به شکل (۱۱-۵ ج)، بیشترین کرنش حجمی مغار مدل شماره ۳ مربوط به تاج

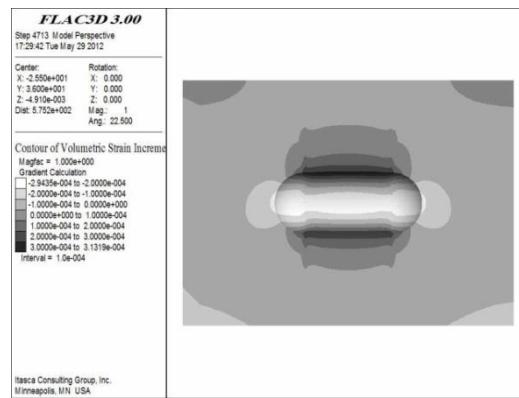
مغار و در حدود ۰/۱۱ تا ۰/۱۰ درصد است. میزان کرنش حجمی در کف مغار مدل شماره ۳ در حدود ۰/۰۶ تا ۰/۰۷۵ درصد است. کمترین میزان کرنش حجمی نیز مربوط به دیواره مغار و در حدود ۰/۰۲ درصد است. بیشترین کرنش حجمی مغار مدل شماره ۴ (شکل ۱۱-۵د) در قسمت سقف مغار و در حدود ۰/۰۳۱ تا ۰/۰۳۰ درصد است. مقدار کرنش حجمی در کف مغار کمتر از مقدار کرنش در سقف مغار و در حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۳ درصد است. میزان کرنش حجمی در راس دو قسمت کروی در حدود ۰/۰۲-۰/۰۳-۰/۰۳ درصد است. کمترین میزان کرنش حجمی مغار شماره ۴ در نزدیکی گوشه‌های مغار و در حدود ۰/۰۱ درصد است. بنابراین بیشترین میزان کرنش حجمی مربوط به سقف و کف مغار شماره ۲ و کمترین میزان کرنش حجمی مربوط به دیواره مغار شماره ۱ بوده است.



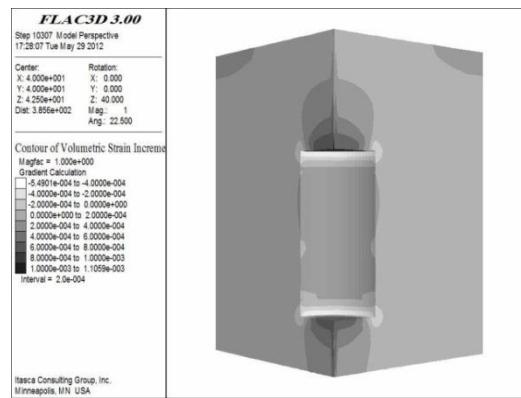
ب): مدل شماره ۲



الف): مدل شماره ۱



د): مدل شماره ۴



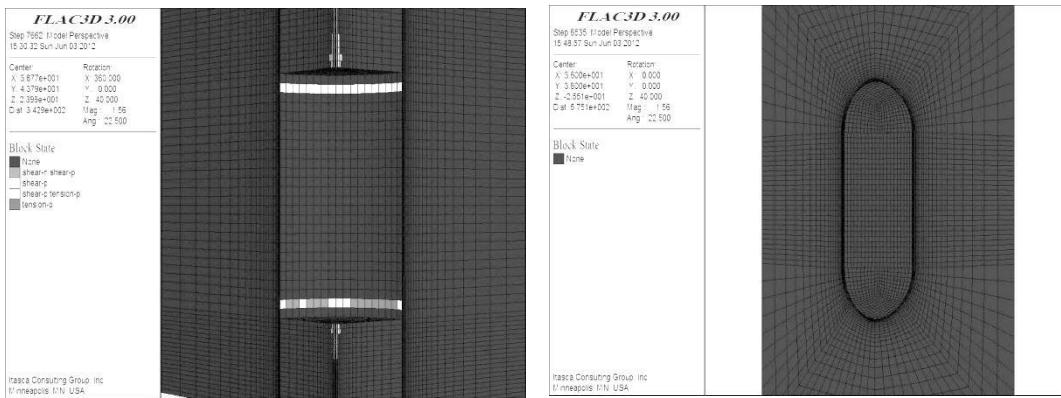
ج): مدل شماره ۳

شکل (۱۱-۵): کانتورهای کرنش حجمی برای مدل‌های شماره ۱ تا ۴ در عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین

### ۳-۱۸-۵ گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغارها

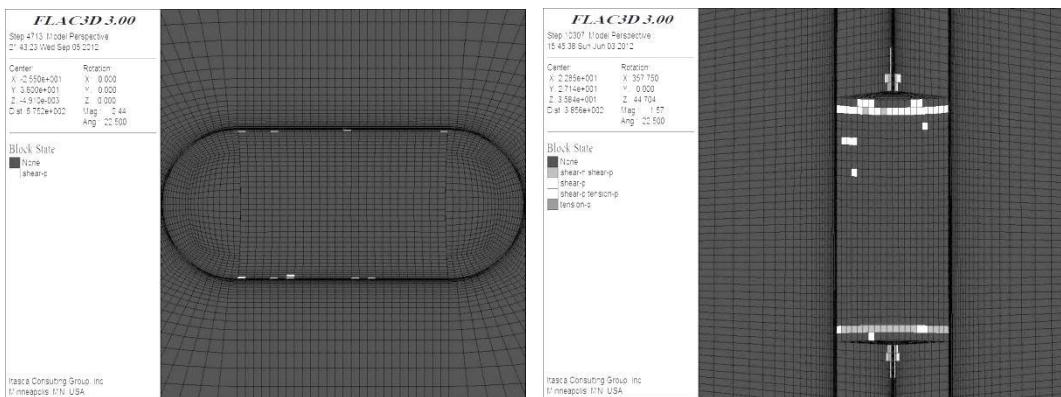
در نرم افزار  $\text{FLAC}^{3D}$ ، می‌توان نواحی که در آنها شرایط گسیختگی ارضا شده است را مشخص کرد. در این نرم افزار گسیختگی به دو صورت شکست برشی و کششی در زمان حال و گذشته بررسی می‌شود. اگر در یک مرحله زمانی، تنش در یک ناحیه به حد تسلیم یا فراتر از آن برسد، آن ناحیه در حالت شکست فعال<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد و اگر یک ناحیه در مراحل زمانی گذشته تسلیم و گسیخته شده باشد، ولی در زمان حال تنش‌های این ناحیه در زیر حد تسلیم قرار داشته باشند، این ناحیه در حالت شکست منفعل و در وضعیت کشسان قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، وجود یک نوار پیوسته از نواحی تسلیم‌شده‌ی فعال در مدل که در دو سطح با هم تلاقی دارند، بیان‌گر وقوع شکست در مدل است. همچنین اگر مقایسه‌ی مدل قبل و بعد از حفاری، گسترش نواحی فعال تسلیم را نشان دهد، می‌توان شکست نهایی و عدم تعادل مدل را انتظار داشت (Itasca, 2009). در شکل (۱۲-۵)، گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغارها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲-۵) مشاهده می‌شود تنها مغاری که تسلیم در آن اتفاق نیفتاده، مغار مربوط به مدل شماره ۱ است و این به خاطر هندسه این مغار است که باعث توزیع بهتر تنش می‌شود و در نتیجه احتمال ناپایداری در آن کمتر است. بیشترین میزان تسلیم در این عمق (۱۳۰۰ متری سطح زمین) نیز در مغار مدل شماره ۳ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱۲-۵ ب) و (۱۲-۵ ج) مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع و قطر در مغارهای استوانه‌ای قائم باعث افزایش ناپایداری شده است. تسلیم‌شدنگی در مغارهای مدل‌های شماره ۲ و ۳ به صورت تسلیم در گذشته و حال و در دو حالت کشش و برش بوده است. تسلیم‌شدنگی در مغار مدل شماره ۴ به صورت تسلیم در گذشته و در حالت برش بوده است. بنابراین میزان ناپایداری و احتمال وقوع شکست در مغارهای مدل‌های شماره ۲ و ۳ بیشتر از مغار مدل شماره ۴ است.

<sup>۱</sup> - Shear-Now and Tension-Now



ب): مدل شماره ۲

الف): مدل شماره ۱



د): مدل شماره ۴

ج): مدل شماره ۳

شکل (۱۲-۵): گسترش ناحیه تسليم در اطراف مغارهای مدل‌های ۱ تا ۴ (نقاط روشن نشان‌دهنده نقاطی است که در آنها تسليم رخ داده است).

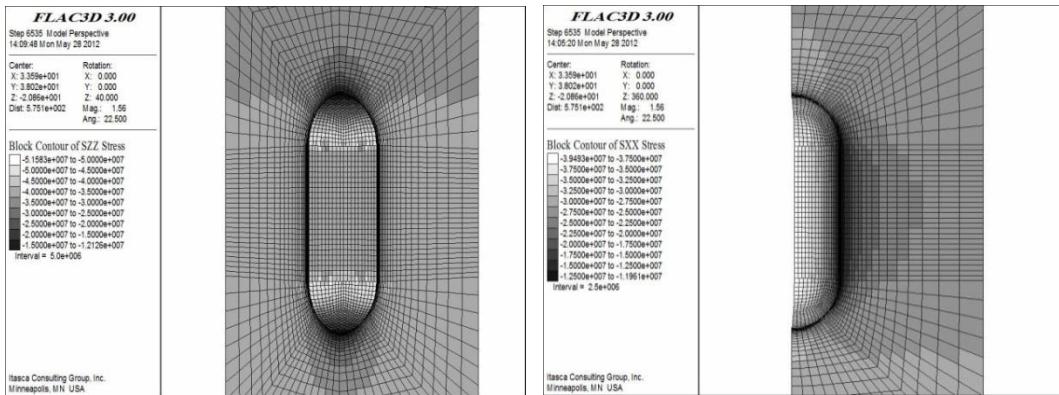
#### ۴-۱۸-۵ تنش‌ها

میدان تنش بر جای زمین تاثیر زیادی بر وضعیت پایداری یک سازه زیرزمینی دارد. این تاثیر در شرایطی که مقدار تنش از مقاومت توده سنگ بیشتر باشد، محسوس‌تر است. پس از حفر سازه، بسته به بزرگی و جهت تنش‌های بر جا و هندسه سازه، تنش‌ها دوباره در اطراف سازه تنظیم می‌شوند. از دیدگاه تحلیلی، وضعیت این تنش‌ها در حاشیه جداره مغار از اهمیت خاصی برخوردار است. از آنجا که تنش‌های بر جا ناهمسانگرد هستند، تنش‌های مماسی اطراف سازه حتی در مقاطع دایره‌ای نیز می‌توانند متغیر باشد. همچنین مقدار بزرگ‌ترین تنش مماسی بیشتر به شکل سازه و خواص شکل‌پذیری توده سنگ بستگی دارد تا به ابعاد آن.

پس از حفر یک سازه زیرزمینی بسته به مقاومت توده سنگ، مقدار تنش‌ها در اطراف سازه در حین تنظیم مجدد شروع به کاهش می‌نماید. در سنگ‌های سست ممکن است مقدار تنش‌های القایی در جداره سازه (به ویژه در سقف) به صفر نیز برسد. یعنی همزمان با تغییر شکل توده‌سنگ، مقادیر زیادی از تنش و انرژی نیز آزاد می‌شود. بنابراین، مقدار کاهش تنش‌ها (پس از حفر) در راستای افقی یا قائم نسبت به مقادیر تنش‌های اولیه (پیش از حفر) در همان راستا، آزادسازی تنش نامیده می‌شود. در این تحقیق بلafاصله بعد از حفر مغار، درون آن با آب با فشار هیدرواستاتیک پر شده است، بنابراین تغییرات تنش در این حالت نسبت به تنش‌های پیش از حفر بررسی شده است.

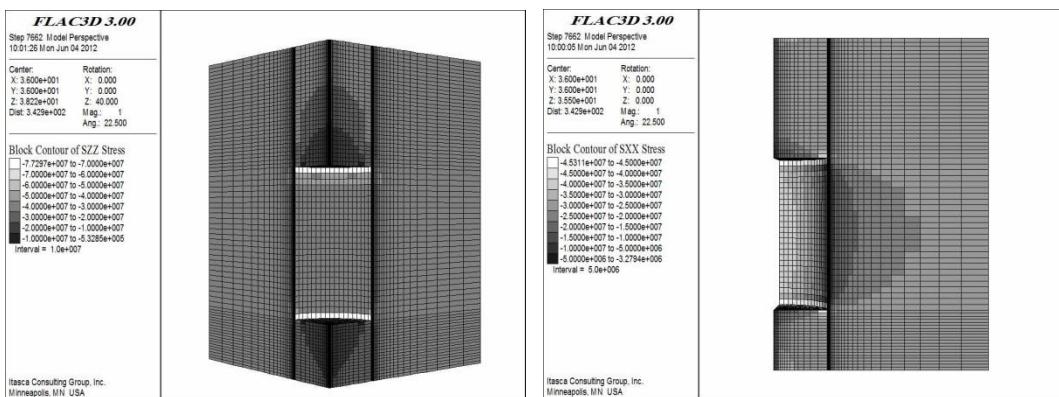
در مجموعه اشکال (۱۳-۵)، کانتورهای تنش افقی و قائم در اطراف تمامی مغارها آورده شده است. با توجه به مجموعه شکل (۱۳-۵) و (۵-۸) مشاهده می‌شود که با افزایش آزادسازی تنش‌های افقی از توده سنگ به طرف جداره مغار، مقدار جابجایی‌های افقی دیواره مغار افزایش یافته است. همچنین با افزایش آزادسازی تنش‌های قائم از توده‌سنگ به طرف جداره مغار، جابجایی‌های قائم در سقف و کف مغار نیز روند افزایشی نشان داده است.

