





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل پایداری مغار نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی

امین عسگری

اساتید راهنما :

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر احمد رمضان زاده

اساتید مشاور:

دکتر حسین جلالی فر

مهندس فرید فرمانی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰

## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه : اکتشاف معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امین عسگری

تحت عنوان: تحلیل پایداری مغار نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۱۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه بسیار خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور  | امضاء | اساتید راهنما          |
|-------|---------------|-------|------------------------|
|       | حسین جلالی فر |       | سید محمد اسماعیل جلالی |
|       | فرید فرمانی   |       | احمد رمضان زاده        |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی | امضاء | اساتید داور |
|-------|------------------------|-------|-------------|
|       | حسین میرزایی           |       | فرهنگ سرشکی |
|       |                        |       | شکراله زارع |

تقدیم به

وسعت قلب پدرم

که آرامش را در سینه‌ام می‌نشانند تا بال ذهنم با آرامش در آسمان علم به پرواز درآید.

تقدیم به

شکوه دیدگان مادرم

که آسمان عشق و پاکی را در سینه‌ام جای داد تا آبی آسمان ایثار در روحم رنگ گیرد.

تقدیم به همه آنان که در وادی خاموش و تاریک زندگی‌ام، منزل به منزل، چراغ هدایت را در

فراسوی نگاهم روشن کردند.

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت

حال که توفیق ختم این رساله را یافتم، خدا را سپاسگذارم که در تمام طول مسیر همواره استعانت از او چراغ راه و گرمابخش دل من بوده و امید است در آینده نیز چنین باشد.

از دست و زبان که برآید                      کز عهده شکرش به درآید

از اساتید راهنمای ارجمندم آقایان دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و احمد رمضانزاده نهایت سپاس و تشکر را دارم. از جناب آقای دکتر حسین جلالی‌فر از دانشگاه کرمان و به ویژه جناب آقای مهندس فرید فرمانی از شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی ایران که برادرانه اینجانب را در راستای انجام این تحقیق یاری‌رسان بودند، بسیار سپاسگذارم.

به درستی که اگر انصاف رعایت شود، باید در ابتدا از جناب دکتر Benoit Brouard از شرکت Brouard Consulting فرانسه، به خاطر تمامی کمک‌ها، راهنمایی‌ها و تشویق‌هایشان تشکر کنم که اگر وجود ایشان نبود، کار چنین تمام، به انجام نمی‌رسید. از خدا برای ایشان آرزوی سلامتی و موفقیت هرچه تمام‌تر را دارم.

همچنین از مسئولین شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی ایران به ویژه جناب مهندس رجبی و سایر عزیزان این شرکت نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

اساتید بسیار زیادی مرا در انجام این تحقیق یاری رسان بودند که شاید به عدد، نتوان تمامی آنها را در این مختصر گنجانید. با این حال دست تک تک آنها را به گرمی می‌فشارم و از خداوند برای آنان آرزوی توفیق روزافزون دارم.

## تعهد نامه

اینجانب امین عسگری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل پایداری مغار نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و احمد رمضانزاده متعهد می شوم .

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

۱۳۹۰/۱۱/۱۴

امین عسگری

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## مقالات مستخرج شده از پایان نامه

- عسگری امین، جلالی سید محمد اسماعیل، رمضان زاده احمد، (۱۳۹۰)، "مخاطرات ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در سازندهای نمک و راهکارهای مقابله با آن"، اولین کنفرانس مجازی ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، مهر ۱۳۹۰. دانشگاه صنعتی شاهرود

## چکیده

رشد روزافزون مصرف انرژی، جوامع بشری امروزی را بیش از هر زمان دیگری به منابع انرژی نیازمند نموده است. گاز طبیعی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی در جهان است که در سال‌های اخیر مصرف آن رشد زیادی داشته است. وجود محدودیت‌هایی در شبکه توزیع این ماده حامل انرژی باعث شده است که در طول ماه‌های سرد سال و در زمان اوج مصرف، کمبودهایی در ایران احساس شود. هدف از ذخیره‌سازی تامین انرژی در زمان‌های کمبود عرضه و شدت تقاضا است.

امروزه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به ویژه ذخیره‌سازی در سازندهای زیرزمینی نمک، به دلیل مزایای بسیار زیاد آن بیش از هر زمان دیگری مورد توجه قرار گرفته‌اند. وجود منابع عظیم زیرزمینی نمک در ایران، پتانسیل بسیار مناسبی را برای استفاده از این روش ایجاد نموده است.

پایداری فضاهای زیرزمینی (مغار) ساخته شده در سازندهای نمک به منظور ذخیره‌سازی گاز طبیعی، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. پارامترهای زیادی از جمله پارامترهای هندسی، بهره‌برداری، زمین‌شناسی و خصوصیات سازند در برگیرنده مغار (یعنی سنگ نمک) بر این رفتار تاثیرگذارند. هدف از این تحقیق شناخت نحوه تاثیر این پارامترها بر رفتار و پایداری مغار تحت بارگذاری توامان ترمومکانیکی است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار توانمند LOCAS انجام شد. این نرم‌افزار مخصوص طراحی و تحلیل پایداری انواع فضاهای زیرزمینی ساخته شده در سازندهای نمکی است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که عمق مغار، فشارهای کمینه و بیشینه و پارامترهای خزشی سنگ نمک از تاثیرگذارترین پارامترها بر رفتار و پایداری مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی هستند.

کلمات کلیدی: گاز طبیعی، مغار نمکی، گنبد نمکی، ذخیره‌سازی زیرزمینی، پایداری



## فهرست مطالب

### فصل اول: کلیات

|     |                                             |    |
|-----|---------------------------------------------|----|
| ۱-۱ | سخن نخست                                    | ۲  |
| ۲-۱ | ضرورت ذخیره سازی گاز طبیعی                  | ۲  |
| ۳-۱ | سابقه ذخیره سازی زیرزمینی گاز طبیعی         | ۶  |
| ۴-۱ | ضرورت ذخیره سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی | ۷  |
| ۵-۱ | اهداف تحقیق                                 | ۹  |
| ۶-۱ | ساختار تحقیق                                | ۱۱ |

### فصل دوم: روش های ذخیره سازی زیرزمینی گاز طبیعی

|         |                                              |    |
|---------|----------------------------------------------|----|
| ۱-۲     | مقدمه                                        | ۱۴ |
| ۲-۲     | روش های ذخیره سازی زیرزمینی گاز طبیعی        | ۱۵ |
| ۱-۲-۲   | مخازن تهی شده گاز و نفت                      | ۱۶ |
| ۲-۲-۲   | آبخوان ها                                    | ۱۸ |
| ۳-۲-۲   | مغارهای سنگی با پوشش                         | ۱۹ |
| ۱-۴-۲-۲ | ذخیره سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی         | ۲۱ |
| ۴-۲-۲   | سایر روش ها                                  | ۳۳ |
| ۳-۲     | مقایسه روش های ذخیره سازی زیرزمینی گاز طبیعی | ۳۳ |
| ۴-۲     | جمع بندی                                     | ۳۶ |

### فصل سوم: پتانسیل های ذخیره سازی زیرزمینی گاز طبیعی در سازندهای نمکی ایران

|       |                                                           |    |
|-------|-----------------------------------------------------------|----|
| ۳-۱   | مقدمه                                                     | ۳۹ |
| ۲-۳   | کلیاتی در مورد گنبد های نمکی                              | ۳۹ |
| ۳-۳   | معیارهای انتخاب گنبد نمکی مناسب برای ذخیره سازی گاز طبیعی | ۴۳ |
| ۱-۳-۳ | شرایط سطحی                                                | ۴۳ |
| ۲-۳-۳ | شرایط زیرسطحی                                             | ۴۵ |

|    |                                                            |
|----|------------------------------------------------------------|
| ۴۶ | ..... ۳-۳-۳ خصوصیات فیزیکی - شیمیایی و ژئومکانیکی          |
| ۴۸ | ..... ۴-۳-۳ هیدرولوژی و هیدروژئولوژی                       |
| ۴۸ | ..... ۵-۳-۳ ملاحظات اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و پدافندی |
| ۴۹ | ..... ۴-۳ پتانسیل‌های ذخیره‌سازی در گنبد‌های نمکی ایران    |
| ۵۱ | ..... ۱-۴-۳ حوزه جنوب ایران (نمک هرمز)                     |
| ۵۲ | ..... ۲-۴-۳ حوزه ایران مرکزی                               |
| ۵۲ | ..... ۱-۲-۴-۳ ناحیه گرمسار                                 |
| ۵۲ | ..... ۲-۲-۴-۳ ناحیه آران                                   |
| ۵۳ | ..... ۳-۲-۴-۳ ناحیه اردکان                                 |
| ۵۴ | ..... ۴-۲-۴-۳ ناحیه قم                                     |
| ۵۴ | ..... ۵-۲-۴-۳ ناحیه سمنان                                  |
| ۵۵ | ..... ۵-۳ جمع‌بندی                                         |

### فصل چهارم: تبیین پارامترهای طراحی مغارهای نمکی

|    |                                                      |
|----|------------------------------------------------------|
| ۵۸ | ..... ۱-۴ مقدمه                                      |
| ۵۹ | ..... ۲-۴ اصول مکانیک سنگ مرتبط با طراحی مغارهای نمک |
| ۶۰ | ..... ۱-۲-۴ تنش                                      |
| ۶۳ | ..... ۲-۲-۴ خزش                                      |
| ۶۵ | ..... ۳-۲-۴ مدل رفتاری سنگ نمک                       |
| ۶۵ | ..... ۱-۳-۲-۴ مقدمه                                  |
| ۶۸ | ..... ۲-۳-۲-۴ مدل رفتاری نورتون- هاف (N- H)          |
| ۶۹ | ..... ۳-۳-۲-۴ مدل رفتاری مانسون- داسون (M-D)         |
| ۷۱ | ..... ۴-۲-۴ ترمودینامیک مغارهای نمکی                 |
| ۷۲ | ..... ۱-۴-۲-۴ رفتار گاز درون مغار                    |
| ۷۳ | ..... ۲-۴-۲-۴ تغییر دمای درون مغار                   |

|    |                                                    |
|----|----------------------------------------------------|
| ۷۴ | ..... سیکل بهره‌برداری ۳-۴-۲-۴                     |
| ۷۵ | ..... معیارهای تحلیل پایداری ۳-۲-۴                 |
| ۷۷ | ..... اتساع ۱-۳-۲-۴                                |
| ۷۸ | ..... کشش ۲-۳-۲-۴                                  |
| ۷۹ | ..... افت حجم مغار ۳-۳-۲-۴                         |
| ۸۰ | ..... روش‌های طراحی ۳-۴                            |
| ۸۰ | ..... روش‌های تجربی ۱-۳-۴                          |
| ۸۱ | ..... روش‌های تحلیلی ۲-۳-۴                         |
| ۸۴ | ..... روش‌های عددی ۳-۳-۴                           |
| ۸۶ | ..... مقایسه روش المان محدود و تفاضل محدود ۱-۳-۳-۴ |
| ۸۷ | ..... معرفی نرم‌افزار LOCAS ۲-۳-۳-۴                |
| ۸۹ | ..... جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۴-۴                    |

### فصل پنجم: تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی

|     |                                        |
|-----|----------------------------------------|
| ۹۲  | ..... مقدمه ۱-۵                        |
| ۹۳  | ..... توصیف مساله ۲-۵                  |
| ۹۳  | ..... ساختار زمین‌شناسی ۱-۲-۵          |
| ۹۳  | ..... مشخصات سنگ نمک و گاز طبیعی ۲-۲-۵ |
| ۹۶  | ..... شکل مغار ۳-۲-۵                   |
| ۹۷  | ..... مش‌بندی مدل ۴-۲-۵                |
| ۹۹  | ..... فرآیند ساخت و بهره‌برداری ۵-۲-۵  |
| ۱۰۰ | ..... تحلیل پایداری مدل مرجع ۳-۵       |
| ۱۰۱ | ..... دمای مغار ۱-۳-۵                  |
| ۱۰۲ | ..... حجم مغار ۲-۳-۵                   |
| ۱۰۳ | ..... ظرفیت ذخیره‌سازی ۳-۳-۵           |

|     |                                                   |
|-----|---------------------------------------------------|
| ۱۰۴ | ..... تنش‌ها. ۴-۳-۵                               |
| ۱۰۴ | ..... تنش اصلی بیشینه ۱-۴-۳-۵                     |
| ۱۰۷ | ..... تنش‌های موثر ۲-۴-۳-۵                        |
| ۱۰۸ | ..... اتساع ۳-۴-۳-۵                               |
| ۱۱۱ | ..... پاشنه چاه ۵-۳-۵                             |
| ۱۱۴ | ..... جمع‌بندی ۶-۳-۵                              |
| ۱۱۵ | ..... تحلیل حساسیت ۴-۵                            |
| ۱۱۵ | ..... پارامترهای هندسی ۱-۴-۵                      |
| ۱۱۵ | ..... عمق مغار ۱-۱-۴-۵                            |
| ۱۱۷ | ..... شکل ۲-۱-۴-۵                                 |
| ۱۲۱ | ..... حجم مغار ۳-۱-۴-۵                            |
| ۱۲۳ | ..... فاصله مغارها ۴-۱-۴-۵                        |
| ۱۲۵ | ..... فشار کمینه ۵-۱-۴-۵                          |
| ۱۲۷ | ..... فشار بیشینه ۶-۱-۴-۵                         |
| ۱۲۹ | ..... تعداد سیکل‌ها ۷-۱-۴-۵                       |
| ۱۳۲ | ..... زمان سیکل‌ها ۸-۱-۴-۵                        |
| ۱۳۴ | ..... دمای گاز تزریقی ۹-۱-۴-۵                     |
| ۱۳۶ | ..... عمق گنبد ۱۰-۱-۴-۵                           |
| ۱۳۷ | ..... جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تحلیل حساسیت ۱۱-۱-۴-۵ |
| ۱۳۸ | ..... تحلیل پارامتری ۲-۴-۵                        |
| ۱۳۹ | ..... مدول یانگ ۱-۲-۴-۵                           |
| ۱۴۰ | ..... نسبت پواسون ۲-۲-۴-۵                         |
| ۱۴۱ | ..... نسبت انرژی فعال‌سازی (Q/R) ۳-۲-۴-۵          |
| ۱۴۲ | ..... توان خزش ۴-۲-۴-۵                            |

۵-۴-۲-۵ ضریب خزش ..... ۱۴۴

۵-۵ جمع بندی ..... ۱۴۵

### فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری ..... ۱۵۰

۶-۲ پیشنهادات ..... ۱۵۲

منابع ..... ۱۵۴

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ..... ۱۷
- شکل (۲-۲): نحوه استفاده از روش‌های مختلف ذخیره‌سازی گاز طبیعی با توجه به میزان تقاضا ..... ۱۷
- شکل (۳-۲): مقطع قائم گنبد نمکی Tostrup، دانمارک ..... ۲۲
- شکل (۴-۲): فرآیند انحلال در مغارهای نمک و اجزای سیستم فرآیند ..... ۲۴
- شکل (۵-۲): نمایی از فرآیند آبرانی مرسوم ( ..... ۲۷
- شکل (۶-۲): نیروی اضافه مورد نیاز برای غلبه بر فشار استاتیکی اضافه بر محدودیت فشاری گاز در پاشنه چاه ..... ۲۷
- شکل (۷-۲): نمایی شماتیک از ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای ..... ۲۸
- شکل (۸-۲): پارامترهای هندسی و بهره‌برداری مغارهای ذخیره‌سازی گاز ..... ۳۰
- شکل (۱-۳): نمودار بلوکی شکل‌های مختلف سازندهای نمک ..... ۴۰
- شکل (۲-۳): دسته بندی گنبدهای نمکی از لحاظ نحوه جایگیری آنها در زیر زمین ..... ۴۱
- شکل (۳-۳): مراحل رشد گنبد نمکی ..... ۴۲
- شکل (۴-۳): نقشه جهانی سازندهای زیرزمینی نمک ..... ۴۲
- شکل (۵-۳): نمایی شماتیک از فرایند انحلال کنترل نشده در سقف مغار، ریزش سقف و در نهایت روباره مغار ..... ۴۴
- شکل (۶-۳): نمایی شماتیک از مقطع زمین‌شناسی سازند لایه‌ای نمک ..... ۴۷
- شکل (۷-۳): تکتونیک صفحه ایران و محل تشکیل گنبدهای نمکی در ایران مرکزی ..... ۵۱
- شکل (۸-۳): پراکندگی گنبدهای نمکی ایران ..... ۵۱
- شکل (۹-۳): مقطع لرزه‌ای و تصویر سطحی از محدوده گنبد نمکی نهان در نصرآباد ..... ۵۳
- شکل (۱۰-۳): نمایی از نقشه زمین‌شناسی شمال کاشان (نصرآباد) ..... ۵۳
- شکل (۱۱-۳): نمایی از معدن سنگ در نزدیکی منطقه نصرآباد کاشان ..... ۵۴
- شکل (۱-۴): توصیف گرافیکی نامتغیرهای تنش  $\sigma, \tau, \theta$  در مختصات تنش‌های اصلی ..... ۶۲
- شکل (۲-۴): منحنی عمومی رفتار سنگ در برابر خزش ..... ۶۴

شکل (۳-۴): نقشه مکانیسم خزش نمک، ناحیه مشخص شده شامل گستره تنش‌های انحرافی وارد بر سازندهای نمک در مغارهای ذخیره‌سازی ..... ۶۶

شکل (۴-۴): تغییر شکل تحت بار ثابت بر اساس مدل M-D (Karimi-Jafari, 2007) ..... ۷۱

شکل (۵-۴): فاکتور تراکم‌پذیری گاز متان بر حسب تابعی از دما (۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد) و فشار (۰ تا ۳۰ مگاپاسکال) ..... ۷۳

شکل (۶-۴): توزیع شعاعی دما در اطراف مغار برای تعداد سیکل مختلف (یک سیکل و پنج سیکل)؛  $\Delta r$  ضخامت ناحیه تحت تاثیر نوسان دمای درونی مغار ..... ۷۶

شکل (۷-۴): توزیع شعاعی دما در اطراف مغار برای دوره‌های مختلف سیکل بهره‌برداری (یک روز، یک هفته و یک ماه)؛  $\Delta r$  ضخامت ناحیه تحت تاثیر نوسان دمای درون مغار ..... ۷۶

شکل (۸-۴): ضخامت ناحیه تحت تاثیر  $\Delta r$  از دیواره مغار تا ناحیه پیک بر حسب تابعی از دوره سیکل بهره‌برداری ..... ۷۶

شکل (۹-۴): مقایسه معیارهای اتساع خطی (راتیگان) و معیار غیر خطی (DV) در دو حالت کشش و فشار ..... ۷۹

شکل (۱۰-۴): آهنگ افت نسبی حجم مغار در حالت پایا هنگامی که اثرات ترمودینامیکی در محاسبات در نظر گرفته شود (منحنی بالایی) و هنگامی که این اثرات در نظر گرفته نشود (منحنی پایینی) ..... ۸۳

شکل (۱۱-۴): دسته بندی روش‌های عددی ..... ۸۵

شکل (۱-۵): مقایسه احتمال خزش سنگ نمک Avery Island و دیگر سنگ‌های نمک ..... ۹۵

شکل (۳-۵): نحوه مش‌بندی مدل ..... ۹۷

شکل (۲-۵): مشخصات هندسی مدل مرجع ..... ۹۷

شکل (۴-۵): مش‌بندی مدل مرجع ..... ۹۸

شکل (۵-۵): تاریخچه تغییرات فشار گاز در مدل مرجع در طول دوره ساخت و بهره‌برداری ..... ۱۰۰

شکل (۶-۵): نوسانات دمای دیواره مغار در اثر سیکل بهره‌برداری در مدل مرجع ..... ۱۰۱

شکل (۷-۵): تبادل گرمایی میان گاز و دیواره مغار ..... ۱۰۲

شکل (۸-۵): افت حجم مغار در اثر سیکل بهره‌برداری در مدل مرجع ..... ۱۰۳

شکل (۹-۵): توزیع تنش‌های اصلی بیشینه در طول دیواره مغار برای زمان‌های مورد تحلیل ..... ۱۰۵

شکل (۱۰-۵): وضعیت تنش بیشینه اصلی در راستای شعاعی از مرکز مغار مرجع در عمق ۱۰۰۰ متر ..... ۱۰۷

- شکل (۵-۱۱): وضعیت تنش بیشینه اصلی در بالای مغار ..... ۱۰۸
- شکل (۵-۱۲): توزیع تنش‌های موثر در دیواره مغار در زمان های مورد تحلیل ..... ۱۰۸
- شکل (۵-۱۴): وضعیت اتساع (دوریس) در بالا و پایین محور قائم مغار در سازند نمک ..... ۱۱۰
- شکل (۵-۱۵): وضعیت تنش‌ها در نقطه‌ای در میانه مغار واقع بر لبه دیواره در صفحه تنش متوسط و تنش برشی ..... ۱۱۲
- شکل (۵-۱۶): وضعیت تنش بیشینه اصلی نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول ساخت و بهره‌برداری از مغار در مدل مرجع ..... ۱۱۳
- شکل (۵-۱۷): وضعیت تنش‌های موثر در نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول سخت و بهره‌برداری از مغار در مدل مرجع ..... ۱۱۳
- شکل (۵-۱۸): وضعیت اتساع در نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول سخت و بهره‌برداری از مغار در مدل مرجع بر اساس معیار ..... ۱۱۳
- شکل (۵-۱۹): نوسانات دمایی مغار از عمق ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر ..... ۱۱۷
- شکل (۵-۲۰): ظرفیت ذخیره‌سازی مغار از عمق ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر ..... ۱۱۷
- شکل (۵-۲۱): نوسانات دمایی مغار برای  $H:D=1$ ،  $H:D=5$  و  $H:D=9$  با فشار بهره‌برداری  $(0.2 - 0.85)$  فشار روباره در پاشنه چاه ..... ۱۱۸
- شکل (۵-۲۲): افت حجم نسبی مغار برای سه شکل با نسبت ارفاع به قطر (۱، ۳ و ۵) در عمق ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر ..... ۱۱۸
- شکل (۵-۲۳): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای شکل‌های مختلف مغار نمک (۱ تا  $H:D=9$ ) ..... ۱۱۹
- شکل (۵-۲۴): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای شکل‌های مختلف مغار ( $H:D=5$  تا ۱)، اعداد دوم و سوم به ترتیب معرف فشار کمینه و بیشینه در ناحیه پاشنه چاه و  $E$  معرف منحنی مربوط به تنش موثر است. .... ۱۲۰
- شکل (۵-۲۵): وضعیت اتساع پاشنه چاه برای شکل‌های مختلف مغار و در اعماق مختلف بر اساس معیار دوریس ..... ۱۲۱
- شکل (۵-۲۶): نوسان دمایی مغار برای دو حجم ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعب در عمق ۱۰۰۰ متری و فشار بهره‌برداری  $(0.2 - 0.85)$  فشار روباره در پاشنه چاه ..... ۱۲۱



شکل (۵-۲۷): آهنگ افت حجم نسبی مغارهای ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعبی در اعماق ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر..... ۱۲۲

شکل (۵-۲۸): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای مغارهای ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعبی در عمق ۱۰۰۰ متر..... ۱۲۲

شکل (۵-۲۹): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای مغارهای با حجم‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار مترمکعب در عمق‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر، E: تنش موثر..... ۱۲۳

شکل (۵-۳۰): وضعیت اتساع پاشنه چاه برای مغارهای با حجم ۴۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب در عمق‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری بر اساس معیار دوریس..... ۱۲۳

شکل (۵-۳۱): آهنگ افت حجم نسبی مغار برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر..... ۱۲۴

شکل (۵-۳۲): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر..... ۱۲۴

شکل (۵-۳۳): وضعیت تنش بیشینه اصلی در پاشنه چاه برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر..... ۱۲۵

شکل (۵-۳۴): وضعیت اتساع در پاشنه چاه برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر بر اساس معیار دوریس..... ۱۲۵

شکل (۵-۳۵): نوسان دمایی مغار برای سه فشار کمینه مختلف ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه..... ۱۲۶

شکل (۵-۳۶): آهنگ افت حجم نسبی مغار کروی ( $H:D=1$ ) با فشارهای کمینه (۰/۲ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه)..... ۱۲۶

شکل (۵-۳۷): آهنگ افت حجم نسبی مغار سیلندری ( $H:D=3$ ) برای دو فشار کمینه (۰/۲ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه)..... ۱۲۷

شکل (۵-۳۸): احتمال اتساع در پاشنه چاه برای دو فشار کمینه (۰/۲ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه) بر اساس معیار دوریس..... ۱۲۷

شکل (۵-۳۹): نوسان دمایی مغار برای فشارهای بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه)..... ۱۲۸

شکل (۵-۴۰): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی دو مغار با فشار بهره‌برداری (۰/۲، ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه) و (۰/۴، ۰/۷۵ فشار روباره در پاشنه چاه) در عمق ۱۰۰۰ متری (حجم مغار ۴۰۰ هزار مترمکعب)..... ۱۲۸

- شکل (۵-۴۱): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای دو فشار کمینه (۰/۲ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه) برای عمق‌های ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر، E: تنش موثر ..... ۱۲۹
- شکل (۵-۴۲): اثر تعداد سیکل بهره‌برداری بر آهنگ افت حجم نسبی مغار برای سیکل‌های سالانه و ماهانه ..... ۱۳۰
- شکل (۵-۴۳): اثر تعداد سیکل بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی مغار ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۴۴): اثر تعداد سیکل بر وضعیت تنش بیشینه اصلیو موثر در اطراف پاشنه چاه برای دو نوع سیکل سالانه و ماهانه ..... ۱۳۱
- شکل (۵-۴۵): اثر تعداد سیکل بر وضعیت اتساع در پاشنه چاه برای دو نوع سیکل سالانه و ماهانه بر اساس معیار دوریس ..... ۱۳۲
- شکل (۵-۴۶): نوسان دمایی مغار برای زمان سیکل یک ماهه، شش ماهه و یک ساله، (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل) ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۴۷): اثر زمان سیکل بر آهنگ افت حجم نسبی مغار (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل) ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۴۸): اثر زمان سیکل بر وضعیت تنش بیشینه اصلیو موثر در پاشنه چاه (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل) ..... ۱۳۴
- شکل (۵-۴۹): اثر زمان سیکل بر وضعیت اتساع در پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل) ..... ۱۳۴
- شکل (۵-۵۰): تغییر دمای گاز تزریقی (۲۱، ۳۷ و ۵۴ درجه سانتیگراد) و نوسانات دمایی مغار ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۵۱): اثر تغییر دمای گاز تزریقی بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۵۲): اثر تغییر دمای گاز تزریقی بر وضعیت تنش بیشینه اصلیو موثر در پاشنه چاه ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۵۳): اثر تغییر عمق گنبد (۲۰۰ و ۴۰۰ متر) بر نوسانات دمایی مغار ..... ۱۳۶
- شکل (۵-۵۴): اثر تغییر عمق گنبد بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۳۶
- شکل (۵-۵۵): اثر تغییر عمق گنبد بر تنش بیشینه اصلیو موثر در پاشنه چاه ..... ۱۳۷
- شکل (۵-۵۶): اثر تغییر عمق گنبد بر وضعیت اتساع پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس ..... ۱۳۷
- شکل (۵-۵۷): اثر تغییر مدول یانگ سنگ نمک بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۳۹
- شکل (۵-۵۸): تاثیر مدول یانگ بر تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه ..... ۱۳۹

- شکل (۵-۵۹): اثر مدول یانگ بر احتمال اتساع در سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس ..... ۱۴۰
- شکل (۵-۶۰): اثر تغییر نسبت پواسون سنگ نمک بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۴۰
- شکل (۵-۶۱): تاثیر نسبت پواسون بر تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه ..... ۱۴۰
- شکل (۵-۶۲): اثر نسبت پواسون بر احتمال اتساع در سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس ..... ۱۴۱
- شکل (۵-۶۳): اثر تغییر انرژی فعالسازی سنگ نمک بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۴۲
- شکل (۵-۶۴): اثر تغییر انرژی فعالسازی سنگ نمک بر وضعیت تنش‌های بیشینه و موثر در پاشنه چاه، E: تنش موثر ..... ۱۴۲
- شکل (۵-۶۵): اثر تغییر انرژی فعالسازی سنگ نمک بر وضعیت اتساع پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس ..... ۱۴۲
- شکل (۵-۶۶): اثر تغییر ثابت  $n$  بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۴۳
- شکل (۵-۶۷): اثر تغییر ثابت  $n$  بر وضعیت تنش‌های بیشینه و موثر در پاشنه چاه ..... ۱۴۳
- شکل (۵-۶۸): اثر تغییر ثابت  $n$  بر وضعیت اتساع پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس ..... ۱۴۴
- شکل (۵-۶۹): اثر تغییر انرژی فعالسازی بر آهنگ افت حجم نسبی مغار ..... ۱۴۴
- شکل (۵-۷۰): اثر تغییر انرژی فعالسازی بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی ..... ۱۴۵
- شکل (۵-۷۱): اثر تغییر انرژی فعالسازی بر وضعیت تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه ..... ۱۴۵

## فهرست جداول

- جدول (۱-۱): مروری بر مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی دنیا ..... ۸
- جدول (۲-۱): نسبت میزان گاز برداشت شده از انواع مخازن ذخیره‌سازی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ ..... ۹
- جدول (۱-۲): نمونه‌ای از برنامه زمان‌بندی احداث یک مغار ..... ۲۹
- جدول (۲-۲): پارامترهای هندسی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در گنبد‌های نمک ..... ۳۳
- جدول (۳-۲): مقایسه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی با میدان‌های تهی شده نفت و گاز و آبخوان‌ها (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۰) ..... ۳۴
- جدول (۴-۲): نسبت میزان گاز برداشت شده از انواع مخازن ذخیره‌سازی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ..... ۳۵
- جدول (۴-۲): تقسیم بندی حوادث بر حسب نوع روش ذخیره سازی ..... ۳۵
- جدول (۱-۳): معیارها، پارامترهای اکتشافی و تاثیر آنها در انتخاب مکان ذخیره‌سازی درون مغارهای نمکی ..... ۵۰
- جدول (۱-۴): تعدادی از مدل‌های رئولوژیکی (منشی‌زاده، ۱۳۸۷) ..... ۶۷
- جدول (۲-۴): تنش‌های اضافه ترموالاستیک برای شکل‌های ساده از مغار ..... ۸۳
- جدول (۱-۵): مشخصات لایه‌های زمین در مدل مرجع ..... ۹۳
- جدول (۲-۵): مشخصات سنگ نمک برای مدل مرجع ..... ۹۵
- جدول (۳-۵): ویژگی‌های فیزیکی و ترمودینامیکی گاز طبیعی (متان) (LOCAS user's giude) ..... ۹۶
- جدول (۴-۵): مشخصات هندسی مدل مرجع مغار نمکی ..... ۹۶
- جدول (۵-۵): مشخصات نقاط شماره گذاری شده در شکل (۵-۵) ..... ۱۰۰
- جدول (۶-۵): معیارهای تحلیل اثر تغییر پارامترها بر رفتار مغار نمکی ..... ۱۰۱
- جدول (۷-۵): پارامترهای ظرفیت ذخیره‌سازی گاز طبیعی برای مدل مرجع ..... ۱۰۴
- جدول (۸-۵): مقدار مولفه‌های معیار اتساع دوریس ..... ۱۰۹
- جدول (۹-۵): پارامترهای مورد نظر جهت انجام تحلیل و گستره هر کدام از آنها ..... ۱۱۶
- جدول (۵-۱۰): میزان اثر پارامترهای مختلف بر مقدار گاز عملیاتی ..... ۱۳۷
- جدول (۵-۱۱): میزان اثر پارامترهای مختلف بر مقدار گاز عملیاتی ..... ۱۳۸

جدول (۵-۱۲): جدول حساسیت، تاثیر افزایش هر کدام از پارامترها در محدوده اشاره شده در جدول (۵-۹)  
برای هر پارامتر.....۱۴۸

فصل اول

کلیات

## ۱-۱ سخن نخست

حسن آینده‌نگری همواره انسان را بر آن داشته تا به آینده بیاندیشد و با تدبیر، امروز خود را به فردایی روشن‌تر پیوند دهد. امروزه نیز انسان‌ها در اندیشه نیازهای آتی‌هاند و یکی از اساسی‌ترین نیازهای هر جامعه، انرژی است. رشد جمعیت و پیشرفت علم و صنعت موجب مصرف روز افزون انرژی شده و با توجه به محدودیت منابع، مواد حامل انرژی بسان گنجینه‌هایی گشته‌اند که طبیعت برای ما به یادگار گذاشته است. شایسته است که وارثان این میراث گرانبمایه نیز با آگاهی و آینده‌نگری به بهره‌برداری، مصرف و البته ذخیره‌سازی آن برای فرداهای دور و نزدیک بپردازند.

در ادامه این فصل ابتدا ضرورت و سابقه ذخیره‌سازی گاز طبیعی تبیین شده و پس از آن اهداف این تحقیق آمده است. در پایان نیز ساختار کلی تحقیق بیان شده است.

## ۲-۱ ضرورت ذخیره سازی گاز طبیعی

مواد هیدروکربوری مانند گاز طبیعی و نفت خام از مهم‌ترین منابع تولید انرژی در جهان هستند. در سال‌های اخیر مصرف گاز طبیعی در ایران رشد زیادی داشته به طوری که به یکی از منابع عمده تامین انرژی مبدل شده است. افزایش مصرف گاز طبیعی و موارد گوناگون مصرفی آن سبب شده تا در طول ماه‌های سرد سال و در زمان اوج مصرف، کمبودهایی در کشور احساس شود. هدف از ذخیره‌سازی تامین گاز طبیعی مورد نیاز در زمان‌هایی است که با کمبود عرضه و شدت تقاضا است. این شرایط در کوتاه مدت و در مقیاس کوچک به صورت زمان‌های اوج مصرف روزانه، هفتگی و سالانه و در دراز مدت و مقیاس بزرگ به شکل زمان‌های بحران نظیر جنگ‌ها، تحریم‌ها و انحصار طلبی‌های شدید در بازارهای جهانی روی می‌دهند.

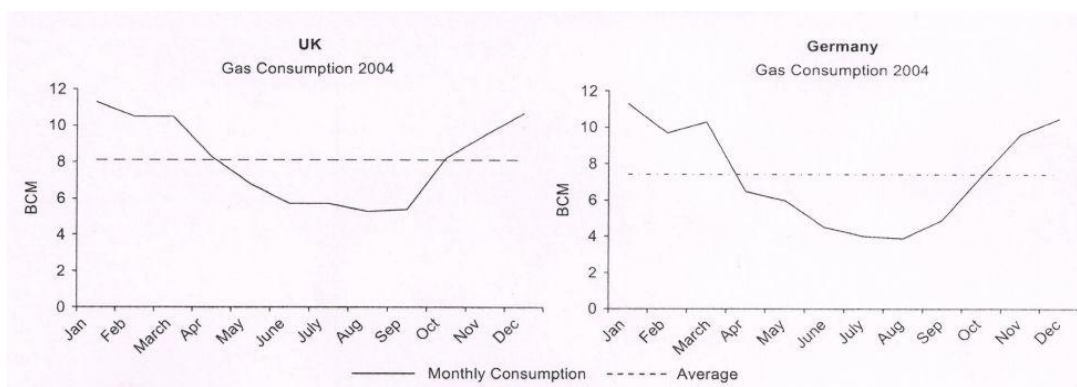
برای نمونه در شمال غربی اروپا نزدیک به ۶۷ درصد مصرف سالانه گاز طبیعی در ماه‌های سرد سال (از اکتبر تا مارس، ۶ ماه) صورت می‌گیرد. همچنین حدود ۹۰ درصد مصرف خانگی گاز طبیعی در سال، در این ماه‌ها مصرف می‌شود و ممکن است تقاضای گاز در یک روز زمستانی به بیش از ۱۰ برابر یک روز تابستانی برسد. در شکل (۱-۱) مصرف گاز طبیعی در انگلستان و آلمان در ماه‌های مختلف سال ۲۰۰۴ میلادی نشان داده شده است (Huffler & Kubler, 2007). این وضعیت برای ایران نیز صادق است. به عنوان مثال همانطور که در شکل (۲-۱) مشاهده می‌شود، مصرف گاز طبیعی در ایران در دی‌ماه به بیش از پنج برابر در تیرماه رسیده است (آذین و فراش، ۱۳۹۰).

به طور کلی سه روش برای تامین نیاز گاز طبیعی وجود دارد که شامل تولید داخلی، واردات و ذخیره‌سازی است. با توجه به شرایط فنی مخازن و تاسیسات و خطوط لوله گاز طبیعی، امکان افزایش شدید آهنگ برداشت در ماه‌های سرد زمستانی و تامین تقاضای موجود بسیار مشکل است. همچنین با افزایش تولید و کاهش ذخیره مخازن، آهنگ تولید گاز طبیعی افت می‌کند. بنابراین، تولید گاز به تنهایی گزینه قابل اتکایی نیست.

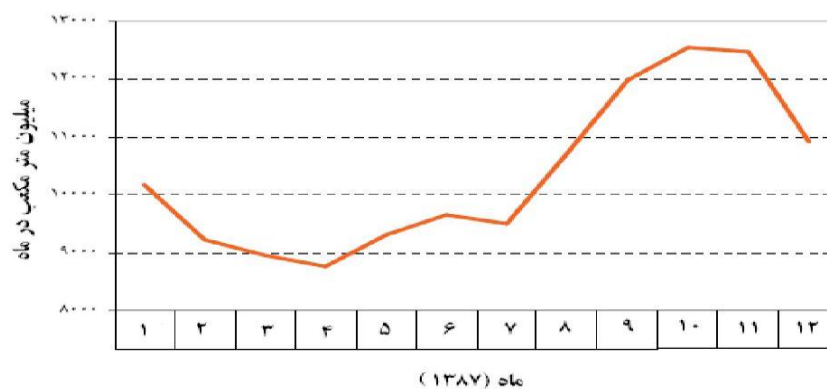
همچنین با توجه به افزایش تقاضا و همچنین افزایش قیمت گاز در ماه‌های سرد زمستانی در دنیا، محدودیت استفاده از خطوط لوله و نیز انعطاف پذیری اندک واردات و قراردادهای وارداتی و با در نظر گرفتن بحران‌های سیاسی، واردات نیز به تنهایی منبع مناسبی برای تامین تقاضای رو به رشد و متغیر گاز طبیعی در دراز مدت نیست (رفیعی، ۱۳۸۷).

با توجه به شکل (۳-۱) مشاهده می‌شود در اروپا طی یک دوره ده ساله، سهم تولید از ۵۲ درصد به ۳۹ درصد کاهش یافته است. سهم واردات بدون تغییر و نزدیک به ۲۰ درصد بوده و سهم ذخیره‌سازی از ۳۰ درصد به بیش از ۴۰ درصد افزایش یافته است (Huffler & Kubler, 2007).

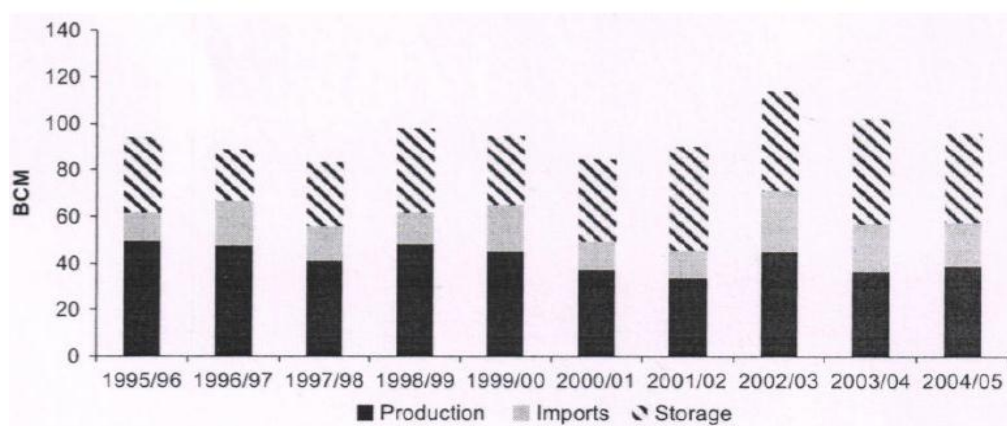




شکل (۱-۱): مصرف گاز طبیعی در انگلستان و آلمان در ماه‌های مختلف سال ۲۰۰۴ میلادی بر حسب میلیارد متر مکعب (Huffler & Kubler, 2007)



شکل (۲-۱): تغییرات میزان مصرف گاز طبیعی ایران در ماه‌های مختلف سال ۱۳۸۷ بر حسب میلیون متر مکعب (آذین و فراش، ۱۳۹۰)



شکل (۳-۱): سهم روش‌های تولید، واردات و ذخیره سازی گاز طبیعی اضافی مورد نیاز در ماه‌های سرد اروپای شمال غربی (Huffler & Kubler, 2007)

با توجه به این موارد، ضرورت بذل توجه ویژه به ذخیره‌سازی گاز طبیعی روشن می‌شود. تجربیات گذشته بیانگر کارایی مناسب این روش جهت تامین بیش تقاضای گاز طبیعی در ماه‌های سرد است. ایران دومین دارنده ذخایر گاز طبیعی، چهارمین تولید کننده و سومین مصرف کننده گاز طبیعی در دنیا است (پانا نیوز، ۲۸ آذر ۱۳۸۹). ذخایر گازی ایران طبق جدیدترین آمارها معادل ۳۰/۷۶ تریلیون متر مکعب برآورد شده است. همچنین ظرفیت پالایش گاز طبیعی کشور برابر با ۳۶۰ میلیون مترمکعب در روز است که ۷۰٪ آن از دو میدان گازی پارس جنوبی و کنگان تامین می‌شود (آذین، ۱۳۸۸). در سال ۱۳۸۹ مصرف گاز طبیعی ایران با افزایشی ۶/۵ درصدی از مرز ۱۷۵ میلیارد مترمکعب در سال گذشت که از این مقدار حدود ۱۶۶ میلیارد متر مکعب تولید داخل و ۹ میلیارد متر مکعب از طریق واردات به خطوط انتقال گاز تامین شده است (خبرگزاری انقلاب اسلامی، ۲۸ اسفند ۱۳۸۹).

وجود محدودیت‌هایی در شبکه توزیع گاز طبیعی باعث شده است که در طول ماه‌های سرد سال و در زمان اوج مصرف، کمبودهایی در کشور احساس شود. استفاده از گزینه ذخیره‌سازی گاز طبیعی و افزایش ذخایر در دسترس، علاوه بر حفظ ثبات تولید و کاهش آسیب‌پذیری بازارهای داخلی، مزایای بسیاری نظیر دستیابی به اهداف استراتژیک، ایمنی بالا، کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری را در پی خواهد داشت.

روند ذخیره‌سازی گاز طبیعی نیز در طول یک قرن گذشته رو به فزونی نهاده است، بطوریکه در بعضی از کشورها حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد گاز مصرفی سالانه آنها ذخیره‌سازی شده است (Plaat, 2009). بر اساس حجم مصرفی گاز طبیعی کشور در سال ۱۳۸۶، ذخیره گاز مورد نیاز ایران برای تامین بار اضافی مصرف در فصول سرد سال معادل ۱۰ میلیارد متر مکعب در سال برآورد شده است (آذین، ۱۳۸۸).

ذخیره‌سازی گاز طبیعی علاوه بر تامین تقاضاهای فصلی به عنوان هدف اصلی، اهداف زیر را نیز دنبال می‌کند (مرادی قصر، ۱۳۸۵):

- کنترل عرضه و تقاضا در شهرهای بزرگ و مراکز صنعتی
- کاهش هزینه‌های انتقال گاز
- کاهش هزینه تنظیم رگولاتورهای گاز در مراکز صنعتی در اثر تغییر فشار گاز در فصول زمستان و تابستان
- ایجاد توان لازم برای رقابت در بازارهای جهانی
- ایفای نقش بازدارنده در هنگام سقوط بهای انرژی در سطح بین المللی
- در اختیار داشتن قدرت ذخیره سازی به عنوان یک ابزار در اقتصاد سیاسی
- توسعه یافتگی و کسب جایگاه در نظام بین الملل
- افزایش اعتماد در سرمایه گذاری خارجی

### ۱-۳ سابقه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری از نظر اقتصادی، ایمنی و زیست محیطی بر سایر روش‌های ذخیره‌سازی برتری دارد (Berest & Brouard, 2003). مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز در مقایسه با میادین تولید گاز طبیعی از میزان تحویل<sup>۱</sup> بالاتری برخوردارند و سعی می‌شود جانمایی آنها به مصرف کننده نهایی نزدیکتر باشد (آذین، ۱۳۸۸). گاز طبیعی را می‌توان در مخازن گاز و نفت تهی شده<sup>۲</sup>، آبخوان‌ها<sup>۳</sup>، مغارهای سنگ سخت<sup>۴</sup> و مغارهای نمکی<sup>۵</sup> ذخیره نمود. از این میان مغارهای نمکی به دلایل فنی و اقتصادی از جاذبه‌های فراوانی برخوردارند (عطائی و عسگری، ۱۳۹۰).

<sup>۱</sup> Deliverability

<sup>۲</sup> Depleted Reservoirs for Oil and Gas fields

<sup>۳</sup> Aquifers

<sup>۴</sup> Hard rock caverns

<sup>۵</sup> Salt caverns

اولین بار در سال ۱۹۱۵ در کانادا از یک مخزن تهی شده گاز به منظور ذخیره‌سازی گاز طبیعی استفاده شد. یک سال پس از آن آمریکا با ذخیره‌سازی گاز در یک مخزن تهی شده در ایالت نیویورک به جمع کشورهای دارای مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز طبیعی پیوست. از مخازن تهی شده نفت در سال ۱۹۴۲ در ایالت کالیفرنیا آمریکا برای اولین بار برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی استفاده شد. ذخیره‌سازی گاز طبیعی در آبخوان‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۴۶ در ایالت کنتاکی آمریکا انجام شد. نخستین مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی در اروپا در سال ۱۹۵۳ و در یک آبخوان به بهره‌برداری رسید. اولین پروژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمک به حدود نیم قرن پیش در آمریکا برمی‌گردد. تعداد تاسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مخازن زیرزمینی دنیا روند رو به رشدی دارد و هم‌اکنون تعداد آنها به ۶۲۸ عدد می‌رسد و حجم گاز ذخیره شده در آنها بالغ بر ۳۱۸ میلیارد متر مکعب (حدوداً دو برابر مصرف سالانه گاز طبیعی در ایران) می‌باشد. در جدول (۱-۱) وضعیت آماری انواع روش‌های ذخیره‌سازی بر حسب کشورهای دارای این مخازن تا سال ۲۰۰۷ ارائه شده است (Plaat, 2009). همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، حتی کشورهای دارای ذخایر عظیم گاز طبیعی مانند روسیه نیز اقدام به ذخیره‌سازی گاز نموده‌اند.

#### ۴-۱ ضرورت ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی

سنگ نمک (هالیت، NaCl) به دلیل ویژگی‌های خاص از جمله نفوذپذیری بسیار کم، عملاً ماده‌ای نفوذناپذیر محسوب می‌شود (Evans, 2008) که اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بکر آن حتی در آزمایشگاه نیز با دستگاه‌های بسیار خاص و دقیق انجام می‌گیرد (Berest & Brouard, 2003).