درصد آزادسازی تنش در اطراف مغارها در جدول (۲-۵) آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۲-۵) مشاهده می‌شود در تمامی مغارها به جز مغار مدل شماره ۱، آزادسازی تنش قائم در سقف منجر به آزادسازی تنش افقی در سقف شده است. آزادسازی تنش افقی در گوشه بالای مغار مدل شماره ۱ منجر به تمرکز تنش قائم در آن قسمت شده است. باید توجه کرد که در مغارهای مدل‌های شماره ۲ و ۳، در گوشه‌های پایین و بالا، تمرکز تنش قائم و افقی وجود دارد. همچنین میزان آزادسازی تنش قائم در کف مغارهای مدل‌های شماره ۲ و ۳ بسیار زیاد است. بیشترین میزان آزادسازی تنش قائم مربوط به مغار مدل شماره ۴ و در سقف آن است. بیشترین میزان آزادسازی تنش افقی نیز قائم نیز مربوط به مغار مدل شماره ۴ و در دیواره آن است. بیشترین میزان آزادسازی تنش افقی نیز مربوط به مغار مدل شماره ۲ و در کف آن است. بیشترین میزان تمرکز تنش افقی نیز مربوط به مغار مدل شماره ۲ و در گوشه بالای آن است.



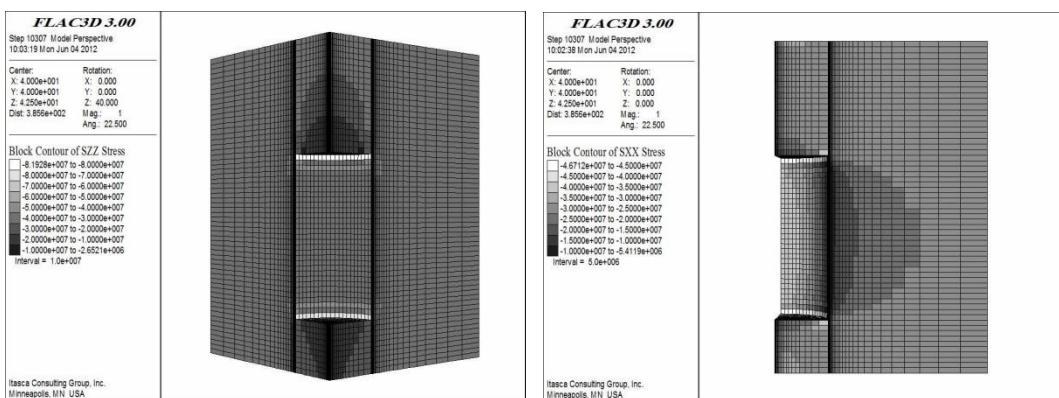
ب) کانتور تنش قائم مدل شماره ۱

الف) کانتور تنش افقی مدل شماره ۱



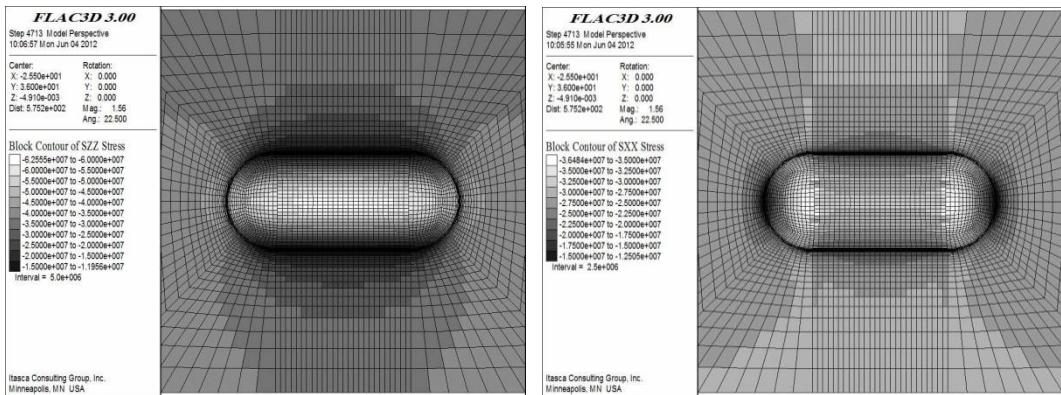
د) کانتور تنش قائم مدل شماره ۲

ج) کانتور تنش افقی مدل شماره ۲



ت) کانتور تنش قائم مدل شماره ۳

پ) کانتور تنش افقی مدل شماره ۳



و) کانتور تنش افقی مدل شماره ۴

ن) کانتور تنش افقی مدل شماره ۴

شکل (۱۳-۵): کانتورهای تنش افقی و قائم در اطراف مغارهای مدل‌های ۱ تا ۴

جدول (۱-۵): مقادیر درصد آزادسازی تنش در قسمت‌های مختلف مغار (اعداد مثبت نشان‌گر آزادسازی تنش و اعداد منفی نشان‌گر تمرکز تنش هستند)

کف	گوشه پایین		دیواره		گوشه بالا		سقف		درصد آزادسازی تنش	
	قائم	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی		
تنش										
۶۴/۷	-۱۲/۵	-۱۶/۹۹	۵۴/۵	-۲/۲۵	۵۴/۷	-۱۱/۳	۵۳/۶	۶۴/۹	-۱۴/۸	مدل ۱
۸۹	۵۷/۱	-۱۹/۴۴	-۳۲	-۰/۲۹	۵۵/۵	-۲۷/۵	-۳۳/۸	۷۶/۵	۵۳/۵	مدل ۲
۸۳	۴۳/۱۲	-۱۳/۱۳	-۲۶	-۰/۵۷	۵۶/۴	-۲۳/۳	-۳۱/۱	۹۰/۶	۴۹/۴۴	مدل ۳
۶۵/۶	۱۹/۶۴	۶۵/۱۸	۱۲/۹	-۵۴	۵۴/۲	۶۵	۹/۷	۶۴/۷	۲۲/۱۴	مدل ۴

## ۱۹-۵ انتخاب شکل مغار

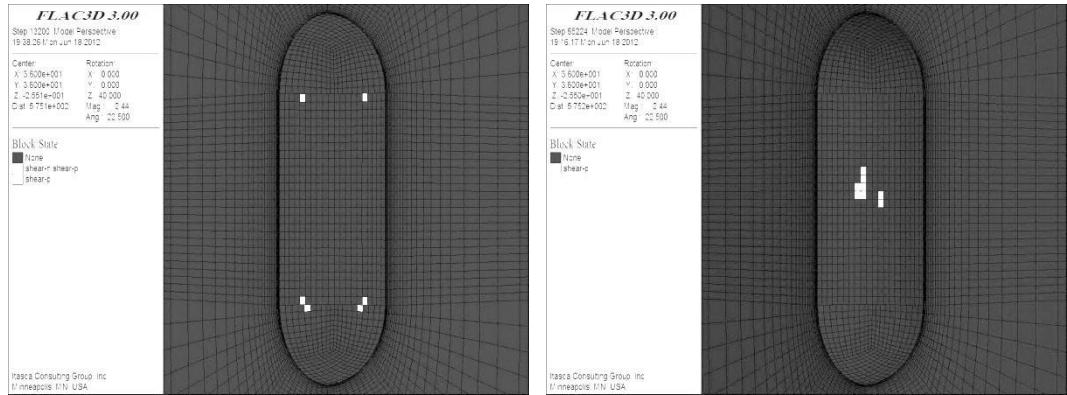
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، دو روش برای حفر مغار به روش انحلالی وجود دارد، تک‌چاهی و دوچاهی. ساخت مغار مدل شماره ۴ به روش حفر دوچاهی بسیار هزینه‌بر و دشوار است، زیرا علاوه بر دوچاه باید اتصال دهنده‌ای افقی نیز برای متصل نمودن دوچاه حفر شود. همچنین در شکل (۱۲-۵) نیز مشاهده شد که نواحی از سقف و کف و دیواره این مغار (مدل شماره ۴) تحت بارگذاری‌های وارد شده تسلیم شده است. بنابراین مدل شماره ۴ از گزینه‌های مورد نظر برای ساخت مغار ذخیره-

سازی گاز طبیعی در تشكیلات کربناته حذف می‌شود. مغارهای استوانه‌ای که به روش انحلالی تک-چاهی ساخته می‌شوند عموماً سقف کروی هستند، ولی در این تحقیق، برای بررسی تاثیر شکل و هندسه مغار بر پایداری آن، مغارها به صورت استوانه‌ای بدون سقف کروی نیز مدل شده‌اند. تمرکز تنش زیاد به خصوص تنش افقی در گوشه‌های مغارهای مدل‌های ۲ و ۳ (جدول ۲-۵) باعث بوجود آمدن نقاط تسلیم در گوشه‌ها، سقف و کف این مغارها شده است (شکل ۱۲-۵ ب و ج). با توجه به موارد اشاره شده و این‌که مغار مدل شماره ۱ با وجود تمرکز تنش زیاد در سقف، تسلیمی نشان نداده است (شکل ۱۲-۵ الف)، بنابراین مغار مدل شماره ۱ برای ساخت و ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشكیلات کربناته انتخاب شده است. بنابراین بررسی بیشترین و کمترین فشار گاز داخل مغار و نیز تحلیل حساسیت و پارامتری تنها بر روی مغار مدل شماره ۱ انجام شده است.

#### ۵-۲۰ بیشترین و کمترین فشار گاز داخل مغار

برای تحلیل پایداری مغار در برابر فشارهای گاز داخلی، فشار گاز داخل مغار با نسبت‌هایی افزایش پیدا کرده است. این نسبت به صورت  $\frac{\text{فشار گاز داخل مغار}}{\text{فشار هیدرواستاتیکی}}$  تعریف شده و با نماد  $P^*$  نشان داده شده است. فشار ابتدایی به صورت فشار هیدرواستاتیکی معادل  $0/9$  وزن ستون آب در عمق  $1300$  متری سطح زمین به داخل مغار اعمال شده است. فشار هیدرواستاتیکی داخل مغار ابتدا با گام‌های  $1/10 P^*$  افزایش (از مقدار اولیه ۱ تا ۲) پیدا کرده است. به دلیل مشاهده نشدن تسلیم، مقدار نسبت  $P^*$ ، به  $0/2$  افزایش پیدا کرده است (از مقدار ۲ تا ۵). همچنین برای بررسی پایداری مغار در فشارهای کمتر از فشار هیدرواستاتیکی، فشار داخلی مغار در نسبت‌های  $0/9$ ،  $0/8$ ،  $0/7$ ،  $0/6$ ،  $0/5$  و  $0/4$  فشار هیدرواستاتیکی اعمال شده است. با اعمال فشارهای بالا مشخص شد که اولین ناپایداری‌ها در فشاری معادل  $4/6$  برابر فشار هیدرواستاتیکی یعنی در فشار  $55/72$  مگاپاسکال اتفاق افتاده است (شکل ۵-۴، الف). همچنین ناپایداری در فشارهای کمتر از فشار هیدرواستاتیکی در فشاری معادل  $7/0$  برابر فشار هیدرواستاتیکی یعنی در فشار  $8/48$  مگاپاسکال رخ داده است (شکل ۱۴-۵، ب).

با توجه به شکل (۱۴-۵ الف و ب) مشاهده می‌شود که تسلیم در فشارهای بیشتر و کمتر از فشار هیدرواستاتیک به صورت تسلیم برشی بوده است. ناپایداری در حد پایین فشار به صورت تسلیم در حال و گذشته بوده است در صورتی که ناپایداری در حد بالای فشار به صورت تسلیم در گذشته بوده است.



الف) فشار داخلی مغار  $55/72$  مگاپاسکال است

شکل (۱۴-۵): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ برای فشارهای داخلی بیشتر و کمتر از فشار هیدرواستاتیک

مقادیر درصد آزادسازی تنش‌های افقی و قائم برای بیشترین و کمترین فشارهای گاز داخلی (نسبت به تنش‌های القایی پس از حفر و قبل از اعمال تغییرات فشار داخلی محاسبه شده است) در جدول (۳-۵) آورده شده است. با توجه به جدول (۲-۵) و (۳-۵) مشاهده می‌شود که افزایش فشار داخلی منجر به آزادسازی تنش‌های افقی در سقف و کف و تنش‌های قائم در گوشه‌های بالا و پایین و مرکز تنش‌های افقی در گوشه‌های پایین و بالا و دیواره و تنش‌های قائم در سقف و کف و دیواره مغار شده است. همچنین کاهش فشار داخلی منجر به آزادسازی تنش‌های قائم در سقف و کف و تنش‌های افقی در گوشه‌های بالا و پایین و دیواره و مرکز تنش‌های قائم در گوشه‌های پایین و بالا و تنش‌های افقی در سقف و کف شده است. باید توجه کرد که تغییرات در تنش قائم در دیواره در فشار  $8/48$  مگاپاسکال زیاد نبوده است. همچنین میزان تغییرات در مقدار تنش‌ها در حد بالای فشار گاز داخلی، بیشتر بوده است.

جدول (۳-۵): مقادیر درصد آزادسازی تنش در قسمت‌های مختلف مغار مدل شماره ۱ برای حد بالا و پایین فشار گاز داخلی (اعداد مشیت نشان‌گر آزادسازی تنش و اعداد منفی نشان‌گر تمرکز تنش هستند)

کف		گوشه پایین		دیواره		گوشه بالا		سقف		درصد آزادسازی تنش
تنش										
قائم	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی	قائم	افقی	فشار داخلی
-۳۲۳/۸	۷۵/۹	۱۱/۲	-۳۴۲/۴	-۲/۲	-۳۴۴	۳۴/۶	-۳۲۹/۵	-۳۵۵/۴	۷۷/۵	۵۵/۷۲ مگاپاسکال
۳۲/۹۲	-۷/۳	-۱/۹	۳۲/۹۶	+۱	۳۱	-۲/۵۹	۲۷/۴۴	۲۷/۹۳	-۶/۱	۸/۴۸ مگاپاسکال

## فصل ششم:

# تخلیل حساسیت و تخلیل پارامتری

## ۱-۶ مقدمه

همان طور که پیشتر نیز توضیح داده شده، عدم قطعیت در برآورد شرایط توده‌سنگ یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی سازه‌های زیرزمینی است. این پژوهش در مرحله مطالعات اولیه و امکان‌سنجی است، بنابراین امکان دسترسی به داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا یا آزمایشگاهی (مطالعات تکمیلی) مقدور نیست. از این‌رو طبیعی است که پارامترهای بکار برده شده در طراحی‌ها، مدل‌سازی‌های انجام شده و نتایج حاصل از آنها با درصدی از عدم قطعیت همراه باشد. در این فصل برای بررسی تاثیری که هر پارامتر می‌تواند بر میزان پایداری مغارها داشته باشد، تحلیلی بر حساسیت پارامترهای توده‌سنگ و پارامترهای طراحی و عملیاتی مهم‌تر انجام شده است. پارامترهای محیط و توده‌سنگ شامل نسبت تنش افقی به قائم، مقاومت برشی، مدول شکل‌پذیری و پارامترهای طراحی و عملیاتی شامل عمق قرارگیری و ابعاد مغار است.

برای انجام تحلیل حساسیت و پارامتری، تنها پارامتر مورد نظر تغییر می‌کند و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

## ۲-۶ تحلیل پارامتری

تحلیل پارامتری بر روی پارامترهای نسبت تنش افقی به قائم، مقاومت برشی و مدول شکل‌پذیری انجام شده است.

### ۲-۶-۱ نسبت تنش افقی به قائم

با توجه به نتایج حاصل شده در فصل ۵، مغار مورد نظر برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک و در عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین قرار گرفته و به شکل استوانه‌ای قائم با دو نیم‌کره در دو انتهای آن (مدل شماره ۱) است. نسبت تنش افقی به قائم ( $K$ ) با توجه به رابطه (۱-۶) معمولاً در بازه‌ی ۰/۴ تا ۰/۶۵ متغیر است (Hoek and Brown, 1980).

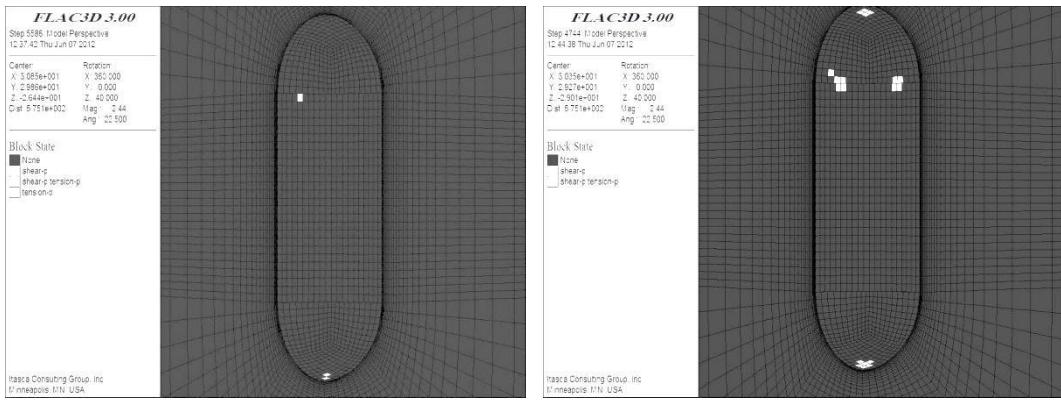
$$\frac{100}{z} + 0.3 < K < \frac{1500}{z} + 0.5 \quad (1-6)$$

بنابراین نسبت‌های بررسی شده برای تحلیل حساسیت شامل ۰/۴، ۰/۶، ۱ و ۰/۶ است.

در فصل ۵ و در شکل (۱۲-۵ الف) مشاهده شد که مغار مدل شماره ۱ با نسبت تنش افقی به قائم

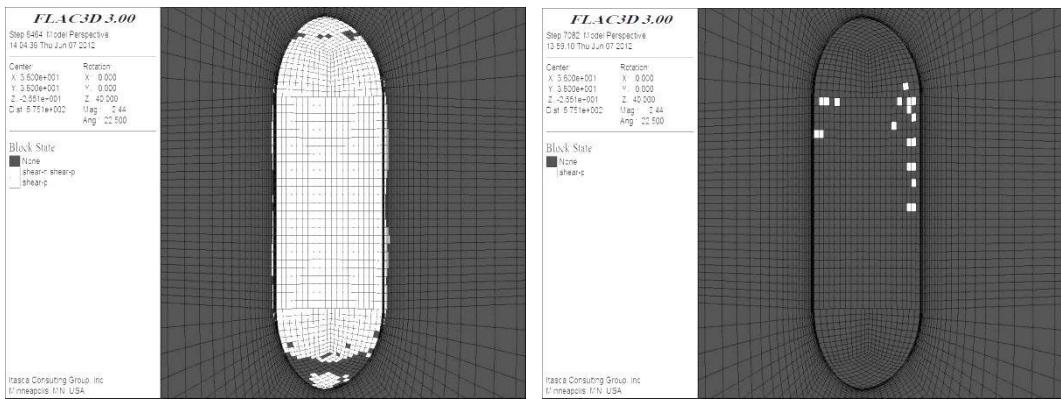
۰/۸ کاملاً پایدار است و هیچ‌گونه تسلیمی اتفاق نمی‌افتد.

همان‌طور که در مجموعه شکل (۱-۶) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان تسلیم‌شدگی مربوط به نسبت تنش افقی به قائم ۱/۶ (شکل ۱-۶ الف) و کمترین میزان تسلیم‌شدگی مربوط به نسبت ۰/۶ است (شکل ۱-۶ ب). در نسبت تنش افقی به قائم ۰/۴، قسمت‌هایی از سقف، کف و نواحی نزدیک به گوشه‌های بالا تسلیم شده‌اند. بنابراین زمانی که تنش‌های افقی بسیار کمتر از تنش‌های قائم هستند، تسلیم‌شدگی در قسمت‌هایی از مغار مشاهده خواهد شد. با افزایش مقدار تنش‌های افقی تا ۰/۸ برابر تنش‌های قائم، مساحت ناحیه تسلیم کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل (۱-۶ الف و ب) مشاهده می‌شود، مساحت ناحیه تسلیم در نسبت تنش افقی به قائم ۰/۶ نسبت به مساحت ناحیه تسلیم در نسبت تنش افقی به قائم ۰/۴ کاهش یافته و در نسبت تنش افقی به قائم ۰/۸، مساحت ناحیه تسلیم به صفر رسیده است. همان‌طور که در شکل (۱-۶ ج) مشاهده می‌شود، در نسبت تنش افقی به قائم ۱، قسمت‌هایی از بالای دیواره مغار تسلیم شده است. بنابراین، افزایش مقدار تنش‌های افقی از ۰/۸ برابر مقدار تنش‌های قائم تا حالتی که تنش‌های افقی و قائم به یک مقدار هستند، ناپایداری افزایش پیدا کرده است. باید توجه شود وقتی که تنش‌های افقی بسیار کمتر از تنش‌های قائم هستند، ناپایداری بیشتر در ناحیه سقف و کف مغار اتفاق می‌افتد ولی در نسبت‌های تنش افقی به قائم بزرگتر ناپایداری بیشتر در دیواره مغار رخ می‌دهد. با افزایش مقدار تنش‌های افقی و در حالتی که نسبت تنش افقی به قائم بیشتر از ۱ است، ناپایداری در بیشتر قسمت‌های مغار مشاهده می‌شود به‌طوری که در نسبت تنش افقی به قائم ۱/۶، مغار به شدت ناپایدار است و بیشتر نواحی مغار تسلیم شده‌اند. در این حالت احتمال نشت گاز به خارج از محدوده مغار وجود دارد.



ب) نسبت تنش افقی به قائم: ۰/۶

الف) نسبت تنش افقی به قائم: ۰/۴



د) نسبت تنش افقی به قائم: ۱/۶

ج) نسبت تنش افقی به قائم: ۱

شکل (۱-۶): گسترش ناحیه تسليم در اطراف مغار مدل شماره ۱ با نسبت‌های مختلف تنش افقی به قائم

نمودار مربوط به بیشترین جابجایی سقف و دیواره در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. با توجه به

شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، جابجایی سقف کمتر و دیواره

بیشتر شده است. بنابراین، بیشترین جابجایی سقف در  $K=0/4$  و بیشترین جابجایی دیواره در  $K=1/6$

رخ داده است. در این تحلیل، جابجایی سقف از ۳ سانتی‌متر در  $K=0/4$  با کاهش ۲۶ درصدی به ۲/۲

سانتی‌متر در  $K=1/6$  و جابجایی دیواره از ۱/۱۶ سانتی‌متر در  $K=0/4$  با افزایش ۱۷۲ درصدی به

۳/۱۷ سانتی‌متر در  $K=1/6$  رسیده است. بنابراین تغییرات نسبت تنش افقی به قائم در میزان تغییرات

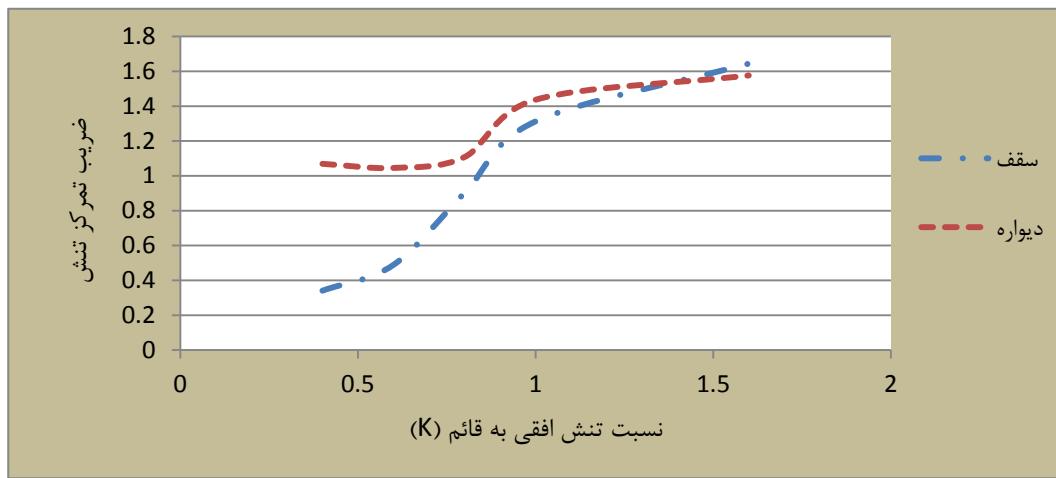
جابجایی دیواره نسبت به میزان تغییرات جابجایی سقف بیشتر بوده است.

در شکل (۳-۶) مقادیر تمرکز تنش (نسبت بیشترین تنش اصلی پس از حفاری به بیشترین تنش اصلی پیش از حفاری) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳-۶) فهمیده می‌شود که با افزایش نسبت تنش افقی به قائم، ضریب تمرکز تنش در دیواره و سقف مغار افزایش پیدا کرده است. بیشترین تنش القایی در دیواره مغار در  $K=1/6$  و به مقدار  $MPa = 85/33$  و کمترین مقدار تنش القایی در دیواره مغار در  $K=1/6$  و  $MPa = 37/28$  بوده است. بیشترین تنش القایی در سقف مغار در  $K=1/6$  و به مقدار  $MPa = 11/78$  و به مقدار  $MPa = 88/08$  و کمترین تنش القایی در سقف مغار در  $K=0/4$  و به مقدار  $MPa = 0/6$  بوده است. با توجه به مقادیر بیشترین و کمترین ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره در نسبت‌های مختلف تنش افقی به قائم و همچنین شبیه نمودارهای تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم، فهمیده می‌شود که تغییرات نسبت تنش افقی به قائم در میزان تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف بیشتر بوده است.