جدول (۱-۱): مروری بر مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی دنیا (Plaat, 2009)

| قابلیت تحویل<br>(میلیون متر مکعب<br>در روز) | ظرفیت گاز عملیاتی<br>(میلیارد متر مکعب) | تعداد سایت ذخیره‌سازی |             |                |           |                            | ناحیه            |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|-------------|----------------|-----------|----------------------------|------------------|
|                                             |                                         | مجموع                 | دیگر روش‌ها | مغارهای<br>نمک | آبخوان‌ها | مخازن تهی شده<br>نفت و گاز |                  |
| ۱۵۶۰                                        | ۷۰                                      | ۱۲۳                   | ۳           | ۲۹             | ۲۳        | ۶۸                         | اروپا            |
| ۹۸۰                                         | ۱۰۹                                     | ۵۰                    | -           | ۱              | ۱۳        | ۳۶                         | شوروی<br>سابق    |
| ۲۵۶۰                                        | ۱۰۸                                     | ۳۹۰                   | ۱           | ۲۶             | ۴۵        | ۳۱۸                        | آمریکا           |
| ۳۱۵                                         | ۲۰                                      | ۵۴                    | -           | ۹              | -         | ۴۵                         | کانادا           |
| ۲                                           | ۰/۲                                     | ۲                     | -           | -              | -         | ۲                          | آمریکای<br>جنوبی |
| ۱۱                                          | ۱/۶                                     | ۵                     | -           | -              | -         | ۵                          | آسیا             |
| ۱۰                                          | ۱/۰                                     | ۴                     | -           | -              | -         | ۴                          | استرالیا         |
| ۵۴۴۰                                        | ۳۱۸                                     | ۶۲۸                   | ۴           | ۶۵             | ۸۱        | ۴۷۸                        | مجموع            |

این خاصیت سبب شده است که سنگ نمک توانایی بسیار بالایی در حفظ و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری مایع و گازی از خود نشان دهد (EN British Standard 1918:3, Fokker, 1995). ویژگی دیگر سنگ نمک که باعث شده از دیدگاه ذخیره‌سازی بیشتر مورد توجه قرار بگیرد، قابلیت خود ترمیمی نمک در اثر خزش است (Broome, 2009, DeVries & Neiland, 1999, Zander, 2010, Staudmeister & Zapf, 2010). به این معنی که در سازندهای نمکی و در سطح تنش‌های متوسط، عملاً درزه و ترک در سازند وجود ندارد و یا اگر به وجود آید تحت اثر خاصیت خود ترمیمی سنگ نمک از بین می‌رود (EN British Standard 1918:3). علاوه بر آن درصد تخلخل سنگ نمک بسیار کمتر از سایر سنگ‌های رسوبی است (کمتر از ۱ درصد) (Geluk et al., 2007) که این امر نیز به نوبه‌ی خود بر قابلیت مغارهای ذخیره‌سازی نمک از دیدگاه حفظ مواد هیدروکربوری می‌افزاید. نکته‌ی دیگری که به خصوص از دیدگاه اقتصادی، ذخیره‌سازی در سازندهای نمکی را توجیه پذیر می‌نماید، قابلیت انحلال زیاد سنگ نمک در آب است (Evans, 2008). به این ترتیب تنها با حفر یک چاه از سطح زمین و تزریق آب به درون سازند نمک،

می‌توان فضای بسیار بزرگی در زیر زمین ایجاد کرد و از فضای حاصل برای مقاصد ذخیره‌سازی استفاده نمود. همچنین از لحاظ پدافند غیر عامل، قابلیت استهلاک امواج دینامیکی در سازندهای نمکی و عمق زیاد سازه زیرزمینی نیز مورد توجه است (جلالی و افتخاری، ۱۳۸۸). این روش از لحاظ زیست محیطی هم به دلیل ذخیره‌سازی در اعماق زیاد، دارای مزیت است (Berest et al., 2011).

مجموع این عوامل و عوامل دیگر (مثل افزایش قیمت جهانی گاز) باعث شده تا در طی سالهای اخیر از منظر ذخیره‌سازی توجه بسیار ویژه‌ای به سازندهای دارای نمک به عمل آید. از آنجا که ایران دارای ذخایر زیرزمینی بسیار غنی از سازندهای نمک چه به شکل گنبدیهای نمکی و یا نمک‌های لایه‌ای است (Gillhouse & Horvath, 2008, Folle, 2006)، بنابراین پتانسیل این نوع از ذخیره‌سازی مهیا است.

امروزه استفاده از مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به دلایل فنی و اقتصادی مختلف روند رو به رشدی را طی می‌کند. برای روشن‌تر شدن موضوع جدول (۱-۲) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نسبت میزان گاز برداشت شده از مخازن ذخیره‌سازی مغارهای نمکی طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۸ نسبت به سایر روش‌ها از رشد بسیار بیشتری برخوردار بوده است.

جدول (۱-۲): نسبت میزان گاز برداشت شده از انواع مخازن ذخیره‌سازی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ (EIA, 2005)

| تاریخ (سال) | مخزن تهی شده نفت و گاز | آبخوان | مغار نمکی | مجموع |
|-------------|------------------------|--------|-----------|-------|
| ۱۹۹۸        | ۷۹                     | ۱۰     | ۱۱        | ٪۱۰۰  |
| ۲۰۰۵        | ۷۴                     | ۱۰     | ۱۶        | ٪۱۰۰  |
| ۲۰۰۸        | ۶۵                     | ۱۰     | ۲۵        | ٪۱۰۰  |

## ۱-۵ اهداف تحقیق

مخازن ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری (به ویژه گاز طبیعی) در سازندهای نمکی باید از پایداری و استحکام کافی برخوردار باشند تا علاوه بر حفظ پایداری مکانیکی، از نشت مواد هیدروکربوری به خارج از مخزن جلوگیری شود. به همین دلیل مطالعات مکانیک سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رفتار وابسته به زمان سازند در بر گیرنده مغار، تغییرات شدید فشار و دمای درون آن، عمق زیاد نسبت به سایر

فضاهای زیرزمینی موجود، (Evans et al., 2009) وجود تنش‌های بزرگ در اطراف مغار، تحلیل پایداری فضاهای ساخته شده در سازندهای نمکی را از پیچیدگی‌های بسیار زیادی برخوردار کرده است.

روش‌های مختلفی برای طراحی فضاهای زیرزمینی وجود دارد که شامل روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی است. مهمترین وجه تمایز روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی در قابلیت شبیه‌سازی وضعیت واقعی است (Sinha, 1989). انتخاب هر کدام از این روش‌ها رابطه مستقیمی با نیازها و الزامات هر پروژه خاص دارد. برای مثال در مراحل طراحی اولیه و یا مطالعات امکان‌پذیری هر پروژه استفاده از روش‌های تجربی و یا تحلیلی (فرم بسته<sup>۱</sup>)، نیاز پروژه را تامین می‌کند اما در مراحل طراحی نهایی استفاده از روش‌های عددی ضروری است. با این حال در مورد مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به دلیل پیچیدگی‌های خاص پروژه باید از همه روش‌ها سود برد.

تاکنون مطالعات رفتار مغارهای نمکی عمدتاً به صورت مکانیکی بوده و رفتار توام مکانیکی و ترمودینامیکی مغار بسیار کم صورت پذیرفته است (Zander, 2010). در این تحقیق، رفتار توام ترمودینامیکی و مکانیکی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی شبیه‌سازی شده و به بررسی پایداری آن پرداخته می‌شود.

شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی ایران چندین پروژه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی را در دست اجرا دارد که یکی از آنها پروژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در گنبد نمکی "نصرآباد" کاشان است. لذا انجام مطالعات مکانیک سنگی جهت شناخت چگونگی رفتار فضاهای ایجاد شده در درون این سازند، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است.

نظر به اینکه این پروژه در حال حاضر مراحل اکتشافی اولیه خود را می‌گذراند، بنابراین هنوز حتی اطلاعات نسبتاً دقیقی از وضعیت زمین‌شناسی و ژئومکانیکی محل در دسترس نیست. به همین دلیل

<sup>1</sup>Closed- form

سعی بر آن است تا با مطالعه هر کدام از عوامل موثر بر رفتار مغار نمکی (شامل پارامترهای هندسی مغار، پارامترهای عملیاتی، پارامترهای زمین شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی) در محدوده مورد انتظار، نحوه اثر هر کدام از آنها مشخص شود تا در آینده و با در دست داشتن اطلاعات دقیق از منطقه، طراحی این مغارها را به نحو مطلوب انجام گیرد.

## ۱-۶ ساختار تحقیق

این تحقیق در شش فصل تدوین گردیده است. در فصل نخست (فصل حاضر) به ذکر کلیاتی در مورد چرایی و چگونگی ذخیره سازی گاز طبیعی در فضاهای زیرزمینی پرداخته و هدف از انجام تحقیق مشخص شده است. در فصل دوم به بررسی انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به خصوص روش ذخیره‌سازی در مغارهای نمکی که موضوع این تحقیق است، پرداخته شده است. بررسی پتانسیل‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی ایران، موضوع فصل سوم است. در این فصل سازندهای نمکی ایران بیشتر بر مبنای زمین‌شناسی مورد بررسی اجمالی قرار می‌گیرند و همچنین معیارهای موثر در انتخاب سازند نمکی مناسب جهت ذخیره‌سازی گاز طبیعی شرح داده شده است. در انتهای این فصل منطقه نصرآباد کاشان که محل اجرای اولین پروژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی ایران است، به شکل اجمالی معرفی خواهد شد. در فصل چهارم پس از ارایه اصول کلی مکانیک سنگ مرتبط با طراحی مغارهای نمکی، به تبیین پارامترهای طراحی و تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی پرداخته شده است. در انتهای این فصل نیز روش‌های طراحی شامل روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی بیان شده است. در فصل پنجم به تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی پرداخته شده است. در این فصل عوامل موثر بر رفتار مغارهای نمکی مورد بحث و تجزیه و



تحلیل قرار گرفته است. فصل انتهایی این تحقیق شامل ارایه نتایج حاصل از مطالعات انجام شده و ارایه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی است.

## فصل دوم

روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

## ۲-۱ مقدمه

هدف از این فصل آشنایی با روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به ویژه در سازندهای نمکی است. مزایای فراوان استفاده از فضاهاى زیرزمینی برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی شامل امکان ذخیره‌سازی با ظرفیت زیاد، اشغال فضای سطحی کم، ایمنی و پایداری بالا، تأثیرات زیست محیطی کم و جذب نوسانات فشار گاز باعث کاهش هزینه‌های سرمایه گذاری اولیه برای اجرای طرح‌های گازرسانی و طولانی‌تر شدن عمر شبکه می‌شود (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۰). این موارد باعث شده تا این حفاریات در شرایط متفاوت زمین شناسی و اقتصادی، مورد توجه قرارگیرند.

قبل از ورود به بحث روش‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی، لازم است برخی اصطلاحات توضیح داده شود.

- ظرفیت کلی ذخیره‌سازی گاز<sup>۱</sup>: بیشترین مقدار گازی که می‌توان در مخزن ذخیره کرد.
- گاز پایه<sup>۲</sup>: حجمی از گاز که به عنوان ذخیره دائمی مخزن برای تامین حداقل فشار، حفظ آهنگ برداشت مناسب و اطمینان از پایداری فضا در نظر گرفته می‌شود.
- گاز عملیاتی (کاری)<sup>۳</sup>: حجم گاز در دسترس برای برداشت در یک زمان مشخص و برابر تفاضل کل گاز موجود و گاز پایه است.
- آهنگ گردش گاز<sup>۴</sup>: متوسط تعداد دفعاتی که می‌توان حجم گاز کاری یک مخزن را در یک بازه زمانی مشخص تزریق و تخلیه نمود. بازه زمانی، عموماً یکسال در نظر گرفته می‌شود.
- قابلیت برداشت<sup>۱</sup>: مقدار گازی که می‌توان در یک مدت معین (مثلاً یک روز) از مخزن برداشت نمود.

<sup>1</sup>Total Gas Storage Capacity

<sup>2</sup>Base Gas or Cushion Gas

<sup>3</sup>Working Gas

<sup>4</sup>Cycling Rate

- قابلیت تزریق<sup>۲</sup>: مقدار گازی که می‌توان در یک مدت معین (مثلاً یک روز) به مخزن تزریق نمود.

- پاشنه چاه<sup>۳</sup>: قسمت تحتانی لوله جداری که به درون سازند نمکی پرچ می‌شود.

- گرادیان فشار<sup>۴</sup>: نسبت فشار برای هر واحد از عمق (معمولاً به صورت MPa/m یا psi/ft) شناخته شده است.

با توجه به وابستگی حجم گاز به دما و فشار محیط، کمیت‌های بالا برای شرایط استاندارد (دما ۱۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ بار) گزارش می‌شوند. خصوصیات مخازن در طول زمان ثابت نیستند و تغییر می‌کنند. برای نمونه با افزایش گاز موجود در مخزن، فشار داخلی افزایش یافته و قابلیت برداشت بیشتر می‌شود. بنابراین هنگامی که مخزن پر است، قابلیت برداشت به بیشترین مقدار خود رسیده و با برداشت گاز به تدریج قابلیت آن کم می‌شود. قابلیت تزریق نیز وابسته به گاز موجود در مخزن است، به طوری که در هنگام خالی بودن مخزن، بیشترین مقدار خود را دارد و با پر شدن مخزن از میزان آن کاسته می‌شود. پارامترهای عملیاتی بر ظرفیت کلی گاز و گاز پایه تاثیر گذار هستند (Plaat, 2009).

## ۲-۲ روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

هر کدام از روش‌های ذخیره‌سازی، مشخصات فنی (تخلخل، نفوذپذیری و قابلیت حفظ هیدروکربور) و اقتصادی خاص خود را دارد. گاز طبیعی در زیرزمین به دو صورت مختلف ذخیره می‌شود:

الف) محیط متخلخل: در تعدادی از روش‌ها، گاز در فضای حفرات ریز میان دانه‌ای سازندهای متخلخل زیرزمینی مانند آبخوان‌ها و مخازن تهی شده گاز و نفت ذخیره می‌شود. در این روش‌ها، هرچقدر

<sup>1</sup> Deliverability

<sup>2</sup> Injection Capacity

<sup>3</sup> Casing shoe

<sup>4</sup> Pressure gradient

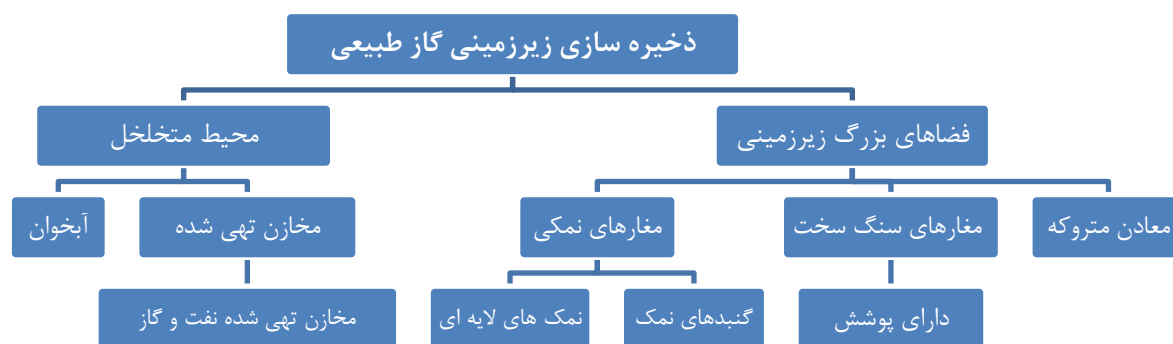
سازند دارای تخلخل و نفوذپذیری بیشتری باشد، برای ذخیره‌سازی مطلوب‌تر است. همچنین در این روش‌ها مخازن با حجم توزیع زیاد برای برآورده کردن رشد تقاضاهای فصلی استفاده می‌شود. این نوع مخازن، قادر به نگه داشتن گاز طبیعی کافی برای برآورده کردن تقاضاهای مورد نیاز فصلی به صورت طولانی مدت هستند. معمولاً نرخ گردش در این مخازن یک سال است. گاز طبیعی معمولاً در طول فصل گرم سال تزریق می‌شود. این نوع از مخازن دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بالایی هستند اما آهنگ تولید آنها نسبتاً کم است. بدان مفهوم که مقدار گاز قابل برداشت روزانه محدود است. اما با عنایت به حجم فوق‌العاده زیاد، این مخازن می‌توان به عنوان منبع عرضه پایدار و طولانی مدت استفاده کرد (Plaats, 2009).

ب) فضاهای بزرگ زیرزمینی: در این روش با احداث یک فضای زیرزمینی به منظور ذخیره‌سازی (مثل مغارهای سنگ سخت و یا مغارهای نمکی) ذخیره‌سازی انجام می‌گیرد. در شکل (۱-۲) انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ارائه شده است. این نوع مخازن طوری طراحی می‌شوند که آهنگ تولید بالایی در مدت زمان کوتاه را داشته باشند. بدین منظور که گاز را به سرعت می‌توان از این مخازن برداشت نمود. این سازه‌ها به منظور برآورده کردن نیازهای ناگهانی و رشد تقاضاهای کوتاه مدت ساخته می‌شوند. از مخازن واقع در فضاهای بزرگ زیرزمینی برای تامین اوج مصرف در زمان‌های کوتاه و از مخازن واقع در سازندهای متخلخل برای تامین گاز طبیعی در مدت طولانی‌تر استفاده می‌شود (شکل ۲-۲) (زارعیان، ۱۳۸۸).

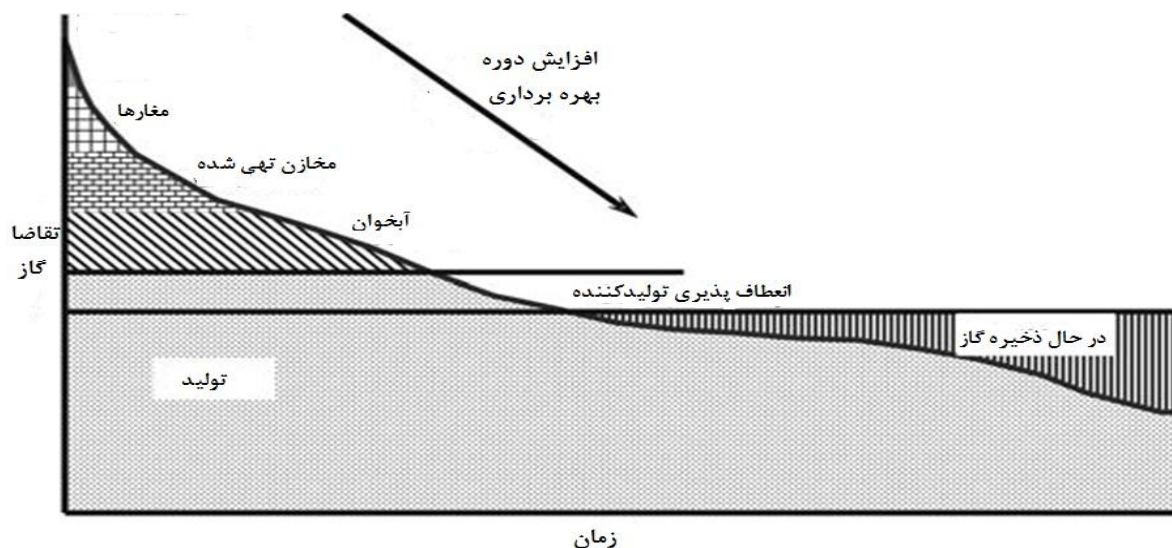
## ۱-۲-۲ مخازن تهی شده گاز و نفت

استفاده از مخازن تهی شده گاز و نفت، رایج‌ترین روش ذخیره‌سازی گاز است. اولین بار در سال ۱۹۱۶ از این روش در آمریکا استفاده شد (Plaats, 2009). مخازن تهی شده دارای فضای مناسب و آماده‌ای برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی هستند. وجود بسیاری از امکانات مانند زیرساخت‌های برداشت و انتقال و نیز آگاهی از وضعیت فیزیکی و زمین‌شناسی مخزن موجب کاهش هزینه‌های اولیه ذخیره‌سازی و جذابیت

اقتصادی این روش گردیده است. در مخازن تهی شده برای تامین فشار کاری مورد نیاز، نزدیک به ۵۰ درصد ظرفیت ذخیره‌سازی گاز به عنوان گاز پایه در نظر گرفته می‌شود. دوره گردش این گاز یک بار در سال است (Plaat, 2009).



شکل (۱-۲): انواع روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی (اصلاح شده از داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل (۲-۲): نحوه استفاده از روش‌های مختلف ذخیره‌سازی گاز طبیعی با توجه به میزان تقاضا (Plaat, 2009)

در مناطقی که مخازن تهی شده نفت و گاز وجود ندارد (مثلا در اروپای مرکزی)، ذخیره سازی در مغاره‌های نمکی و آبخوان‌ها مورد توجه است. از لحاظ زمین‌شناسی، سازندهای تهی شده باید دارای

نفوذپذیری و تخلخل بالایی باشند. تخلخل، بر مقدار گاز طبیعی درون سازند و نفوذپذیری بر نرخ جریان گاز در داخل سازند موثر است. از مخازن تخلیه شده برای ذخیره سازی دی اکسید کربن و هیدروژن نیز استفاده شده است (Plaat, 2009). در ایران اولین مخزن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مخزن نفتی سراجیه در ۴۰ کیلومتری قم در حال ایجاد و تجهیز برای ذخیره سازی گاز طبیعی است. این مخزن به منظور تزریق ۷/۳ میلیون متر مکعب گاز در ماه‌های گرم و برداشت ۹/۸ میلیون مترمکعب در ماه‌های سرد سال ایجاد شده است (ماهنامه شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی، مرداد ۱۳۹۰).

## ۲-۲-۲ آبخوان‌ها

تاکنون بیش از ۸۱ مخزن ذخیره‌سازی گاز در جهان از نوع آبخوان ساخته شده است که بزرگترین آنها در فرانسه و با ظرفیتی معادل ۳/۵ میلیارد متر مکعب قرار دارد (Plaat, 2009).

آبخوان‌ها، سازندهای متخلخل و نفوذپذیری هستند که به عنوان مخازن طبیعی آب عمل کرده و در بعضی شرایط خاص می توانند به عنوان مخازن گاز طبیعی استفاده شوند. هزینه تبدیل آبخوان‌ها به مخزن بسیار بیشتر از مخازن تهی شده است. این نوع انبارها تنها در مناطقی استفاده می شود که مخزن تهی شده‌ای وجود ندارد. معمولاً دوره گردش گاز در این مخازن یک بار در سال است (زارعیان، ۱۳۸۸).

آبخوان‌ها به دلیل ناشناخته بودن خصوصیات زمین شناسی محل آنها، صرف زمان و هزینه‌های زیاد برای تعیین کیفیت و تبدیل آن به مخزن و نیز حجم زیاد گاز پایه مورد نیاز (گاهی تا ۸۰ درصد)، نامطلوب‌ترین و پرهزینه‌ترین نوع از سازه‌های ذخیره سازی زیرزمینی گاز طبیعی به شمار می‌روند. علاوه بر هزینه و زمان زیادی که برای ایجاد این نوع مخازن صرف می‌شود، محدودیت های محیطی نیز برای استفاده از آنها به عنوان مخازن ذخیره گاز طبیعی وجود دارد (Plaat, 2009).

سازندهای حاوی آب نمی‌توانند گاز را مانند مخازن تهی شده نگه دارند. مقداری از گازی که تزریق شده است از سازند فرار می‌کند که باید توسط چاه جمع آوری شود.

استخراج گاز پایه از مخازن تهی شده امکان پذیر است، اما انجام چنین عملی برای آبخوان‌ها اثرات منفی از جمله خسارت به سازند را به دنبال دارد. بیشتر مخازن سفره‌های آب هنگامی که قیمت گاز طبیعی کم بوده است توسعه داده شده‌اند، به طوری که هزینه گاز پایه بسیار ارزان تمام می‌شده است. بنابراین با افزایش قیمت گاز طبیعی ایجاد مخازن از نوع آبخوان‌ها بسیار گران است (زارعیان، ۱۳۸۸). ایران در حال حاضر دارای یک مخزن در حال ساخت از این نوع در یورتشای ورامین است. ظرفیت این مخزن ۴ میلیون و ۸۰۰ هزار متر مکعب است (ماهنامه شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی، مرداد ۱۳۹۰).

### ۲-۲-۳ مغارهای سنگی با پوشش

ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در مغارهای سنگی به دو شکل مغارهای سنگی دارای پوشش و مغارهای سنگی بدون پوشش انجام می‌شود. مهمترین مزیت مغارهای دارای پوشش نسبت به مغارهای بدون پوشش، عدم وابستگی به شرایط هیدروژئولوژیکی است. به لحاظ اجرایی امکان اجرای سازه‌های ذخیره‌سازی با پوشش در هر محیطی وجود دارد ولی هر چه محیط به لحاظ ژئومکانیکی پایدارتر باشد، هزینه‌های اجرا هم به مراتب کاهش خواهد یافت.

برای ساخت مغارهای دارای پوشش، پس از حفر فضای زیرزمینی، دیواره مغار با جدارهای فلزی (غشاء نفوذناپذیر) پوشیده شده، پس از آن میان لایه فلزی و سنگ دیواره بتن ریزی می‌شود. کنترل نشت مواد هیدروکربوری توسط این غشاء نفوذناپذیر صورت می‌گیرد. در مغارهای سنگی دارای پوشش مقاومت بالای سنگ حایز اهمیت است اما خواص نفوذپذیری آن از اهمیت کمتری برخوردار است (کریمی نسب و همکاران، ۱۳۸۸). این روش بسیار پرهزینه است و بیشتر در کشورهایی که دارای مخازن تهی شده نفت و گاز یا سازه‌های نمکی مناسب نیستند اجرا شده است (کریمی نسب و همکاران، ۱۳۸۸، EN British Standard 1918:4). فناوری ساخت اینگونه مغارها، استفاده از تکنولوژی معمول معدنکاری یا روش‌های جدید حفاری است (Johnson, 2004).



با ساخت دو مغار سنگ سخت بدون پوشش در جمهوری چک، این سازه‌ها برای ذخیره‌سازی گاز مورد توجه قرار گرفتند. این مغارها شامل تونل‌هایی با طول ۴۵ کیلومتر هستند که در عمق نزدیک به ۱۰۰۰ متری زیر زمین قرار دارند و در مجموع دارای حجم گاز کاری  $۵۴ \times ۱۰^۶$  متر مکعب (در حالت استاندارد) هستند (Plaata, 2009).

در سوئد در سال ۲۰۰۴ اولین مغار سنگ سخت دارای پوشش فولادی مورد بهره برداری قرار گرفت. این مغار با حجمی حدود ۴۰ هزار مترمکعب در درون سنگ‌های گرانیتی ساخته شده و با حجم گاز کاری بیش از  $۸/۵ \times ۱۰^۶$  متر مکعب، قابلیت تحویل  $۹۶۰ \times ۱۰^۳$  متر مکعب گاز در روز را دارد (Plaata, 2009).

## ۲-۲-۴ مغارهای نمکی

ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی اولین بار در ایالت میشیگان آمریکا در سال ۱۹۶۱ صورت گرفت (Allen, 1972). اولین مغار نمکی ویژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سال ۱۹۶۳ در ساسکاچوان کانادا<sup>۱</sup>، طراحی و ساخته شد. در آمریکا نیز اولین مغار نمکی اختصاصی ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سال ۱۹۷۰ در ایالت می‌سی‌سی‌پی ساخته شد. در اروپا تاسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی ابتدا در ارمنستان (Abovian سال ۱۹۶۴)، سپس در فرانسه (Tersanne سال ۱۹۶۸) و آلمان (Kiel سال ۱۹۶۹) ساخته شدند (Thomas & Gehle, 2000).<sup>۲</sup>

بین سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۷۸ آلمان شروع به ساخت مغارهای ذخیره‌سازی استراتژیک نفت خام در (Etzel) نمود. بعدها تعدادی از این مغارها با تغییر کاربری، برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی استفاده شدند.

در سال ۲۰۰۷، تعداد تاسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی به بیش از ۶۵ عدد رسیده است (Plaata, 2009). هر کدام از تاسیسات ذخیره‌سازی خود شامل چندین مغار نمکی است. لازم به

<sup>۱</sup>Saskatchewan

ذکر است که تنها در ۵۰ عدد از این مغارها حدود ۵/۷ میلیارد متر مکعب گاز طبیعی ذخیره شده است (Gillhaus & Horvath, 2008). در ادامه به ذکر روش ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی و الزامات آن پرداخته می‌شود.

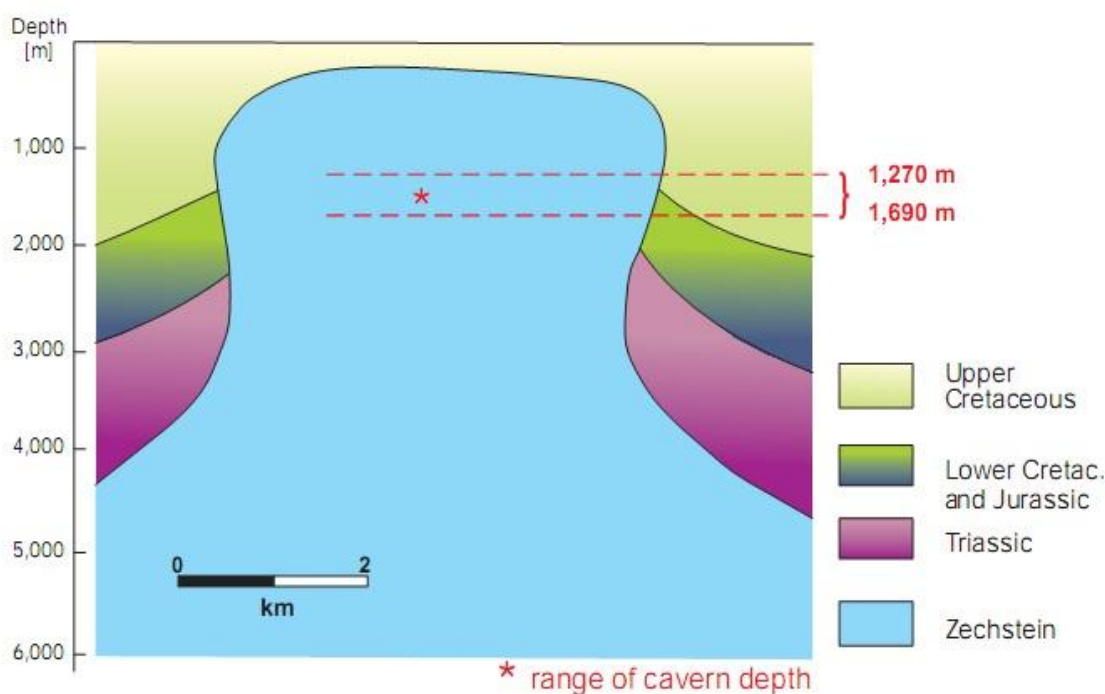
## ۲-۴-۱ ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی

در ساخت مغار مناسب برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی باید الزاماتی به شرح زیر را در نظر گرفت (EN British Standard 1918:3):

- الف) ارزیابی مناسب بودن سازند نمکی از لحاظ زمین شناسی به منظور ذخیره‌سازی
  - ب) توصیف وضعیت رفتار نمک تحت شرایط تنش و دمای مورد انتظار در اطراف مغار و تحلیل پایداری کوتاه مدت و بلند مدت سازه آن
  - پ) حفاری، بتن ریزی و تکمیل چاه<sup>۱</sup> به منظور جلوگیری از نشت گاز
  - ت) انحلال کنترل شده مغار تا رسیدن به شکل و ابعاد مورد نظر
  - ث) اولین تزریق گاز<sup>۲</sup> تحت شرایط کنترل شده
  - ج) پایش پارامترهای بحرانی مغار در طول بهره‌برداری از آن
- بدیهی است در تمام سازندهای نمکی نمی‌توان گاز طبیعی ذخیره‌سازی کرد بنابراین باید اکتشافات و مطالعات کافی صورت گیرد تا سازند مناسب انتخاب شود. سازندهای نمکی مناسب باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشند تا بتوان مغارهای نمکی را در آنها احداث کرد. ایده‌آل‌ترین مکان برای ساخت مغارهای نمکی، گنبد‌های نمک مثل گنبد‌های نمک خلیج مکزیک یا گنبد‌های اروپای شمال غربی هستند. این گنبد‌ها عموماً بیش از چند هزار متر ارتفاع دارند و قطرشان چندین کیلومتر است (شکل ۲-۳).

<sup>۱</sup>Completion

<sup>۲</sup>First gas fill



شکل (۲-۳): مقطع قائم گنبد نمکی Tostrup، دانمارک (Gillhaus & Horvath, 2008)

مغارهای نمک در نمک‌های لایه‌ای<sup>۱</sup> نیز ساخته شده‌اند. برای مثال در فرانسه، کانادا و شرق آمریکا و چین مغارهایی از این نوع وجود دارند. نمک‌های لایه‌ای عموماً بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر ضخامت دارند و حجم مغارهای ساخته شده در آنها معمولاً بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ هزار متر مکعب تغییر می‌کند. شکل مطلوب مغارهای نمکی، سیلندر قائم با ارتفاع چند صد متر و قطر بین ۵۰ تا ۸۰ متر است. چنین مغارهای عموماً حجمی بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ هزار متر مکعب دارند. عمر مفید مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز بین ۲۰ تا ۵۰ سال است (Istvan & Querio, 1983, Lux, 1990).

روش ساخت مغارهای نمکی، معدنکاری انحلالی<sup>۲</sup> است. معدنکاری انحلالی قدمتی بیش از صد سال دارد (Warren, 2006) و برای طیف گسترده‌ای از کانی‌ها قابل استفاده است (Gaz de France, 1987). (Evans, 2008a). امروزه طراحی و ساخت مغارهای نمک به منظور ذخیره‌سازی گاز طبیعی به حدی

<sup>۱</sup> Bedded salt

<sup>۲</sup> Solution Mining

پیشرفت کرده که فرآیندی به نام معدنکاری انحلالی ویژه گاز<sup>۱</sup> (SMUG) توسعه یافته است (Evans, 2008b).

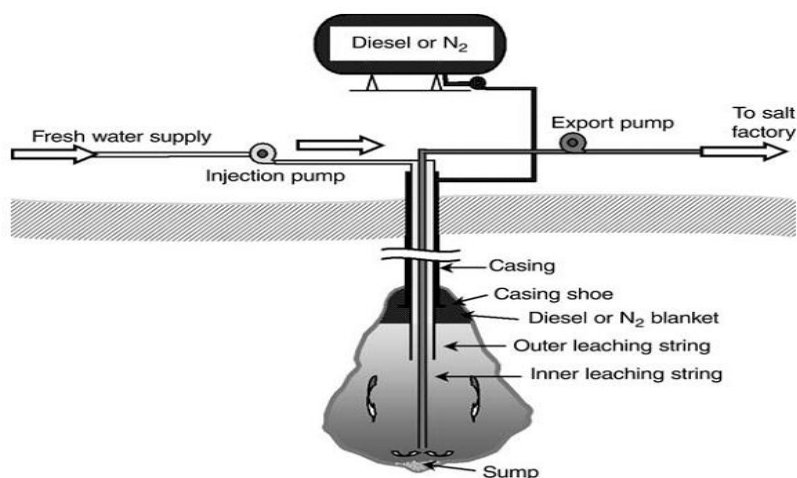
برای ایجاد مغار در یک گنبد نمکی یا لایه‌ی ضخیم نمک ابتدا یک چاه تا بخش بالایی لایه نمکی حفاری شده، سپس لوله گذاری و بتن ریزی آن از کف چاه تا سطح زمین انجام می‌شود. پس از آن بسته به هدف (معمولا یک یا دو لوله) تعدادی لوله به صورت هم مرکز در درون چاه قرار داده می‌شود. پس از آماده سازی چاه، آب شیرین از طریق لوله مرکزی به دورن سازند نمکی تزریق شده تا نمک‌های درون سازند را در خود حل نماید (شکل ۲-۴). با انجام این عمل (موسوم به انحلال<sup>۲</sup>) نمک در آب حل شده و آن را شور می‌نماید که در اصطلاح به آن شوراب<sup>۳</sup> گویند. شوراب در نهایت از طریق فضای بین لوله مرکزی و جداری به سطح زمین رانده می‌شود. فضای خالی میان لوله جداری و لوله انحلال بیرونی از مواد سبک نفتی یا گاز پر می‌شود تا از آن به عنوان پتوی محافظ<sup>۴</sup> سقف مغار و پاشنه چاه در برابر انحلال استفاده شود (API 1114, EN British Standard 1918:3). شوراب، توسط خطوط لوله به سطح زمین منتقل شده یا با تزریق به درون فضاهای متخلخل زیرزمینی (معمولا در زیر سفره‌های آب شیرین) انباشته می‌شود. ساخت مغارهای نمک منجر به تولید مقدار زیادی شوراب می‌شود که باید آن را به نحو مناسبی دفع کرد. در بعضی موارد دفع شوراب به حدی اهمیت پیدا می‌کند که شرایط اقتصادی پروژه را تحت تاثیر زیاد قرار داده و ممکن است آن را متوقف کند (Plaat, 2009).

<sup>1</sup>Solution Mining Under Gas

<sup>2</sup>Leaching

<sup>3</sup>Brine

<sup>4</sup>Blanket



شکل (۲-۴): فرآیند انحلال در مغارهای نمک و اجزای سیستم فرآیند (Plaat, 2009)

مدت زمان ساخت مغار بستگی به آهنگ تزریق آب و درجه شوری شوراب دارد. به صورت تقریبی با تزریق هر هفت تا ده متر مکعب آب به درون مغار، یک متر مکعب نمک استحصال می‌شود (Leith, 2001). شکل مغار به وسیله جابجایی عمق لوله‌های انحلال و تولید، سطح تراز پتوی محافظ، آهنگ و جهت گردش سیال قابل کنترل است. شکل مغار در دوره ساخت آن به صورت متوالی توسط تجهیزات پایش سونار<sup>۱</sup> کنترل می‌شود. ایجاد مغارهای نمکی با روش انحلالی بسته به حجم آنها از چند ماه تا چند سال به طول می‌انجامد.

بطور کلی مراحل معدنکاری انحلالی به سه مرحله اصلی تقسیم بندی می‌شود:

(۱) بازکردن سازند: شامل حفاری چاه

(۲) آماده سازی: شامل هدایت لوله ها به درون چاه و سیمان کردن پشت لوله‌ها، نصب تاسیسات

سطحی نظیر (پمپ ها، خطوط لوله و تانکرها) مستقر و آغاز فاز انحلال

(۳) انحلال: انحلال نمک با غلظت مورد نظر تا رسیدن به حجم و شکل مورد نظر (Saygun, 2008).

<sup>1</sup>Sonar

مهمترین روش در میان روش‌های مختلف انحلال، روش انحلال مستقیم و معکوس است. با تغییر و ترکیب نحوه تزریق سیال در این روش‌ها، شکل مطلوب مغار حاصل می‌شود. در روش مستقیم، آب از درون لوله مرکزی به درون سازند تزریق و شوراب حاصل از طریق لوله جداری به سطح زمین پمپ می‌شود. شکل مغار حاصل در این روش تقریباً استوانه‌ای است. اما در روش معکوس، آب از لوله جداری تزریق و شوراب از طریق لوله مرکزی به بیرون هدایت می‌شوند. در این روش بیشتر فقط بخشی از مغار که نزدیک به سقف مغار است (نقطه تزریق) توسعه می‌یابد. شکل مغار در این روش شبیه به مخروط وارونه است.

فرآیند انحلال، فرآیندی پیچیده است که توصیف آن نیازمند استفاده از معادلات دیفرانسیل غیر خطی با وضعیت مرزی پیچیده است. مهمترین عواملی که بر انحلال نمک تاثیر گذارند شامل دما، مواد نامحلول سنگ نمک، غلظت شوراب هستند (Saygun, 2008).

قبل از شروع تزریق گاز به درون مغار و بعد از آن باید از استحکام مغار برای ذخیره‌سازی گاز اطمینان حاصل شود. این مهم با استفاده از آزمون سلامت مغار<sup>۱</sup> (MIT) انجام می‌گیرد. در آزمون سلامت مغاری که حاوی سیال مایع است<sup>۲</sup>، یک سیال سبک (معمولاً مواد سبک هیدروکربوری یا نیتروژن) از طریق لوله جداری تزریق شده، سپس با پایش سطح مشترک سیال و شوراب، سلامت مغار از نظر نشت بررسی می‌گردد. آزمون سلامت برای مغارهای حاوی سیال مایع (آزمون سلامت معمول MIT) با تست سلامت مغارهای حاوی گاز<sup>۳</sup> متفاوت است. مهمترین دلیل این تفاوت تشکیل سطح مشترک بین دو سیال (سیال آزمون MIT و شوراب) در مغارهای حاوی سیال مایع و عدم تشکیل آن در مغارهای حاوی گاز (به دلیل نبود سیال مایع در مغار)، برمی‌گردد. به‌طور کلی انجام آزمون سلامت برای مغارهای گازی بسیار پیچیده‌تر است و امکان بروز خطای بیشتری در آن وجود دارد. آزمون‌های سلامت برای مغارهای گازی که پس از تزریق گاز و قبل از شروع به بهره‌برداری انجام می‌گیرد، به‌طور کلی به دو دسته روش‌های

<sup>1</sup>Mechanical Integrity Test

<sup>2</sup>Brine-filled cavern

<sup>3</sup>Gas-filled cavern

خارجی<sup>۱</sup> (شامل بررسی سلامت مغار، چاه و پاشنه چاه) و روش‌های داخلی<sup>۲</sup> (فقط شامل بررسی لوله جداری و فضای حلقوی چاه) تقسیم می‌شود (Nelson & Van Sambeek, 2003).

قبل از آنکه مغار برای بهره برداری و ذخیره‌سازی گاز طبیعی آماده شود لازم است شوراب از درون آن تخلیه شود تا فضای لازم برای ذخیره‌سازی گاز مهیا گردد. به روش انجام این کار آبرانی<sup>۳</sup> گویند. فرآیند آبرانی متداول شامل تزریق گاز طبیعی از جدار بیرونی چاه<sup>۴</sup> به درون مغار و تخلیه شوراب از طریق لوله مرکزی است. این فرآیند در شکل (۲-۵) مشخص شده است.

فشار گاز طبیعی که به درون مغار تزریق می‌شود باید به گونه‌ای تنظیم شود که بر دو عامل فشار استاتیکی ستون شوراب و نیز فشار اصطکاکی ناشی از جریان شوراب (در مغار و لوله تخلیه) غلبه نماید. مادامی که شوراب از درون مغار در حال تخلیه است، سطح مشترک گاز و شوراب به سمت پایین حرکت کرده و این امر باعث افزایش فشار استاتیکی مورد نیاز برای آبرانی مغار می‌شود. بنابراین برای به منظور تخلیه شوراب باید فشار گاز مرتباً افزایش داده شود (شکل ۲-۶) (Thompson, 2008). آهنگ تزریق گاز نیز به عمق مغار یا به عبارت بهتر به عمق سطح مشترک گاز/شوراب بستگی دارد (Blecker et al., 1994).

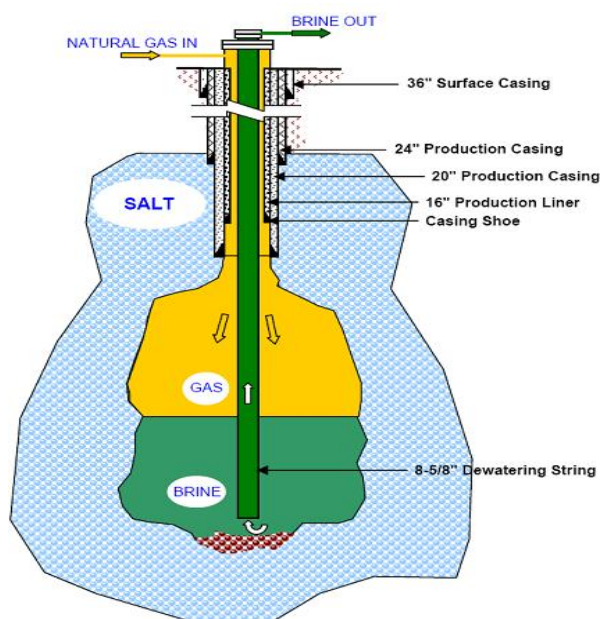
فرآیند آبرانی متداول بیشتر برای مغارهایی کاربرد دارد که محدودیت فشاری در پاشنه چاه اجازه تخلیه کامل آب داخل مغار، قبل از رسیدن فشار به حد نهایی در پاشنه چاه بدهد. در بسیاری از موارد (به خصوص در مورد مغارهای با ارتفاع زیاد) تنها استفاده از روش معمول برای تخلیه شوراب کافی نیست و روش‌های دیگری نظیر استفاده از پمپ شناور یا تزریق گاز به درون لوله تخلیه همراه با آن اجرا می‌شود (Thompson, 2008). این مطلب در شکل (۲-۶) در بخش پایینی مغار (بین ۳۴۰۰ تا ۳۷۵۰ فوت) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>External method

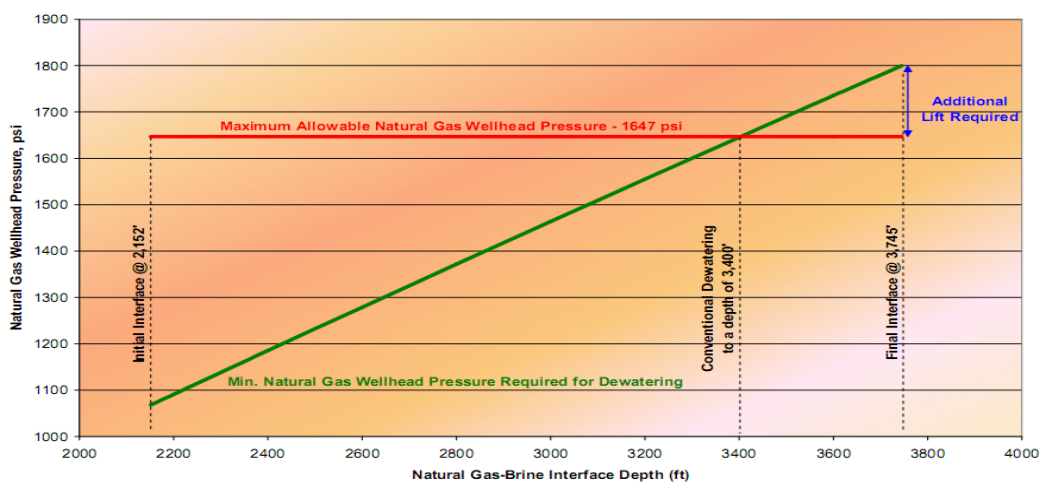
<sup>۲</sup>Internal method

<sup>۳</sup>Dewatering or Debrining or Gas first-fill

<sup>۴</sup>Annulus



شکل (۲-۵): نمایی از فرآیند آبرانی مرسوم (Thompson, 2008)

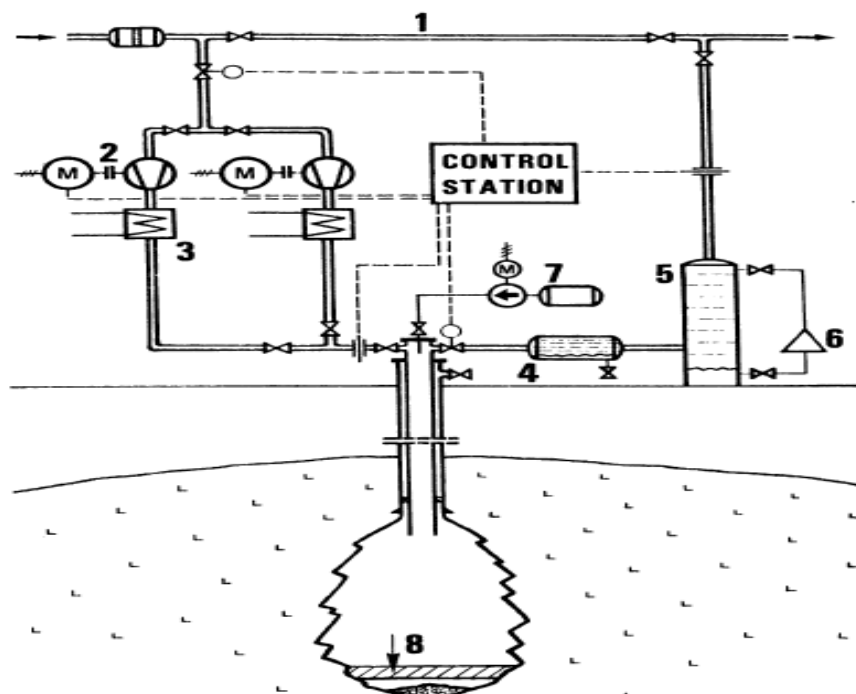


شکل (۲-۶): نیروی اضافه مورد نیاز برای غلبه بر فشار استاتیکی اضافه بر محدودیت فشاری گاز در پاشنه چاه (Thompson, 2008)

به طور کلی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به دو صورت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. تفاوت این دو روش به نحوه تخلیه گاز بر می‌گردد. در روش نخست با تزریق شورابه به جای گاز تخلیه



شده، فشار کمینه داخلی مغار در حد مطلوبی حفظ می‌شود<sup>۱</sup>. در روش دوم که بیشتر معمول است مقداری گاز در مغار باقی می‌ماند (گاز پایه) تا با استفاده از فشار داخلی آن پایداری مغار حفظ گردد. پر واضح است که در روش نخست از کل گاز ذخیره شده می‌توان استفاده کرد اما در روش دوم حدود یک سوم تا یک چهارم گاز باید به عنوان گاز پایه در مغار باقی بماند. در شکل (۷-۲) تاسیسات سطحی مورد نیاز به منظور ذخیره‌سازی گاز طبیعی با روش دوم ذخیره‌سازی نشان داده شده است (Haddenhorst & Quast, 1992). همانطور که در شکل (۷-۲) دیده می‌شود؛ این تاسیسات شامل (۱) خط لوله اصلی، (۲) ایستگاه کمپرسور، (۳) سرد کننده، (۴) جدا کننده، (۵) واحد دهیدراسیون، (۶) احیا کننده گلیکول، (۷) مخزن متانول برای جلوگیری از هیدراسیون و (۸) ته‌نشین گاه<sup>۲</sup> است. در این تحقیق روش دوم که بیشتر معمول است مد نظر قرار دارد.