نسبت تنش افقی به قائم ( $K$ )

شکل (۲-۶): نمودار تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم

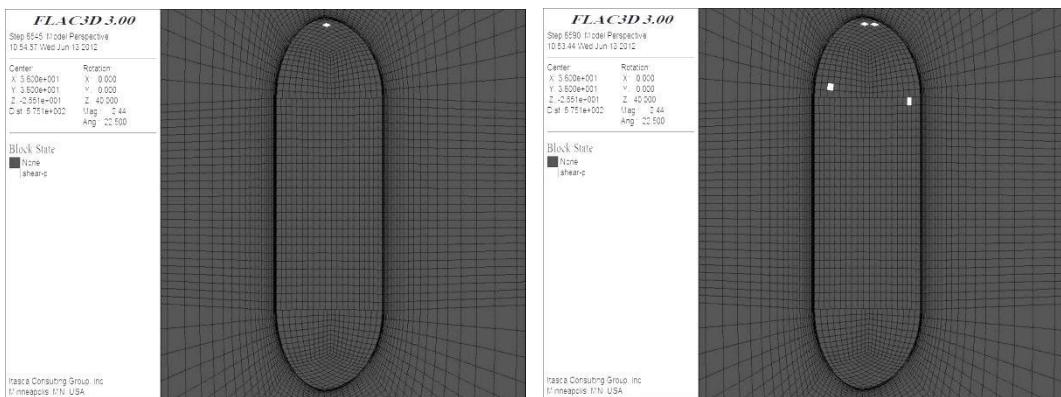


شکل (۳-۶): نمودار تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات نسبت تنش افقی به قائم

## ۲-۲-۶ چسبندگی

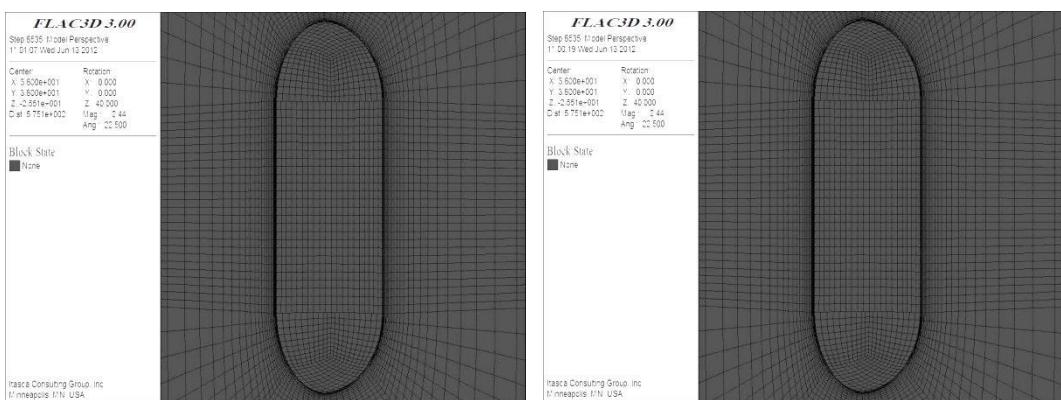
مقاومت برشی هر توده سنگ به زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی یا مقاومت برشی ذاتی آن توده-سنگ وابسته است. به دلیل تغییرات کم زاویه اصطکاک داخلی سنگ آهک، تحلیل حساسیت تنها بر روی چسبندگی انجام شده است. بازه تغییرات چسبندگی برای توده سنگ آهک بین  $+30^{\circ}$  و  $-30^{\circ}$  درصد حالت میانگین آن ( $6/72$  مگاپاسکال) یعنی بین  $4/7$  تا  $8/7$  مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از این تحلیل حساسیت در مجموعه شکل (۴-۶)، (۵-۶) و (۶-۶) مشاهده می‌شود. با توجه به مجموعه شکل (۴-۶) به خوبی مشاهده می‌شود که با کاهش چسبندگی، ناحیه تسلیم اطراف مغار گسترش یافته و باعث ناپایداری قسمت‌هایی از سقف و نواحی بالای دیواره مغار شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۶: الف و ب) مشاهده می‌شود، تسلیم‌های رخ داده، به صورت تسلیم در برش هستند، بنابراین با افزایش چسبندگی مقاومت برشی افزایش یافته و در نتیجه مساحت ناحیه تسلیم کاهش یافته است. همان‌طور که در شکل (۵-۶) و (۶-۶) مشاهده می‌شود، تغییرات چسبندگی باعث تغییرات زیادی در میزان جابجایی و تمرکز تنش نشده است.



ب) مقدار چسبندگی: ۵/۷ مگاپاسکال

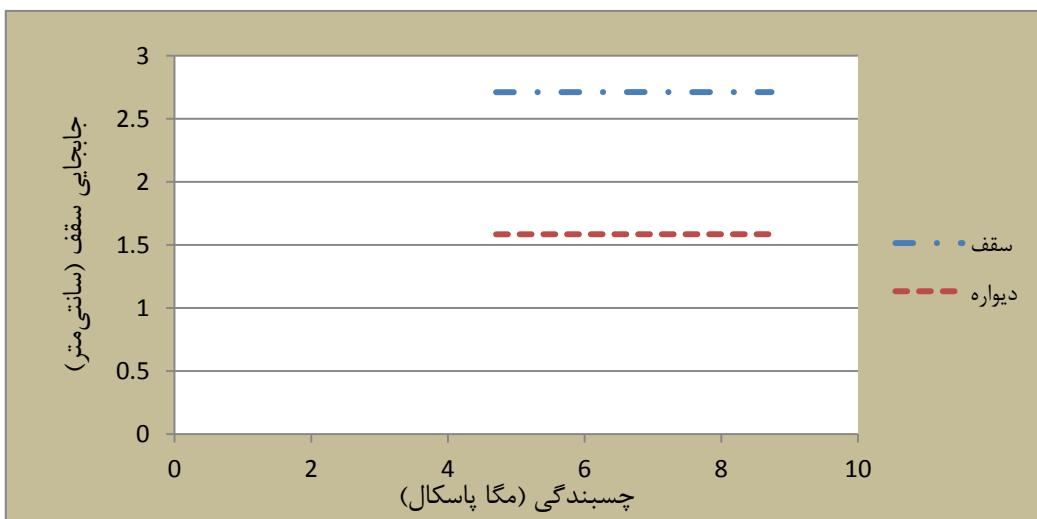
الف) مقدار چسبندگی: ۴/۷ مگاپاسکال



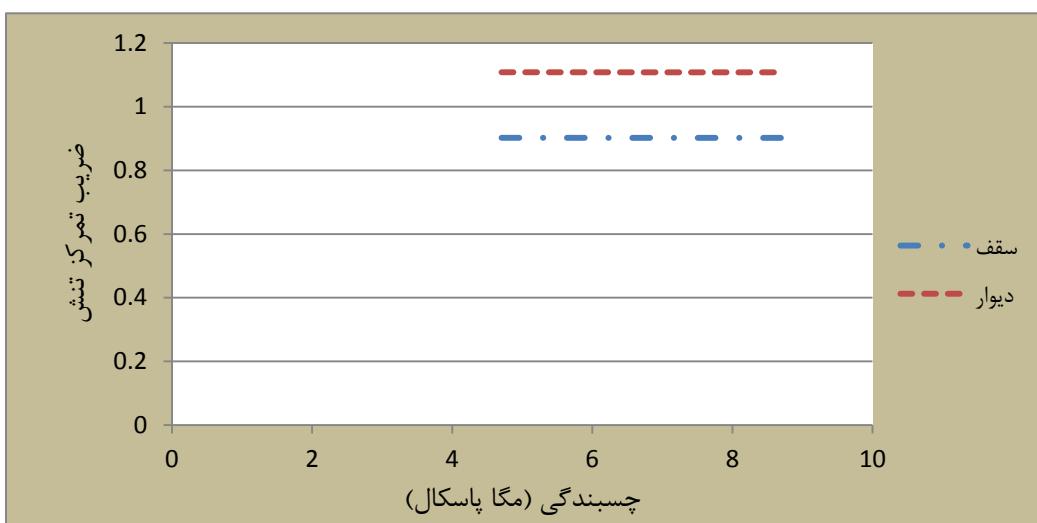
د) مقدار چسبندگی: ۸/۷ مگاپاسکال

ج) مقدار چسبندگی: ۷/۷ مگاپاسکال

شکل (۶-۴): گسترش ناحیه تسليیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ برای مقادیر مختلف چسبندگی



شکل (۶-۵): نمودار تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ در بازه چسبندگی ۴/۷ تا ۸/۷ مگاپاسکال

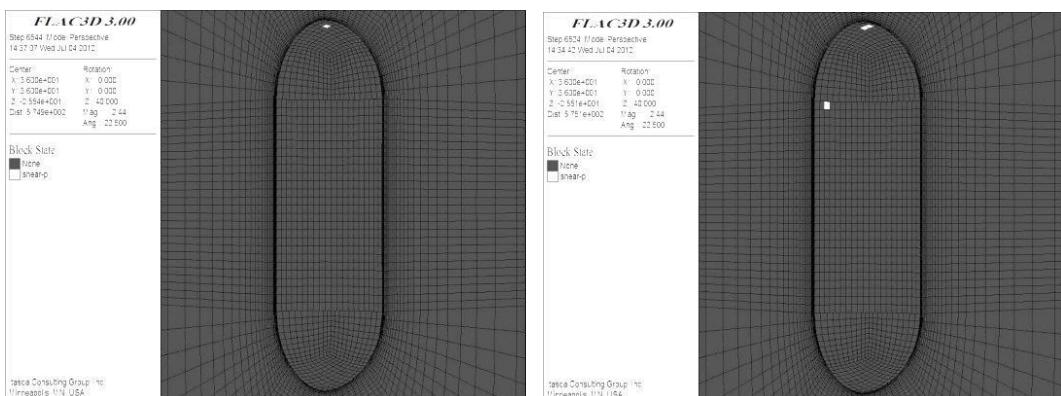


شکل (۶-۶): نمودار تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ در بازه چسبندگی  $4/7$  تا  $8/7$  مگاپاسکال

### ۳-۲-۶ مدول شکل‌پذیری

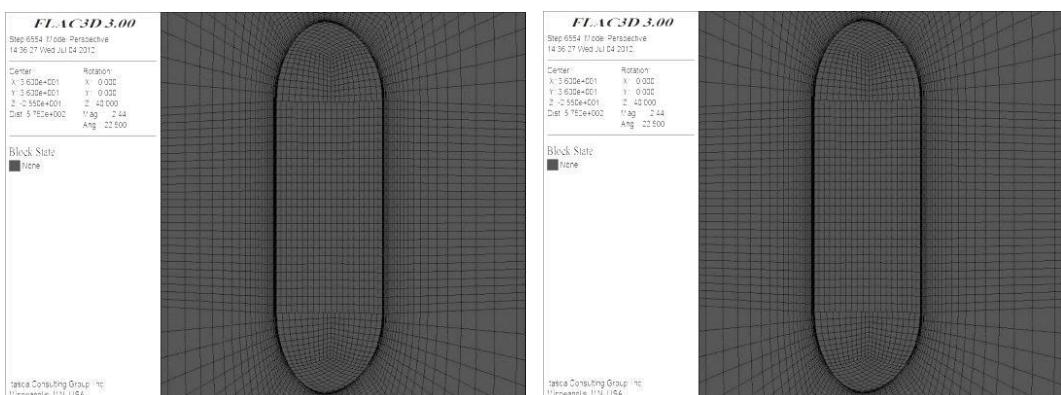
مدول شکل‌پذیری سنگ آهک در این تحقیق در بازه  $5/7$  تا  $5/11$  گیگاپاسکال (در رصدی  $80$  درصدی بیشتر و کمتر از مدول شکل‌پذیری مبنا به مقدار  $28/4$  گیگاپاسکال) تغییر کرده است. همان‌طور که در شکل (۷-۶) مشاهده می‌شود در مدول‌های شکل‌پذیری بسیار کم، قسمت‌هایی از سقف و نواحی بالایی دیواره مغار تسلیم شده است. ولی با افزایش مدول شکل‌پذیری از میزان ناپایداری کاسته شده است. به‌طور کلی، تغییرات مدول شکل‌پذیری تاثیر زیادی بر وضعیت پایداری مغار نداشته است. با توجه به شکل (۸-۶) فهمیده می‌شود که با کمتر شدن مدول شکل‌پذیری، جابجایی سقف و دیواره افزایش پیدا کرده است. میزان تغییرات جابجایی در مدول‌های شکل‌پذیری کمتر به‌ویژه در سقف مغار بسیار زیاد بوده است. ولی میزان تغییرات جابجایی در مدول‌های شکل‌پذیری بیشتر، کمتر شده است. افزایش مدول شکل‌پذیری از  $5/7$  تا  $5/11$  گیگاپاسکل باعث کاهش  $88/9$  درصدی جابجایی سقف مغار از  $13/5$  سانتی‌متر به  $1/5$  سانتی‌متر و کاهش  $88/9$  درصدی جابجایی دیواره مغار از  $7/9$  سانتی‌متر به  $0/9$  سانتی‌متر شده است. همان‌طور که در شکل (۹-۶) نیز مشاهده می‌شود، تغییرات مدول

شکل پذیری تاثیر زیادی بر روی وضعیت تنفس نداشته است و تمرکز تنفس وضعیت تقریباً ثابتی را نشان می‌دهد.



ب) مدول شکل پذیری = ۱۷ مگاپاسکال

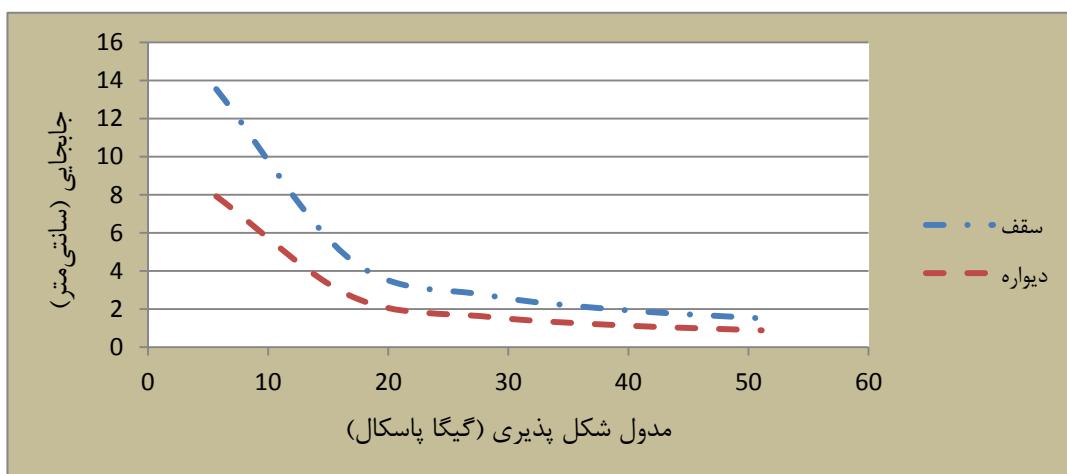
الف) مدول شکل پذیری = ۵/۷ مگاپاسکال



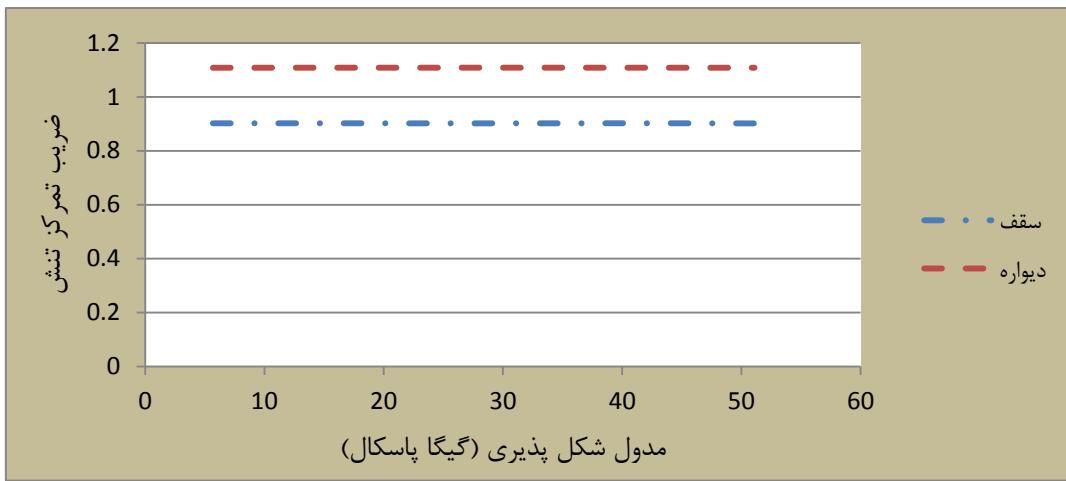
د) مدول شکل پذیری = ۵/۱۱ مگاپاسکال

ج) مدول شکل پذیری = ۳۹/۷ مگاپاسکال

شکل (۷-۶): گسترش ناحیه تسليیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ برای مدول‌های شکل پذیری مختلف



شکل (۸-۶): نمودار تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات مدول شکل پذیری



شکل (۹-۶): نمودار تغییرات ضریب تمثیل تنفس سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات مدول‌های شکل‌پذیری

### ۳-۶ تحلیل حساسیت

در این تحقیق تحلیل حساسیت نسبت به عمق و ابعاد مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته انجام شده است.

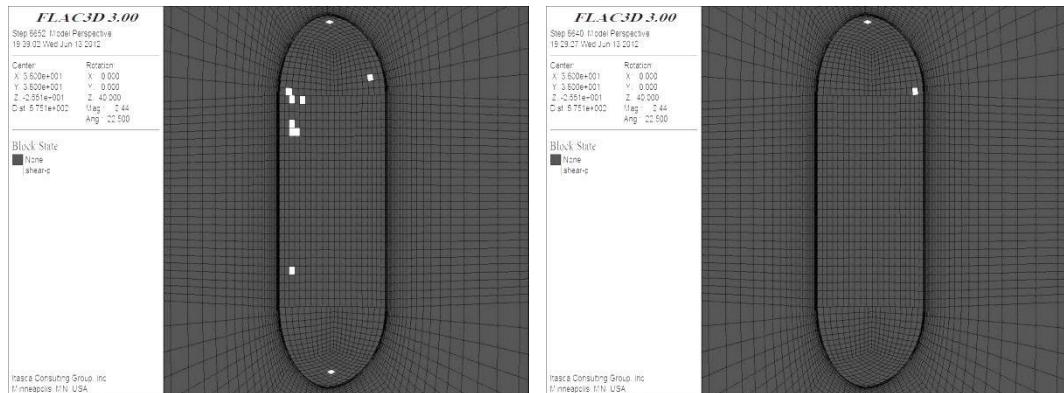
#### ۳-۶-۱ عمق

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، بازه‌ی تغییرات عمق برای ساخت مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته ۱۲۲۰ متر تا ۲۷۵۰ از سطح زمین در نظر گرفته شده است. بنابراین عمق‌هایی که در آنها تحلیل حساسیت انجام شده شامل ۱۶۰۰، ۱۹۰۰، ۲۲۰۰، ۲۴۰۰ و ۲۷۰۰ متری از سطح زمین است. نتایج حاصله در مجموعه شکل (۱۰-۶) و (۱۱-۶) نشان داده شده است.

در فصل ۵ مشاهده شد که مغار مدل شماره ۱ برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته در عمق ۱۳۰۰ از سطح زمین پایدار است و هیچ ناحیه‌ی تسلیمی در سقف، کف و دیواره‌ی مغار مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در مجموعه شکل (۱۰-۶) مشاهده می‌شود به تدریج با افزایش عمق قرارگیری مغار، قسمت‌هایی از سقف و نواحی بالایی دیواره مغار تسلیم شده است. با بیشتر شدن عمق قرارگیری مغار، مساحت ناحیه تسلیم نیز در اطراف مغار افزایش پیدا کرده، به‌طوری که در عمق ۱۹۰۰ از سطح زمین قسمت‌های بیشتری از سقف و دیواره مغار تسلیم شده است. در عمق

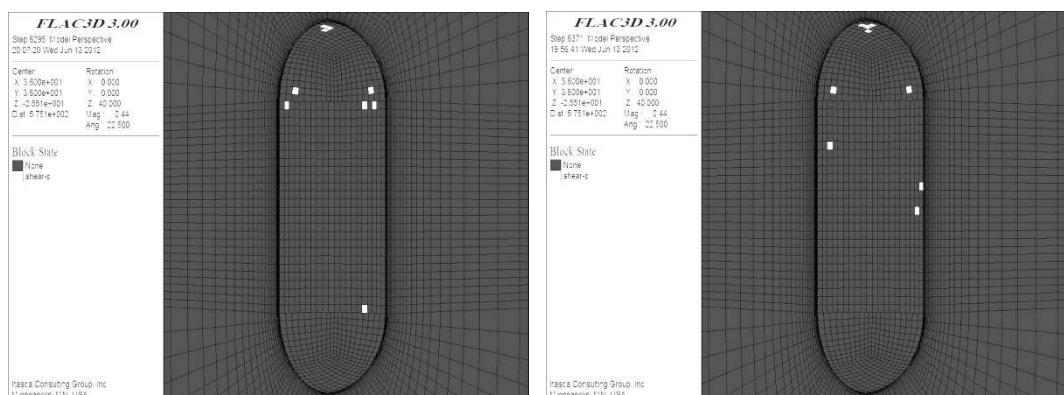
۲۷۰۰ متری از سطح زمین، قسمت‌های زیادی از دیواره و نیز بخش‌هایی از سقف و کف مغار تسليم

شده است (شکل ۱۰-۶ ن).



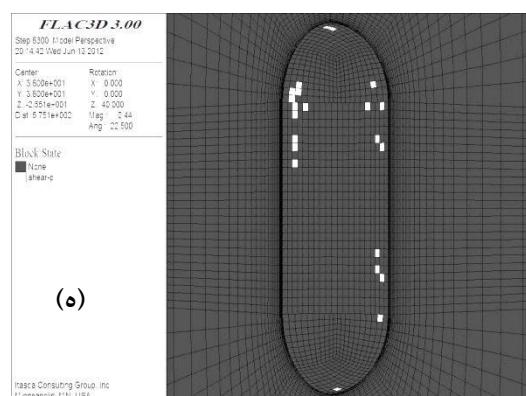
ب) عمق از سطح زمین = ۱۹۰۰ متر

الف) عمق از سطح زمین = ۱۶۰۰ متر



د) عمق از سطح زمین = ۲۴۰۰ متر

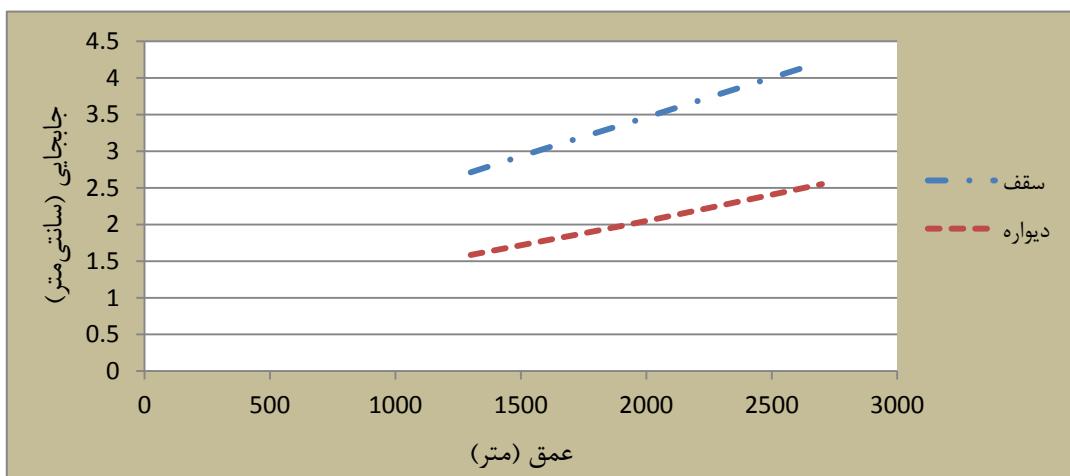
ج) عمق از سطح زمین = ۲۰۰۰ متر



ن) عمق از سطح زمین = ۲۷۰۰ متر

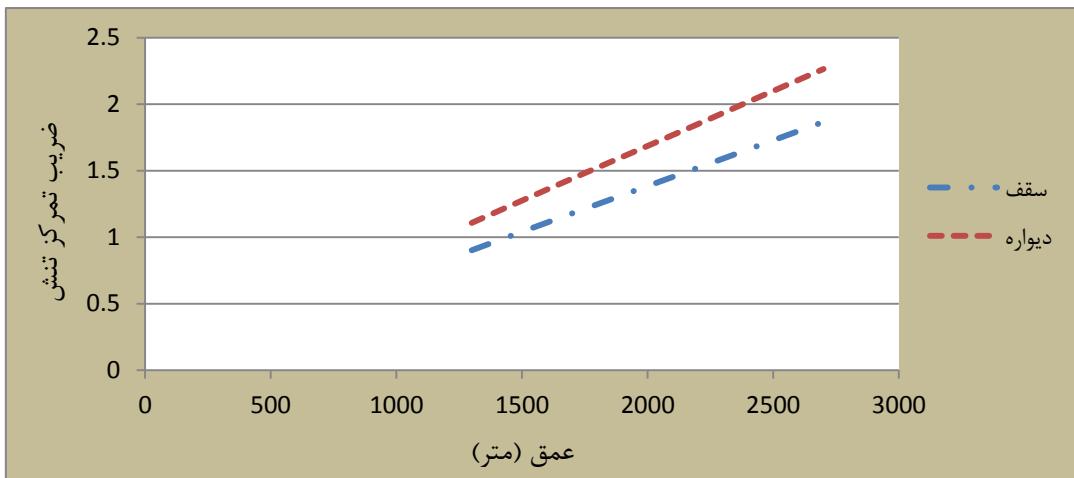
شکل (۱۰-۵): گسترش ناحیه تسليم در اطراف مدل شماره ۱ در اعماق مختلف

همان‌طور که در شکل (۱۰-۶) مشاهده می‌شود، افزایش عمق باعث افزایش جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ شده است. میزان تغییرات جابجایی در نتیجه تغییر عمق در سقف بیشتر از میزان تغییرات جابجایی در دیواره مغار بوده است. بیشترین میزان جابجایی سقف مغار در عمق ۲۷۰۰ متری زمین و به اندازه ۴/۲۲ سانتی‌متر و کمترین میزان جابجایی سقف در عمق ۱۳۰۰ متری زمین و به مقدار ۲/۷۱ سانتی‌متر بوده است، یعنی جابجایی سقف مغار رشدی ۵۵ درصدی داشته و در بازه‌ی ۲/۷۱ تا ۴/۲۲ سانتی‌متر تغییر کرده است. بیشترین میزان جابجایی دیواره مغار در عمق ۲۷۰۰ متری زمین و به اندازه ۲/۵۵ سانتی‌متر و کمترین میزان جابجایی دیواره مغار در عمق ۱۳۰۰ متری زمین و به اندازه ۱/۵۸ سانتی‌متر بوده است، یعنی جابجایی دیواره مغار رشدی ۶۱ درصدی داشته و در بازه‌ی ۱/۵۸ تا ۲/۵۵ سانتی‌متر تغییر کرده است.



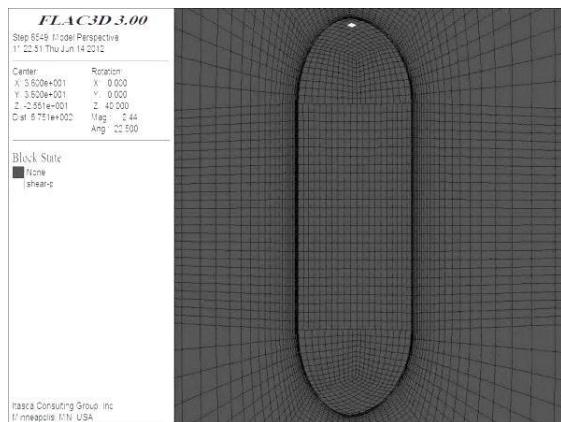
شکل (۱۰-۶): تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات عمق

با افزایش عمق قرارگیری مغار از ۱۳۰۰ تا ۲۷۰۰ متری سطح زمین، مقدار تنش اصلی حداکثر در سقف مغار از ۳۱ مگاپاسکال به ۶۵ مگاپاسکال رسیده است و در نتیجه ضریب تمرکز تنش با افزایشی ۱۰/۷ درصدی از ۰/۹ به ۱/۸۷ رسیده است. افزایش ۱۰/۸ درصدی عمق باعث افزایش مقدار تنش اصلی حداکثر در دیواره مغار از ۳۹ مگاپاسکال به ۸۱ مگاپاسکال نیز شده است. بنابراین ضریب تمرکز تنش دیواره مغار نیز با افزایشی ۱۰/۴ درصدی از ۱/۱ به ۲/۳ رسیده است (شکل ۱۱-۶).