شکل (۷-۲): نمایی شماتیک از ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمک (Haddenhorst & Quast)

<sup>۱</sup>De-brining mode

<sup>۲</sup>Sump

در جدول (۱-۲) برنامه زمان‌بندی احداث یک مغار نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فرآیند انحلال مغار و اولین تزریق گاز بیشترین زمان را در کل فرآیند احداث مغار به خود اختصاص می‌دهند (Bernhardt, 2011).

همانطور که در شکل (۸-۲) نشان داده شده است، به منظور طراحی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی باید اجزای سیستم ذخیره‌سازی (یعنی پایداری و استحکام مغار، سرعت همگرایی مغار) در حالت بهینه‌ای قرار گیرند (Allison, 1992). از دیدگاه مکانیک سنگی، مغار نمکی باید طوری طراحی شود تا ضمن برقراری پایداری، مغار در حالت بهینه‌ای از نظر بازدهی قرار داشته باشد.

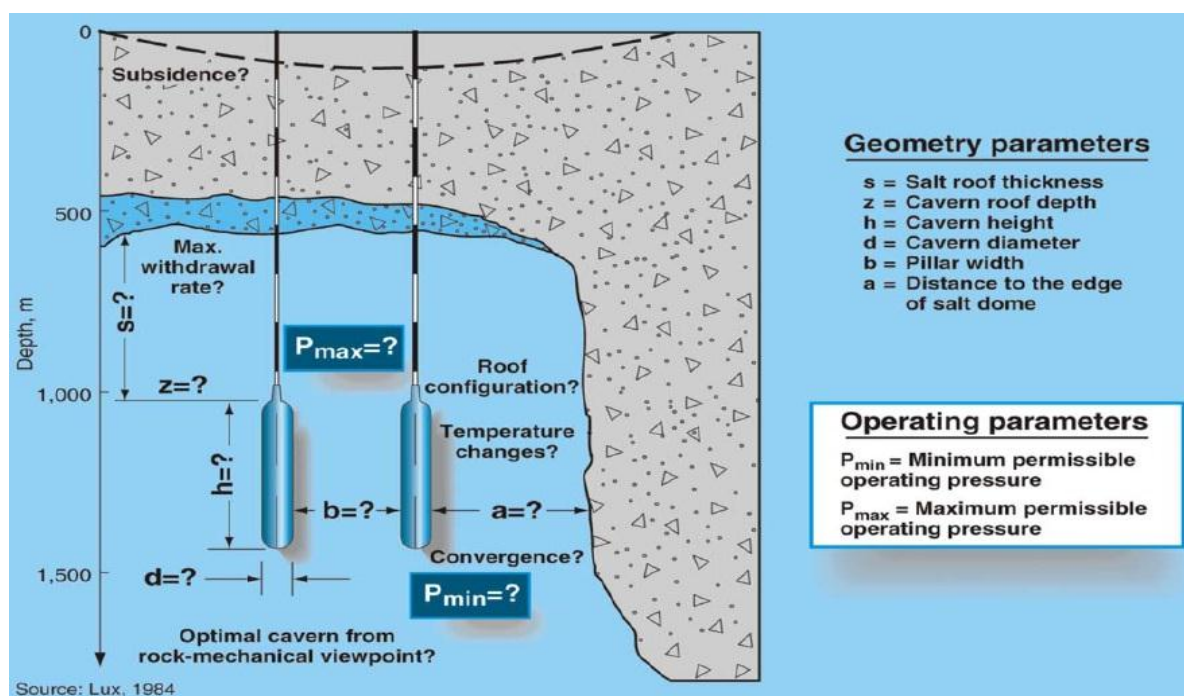
جدول (۱-۲): نمونه‌ای از برنامه زمان‌بندی احداث یک مغار (Bernhardt, 2011)

| نام فرآیند                             | مدت زمان (هفته) |
|----------------------------------------|-----------------|
| حفاری چاه                              | ۸               |
| آزمون سلامت مغار                       | ۳               |
| انحلال                                 | ۱۲۵             |
| آزمون سلامت مخصوص مغارهای گاز          | ۴               |
| تکمیل چاه                              | ۴               |
| آبرانی (اولین تزریق گاز)               | ۵۳              |
| خارج کردن لوله‌های انحلال <sup>۱</sup> | ۱               |
| مجموع زمان                             | ۱۹۸             |

بدین معنی که ضمن داشتن حجم کافی و قابلیت برداشت و تزریق مناسب، آهنگ کاهش حجم مغار و میزان نشست سطح زمین در حد مناسبی باشد. پارامترهای طراحی مغار به طور کلی در دو گروه پارامترهای هندسی و پارامترهای عملیاتی جای می‌گیرند. پارامترهای هندسی شامل ابعاد مغار، فاصله مغار از مرزهای سازند نمک، عمق آن از سطح زمین و همچنین از مغارهای مجاور می‌شود. پارامترهای عملیاتی یا بهره برداری نیز شامل مشخصات سیکل تزریق و تخلیه گاز (مثل فشار بیشینه و کمینه، آهنگ تزریق و تخلیه گاز از درون مغار) می‌شود.

<sup>1</sup>Snubbing

الزامات مورد نیاز برای پایداری مغار، معمولاً منجر به ایجاد محدودیت در انتخاب شکل، ارتفاع مغار و سیکل فشارهای بیشینه و کمینه<sup>۱</sup> می‌شود (Plaats, 2009). اگر فشار بیشینه با فشار روباره برابر شود، احتمال ایجاد ترک در سازند نمک بسیار زیاد می‌شود. فشار کمینه نیز باید طوری انتخاب شود که همگرایی مغار در اثر خزش در حد قابل قبولی یا قی بماند و اتساع در سنگ نمک نیز رخ ندهد (Evans, 2008b). فشار کمینه مجاز را معمولاً بین ۲۰ تا ۳۵ درصد فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه در نظر می‌گیرند (Neiland, 2008). این بدان معنی است که میزان گاز پایه حدود یک چهارم تا یک سوم کل حجم گاز درون مغار و گاز کاری حدود دو سوم آن را تشکیل می‌دهد (Plaats, 2009). همچنین فشار بیشینه مجاز بین ۷۵ تا ۸۵ درصد فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه در نظر گرفته می‌شود (Neiland, 2008).



شکل (۲-۸): پارامترهای هندسی و بهره‌برداری مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی (Rolfs et al., 2006)

سنگ نمک ماده‌ای پلاستیک است که تحت تنش ثابت به آهستگی حرکت (خزش) می‌کند (Plaats, 2009). رفتار سنگ نمک تحت بارگذاری متناوب (یعنی آنچه که در مغارهای ذخیره‌سازی گاز به

<sup>۱</sup>Maximum and Minimum Operating Pressure

وقوع می‌پیوندد) با بارگذاری ثابت (یعنی آنچه که در مغارهای ذخیره‌سازی مواد مایع به وقوع می‌پیوندد) کاملاً متفاوت است (Arnold et al., 2011). با افزایش دما خاصیت خزش سنگ نمک افزایش می‌یابد. از آنجا که فشار درون مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی همواره باید کمتر از فشار ناشی از سنگ‌های روباره باشد، سنگ نمک همواره به درون مغار حرکت می‌کند. بنابراین کاهش حجم مغار همیشه وجود دارد. تنها باید با طراحی و بهره‌برداری بهینه میزان آن را در کمترین حالت ممکن قرار داد. برای مغارهایی که در عمق ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ متری از سطح زمین قرار دارند، آهنگ کاهش حجم مغار معمولاً کمتر از ۱ درصد حجم مغار در سال است. در اعماق بیشتر به دلیل افزایش فشار ناشی از روباره و همچنین دمای بیشتر، آهنگ کاهش حجم به سرعت افزایش پیدا می‌کند. برای نمونه، مغاری که در کشور هلند در نزدیکی منطقه هارلینگن<sup>۱</sup> و در عمق ۳۰۰۰ متری ساخته شده، آهنگ کاهش حجم حدود ۷۰ درصد در سال را نشان داده است. این مقدار کاهش حجم بدین معنی است که تقریباً مغار به همان سرعت که ساخته شد، دچار کاهش حجم شده است (Plaat, 2009). به‌طور کلی سه عامل عمق، فشار درونی مغار (به ویژه فشار کمینه) و خصوصیات خزشی سنگ نمک بیشترین تاثیر را بر آهنگ همگرایی مغار دارند. سایر عوامل مثل دما (که وابسته به عمق و فرآیند ترمودینامیکی حاکم بر مغار است)، شکل، اندازه مغار و فضاهای زیرزمینی همجوار نیز بر آهنگ همگرایی مغار تاثیرگذارند (Slizowki et al., 2009).

برای آنکه آهنگ کاهش حجم مغار در حد قابل قبولی باشد، اعماق کم ترجیح داده می‌شوند. اما از طرف دیگر، فشاری که در آن گاز در مغار ذخیره می‌شود با افزایش عمق افزوده می‌گردد و از این لحاظ در مغارهای با حجم مساوی هر چه مغار عمیق‌تر باشد، حجم بیشتری از گاز با قابلیت تحویل بالاتری را می‌توان ذخیره کرد. بنابراین برای به تعادل رسیدن دو محدودیت فشار درون مغار و کاهش حجم آن،

---

<sup>1</sup>Harlingen

عمق مغارها را معمولا کمتر از ۱۷۰۰ متر و ترجیحا بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در نظر می‌گیرند (Plaat, 2009).

ظرفیت گاز کاری یک مغار ساخته شده در گنبد نمک حدودا ۴۰ تا ۷۰ میلیون متر مکعب است، با این شرایط برای احداث تاسیسات قابل قبول نیاز به چندین مغار است. از نقطه نظر پایداری، فاصله بین مغارهای نمک باید به اندازه کافی زیاد باشد (عموما در حد ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر). بنابراین سازند نمکی باید چند کیلومتر قطر داشته باشد تا بتوان چنین تاسیساتی را در آن ایجاد کرد (Plaat, 2009).

یکی از مهمترین پارامترهایی که بر طراحی مغارهای نمک به ویژه شکل مغار تاثیرگذار است، نسبت تنش‌های افقی به قائم ( $K_0 = \frac{\sigma_H}{\sigma_V}$ ) است. حرکت جریانی سازند نمک در مقیاس زمان‌های زمین‌شناسی مانند یک سیال عمل می‌کند و این موضوع باعث شده تا نسبت تنش‌های افقی به قائم در نواحی درون گنبد نمک (دور از مرزهای گنبد) تقریبا با هم برابر باشند (یعنی  $K_0 = 1$ ). نتایج مطالعات نیز بر صحت این موضوع دلالت دارد (Staudtmeister & Zapf, 2009).

شکل مغار بر پایداری مغار تاثیرگذار است (Sobolik & Ehgartner, 2006). با وجود آنکه از نظر آلیسون<sup>۱</sup> مغارهای کروی پایدارتر از سایر شکل‌ها هستند (Allison, 1992) اما بیشتر مغارهای ساخته شده تاکنون سیلندری شکل هستند.

ضخامت پوش سنگ نیز عامل مهمی در طراحی و ساخت مغارهای نمک است. پوش سنگ باعث استحکام مغار در برابر نشت مواد هیدروکربوری و نیز حفظ پایداری مکانیکی آن می‌شود (Martinez, 1989).

برای آشنایی بیشتر، در جدول (۲-۲) محدوده تغییرات برخی از پارامترهای هندسی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی که تاکنون ساخته شده‌اند، ارائه شده است.

<sup>1</sup>Allison

جدول (۲-۲): پارامترهای هندسی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در گنبد‌های نمک (Gillhaus & Horvath, 2008)

| پارامتر                                 | مقدار کمینه | مقدار بیشینه |
|-----------------------------------------|-------------|--------------|
| تعداد مغار احداث شده در یک واحد تاسیسات | ۱           | ۱۰۶          |
| قطر مغار (متر)                          | ۴۰          | ۸۰           |
| ارتفاع مغار (متر)                       | ۳۰          | ۷۰۰          |
| عمق سقف مغار (متر)                      | ۶۵۰         | ۱۶۰۰         |
| حجم مغار (میلیون متر مکعب)              | ۰/۰۲۵       | ۷/۶          |

## ۲-۲-۴ سایر روش‌ها

تاکنون تعدادی از معادن زیرزمینی اتاق و پایه به تاسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی تبدیل شده‌اند. اولین آنها معدن آهک در ایالت ایندیانا آمریکا در سال ۱۹۵۲ بود. در سال ۱۹۷۰ یک معدن نمک در آلمان به تاسیسات ذخیره‌سازی تبدیل شد (Evans, 2008). همچنین ذخیره‌سازی گاز طبیعی در معادن ذغال سنگ در کلرادو (بین سال‌های ۱۹۵۹-۲۰۰۳) و دو معدن در دیگر بین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۰۰ میلادی انجام گرفته است. مهمترین مساله ذخیره‌سازی گاز در معادن ذغال، مشکل نفوذپذیری و نشت گاز است. همچنین اخیراً مطالعاتی در مورد ساخت مغارها در سازندهای سنگ آهک با روش معدنکاری انحلالی با اسید (مشابه شوراب مغارهای نمک) در حال انجام است (Plaat, 2009).

## ۲-۳ مقایسه روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

برای انتخاب روش ذخیره‌سازی متغیرهای زیادی تعریف شده است. تعدادی از مهمترین این پارامترها عبارتند از: بومی بودن فن‌آوری ساخت، ظرفیت ذخیره‌سازی، بازدهی، هزینه‌ها، مسایل زیست محیطی، قابلیت تحویل گاز، تعداد چرخه‌های سالانه (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۰). در جدول (۲-۳) مغارهای نمکی با میدان‌های تهی شده نفت و گاز مقایسه شده‌اند.

امروزه استفاده از مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی به دلایل فنی و اقتصادی مختلف روند رو به رشدی را طی می‌کند. برای روشن‌تر شدن موضوع جدول (۲-۴) ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود نسبت میزان گاز برداشت شده از مخازن ذخیره‌سازی مغارهای نمکی طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۸ نسبت به سایر روش‌ها از رشد بسیار بیشتری برخوردار بوده است.

یکی از بهترین گزینه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی، مغارهای نمکی هستند. این فضاها در طول عمر خود، در زمان‌های اوج مصرف، با راندمان بالا پاسخگوی نیازها خواهند بود (Kepplinger et al., 2011)

جدول (۲-۳): مقایسه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی با میدان‌های تهی شده نفت و گاز و آبخوان‌ها (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۰)

| ویژگی                           | واحد          | مغارهای نمکی  | مخازن تهی شده    | آبخوان‌ها     | مغار سنگی دارای پوشش |
|---------------------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|----------------------|
| تعداد چاه‌ها                    | -             | ۱ تا ۳        | ۱۰ تا بیش از ۱۰۰ | -             | ۱                    |
| نرخ تخلیه در هر چاه             | (MMcfd)       | ۳۰۰ تا ۶۰۰    | ۵ تا ۱۰          | -             | -                    |
| درصد گاز عملیاتی نسبت به گاز کل | -             | ۶۰ تا ۷۰      | ۵۰               | ۲۰ تا ۵۰      | ۱۰                   |
| زمان معمول تخلیه                | روز           | ۱۰            | ۱۰۰ تا ۱۵۰       | ۱۰۰ تا ۱۵۰    |                      |
| تعداد سیکل‌ها در طول یک سال     | -             | ۶ تا ۱۲       | ۱ تا ۲           | ۱ تا ۲        | ۱۰ تا ۲۰             |
| بومی بودن فن‌آوری ساخت          | -             | غیر بومی      | غیر بومی         | غیر بومی      | بومی                 |
| مشکلات زیست محیطی               | -             | متوسط تا زیاد | متوسط تا زیاد    | متوسط تا زیاد | کم                   |
| عمق متداول قرارگیری             | متر           | ۷۰۰ تا ۱۸۰۰   | ۵۰۰ تا ۱۵۰۰      | ۵۰۰ تا ۱۵۰۰   | ۵۰ تا ۲۰۰            |
| حجم هندسی                       | هزار متر مکعب | ۱۰۰ تا ۳۰۰۰   | -                | -             | ۸۰ تا ۲۰۰            |

جدول (۲-۴): نسبت میزان گاز برداشت شده از انواع مخازن ذخیره‌سازی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۸ (EIA, 2005)

| تاریخ (سال)        | میزان برداشت از مخزن تهی شده<br>نفت و گاز (درصد) | میزان برداشت از<br>آبخوان (درصد) | میزان برداشت از مغار<br>نمک (درصد) | مجموع |
|--------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------|
| ۱۹۹۸               | ۷۹                                               | ۱۰                               | ۱۱                                 | ٪۱۰۰  |
| ۲۰۰۵               | ۷۴                                               | ۱۰                               | ۱۶                                 | ٪۱۰۰  |
| ۲۰۰۸<br>(پیش‌بینی) | ۶۵                                               | ۱۰                               | ۲۵                                 | ٪۱۰۰  |

محققان زیادی از جمله برست و بروارد<sup>۱</sup> (۲۰۰۳)، ایوانس<sup>۲</sup> (۲۰۰۸) و عسگری و همکاران (۱۳۹۰)

به بررسی مخازن ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری از لحاظ ایمنی پرداخته‌اند (Berest & Evans, 2008b)

(Brouard, 2003 عسگری و همکاران، ۱۳۹۰). در جدول (۲-۴) تعداد حوادث ایجاد شده برای انواع

روش‌های مختلف ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری ارائه شده است. همانطور که در این جدول

مشاهده می‌شود، نسبت تعداد حادثه، برای مغارهای نمکی نسبت به سایر روش‌های ذخیره‌سازی بیشتر

است (۵۵٪). البته شدت حوادث در هر کدام از این موارد متغیر است. با این حال اتخاذ تدابیر ایمنی برای

این نوع ذخیره‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

جدول (۲-۴): تقسیم بندی حوادث بر حسب نوع روش ذخیره سازی (Evans, 2008)

| مخازن تهی شده<br>نفت و گاز          | آبخوان‌ها | مغارهای نمک | مغار سنگ سخت | دیگر روش‌ها | مجموع |
|-------------------------------------|-----------|-------------|--------------|-------------|-------|
| تعداد مخزن                          | ۴۴۰       | ۸۱          | ۶۶           | -           | ۵۸۷   |
| تعداد حادثه                         | ۲۲        | ۲۴          | ۳۶           | ۷           | ۹۱    |
| نسبت (تعداد حادثه به<br>تعداد مخزن) | ٪۵        | ٪۳۰         | ٪۵۵          | -           | ٪۳۱   |

<sup>۱</sup>Berest and Brouard

<sup>۲</sup>Evans



## ۲-۴ جمع بندی

سنگ نمک به دلیل ویژگی‌های خاص از جمله نفوذپذیری بسیار کم (کمتر از  $10^{-5} \text{ m}^2$ ) عملاً ماده‌ای نفوذناپذیر محسوب می‌شود که اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بکر آن حتی در آزمایشگاه نیز با دستگاه‌های بسیار خاص و دقیق انجام می‌گیرد. این خاصیت سبب شده این ماده توانایی بسیار بالایی در حفظ و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری مایع و گازی از خود نشان دهد. ویژگی دیگر سنگ نمک که باعث شده از دیدگاه ذخیره‌سازی بیشتر مورد توجه قرار گیرد، قابلیت خود ترمیمی نمک تحت اثر خزش است. به این معنی که در سازندهای نمکی و در سطح تنش‌های متوسط، عملاً درزه و ترک در سازند وجود ندارد و یا اگر به وجود آید تحت اثر خاصیت خود ترمیمی نمک از بین می‌رود. علاوه بر آن درصد تخلخل سنگ نمک بسیار کمتر از سایر سنگ‌های رسوبی است (کمتر از ۱٪) که این امر نیز به نوبه‌ی خود بر استحکام<sup>۱</sup> مغارهای ذخیره‌سازی نمک از دیدگاه نشت مواد هیدروکربوری می‌افزاید. نکته‌ی دیگری که به خصوص از دیدگاه اقتصادی، ذخیره‌سازی در سازندهای نمکی را توجیه پذیر می‌نماید، قابلیت انحلال زیاد سنگ نمک در آب است. به این ترتیب تنها با حفر یک چاه از سطح زمین و تزریق آب شیرین به درون سازند نمک، می‌توان فضای بسیار بزرگی در زیر زمین ایجاد کرد و از فضای حاصل برای مقاصد ذخیره‌سازی استفاده نمود. همچنین از لحاظ پدافند غیر عامل، قابلیت استهلاک امواج دینامیکی در سازندهای نمکی نیز مورد توجه می‌باشد. گنندهای نمکی به دلیل ابعاد بسیار بزرگ و برخورداری از خلوص و یکنواختی مناسب، مکان‌هایی ایده‌آل برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی نسبت به نمک‌های لایه‌ای هستند. علاوه بر آن مغارهای نمک دارای کارکردهای دیگری مثل امکان دفع زباله‌های خطرناک هسته‌ای و صنعتی، آزمایش جنگ‌افزارها و تولید نمک هم هستند (Leith, 2001).

<sup>1</sup>Tighness

در فصلی حاضر روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به اختصار مورد بررسی مختصری قرار گرفت. در بین این روش‌ها ذخیره‌سازی در سازندهای نمکی به دلایل گفته شده در قسمت‌های گذشته، در طی سالهای اخیر بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که در ایران ذخایر زیرزمینی بسیار غنی از سازندهای نمک به شکل گنبد‌های نمکی و یا نمک‌های لایه‌ای وجود دارد، لذا پتانسیل این نوع ذخیره‌سازی مهیا است. در فصل بعدی ضمن بررسی ساختارهای نمکی کشور، با محل احداث اولین سایت ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی کشور به صورت اجمالی معرفی خواهد شد.

## فصل سوم

پتانسیل‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در

سازندهای نمکی ایران

### ۳-۱ مقدمه

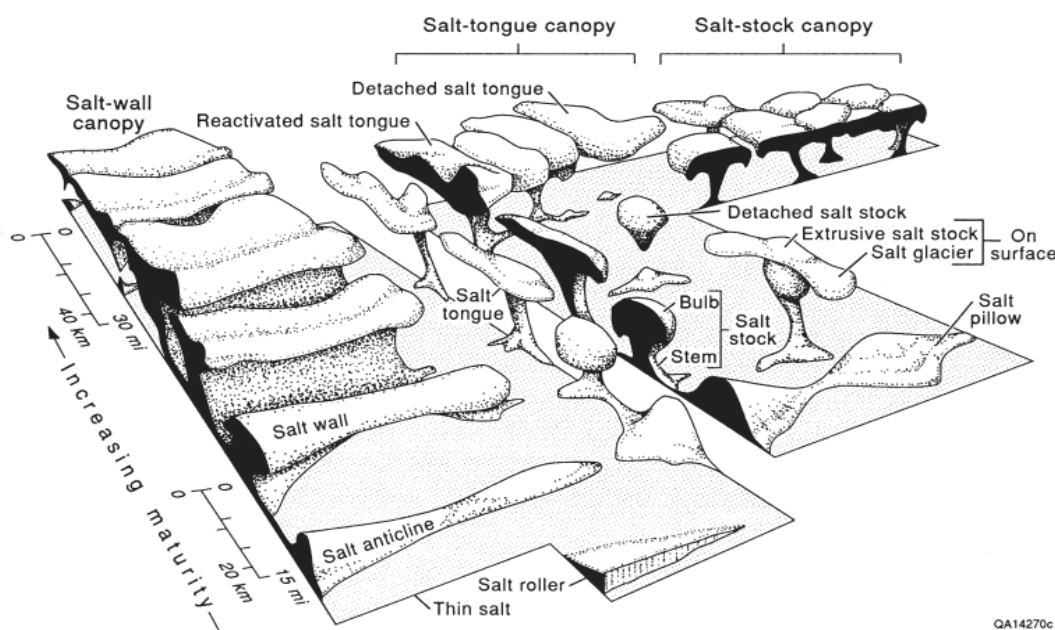
همانطور که در فصل قبل اشاره شد، ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی به خصوص گنبد‌های نمکی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است و از همین رو در این فصل به بررسی پتانسیل‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی کشور در سازندهای نمکی پرداخته می‌شود. معیارهای زیادی در مطلوبیت سازندهای نمک به منظور ذخیره‌سازی گاز طبیعی، اثر گذار هستند. تاکنون مطالعات اکتشافی مفصلی بر روی سازندهای نمکی ایران به منظور ذخیره‌سازی انجام نشده، بنابراین مناطق مستعد نیازمند انجام مطالعات اکتشافی تکمیلی است تا در نهایت و پس از انجام این مطالعات، سازندهای نمکی مناسب جهت ذخیره‌سازی مشخص شوند. در این فصل پس از ذکر کلیاتی در مورد گنبد‌های نمکی، معیارهای انتخاب نواحی امید بخش جهت ذخیره‌سازی بیان شده و پتانسیل‌های کشور معرفی می‌گردند. پس از آن گنبد‌های نمک ایران از لحاظ زمین شناسی به صورت مختصر بررسی می‌شوند. در انتها اولین سایت احتمالی ذخیره‌سازی گاز طبیعی در گنبد نمکی کشور واقع در ناحیه نصرآباد کاشان به صورت اجمالی معرفی خواهد شد.

### ۳-۲ کلیاتی در مورد گنبد‌های نمکی

سنگ نمک به دلیل خاصیت جریان پذیری به شکل‌های مختلف و متنوعی در زیر زمین دیده شده است. تاکنون استاندارد خاصی برای طبقه بندی سازندهای نمک ارائه نشده است. پرکاربردترین نوع طبقه بندی، سازندهای نمک را به دسته‌های؛ لایه‌ای<sup>۱</sup>، بالشی<sup>۲</sup>، طاقدیسی، ساندویچی، گنبدی، پلاگ و جوش خورده تقسیم بندی می‌کند (Gillhaus & Horvath, 2006). در شکل (۳-۱) انواع مخلف سازندهای نمک نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>Bedded Salt

<sup>۲</sup>Salt Pillow/ Salt Swell



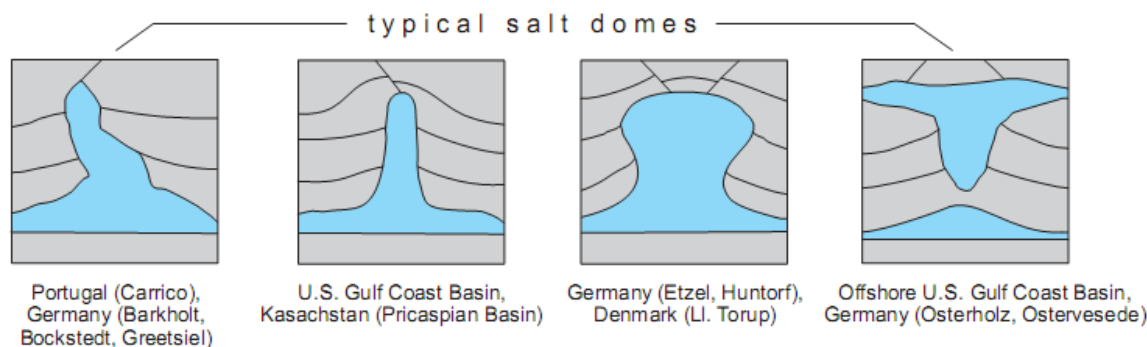
شکل (۳-۱): نمودار بلوکی شکل‌های مختلف سازندهای نمک (Gillhaus & Horvath, 2006)

گنبد‌های نمکی اصولاً حاصل فعالیت‌های تکتونیکی و هالوتکتونیکی بر نهشته‌های نمکی هستند (Evans, 2008). هر گنبد نمکی شامل یک هسته مرکزی است که از نمک تشکیل شده و بخشی که اطراف هسته مرکزی را احاطه می‌کند معمولاً از رسوبات نمکی جوانتر تشکیل شده است. بنا به یک تعریف، گنبد‌های نمکی تنها به اشکالی از سازندهای نمک گفته می‌شود که دارای پوش سنگ هستند (Gillhaus & Horvath, 2006). در بعضی از گنبد‌های نمکی ضخامت پوش سنگ به چند صد متر می‌رسد و بعضی از گنبد‌های نمکی مثل گنبد نمکی قم فاقد پوش سنگ است. پوش سنگ‌ها معمولاً از سنگ‌های آهکی، ژئپس و انیدریت تشکیل می‌شوند. در بعضی موارد پوش سنگ محتوی ذخایر گوگردی است (Evans, 2008).

گنبد‌های نمکی دارای شکل‌های مختلف هستند که ابعاد آنها گاه به چندین کیلومتر می‌رسد (شکل ۳-۲). شکل تمامی گنبد‌های نمکی یکسان نیست و به عوامل مختلفی مثل زمان ظاهر شدن<sup>۱</sup>، آهنگ حل

<sup>۱</sup>Time of emergence

شدن نمک<sup>۱</sup> (که توسط آهنگ فرسایش کنترل می‌شود)، آهنگ بالا آمدن نمک از منبع نمکی، فعالیت‌های تکتونیکی منطقه و سنگ‌های پوششی بستگی دارد (Jahani, 2005).



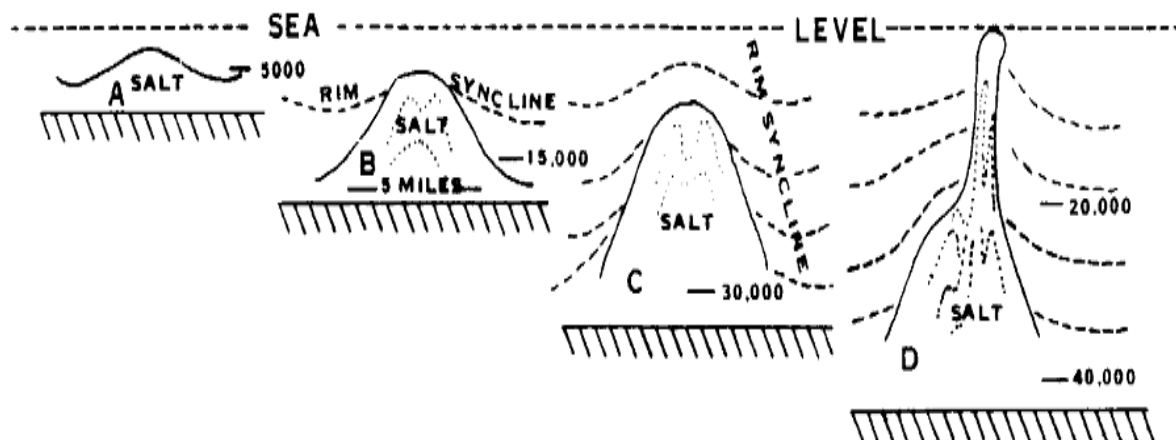
شکل (۳-۲): دسته بندی گنبد‌های نمکی از لحاظ نحوه جایگیری آنها در زیر زمین (Gillhaus & Horvath, 2006)

علاوه بر شکل، ابعاد و عمق گنبد‌های نمکی نیز مختلف است. برای مثال ابعاد گنبد‌های نمکی جنوب ایران از ۱ تا ۱۵ کیلومتر مشاهده شده است (Jahani, 2008). همچنین عمق قرار گیری سطح فوقانی گنبد‌های نمک از کمتر از یک کیلومتر (مانند گنبد‌های نمکی ایران) تا اعماق بیش از سه کیلومتر تغییر می‌کند (قره چلو، ۱۳۸۷).

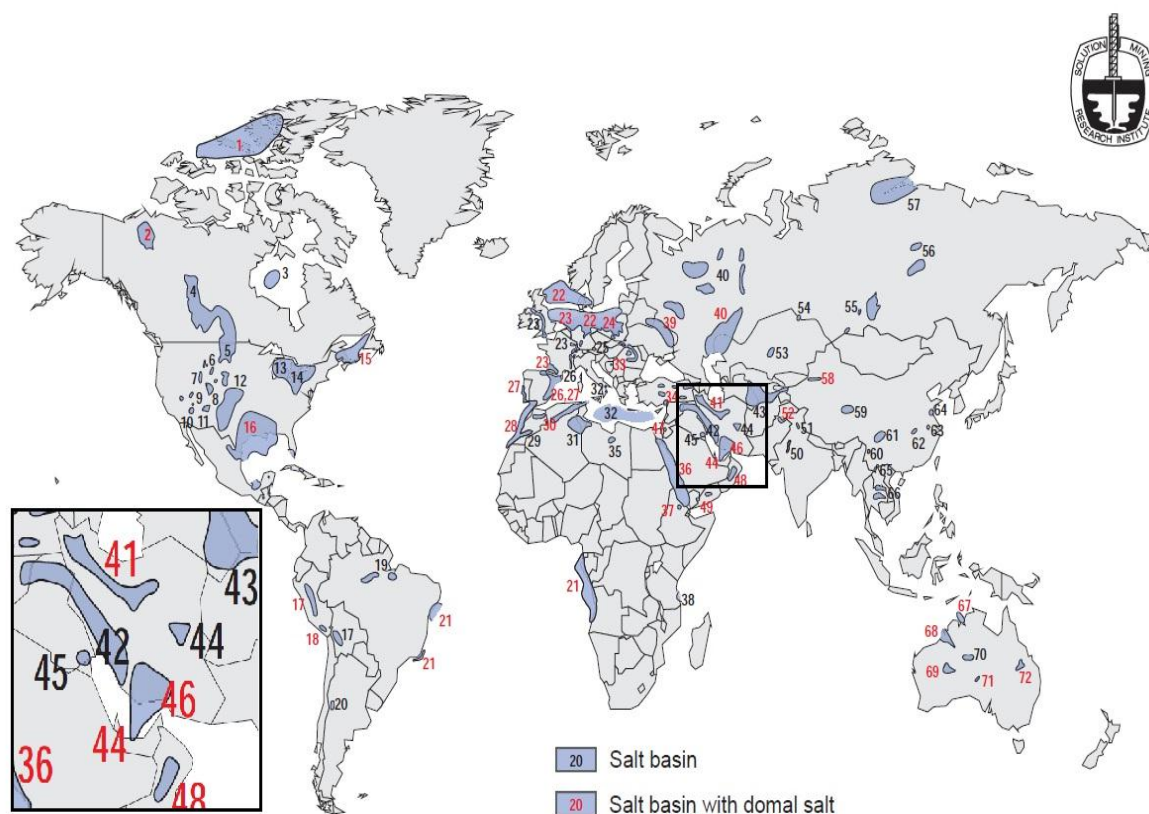
مهمترین وجه مشخصه گنبد‌های نمکی، دیواره‌های پرشیب آن است. منشا گنبد‌های نمکی از لایه‌های ضخیم نمک است که در ابتدا به شکل بالش در می‌آید و پس از آن به مرور زمان و در اثر فعالیت‌های تکتونیکی و هالوتکتونیکی به سمت سطح زمین نفوذ می‌کنند (شکل ۳-۳). گنبد‌های نمکی معمولاً دارای سطح مقطع افقی دایره‌ای و یا نزدیک به آن هستند مگر در مواردی که بر اثر نزدیکی به گسل‌های بزرگ، شکل آنها از حالت تقارن خارج شود.

گنبد‌های نمکی تقریباً در نیمی از سازندهای نمکی شناخته شده دنیا وجود دارند. مهمترین مراکز تجمع گنبد‌های نمکی دنیا در خلیج مکزیک، اروپای مرکزی، قزاقستان و خاورمیانه است. در شکل (۳-۴) پراکندگی سازندهای نمک در دنیا نشان داده شده است.

<sup>1</sup>Rate of salt dissolution



شکل (۳-۳): مراحل رشد گنبد نمکی (White & Spiers, 1983)



شکل (۴-۳): نقشه جهانی سازندهای زیرزمینی نمک (Gillhaus & Horvath, 2006)

### ۳-۳ معیارهای انتخاب گنبد نمکی مناسب برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی

احداث مغارهای نمکی به منظور ذخیره‌سازی به‌طور کلی تابع سه عامل است: (۱) وجود گستره مناسب توده نمک، (۲) وجود آب لازم به منظور معدنکاری انحلالی و (۳) امکان دفع یا بازیابی نمک شوراب حاصل از معدنکاری انحلالی (Allison, 1992).

برای مطالعه گنبدهای نمکی، قبل از انجام مطالعات اکتشافی تفصیلی، مطالعات سطحی انجام می‌شود. اولین گام، مطالعات ناحیه‌ای با هدف شناسایی مناطق دارای پتانسیل نمک است که معمولاً با مطالعه نقشه‌های موجود آغاز شده و در ادامه با استفاده از عکس‌های هوایی، مطالعات ژئوشیمیایی آب‌ها و برداشت‌های ژئوفیزیکی هوایی ادامه می‌یابد. در صورت امید بخش بودن منطقه، روش‌های ژئوفیزیکی زمینی مثل عملیات ژئوالکتریک، گرانی‌سنجی، الکترومغناطیس و لرزه‌ای برای شناسایی هندسه و عمق مجموعه نمکی بکار می‌رود (Gaz de France, 1989). در نهایت با حفر گمانه‌های اکتشافی مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی توده نمکی تا حد مورد نیاز شناسایی می‌شود (Jermeic, 1994).

به منظور انتخاب محل‌های مناسب برای ذخیره‌سازی گاز باید معیارها و ضوابط به صورتی بیان شوند که بتوان به جمع‌آوری داده‌ها پرداخت. این شرایط به‌طور کلی به شرایط سطحی، زیرسطحی، شرایط فیزیکی- شیمیایی و ملاحظات اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و پدافندی تقسیم‌بندی می‌شوند. هرکدام از این شرایط دارای زیرمجموعه‌هایی است که در ادامه به‌صورت مختصر مطرح می‌شوند.

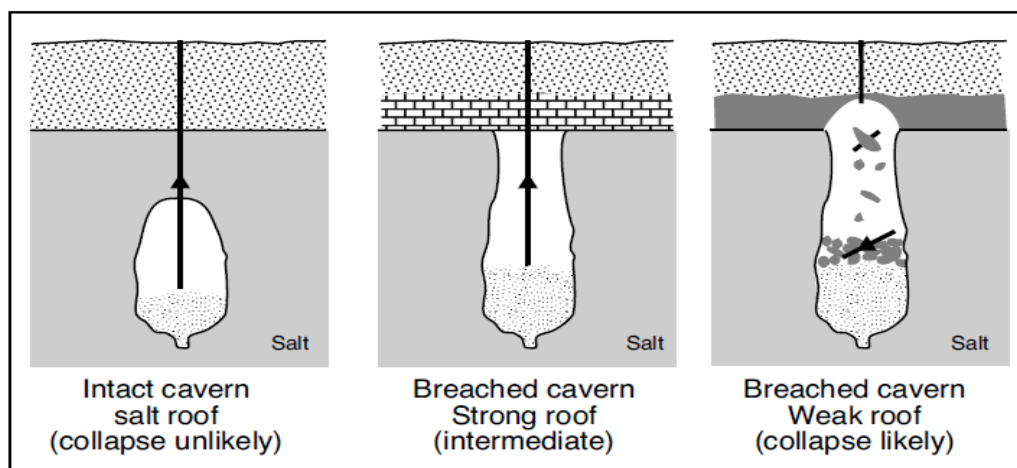
#### ۳-۳-۱ شرایط سطحی

به دلیل آنکه در مرحله شناسایی، اطلاعات زیر سطحی بسیار ناچیز است بنابراین استفاده از اطلاعات سطحی می‌تواند راهنمای بسیار مناسبی برای یافتن سازند نمکی مناسب باشد که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.



الف) **گسترش سطحی:** گسترش وسیع سازند نمک دلیلی بر وسیع بودن حوزه نمکی است که فاکتور مثبتی برای ذخیره‌سازی است. اما به منظور مقایسه گسترش سطحی و برونزدگی نمک در حوزه‌ها باید عمق و سن سازند نمکی تغذیه کننده، جنس لایه‌های فوقانی و شرایط تکتونیکی مناطق را در نظر گرفت (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

ب) **لیتولوژی و وضعیت ساختاری سنگ‌های روباره:** استحکام سنگ‌های روباره در جلوگیری از ریزش سقف مغار موثر است. بنابراین مطالعه وضعیت ساختاری زمین از اهمیت خاصی برخوردار است (سلسبیلی، ۱۳۸۸). بررسی وضعیت سنگ‌ها و لایه‌های روباره به ویژه در مورد نمک‌های لایه‌ای از اهمیت بیشتری برخوردار است (شکل ۳-۵).



شکل (۳-۵): نمایی شماتیک از فرایند انحلال کنترل نشده در سقف مغار، ریزش سقف و در نهایت روباره مغار (Berest & Brouard, 2003)

ج) **تکتونیک و لرزه خیزی:** با توجه به آنکه تکتونیک فعال می‌تواند باعث افزایش نرخ گنبدزایی و بالا آمدگی نمک شود، باید در انتخاب گنبد نمکی دقت بسیار زیادی گردد. نزدیکی به گسل‌های فعال خطر خزش نمک را افزایش می‌دهد. همچنین خود گنبدزایی و بالا آمدگی نمک باعث افزایش خزش می‌شود (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

### ۳-۳-۲ شرایط زیرسطحی

اطلاعات زیرسطحی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برای شناسایی مکان‌های مناسب به منظور ذخیره‌سازی برخوردارند. عمده این اطلاعات توسط برداشت‌های ژئوفیزیکی حاصل می‌شوند. در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

**الف) دیاپیریزم:** نرخ فعالیت و بالا آمدگی نمک در گنبد‌های نمکی بر پایداری مغار (و به دنبال آن انتخاب مکان ذخیره‌سازی) تاثیر دارد. مراحل نفوذ نمک و تشکیل دیاپیرها را به سه مرحله دیاپیریزم واکنشی<sup>۱</sup>، دیاپیریزم فعال<sup>۲</sup> و دیاپیریزم غیر فعال<sup>۳</sup> تقسیم کرد. در دیاپیریزم غیر فعال گنبد نمکی در سطح زمین رخمون دارد و در دیاپیریزم فعال یا واکنشی آثاری از نمک گنبد نمکی در سطح زمین دیده نمی‌شود.

بهترین حالت برای ذخیره‌سازی، حفر مغار در دیاپیرهای واکنشی است و از میان دیاپیرهای فعال و انفعالی بایست با توجه به بالا آمدگی نمک، حجم نمک، شرایط سطحی و زیرسطحی نمک، شکل هندسی آنها انتخاب صورت گیرد. خصوصیات مورفولوژیکی دیاپیرها با میزان فعالیت آنها ارتباط مستقیمی دارد به طوری که هر چه فعالیت گنبد نمک بیشتر باشد، ارتفاع و شیب دیواره‌های گنبد بیشتر می‌شود. بنابراین گنبد‌های نمکی با ارتفاع زیاد و شیب دیواره‌های قائم قطعاً فعالیت بیشتری دارند (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

**ب) ضخامت:** ضخامت و گسترش سازند نمکی از مهمترین فاکتورهای تعیین کننده شکل هندسی مغار هستند. حداقل گسترش لازم سازند نمکی با توجه به قطر و تعداد مغارهایی که در درون سازند حفر می‌گردد تعیین می‌شود. مغارهای بزرگ معمولاً در نمک‌هایی با ضخامت ۱۵۰ تا ۴۰۰ متر ایجاد می‌شوند.

<sup>۱</sup>Reactive Diapirism

<sup>۲</sup>Active Diapirism

<sup>۳</sup>Passive Diapirism

البته در ضخامت‌های کمتر بین ۶۰ تا ۱۰۰ متر نیز می‌توان معدنکاری انحلالی را انجام داد اما مغارهای ایجاد شده از حجم کمتری برخوردار هستند (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

ج) **عمق نمک:** عمق گنبد نمک بر تعیین فشار بیشینه<sup>۱</sup> (MOP) و کمینه عملیاتی بسیار تاثیر گذار است. بیشینه ظرفیت ذخیره سازی مغار متناسب با فشار عملیاتی بیشینه (MOP) است با افزایش عمق میزان فشار بیشینه عملیاتی در نتیجه میزان خزش در مغارها افزایش می‌یابد و این موضوع مطلوب نیست. همچنین با احداث مغار در اعماق کم می‌توان فشار عملیاتی کمینه را کاهش داد (افزایش ظرفیت گاز کاری) اما با کاهش عمق فشار بیشینه عملیاتی نیز کاهش می‌یابد. عمق احداث مغارهای ذخیره‌سازی گاز در گنبدهای نمکی حدودا بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ قرار دارد (Lux & Rokahr, 1990).

د) **درزه‌ها و گسل‌ها:** درزه‌ها و گسل‌ها با ایجاد شکاف و جدایش در لایه‌های فوقانی، زون‌های سستی را تشکیل می‌دهند که نمک می‌تواند از طریق آنها بالا آمده و گنبدها را تشکیل دهد. به دلیل خاصیت پلاستیسیته نمک، درزه‌ها و گسل‌ها به اضمحلال رفته و بر سازند نمک تاثیری نمی‌گذارند. اما روباره نمک می‌تواند تحت تاثیر این ناپیوستگی‌ها قرار گیرد و مناطق سست و نامطمئنی را تشکیل دهد که محل فرار گازها خواهد بود. گسل‌های فعال و بزرگ بر انتخاب گنبد نمک تاثیر منفی می‌گذارند (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

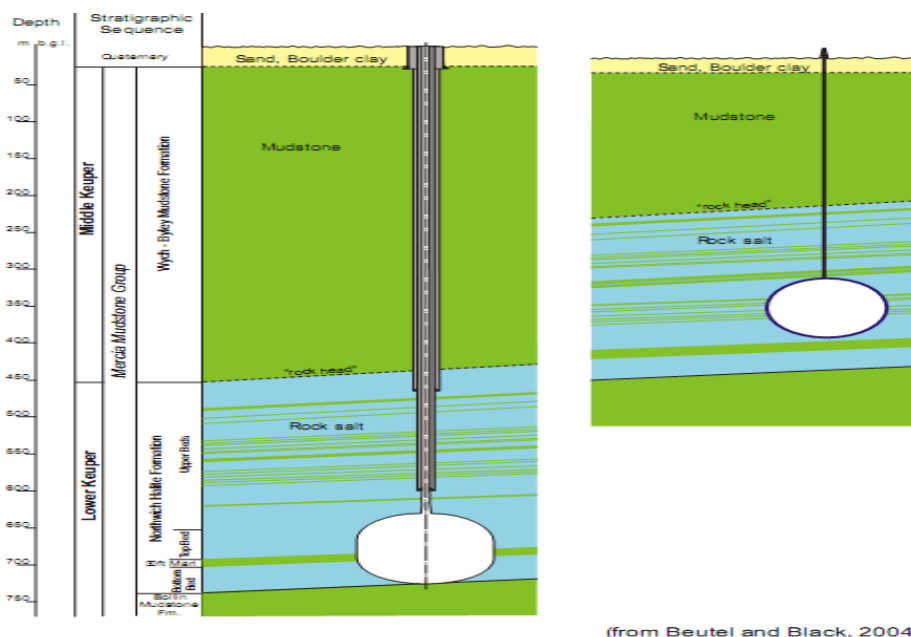
### ۳-۳-۳ خصوصیات فیزیکی - شیمیایی و ژئومکانیکی

خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و ژئومکانیکی نمک و سنگ‌های روباره توسط آزمایش‌های مختلف در آزمایشگاه و یا به شکل برجا سنجیده می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها برای مطالعات امکان‌سنجی و همچنین طراحی مغار و چاه استفاده می‌شود که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

<sup>1</sup>Maximum Operating Pressure

الف) خلوص و همگنی: وجود ناخالصی‌ها در نمک در هنگام توسعه و بهره برداری از مغار باعث ایجاد مشکلات زیادی می‌شوند. علاوه بر آن وجود مواد نامحلول در آب، مانع از ادامه عملیات معدنکاری انحلالی است. بنابراین تعیین میزان ناخالصی‌ها و محل آنها در فرآیند معدنکاری تاثیر گذار است (سلسبیلی، ۱۳۸۸). نمک‌های لایه‌ای شامل میان لایه‌هایی از مواد نامحلول نظیر گل‌سنگ، ماسه سنگ، سنگ آهک، دولومیت و آنیدرید هستند (شکل ۳-۶).

اگر در سازند نمکی عناصری مثل منگنز و یا پتاسیم وجود داشته باشد، پتانسیل ایجاد شکل‌های غیر متعارف و نامناسب مغار نمکی وجود دارد (Gaz de France, 1989, Fokker, 1995). بنابراین احداث مغارهای ذخیره‌سازی در سازندهای نمک نیازمند انجام مطالعات اکتشافی کافی و شناسایی آنومالی‌ها و دیگر ساختارهای زمین شناسی است.



شکل (۳-۶): نمایی شماتیک از مقطع زمین‌شناسی سازند لایه‌ای نمک Byley (Gillhaus & Horvath, 2008)

(ب) نفوذپذیری و تخلخل: نفوذپذیری و تخلخل سازند نمک تابع ناخالصی‌ها، وجود آب و همچنین عمق سازند است. تخلخل سنگ نمک معمولاً کمتر از ۱٪ است. نفوذپذیری سنگ نمک بسیار کم است به‌طوری‌که با تقریب خوبی می‌توان آن را نفوذ ناپذیر فرض کرد (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

(پ) خصوصیات ژئومکانیکی: این خصوصیات شامل خصوصیات مقاومتی سنگ‌های روباره و سازند نمکی و خصوصیات خزشی سنگ نمک می‌شود.

### ۳-۳-۴ هیدرولوژی و هیدروژئولوژی

در بررسی وضعیت هیدرولوژی (آب شناسی) و هیدروژئولوژی (آب زمین شناسی) باید به طبیعت و منبع آب‌های زیرزمینی و سطحی و همچنین جهت، سرعت و حجم جریان آب‌های زیرزمینی توجه داشت. در ذخیره‌سازی گاز درون مغارهای نمکی، مطالعات آب شناسی به منظور تامین آب شیرین برای انجام عملیات معدنکاری انحلالی و چگونگی تخلیه شوراب در محیط زیست متمرکز است. همچنین به دلیل آنکه رطوبت و گردش آب زیرزمینی به شدت بر خاصیت پلاستیسیته نمک تاثیر گذار است، شناسایی و تعیین پارامترهای آب زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است. به دلیل آنکه جهت انجام عملیات معدنکاری انحلالی به حجم زیادی از آب شیرین نیاز است (۷ تا ۸ متر مکعب آب شیرین برای استخراج یک متر مکعب نمک)، تامین منابع آب، وجود منابع آب زیرزمینی و سطحی در نزدیکی سایت ذخیره‌سازی در انتخاب مکان ذخیره‌سازی بسیار مهم است (Gaz de France, 1987).

### ۳-۳-۵ ملاحظات اقتصادی، اجتماعی، زیست محیطی و پدافندی

مجاورت به نواحی مسکونی پرتراکم، نزدیکی به راه‌های دسترسی و خطوط لوله گاز از مهمترین پارامترهای اقتصادی در انتخاب یک گنبد نمکی به عنوان محل ذخیره‌سازی گاز است.

از لحاظ زیست محیطی محل ذخیره‌سازی، تاسیسات آن و حوزه تخلیه شوراب باید با قوانین زیست محیطی منطبق باشد. رعایت شرایط زیست محیطی و انتخاب محل تخلیه شوراب یکی از مسایل مهم در معدنکاری انحلالی است که در انتخاب سایت ذخیره‌سازی موثر است. یکی از مهمترین محدودیت‌های منابع آبهای سطحی در ایران، مشکل شور شدن بر اثر عوامل مختلف طبیعی از جمله سازندهای شور مثل گنبد‌های نمکی است. در استان‌هایی از کشور مثل استان فارس، هرمزگان، خوزستان و سمنان که رخنمونی از گنبد‌های نمکی وجود دارد، آبهای سطحی مجاور این سازندها با تغییر کیفیت مواجه می‌شود. به دلیل آنکه سایت‌های ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری و نیز گاز طبیعی به عنوان نقاط استراتژیک تامین انرژی در مواقع بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، لذا تامین امنیت و ایمنی آنها از جمله عواملی است که در هنگام مکان‌یابی گنبد‌های نمکی مناسب باید مد نظر قرار گیرند. بحث پدافند غیر عامل و توانایی حفاظت از این نقاط استراتژیک می‌تواند به عنوان شاخصی برای این موضوع در نظر گرفته شود. در جدول (۳-۱) خلاصه‌ای از معیارها و پارامترهای اکتشافی در انتخاب مکان سایت ذخیره‌سازی ارائه شده است.

### ۳-۴ پتانسیل‌های ذخیره‌سازی در گنبد‌های نمکی ایران

ایران از نظر رسوبات تبخیری بسیار غنی است و بهترین نمونه‌های گنبد‌های نمکی شناخته شده در دنیا مربوط به جنوب ایران و خلیج فارس است که بالغ بر ده‌ها گنبد است. وجود نیروهای تکتونیکی بر بالا آمدن و تشکیل گنبد‌های نمکی ایران تاثیرگذار است. در شکل (۳-۷) وضعیت قرار گیری گنبد‌های نمکی در ایران مرکزی در ارتباط با نیروهای تکتونیکی حاصل از حرکات صفحه تکتونیکی عربستان دیده می‌شود (Folle, 2010). ساخت‌های نمکی شناخته شده در ایران در اقلیم‌های زمین‌شناسی متنوعی توزیع شده‌اند. اما به طور کلی عمده این ساخت‌ها نمکی را می‌توان در کمربند چین خورده زاگرس و بلوک ایران مرکزی

یافت. همانطور که در شکل (۳-۸) دیده می‌شود، سازندهای نمکی ایران در چهار منطقه جنوب، جنوب غربی ایران در کمرندهای چین خورده زاگرس، ایران مرکزی و شمال غرب قرار دارند (Gillhaus & Horvath, 2006, Jackson, 1990) که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

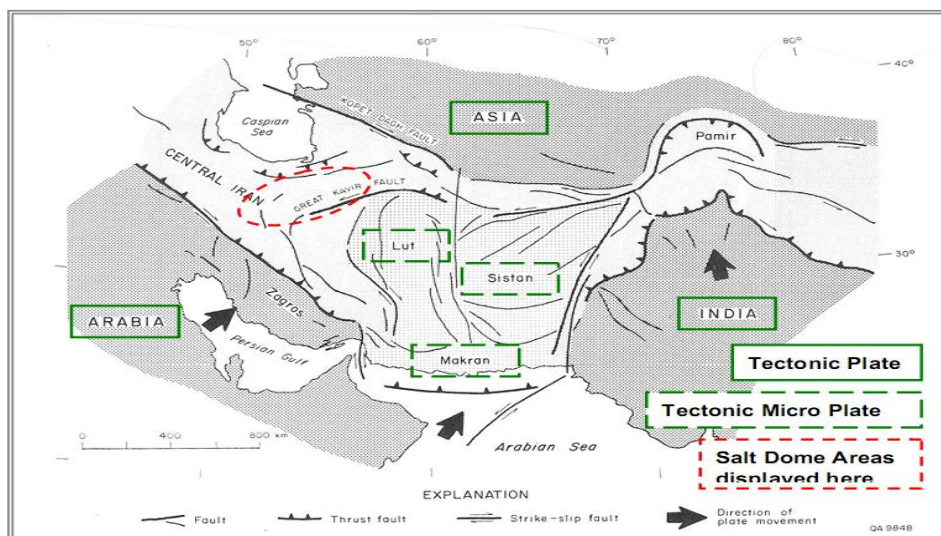
جدول (۳-۱): معیارها، پارامترهای اکتشافی و تاثیر آنها در انتخاب مکان ذخیره‌سازی درون مغارهای نمکی (در مرحله اکتشاف مقدماتی) (سلسبیلی، ۱۳۸۸)

| معیار                                   | پارامتر اکتشافی                                                                                                                                                      | چگونگی تشخیص                                                                                                |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| دیاپیریسیم                              | مرحله دیاپیریسیم<br>شیب و ارتفاع گنبدها                                                                                                                              | با در نظر گرفتن آهنگ فرسایش، ارتفاع و گرادیان شیب بیشتر گنبد می‌تواند دلالت بر فعالیت و گنبدزایی بیشتر باشد |
| شرایط زیر سطحی                          | عمق، ضخامت و حجم                                                                                                                                                     | گزارشات زمین شناسی                                                                                          |
| شرایط سطحی                              | پیکربندی سازند نمکی ضخامت و<br>گسترش سطحی<br>وسعت روباره                                                                                                             | گزارشات و نقشه‌های زمین شناسی<br>تصاویر ماهواره‌ای<br>بازدید زمین شناسی                                     |
| تکتونیک و لرزه‌ای                       | گسل‌های لرزه زا<br>میزان لرزه خیزی                                                                                                                                   | نقشه‌های خطر زمین لرزه                                                                                      |
| ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و ژئومکانیکی | میزان خلوص و همگنی<br>میان لایه‌های غیر نمکی<br>نفوذپذیری و تخلخل                                                                                                    | تصاویر ماهواره‌ای<br>بازدید زمین شناسی و برداشت نمونه<br>گزارشات و نقشه‌های زمین شناسی                      |
| هیدرولوژی و هیدروژئولوژی                | آب‌های سطحی و زیرزمینی                                                                                                                                               | تعیین میانگین بارش منطقه<br>جمع آوری اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه (دبی و کیفیت)                   |
| ملاحظات زیست محیطی                      | مکان احداث سایت ذخیره‌سازی<br>محل تخلیه شورابه                                                                                                                       | عدم تعارض با محل‌های حفاظت شده<br>تعیین حوزه‌های دفع شوراب و عدم تداخل آنها با محل‌های حفاظت شده            |
| ملاحظات اقتصادی و اجتماعی و پدافندی     | وجود پتانسیل منابع طبیعی و<br>نمک‌های معدنی، نزدیکی به اماکن<br>پرمصرف (شهرهای پرجمعیت، مراکز صنعتی)<br>نزدیکی به خطوط لوله گاز و راه‌های<br>دسترسی، پدافند غیر عامل | نقشه شهرها، اماکن پر مصرف، راه‌ها و خطوط لوله گاز                                                           |

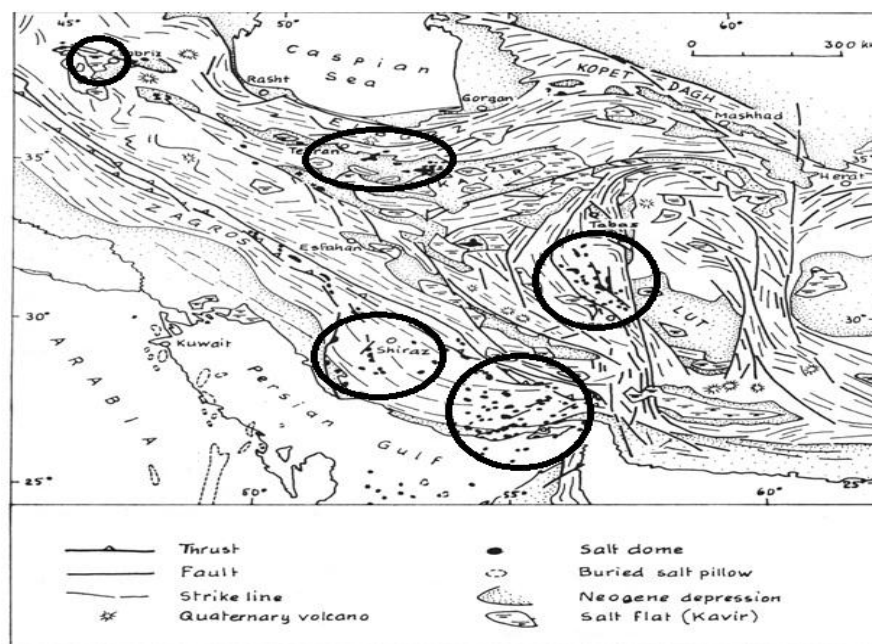
## ۳-۴-۱ حوزه جنوب ایران (نمک هرمز)

نمک‌های هرمز شامل تعداد بسیار زیادی گنبد نمکی در زاگرس و در خلیج فارس است. گنبد های

نمکی جنوب ایران است و سن آنها را به کامبرین نسبت داده اند (Gillhaus & Horvath, 2006).



شکل (۳-۷): تکتونیک صفحه ایران و محل تشکیل گنبد های نمکی در ایران مرکزی (Folle, 2010)



شکل (۳-۸): پراکندگی گنبد های نمکی ایران (Jackson, 1991)



### ۳-۴-۲ حوزه ایران مرکزی

حوزه ایران مرکزی دارای تعداد زیادی حوزه رسوبی منفصل از هم در جنوب کمربند البرز که در طول ۱۰۰۰ کیلومتر از غرب دریای خزر تا جنوب مشهد پراکنده‌اند. سن این رسوبات دارای سازند نمکی به دوران ترشیاری نسبت داده شده است (Gillhaus & Horvath, 2006). در ادامه بخش‌های مختلف ناحیه ایران مرکزی شامل ناحیه گرمسار، آران، اردکان قم و سمنان تشریح می‌شوند.

#### ۳-۴-۲-۱ ناحیه گرمسار

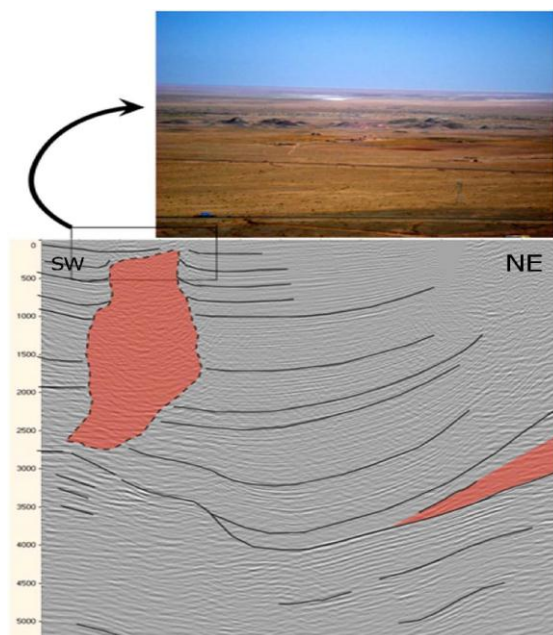
ناحیه گرمسار در بخش جنوبی البرز مرکزی و ناحیه منتهی الیه شمالی کویر مرکزی قرار دارد. در بخش گرمسار گنبدهای نمکی موجود دارای سن ائو-الیگوسن و یا نهشته‌های قرمز پایین است. ساختارهای نمکی ناحیه گرمسار به گسل‌های فعال بسیار نزدیک است و شرایط تکتونیکی فشارشی فعال در شمال این محدوده مشهود است (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

#### ۳-۴-۲-۲ ناحیه آران

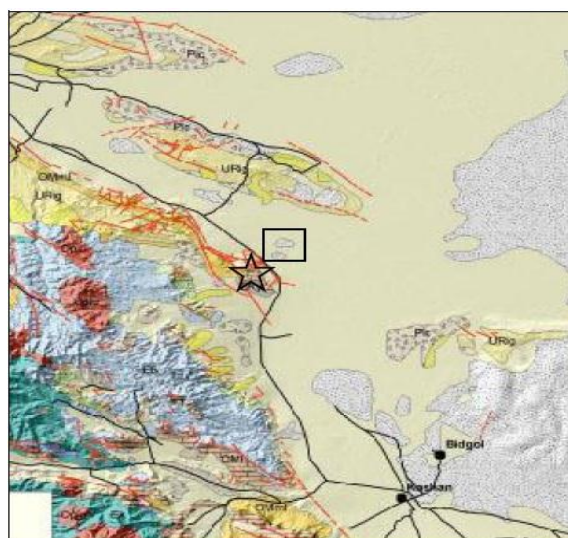
حوزه نمکی محدوده آران (کاشان) به خصوص ساختارهای نمکی پنهان که در هسته تاقدیس‌ها پنهان شده‌اند (شکل ۳-۹) می‌توانند بهترین ناحیه برای انجام مطالعات اکتشافی تفضیلی باشند. اولین پروژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی کشور در مغارهای نمکی، در سازند نمکی نصرآباد کاشان (شکل‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱) واقع در کیلومتر ۵۰ بزرگراه قم - کاشان مراحل اولیه اکتشافی خود را پشت سر گذاشته و در حال آماده سازی برای انجام مطالعات اکتشافی تفضیلی است. ساختار نمکی نصرآباد کاشان یکی از بزرگترین ساختارهای نمکی ایران در حوزه ایران مرکزی (با ابعاد ۹ تا ۱۰ کیلومتر طول، ۴/۵ تا ۵ کیلومتر عرض، عمق ۳/۵ کیلومتر) قابلیت ذخیره‌سازی حدود ۹ میلیارد متر گاز طبیعی را داراست (کشاورز و همکاران، ۱۳۹۰).

## ۳-۴-۳ ناحیه اردکان

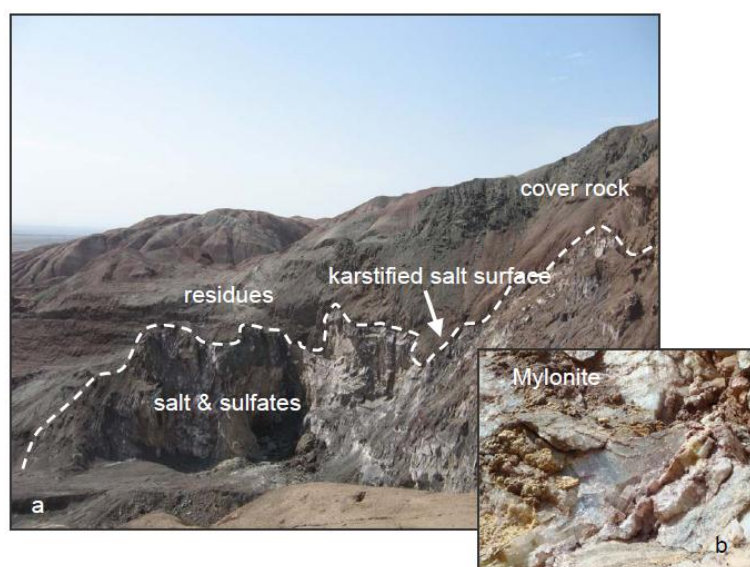
در حوزه نمکی یزد- اردکان تبخیرهای ائوسن میانی در بخش‌های محدودی تشکیل شده‌اند. گنبد‌های نمکی این ناحیه عموماً با یک کلاهک کم ضخامت همراه هستند.



شکل (۳-۹): مقطع لرزه‌ای و تصویر سطحی از محدوده گنبد نمکی نهان در نصرآباد، تمرکز نمک در هسته تاقدیس نشان داده شده است. به علت کیفیت کم خط لرزه‌ای حاشیه گنبد نمکی دقیق نیست (کشاورز و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل (۳-۱۰): نمایی از نقشه زمین‌شناسی شمال کاشان (نصرآباد)، محدوده نشان داده شده با علامت مربع در شرق اتوبان قم- کاشان یک ساخت نمکی پنهان و کم عمق است (سلسبیلی، ۱۳۸۸)



شکل (۳-۱۱): نمایی از معدن سنگ در نزدیکی منطقه نصرآباد کاشان، رخساره‌هایی از سنگ‌های مربوط به سازند قرمز تحتانی که در اثر گسل خوردگی با سطح زمین رسیده‌اند (Folle, 2010)

رخنمون‌های موجود در معادن نمک این ناحیه نشان دهنده وجود سه نوع نمک کاملاً سفید،

نمکی قرمز و نمک تیره است. (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

### ۳-۴-۲-۴ ناحیه قم

لایه‌های کهن نمک در منطقه قم به سن الیگوسن می‌رسد. مشخصه اصلی این نمک، ضخامت، خلوص و همگنی بیشتر آن نسبت به نمک‌های جوانتر است. سن نمک جوانتر به میوسن می‌رسد و جزیی از سازند قرمز فوقانی محسوب می‌شود. نمک‌های قرمز فوقانی همراه با میان‌لایه‌های ژئوپس، مارن و شیل بوده و از ضخامت، خلوص و همگنی کافی به منظور ذخیره‌سازی گاز برخوردار نیست (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

### ۳-۴-۲-۵ ناحیه سمنان

در بخش شرقی حوزه نمکی کویر بزرگ واقع در جنوب رشته کوه‌های البرز، ۵۳ گنبد نمکی در سطح زمین رخنمون یافته‌اند. عموماً این گنبدها بیش از ۱۰۰ متر از زمین‌های اطراف خود بالاتر آمده‌اند.

ابعاد این گنبد‌ها کاملاً متفاوت بوده و قطر آنها از ۱ تا ۱۰ کیلومتر تغییر می‌کند. در اینجا نیز مانند نمک قم لایه‌های کهن نمک به سن الیگوسن می‌رسد (سلسبیلی، ۱۳۸۸).

### ۳-۵ جمع‌بندی

با وجود اینکه به نظر می‌رسد گنبد‌های نمکی جنوب ایران از لحاظ حجم ذخیره و خلوص نمک در حد مطلوبی قرار داشته باشند اما به دلیل دوری از مراکز جمعیتی، وجود مخازن تهی شده، تا کنون جهت ذخیره‌سازی گاز چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

در بخش ایران مرکزی، ساخت‌های نمکی ناحیه گرمسار به گسل‌های فعال بسیار نزدیک است و به شرایط تکتونیکی فشارشی فعال در شمال این محدوده تاثیر قابل توجهی بر ساخت‌های نمکی گذاشته است. با این حال به دلیل پتانسیل وجود نمک در بخش‌های جنوبی گرمسار ایوانکی، مطالعات زیرسطحی ژئوفیزیکی لازم است.

حوزه نمکی اردکان (کلوت) اگرچه از لحاظ زمین شناسی (حجم، خلوص و خطر زمین لرزه) در شرایط بسیار مناسبی قرار دارد اما دور بودن از منابع تامین آب و شهرهای پرجمعیت فاکتورهای منفی برای این ناحیه است.

گنبد نمکی قم از لحاظ فاکتورهای اقتصادی (نزدیکی به شهرهای پرجمعیت، منابع تامین آب، خط لوله گاز، جاده و منطقه دفع شوراب) در شرایط بسیار مطلوبی قرار دارد اما حجم و خلوص نمک در این ناحیه نسبت به نواحی دیگر بسیار کمتر است.

ساخت‌های نمکی جنوب سمنان به خصوص در ساختار کاناپی (سایبانی) حجم نمک بسیار زیاد بوده اما از لحاظ فاکتورهای اقتصادی در شرایط بسیار نامطلوبی قرار دارد (دور بودن از شهرهای پرجمعیت،

جاده، منابع تامین آب) اما ساخت‌های شمالی‌تر که در ناحیه جنوب معلمان واقع شده‌اند از لحاظ فاکتورهای اقتصادی در شرایط بهتری قرار دارند.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که حوزه نمکی محدوده آران به خصوص ساخت‌های نمکی پنهان که در هسته تاقدیس‌ها پنهان شده‌اند می‌توانند بهترین ناحیه برای انجام مطالعات اکتشافی تفضیلی باشند. محدوده آران با نزدیک بودن به شهرهای پرجمعیت، منابع تامین آب و دور بودن از گسل‌های فعال از لحاظ فاکتورهای اقتصادی و زمین شناسی مطلوب در نظر گرفته می‌شود.

## فصل چهارم

تبیین پارامترهای طراحی مغارهای نمکی

## ۴-۱ مقدمه

تاریخچه طراحی مغارهای نمکی به منظور ذخیره‌سازی گاز طبیعی به بیش از ۴۰ سال پیش بر می‌گردد. بسیاری از معیارهای طراحی که در طول این مدت استفاده شده‌اند یا به طور کلی کنار گذاشته شدند و یا اصلاحاتی در آنها به وجود آمده است (Rokahr, 2009). بررسی رفتار ترمودینامیکی سنگ نمک از اواسط دهه ۳۰ میلادی آغاز شده است. پیشرفت‌های بسیار زیادی که در این زمینه به وقوع پیوست که در نهایت باعث شد تا شاخه جدیدی از علم مکانیک سنگ با عنوان "مکانیک نمک" ظهور یابد (Karimi- Jafari, 2007).

برای مثال، در دهه ۷۰ میلادی قبل از پیدایش اولین کدهای المان محدود برای طراحی مغار در دهه ۸۰، از روش‌های تحلیلی استفاده بسیار زیادی می‌شد. برای مثال در فرانسه مفهوم " ناحیه پلاستیک"<sup>۲</sup> برای طراحی‌ها بکار می‌رفت. در این مفهوم سنگ نمک به عنوان ماده‌ای الاستوپلاستیک و دارای چسبندگی زیاد (حدود ۳ مگاپاسکال) در نظر گرفته می‌شد. فشار کمینه درون مغار طوری طراحی می‌شد تا محدوده پلاستیک در اطراف مغار گسترش بسیار کمی داشته باشد. طراحی فاصله مغارها با مفهوم ناحیه پلاستیک منجر به فاصله داری بسیار زیاد مغارها ( $P/D > 6.5^3$ ) شد. مطالعات آزمایشگاهی بعدها نشان داد که چسبندگی سنگ نمک بسیار کمتر از مقدار در نظر گرفته شده در مفهوم ناحیه پلاستیک است تا جاییکه حتی باید از مقدار آن صرف نظر کرد و ناحیه پلاستیک در اطراف مغار گستردگی بسیار زیادی دارد. بدین ترتیب از این مفهوم برای طراحی دیگر استفاده نشد (Rokahr, 2009).

در فرانسه، در ابتدا فشار کمینه مغارها کمی بیشتر از فشار گاز در خطوط انتقال گاز طراحی می‌شد بطوریکه در انتهای دوره برداشت نیازی به فشرده‌سازی گاز نباشد (حدود ۷۰ بار). با گذشت ده سال از

<sup>1</sup>The mechanics of salt<sup>2</sup>Limited Plastic Zone<sup>3</sup>نسبت قطر مغار به فاصله محور دو مغار مجاور

بهره‌برداری این مغارها، همگرایی بسیار زیادی در مغار مشاهده گردید (۳۰ درصد در طول ۱۰ سال) که نشان دهنده ضعف این مفهوم برای طراحی فشار کمینه مغارها است (Rokahr, 2009).

در ابتدا برای محاسبه فشار بیشینه مجاز از تنش‌های اولیه استفاده می‌شد اما بعدها به دلیل ضعف این مدل‌ها، تنش‌های القایی ثانویه در تعیین فشار بیشینه مجاز بکار گرفته شد.

در اوایل دهه ۸۰ تا ۹۰ میلادی بیشترین تمرکز بر روی اصول و جنبه‌های مکانیک سنگی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی و تحلیل پایداری این مغارها با کمک معیارهای تجربی و تحلیلی بود. وضعیت تنش‌های زمین پس از حفر مغار بستگی مستقیمی به رفتار سنگ نمک دارد. به همین دلیل در این دهه‌ها آزمون‌های آزمایشگاهی بسیار زیادی به منظور تعیین مدل رفتاری مناسب سنگ نمک انجام شد. در دهه ۹۰ میلادی، به تدریج و با پیشرفت رایانه‌ها، تحلیل‌های مکانیک سنگی به سمت استفاده از مدل‌های عددی سوق پیدا کرد. امروزه با گسترش رایانه‌ها و پیدایش روش‌های عددی، از مدل‌های پیچیده عددی که بر پایه روش‌های المان محدود یا تفاضل محدود است، برای مقاصد طراحی استفاده می‌شود. پیشرفت در این امر به قدری وسیع و پر شتاب بوده که هم اکنون ادعا می‌شود می‌توان رفتار سنگ نمک را پیش بینی کرد و در نتیجه میزان همگرایی مغار و وضعیت تنش و کرنش اطراف آن در توده سنگ نمک را محاسبه کرد. (Rokahr, 2009). هم اکنون از مدل‌های عددی برای حل مسایل فرآیندهای توامان ترموهیدرومکانیکی استفاده می‌شود (Jackson, 2010). در پیوست (جدول A) پیشینه مطالعات مکانیک سنگی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی از گذشته تا کنون ارائه شده است.

## ۴-۲ اصول مکانیک سنگ مرتبط با طراحی مغارهای نمک

در این بخش به بررسی مفاهیم مکانیک سنگ مرتبط با تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری (به ویژه گاز طبیعی) پرداخته می‌شود.



## ۴-۲-۱ تنش

به طور معمول مولفه‌های وضعیت تنش را به صورت تانسور تنش نشان می‌دهند، که با توجه به مختصات سیستم به شکل ماتریسی زیر نمایش داده می‌شود:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (۱-۴)$$

تانسور تنش به دو بخش قابل تقسیم است؛ تنش هیدروستاتیک  $\sigma_m$  و تنش انحرافی  $s_{ij}$  که به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (۲-۴)$$

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix} \quad (۳-۴)$$

نامتغیرهای<sup>۱</sup> تنش، مستقل از سیستم مختصات تنش هستند و با تغییر سیستم مختصات تغییر نمی‌کنند. نامتغیرهای تنش زیادی تعریف شده است، اما معمولاً از نامتغیر تنش اصلی استفاده می‌شود. به دلیل آنکه در سیستم مختصات تنش‌های اصلی، تنش‌های برشی صفر هستند، لذا این نامتغیرها کاربرد زیادی در تحلیل مسایل مکانیکی پیدا کرده‌اند. با اعمال شرط تنش‌های برشی برابر صفر در تانسور تنش، معادله (۴-۴) حاصل می‌شود:

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (۴-۴)$$

که به ترتیب نامتغیرهای اول، دوم و سوم تانسور تنش اصلی هستند، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (۵-۴)$$

$$I_2 = (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \quad (۶-۴)$$

---

<sup>۱</sup>Invariant

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (۷-۴)$$

تانسورهای تنش انحرافی نیز به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$J_1 = 0 \quad (۸-۴)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ji} = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (۹-۴)$$

$$J_3 = \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki} = \begin{vmatrix} \sigma_x - \frac{1}{3} I_1 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \frac{1}{3} I_1 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z - \frac{1}{3} I_1 \end{vmatrix} \quad (۱۰-۴)$$

برای درک بهتر هر کدام از این نامتغیرها، سیستم مختصات تنش‌های اصلی  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  در نظر گرفته شود. در این سیستم مختصات اندازه‌ی تنش‌های برشی صفر است. در شکل (۱-۴) سیستم مختصات تنش‌های اصلی نشان داده شده است. تنش هیدرواستاتیک بر اساس نامتغیرهای تنش به شکل زیر تعریف می‌شود:

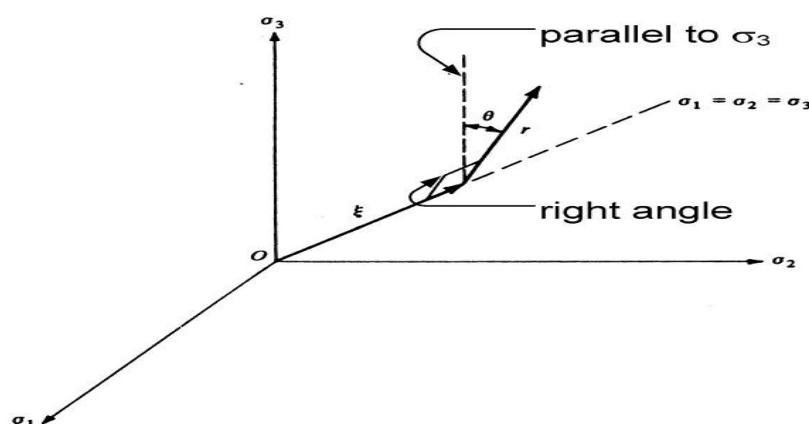
$$\xi = \sigma_m = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (۱۱-۴)$$

اگر اندازه‌ی تنش هیدروستاتیک اعمالی برابر با  $\sigma_h$  باشد؛ (یعنی  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_h$ ). با توجه به سیستم مختصاتی، اندازه‌ی تنش هیدروستاتیک  $\sigma_h$  در طول محور  $\xi$  اندازه‌گیری می‌شود و برابر با اندازه نامتغیر تنش  $\xi$  است. بنابراین نامتغیر تنش  $\xi$ ، نشان دهنده‌ی مولفه هیدروستاتیک وضعیت تنش است.

حال صفحاتی در نظر گرفته شود که محور هیدروستاتیک (محور  $\xi$ ) محور نرمال آن است. یعنی صفحاتی که محور  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  بر آن عمود است. برای هر وضعیت تنش، نقطه مربوط به آن در سیستم مختصات تنش‌های اصلی در یکی از این صفحات قرار می‌گیرد. حال فاصله بین نقطه نشانگر وضعیت تنش

و محور هیدروستاتیک در آن صفحه، با تنش‌های انحرافی مرتبط است. اندازه‌ی این فاصله برابر با  $r$  است و بر اساس رابطه (۱۲-۴) محاسبه می‌شود:

$$r = \sqrt{2J_2} = \sqrt{\frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (12-4)$$



شکل (۱-۴): توصیف گرافیکی نامتغیرهای تنش  $(\xi, r, \theta)$  در مختصات تنش‌های اصلی (Wolf, 2008)

نامتغیر سوم یعنی  $\theta$  با عنوان زاویه لوده<sup>۱</sup> شناخته می‌شود و توسط رابطه (۱۳-۴) بیان می‌شود.

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (13-4)$$

نامتغیر  $\theta$  معرف وضعیت ارتباط میان تنش متوسط  $(\sigma_2)$  و تنش‌های بیشینه  $(\sigma_1)$  و کمینه  $(\sigma_3)$  است. هرگاه اندازه‌ی تنش متوسط با تنش کمینه  $\sigma_2 = \sigma_3$  برابر باشد، مقدار  $\theta = -30^\circ$  (کشش سه محوره) و هرگاه اندازه‌ی تنش متوسط با تنش بیشینه  $\sigma_2 = \sigma_1$  برابر باشد، مقدار  $\theta = +30^\circ$  (تراکم سه محوره) خواهد بود. بنابراین زاویه  $\theta$  نشانگر مقدار تنش متوسط اصلی در ارتباط با تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه است (Wolf, 2008).

<sup>1</sup>Lode angel

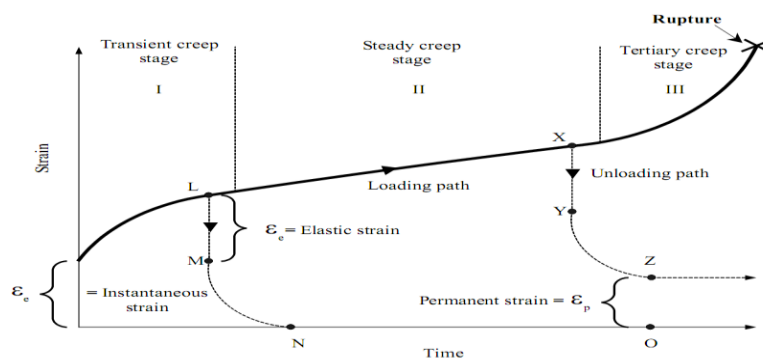
## ۴-۲-۲ خزش

رفتار مکانیکی سنگ نمک بسیار پیچیده و تابع ابعاد بلورنمک، باندهای بین بلوری، انحلال پذیری، زمان، دما، رطوبت و ناخالصی‌ها است (Jeremic, 1994, Pfeifel et al., 1996). رفتار مکانیکی سنگ نمک عموماً با اختلاف در تغییر شکل‌ها و ویژگی‌های خزشی نشان داده می‌شود (Karimi-Jafari, 2007). بنابراین رفتار سنگ نمک به دلیل رفتارهای متفاوت در شرایط بارگذاری، دما، کرنش و آهنگ کرنش مختلف، با سایر سنگ‌ها تفاوت خاصی دارد. برای مثال سنگ نمک در آزمایش تراکمی تک محوره رفتاری ترد شونده<sup>۱</sup> از خود نشان داده اما سازندهای نمک در مقیاس زمین شناسی رفتاری سیال مانند (ویسکوز) را از خود بروز می‌دهند (Jeremic, 1994) بنابراین رفتار سنگ نمک علاوه بر مقدار بارگذاری، تابع آهنگ بارگذاری نیز هست.

خزش نوعی رفتار پلاستیک است. تغییر شکل خزشی معمولاً در سه مرحله مختلف بررسی می‌شود (شکل ۴-۲). این مراحل، معرف مدل توصیف کننده خزش در بارگذاری ثابت هستند. با شروع بارگذاری ثابت بر روی سنگ نمک، در ابتدا و سریعاً یک کرنش الاستیک  $\epsilon_e$  ایجاد می‌شود. پس از کرنش الاستیک، کرنش اولیه یا انتقالی که در شکل با ناحیه I نشان داده شده، ایجاد می‌شود. ناحیه II را معمولاً با شیب ثابت آن شناسایی می‌کنند و به آن مرحله خزش پایا یا ثانویه گفته می‌شود. در مرحله سوم که به آن خزش سوم<sup>۲</sup> یا خزش شتابدار<sup>۳</sup> گفته می‌شود، در سنگ نمک شکست ایجاد می‌شود. خزش سوم شامل ترکیبی از فرایندهای توسعه درزه‌ها، خزش نمک و بهبود<sup>۴</sup> درزه است (Evans, 2008). به طور کلی گسیختگی در سنگ هنگامی پیش می‌آید که سنگ تحت اثر تنش کششی یا تنش‌های تفاضلی زیاد قرار گیرد. برای مغارهای نمکی، مورد اول معمولاً در هنگام قرارگیری مغار در فشار داخلی زیاد و مورد دوم در

<sup>1</sup>Brittle<sup>2</sup>Tertiary Creep<sup>3</sup>Accelerating creep<sup>4</sup>Healing

هنگام فشار داخلی کم رخ می‌دهد. اتساع سنگ نمک قبل از شکستن ایجاد می‌شود و طی آن نفوذپذیری نمک افزایش یافته و سنگ آسیب می‌بیند (Karimi-Jafari, 2007). به همین دلیل در بسیاری از مغارهای نمکی در بازه‌ای از زمان مغار را در فشار بیشینه قرار می‌دهند تا آسیب‌هایی که در طول بهره‌برداری از مغار به سنگ نمک وارد می‌شود، بهبود یابد (شکل ۴-۴) (Staudtmeister & Zapf, 2010). مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با برداشتن بار در مرحله اول و در نقطه  $L$ ، کرنش سریعاً به سطح  $M$  کاهش می‌یابد و پس از آن با گذشت زمان و بصورت نامتقارن مقدار کرنش به صفر می‌رسد ( $N$ ). اندازه فاصله  $LM$  برابر با کرنش اولیه الاستیک  $\epsilon_e$  است. در این مرحله و با برداشتن بار ثابت، هیچگونه تغییر شکل دایم در ماده اتفاق نمی‌افتد. اگر بار برداری در مرحله دوم انجام گیرد، تغییر شکلی به اندازه  $\epsilon_p$  اتفاق می‌افتد که دایمی است. رفتار وابسته به زمان سنگ نمک در بارگذاری ثابت، بر پایه رفتارهای ویسکو الاستیک و ویسکو پلاستیک بررسی می‌شود (Jeremic, 1994).



شکل (۴-۲): منحنی عمومی رفتار سنگ در برابر خزش (Jeremic, 1994)

رفتار خزشی نمک در اثر انواع مختلف جابجایی (لغزش<sup>۱</sup>، روی هم افتادگی<sup>۲</sup> و لغزش‌های مایل<sup>۳</sup>) پدید می‌آید (Karimi-Jafari, 2007). خزش نمک تحت کنترل این رفتارها است که به طور موازی عمل می‌کنند. در مدل‌هایی که برای ارزیابی رفتار سنگ نمک گسترش می‌یابند باید این رفتارها در نظر گرفته

<sup>1</sup>Glide

<sup>2</sup>Climb

<sup>3</sup>Cross-slip

شوند. در شکل (۳-۴) نقشه رفتار خزش نمک نشان داده شده است. گستره تنش‌های انحرافی وارد بر سازندهای نمک در مغارهای ذخیره‌سازی به طور معمول بین (۵ تا ۲۰ مگاپاسکال) و گستره دمایی آن نیز حدوداً بین (صفر تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد) است (Berest et al., 2008).

ناحیه مشخص شده در شکل (۳-۴) این گستره را در نقشه رفتار خزشی نمک مشخص کرده است. همانطور که از شکل برمی‌آید، سه رفتار (۱) رژیم با دمای زیاد و تنش کم (مکانیسم جابجایی روی هم افتادگی<sup>۱</sup>) کنترل می‌شود، (۲) رژیم با دمای پایین و تنش کم (تعریف نشده) و (۳) رژیم با تنش زیاد (رفتار جابجایی<sup>۲</sup>) بر توده نمک اطراف مغار کنترل می‌شود. تمامی این رفتارها نسبت به دما حساس هستند (Berest et al., 2008). همچنین رفتار حاکم بر آهنگ کرنش زیاد جابجایی لغزشی و رفتار حل شدن فشاری<sup>۳</sup> بر آهنگ کرنش کم تاثیرگذار است (Evans, 2008). تغییر دما اثر چندانی بر خزش انتقالی ندارد و طبق اظهارات ووگلر<sup>۴</sup> مکانیسم جابجایی به نسبت  $\sigma/G$  حساس است (Karimi-Jafari, 2007).

## ۳-۲-۴ مدل رفتاری سنگ نمک

### ۳-۲-۴-۱ مقدمه

مدل‌های زیادی تاکنون برای توصیف رفتار مکانیکی سنگ نمک توسعه یافته‌اند. هر کدام از این مدل‌ها ویژگی‌های خاص خود را دارند و از مدل‌های ساده ویسکو الاستیک شروع شده و تا مدل‌های بسیار پیچیده‌ها شامل می‌شوند. شکل کلی قانون حاکم بر فرایند خزش به شکل زیر است:

$$\dot{\varepsilon} = F(A, \sigma, T, \varepsilon, z_i) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (۱۴-۴)$$

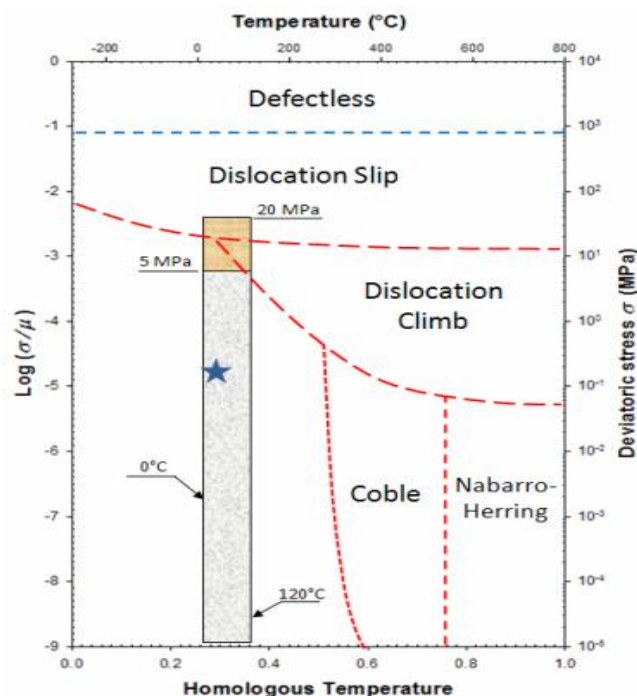
<sup>۱</sup>Dislocation climb

<sup>۲</sup>slip

<sup>۳</sup>Pressure solution

<sup>۴</sup>Vogler

که در آن  $A$  ثابت ماده،  $T$  دمای مطلق،  $\sigma$  تانسور تنش،  $\varepsilon$  کرنش،  $Q$  انرژی فعال سازی<sup>۱</sup> (حداقل انرژی مورد نیاز برای شروع فرآیند خزش)،  $R$  ثابت جهانی گازها و  $z_i$  دیگر پارامترهای سنگ مثل رطوبت و ناخالصی سنگ است (Karimi-Jafari, 2007).



شکل (۴-۳): نقشه مکانیسم خزش نمک، ناحیه مشخص شده شامل گستره تنش‌های انحرافی وارد بر سازندهای نمک در مغارهای ذخیره‌سازی (Berest et al., 2008)

مدل‌های رفتاری که برای سنگ نمک توسعه یافته‌اند را به طور کلی می‌توان در سه گروه تقسیم

نمود: (۱) مدل‌های فیزیکی، (۲) مدل‌های تجربی و (۳) مدل‌های رئولوژیکی.

### الف) مدل‌های فیزیکی

این مدل‌ها برای فلزات مطرح شدند و بخاطر پیچیدگی بسیار زیاد رفتار سنگ و تفاوت‌های بسیار زیاد

رفتار مکانیکی فلزات با سنگ‌ها، نتوانستند مقبولیت و کارامدی مناسبی را در مورد سنگ‌ها داشته

باشند (Watchasat, 2002).