شکل (۱۱-۶): تغییرات ضریب تمرکز تنفس سقف و دیواره مدل شماره ۱ نسبت به تغییرات عمق

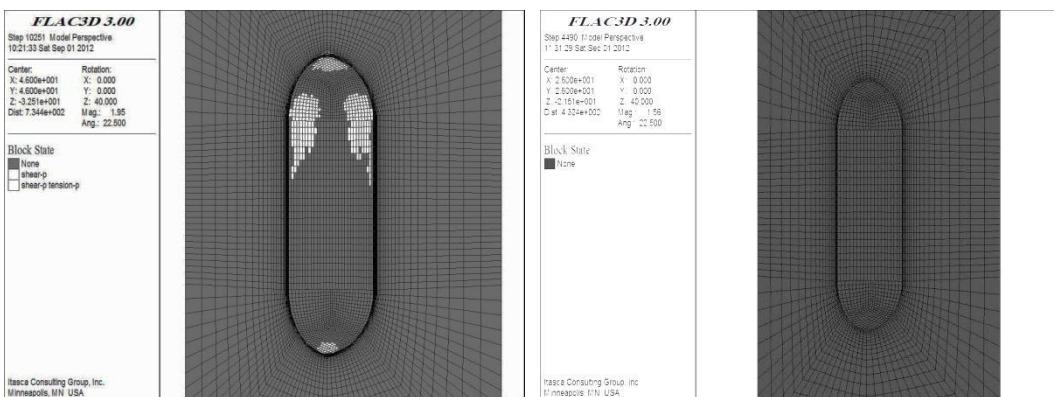
با توجه به این‌که مغار مدل شماره ۱ در عمق ۱۳۰۰ متری سطح زمین پایدار است و ناپایداری در عمق ۱۶۰۰ متری مشاهده شده است، بنابراین مدل‌سازی در اعماق ۱۳۳۰، ۱۳۵۰، ۱۳۷۰، ۱۴۰۰، ۱۴۳۰، ۱۴۵۰، ۱۴۷۰، ۱۵۰۰، ۱۵۳۰، ۱۵۵۰، ۱۵۷۰ و ۱۶۰۰ بهمنظور بررسی عمقی که در آن ناپایداری در محیط مغار شروع شده، انجام شده است. در نتیجه این تحلیل، ناپایداری در عمق ۱۴۰۰ متری در اطراف مغار مشاهده شده است (شکل ۱۲-۶). همان‌طور که در شکل (۱۲-۶) مشاهده می‌شود، قسمتی از سقف مغار تسلیم شده است که این تسلیم‌شدگی در برش بوده است.



شکل (۱۲-۶): گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار مدل شماره ۱ در عمق ۱۴۰۰ متری زمین

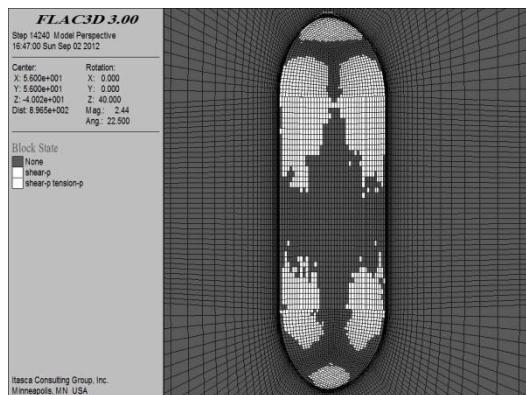
## ۶-۳-۲ ابعاد مغار

به منظور بررسی تاثیر تغییر ابعاد مغار بر روی پایداری مغار، تحلیل حساسیت بر روی ابعاد مغار انجام شده است (نسبت ارتفاع به قطر ثابت در نظر گرفته شده است). برای رسیدن به این منظور، قطر مغار در بازه ۲۶ متر تا ۵۶ متر و ارتفاع مغار در بازه ۴۳ متر تا ۸۰ متر تغییر کرده است. در نتیجه تغییر ابعاد مغار، حجم مغار در بازه ۳۲۰۰۰ تا ۲۹۰۰۰ متر مکعب تغییر کرده است. همان‌طور که در شکل (۱۳-۶) مشاهده می‌شود، افزایش ابعاد مغار باعث گسترش ناحیه تسليم در قسمت‌های بالایی دیواره، سقف و کف مغار شده است. بیشترین ناپایداری مربوط به مغار با قطر ۵۶ متر و ارتفاع ۸۰ متر بوده است. ناپایداری به صورت تسليم‌شدگی در گذشته و حال و در حالت برش و کشش بوده است. با توجه به شکل (۱۴-۶) مشاهده می‌شود که افزایش ۱۱۵ درصدی قطر و ۸۶ درصدی ارتفاع مغار باعث افزایش ۲۱۲ درصدی جابجایی سقف از ۱/۸ سانتی‌متر تا ۵/۵ سانتی‌متر و ۲۰۷ درصدی جابجایی دیواره مغار از ۱/۰۵ تا ۳/۲ سانتی‌متر شده است. با توجه به شکل (۱۵-۶) مشاهده می‌شود که تغییر ابعاد مغار تاثیر زیادی بر میزان ضریب تمرکز تنفس سقف و دیواره مغار نداشته است. اگرچه، تغییرات ضریب تمرکز تنفس سقف و دیواره مغار بیشتر از تغییرات جابجایی و ضریب تمرکز تنفس سقف و دیواره مغار نسبت به تغییرات قطر مغار نشان داده شده است.



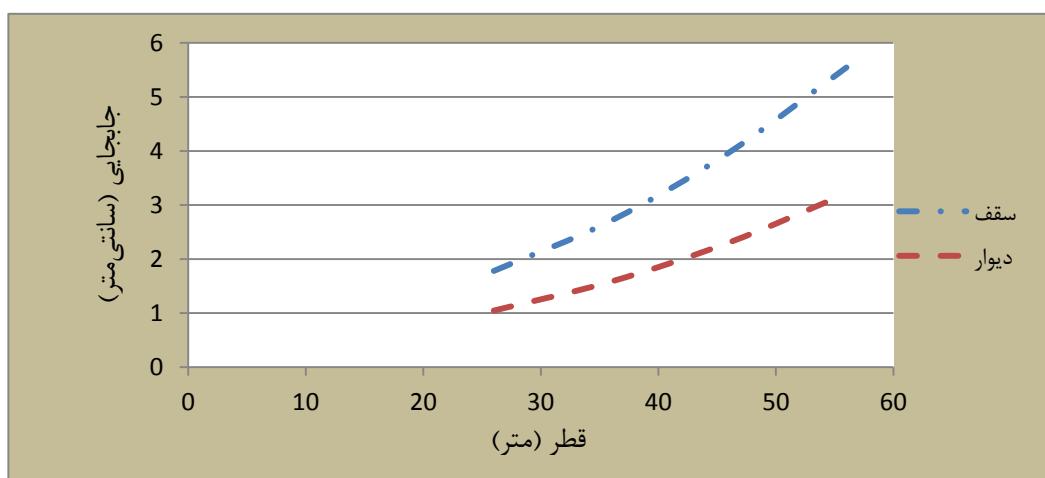
ب) قطر مغار: ۴۶ متر، ارتفاع مغار: ۶۵ متر

الف) قطر مغار: ۲۶ متر، ارتفاع مغار: ۴۳ متر

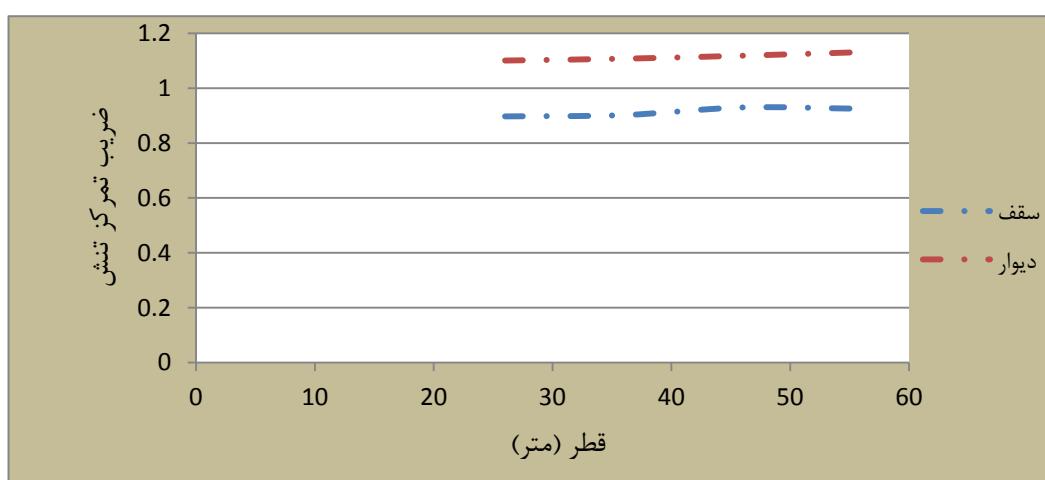


ج) قطر مغار: ۲۸ متر، ارتفاع مغار: ۸۰ متر

شکل (۱۳-۶): گسترش ناحیه تسليم در اطراف مغار برای ابعاد مختلف



شکل (۱۴-۶): تغییرات جابجایی سقف و دیواره مغار نسبت به تغییرات ابعاد مغار



شکل (۱۵-۶): تغییرات ضریب تمرکز تنش سقف و دیواره مغار نسبت به تغییرات ابعاد مغار

## ۵-۶ نتیجه‌گیری

در فصل ۵ مشاهده شد مغار مدل شماره ۱ که در توده‌سنگ آهک با خصوصیات مشخص (جدول ۵-۱) و در عمق ۱۳۰۰ متری از سطح زمین با نسبت تنش افقی به قائم ۰/۸ قرار دارد، پایدار است و هیچ‌گونه ناحیه تسلیمی در آن مشاهده نمی‌شود. از آن جایی که خصوصیات توده‌سنگ آهک در اعماق زیاد به طور واضح و کامل مشخص نیست و با عدم قطعیت همراه است، بنابراین تحلیل پارامتری بر روی پارامترهای محیط و توده‌سنگ شامل نسبت تنش افقی به قائم، چسبندگی و مدول شکل‌پذیری و تحلیل حساسیت بر روی عمق و ابعاد مغار انجام شده است. در نتیجه این تحلیل‌ها مشخص شد که افزایش نسبت تنش افقی به قائم باعث گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار، جابجایی دیواره و ضریب تمکز تنش در دیواره و سقف مغار شده است. ولی افزایش نسبت تنش افقی به قائم، باعث کاهش جابجایی در سقف مغار شده است. همچنین مشاهده شد که تغییر چسبندگی، مدول شکل‌پذیری و مقاومت برشی ذاتی توده‌سنگ تاثیر چندانی بر میزان جابجایی و تمکز تنش نداشته است. بنابراین در میان پارامترهای توده سنگ حساس‌ترین پارامتر، نسبت تنش افقی به قائم است. در ادامه، تحلیل حساسیت بر روی عمق و ابعاد مغار انجام شده است که مشاهده شد، با افزایش عمق میزان جابجایی و تمکز تنش در سقف و دیواره مغار افزایش یافته است. همچنین افزایش عمق باعث گسترش ناحیه تسلیم در اطراف مغار شده است. به منظور پیدا کردن عمقی که در آن ناپایداری در مغار مدل شماره ۱ ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته شروع شده، تحلیل پایداری نسبت به عمق‌های مختلف در بازه ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ متری از سطح زمین انجام شده است. در نتیجه، اولین نشانه‌های ناپایداری در عمق ۱۴۰۰ متری سطح زمین و در سقف مغار مشاهد شده است. افزایش قطر و ارتفاع مغار و در نتیجه افزایش حجم مغار باعث افزایش میزان جابجایی سقف و دیواره مغار شده است. ولی افزایش ابعاد مغار تاثیر زیادی بر میزان ضریب تمکز تنش سقف و دیواره مغار نداشته است. با افزایش ابعاد مغار، مساحت ناحیه تسلیم در محیط مغار افزایش یافته است.

## فصل هفتم:

### جمع‌بندی نتایج و ارایه پیشنهاده

## ۱-۷ جمع‌بندی

امروزه در بسیاری از مناطق جهان، ذخیره‌سازی گاز طبیعی در اعمق زمین انجام می‌شود. در حال حاضر ذخایر نفت و گاز تهی شده، منابع آبخوان و مغارهای نمکی، سه نوع اصلی روش‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ساختارهای زمین‌شناسی هستند. سایر روش‌ها شامل، معادن متروکه و مغارهای سنگ سخت هستند.

روش دیگری که در این پژوهش نیز استفاده شده و هم‌اکنون در مرحله تحقیقات است، ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ساختارهای آهکی (کربناته) است. نیاز به درخواست زیاد گاز طبیعی در مناطقی که امکان استفاده از روش‌های فوق وجود ندارد، ذخیره‌سازی گاز در نزدیکی بازارهای مصرف، ذخیره‌سازی گاز و استفاده از آن برای مدت زمان طولانی با توجه همگرایی کم مغارهای آهکی و نیز ذخیره‌سازی امن به لحاظ پدافند غیرعامل، استفاده از این روش جدید را توجیه می‌کند.