<sup>1</sup>Activation Energy

## ب) مدل‌های رئولوژیکی

مدل‌های رئولوژیکی رفتار مکانیکی نمک را توصیف می‌نمایند. مهمترین ضعف این مدل‌ها نادیده گرفتن مکانیسم واقعی تغییر شکل نمک است. زیرا در این مدل‌ها تنها از ترکیب‌های دو المان فنر و میراگر<sup>۱</sup> برای مدل کردن رفتار استفاده شده است (Watchasat, 2002). در جدول (۱-۴) به تعدادی از این مدل‌ها و فرمول آن اشاره شده است. در این روابط  $K$  مدول بالک،  $t$  زمان،  $\sigma_1$  تنش،  $G_i$  مدول برشی،  $\eta_i$  میرایی و  $\varepsilon_1$  کرنش است.

جدول (۱-۴): تعدادی از مدل‌های رئولوژیکی (منشی‌زاده، ۱۳۸۷)

| نام مدل | فرمول                                                                                                                                                                                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| کلوین   | $\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1}{9k} + \frac{\sigma_1}{3G_1} \left( 1 - \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) \right)$                                                           |
| ماکسول  | $\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1 t}{3\eta_2} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{9K}$                                                                                        |
| برگر    | $\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1}{9k} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} + \frac{\sigma_1}{3G_1} \exp\left(-\frac{G_1 t}{\eta_1}\right) + \frac{\sigma_1 t}{3\eta_2}$ |

## پ) مدل‌های تجربی

مدل‌های تجربی عموماً با تطبیق یک منحنی بر روی داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند. مدل‌های تجربی به شکل‌های مختلفی ارائه شده‌اند (توانی، نمایی، چند جمله‌ای و غیره) (Watchasat, 2002). در بعضی از مدل‌های رفتاری تنها بخش خزش پایای نمک در نظر گرفته می‌شوند (مدل رفتاری نورتون-هاف نمونه‌ای از این مدل رفتاری است که در بخش بعدی به آن اشاره می‌شود). این مدل‌ها بیشتر در مواردی سودمندند که رفتار بلند مدت سنگ نمک در تنش ثابت مورد نظر باشد دسته‌ای دیگر از این مدل‌ها هم بخش خزش پایا و هم خزش اولیه (انتقالی) را در خود گنجانده‌اند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان به

<sup>1</sup>Dashpot



بررسی رفتار کوتاه مدت و بلند مدت سنگ نمک پرداخت (در جدول B و C پیوست انواع مدل‌های رفتاری خزش پایا و انتقالی آورده شده است).

مغارهای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری مایع (نفت خام) تقریباً در یک فشار ثابت کار می‌کنند، در حالی که مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی بین دو فشار کمینه و بیشینه کار می‌کنند. برای مثال برای مغاری در عمق ۱۰۰۰ متری از سطح زمین، فشار ذخیره‌سازی برای مواد مایع حدود ۱۱ MPa و ثابت است ولی فشار داخلی مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی در همین عمق حدوداً بین ۴ MPa تا ۱۸ MPa تغییر می‌کند (Colin & Laguerie, 1990). با توجه به آنکه سازند نمکی اطراف مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در اثر سیکل‌های متوالی تخلیه و تزریق گاز دایماً تحت اثر تنش‌های انحرافی مختلف هستند، به ندرت خزش نمک به حالت پایا می‌رسد. به همین بهتر است از دسته دوم مدل‌های رفتاری که خزش اولیه و پایا را دارند سود جست.

#### ۲-۳-۲-۴ مدل رفتاری نورتون-هاف (N-H)

مدل رفتاری نورتون-هاف<sup>۱</sup> (N-H) تنها خزش را در حالت پایا تعریف می‌کند و در حالت تک محوره و سه محوره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\varepsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n \quad (۱۵-۴)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} \delta_{ij} + \frac{3}{2} A^* (\sqrt{3} J_2)^{n-1} s_{ij} \quad (۱۶-۴)$$

که در آن  $\dot{\varepsilon}$  آهنگ کرنش،  $A$ ،  $n$  ثابت ماده است و بین ۳ تا ۶ تغییر می‌کند،  $Q$  انرژی فعال‌سازی،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T$  دمای بر حسب کلوین،  $\nu$  نسبت پواسون،  $E$  مدول الاستیک و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر (Karimi-jafari, 2007. Brouard & Berest, 1999).  $A^* = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ ،  $s_{ij}$  و  $J_2$  قبلاً تعریف شده‌اند.

<sup>1</sup>Norton- Hoff

## ۴-۲-۳-۳ مدل رفتاری مانسون - داسون (M-D)

این مدل بر پایه رفتار میکرومکانیکی ایجاد شده است. در مدل مانسون - داسون<sup>۱</sup> (M-D) مجموع خزش کل به دو بخش خزش انتقالی و خزش پایا تقسیم می‌شود. در این مدل سه رفتار با شرایط دمایی و تنش متفاوت حاکم است که بر اساس هر کدام از این سه رفتار، تغییر شکل‌ها انجام می‌شود (Karimi-jafari, 2007, Munson, 2004). استفاده از مدل‌های چند رفتار منجر به بهبود شرایط طراحی مغارهای نمک شده است (DeVries, 1999, 2003). در شکل (۴-۴) منحنی مدل رفتاری M-D ارایه شده است. سه مکانیسم حاکم بر خزش در مدل M-D به ترتیب عبارتند از: (۱) رفتار در دمای زیاد و تنش کم با رفتار جابجایی روی هم افتادگی<sup>۲</sup>، (۲) رفتار با دمای پایین و تنش کم با رفتار تعریف نشده و (۳) رفتار با تنش زیاد. بدین ترتیب خزش ناشی از مجموع عملکرد هم زمان و موازی این سه رفتار است که در حالت تک محوره به شکل زیر تعریف می‌شود (Karimi-jafari, 2007, Munson, 2004):

$$\dot{\epsilon}^{ss} = \dot{\epsilon}_I^{ss} + \dot{\epsilon}_{II}^{ss} + \dot{\epsilon}_{III}^{ss} \quad (۱۷-۴)$$

$$\dot{\epsilon}_I^{ss} = A_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} \left( \frac{\sigma}{G} \right)^{n_1} \quad (۱۸-۴)$$

$$\dot{\epsilon}_{II}^{ss} = A_2 e^{-\frac{Q_2}{RT}} \left( \frac{\sigma}{G} \right)^{n_2} \quad (۱۹-۴)$$

$$\dot{\epsilon}_{III}^{ss} = H(\sigma - \sigma_0) \left[ B_1 e^{-\frac{Q_1}{RT}} + B_2 e^{-\frac{Q_2}{RT}} \right] \sinh \left[ \frac{q(\sigma - \sigma_0)}{G} \right] \quad (۲۰-۴)$$

که در آن  $A_i$  و  $B_i$  ثابت‌های مدل،  $Q_i$  انرژی‌های فعال سازی،  $T$  دمای مطلق،  $R$  ثابت گازها،  $G$

مدول برشی،  $\sigma$  تنش،  $n_i$  توان تنش،  $q$  ثابت مدل،  $\sigma_0$  محدوده تنش مربوط به مکانیسم جابجایی و  $H$  تابع پله‌ای<sup>۳</sup> است.

<sup>۱</sup>Munson- Dowson

<sup>۲</sup>Dislocation climb

<sup>۳</sup>Heaviside function

روابط (۱۸-۴) و (۱۹-۴) شامل پارامتر توانی هستند در حالیکه رابطه (۲۰-۴) دارای پارامتر نمایی

است. آهنگ خزش انتقالی نسبت به آهنگ خزش کل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\varepsilon} = F \dot{\varepsilon}^{ss} \quad (21-4)$$

کرنش سخت شونده<sup>۱</sup> یکی از پارامترهایی است که توسط آن وضعیت تغییر شکل پذیری نمک

بررسی می‌شود و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{\partial F(\sigma, \zeta)}{\partial \sigma}, \quad g(\zeta, \dot{\zeta}, \sigma) = 0 \quad (22-4)$$

که در آن  $\zeta$  پارامتر سخت شونده و  $F$  پتانسیل ویسکوپلاستیک بوده و به کرنش وابسته است.  $F$

تابعی سه بخشی از سخت شونده، خزش پایا و بازیابی است که به شکل زیر بیان می‌شود:

$$F = \begin{cases} e^{\Delta(1-\frac{\zeta}{\varepsilon_t^*})^2} & \zeta \leq \varepsilon_t^* \\ 1 & \text{خزش پایا} \\ e^{-\delta(1-\frac{\zeta}{\varepsilon_t^*})^2} & \zeta \geq \varepsilon_t^* \end{cases} \quad (23-4)$$

که در آن  $\Delta$  و  $\delta$  به ترتیب پارامترهای سخت شونده و بازیابی،  $\varepsilon_t^*$  محدوده تغییر شکل انتقالی و

$\zeta$  توسط معادله (۲۴-۴) حاصل می‌شود:

$$\zeta = (F - 1) \varepsilon^{ss} \quad (24-4)$$

$$\Delta = \alpha_w + \beta_w \log\left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad (25-4)$$

$$\delta = \alpha_r + \beta_r \log\left(\frac{\sigma}{G}\right) \quad (26-4)$$

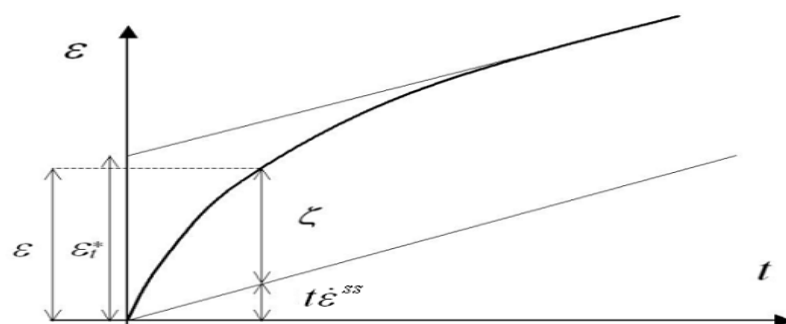
$$\varepsilon_t^* = K_0 e^{cT} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^m \quad (27-4)$$

که در آن  $\alpha_w, \alpha_r, \beta_w, \beta_r$  ثابت سنگ،  $K_0, m$  و  $c$  ثابت هستند. پارامترهای سخت شونده  $\Delta$  و

بازیابی  $\delta$  به صورت توابع زیر تعریف می‌شوند (Karimi-jafari, 2007, Munson, 2004):

<sup>1</sup>Strain hardening

تاکنون مطالعات زیادی در مورد مدل رفتاری (M-D) انجام گرفته است. برای مثال Fossum و همکاران پارامترهای موجود در مدل M-D را از لحاظ آماری مورد بررسی قرار داده‌اند (Fossum et al., 1993). همچنین از این مدل در پروژه‌های زیادی به منظور طراحی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی استفاده شده است (Rath et al., 2009, Sobolik et al., 2010, DeVries et al., 2005, Neiland & Ratigan, 2006). به همین دلیل در این تحقیق از این مدل جهت بررسی رفتار سازند نمکی اطراف مغار استفاده می‌شود.



شکل (۴-۴): تغییر شکل تحت بار ثابت بر اساس مدل M-D (Karimi-Jafari, 2007)

#### ۴-۲-۴ ترمودینامیک مغارهای نمکی

ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی و سیکل بهره‌برداری از آن باعث تغییر مداوم فشار داخلی مغار می‌شود. تغییر فشار گاز درون مغار بر اساس معادله حالت گازهای حقیقی منجر به تغییر دمای آن شده که دیواره مغار را تا شعاع زیادی تحت تاثیر قرار می‌دهد (در بخش بعد به این موضوع پرداخته می‌شود). در نهایت این تغییر دما باعث ایجاد تنش دیگری علاوه بر تنش‌های موجود در سازند می‌شود. این تنش با تنش‌های اطراف مغار جمع شده و شرایط میدان تنش را تغییر می‌دهند. به دلیل بالا بودن ضریب انبساط گرمای سنگ نمک، مطالعه رفتار آن به ویژه در هنگام تخلیه مغار از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Staudtmeister & Zapf, 2010).

در گذشته در طراحی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی فصلی گاز از تاثیر دمای گاز بر سازند نمک معمولاً صرف نظر می‌شد (Zander, 2010). اما باید با شبیه‌سازی ترمودینامیکی این مغارها، اثر تغییر دمای گاز در آن دیده شود (Kunstman et al., 2004). در این تحقیق بحث ترمودینامیکی رفتار مغار دیده شده است.

#### ۴-۲-۴-۱ رفتار گاز درون مغار

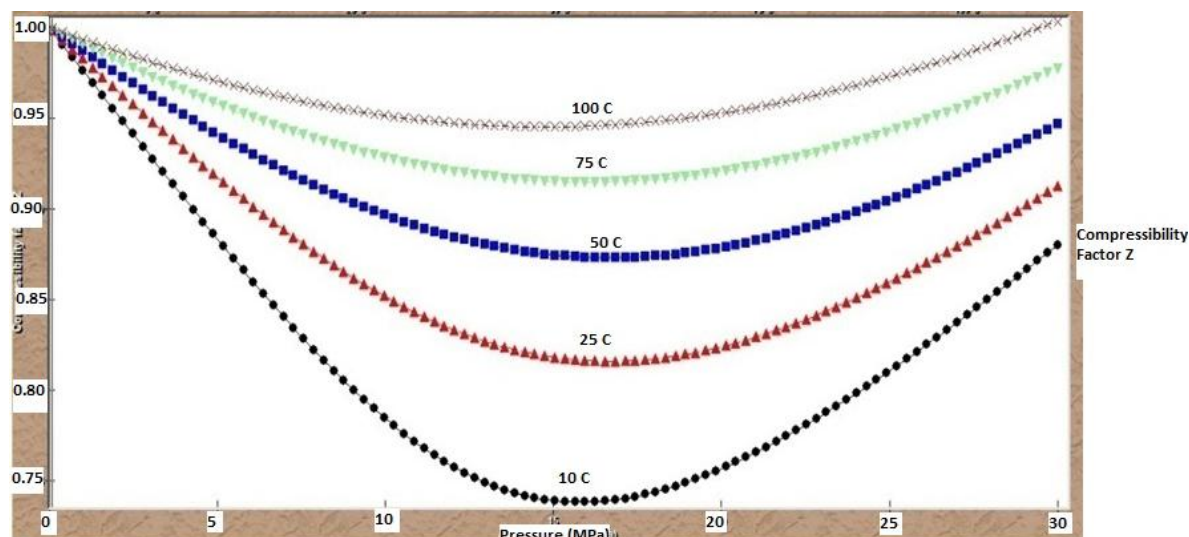
در معادله حالت گازهای حقیقی، میان فشار، دما و چگالی یک گاز رابطه زیر برقرار است:

$$PV = Z \frac{m}{M} RT \quad (4-28)$$

که در آن  $m$  جرم گاز،  $M$  وزن ملکولی گاز،  $R$  ثابت جهانی گاز و  $Z = Z(R, T)$  پارامتر تراکم‌پذیری گاز است. برای گاز ایده‌آل مقدار  $Z = 1$  است، اما پارامتر تراکم‌پذیری گازهای حقیقی به مقدار بسیار زیادی با حالت ایده‌آل متفاوت است. برای مثال فاکتور تراکم‌پذیری گاز متان در شکل (۴-۵) بر حسب تابعی از دما و فشار نشان داده شده است برای محاسبه پارامتر تراکم‌پذیری معمولاً از معادله درجه دوم زیر استفاده می‌شود:

$$Z(P, T) \approx 1 - (Z_1 - Z_2 T - Z_3 T^2)(Z_4 P - Z_5 P^2) \quad (4-29)$$

که در آن  $Z_i$  ثابت‌های مخصوص هر گاز هستند (Brouard et al., 2011). فاکتور تراکم‌پذیری گاز بر ظرفیت ذخیره‌سازی آن بسیار تاثیرگذار است (Neiland, 2008).



شکل (۴-۵): فاکتور تراکم‌پذیری گاز متان بر حسب تابعی از دما (۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد) و فشار (۰ تا ۳۰ مگاپاسکال)

#### ۴-۲-۲ تغییر دمای درون مغار

در سال ۱۹۸۶ معادله دیفرانسیلی برای محاسبه آهنگ تغییر دمای گاز بر اساس تعادل انرژی درونی مغار ارائه شد. برای محاسبه آهنگ تغییر دمای گاز، دو مرحله تزریق و تخلیه مغار به شکل مجزا بررسی می‌شوند:

##### الف) مرحله تزریق

در مرحله تزریق دمای مغار توسط رابطه (۴-۳۰) تعیین می‌شود:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_v} \left[ \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{q_c}{V} + \frac{q_m}{V} C_p (T_e - T) \right] \quad (۴-۳۰)$$

که در آن  $P, T, V, \rho$  به ترتیب فشار، دما، حجم و چگالی گاز درون مغار هستند.  $C_p$  و  $C_v$  ظرفیت گرمایی ویژه گاز در فشار و حجم ثابت،  $q_c$  شارش گرما از توده سنگ دیواره مغار،  $T_e$  دمای گاز ورودی به مغار و  $q_m$  جریان جرمی گاز تزریقی به درون مغار است و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$q_m = \dot{m} = m \left[ \frac{\dot{P}}{P} - \frac{\dot{T}}{T} + \frac{\dot{V}}{V} - \frac{\dot{Z}}{Z} \right] \quad (۴-۳۱)$$

$\frac{\dot{V}}{V} = \beta_c \dot{P} + \varepsilon^{vp}$  آهنگ نسبی حجم مغار است و در آن  $\beta_c$  ضریب تراکم‌پذیری مغار است که تابعی از شکل مغار و پارامترهای الاستیک سنگ است؛  $\varepsilon^{vp}$  آهنگ خزش مغار که تابعی از تاریخچه بارگذاری، دما، شکل مغار و پارامترهای خزشی نمک است.

(ب) مرحله تخلیه

در مرحله تخلیه مغار، جمله آخر معادله (۴-۳۰) حذف می‌شود، زیرا این جمله بیانگر تغییر انرژی گاز مغار در اثر تزریق گاز به درون مغار است. در مرحله تخلیه به دلیل آنکه دمای گاز خروجی مغار برابر با دمای گاز درون مغار فرض می‌شود، معادله (۴-۳۰) به شکل زیر درمی‌آید:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_v} \left[ \frac{T}{\rho} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \frac{d\rho}{dt} + \frac{q_c}{V} \right] \quad (۴-۳۱)$$

شارش گرما از توده سنگ (یعنی  $q_c$ ) در برابر تغییر انرژی مربوط به انبساط/تراکم گاز (اولین جمله معادله ۴-۳۰) کوچک است. با این حال، شارش گرما به وسیله انتقال حرارتی از دیواره مغار می‌تواند نقش مهمی داشته باشد، به ویژه در هنگامی که پایداری بلند مدت مغار مد نظر قرار گیرد. در بخش بعدی به این موضوع بیشتر پرداخته می‌شود. شارش گرمایی از دیواره مغار می‌توان توسط رابطه زیر بیان کرد:

$$q_c = \int_{\partial\Omega} -K_{salt} \frac{\partial T_{salt}}{\partial n} da \quad (۴-۳۲)$$

که در آن  $K_{salt}$  ضریب انتقال حرارتی سنگ نمک است (Brouard et al., 2011).

#### ۴-۲-۳ سیکل بهره‌برداری

Brouard و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی اثر دوره سیکل بهره‌برداری<sup>۱</sup> بر توزیع دما در سازند نمکی اطراف مغار پرداختند. دمای گاز درون مغار در اثر سیکل‌های تزریق و تخلیه مغار به میزان زیادی نوسان می‌کند. به گونه‌ای که در هنگام تزریق گاز دمای آن افزایش یافته و در هنگام تخلیه افت پیدا می‌کند. در اطراف مغار ناحیه‌ای وجود دارد که تحت تاثیر نوسان دمایی گاز قرار می‌گیرد و تنش‌های

<sup>۱</sup>Cycle period

اضافه‌ای در آن به وجود می‌آید که به شکل کششی عمل می‌کند. در شکل (۴-۶) این ناحیه نشان داده شده است. وجود این ناحیه تنش کششی بر پایداری مغار بسیار تاثیر می‌گذارد و از همین رو باید در تحلیل‌ها مورد توجه قرار گیرد و تا آنجا که امکان دارد از بروز نواحی کششی در اطراف مغار جلوگیری شود. گستردگی این ناحیه و همچنین میزان تنش‌های اضافه ناشی از نوسان دمایی گاز تابع طول دوره سیکل بهره‌برداری و خواص انتقال حرارتی سنگ نمک است. در شکل (۴-۷) توزیع دما در سازند نمکی برای یک مغار کوچک کروی شکل در دوره‌های مختلفی از سیکل بهره‌برداری (از یک روز تا یک ماه) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زمان سیکل بارگذاری، ضخامت ناحیه متاثر از نوسان دمایی ( $\Delta r$ ) بزرگتر می‌شود. در شکل (۴-۸) ارتباط زمان سیکل بارگذاری و ضخامت ناحیه متاثر از نوسان دمایی به شکل یک نمودار ارائه شده است و توسط رابطه (۴-۳۳) می‌توان آن را بیان کرد:

$$\Delta r = 2.9 \times 10^4 \sqrt{\pi k_{salt} \tau / 2} \quad (4-33)$$

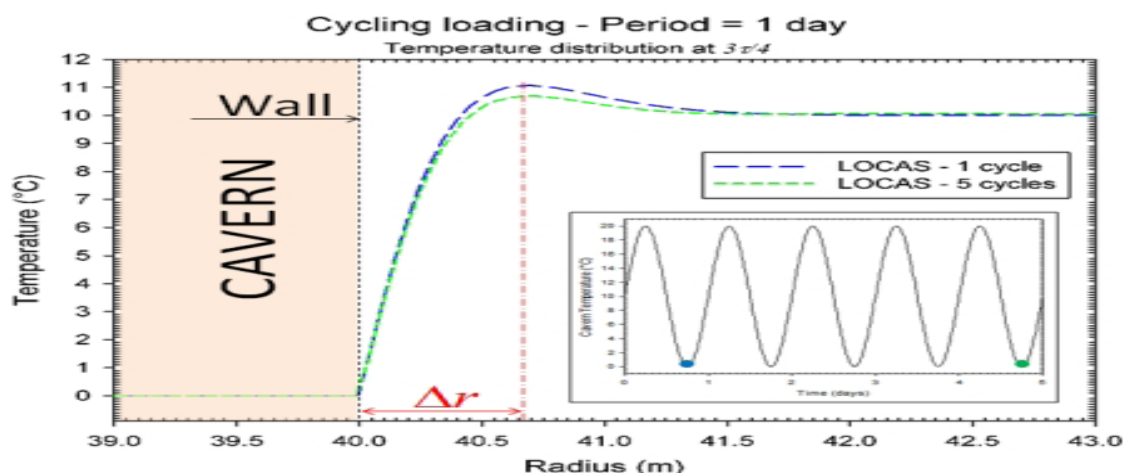
که در آن  $\Delta r$  بر حسب سانتیمتر و  $k_{salt}$  ضریب هدایت گرمایی<sup>۱</sup> نمک بر حسب ( $m^2/s$ ) و  $\tau$  دوره سیکل بهره‌برداری بر حسب روز است (Brouard et al., 2011).

## ۴-۲-۳ معیارهای تحلیل پایداری

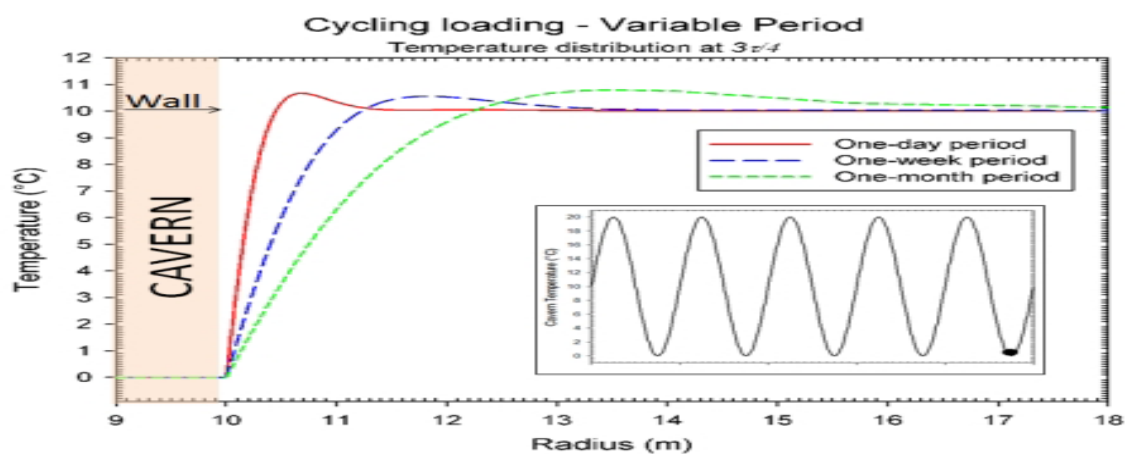
به‌طور کلی معیارهای تحلیل پایداری برای مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی که دارای نوسانات فشاری و دمایی هستند، شامل معیار اتساع، کشش و افت حجم مغار می‌شوند (Lestringant et al., 2010, Brouard et al., 2011). برای پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی باید پتانسیل ایجاد اتساع، در اطراف مغار نمکی به حداقل میزان ممکن برسد.

<sup>1</sup>Thermal diffusivity

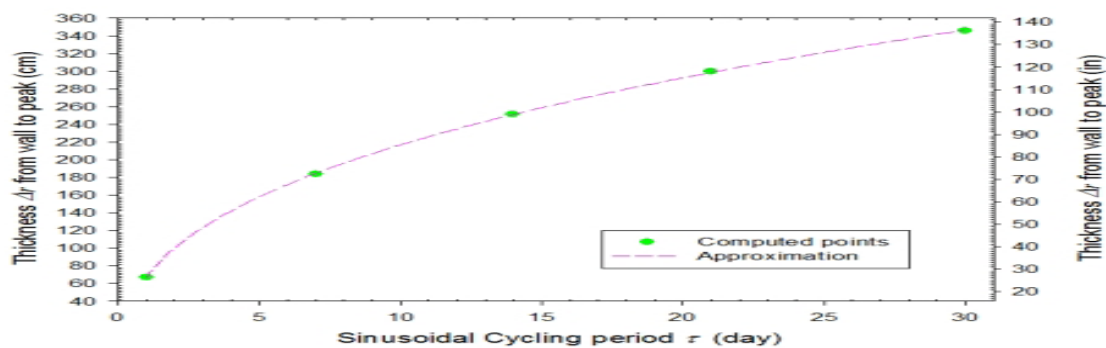




شکل (۴-۶): توزیع شعاعی دما در اطراف مغار برای تعداد سیکل مختلف (یک سیکل و پنج سیکل)؛  $\Delta r$  ضخامت ناحیه تحت تاثیر نوسان دمای درونی مغار (Brouard et al., 2011)



شکل (۴-۷): توزیع شعاعی دما در اطراف مغار برای دوره‌های مختلف سیکل بهره‌برداری (یک روز، یک هفته و یک ماه)؛  $\Delta r$  ضخامت ناحیه تحت تاثیر نوسان دمای درون مغار (Brouard et al., 2011)



شکل (۴-۸): ضخامت ناحیه تحت تاثیر  $\Delta r$  از دیواره مغار تا ناحیه پیک بر حسب تابعی از دوره سیکل بهره‌برداری (Brouard et al., 2011)

ایجاد اتساع در سنگ نمک موجب افزایش درزه و ترک در آن می‌شود. که این امر به نوبه‌ی خود باعث افزایش نفوذپذیری نمک، کاهش مقاومت آن و در نهایت عدم پایداری دیواره مغار خواهد شد. همانطور که قبلاً بیان شد، مقاومت سنگ نمک در برابر تنش‌های کششی بسیار کم است. بنابراین شرایط تنش در اطراف مغار باید بگونه‌ای باشد که تنش کششی بر سنگ نمک اعمال نشود. همچنین آهنگ افت حجم مغار باید کمتر از مقدار مجاز باشد. آهنگ افت حجم زیاد باعث کاهش میزان گاز ذخیره شده در مغار و کاهش مطلوبیت اقتصادی آن می‌شود. در ادامه این معیارها شرح داده می‌شوند.

#### ۴-۲-۳-۱ اتساع

اتساع هنگامی رخ می‌دهد که تنش‌های برشی نسبت به تنش متوسط فزونی یابند. در اثر بروز اتساع ریز- درزه‌ها<sup>۱</sup> در سنگ ایجاد می‌شود. در ادامه با افزایش تخلخل سنگ، میزان نفوذپذیری سنگ افزایش یافته و در مجموع مقاومت سنگ کاهش می‌یابد. معیارهای اتساع که تاکنون ارائه شده‌اند به دو شکل خطی و غیر خطی هستند. معیارهای خطی، دارای پارامترهای کمتری‌اند (مثل معیارهای اسپیرز<sup>۲</sup> و راتیگان<sup>۳</sup>) و در نتیجه به شکل ساده‌تری می‌توان از آنها استفاده کرد. اما معیارهای غیر خطی دارای پارامترهای بیشتری هستند و اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (مثل معیار DeVries). کلیه معیارهای اتساع در فضای مختصات نامتغیرهای اول تنش و دوم تنش تفاضلی ( $I_1, I_2$ ) نوشته می‌شوند.

- معیار اتساع راتیگان به صورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۴-۱۰):

$$\sqrt{J_2} < 0.27 |I_1| \quad (۴-۳۴)$$

در معیار راتیگان سه مولفه اصلی تانسور تنش در محاسبات مد نظر قرار نمی‌گیرد. (در دیواره مغار، تنش‌های شعاعی معمولاً کمترین میزان فشارشی را نسبت به دو مولفه تنش‌های تانژانتی دارند، این

<sup>۱</sup>Micro- fracture

<sup>۲</sup>Spiers

<sup>۳</sup>Ratigan

موقعیت قرارگیری تنش‌ها درست بر خلاف وضعیت تنش‌ها در آزمون استاندارد سه محوره است) همچنین وقتی که تنش متوسط کوچک باشد، این معیار بسیار بدبینانه است.

- پیشرفته ترین معیار اتساع در سال ۲۰۰۵ توسط دوریس<sup>۱</sup> و همکارانش ارائه شد (DeVeries et al., 2005). معیار اتساع دوریس یا DV با رابطه زیر تعریف می‌شود (شکل ۴-۹):

$$\sqrt{J_2} < \sqrt{J_2 \text{ dil}} = \frac{D_1 \left( \frac{|I_1|}{\sigma_0} \right)^m + \bar{T}_0}{\sqrt{3} \cos \theta - D_2 \sin \theta} \quad (35-4)$$

که در آن  $D_1$ ،  $D_2$ ،  $\sigma_0 = 1 \text{ MPa}$ ،  $\bar{T}_0$  و  $m$  پنج ثابت هستند که به صورت تجربی تعیین می‌شود،  $\theta$  زاویه لوده است که قبلاً تعریف شده است.

در معیار دوریس، ضریب ایمنی (FOS) به صورت زیر تعریف می‌شود. اتساع هنگامی رخ می‌دهد که  $FOS \leq 1$  باشد (Brouard et al., 2007):

$$FOS = \frac{\sqrt{J_2 \text{ dil}}}{\sqrt{J_2}} \quad (36-4)$$

#### ۲-۳-۲-۴ کشش

در صورت وجود ناحیه‌ای با تنش‌های کششی در اطراف مغار، خطر درزه داری سنگ نمک و ورقه ورقه شدن آن در دیواره مغار وجود دارد. در ادامه دو معیار مختلف در مورد معیار تنش‌های کششی بررسی می‌گردد.

- معیار "بدون کشش"<sup>۲</sup> - در این معیار تصریح می‌شود که در اطراف مغار هیچکدام از تنش‌های اصلی نباید کششی باشند. در مورد مغارهای کروی، تنش‌های شعاعی همیشه باید فشاری باشند. این معیار به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_{\theta\theta} < 0 \quad (37-4)$$

<sup>۱</sup>DeVries

<sup>۲</sup>No Tension

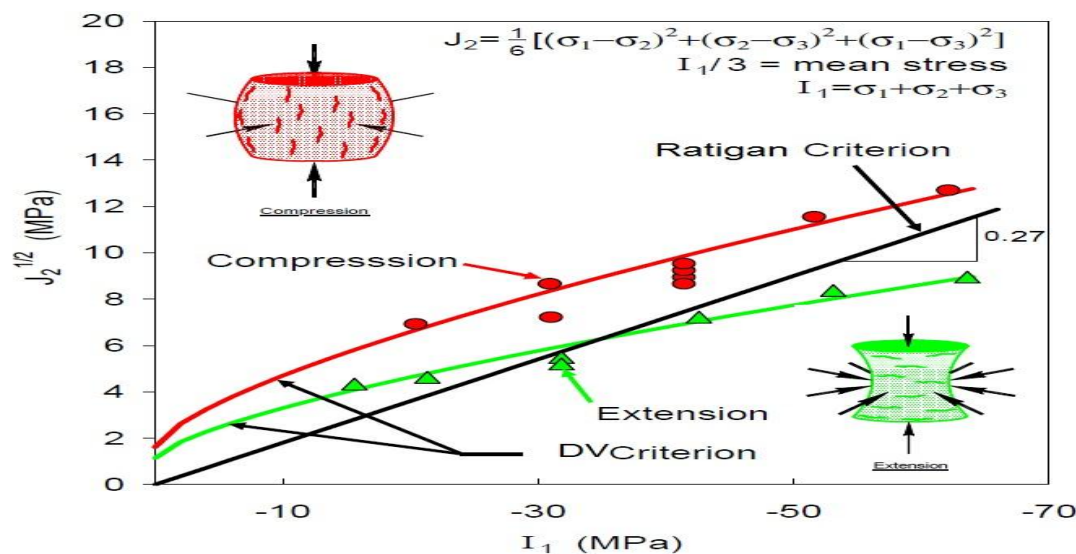
- معیار "بدون تنش موثر کششی": این معیار توسط بروآرد<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ پیشنهاد شده است و در آن تصریح می‌شود که تنش‌های تانژانتی فشاری در دیواره مغار باید کوچکتر از فشار سیال درون مغار باشد، و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_{\theta\theta} + P < 0 \quad (۳۸-۴)$$

اگر شرایط تنشی، این معیار را ارضا نکند، شکافت هیدرولیکی در سنگ اتفاق می‌افتد. این معیار نسبت به معیار بدون تنش سخت گیرانه‌تر است.

#### ۳-۳-۲-۴ افت حجم مغار

آهنگ افت حجم مغار باید کمتر از مقدار مجاز باشد (کمتر از ۱٪ در سال). آهنگ افت حجم زیاد باعث کاهش میزان گاز ذخیره شده در مغار و کاهش مطلوبیت اقتصادی آن می‌شود.



شکل (۴-۹): مقایسه معیارهای اتساع خطی (راتیگان) و معیار غیر خطی (DV) در دو حالت کشش و فشار (DeVries, 2006)

<sup>1</sup>Bouard

### ۴-۳ روش‌های طراحی

روش‌های طراحی فضاهای زیرزمینی به طور کلی به سه دسته روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. طراحی فضاهای زیرزمین درون سازندهای نمکی نیز از این قایده مستثنی نیست. در ادامه به ذکر روش‌های که بیشتر به منظور طراحی فضاهای زیرزمینی توسعه یافته است، اشاره می‌شود.

### ۴-۳-۱ روش‌های تجربی

در مقدمه این فصل به برخی از معیارهای تجربی که در گذشته مورد استفاده قرار گرفته بودند، اشاره شد. هر کدام از آن معیارها دارای نقص‌هایی بودند که بعدها به تدریج اصلاح و یا بطور کلی کنار گذاشته شدند. اما برخی از معیارها نیز با موفقیت مورد استفاده قرار گرفتند. معیار Dreyer یکی از این معیارهاست که در ادامه به شکل مختصر تشریح می‌شود.

در اواخر دهه ۶۰ میلادی در آلمان، Dreyer با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های ساخته شده کوچک مقیاس مغار در سنگ نمکی، مدل خود را ارائه داد. معیار پایداری در این آزمایش‌ها، اضافه کردن بار بر روی مدل تا هنگام پدیدار شدن اولین ریزدرزه بود.

$$k = a \left[ 1 - \frac{d}{h} \left( 1 - \frac{d}{2h} \right) \right] \left( \frac{P_t - P_i}{P_0} \right)^l \left( \frac{1+T}{T_0} \right)^m \left( \frac{t}{t_0} \right)^n \quad (4-39)$$

که در آن  $k$ : ضریب کاهش حجم مغار،  $a$ : ثابت سنگ نمک،  $d$ : قطر بیشینه مغار،  $h$ : ارتفاع مغار،  $P_t$ : تنش متوسط سازند،  $P_i$ : فشار متوسط درون مغار،  $P_0$ : مرجع استاندارد،  $T$ : دمای متوسط مغار،  $T_0$ : ۲۷۳ کلوین،  $t$ : عمر بهره‌برداری مغار،  $t_0$ : یک ماه،  $l$ : پارامتر سنگ نمک (از ۱/۲ تا ۲/۹۵)،  $m$ : پارامتر سنگ نمک (از ۱/۷ تا ۶/۴۳)،  $n$ : پارامتر سنگ نمک (از ۰/۳۲ تا ۰/۹۴) (Allison, 1992)

بر اساس معیار Dreyer، اگر چگالی روباره  $0.23 \text{ bar/m}$  فرض شود آنگاه مقدار فشار بیشینه باید بسته به مشخصات پروژه بین  $0.17 \text{ bar/m}$  تا  $0.195 \text{ bar/m}$  انتخاب شود (Rokahr, 2009).

شایان ذکر است که هم اکنون در بیش از ۱۰۰ مغار نمکی ذخیره‌سازی نفت و گاز از معیار Dreyer استفاده شده است و تمامی این مغارها در حال بهره برداری هستند (Rokahr, 2009. Dreyer, 1987).

#### ۴-۳-۲ روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی همانطور که در فصول پیشین نیز گفته شد، به دلیل سادگی استفاده از آنها در مطالعات اولیه برای طراحی فضاهای زیرزمینی کاربرد خوبی دارند. مغارهای نمکی نیز از این امر مستثنی نیستند. تاریخچه ایجاد روش‌های تحلیلی برای طراحی مغارهای نمک به حدود ۴۰ سال پیش بازمی‌گردد. کرنک<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۸ حل غیر خطی الاستیکی برای مغارهای کروی و استوانه‌ای و با توجه به فشار داخلی مغار ارائه داد. با استفاده از روش کرنک، افت حجم مغار، گسترده‌گی ناحیه غیر خطی و توزیع تنش در اطراف مغار قابل محاسبه بود. کلین<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۰ روش فرم بسته‌ای برای محاسبه توزیع تنش‌ها در حالت پایا و آهنگ همگرایی برای توجه به توزیع غیر یکنواخت دما ارائه داد. در سال ۱۹۸۳ چابانز<sup>۳</sup> نیز روش فرم بسته‌ای برای تحلیل همگرایی خزشی مغارهای استوانه‌ای و کروی در فضای نامحدود و با توجه به فشار داخلی مغار ارائه داد (Hardy et al. 1983). ون سمبیک<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۶ رابطه‌ای برای محاسبه توزیع تنش‌های بلند مدت حول مغارهای کروی و استوانه‌ای ارائه داد (Van Sambeek, 1998). با این حال تعداد روش‌های فرم بسته مناسب جهت محاسبه رفتار وابسته به زمان مغارهای نمک چندان زیاد نبود. علاوه بر آن مدل رفتاری سنگ نمک ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته می‌شدند که به دلیل رفتار کاملاً غیر خطی نمک استفاده از این مدل‌ها چندان قابل اطمینان نبود (Hardy et al. 1983).

<sup>1</sup>Krenk

<sup>2</sup>Klein

<sup>3</sup>Chabannes

<sup>4</sup>Van Sambeek

برست<sup>۱</sup> و بروآرد در سال ۲۰۰۳ آهنگافت حجم یک مغار کروی با شعاع  $a$  و حجم  $V$  در محیطی نامتناهی با خصوصیات الاستو-ویسکو-پلاستیک را بصورت زیر بیان کردند: اگر عمق مرکز مغار به عنوان عمق مغار فرض شود، آنگاه فشار روباره در مغار برابر با  $P_\infty$  است. در زمان  $t = 0$ ، فشار داخلی مغار برابر با  $P_c$  است که  $P_c < P_\infty$ . فرض می‌شود در زمان  $t > 0$  مقدار  $P_c$  ثابت باشد. پس از تغییر فشار ناگهانی، مغار در حالت خزش انتقالی قرار می‌گیرد و در طول آن از میزان تنش‌های انحرافی کاسته می‌شود. پس از گذشت مدت زمان طولانی خزش مغار به حالت پایا می‌رسد. برای مدل کردن خزش ثانویه (پایا) می‌توان از مدل رفتاری (N-H) استفاده کرد. آهنگ افت حجم و توزیع تنش انحرافی در حالت پایا برای مغار کروی، به شکل زیر محاسبه می‌شود (Berest & Brouard, 2003):

$$\frac{\dot{V}}{V} = -\frac{3}{2}A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\frac{3}{2n}(P_\infty - P_c)\right]^n \quad (40-4)$$

$$\sqrt{3}J_2 = \frac{3}{2n}(P_\infty - P_c) \left(\frac{a}{r}\right)^{3/n} \quad (41-4)$$

معادله (۴۱-۴) ارتباط بین تنش‌های انحرافی  $J_2$  با اختلاف فشار  $(P_\infty - P_c)$  و فاصله از مرکز مغار ( $r$ ) را بیان می‌کند.

برای مغار استوانه‌ای، آهنگ افت حجم نسبی مغار توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

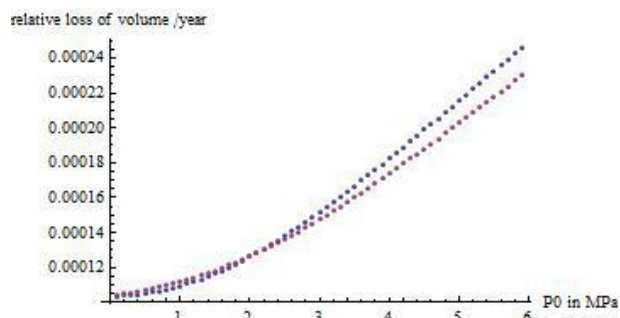
$$\frac{\dot{V}}{V} = -\sqrt{3}A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\frac{\sqrt{3}}{n}(P_\infty - P_c)\right]^n \quad (42-4)$$

بین تمامی شکل‌های ممکن، کمترین آهنگ افت حجم مغار مربوط به شکل کروی است (Brouard & Berest, 1999).

اما علاوه بر تنش‌های ناشی از فشار سنگ‌های روباره، باید تنش‌های ناشی از تغییر دمای سنگ نیز در محاسبات در نظر گرفته شوند. برای روشن‌تر شدن موضوع به شکل (۴-۱۰) توجه شود. در این شکل آهنگ افت حجم نسبی یک مغار کروی شکل در عمق ۷۲۵ متری نشان داده شده است. رفتار کلی

<sup>1</sup>Berest

مغار مجموعه‌ای از رفتار تناوبی، الاستیک (یا ترموالاستیک) بعلاوه‌ی رفتار حالت پایای ویسکوپلاستیک نورتون- هاف است. منحنی پایینی مربوط حالتی است که از اثر ترمودینامیکی صرف نظر شود. منحنی بالایی مربوط به حالتی است که فرض شود سیکل فشار بهره برداری باعث ایجاد سیکل دمایی در مغار می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود آهنگ افت حجم مغار در حالت پایا هنگامی که تاثیرات ترمودینامیکی در نظر گرفته شود، سریع‌تر است.



شکل (۴-۱۰): آهنگ افت نسبی حجم مغار در حالت پایا هنگامی که اثرات ترمودینامیکی در محاسبات در نظر گرفته شود (منحنی بالایی) و هنگامی که این اثرات در نظر گرفته نشود (منحنی پایینی) (Lestringant et al., 2010).  
روش‌های فرم بسته‌ای برای محاسبه تنش‌های اضافی ناشی از تغییر دما گاز ( $\Delta T_{salt}$ ) برای شکل‌های ساده مغار کروی و استوانه‌ای (با شعاع  $a$ ) تا فاصله  $r$ ) وجود دارد که در جدول (۴-۲) ارائه شده است (Brouard et al., 2011).

جدول (۴-۲): تنش‌های اضافه ترموالاستیک برای شکل‌های ساده از مغار (Brouard et al., 2011)

| استوانه‌ای                                                                      | کروی                                                               | تنش‌های اضافه                    |       |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------|
| $-\left(\frac{a}{r}\right)^2 \bar{\omega} J(r)$                                 | $-\frac{2\bar{\omega}}{r^3} I(r)$                                  | $\Delta\sigma_{rr}(r)$           | شعاعی |
| $+\left(\frac{a}{r}\right) \bar{\omega} J(r) - \bar{\omega} \Delta T_{salt}(r)$ | $+\frac{\bar{\omega}}{r^3} I(r) - \bar{\omega} \Delta T_{salt}(r)$ | $\Delta\sigma_{\theta\theta}(r)$ | مماسی |
| $-\bar{\omega} \Delta T_{salt}(r)$                                              | $-\bar{\omega} \Delta T_{salt}(r)$                                 | $\Delta\sigma_{zz}(r)$           | قائم  |

که در آن  $\bar{\omega} = E_{salt} \alpha_{salt} / (1 - \nu_{salt})$  است و  $(\nu_{salt}$  و  $E_{salt})$  پارامترهای الاستیک نمک،  $\alpha_{salt}$

ضریب انبساط حرارتی نمک و  $I(r)$  و  $J(r)$  انتگرال‌هایی هستند که به شکل زیر تعریف می‌شوند:

$$I(r) = \int_a^r u^2 \Delta T_{salt}(u) du \quad J(r) = \int_a^r u \Delta T_{salt}(u) du \quad (۴-۴۳)$$



روش‌های فرم بسته تنها برای شکل‌های معینی قابل استفاده هستند. فرضیات ساده کننده زیادی در آنها بکار گرفته شده که کاربرد آنها را دچار محدودیت نموده است. برای مثال محیط در بر گیرنده مغار نامتناهی و شرایط تنش برجا هیدرواستاتیک فرض شده است که این مورد اخیر در مورد گنبد‌های نمکی تا حدود زیادی صادق است. اما بطور کلی محدودیت‌ها و نواقص استفاده از روش‌های فرم بسته عبارتند از (Hardy et al. 1983):

- تاثیرات خزش اولیه (انتقالی) بر همگرایی مغار قابل مطالعه نیست.
- تنها برای شکل‌های خاصی از مغارها کاربرد دارند.
- در مغارهای با حجم و ابعاد زیاد بارگذاری ثقلی مهم است که در این روش‌ها منظور نشده است.
- به دلیل عدم توانایی در بر هم نهی مسایل غیر خطی، در ارزیابی فاصله داری مغارها کارایی ندارند.
- تاثیرات تغییرات دوره‌ای<sup>۱</sup> فشار درون مغار قابل حل نیست.

### ۴-۳-۳ روش‌های عددی

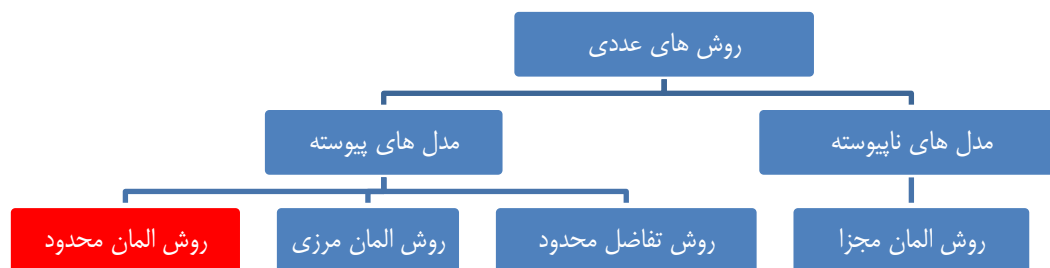
شبیه سازی رفتار مکانیکی غیر خطی و وابسته به زمان مغارهای نمک نیازمند استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته و محاسبات بسیار دقیق است. علاوه بر آن، به پدیده‌های دیگر مانند رفتارهای گرمایی، شیمیایی و هیدرولیکی نیز بر رفتار مغارهای نمک تاثیر گذارند که بایست در تحلیل‌ها مورد توجه قرار گیرند. همه‌ی اینها بکارگیری روش‌های عددی را غیر قابل اجتناب کرده است.

روش‌های عددی بر اساس نحوه گسسته‌سازی مساله به دو گروه مدل‌های پیوسته و ناپیوسته دسته‌بندی می‌شوند. در شکل (۴-۱۱) دسته بندی روش‌های عددی نشان داده شده است. در ارتباط با

<sup>1</sup>Cyclic

مدل‌سازی مغارهای نمکی، به دلیل خواص ویژه نمک از جمله التیام‌پذیری آن کمتر ناپیوستگی در آن دیده می‌شود. همچنین به دلیل قرارگیری مغارهای نمک در اعماق زیاد (بیشتر از ۵۰۰ متر) تقریباً هیچگونه ناپیوستگی به شکل معمول در آن دیده نمی‌شود. این مورد برای مغارهایی که در گنبدهای نمک ساخته می‌شوند نسبت به مغارهای واقع در نمک‌های لایه‌ای نمود بیشتری دارد. البته گسل‌های عمیق و بزرگ در صورت وجود بر رفتار و پایداری مغار اثر می‌گذارد. با این وجود تحلیل رفتار مغارهای نمک با استفاده از مدل‌های پیوسته مطلوبیت و کارایی بسیار زیادی دارد تا آنجا که تقریباً همه کدهای عددی نوشته شده به منظور طراحی و تحلیل پایداری مغارهای نمکی بر اساس مدل‌های پیوسته است. شکل مغارهای واقع در گنبدهای نمکی عموماً کپسول مانند در نظر گرفت و به دلیل تقارنی که در مساله وجود دارد، امکان استفاده از روش‌های عددی دو بعدی نیز هست (Geurber & Durup, 1996).

مدل‌های پیوسته خود به سه گروه المان محدود<sup>۱</sup> (FEM)، تفاضل محدود<sup>۲</sup> (FDM) و المان مرزی<sup>۳</sup> (BEM) تقسیم می‌شوند. به دلیل آنکه تاکنون بیشتر نرم افزارهای تجاری تولید شده برای تحلیل پایداری مغارهای نمک در دو گروه المان محدود (مثل نرم افزار LOCAS و Abaqus) و تفاضل محدود (مثل FLAC<sup>3D</sup> و FLAC) قرار می‌گیرند، در ادامه روش المان محدود به صورت اجمالی بررسی می‌شود و نرم افزار LOCAS معرفی می‌گردد.



شکل (۴-۱۱): دسته بندی روش‌های عددی (Sinha, 1989)

<sup>۱</sup>Finite element method

<sup>۲</sup>Finite difference method

<sup>۳</sup>Boundary element method

### ۴-۳-۱ مقایسه روش المان محدود و تفاضل محدود

روش المان محدودی روشی مبتنی بر اساس محیط پیوسته است. محدوده مسئله (یعنی زمین) به تعدادی المان بسیار کوچک تقسیم شده و این المان‌ها توسط گره به یکدیگر متصل می‌شوند. ارتباط تنش‌ها و کرنش‌ها با مدل رفتاری مناسب بیان می‌شود. پس از ساخت مدل شرایط مرزی و اولیه در مدل وارد شده و سپس سازه زیرزمینی حفر و محاسبات مربوطه اعمال می‌شود.

امکان‌پذیری ارتباط المان‌ها با ترکیب‌های مختلف، قابلیت حل مسایل بسیار پیچیده را با روش المان محدود فراهم آورده است. مبنای حل در این روش، حل ماتریس سختی است. نقاط قوت و ضعف این روش عبارتند از (Sinha, 1989):

- نقاط قوت روش المان محدود
    - امکان تحلیل شرایط پیچیده سازه‌های زیرزمینی
    - امکان استفاده از مدل‌های رفتاری پیچیده
    - قابلیت در نظرگیری اثر زمان با استفاده از سرعت کرنش
- روش تفاضل محدود مانند روش المان محدود بر اساس محیط پیوسته عمل می‌کند و در آن محیط مسئله به المان‌های ریزی تقسیم می‌شود. وجه تمایز این روش با روش المان محدود در روش حل پارامترهای مجهول مسئله است. در روش تفاضل محدود، بر خلاف روش المان محدود که از حل ضمنی (غیر صریح) استفاده می‌کند، این روش از حل صریح سود می‌برد.

- نقاط ضعف روش تفاضل محدود
  - زمان بر بودن در مورد حل مسایل استاتیکی
  - عدم توسعه کدهای مدل‌های رفتاری خزشی پیچیده مثل مدل مانسون- داسون به دلیل پیچیده بودن حل معادله آن توسط روش‌های غیر صریح

به دلیل آنکه یکی از پیش نیازهای انجام تحقیق، استفاده از مدل‌های رفتاری خزشی برای شبیه‌سازی رفتار سنگ نمک در مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی است، بنابراین روش‌هایی مطلوب هستند که کدهای مدل رفتاری خزشی در آن توسعه یافته باشد. به همین دلیل استفاده از روش المان محدود که در آن امکان بسط چنین کدهایی وجود دارد مد نظر قرار گرفت. نرم‌افزار LOCAS بر پایه روش المان محدود توسعه یافته و در آن مدل‌های رفتاری خزشی پیچیده‌ای مثل مدل مانسون- داسون توسعه یافته است. در ادامه به ذکر ویژگی‌ها و خصوصیات این نرم‌افزار پرداخته می‌شود.

#### ۴-۳-۲ معرفی نرم‌افزار LOCAS

اعمال همه‌ی پدیده‌های حاکم بر رفتار مغارهای نمک در نرم‌افزارهای المان محدود بسیار مشکل است. تاکنون چندین نرم‌افزار برای فضاهای زیرزمینی نمکی طراحی شده است، اما هیچکدام از آنها مغارهای حاوی سیال فرض نشده است. اکثر نرم‌افزارهای موجود تنها برخی جنبه‌های رفتار مغارها (عمدتاً جنبه‌های مکانیکی یا ترمودینامیکی) را در نظر می‌گیرند، ولی تاکنون نرم‌افزاری که همه‌ی جنبه‌های موثر در رفتار مغارها و ارتباط بین آنها که برای شبیه‌سازی رفتار بلند مدت مغارهاست را در نظر بگیرد توسعه نیافته است. شبیه‌سازی رفتار مکانیکی غیر خطی و وابسته به زمان مغارهای نمک نیازمند استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته و محاسبات بسیار دقیق است. علاوه بر آن، به پدیده‌های دیگر مانند رفتارهای گرمایی، شیمیایی و هیدرولیکی نیز بر رفتار مغارهای نمک تاثیر گذارند که باید در تحلیل‌ها مورد توجه قرار گیرند.

نرم‌افزار LOCAS<sup>۱</sup> که حاصل سال‌ها مطالعه تئوریک و تست‌های برجا و آزمایشگاهی بسیار زیادی است، قادر است بسیاری از جنبه‌های مربوط به طراحی مغارهای نمکی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری را در نظر بگیرد. پدیده‌هایی که می‌توانند در نرم‌افزار LOCAS در نظر گرفته شوند عبارتند از:

<sup>۱</sup>Logiciel (software in French) for Cavern Abandonment Study

- خزش اولیه (یا گذرا) و ثانویه (پایا)ی سنگ نمک
- گرم شدن شوراب و انبساط گرمایی حاصل از آن
- نفوذ شوراب در سازند نمکی
- انحلال/کریستاله شدن نمک
- تراکم/غیرمتراکم شدن آدیاباتیک گاز
- آسیب سنگ؛

LOCAS یک نرم افزار کاربر دوست (User friendly) المان محدود بوده و مختص مغارهای نمکی است. با استفاده از ابزارهای مختلفی که در این نرم افزار تعبیه شده، امکان درک ساز و کار و رفتار انواع مغارهای ذخیره سازی مواد هیدروکربوری مایع (Brine-filled) و گازی شکل (Gas-filled) به وجود آمده است. با کمک قابلیت‌های محاسبه‌ای و فرآیندهای پردازشی موجود در این نرم افزار امکان بررسی پایداری مکانیکی کوتاه مدت و بلند مدت مغار از جنبه‌های مختلف ایجاد شده است. به طور کلی LOCAS از پیشرفته‌ترین ابزارهای طراحی و بهینه سازی مغارهای نمکی است.

قابلیت‌های موجود در نرم افزار LOCAS سبب شده تا بتوان از جنبه‌های بسیار زیادی به مطالعه سازه پیچیده مغاره نمکی پرداخت. LOCAS یک نرم افزار تحلیل دو بعدی متقارن است که در آن به بررسی رفتارهای بلند مدت و کوتاه مدت مغارهای نمک پرداخته می‌شود. چندین مدل رفتاری برای سنگ نمک شامل (مدل Norton-Hoff، مدل Munson-Dowson، مدل Lubby2 و مدل LMS) در این نرم‌افزار وجود دارد. معیارهای آسیب (Damage) و شکست (Failure) زیادی در این نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. همچنین با کمک LOCAS ظرفیت ذخیره‌سازی مغار به راحتی قابل محاسبه و بهینه سازی است. محاسبات این نرم افزار بر اساس جدیدترین و کارآمدترین الگوریتم‌هاست، که بر پایه بهینه سازی و موازی سازی پردازشگرهای چند هسته‌ای اینتل (Intel®) بنا نهاده شده است. با استفاده از خصوصیات

پس‌پردازشی<sup>۱</sup> موجود در LOCAS، امکان نمایش گرافیکی نتایج حاصل از محاسبات به وجود دارد و نمودارهای مختلفی در دسترس هستند (LOCAS User's Guide).

اعتبارسنجی نرم‌افزار LOCAS یا تعداد زیادی از روش‌های فرم بسته انجام شده است (Karimi-2007). همچنین در پیوست (جدول D) لیست پروژه‌ها و مقالاتی که از نرم‌افزار LOCAS به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم استفاده شده، ارائه شده است.

#### ۴-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سنگ بنای اصلی معیارهای تحلیل پایداری مغارهای نمکی شامل معیارهای بررسی اتساع سنگ نمک درک نامتغیرهای اصلی تانسورهای تنش و تنش انحرافی است. شبیه‌سازی رفتار سنگ نمک باید با استفاده از مدل‌های رفتاری شامل حالت خزش انتقالی و پایا باشد. مدل رفتاری مانسون- داسون از پیشرفته‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی رفتار سنگ نمک است که بر پایه اطلاعات حاصل از نقشه مکانیسم خزش نمک توسعه یافته است. در این تحقیق از این مدل استفاده شده است. به دلیل اهمیت تاثیر رفتار ترمودینامیکی گاز بر رفتار کلی سازند نمکی دربرگیرنده مغار، باید در شبیه‌سازی این بخش نیز مورد توجه قرار گیرد. به طور کلی معیارهای تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی شامل حجم مغار، وضعیت تنش‌های اصلی بیشینه، وضعیت تنش‌های موثر و اتساع سنگ نمک می‌شود. برای پایدار ماندن مغار، آهنگ افت حجم مغار نباید از مقدار مجاز فراتر رود. همچنین وضعیت تنش‌های بیشینه و موثر در سازند نمکی دربرگیرنده مغار نباید به حالت تنش‌های کششی برسد. علاوه بر آن سنگ نمک نباید دچار اتساع شود. معیار اتساع استفاده شده در این تحقیق معیار دوریس است. استفاده از این معیار به دلایل زیادی از جمله به دلیل غیر خطی بودن آن، در نظرگیری مکانیسم واقعی رفتار نمک در سال‌های اخیر به شدت زیاد شده است.

<sup>1</sup>Post processing

از میان روش‌های مختلف عددی طراحی و تحلیل پایداری فضاهاى زیرزمینی در سازندهای نمکی، روش المان محدود برگزیده شده و بر اساس آن نرم‌افزار LOCAS که بر پایه این روش توسعه یافته برای شبیه‌سازی رفتار مغار نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی و پایداری آن انتخاب شده است.

## فصل پنجم

تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی



## ۵-۱ مقدمه

پیش‌بینی رفتار و ارزیابی پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی جز با کمک مدل‌های ژئومکانیکی، شبیه‌سازی و تحلیل رفتار اجزای گوناگون آن توسط نرم‌افزارهای توانمند و استفاده از مدل‌های رفتاری پیشرفته، امکان‌پذیر نیست. همچنین معیارهای مورد استفاده در تحلیل پایداری باید متناسب با پیچیدگی رفتار مغار نمکی تحت بارگذاری متناوب باشد. همچنین این بارگذاری متناوب، باعث تغییر متناوب دمای درون مغار شده و تنش‌های حرارتی اضافه‌ای بر دیواره مغار اعمال می‌شود که باید در شبیه‌سازی رفتار مغارهای گازی در نظر گرفته شود.

به طور کلی، نتایج حاصل از مدل‌سازی زمانی معتبر هستند که شرایط تاثیرگذار بر رفتار مغار در نظر گرفته شوند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار LOCAS و شبیه‌سازی فرآیندهای بارگذاری متناوب فشاری و حرارتی، به مطالعه رفتار مغارهای نمک ذخیره‌سازی گاز<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود.

هدف این فصل بررسی چگونگی رفتار مغار نمک ذخیره‌سازی گاز طبیعی و تحلیل پایداری آن است. به همین دلیل در ابتدا یک مدل از مغار ذخیره‌سازی گاز طبیعی ساخته شده و رفتار آن به صورت کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل در این تحقیق "مدل مرجع" خوانده می‌شود. در ادامه این فصل با تغییر پارامترهای مدل مرجع، به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی، بهره‌برداری، خصوصیات سنگ نمک و شرایط زمین‌شناسی بر رفتار و پایداری مغار نمکی پرداخته می‌شود. برای انجام این کار، از تحلیل حساسیت و مطالعات پارامتری استفاده شده است. در بخش تحلیل پارامتری، به بررسی تاثیر خصوصیات سنگ نمک بر پایداری و رفتار مغار، پرداخته شده است. محدوده‌ای که در آن پارامترهای مختلف مدل مرجع تغییر داده شده است بر اساس مطالعات پیشین انجام شده و سعی شده در حد امکان پارامترهای مدل به ویژگی‌های سایت احتمالی ذخیره‌سازی گاز طبیعی در نصرآباد کاشان نزدیک باشد.

<sup>1</sup>Gas-filled

## ۵-۲ توصیف مساله

برای مطالعه رفتار مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز، ابتدا یک مدل مرجع تعریف شده و رفتار آن مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات مدل مرجع تا آنجا که امکان داشت نزدیک به ویژگی‌های تعیین شده در محل احتمالی اولین پروژه ذخیره‌سازی گاز طبیعی ایران در منطقه نصرآباد کاشان انتخاب شد.

## ۵-۲-۱ ساختار زمین‌شناسی

برای تحلیل، وضعیتی فرضی در نظر گرفته می‌شود که در آن گنبد نمکی در عمق ۲۰۰ متر زیر سطح زمین قرار گرفته است (با توجه شکل ۳-۹). روباره‌ای با چگالی متوسط  $2600 \text{ kg/m}^3$  بر روی گنبد نمکی قرار دارد. سنگ نمک خالص و چگالی متوسط آن  $2200 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شد. در جدول (۵-۱) وضعیت لایه‌بندی و مشخصات فیزیکی و الاستیک ساختار زمین در مدل مرجع ارایه شده است. با توجه به حالت همگن، رفتار جریانی، دمای بالا و دوره‌های طولانی زمین‌شناسی سنگ نمک، می‌توان وضعیت تنش را هیدرواستاتیک فرض کرد (یعنی  $K_0 = 1$ ). شیب زمین گرمایی  $0.187 \text{ C.m}^{-1}$  و دمای متوسط سطح زمین  $25^\circ\text{C}$  فرض شده است (DeVries et al., 2002).

جدول (۵-۱): مشخصات لایه‌های زمین در مدل مرجع (مشخصات نمک از Brouard et al., 2007 اخذ شده است)

| شماره لایه | جنس لایه | ضخامت (m) | عمق (m)     | چگالی ( $\text{kg/m}^3$ ) | مدول یانگ (GPa) | نسبت پواسون |
|------------|----------|-----------|-------------|---------------------------|-----------------|-------------|
| ۱          | دولومیت  | ۲۰۰       | صفر تا ۲۰۰  | ۲۶۰۰                      | ۴۰              | ۰/۳۵        |
| ۲          | نمک      | ۲۰۰۰      | ۲۰۰ تا ۲۲۰۰ | ۲۲۰۰                      | ۳۰              | ۰/۲۵        |

## ۵-۲-۲ مشخصات سنگ نمک و گاز طبیعی

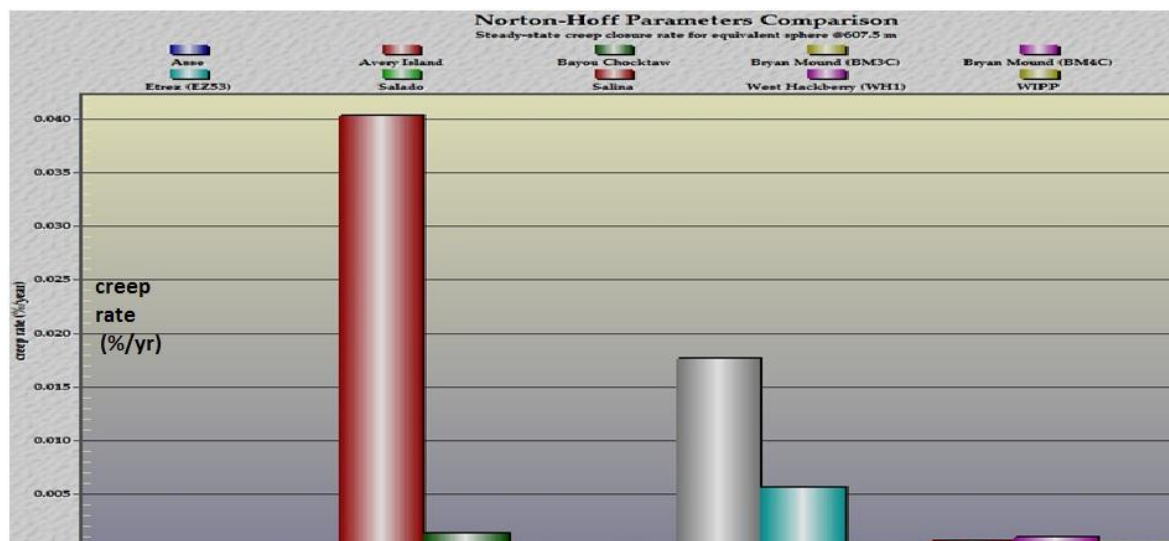
برای بررسی رفتار سنگ نمک از مدل رفتاری مانسون- داسون (M-D) استفاده شده که در فصل گذشته درباره این مدل به تفصیل توضیح داده شده است. داده‌های مورد استفاده در مدل از نتایج

آزمایش‌های آقای مانسون بر روی سنگ نمک آوری‌آیلند<sup>۱</sup> اخذ شده است (Munson, 2004). انتخاب سنگ نمک آوری‌آیلند سه دلیل انجام گرفته است. اول آنکه پارامترهای ژئومکانیکی سنگ نمک (از جمله پارامترهای خزشی) محل اجرای پروژه، در هنگام انجام این تحقیق مشخص نشده‌اند. دوم آنکه تعیین پارامترهای مدل M-D نیاز به درک چگونگی رفتار نمک دارد. آزمایش‌های انجام گرفته توسط آقای مانسون از این ویژگی برخوردار است (تاکنون چنین آزمایش‌هایی بر روی سنگ‌های نمک ایران انجام نشده است). دلیل دوم، در نظر گرفتن بدترین شرایط ممکن است. به دلیل آنکه سنگ نمک آوری‌آیلند دارای احتمال خزشی بسیار بیشتری نسبت به سایر سنگ‌های نمک است (در ادامه مقایسه‌ای بین سنگ آوری‌آیلند با سایر سنگ‌های نمک ارایه شده است)، بنابراین انتخاب این سنگ نمک آوری‌آیلند گزینه مناسبی تشخیص داده شده است. در جدول (۵-۲) پارامترهای ژئومکانیکی و ترمودینامیکی سنگ نمک که در مدل مرجع استفاده شده است، مشاهده می‌شود.

برای مقایسه سنگ نمک آوری‌آیلند با دیگر سازندهای نمک، احتمال خزشی تعریف می‌شود. احتمال خزشی به صورت کرنش تجمعی ویسکوپلاستیک یک نمونه از سنگ نمک است که مدت یک سال در دمای مرجع (در اینجا  $20^{\circ}\text{C}$ ) و تحت فشار  $10\text{ MPa}$  قرار گرفته است. برای مقایسه خزش، تنها بخش خزش پایای مدل M-D (معادل مدل رفتاری نورتن-هاف N-H) در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۵-۱) نتایج مقایسه احتمال خزش ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، احتمال خزشی سنگ نمک آوری‌آیلند بیشتر از سایر سنگ‌ها است ( $0.41\%$  در سال).

رفتار ترمودینامیکی گاز در نرم‌افزار LOCAS قابل شبیه‌سازی است. معادلات حاکم بر رفتار گاز در فصل چهارم اشاره شده است. در جدول (۵-۳) مشخصات ترمودینامیکی گاز طبیعی (متان) که در ذخیره سازی استفاده می‌شود، ارایه شده است. دمای گاز تزریقی به مغار  $37^{\circ}\text{C}$  فرض شده است.

<sup>1</sup>Avery Island



شکل (۵-۱): مقایسه احتمال خزش سنگ نمک Avery Island و دیگر سنگ‌های نمک

جدول (۵-۲): مشخصات سنگ نمک برای مدل مرجع

| مشخصات مدل M-D (Munson, 2004) |                         |          |                                | مشخصات الاستیک (Munson, 2004)              |                                    |                         |
|-------------------------------|-------------------------|----------|--------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| مقدار                         | واحد                    | پارامتر  |                                | مقدار                                      | واحد                               | پارامتر                 |
| ۰/۷۴                          | /MPa <sup>n</sup> -year | A        | پارامترهای خزش پایا            | ۳۰۰۰                                       | MPa                                | مدول یانگ               |
| ۵                             | -                       | n        |                                | ۰/۲۵                                       | -                                  | نسبت پواسون             |
| ۵۰۳۲                          | K                       | Q:R      |                                | مشخصات ترمودینامیکی (Brouard et al., 2007) |                                    |                         |
| ۳                             | -                       | m        | پارامترهای خزش انتقالی (اولیه) | ۲۲۰۰                                       | Kg/m <sup>3</sup>                  | چگالی                   |
| -۱۳/۲                         | -                       | $\alpha$ |                                | ۹۲۱                                        | J/kg-K                             | ظرفیت گرمایی ویژه       |
| -۷/۷۳۸                        | -                       | $\beta$  |                                | ۳                                          | $\times 1E-6 \text{ m}^2/\text{s}$ | پخش گرمایی <sup>۱</sup> |
| $۷ \times 10^{-۷}$            | /MPa·m                  | K0       |                                | ۶/۰۸                                       | W/m-°C                             | هدایت گرمایی            |
| ۰/۵۸                          | -                       | $\delta$ |                                | ۴                                          | $1E-5 / ^\circ\text{C} \times$     | ضریب انبساط حرارتی      |
| -۳                            | /K                      | c        |                                |                                            |                                    |                         |
| ۹/۰۲×۱۰                       |                         |          |                                |                                            |                                    |                         |

<sup>1</sup>Thermal diffusivity

جدول (۳-۵): ویژگی‌های فیزیکی و ترمودینامیکی گاز طبیعی (متان) (LOCAS user's giude)

| پارامتر                             | واحد              | مقدار  |
|-------------------------------------|-------------------|--------|
| دمای مرجع                           | K                 | ۲۹۳/۱۵ |
| فشار مرجع                           | Atm               | ۱      |
| چگالی                               | Kg/m <sup>3</sup> | ۰/۶۷   |
| ظرفیت گرمایی C <sub>p</sub>         | J/kg-K            | ۲۱۸۱/۶ |
| ظرفیت گرمایی C <sub>v</sub>         | J/kg-K            | ۱۶۸۳   |
| نسبت C <sub>p</sub> /C <sub>v</sub> | -                 | ۱/۲۹۶  |
| ویسکوزیته دینامیکی                  | 1E-5 × Pa.s       | ۱/۰۲۵  |

### ۳-۲-۵ شکل مغار

شکل مغار مرجع "کپسولی شکل" با حجم تقریبی  $۸ \times ۱۰^۵ \text{ m}^3$  و نسبت ارتفاع به قطر ( $\frac{H}{D} = 3$ ) در نظر گرفته شده و از سه بخش تشکیل شده است. بخش استوانه‌ای مرکزی با ارتفاع ۱۴۸ متر و دو نیمکره با شعاع ۳۶ متر در بالا و پایین استوانه که در مجموع مغاری کپسولی شکل را تشکیل می‌دهند (شکل ۵-۲). همچنین در جدول (۴-۵) مشخصات هندسی مدل مرجع نشان داده است. پاشنه چاه در فاصله ۳۰ متری بالای سقف مغار قرار دارد. عمق مرکز مغار مدل مرجع ۱۰۰۰ متر است و با توجه به شیب زمین گرمایی و دمای سطح زمین، دمای مرکز مغار مدل مرجع برابر با  $۴۳/۷^\circ \text{C}$  خواهد بود.

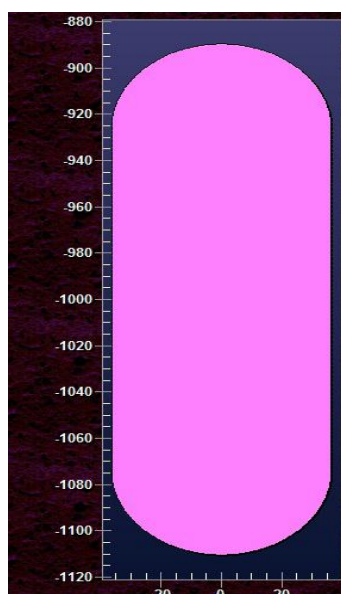
جدول (۴-۵): مشخصات هندسی مدل مرجع مغار نمکی

| پارامتر          | واحد           | مقدار  |
|------------------|----------------|--------|
| حجم خالص مغار    | m <sup>3</sup> | ۷۹۸۰۰۰ |
| ارتفاع مغار      | m              | ۲۲۰    |
| شعاع پیشینه مغار | m              | ۳۶     |
| عمق پاشنه چاه    | m              | ۸۶۰    |
| عمق سقف مغار     | m              | ۸۹۰    |
| عمق متوسط مغار   | m              | ۱۰۰۰   |
| عمق کف مغار      | m              | ۱۱۱۰   |

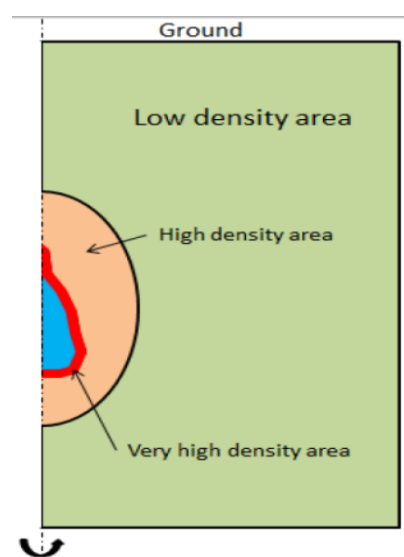
## ۵-۲-۴ مش‌بندی مدل

ابعاد مش‌ها در اطراف مغار باید به اندازه‌ای ریز باشد که بتواند رفتار توامان مکانیکی- ترمودینامیکی سنگ نمک را بخوبی شبیه‌سازی نماید. همچنین گام‌های زمانی<sup>۱</sup> باید به اندازه‌ای کوتاه باشد که تغییر رفتار سنگ تحت اثر تغییرات فشار و دما، در مدل دیده شود. به علت تقارن موجود، تنها نیمی از مغار کپسولی شکل مدل می‌شود. مغار مدل مرجع در مدلی با ارتفاع ۲۲۰۰ متر (از سطح زمین تا عمق ۲۲۰۰ متری) و عرض ۱۰۰۰ متر (فاصله لبه مدل و محور مغار) قرار دارد.

در نرم‌افزار LOCAS سه ناحیه با چگالی مختلف مش (ابعاد مش) در دسترس است. همانطور که در شکل (۵-۳) مشاهده می‌شود، در ناحیه کوچکی از اطراف مغار چگالی مش‌ها بسیار بالاست (ناحیه چگال<sup>۲</sup>). پس از آن با دور شدن از مغار به تدریج از چگالی مش‌ها کاسته می‌شود. تعیین ابعاد مش‌ها در ناحیه چگال از اهمیت خاصی برخوردار است.



شکل (۵-۲): مشخصات هندسی مدل مرجع



شکل (۵-۳): نحوه مش‌بندی مدل

<sup>1</sup>Time step

<sup>2</sup>Veryhigh density area

ابعاد مش‌ها در ناحیه چگال و گام زمانی توسط روابط (۵-۱) تا (۵-۳) محاسبه می‌شود (Brouard

et al., 2011):

$$\Delta x_{max} = \frac{\Delta r}{5} \quad (۵-۱)$$

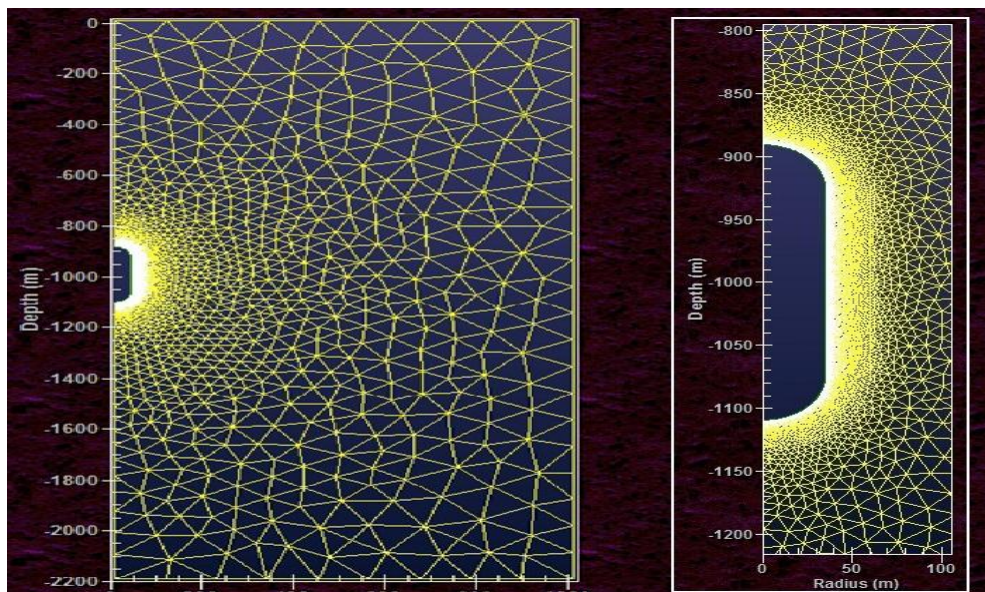
$$\Delta t_{max} < \frac{\Delta r^2}{100k_{salt}} = \frac{\pi\tau}{200} \quad (۵-۲)$$

که در آن،  $\Delta x_{max}$  بیشینه ابعاد مش‌ها در ناحیه پرچگال (بر حسب cm) است و  $\Delta r$  برابر است با:

$$\Delta r = 2.9 \times 10^4 \sqrt{\pi k_{salt} \tau / 2} \quad (۵-۳)$$

که در آن،  $\Delta t_{max}$  بیشینه گام زمانی (بر حسب روز)،  $\tau = 365$  دوره تناوب سیکل بهره‌برداری (بر حسب روز) و  $k_{salt} = 3 \times 10^{-6}$  پخش گرمایی سنگ نمک (بر حسب  $m^2/s$ ) است. ضخامت ناحیه پرچگال (R) برابر است با:  $R = 2\Delta r$ . برای مدل مرجع مقدار  $R = 2400 \text{ cm}$  و  $\Delta t_{max} \leq 5.7 \text{ day}$  خواهد بود.

مش‌بندی مدل مرجع در شکل (۵-۴) نشان داده شده است.



شکل (۵-۴): مش‌بندی مدل مرجع

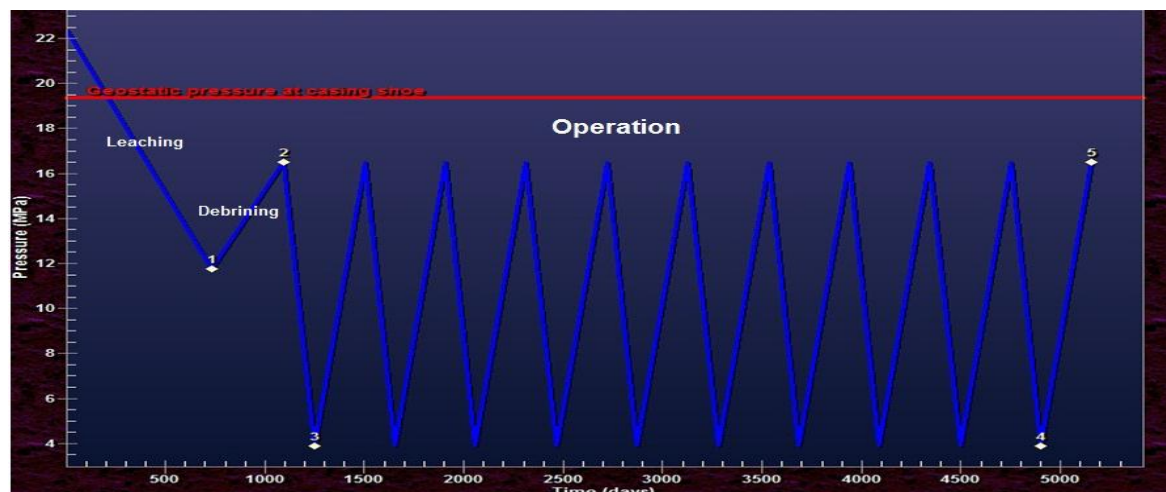
## ۵-۲-۵ فرآیند ساخت و بهره‌برداری

فرآیند ساخت و بهره‌برداری از مغارهای ذخیره‌سازی گاز شامل سه مرحله انحلال، آبرانی و بهره‌برداری است که هر سه فرآیند مذکور در مدل شبیه‌سازی شده است. به طور متوسط برای انحلال هر متر مکعب سنگ نمک حدود هفت تا ده متر مکعب آب لازم است. اگر آهنگ تزریق آب به درون سازند  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  باشد (Haddenhorst and Quast, 1992)، آنگاه برای حفر مغاری با حجم ۸۰۰ هزار متر مکعب، حدود دو سال وقت لازم است. بنابراین فرآیند معدنکاری انحلالی مغار به مدت ۲ سال انجام و پس از آن مرحله آبرانی در مدت ۱ سال انجام می‌گیرد (Bernhardt, 2011). در مرحله بهره‌برداری، گاز در مدت ۲۱۵ روز به درون مغار تزریق و در مدت ۱۵۱ روز از مغار برداشته می‌شود (رفیعی، ۱۳۸۷). در طی این سه مرحله، فشار در مرکز مغار در حین فرآیند انحلال از  $22/37 \text{ MPa}$  (فشار لیتواستاتیک در عمق ۱۰۰۰ متر) به  $11/49 \text{ MPa}$  (وزن ناشی از ستون شوراب در عمق ۱۰۰۰ متر) کاهش یافته و در انتهای فرآیند آبرانی به  $16/5 \text{ MPa}$  (معادل  $0/85$  فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه) افزایش می‌یابد. پس از آن سیکل‌های بهره‌برداری گاز که شامل فشار کمینه  $4/5 \text{ MPa}$  (معادل  $0/2$  فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه) و فشار بیشینه  $16/5 \text{ MPa}$  (معادل  $0/85$  فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه) است در مدل شبیه‌سازی شده است (Neiland, 2008). برای مدل مرجع، تعداد ده سیکل بهره‌برداری در نظر گرفته شده است. در شکل (۵-۵) نمودار فشار درون مغار در طول سه فرآیند انحلال، آبرانی و بهره‌برداری نشان داده شده است. خط افقی نشان داده شده در این شکل، نشانگر فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه است.

در شکل (۵-۵) نقاطی بر روی منحنی فشار درونی مغار شماره‌گذاری شده است که هر کدام به زمان خاصی از فرآیند ساخت و بهره‌برداری تعلق دارد. در این زمان‌ها پایداری و رفتار مغار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۵-۵) نقاط مشخص شده بر روی شکل (۵-۵) توضیح داده شده است.



همچنین دمای مغار، تا انتهای دوره آبرانی، مقداری ثابت و برابر با دمای زمین در مرکز مغار (یعنی  $43/7^{\circ}\text{C}$ ) در نظر گرفته شد.



شکل (۵-۵): تاریخچه تغییرات فشار گاز در مدل مرجع در طول دوره ساخت و بهره‌برداری؛ خط افقی نشانگر فشار روباره در ناحیه پاشنه چاه

جدول (۵-۵): مشخصات نقاط شماره گذاری شده در شکل (۵-۵)

| شماره نقطه | تاریخ از شروع شبیه‌سازی (روز) | توضیحات                  |
|------------|-------------------------------|--------------------------|
| ۱          | ۷۳۰                           | انتهای مرحله انحلال مغار |
| ۲          | ۱۰۹۵                          | انتهای مرحله آبرانی      |
| ۳          | ۱۲۴۶                          | اولین فشار کمینه         |
| ۴          | ۴۹۰۰                          | دهمین فشار کمینه         |
| ۵          | ۵۱۵۵                          | دهمین فشار بیشینه        |

### ۵-۳ تحلیل پایداری مدل مرجع

برای تحلیل پایداری و بررسی رفتار مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز، باید معیارهایی در نظر گرفته شود که در فصل چهارم به تفصیل به آنها اشاره شد. برای تحلیل پایداری مدل مرجع، ابتدا نوسان دمایی درون مغار، آهنگ افت حجم مغار و ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند. پس از آن به بررسی وضعیت تنش بیشینه اصلی و موثر بر روی دیواره مغار و همچنین در اطراف مغار پرداخته خواهد شد. همچنین وضعیت اتساع سنگ نمک در اطراف مغار بر اساس معیار دوریس مورد تحلیل قرار

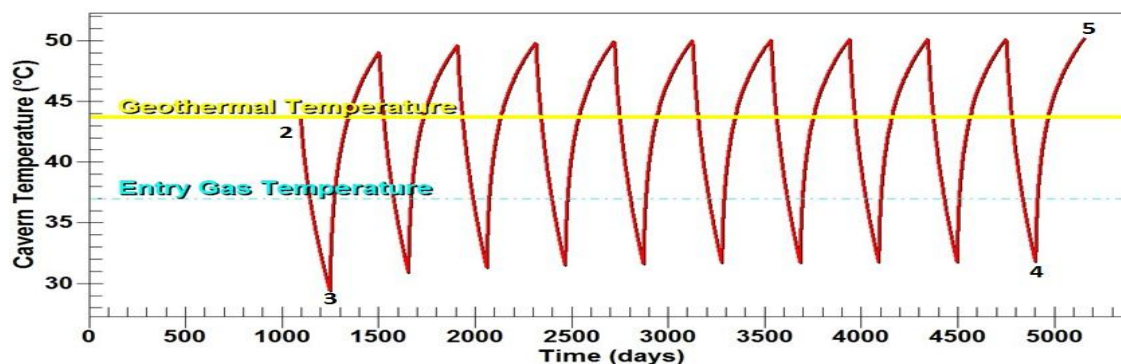
خواهد گرفت. به دلیل اهمیت پایداری پاشنه چاه در طراحی مغارهای نمکی، این بخش به شکل جداگانه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در جدول (۵-۶) این معیارها به صورت مختصر ذکر شده است.

جدول (۵-۶): معیارهای تحلیل اثر تغییر پارامترها بر رفتار مغار نمکی

| ردیف | معیار                          | واحد                | توضیحات         |
|------|--------------------------------|---------------------|-----------------|
| ۱    | نوسان دمایی مغار               | $^{\circ}\text{C}$  |                 |
| ۲    | افت حجم نسبی مغار در سال       | $\text{yr}^{-1} \%$ | $\dot{V}/V$     |
| ۳    | ظرفیت ذخیره سازی کلی و عملیاتی | -                   | پارامتر اقتصادی |
| ۴    | تنش‌های بیشینه اصلی            | MPa                 | در اطراف مغار   |
| ۵    | تنش‌های موثر                   | MPa                 |                 |
| ۶    | اتساع سنگ نمک                  | معیار دوریس         |                 |
| ۷    | تنش‌های بیشینه اصلی            | MPa                 | در پاشنه چاه    |
| ۸    | تنش‌های موثر                   | MPa                 |                 |
| ۹    | اتساع سنگ نمک                  | معیار دوریس         |                 |

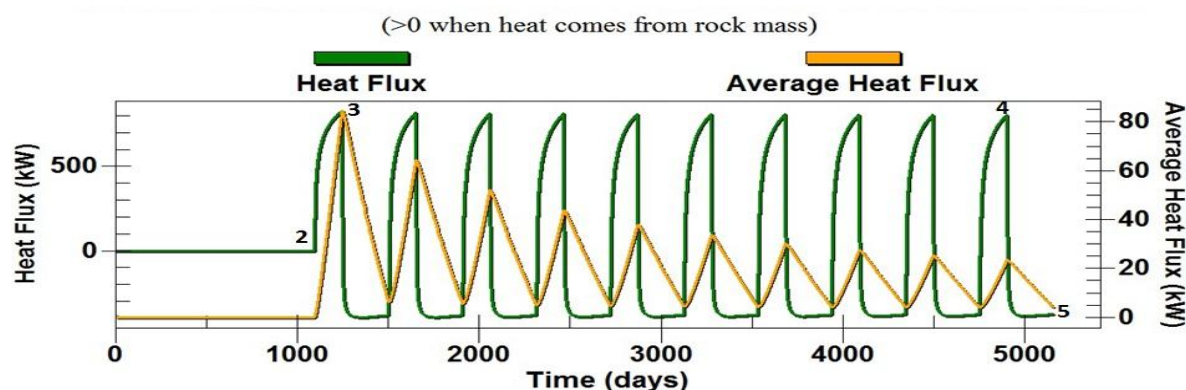
### ۵-۳-۱ دمای مغار

در اثر اعمال سیکل بهره‌برداری و تغییر متناوب دمای گاز، دیواره مغار مدل مرجع تحت نوسان‌های دمایی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۶). در شکل (۵-۶) دمای ژئوترمال مرکز مغار و دمای گاز تزریقی نیز نشان داده شده است.



شکل (۵-۶): نوسانات دمای دیواره مغار در اثر سیکل بهره‌برداری در مدل مرجع

زمان‌های کمینه و بیشینه دمای با زمان‌های کمینه و بیشینه فشار گاز در سیکل بهره‌برداری از مغار منطبق است. همچنان که در شکل (۵-۶) دیده می‌شود، دمای متوسط مغار با گذشت زمان به دمای ژئوترمال مرکز مغار نزدیک می‌شود در اثر مقدار نوسان  $12/6$  مگاپاسکالی فشار داخلی مغار، میزان نوسان دمای دیواره مغار حدوداً  $21$  درجه سانتیگراد است. آهنگ افت دما در هنگام تخلیه گاز سریعتر از افزایش دما به هنگام تزریق گاز است. شکل (۵-۷) نیز موید این مطلب است. در این شکل جریان گرما بین دیواره مغار و گاز نشان داده شده است (شارش گرما از دیواره به گاز مثبت و شارش گرما از گاز به دیواره منفی در نظر گرفته شده است). جریان گرما از دیواره به گاز در هنگام تخلیه، سرعت بیشتری نسبت به تزریق گاز و انتقال گرما به سمت دیواره مغار دارد. این امر موجب افزایش تنش‌های ترمودینامیکی بر دیواره مغار در هنگام تخلیه گاز می‌شود.

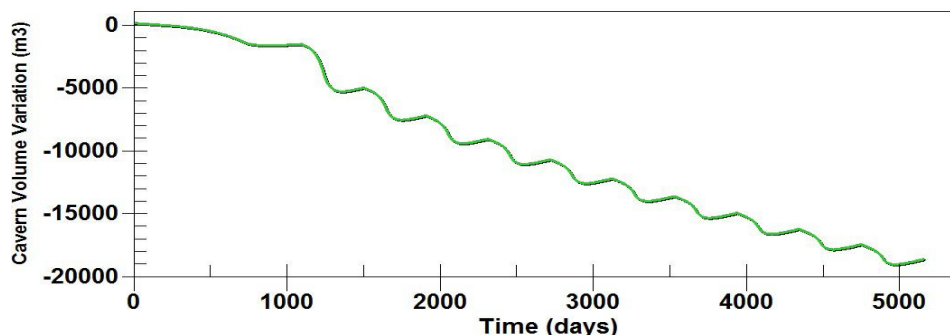


شکل (۵-۷): تبادل گرمایی میان گاز و دیواره مغار

### ۵-۳-۲ حجم مغار

دیواره مغار در اثر اختلاف بین فشار درونی و تنش‌های بیرونی همواره به سمت درون مغار حرکت کرده که در نتیجه باعث افت حجم مغار می‌شود. در شکل (۵-۹) روند افت حجم مغار مدل مرجع در طول زمان به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود حجم مغار پس از گذشت حدود ۵۱۵۵ روز به میزان حدود ۱۹۰۰۰ متر مکعب افت کرده و آهنگ افت حجم نسبی مغار  $0/17\%$  در سال

است. در بخش‌هایی از منحنی شکل (۵-۸) افزایش حجم کمی به صورت نسبی مشاهده می‌شود. این افزایش حجم درست پس از انتهای دوره تخلیه و شروع تزریق گاز به مغار رخ می‌دهد.



شکل (۵-۸): افت حجم مغار در اثر سیکل بهره‌برداری در مدل مرجع

### ۳-۳-۵ ظرفیت ذخیره‌سازی

حجم گاز طبیعی ذخیره‌سازی شده در مغارهای نمک از دو بخش تشکیل شده است؛ گاز عملیاتی و گاز پایه که مجموع آنها ظرفیت کلی ذخیره‌سازی را مشخص می‌کند. از جنبه اقتصادی، برای یک مغار با حجم ثابت، هرچه مقدار گاز عملیاتی بیشتر شود، مقرون به صرفه‌تر خواهد بود.

حجم گاز عملیاتی و پایه تابع فشارهای کمینه و بیشینه بهره‌برداری از مغار هستند. مقدار این دو پارامتر نیز به نوبه‌ی خود به خصوصیات زمین، نوع گاز، عمق، هندسه مغار و سایر شرایط مثل محدودیت تاسیسات (فشار کمپرسور) و غیره وابسته هستند. بنابراین محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مغارهای نمکی تا حدودی پیچیده به نظر می‌رسد.

در نرم‌افزار LOCAS امکان محاسبه این ظرفیت با توجه به شکل و هندسه مغار، سیکل فشار بهره‌برداری، افت حجم مغار و شرایط ترمودینامیک حاکم بر مغار وجود دارد. در جدول (۵-۷) پارامترهای ظرفیت ذخیره‌سازی گاز طبیعی برای مدل مرجع ارایه شده است.

با توجه به جدول (۵-۷) ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی مغار در طول ۱۰ سیکل ذخیره‌سازی اندکی کاهش یافته است. نسبت ظرفیت عملیاتی به ظرفیت کلی (W/T) ثابت باقی مانده است.