طبق تحقیقات انجام شده توسط دانشگاه کلمسون آمریکا، عمق مناسب برای استفاده از این روش در بازه ۱۲۲۰ تا ۲۷۵۰ متری سطح زمین تشخیص داده شده است. روش به صورت حفر چاه به عمق مورد نظر، ایجاد شکستگی و درزه و ترک (ترک‌های هیدرولیکی) در صورت نیاز در سنگ، تزریق اسید تازه (هیدروکلریک اسید) به داخل چاه برای شستن و حل کردن سنگ آهک در اسید و در نهایت خارج کردن باقی‌مانده اسید و نمک حاصل شده است.

در این روش، ابتدا باید مناطقی که احتمال حضور توده‌سنگ آهک در عمق‌های موردنظر وجود دارد را مشخص کرد. مناطق موردنظر باید دارای تکتونیک آرام و نزدیک به خطوط انتقال گاز باشند. با توجه به جمعیت و مصرف زیاد گاز استان تهران و همچنین تمرکز خطوط انتقال گاز در اطراف این استان، مکان‌هایی در اطراف استان تهران و همچنین استان‌های نزدیک آن مانند قزوین و قم انتخاب شده است که با توجه به وضعیت تکتونیکی زمین، ضخامت لایه آهکی و فاصله تا خطوط انتقال گاز، قسمت‌هایی از جنوب شرق و شمال شرق استان قزوین مناسب‌تر تشخیص داده شده است. غرب و

جنوب شهر قم نیز شرایط لازم برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در تشکیلات کربناته برای اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متری از سطح زمین را دارد.

غارها، شکل‌ها و ابعاد مختلفی می‌توانند داشته باشند. در این پژوهش چهار نوع غار تحلیل شده است. غار مدل شماره ۱ به صورت استوانه‌ای قائم با شعاع ۱۸ متر و ارتفاع ۵۱ متر و با دو نیم-کره در دو انتهای آن است. غار مدل شماره ۲ به صورت استوانه‌ای قائم با شعاع ۱۸ متر و ارتفاع ۵۱ متر است. غار مدل شماره ۳ به صورت استوانه‌ای قائم با شعاع ۲۰ متر و ارتفاع ۶۲ متر است. غار مدل شماره ۴ به صورت استوانه‌ای افقی با شعاع ۱۸ متر و طول ۵۱ متر و با دو نیم‌کره به شعاع ۱۸ متر در دو انتهای آن است. غارهای مدل‌های ۱ تا ۳ را می‌توان از طریق معدن‌کاری انحلالی تک-چاهی ایجاد کرد. ولی غار مدل ۴ از طریق معدن‌کاری انحلالی دوچاهی ایجاد می‌شود. عمق تحلیل-شده برای تمامی غارها، ۱۳۰۰ متری سطح زمین در نظر گرفته شده است. با توجه به عمق مورد نظر و نیز میزان ذخیره‌سازی حدود ۱۴ میلیون متر مکعب گاز طبیعی، حجمی در حدود ۷۶۰۰۰ متر مکعب برای غار مدل ۱ و ۴، حدود ۵۲۰۰۰ متر مکعب برای غار مدل شماره ۲ و حدود ۷۸۰۰۰ متر مکعب برای غار مدل شماره ۳ در نظر گرفته شده است. توده‌سنگ آهک در نظر گرفته شده نیز دارای مدول شکل‌پذیری حدود ۲۸ گیگاپاسکال، وزن حجمی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت تنفس افقی به قائم، ۰/۸ است.

پس از انجام مدل‌سازی و تحلیل عددی، جابجایی و کرنش سقف، کف، گوشه بالا، گوشه پایین و دیواره، درصد آزادسازی تنفس و همچنین گسترش ناحیه تسلیم در اطراف تمامی غارها بررسی شد. در نتیجه مدل‌سازی مشاهده شد که در تمامی غارها در عمق ۱۳۰۰ متری زمین به استثنای غار مدل شماره ۱، قسمت‌هایی از سقف و دیواره غار تسلیم شده است. با توجه به وضعیت پایداری غارها، غار مدل شماره ۱ برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سنگ آهک در عمق ۱۳۰۰ متری زمین در نظر گرفته شده است. همچنین برای اطلاع از بیشترین و کمترین میزان فشار مجاز ذخیره‌سازی، تغییرات در فشار داخلی غار برای مشاهده تسلیم‌شدگی در دیواره غار انجام شده است. اولین نشانه-

های ناپایداری در فشارهای ۵۵/۷۲ مگاپاسکال (حد بالای فشار) و ۸/۴۸ مگاپاسکال (حد پایین فشار) مشاهده شده است.

با توجه به این که داده‌های استفاده شده در این پژوهش به دلیل عدم دسترسی به داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا یا آزمایشگاهی با عدم قطعیت همراه است، بنابراین تحلیل حساسیت و پارامتری بر روی پارامترهای مفروض شامل نسبت تنش افقی به قائم، مقاومت برشی و مدول شکل-پذیری و پارامترهای طراحی و عملیاتی شامل عمق و بعد مغار انجام شده است. در فرایند تحلیل پارامتری، نسبت تنش افقی به قائم و مدول شکل پذیری به عنوان موثرترین پارامترها شناخته شده است. نسبت تنش افقی به قائم بیشترین تاثیر را در گسترش ناحیه تسلیم و میزان تمرکز تنش در سقف و کف و مدول شکل پذیری بیشترین تاثیر را در میزان جابجایی داشته است. در تحلیل حساسیت نیز، عمق تاثیر زیادی را در گسترش ناحیه تسلیم، میزان جابجایی و تمرکز تنش داشته است. همچنین اولین عمقی که در آن ناپایداری مشاهده شده، ۱۴۰۰ متری سطح زمین است. تغییر بعد مغار نیز تاثیر زیادی را در گسترش ناحیه تسلیم داشته است.

## ۲-۷ پیشنهادها

در این پژوهش برای برآورد پارامترهای مورد نیاز طراحی از روش تجربی و همچنین داده‌های موجود در منابع مختلف استفاده شده است. هر چند تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای توده‌سنگ انجام شده است، ولی اطلاع از مقادیر دقیق پارامترها می‌تواند به طراحی صحیح و بادقت بیشتر مغار کمک کند. بهتر است که داده‌های استفاده شده در طراحی از توده‌سنگ مکانی که قرار است مغار در آنجا ساخته شود، حاصل شود. بدیهی است برای رسیدن به این منظور باید آزمایش‌هایی را بر روی توده-سنگ بدست آمده از اعمق زمین، انجام داد.

در این تحقیق برای تشخیص مکان‌هایی با احتمال حضور توده‌سنگ آهک در اعمق بیشتر از ۱۰۰۰ متری سطح زمین، از نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده شده است. هر چند که این نقشه‌ها تا حدودی اطلاع از وضعیت زمین در اعمق مختلف می‌دهند، ولی مطمئناً دقیق نیستند. برای اطمینان

دقیق از حضور تودهسنگ آهک با ضخامت کافی در عمق‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح زمین می‌توان از داده‌های حاصل از نمونه‌گیری عمقی یا GIS استفاده کرد.

پارامترهایی وجود دارند که برای بررسی پایداری در طراحی مغار مهم هستند ولی در این پژوهش در نظر گرفته نشده‌اند. مغارهای مدل شده همه در یک ساختار آهکی همگن و همسانگر فرض شده‌اند. ناهمگنی در تشکیلات یا تعامل با تشکیلات مجاور با سنگ‌شناسی مختلف، می‌تواند بر پایداری مغار تاثیر بگذارد. خصوصیات فیزیکی ساختار آهکی عامل موثری در تحلیل پایداری مغار است و تاثیرات پوروالاستیک<sup>۱</sup> نیز می‌توانند در این زمینه نقش داشته باشند. گسل‌ها نیز تاثیر زیادی بر روی پایداری مغار دارند. همچنین تمام ملاحظات و مدل‌سازی‌ها برای تودهسنگ آهک در نظر گرفته شده است، در صورتی که دولومیت نیز قابلیت لازم را برای ذخیره‌سازی گاز دارد.

بعد از حفر چاههای اولیه و پیش از تزریق اسید، می‌توان برای استفاده بهتر از اسید و نیز اندازه‌گیری میزان تنش‌های برجا، درزه و ترک‌هایی را به صورت هیدرولیکی در سنگ ایجاد کرد. این کار همچنین باعث افزایش نرخ تزریق اسید می‌شود. تزریق اسید با سرعتی بیشتر از جریان سیال در ساختار باعث افزایش فشار می‌شود. اگر این فشار از مقاومت کششی سنگ بیشتر شود باعث شکست سنگ و در نتیجه درزه و ترک‌هایی در سنگ می‌شود. خصوصیات سیالی که برای اعمال درزه و ترک استفاده می‌شود، سرعت سیال، خصوصیات درزه و ترک‌های طبیعی سنگ، خصوصیات فیزیکی توده-سنگ آهک، نرخ تزریق، اختلاف تنش، ضخامت لایه‌های مجاور و پارامترهای دیگر، باید تعیین شوند و در مدل‌سازی درزه و ترک‌ها آورده شوند.

نشت اسید و یا دی‌اکسیدکربن از داخل مغار علاوه بر ناپایداری مغار می‌تواند مشکلات زیادی را به وجود بیاورد. در صورتی که این اسید به آب‌های زیرزمینی راه پیدا کند، باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی خواهد شد. بنابراین باید از وضعیت آب‌های زیرزمینی به طور دقیق اطلاع حاصل شود.

<sup>۱</sup> - poroelastic

در این تحقیق فرض شده است که تمامی مغارها کاملا در تودهسنگ آهک قرار گرفته‌اند و همچنین تودهسنگ آهک به راحتی در اسید حل می‌شود. ولی ممکن است که ناخالصی‌هایی در ترکیبات کربناته وجود داشته باشند که در فرایند اسیدشویی مزاحمت ایجاد کنند. این ناخالصی‌ها هرچند از نشت اسید جلوگیری می‌کنند، ولی ممکن است در ساخت مغار با شکل و هندسه موردنظر مشکل ایجاد کنند. بنابراین باید یا اسید بیشتری استفاده کرد یا نوع اسید مصرفی را تغییر داد که این خود باعث هزینه‌هایی خواهد شد.

برای کنترل شکل مغار در حین فرایند اسیدشویی باید سرعت و خصوصیات موج فشار انعکاس و انكسار یافته در سر چاه تعیین شود. برای اطمینان از میزان سرعت و دیگر خصوصیات موج فشار در هر سیالی ( $\text{CO}_2$ ، اسید، نمک حاصله و یا ترکیبی از آنها)، می‌توان آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌هایی را انجام داد و بدین ترتیب معادلاتی را برای موج فشار بدست آورد.

# مناج

## منابع فارسی

پایگاه ملی داده‌های علمی زمین کشور، (۱۳۸۶)، "ژئوپریسیم قسم" ،

<http://www.ngdir.ir/GeoportalInfo/PSubjectInfoDetail.asp?PID=1061&index=39>

پیک ایران، (۱۳۸۹)، "عقب نشینی در میدان رقابت بزرگترین میدان‌نفتی و گازی ایران مشترک است عراق از ایران

در حال پیشی‌گرفتن است" ، [www.peykeiran.com/Content.aspx?ID=14021](http://www.peykeiran.com/Content.aspx?ID=14021)

ترازname انرژی کشور، (۱۳۸۷). چاپ صفا. تهران، وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، شماره کتاب‌شناسی ۲۰۳۳۹۲۹. ص ۱۰۵ - ۱۴۵.

جامعه اطلاعاتی خانواده بزرگ صنایع شیمیایی، (۱۳۸۸)، "مخازن نفتی و گازی مشترک ایران با کشورهای همسایه در

حوضه زاگرس" . <http://www.pronet.ir/index.php?module=content&func=viewpage&pageid=727>

جامعه اطلاعاتی خانواده بزرگ صنایع شیمیایی (۱۳۸۹)، "اكتشافات مخازن جدید نفتی و گازی در ایران" ،

<http://www.pronet.ir/index.php?module=content&func=viewpage&pageid=946>

حسن‌زاده، ج، اسماعیلی‌فرد، صغیری، طریفی، زویا، (۱۳۷۷)، "داده‌های زمین‌گرمایی ایران و تعبیرهای زمین‌ساختی

آن" ، ماهنامه فیزیک زمین و فضا، ج ۲۴، شماره‌های ۱ و ۲، ص ۲۸ - ۳۰

داود آبادی، م.، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه ارشد، "طریقی اولیه هندسی، تحلیل پایداری و تعیین سامانه نگهداری مغاره‌ای

ذخیره‌سازی نفت خام، مطالعه‌ی موردی: مغاره‌ای ذخیره‌سازی نفت خام در بندر گناوه" ، دانشکده معدن،

نفت و ژئوفزیک، دانشگاه صنعتی شاهروд.