جدول (۵-۷): پارامترهای ظرفیت ذخیره‌سازی گاز طبیعی برای مدل مرجع

| پارامتر | TC <sub>1</sub> | TC <sub>2</sub> | WC <sub>1</sub> | WC <sub>2</sub> | WC <sub>1</sub> /TC <sub>1</sub> | WC <sub>2</sub> /TC <sub>2</sub> |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| مقدار   | ۱۳۰/۲           | ۱۲۹/۸           | ۱۰۱/۴           | ۱۰۱/۱           | ۷۷/۸۷                            | ۷۷/۸۷                            |

TC: ظرفیت کلی ذخیره‌سازی و WC: گاز عملیاتی هر دو (بر حسب میلیون متر مکعب در حالت استاندارد MNm<sup>3</sup>),  
WC/TC: نسبت گاز عملیاتی به کل گاز (درصد) زیرنویس ۱: روز اول تزریق گاز یعنی روز ۱۰۹۵ و زیرنویس ۲: روز ۵۱۵۵

### ۵-۳-۴ تنش‌ها

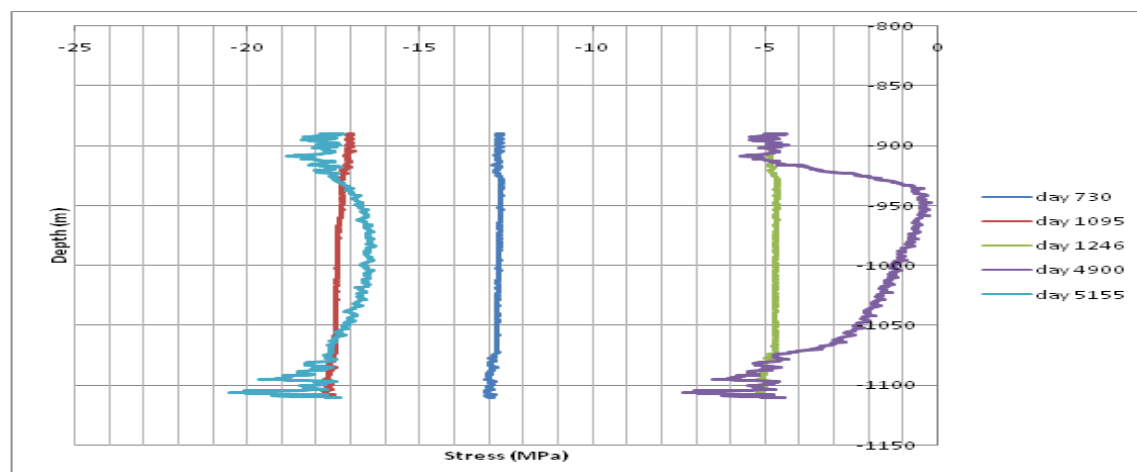
برای تحلیل پایداری مغار باید وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش‌های موثر بر روی دیواره مغار و در اطراف مغار مورد بررسی قرار داده شود. در ادامه به تحلیل مدل مرجع با توجه به این نوع تنش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۵-۳-۴-۱ تنش اصلی بیشینه

تنش‌های اطراف مغار نباید در حالت کششی قرار بگیرند. در مورد تنش بیشینه اصلی مقدار منفی تنش به معنی فشاری بودن و مقدار مثبت به منزله کششی بودن وضعیت تنش است. مقاومت کششی سنگ نمک بسیار کم است، بگونه‌ای که اغلب در مدل‌های ژئومکانیکی از مقدار آن چشم‌پوشی می‌کنند. در این تحقیق نیز از مقدار آن صرف نظر شده است. بر این اساس وجود ناحیه‌های کششی در سنگ نمک اطراف و دیواره مغار، باعث ایجاد احتمال ناپایداری می‌شود. بنابراین طراحی مغار باید به شکلی انجام شود که ناحیه کششی در اطراف مغار وجود نداشته و یا در صورت وجود، کمترین گستردگی را داشته باشد.

در شکل (۵-۹) توزیع تنش بیشینه اصلی بر روی دیواره مغار (از عمق ۸۹۰ تا ۱۱۱۰ متر) در زمان‌های درج شده در جدول (۵-۵) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، وضعیت تنش بیشینه اصلی بر روی دیواره مغار در روزهای ۷۳۰، ۱۰۹۵ و ۱۲۴۶ فشاری و در طول دیواره مغار نسبتاً یکنواخت است. ولی مقدار آنها با یکدیگر متفاوت است، بگونه‌ای که در روز ۱۲۴۶ تنش بیشینه اصلی، در نزدیکترین حالت به وضعیت کششی قرار گرفته‌اند. در روز ۴۹۰۰ (دهمین فشار کمینه) تنش بیشینه اصلی بخصوص در بخش یک‌سوم بالایی مغار به وضعیت کششی بسیار نزدیک می‌شود.

وضعیت تنش‌ها در روز ۵۱۵۵ (دهمین فشار بیشینه) با وضعیت آن در روز ۱۰۹۵ (انتهای آبرانی) تقریباً یکسان است با این تفاوت که بخش مرکزی مغار کمی به حالت کشش نزدیکتر است. دلیل یکسان بودن تقریبی نقاط ۱۰۹۵ و ۵۱۵۵ به مشابه بودن وضعیت فشار درون مغار (هر دو  $16/5 \text{ MPa}$ ) برمی‌گردد.

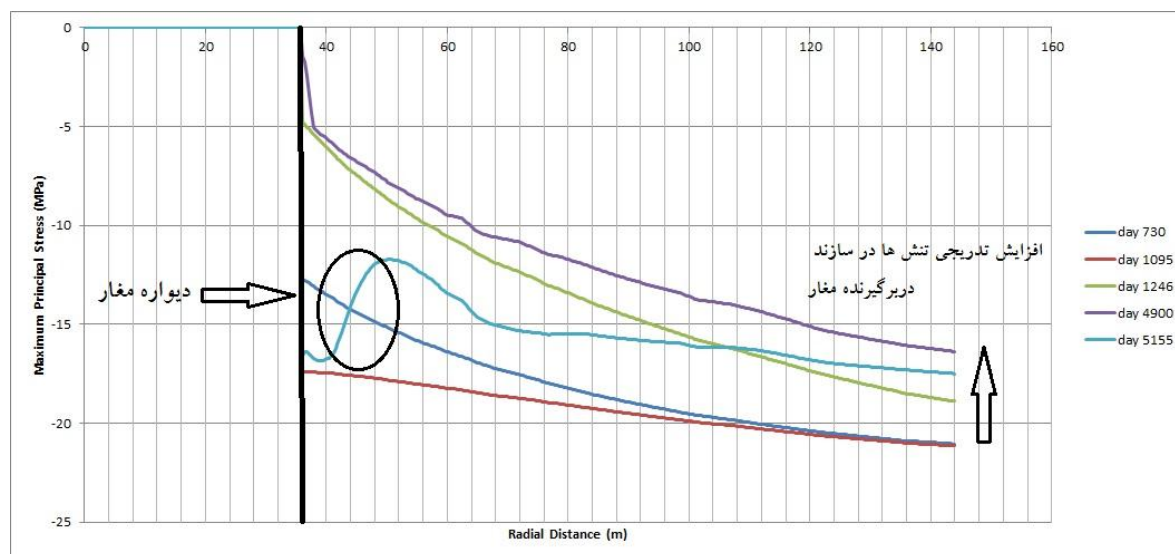


شکل (۵-۹): توزیع تنش‌های اصلی بیشینه در طول دیواره مغار برای زمان‌های مورد تحلیل

پس از بررسی وضعیت تنش اصلی بیشینه بر روی دیواره مغار، به مطالعه وضعیت تنش بیشینه اصلی در اطراف مغار (شعاعی و قائم) پرداخته می‌شود. در شکل (۵-۱۰) وضعیت تنش بیشینه اصلی در اطراف مغار در عمق ۱۰۰۰ متری (عمق مرکز مغار) نشان داده شده است. در فاصله‌های دور از دیواره‌های مغار، وضعیت تنش بیشینه اصلی به حالت ثابتی می‌رسد. با ذکر این نکته که پس از طی سیکل‌های متوالی، تنش بیشینه اصلی اطراف مغار رفته رفته از حالت فشاری به سمت کششی حرکت می‌کند. در فواصل نزدیک به دیواره مغار به خصوص در حالتی که فشار درونی مغار در حالت کمینه است (روزهای ۱۲۴۶ و ۴۹۰۰)، تنش بیشینه اصلی به حالت کششی نزدیک‌تر می‌شود. همانطور که در شکل (۵-۱۰) مشاهده می‌شود، ناحیه بسیار باریکی در اطراف دیواره مغار (در شعاع ۱ متر دیواره مغار) نزدیک به حالت کششی است.

در تمام طول عمر مغار فشار درونی مغار کمتر از فشار درون سازند دربرگیرنده است. بنابراین انتظار می‌رود در نزدیکی دیواره مغار، تنش درون سنگ‌های دربرگیرنده به حالت کششی نزدیکتر باشد و به تدریج با دور شدن از دیواره مغار، وضعیت تنش در سنگ به حالت تنش برجای زمین نزدیکتر شده و از لحاظ مقداری منفی‌تر شود. این مطلب در تمام منحنی‌های شکل (۵-۱۰) به جز منحنی مربوط به دهمین فشار بیشینه (روز ۵۱۵۵) صدق می‌کند. برای تحلیل چگونگی رفتار سنگ در روز ۵۱۵۵، منحنی مربوط به آن را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود. بخش اول در دیواره بلافاصله مغار قرار دارد. بخش دوم که در شکل هم به طور مشخص نشان داده شده در فاصله حدود ۵ تا ۲۰ متری دیواره مغار قرار دارد. بخش سوم نیز از فاصله ۲۰ متری به بعد را تشکیل می‌دهد. رفتار بخش دوم منحنی یعنی در شعاع حدود ۵ تا ۲۰ متری دیواره مغار بر خلاف روند مورد انتظار است. اما بخش بلافاصله دیواره مغار و بخش سوم روند مورد انتظار را نشان می‌دهند. این رفتار در این بخش از منحنی را می‌توان به عدم درک سنگ‌های واقع در این ناحیه از افزایش فشار درونی مغار دانست. بدین ترتیب که به دلیل بارگذاری دوره‌ای مغار، زمان کافی برای پاسخ سنگ‌های ناحیه دوم به افزایش فشار درونی مغار وجود ندارد.

در شکل (۵-۱۱) وضعیت تنش بیشینه اصلی بالای مغار در راستای قائم در طول دوره بهره‌برداری نشان داده شده است. ناحیه آشفستگی تنش‌ها در بالای مغار حدوداً از عمق ۸۲۰ متر تا ۸۹۰ متری گسترده شده است. ارتفاع این ناحیه تقریباً با قطر مغار برابر است. وضعیت تنش‌ها در بالای مغار نیز شبیه به وضعیت شعاعی است و رفته رفته در طول زمان، تنش بیشینه اصلی کاهش می‌یابد. همچنین وضعیت تنش بیشینه اصلی در فواصل نزدیک به دیواره مغار در روزهای ۱۲۴۶ و ۴۹۰۰ (یعنی روزهایی که مغار در فشار کمینه قرار دارد) به کمترین مقدار می‌رسد. وضعیت تنش اصلی بیشینه در روز ۵۱۵۵ نیز مثل شکل (۵-۱۰) بر خلاف انتظار است. این ناحیه در شکل (۵-۱۱) مشخص شده است.



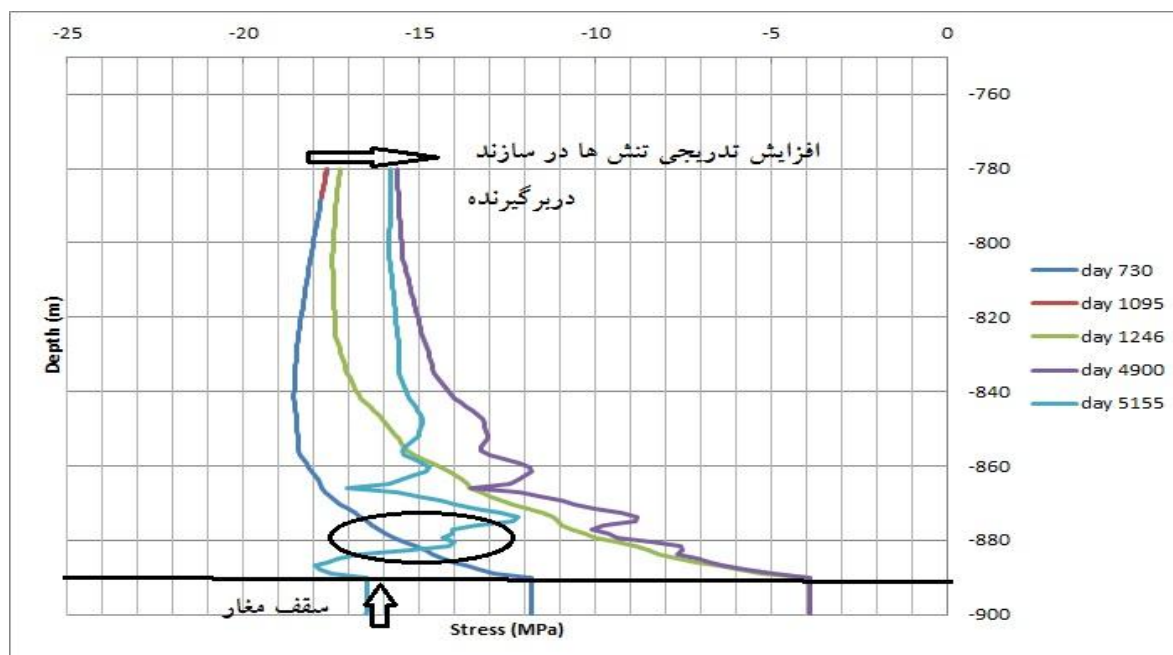
شکل (۵-۱۰): وضعیت تنش بیشینه اصلی در راستای شعاعی از مرکز مغار مرجع در عمق ۱۰۰۰ متر

### ۵-۳-۴-۲ تنش‌های موثر

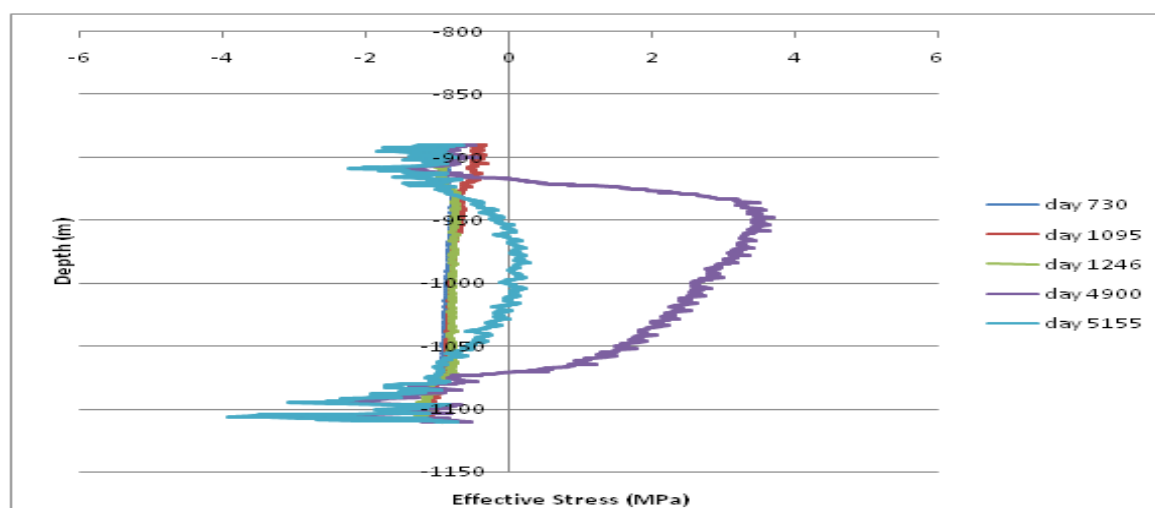
در فصل گذشته در بخش (۴-۳-۲) در مورد تنش موثر توضیح داده شده است. برای پایداری مغار تنش‌های موثر نباید در وضعیت کششی قرار بگیرند. این معیار سختگیرانه‌تر از معیار تنش بیشینه اصلی است

در شکل (۵-۱۲) وضعیت تنش‌های موثر بر روی دیواره مغار مدل مرجع نشان داده شده است. بر اساس این شکل، وضعیت تنش‌های موثر در روزهای ۷۳۰، ۱۰۹۵ و ۱۲۴۶ فشاری است. اما مقدار آن در روز ۴۹۰۰ در بخش یک‌سوم بالایی مغار به حدود ۴ MPa + رسیده و کششی است. پس از آن در روز ۵۱۵۵ نیز بخشی از مغار در حالت کششی قرار دارند. این موضوع نشان دهنده حساس بودن تنش‌های موثر به تعداد سیکل‌های بهره‌برداری است.





شکل (۵-۱۱): وضعیت تنش بیشینه اصلی در بالای مغار



شکل (۵-۱۲): توزیع تنش‌های موثر در دیواره مغار در زمان‌های مورد تحلیل

### ۵-۳-۴-۳-۵ اتساع

در این تحقیق وضعیت اتساع سنگ نمک بر اساس معیار دوریس بررسی می‌شود. همانطور که در

فصل چهارم گفته شد معیار دوریس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sqrt{J_2} < \sqrt{J_2}^{\text{dil}} = \frac{D_1 \left( \frac{|I_1|}{\text{sgn}(I_1) \sigma_0} \right)^m + \bar{T}_0}{\sqrt{3} \cos \psi - D_2 \sin \psi} \quad (۴-۵)$$

برای نرمال کردن معادله، مقدار  $\sigma_0 = 1 \text{ MPa}$  قرار داده شده است. در این تحقیق، مقدار مولفه‌های معیار اتساع دوریس از نتایج آزمایشگاهی دوریس اخذ شده که در جدول (۵-۸) ارایه شده است (DeVries, 2005). اگر معیار دوریس کوچکتر یا مساوی یک باشد ( $DV < 1$ )، آنگاه سنگ نمک در حالت اتساع قرار می‌گیرد.

جدول (۵-۸): مقدار مولفه‌های معیار اتساع دوریس (DeVries, 2005)

| پارامتر     | واحد | مقدار |
|-------------|------|-------|
| $\bar{T}_0$ | MPa  | ۱/۹۵  |
| $m$         | -    | ۰/۶۹۳ |
| $D_1$       | -    | ۰/۷۷۳ |
| $D_2$       | -    | ۰/۵۲۴ |

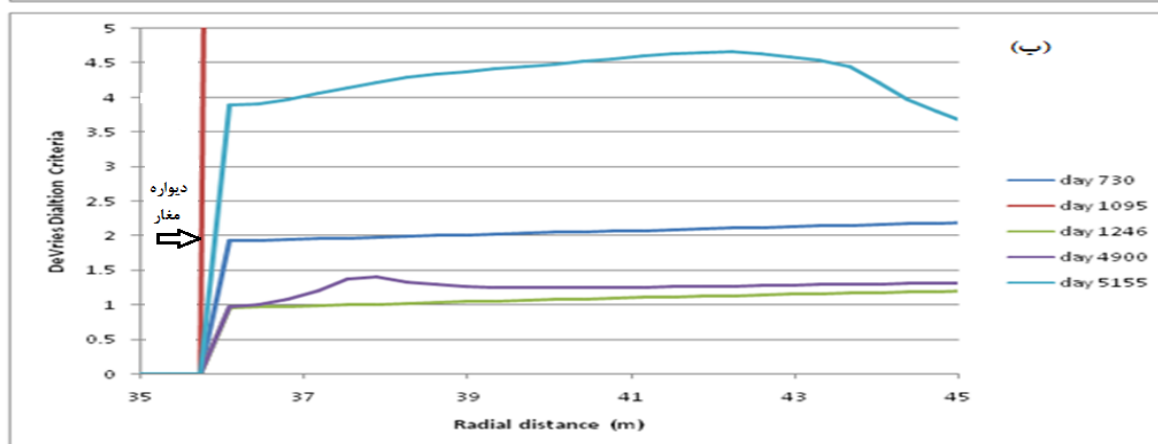
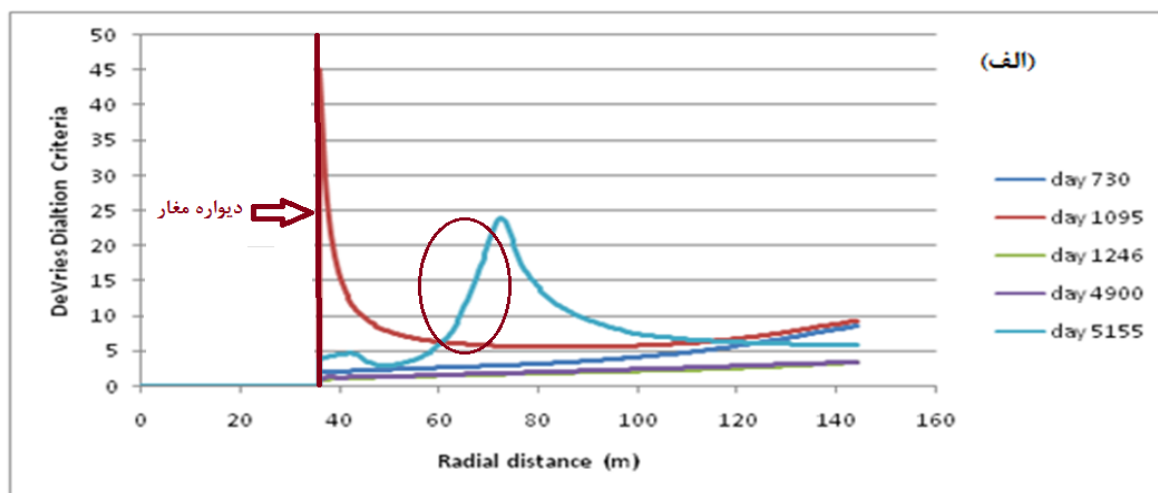
در شکل (۵-۱۳ الف و ب) وضعیت اتساع سنگ نمک در راستای شعاعی از مرکز مغار (عمق ۱۰۰۰ متر) در طول بهره‌برداری نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۵-۱۳ ب)، در روز ۱۲۴۶ (اولین فشار کمینه)، سنگ نمک تا فاصله زیادی از دیواره مغار در حالت نزدیک به اتساع قرار گرفته است. در همین شکل مشاهده می‌شود که سنگ نمک در فاصله بسیار کوچکی از دیواره (حدود نیم متر)، در همه حالات تحت اتساع قرار دارد. ولی گسترش ناحیه تحت اتساع، در زمان‌هایی که مغار در فشار کمینه قرار دارد، بسیار زیاد است.

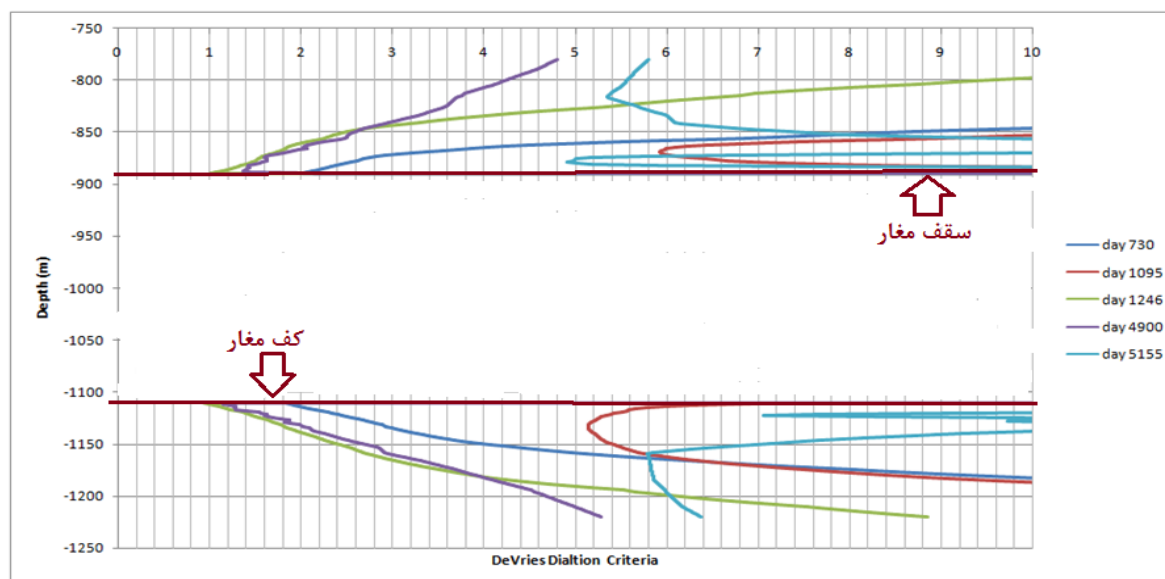
با بررسی وضعیت اتساع سنگ نمک در بالا و پایین مغار (شکل ۵-۱۴)، حالتی مشابه با وضعیت شعاعی اتساع (شکل ۵-۱۳) مشاهده می‌شود.

برای بررسی بهتر شرایط تنش در اطراف مغار، شش نقطه بر روی دیواره مغار در نظر گرفته شده و وضعیت تنش در طول زمان در این نقاط در صفحه نامتغیرهای تنش  $^1(-I_1/3, \sqrt{3}J_2)$  آورده شده است (شکل ۵-۱۵).

<sup>1</sup>Bumblebee flight plane



شکل (۵-۱۳): وضعیت اتساع (دورپس) در فاصله شعاعی از دیواره مغار در عمق ۱۰۰۰ متری؛ (الف) نمای دور، (ب) نمای نزدیک به دیواره مغار



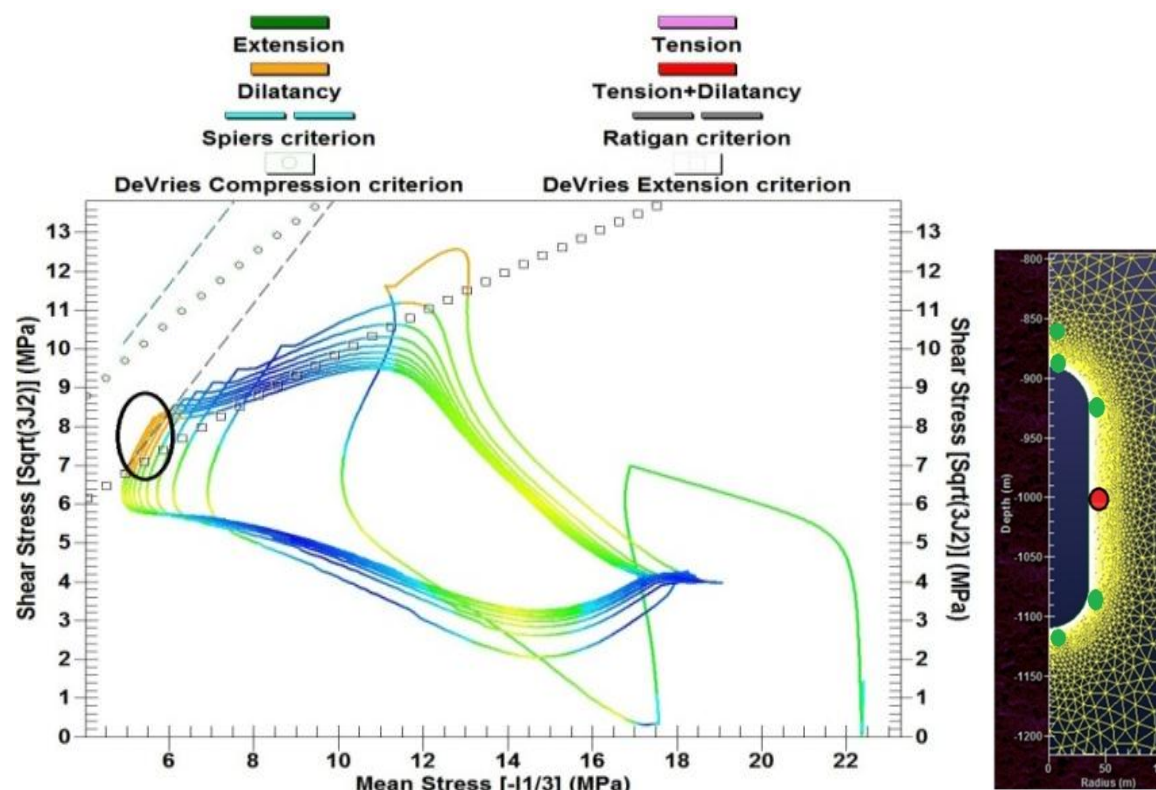
شکل (۵-۱۴): وضعیت اتساع (دورپس) در بالا و پایین محور قائم مغار در سازند نمک

در این صفحه مولفه  $(-I_1/3)$ ، تنش‌های متوسط (هیدروستاتیک) و مولفه  $(\sqrt{3}I_2)$  تنش‌های برشی در نقطه مذکور را در هر لحظه نشان می‌دهد. در شکل (۵-۱۵) وضعیت تنش در نقطه واقع بر دیواره مغار در عمق ۱۰۰۰ متری در صفحه تنش‌های نامتغیرهای تنش نشان داده شده است. در ناحیه نشان داده شده در شکل (۵-۱۵) سنگ نمک از نظر معیار اتساع کششی دوریس در حالت اتساع قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی این پنج نقطه نشان می‌دهد، سنگ‌های دیواره مغار در نزدیکی بخش مرکزی آن، بیشتر از سایر نقاط در معرض اتساع قرار دارند.

### ۵-۳-۵ پاشنه چاه

پاشنه چاه در انتهای لوله‌گذاری چاه قرار دارد و نزدیکترین بخش، به مغار محسوب می‌شود. به دلیل کارکرد پاشنه چاه برای جلوگیری از نشت مواد هیدروکربوری، حفظ پایداری آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین دلیل طراحی پاشنه چاه از مهمترین بخش‌های طراحی چاه محسوب می‌شود. در این تحقیق فاصله پاشنه چاه از سقف مغار برابر با ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. در مدل مرجع عمق قرارگیری پاشنه چاه برابر با ۸۶۰ متر است. در شکل‌های (۵-۱۶) تا (۵-۱۸) وضعیت تنش بیشینه اصلی، تنش‌های موثر و وضعیت اتساع در این نقطه در طول زمان نشان داده شده است.

در شکل (۵-۱۶) تنش بیشینه اصلی در پاشنه چاه در زمان‌هایی که فشار مغار در حالت کمینه قرار دارد، بیشترین مقدار خود رسیده و به حالت کششی نزدیکتر می‌شوند و پس از آن با زیاد شدن مجدد فشار درونی مغار، این تنش‌ها در اطراف پاشنه چاه به حالت فشاری برمی‌گردد. همچنین متوسط تنش بیشینه اصلیا گذشت سیکل‌های متوالی با آهنگی کند شونده رفته رفته افزایش می‌یابد. شکل (۵-۱۶) مطالب گفته شده در بخش (۵-۳-۴-۱) را در مورد افزایش مقدار تنش بیشینه اصلی در طول زمان در اطراف مغار تایید می‌نماید.

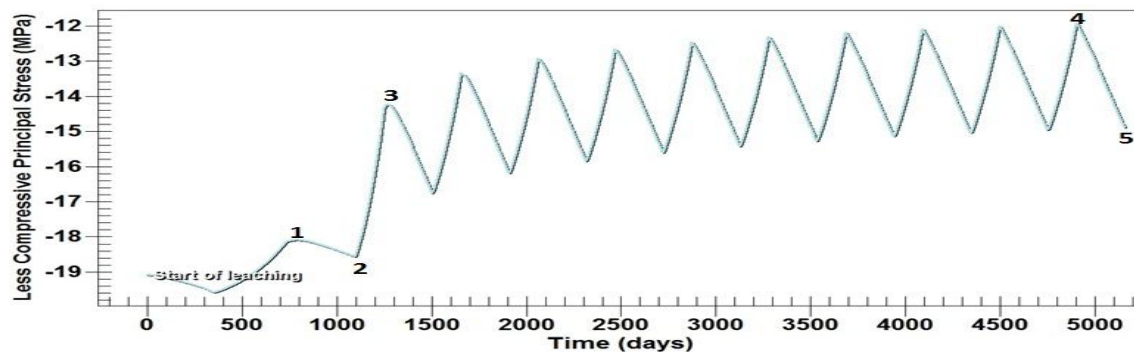


شکل (۵-۱۵): وضعیت تنش‌ها در نقطه‌ای در میانه مغار واقع بر لبه دیواره در صفحه تنش متوسط و تنش برشی

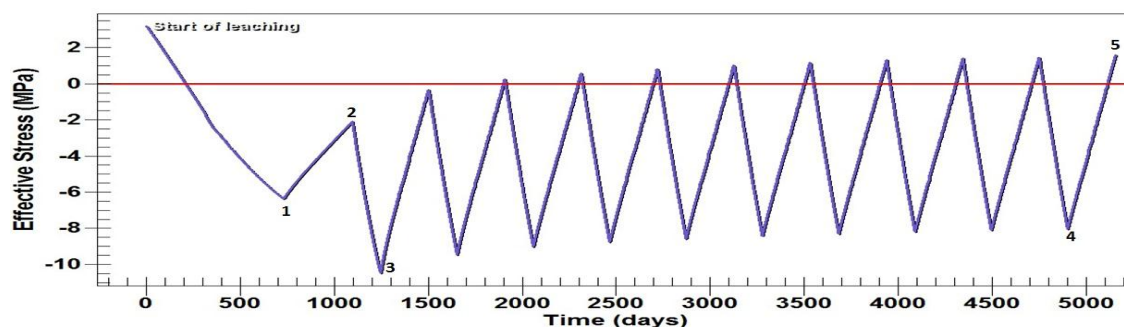
روند تغییرات تنش‌های موثر برخلاف تنش بیشینه اصلی است، به طوریکه در هنگام افزایش فشار به حالت کششی نزدیک‌تر می‌شوند. علت این پدیده به فشار منفذی سیال درون سازند نمکی برمی‌گردد. زیرا با افزایش فشار داخلی مغار، فشار منفذی بر دیواره‌های حفرات ریز افزایش یافته و باعث ایجاد تنش‌های کششی بر روی این دیواره‌ها می‌شود. همانطور که در شکل (۵-۱۷) دیده می‌شود، تنش‌های موثر در اطراف پاشنه چاه در سیکل دوم به حالت کشش می‌رسند. روند افزایشی تنش‌های موثر کندشونده است.

احتمال اتساع سنگ نمک در اطراف پاشنه چاه در زمان‌های فشار کمینه مغار، به بیشترین مقدار خود می‌رسد (اگر معیار اتساع دوریس از یک کمتر شود آنگاه سنگ تحت اتساع قرار می‌گیرد) (شکل ۵-۱۸). احتمال اتساع در سیکل اول زیاد است و رفته رفته با تکرار سیکل‌ها مقدار آن تا حدودی کاهش می‌یابد. دلیل آن رفتار ویسکوپلاستیک سنگ نمک است. سنگ نمک با گذشت زمان رفتار خزشی

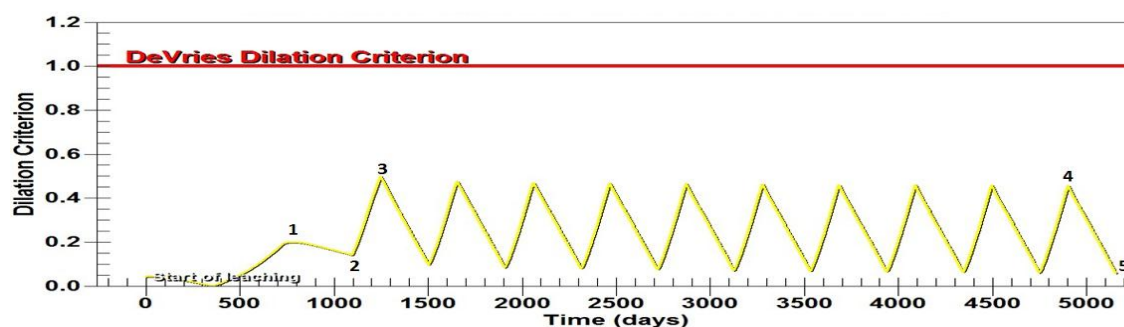
(جریانی) از خود نشان می‌دهد. جریان یافتن سنگ نمک باعث استهلاک تدریجی تنش‌های تفاضلی در درون سازند می‌شود. بدین ترتیب پتانسیل اتساع نیز به مرور زمان کاهش می‌یابد.



شکل (۵-۱۶): وضعیت تنش بیشینه اصلی نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول ساخت و بهره‌برداری از مغار در مدل مرجع



شکل (۵-۱۷): وضعیت تنش‌های موثر در نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول ساخت و بهره‌برداری از مغار در مدل مرجع



شکل (۵-۱۸): وضعیت اتساع در نقطه‌ای در نزدیکی پاشنه چاه در طول ساخت و بهره‌برداری از مغار در مدل مرجع بر اساس معیار دوریس

## ۵-۳-۶ جمع‌بندی

در این بخش به جمع‌بندی تحلیل‌های پایداری انجام شده بر روی مغار مدل مرجع پرداخته شده است. حداکثر مقدار آهنگ افت حجم نسبی مجاز در مراجع مختلف ۱ درصد در سال ذکر شده است (به بخش ۴-۳-۳ مراجعه شود). توجه شود که احتمال خزشی سنگ نمک انتخاب شده برای مدل بسیار بالا است. با این وجود آهنگ افت حجم‌نسبی مغار مدل مرجع که در سیکلی با فشار کمینه ۰/۲ و بیشینه ۰/۸۵ مورد بهره‌برداری قرار گرفته، بسیار کمتر از مقدار مجاز است.

از دیدگاه احتمال ایجاد تنش کششی، سنگ‌های دربرگیرنده مغار بسیار به حالت کششی نزدیک شدند اما وضعیت تنش در اطراف مغار کششی نشد. با این حال به دلیل نزدیک بودن شرایط تنش در سازند دربرگیرنده مغار به حالت کششی و مقاومت کششی بسیار کم سنگ نمک، به ویژه در زمان‌هایی که مغار در فشار کمینه قرار دارد، احتمال شکست کششی در سنگ وجود دارد. مستعدترین مکان‌ها برای ایجاد تنش کششی در بخش یک‌سوم بالای مغار و همچنین در بخش بلافصل دیواره مغار است.

از دیدگاه احتمال ایجاد تنش کششی موثر، به دلیل آنکه فشار منفذی سیال درون سازند دربرگیرنده باعث کاهش تنش فشاری می‌شود، معیار سختگیرانه‌تری است. به همین علت در این مغار در روز ۴۹۰۰ یعنی دهمین فشار کمینه، وضعیت تنش در بخش‌های زیادی از دیواره مغار کششی است و این امر باعث ایجاد احتمال ناپایداری در مغار می‌شود. بنابراین از دیدگاه تنش موثر، این مغار ناپایدار است.

از دیدگاه احتمال ایجاد اتساع، سنگ‌های دربرگیرنده در دیواره بلافصل مغار در طول کل بهره‌برداری در معرض اتساع قرار دارند. همچنین در زمان‌هایی که مغار در فشار کمینه قرار دارد، قسمت‌های زیادی از سنگ‌های دربرگیرنده مغار مدل مرجع به حالت اتساع بسیار نزدیک هستند. بنابراین در این زمان‌ها بیشترین احتمال نشت گاز از دیواره مغار به بیرون از سازند نمکی وجود دارد. سنگ‌های اطراف پاشنه چاه از لحاظ تنش اصلی بیشینه و اتساع در طول بهره‌برداری پایدار هستند. اما از لحاظ تنش

موثر، سنگ‌های این ناحیه از سیکل دوم ذخیره‌سازی به بعد تحت تنش کششی قرار می‌گیرند و بنابراین ناپایدارند.

## ۴-۵ تحلیل حساسیت

پارامترهای حاکم بر رفتار مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی شامل ۴ دسته کلی هندسه مغار، شرایط بهره‌برداری و نیز خصوصیات زمین و سنگ می‌باشد. هر کدام از این دسته‌ها شامل مجموعه‌ای از پارامترهاست که در جدول (۹-۵) نشان داده شده است. برای تحلیل اثر پارامترها، هر کدام از پارامترهای مدل مرجع که در جدول (۹-۵) آورده شده به شکل جداگانه تغییر داده شده و سپس اثر آن بر رفتار مغار مطالعه شده است (سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود). معیارهای در نظر گرفته شده برای تحلیل پایداری و رفتار مغار نمکی بر اساس معیارهای درج شده در جدول (۶-۵) است. در ادامه در بخش تحلیل حساسیت، به بررسی اثر پارامترهای هندسی، عملیاتی و زمین‌شناسی بر پایداری و رفتار مغار پرداخته خواهد شد.

## ۱-۴-۵ پارامترهای هندسی

پارامترهای هندسی مغار شامل عمق مغار، شکل، حجم و فاصله مغارها می‌شود. پارامترهایی مثل ارتفاع و قطر مغار به صورت مستتر در پارامترهای هندسی وجود دارند. در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر پایداری مغار پرداخته می‌شود.

## ۱-۴-۵-۱ عمق مغار

برای بررسی اثر عمق مغار بر پایداری و رفتار مغار، سه مغار در عمق ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر در نظر گرفته شدند. سایر پارامترها ثابت نگه داشته شدند (شماره تحلیل-۱ جدول ۹-۵).

با افزایش عمق، متوسط دمای مغار افزایش یافته و در طی سیکل‌های متوالی به دمای ژئوترمال مرکز مغار نزدیکتر می‌گردد. همچنین همانگونه که در شکل (۱۹-۵) مشاهده می‌شود، دامنه نوسان دمایی



برای مغاری در عمق ۵۰۰ متری حدود ۱۰/۵ درجه سانتیگراد و در عمق ۱۵۰۰ متری حدود ۲۸ درجه

سانتیگراد است. شیب منحنی که نشان دهنده سرعت تغییرات دما است، با افزایش عمق زیاد می‌شود.

ظرفیت ذخیره‌سازی گاز در مغار کاملاً تابع عمق مغار است، بگونه‌ای که با افزایش عمق از ۵۰۰ به

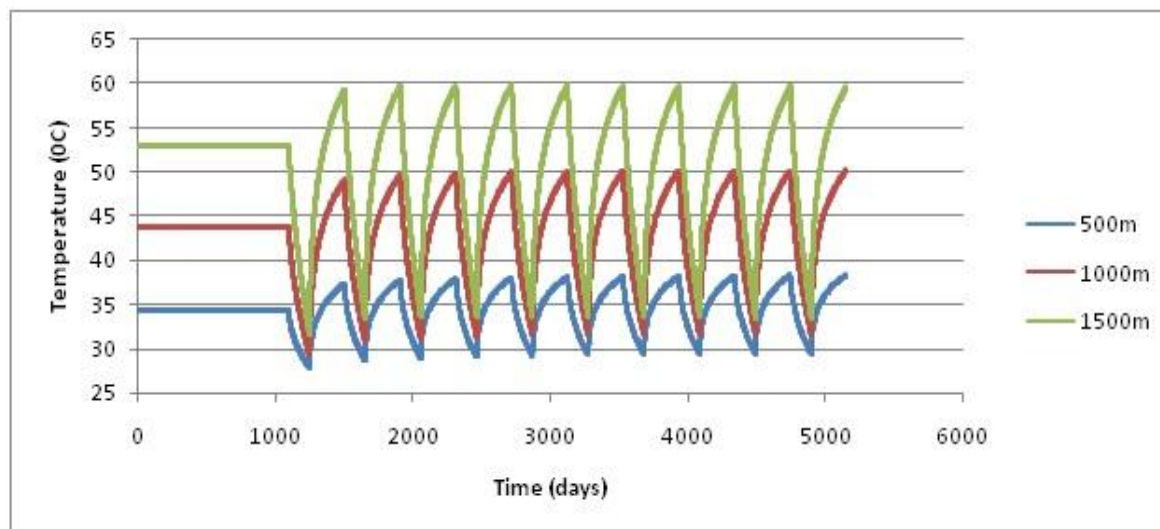
۱۵۰۰ متر، ظرفیت کلی ذخیره‌سازی حدود ۲/۸ برابر و عملیاتی ۲/۸۵ برابر اضافه شده است (شکل ۵-۲۰).

همچنین مقدار گاز پایه از حدود  $13/2 \text{ MNm}^3$  در عمق ۵۰۰ متری به بیش از ۳ برابر یعنی  $39 \text{ MNm}^3$

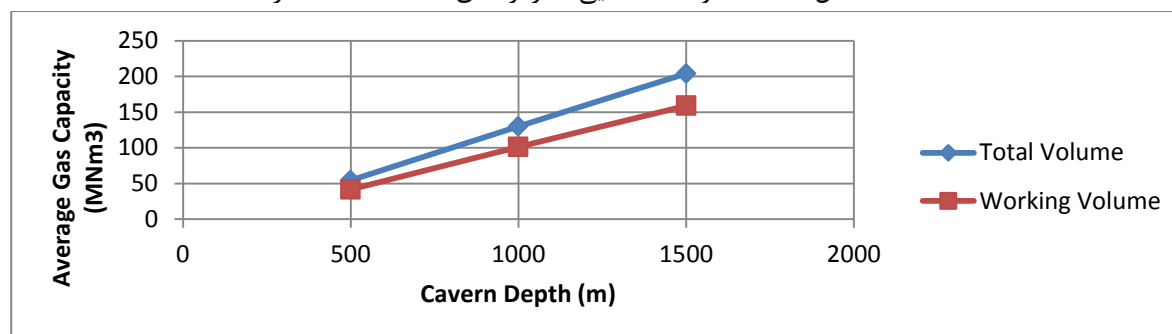
در عمق ۱۵۰۰ متری، افزایش یافته است.