ربانی، ا.، یونسی، م.، (۱۳۸۴)، "بررسی منشاء سولفید هیدروژن در مخازن گاز طبیعی ایران" ، نهمین سخنرانی علمی

ماهانه‌ی واحد آموزش‌های علمی تکمیلی و ارتباطات دانشگاه مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز

ایران

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، "اطلس‌های زمین‌شناسی ایران" ،

[http://www.gsi.ir/Download/WebsiteId\\_5/Lang\\_fa/Page\\_76-02/](http://www.gsi.ir/Download/WebsiteId_5/Lang_fa/Page_76-02/)

سعادت میرقدیم، س. ن، کوچکی، احسان، (۱۳۹۰)، "ذخیره‌سازی گاز طبیعی با استفاده از تکنولوژی LRC" ، اولین

کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، شاهروド: دانشگاه صنعتی شاهرود

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، (۱۳۸۵)، "توسعه میدان پارس شمالی شتاب می‌گیرد" ،  
[www.shana.ir](http://www.shana.ir)

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، (۱۳۸۵)، "امضای قرارداد توسعه میدان های گازی فردوسی و گلشن" ،  
[www.shana.ir](http://www.shana.ir)

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، اداره کل روابط عمومی وزارت نفت، (۱۳۸۶)، "امضای قرارداد توسعه میدان های گازی فردوسی و گلشن" ،  
<http://www.shana.ir/122759-fa.html>

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، اداره کل روابط عمومی وزارت نفت، (۱۳۸۸)، "افزایش ۲۴ میلیارد بشکه نفت و ۱۱۱ تریلیون فوت مکعب گاز به ذخایر کشور" ،  
<http://shana.ir/newsprint.aspx?lang=fa&newsid=145445>

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، اداره کل روابط عمومی وزارت نفت، (۱۳۸۹)، "کشف میدان جدید گازی ۵۰ میلیارد دلاری با ۲۶۰ میلیارد متر مکعب گاز درجا" ،  
<http://www.shana.ir/164546-fa.html>

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، اداره کل روابط عمومی وزارت نفت، (۱۳۸۹)، "جزئیات کشف میدان گازی توسعه تشریح شد" ،  
<http://shana.ir/154762-fa.html>

شبکه اطلاع رسانی نفت و انرژی، اداره کل روابط عمومی وزارت نفت، (۱۳۹۰)، "قرارداد توسعه میدان گازی فروز بی امضا شد" ،  
<http://shana.ir/185236-fa.html>

نفت نیوز، (۱۳۸۸)، "اطلاعات جدید درباره حجم ذخایر میدان گازی هالگان از زبان محدث" ،  
<http://naftnews.net/print-8066.html>

شرکت بهره برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، (۱۳۸۹)، "منطقه عملیاتی پارسیان" ،  
<http://www.szogpc.com/operationalareas-parsian-fa.html>

شرکت بهره برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی، (۱۳۸۹)، "منطقه عملیاتی نار و کنگان" ،  
<http://www.szogpc.com/operationalareas-narkangan-fa.html>

شرکت سیفکو، SIFCO curement company . (۱۳۹۰)، "اكتشافات مخازن جدید نفتی و گازی در ایران" ،  
<http://www.sifcompany.com/fa/23/-/blogs/>

شرکت مدیریت شبکه برق ایران، (۱۳۸۸)، شبکه انتقال نیروی برق سراسری ایران،  
[www.igmc.ir](http://www.igmc.ir)

شرکت ملی نفت ایران، (۱۳۸۸)، "به رهبری از میدان نفتی کرنج"،

<http://www.nioc.ir/fpublications/mashal/260/260-9.htm>

شرکت ملی نفت ایران، (۱۳۸۸)، "بررسی میدان گازی کیش"، نشریه اکتشاف و تولید، شماره ۶۴،

شرکت نفت فلات قاره ایران، (۱۳۹۰)، "نفت خام مخلوط لاوان، یکی از باکیفیت‌ترین نفت‌خام‌های دریایی ایران"،

<http://www.iooc.co.ir/PERSIAN/news/morenews.asp?y=90&m=09&d=26&n=1>

شرکت نفت و گاز پارس، (۱۳۸۹)، "میدان گازی پارس شمالی"،

<http://www.pogc.ir/Default.aspx?tabid=63>، "میدان گازی گلشن".

فرصت، خ، سعدی، م، صادق‌زاده اهری، ج، حسینی جناب، م، (۱۳۸۹)، "بررسی تجربی و مدل‌سازی برج جذب

سوپفید هیدروژن در فرایند سوپفیران"، ماهنامه پژوهش نفت، سال بیستم، شماره ۶۲.

کوکبی، سامیه، (۱۳۸۶)، "مروری بر فعالیت‌های شرکت ملی نفت ایران"، نشریه اقتصاد: بررسی‌های اقتصاد انرژی،

شماره ۸، ص ۱۱۴

مصلح، ک، دهقانی، ف، الزامی، م. ر، ابراهیمی، ر. م، (۱۳۸۷)، "در استفاده بهینه از منابع گازی در ایران"، فصل اول،

موسسه مدیریت انرژی افق. ویرایش فیپا. چاپ اول. تهران: مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی،

. ISBN 978-964-8427-48-6. ۱۴

موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، (۱۳۹۰)، "نقشه جامع راه‌های ایران"، پورتال جامع گردشگری ایران،

<http://www.iranview.com/index.aspx?tm=4>

نوروزی، م، جلالی، م. ا، رمضان‌زاده، ا، سرشکی، ف، افتخاری، م، (۱۳۹۱)، "بررسی فنی- اقتصادی احداث مغارهای

ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در سنگ آهک با استفاده از روش معدن‌کاری اتحادی"، اولین

کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، شاهروود: دانشگاه صنعتی شاهروود

هاشمی، م. ا، نجفی، ع، کوچکی، احسان، (۱۳۹۰)، "لزوم ذخیره‌سازی استراتژیک نفت و گاز در ایران"، اولین

کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، شاهروود: دانشگاه صنعتی شاهروود.

## منابع لاتین

Atlas of Tehran metropolis, (2012), Spatial Information Department of Tehran Municipality's Information and Technology organization

Bakker, S., Heleen, C., Groenenberg, H., (2008), “*Carbon Capture and Storage*”. Energy research Centre of the Netherlands

Castle J. W., Bruce D. A., Falta. R. W., and Murdoch L. C. (2007) “*Manufactured caverns in carbonate rock*” U. S. Patent documents., Patent No: US 7,156,759  
B2. Web Site: <http://www.patentlenz.net/>

Castle J. W., Bruce D. A., Falta. R. W., Murdoch L. C., Foley, J. M. S., Brame, S. E., Brooks, D., (2005), “*Fracture Dissolution of Carbonate Rock: An Innovative Process for Gas Storage*”, Department of Geological Sciences, Clemson University.

Castle<sup>a</sup>, J. W., Bruce D. A., Falta. R. W., Murdoch L. C., Foley, J. M. S., Brame, S. E., Brooks, D., (2004), “*Design and Feasibility of Creating Gas-Storage Caverns by Using Acid to Dissolve Carbonate Rock Formations*”, Society of Petroleum Engineers Inc, SPE, P.O. Box 833836, Richardson, TX 75083-3836, U.S.A, fax 01-972-952-9435.

Castle<sup>b</sup>, J. W., Bruce D. A., Falta. R. W., Murdoch L. C., Foley, J. M. S., Brame, S. E., Brooks, D., (2004), “*Fracture Dissolution of Carbonate Rock: An Innovative Process for Gas Storage*”, Department of Geological Sciences, Clemson University.

Choi, J. W., (2011), PhD. thesis, “*GEOMECHANICS OF SUBSURFACE SAND PRODUCTION AND GAS STORAGE*”, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.

Cristescu, N. D., Paraschiv, I., (1995), “*The optimal shape of rectangular-like caverns*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 32 (4).

Damjanac, B., Torres, C. C., (2002), “*TECHNICAL REVIEW OF THE LINED ROCK CAVERN (LRC) CONCEPT AND DESIGN METHODOLOGY: STEEL LINER RESPONSE*”, Itasca Consulting Group, Inc. Thresher Square East 708 South Third Street, Suite 310 Minneapolis, Minnesota 55415.

Foley, J. M. S., (2006), Master of Science. thesis, “*AN ANALYSIS OF CAVERN STABILITY AND HYDRAULIC FRACTURES IN RELATION TO NATURAL GAS STORAGE IN LIMESTONE FORMATIONS*”, the Graduate School of Clemson University.

Goodman, R. E., (1980), ”*Introduction to rock mechanics*”, New York, Wiley, xii.

Gercek, H., (1997), “*An Elastic Solution for Stresses Around Tunnels With Conventional Shapes*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, v. 34 (3-4),

Hamblin, W. K., Christiansen, E. H., (2003), “*Earth’s Dynamic Systems*”. Prentice Hall; 10th edition, Temth Edition. Brigham Young University

Hart, R., (2003), “*Enhancing Rock Stress Understanding Through Numerical Analysis*”, Director, Software Services: Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota

Hartman, H. L., (2002), “*Introductory mining engineering*”. USA, Wiley-Interscience Publication.

Hoek, E., Brown, E. T., (1980), “*Underground excavations in rock*”, London, Institution of Mining and Metallurgy

Itasca, (2009), Problem solving with FLAC<sup>3D</sup>, FLAC<sup>3D</sup> Users Guide, Minneapolis, Minnesota, USA, Itasca consulting group , Inc.

Iran maps and charts [www.parstimes.com/library/maps.html](http://www.parstimes.com/library/maps.html)

Johansson, J., (2003), Licentiate Thesis, “*High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns CAVERN WALL DESIGN PRINCIPLES*”, Stockholm, Sweden, Division of Soil & Rock Mechanics Royal Institute of Technology.

Johnson, A. M., (1970), “*Physical Processes in Geology*”, San Francisco, Freeman, Cooper & Company.

Lekhnitskii, S. G., (1981), “*Theory of elasticity of an anisotropic body*”, Moscow, Mir Publishers.

Lund, C. P., (2009). “*The Carbon Value Chain*”. CVC Team Norway handbook. Royal Norwegian Embassy in Tokyo

Obert, L., Duvall, W., (1967), “*Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*” New York, John Wiley & Sons, Inc.

Okhravi, H., Amini, A., (1998), “*An example of mixed carbonate–pyroclastic sedimentation (Miocene, Central Basin, Iran)*”, Faculty of Science, University of Tehran, Tehran, Iran, Elsevier: volume 118, issues 1- 4

Omidvar, H., (2007), “*Iran’s Aggressive Natural Gas Expansion Plans*”, Energy Tribune, TX – 17/9/2007, gab-ibn.com.

Partanen, J., (2004), “*Chemistry of HCl and Limestone in Fluidised Bed Combustion*”, Åbo akademi university.

Roth, W., Poisel, R., Zettler, A. H., (2001), “*Comparison between analytical and numerical stability analyses using FLAC for shallow tunnels in soft rock*”, in D. Billiaux, X. Rachez, C. Detournay and R. Hart, eds., FLAC and numerical modeling in geomechanics: proceedings of the second International FLAC Symposium, Lyon/France/29-31 October 2001: Lisse, A.A. Balkema.

Rubin, E. S., (2006), “*IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*”, Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania, USA. Presentation to the RITE International Workshop on CO<sub>2</sub> Geological Storage Tokyo, Japan.

Stanford University libraries, “Oil and gas maps”, (2011), Web page:  
<http://library.stanford.edu/guides/oil-and-gas-maps>

Tajedin, L., Rassi, Y., Oshaghi, M. A., Telmadarrai, Z., Akhavan, A. A., Abai, M, R., Arandian, M. H., (2009), “*Study on Ectoparasites of Rhombomys opimus, the Main Reservoir of Zoonotic Cutaneous Leishmaniasis in Endemic Foci in Iran*”, Journal of Arthropod-Borne Diseases

Thoms, R. L., Gehle, R. M., (2000), “*A BRIEF HISTORY OF SALT CAVERN USE*”, College Station, Texas, U.S.A.

Thomson, G., (2009), ”Burying Carbon Dioxide In Underground Saline Aquifers Political Folly Or Climate Change Fix”, Munk Centre for International Studies University of Toronto.

Vattanasak , H., (2006), Master of Science. Thesis, “*SALT RESERVE ESTIMATION FOR SOLUTION MINING IN THE KHORAT BASIN*”, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Geotechnology Suranaree. University of Technology Academic

Warren, J.K., (2006),” *Evaporates: Sediments, Resources and Hydrocarbons, Springer Berlin Heidelberg New York*”, ISBN-13: 9783540260110, p.p. 893-943.

## **Abstract**

Large underground spaces (Caverns) could be used as hydropower powerhouses, fluid storage, nuclear wastes storage, swere systems and other applications. Salt or rock caverns, depleted gas/oil reservoirs and abandoned mines are types of gas storage facilities in use today. Since salt formations are nearly non-existent in near of major markets and due to high convergence of salt caverns, high cost of drilling and supporting of rock caverns, high cost of convert of depleted reservoirs and abandoned mines to natural gas storage facility and high cushion gas of abandoned mines and depleted reservoirs, alternatives to conventional methods of gas storage are required. So, New method has been conducted into the development of caverns within limestone formations by dissolution using hydrochloric acid. Compared with other techniques, the storage of natural gas in solution-mined, carbonate caverns has several potential advantages. Suitable carbonate regions for natural gas storage have been identified in much of the world and near the markets. Carbonate formations are also suitable for development of storage capacity to desired volume in near of powerhouses. Caverns that created in carbonate formations are nearly stable. In this research, regions of Iran are specified that have potential for creation of cavern in carbonate formations. In this research, there is also an investigation for technical- economical problems, environmental effects and operational problems. Regions of Tehran, Qom, Qazvin and semnan province were selected based on existence of carbonate formations in depht of over 1000 meters, their location near pipelines and little tectonic activity. In this research, stability analysis of four caverns, right cylinder with dome with a radius of 18 meters, right cylinder with a radius of 18 meters, , right cylinder with a radius of 20 meters and a horizontal cylinder with dome with a radius of 18 meters have been conducted. All four caverns are in limestone formations at depht of 1300 meters than ground surface. In this research, The maximum and minimum of internal cavern pressure have been specified. Yang modulus and ratio of horizontal stress to vertical stress are recognized as the most effective parameters in parameter analysis. Depht and Dimensions of cavern are the most effective parameters in sensitive analysis.

## **Keywords:**

Gas storage, carbonate formations, environmental problems, geometry design, 3D modelling



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

## **Construction consideration and Stability Analysis of CNG Storage in limestone Cavern using solution mining**

**Masoud Eshaghi**

**Supervisors:**

**Dr. Seyed Mohamad Esmaeil Jalali**

**Dr. Ahmad Ramezan Zade**

**Advisor:**

**Mehdi Norouzi**

**Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the  
Degree of Master of Science (M.Sc) in Mining Engineering**

October 2012