جدول (۵-۹): پارامترهای مورد نظر جهت انجام تحلیل و گستره هر کدام از آنها

| نوع تحلیل            | نوع | پارامتر             | نماد       | واحد                       | شماره تحلیل | دامنه تغییر |      |      |         |
|----------------------|-----|---------------------|------------|----------------------------|-------------|-------------|------|------|---------|
|                      |     |                     |            |                            |             | مرجع        |      |      |         |
| هندسی                |     | عمق مرکز مغار       | h          | m                          | ۱           |             | ۵۰۰  | ۱۰۰۰ | ۱۵۰۰    |
|                      |     | شکل                 | H/D        | -                          | ۲           |             | ۱    | ۳    | ۵       |
|                      |     | حجم                 | V          | $10^5 \text{ m}^3$         | ۳           |             | ۴    | ۸    |         |
|                      |     | فاصله مغارها        | P          | m                          | ۴           |             | ۳۰۰  | ۱۰۰۰ | نامحدود |
| تحلیل حساسیت عملیاتی |     | فشار کمینه          | $P_{\min}$ | % $P_{OB}$ at $h_{c,shoe}$ | ۵           |             |      | ۰/۲  | ۰/۳     |
|                      |     | فشار بیشینه         | $P_{\max}$ | % $P_{OB}$ at $h_{c,shoe}$ | ۶           |             | ۰/۷۵ | ۰/۸  | ۰/۸۵    |
|                      |     | تعداد سیکل‌ها       | n          | -                          | ۷           |             |      | ۱۰   | ۲۰      |
|                      |     | زمان هر سیکل        | t          | روز                        | ۸           |             | ۳۰   | ۱۸۰  | ۳۶۵     |
|                      |     | دمای گاز تزریقی     | T          | $^{\circ}\text{C}$         | ۹           |             |      | ۲۱   | ۳۷      |
| زمین‌شناسی           |     | عمق گنبد            | $h_{Dome}$ | M                          | ۱۰          |             |      | ۲۰۰  | ۴۰۰     |
|                      |     | مدول یانگ           | E          | GPa                        | ۱۱          |             | ۱۰   | ۲۰   | ۳۰      |
| الاستیک              |     | نسبت پواسون         | v          | -                          | ۱۲          |             |      | ۰/۲۵ | ۰/۳۰    |
|                      |     |                     |            |                            |             |             |      |      | ۰/۳۵    |
| تحلیل پارامتری خزشی  |     | نسبت انرژی فعالسازی | Q/R        | K                          | ۱۳          |             | ۴۰۰۰ | ۵۰۳۲ | ۸۰۰۰    |
|                      |     | توان خزش            | n          | -                          | ۱۴          |             | ۳    | ۴    | ۵       |
|                      |     | ضریب خزش            | A          | $/\text{MPa}^n\text{-yr}$  | ۱۵          |             |      | ۰/۷۴ | ۱۰      |



شکل (۵-۱۹): نوسانات دمایی مغار از عمق ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر



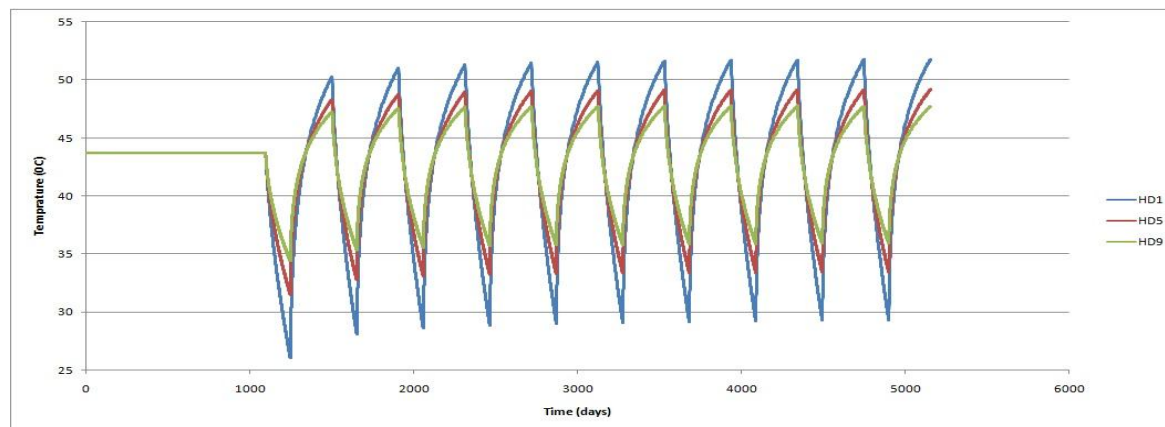
شکل (۵-۲۰): ظرفیت ذخیره‌سازی مغار از عمق ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر

#### ۵-۴-۱-۲ شکل

برای بررسی اثر شکل مغار بر پایداری آن، نسبت‌های مختلف (ارتفاع به قطر) مغار از  $(H:D=1)$  تا  $(H:D=9)$  در نظر گرفته شدند (شماره تحلیل-۲ جدول ۵-۹).

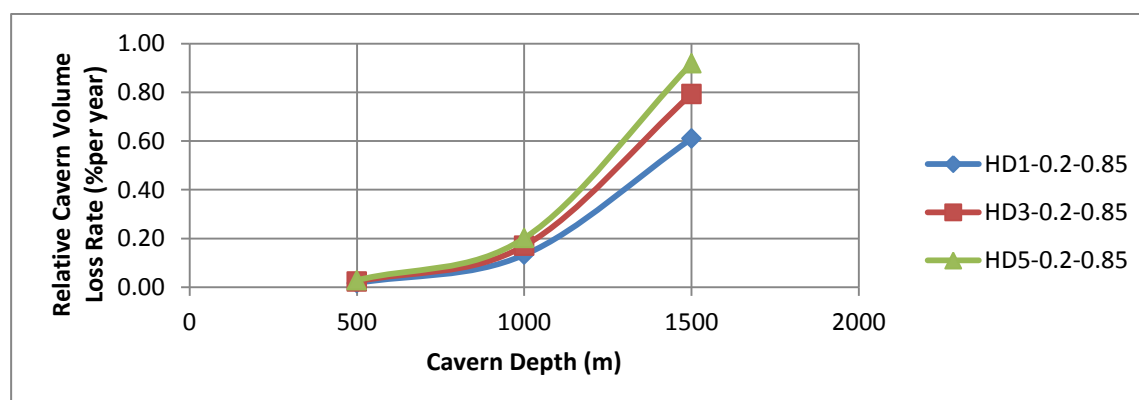
با توجه به شکل (۵-۲۱) در فشار بهره‌برداری یکسان  $(0.2 \text{ تا } 0.85 \text{ فشار روباره در پاشنه چاه})$ ، دامنه نوسانات دمایی برای مغار کروی شکل  $(H:D=1)$  بیشتر از مغارهای سیلندری است. دلیل این امر آن است که به دلیل ارتفاع کمتر مغار کروی نسبت به سیلندری، اختلاف مقدار فشار بیشینه و کمینه برای

مغار کروی بیشتر است. همچنین دمای متوسط مغار ثابت در همه‌ی شکل‌ها ثابت است. علت این پدیده به یکسان بودن عمق قرارگیری مغار در همه شکل‌ها برمی‌گردد.



شکل (۵-۲۱): نوسانات دمایی مغار برای  $H:D=1$ ،  $H:D=5$  و  $H:D=9$  با فشار بهره‌برداری  $(0.2 - 0.85)$  / فشار روباره در پاشنه چاه

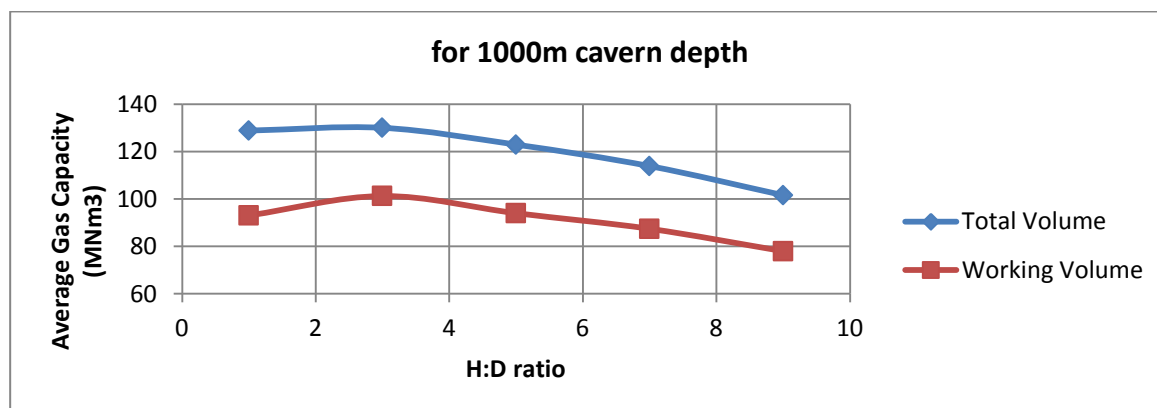
در شکل (۵-۲۲) آهنگ افت حجم نسبی سالانه مغار در فشار بهره‌برداری یکسان  $(0.2)$  تا  $(0.85)$  / فشار روباره در پاشنه چاه، برای سه شکل با نسبت ارتفاع به قطر  $(1, 3, 5)$  در عمق  $500$ ،  $1000$  و  $1500$  متر نشان داده شده است. بطور کلی مغارهای کروی افت حجم کمتری را نسبت به سایر شکل‌ها از خود نشان می‌دهند. با افزایش عمق، آهنگ افت حجم مغار به صورت نمایی افزایش می‌یابد. همچنین اختلاف آهنگ افت حجم نسبی مغارهای سیلندری و کروی در اعماق زیاد، بیشتر از اعماق کم است.



شکل (۵-۲۲): افت حجم نسبی مغار برای سه شکل با نسبت ارتفاع به قطر  $(1, 3, 5)$  در عمق  $500$ ،  $1000$  و  $1500$  متر

طبق شکل (۵-۲۳) برای مغارهای با حجم و عمق متوسط‌تر، ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی مغارهای کروی بیشتر از سایر شکل‌ها است. دلیل این امر آن است که مغار کروی ارتفاعی کمتر از سایر شکل‌ها دارد و به همین دلیل پاشنه چاه برای مغارهای کروی نسبت به سایر شکل‌ها در عمق بیشتری قرار گرفته است. همین امر سبب می‌شود تا بتوان گاز را با فشار بیشتری در مغار ذخیره کرد.

با بررسی وضعیت تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه (شکل ۵-۲۴)، مشاهده می‌شود که احتمال ایجاد تنش‌های کششی در اطراف مغار کروی بیشتر از مغارهای سیلندری است. این موضوع در همه‌ی عمق‌ها صدق می‌کند. همچنین احتمال ایجاد ناحیه کشش در مغارهای کم عمق بیشتر است؛ و به تدریج با زیاد شدن عمق و افزایش فشار روباره از مقدار این احتمال کاسته می‌شود. در مورد شکل (۵-۲۴) وضعیت تنش بیشینه اصلی در همه حالات فشاری است (یعنی  $\sigma_{max} < 0$ ).

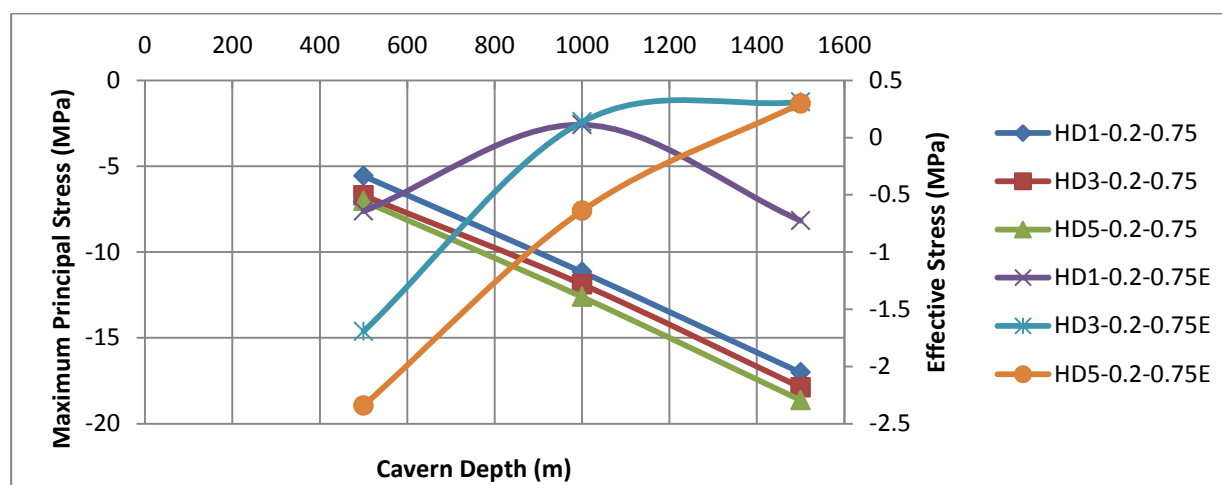


شکل (۵-۲۳): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای شکل‌های مختلف مغار نمک (۱ تا ۹ H:D)

با توجه به شکل (۵-۲۴)، وضعیت تنش‌های موثر برای مغارهای کم عمق، مشابه تنش بیشینه اصلیاست؛ بدین معنی که مغارهای کروی شکل احتمال بیشتری برای ایجاد تنش‌های کششی موثر دارند. ولی در مغارهای عمیق، احتمال ایجاد ناحیه کشش موثر برای مغارهای سیلندری بیشتر از کروی است. در شکل (۵-۲۴) تنش‌های موثر مغارهای سیلندری شکل واقع در عمق ۱۵۰۰ متر، کششی است (یعنی

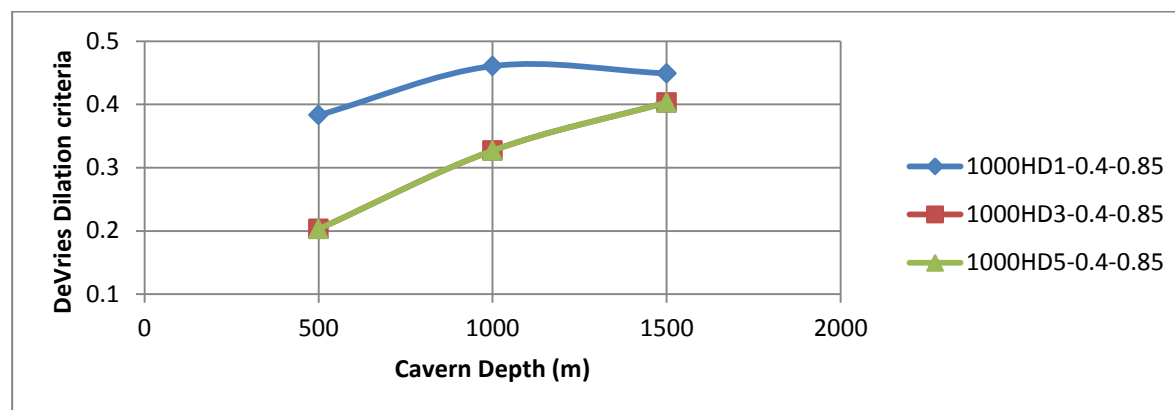
$$(\sigma_{eff} > 0)$$

کاهش تنش‌های بیشینه در اثر افزایش عمق و فشار روباره کاملاً مطابق انتظار است. در مورد تنش‌های موثر به نظر می‌رسد عمق و شکل مغار اقر معکوسی بر وضعیت تنش‌های موثر داشته باشند. بدین ترتیب که با افزایش عمق تنش‌های موثر افزایش یافته و با افزایش نسبت ارتفاع به قطر (H:D) تنش‌های موثر کاهش یابند. وضعیت اتساعی سنگ نمک در اطراف مغارهای کروی شکل بحرانی‌تر از مغارهای سیلندری است.



شکل (۵-۲۴): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای شکل‌های مختلف مغار (۱ تا ۵ H:D)، اعداد دوم و سوم به ترتیب معرف فشار کمینه و بیشینه در ناحیه پاشنه چاه و E معرف منحنی مربوط به تنش موثر است.

در شکل (۵-۲۵) وضعیت اتساع ناحیه پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس برای شکل‌های مختلف مغار در اعماق مختلف، ارایه شده است. وضعیت مغارهای کروی از نظر اتساع بحرانی‌تر از سایر شکل‌ها است ولی در اعماق زیاد، اختلاف احتمال اتساع مغارهای کروی با سایر شکل‌ها کم می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت با افزایش عمق احتمال اتساع افزایش می‌یابد.



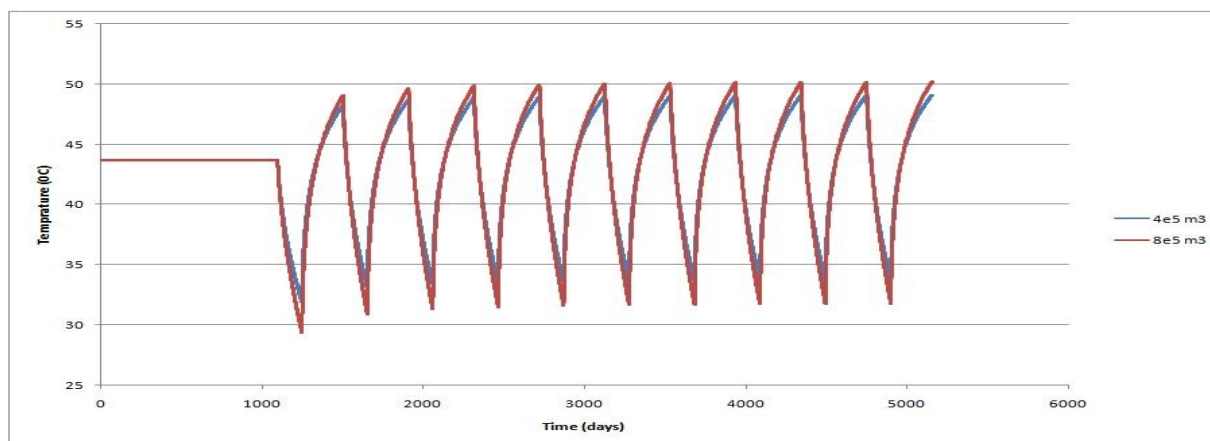
شکل (۵-۲۵): وضعیت اتساع پاشنه چاه برای شکل‌های مختلف مغار و در اعماق مختلف بر اساس معیار دوریس

### ۵-۴-۱-۳ حجم مغار

برای بررسی اثر حجم مغار بر وضعیت پایداری و رفتار آن، دو مغار با حجم ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار مترمکعب در نظر گرفته شدند (شماره تحلیل-۳ جدول ۵-۹).

با توجه به شکل (۵-۲۶) از نظر دامنه نوسان دما و مقدار کمینه و بیشینه آن، تفاوت چندانی بین

مغارهای با حجم مختلف دیده نمی‌شود.

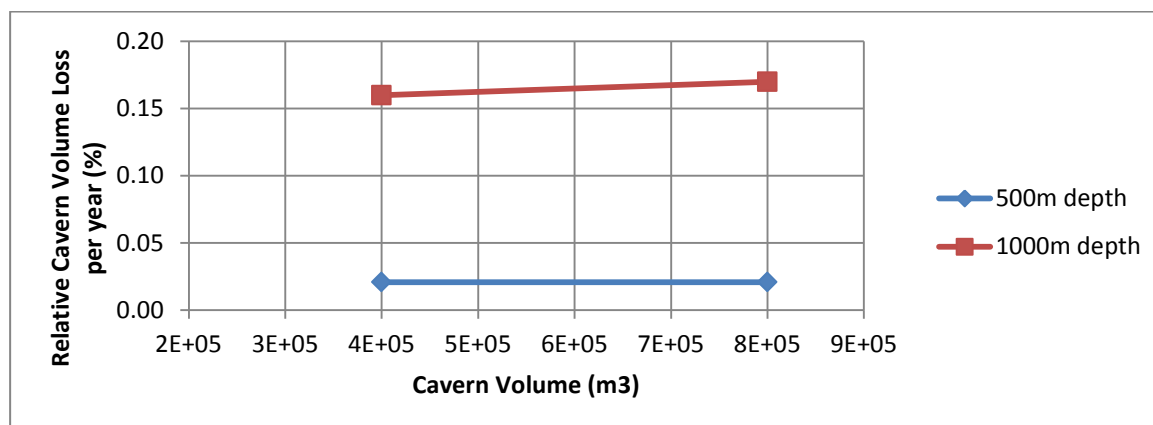


شکل (۵-۲۶): نوسان دمایی مغار برای دو حجم ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعب در عمق ۱۰۰۰ متری و فشار

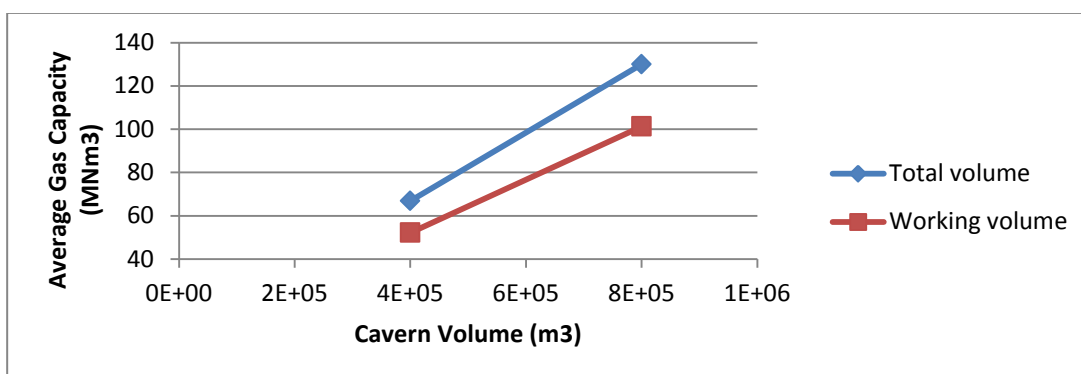
بهره‌برداری (۲/۰ - ۸۵/۰ فشار روباره در پاشنه چاه)

همچنین از نظر آهنگ افت حجم نسبی مغار، در عمق ۵۰۰ متری، تغییر چشمگیری در آن دیده

نمی‌شود. ولی در عمق ۱۰۰۰ متری، آهنگ افت حجم نسبی کمی افزایش می‌یابد (شکل ۵-۲۷).



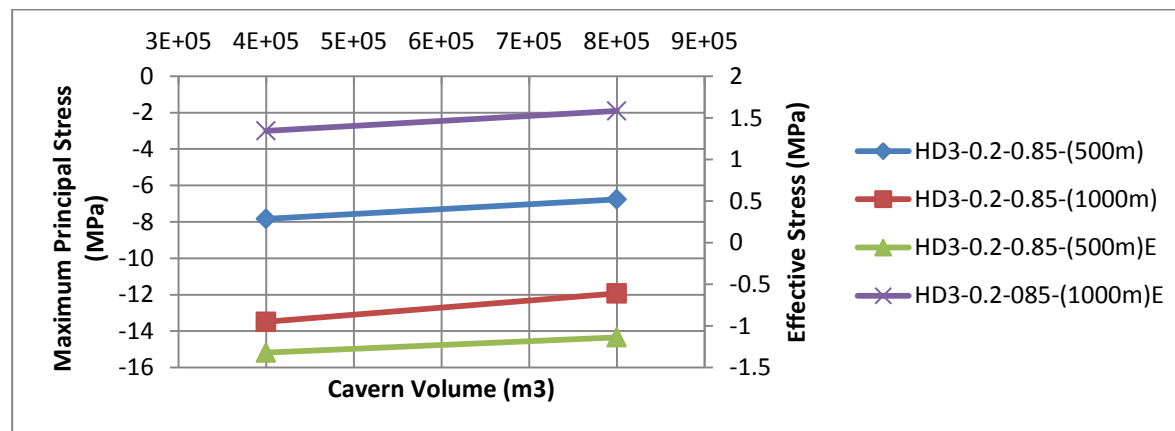
شکل (۵-۲۷): آهنگ افت حجم نسبی مغارهای ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعبی در اعماق ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر طبیعی است که با افزایش حجم مغار، ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی آن نیز افزایش یابد. در شکل (۵-۲۸) رابطه بین ظرفیت ذخیره‌سازی و حجم مغار دیده می‌شود. دلیل آن فشار کم روباره در اعماق کم است. بنابراین تغییر حجم مغار در اعماق کم تاثیر چندان زیادی بر افت حجم آن ندارد. اما در اعماق بیشتر به دلیل زیادتیر شدن فشاره روباره و دما و حساسیت خزشی سنگ نمک نسبت به این دو عامل، مغارهای بزرگتر آهنگ افت حجم بیشتری نسبت به مغارهای کوچکتر نشان می‌دهند.



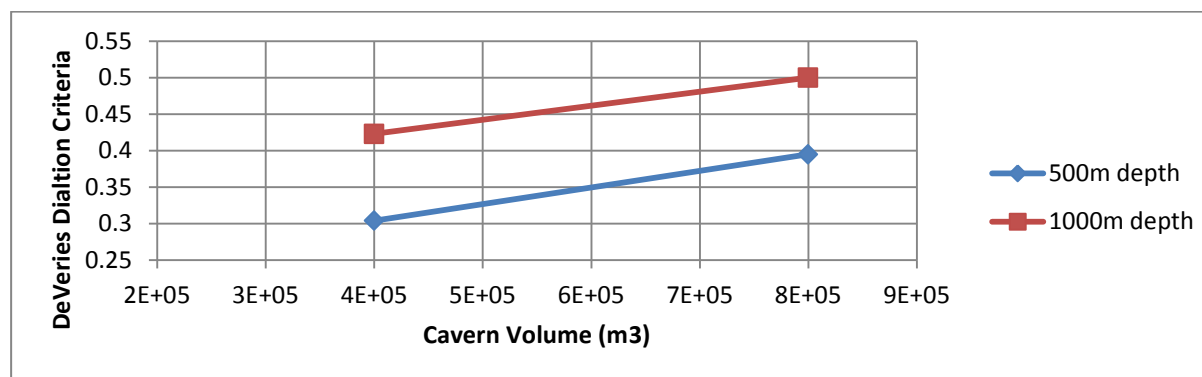
شکل (۵-۲۸): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای مغارهای ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعبی در عمق ۱۰۰۰ متر

همانگونه که در شکل (۵-۲۹) مشاهده می‌شود، تنش بیشینه اصلوی تنش‌های موثر با افزایش حجم مغار، کمی افزایش می‌یابند. احتمال اتساع نیز با افزایش حجم مغار احتمال ایجاد اتساع در پاشنه چاه افزایش می‌یابد (شکل ۵-۳۰).

با توجه به آنکه با افزایش حجم مغار ناحیه بزرگتری در اطراف آن تحت تاثیر قرار می‌گیرد، بدین ترتیب پاشنه چاه که در فاصله ۳۰ متری سقف مغار قرار دارد، بیشتر در معرض تنش‌های القایی ناشی از ایجاد مغار قرار می‌گیرد. این تاثیرات هم در قالب تنش‌های اصلی بیشینه و موثر و هم در قالب اتساع بیشتر سنگ‌های ناحیه پاشنه چاه دیده می‌شود.



شکل (۵-۲۹): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای مغارهای با حجم‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار مترمکعب در عمق‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر، E: تنش موثر



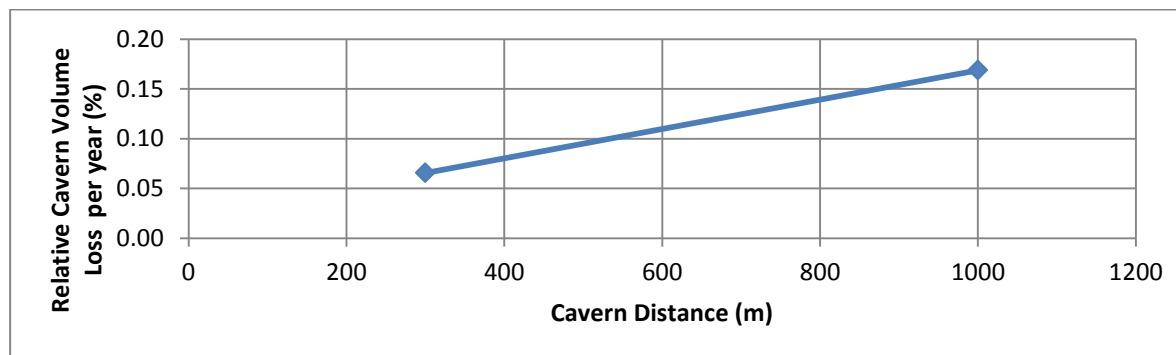
شکل (۵-۳۰): وضعیت اتساع پاشنه چاه برای مغارهای با حجم ۴۰۰ و ۸۰۰ مترمکعب در عمق‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری بر اساس معیار دوریس

#### ۵-۴-۱-۴ فاصله مغارها

برای بررسی تاثیر فاصله‌داری مغار بر پایداری و رفتار آنها، دو فاصله ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متری برای تحلیل نتایج انتخاب شد (شماره تحلیل-۴ جدول ۵-۹).

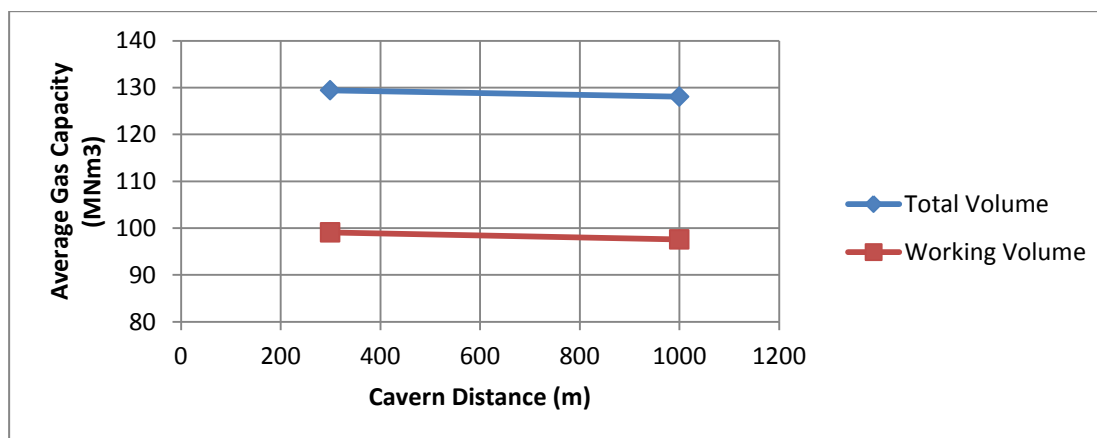


با افزایش فاصله‌داری مغارها از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ متر، آهنگ افت نسبی حجم مغار از حدود ۰/۰۶٪ در سال به ۰/۱۷٪ افزایش یافت. علت این افزایش افت در فاصله‌داری ۱۰۰۰ متر، احتمالاً به آزادتر بودن نسبی دیواره مغار جهت جابجایی شعاعی برمی‌گردد (شکل ۵-۳۱).



شکل (۵-۳۱): آهنگ افت حجم نسبی مغار برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر

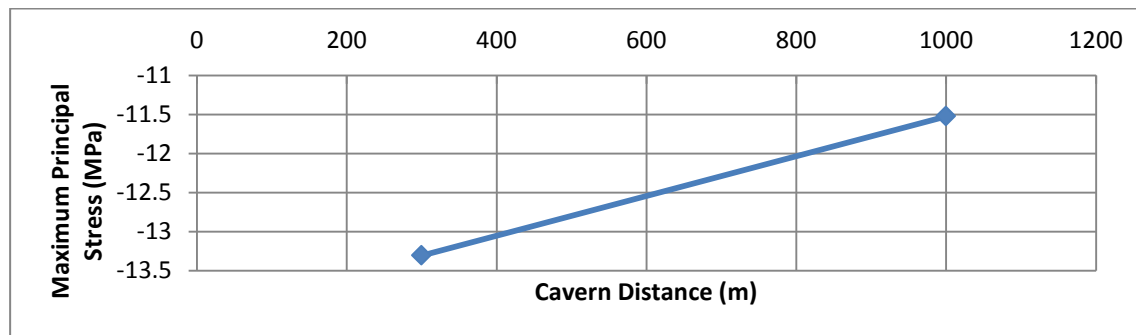
ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی با افزایش فاصله‌داری مغارها کمی افت می‌کند. در شکل (۵-۳۲) این موضوع نشان داده شده است. علت این امر به کاهش حجم مغار برمی‌گردد.



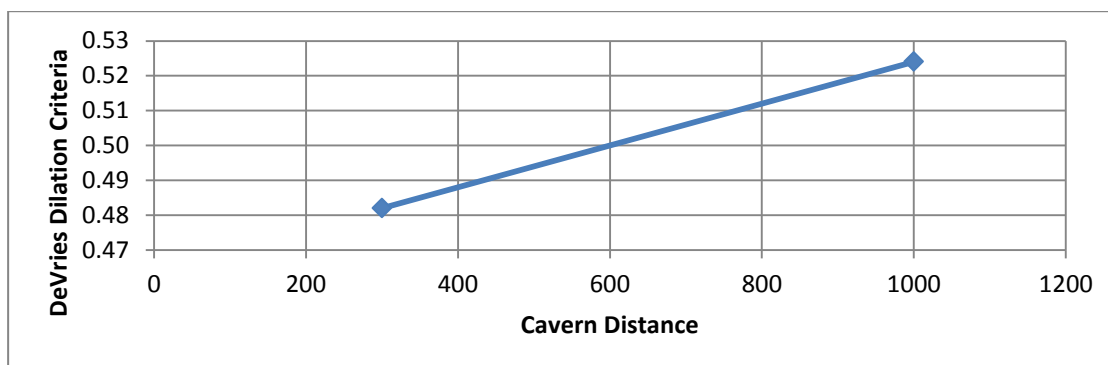
شکل (۵-۳۲): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر

وضعیت پاشنه چاه از لحاظ تنش بیشینه اصلی و اتساع برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر به ترتیب در شکل‌های (۵-۳۳) و (۵-۳۴) ارائه شده است. افزایش فاصله مغارها باعث افزایش نسبتاً

زیاد تنش‌های بیشینه اصلی (از  $13/3$  MPa به  $11/5$ ) و همچنین افزایش احتمال اتساع در نواحی اطراف پاشنه چاه شده است.



شکل (۵-۳۳): وضعیت تنش بیشینه اصلی در پاشنه چاه برای مغارهای با فاصله داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر



شکل (۵-۳۴): وضعیت اتساع در پاشنه چاه برای مغارهای با فاصله داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰ متر بر اساس معیار دوریس

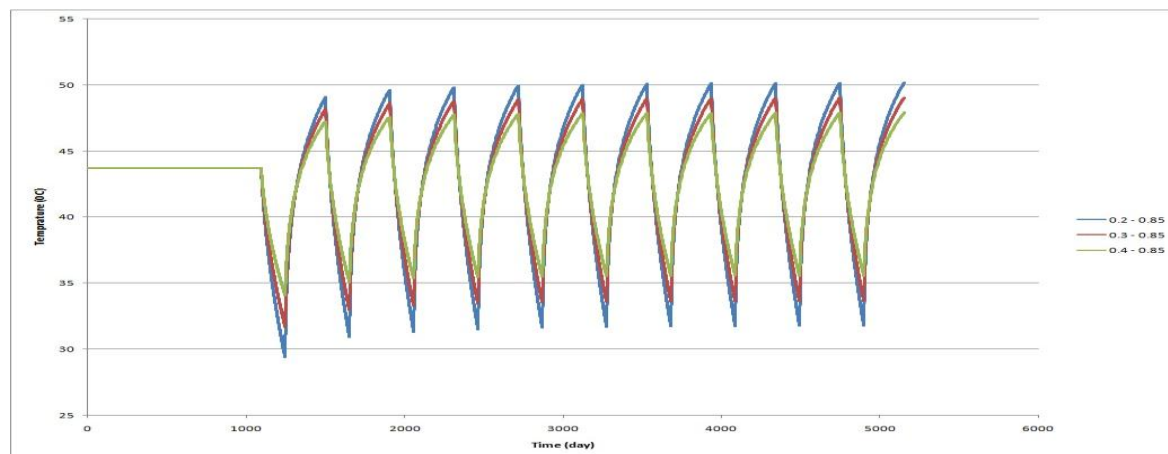
#### ۵-۴-۵ فشار کمینه

برای بررسی تاثیر فشار کمینه بر پایداری و رفتار مغار، سه فشار کمینه ( $0/2$ ،  $0/3$  و  $0/4$ ) انتخاب

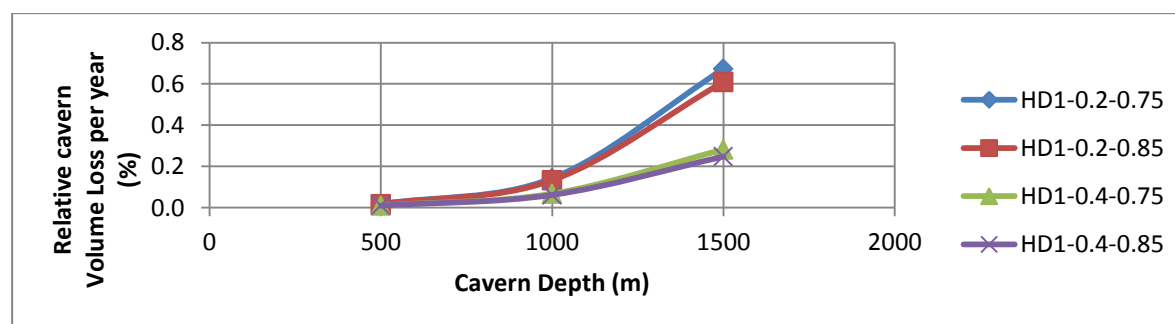
شده است (شماره تحلیل-۵ جدول ۵-۹).

در شکل (۵-۳۵) اثر تغییر فشارهای کمینه بر نوسان دمایی مغار مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش فشار کمینه منجر به کاهش دامنه نوسان دما شده است بگونه‌ای که این دامنه برای فشار کمینه  $0/2$  حدود ۲۶ و برای فشار کمینه  $0/4$  حدود ۱۴ درجه سانتیگراد است. علت کاهش نوسان دما به کاهش نوسان فشار درون مغار برمی‌گردد.

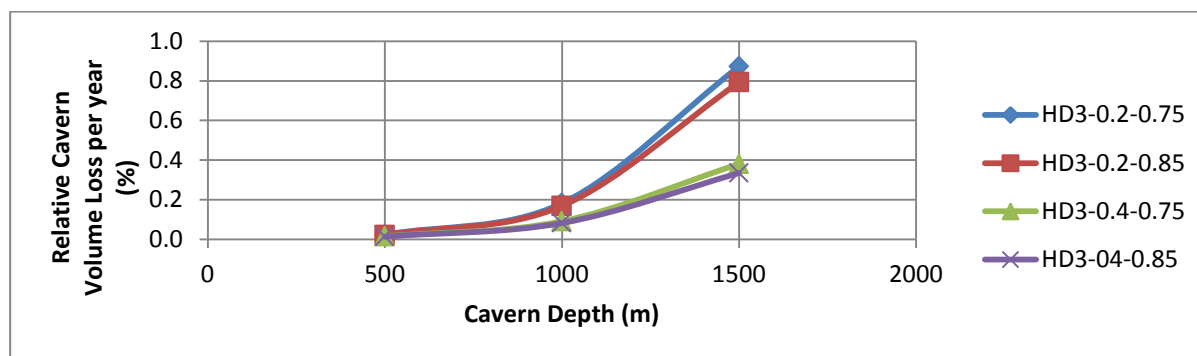
در شکل‌های (۵-۳۶) و (۵-۳۷) به ترتیب اثر تغییر دو پارامتر فشار کمینه و بیشینه بر آهنگ افت حجم نسبی مغاری کروی ( $H:D=1$ ) و سیلندری ( $H:D=3$ ) ارایه شده است. از این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که فشار کمینه نسبت به فشار بیشینه، اثر بسیار بیشتری بر افت حجم مغار دارد. همچنین افت حجم در مغارهای کروی شکل، کمتر از مغارهای سیلندی است.



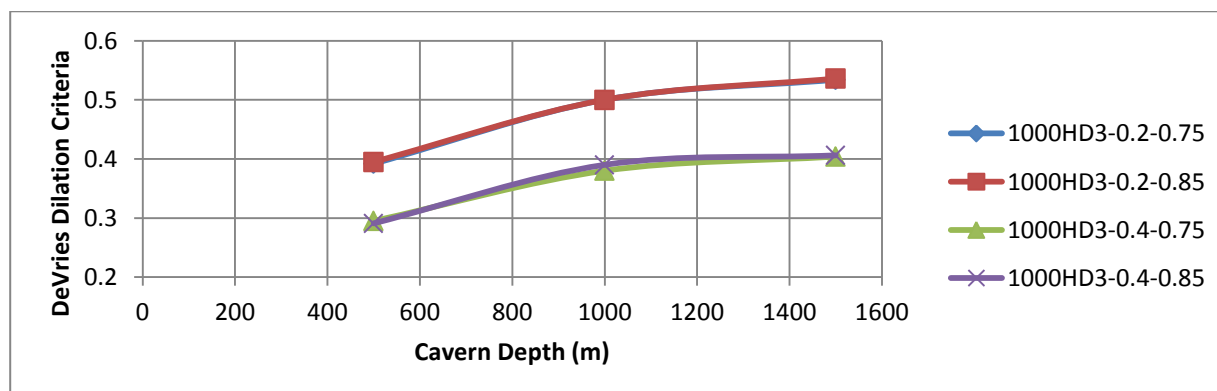
شکل (۵-۳۵): نوسان دمایی مغار برای سه فشار کمینه مختلف ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه



شکل (۵-۳۶): آهنگ افت حجم نسبی مغار کروی ( $H:D=1$ ) با فشارهای کمینه ۰/۲ و ۰/۴ فشار روباره در پاشنه چاه و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه)



شکل (۵-۳۷): آهنگ افت حجم نسبی مغار سیلندری ( $H:D=3$ ) برای دو فشار کمینه  $0.2$  و  $0.4$  فشار روباره در پاشنه چاه و دو فشار بیشینه  $0.75$  و  $0.85$  فشار روباره در پاشنه چاه  
 اثر فشارهای کمینه و بیشینه بر وضعیت اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه در شکل (۵-۳۸) ارایه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییر فشار بیشینه اثری بر وضعیت اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه ندارد. اما کاهش فشار کمینه باعث افزایش بسیار زیاد احتمال اتساع سنگ نمک شده است.



شکل (۵-۳۸): احتمال اتساع در پاشنه چاه برای دو فشار کمینه  $0.2$  و  $0.4$  فشار روباره در پاشنه چاه و دو فشار بیشینه  $0.75$  و  $0.85$  فشار روباره در پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس

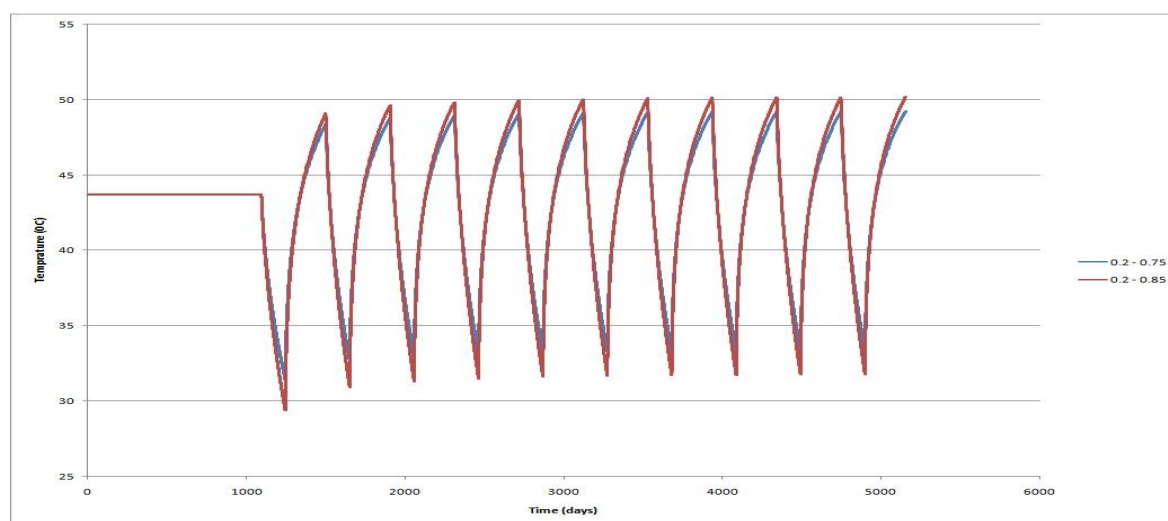
#### ۵-۴-۱-۶ فشار بیشینه

برای بررسی اثر فشار بیشینه بر پایداری و رفتار مغار، دو فشار بیشینه  $0.75$  و  $0.85$  انتخاب شده

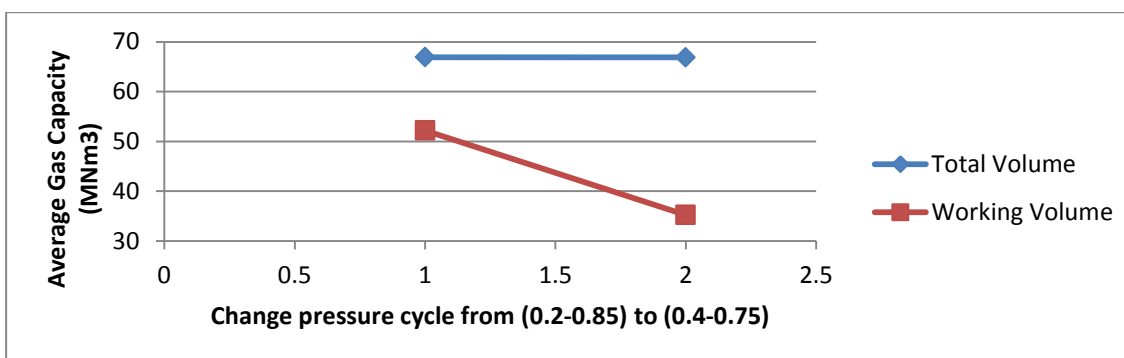
است (شماره تحلیل ۶-جدول ۵-۹).

در شکل (۵-۳۹) اثر تغییر فشار بیشینه بر نوسان دمایی درون مغار مشاهده می‌شود. این میزان حدود نصف نوسان ناشی از تغییر فشار کمینه است. بنابراین فشار کمینه اثر بیشتری بر دمای درون مغار دارد.

در شکل (۵-۴۰) تغییر فشار بهره‌برداری از (۰/۲، ۰/۸۵) به (۰/۴، ۰/۷۵) منجر به کاهش ۳۳ درصدی گاز عملیاتی شد، درحالی‌که ظرفیت کلی تقریباً ثابت باقی مانده است.



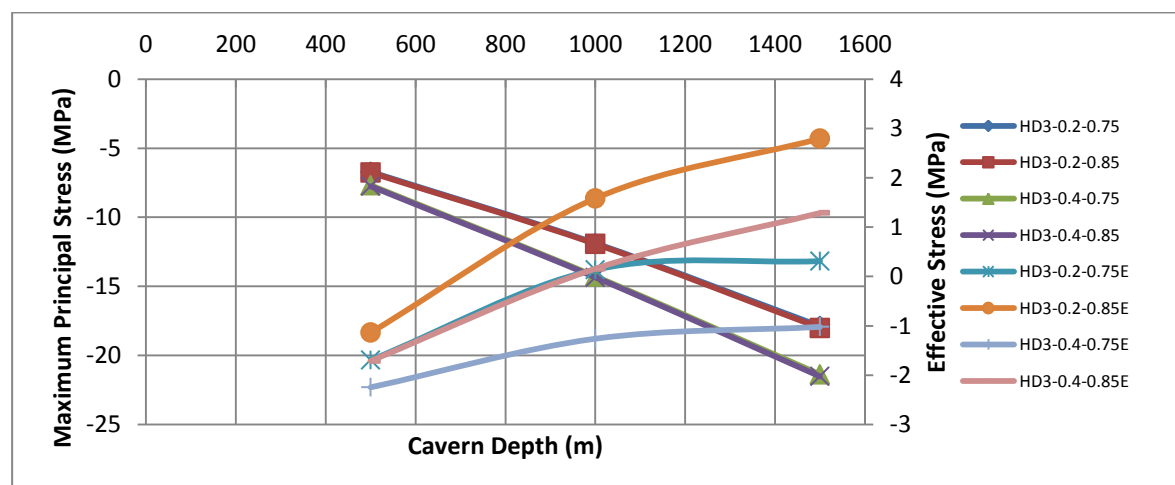
شکل (۵-۳۹): نوسان دمایی مغار برای فشارهای بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه)



شکل (۵-۴۰): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی دو مغار با فشار بهره‌برداری (۰/۲، ۰/۸۵ فشار روباره در پاشنه چاه) و (۰/۴، ۰/۷۵ فشار روباره در پاشنه چاه) در عمق ۱۰۰۰ متری (حجم مغار ۴۰۰ هزار مترمکعب)

بر اساس شکل (۵-۴۱)، تغییر فشار بیشینه تأثیری بر تنش بیشینه اصلی در ناحیه اطراف چاه ندارد، درحالی‌که کاهش فشار کمینه موجب افزایش تنش بیشینه اصلی می‌شود. همچنین تنش‌های بیشینه با افزایش عمق کاهش می‌یابند.

اثر تغییر فشار کمینه و بیشینه بر تنش‌های موثر در پاشنه چاه، در شکل (۵-۴۱) آرایه شده است. ملاحظه می‌شود که کاهش فشار کمینه موجب افزایش تنش موثر و کاهش فشار بیشینه موجب کاهش تنش‌های موثر می‌شود. برای رسیدن به پایدارترین حالت مغار از لحاظ معیار تنش‌های موثر، باید فشار کمینه افزایش و فشار بیشینه کاهش یابد.



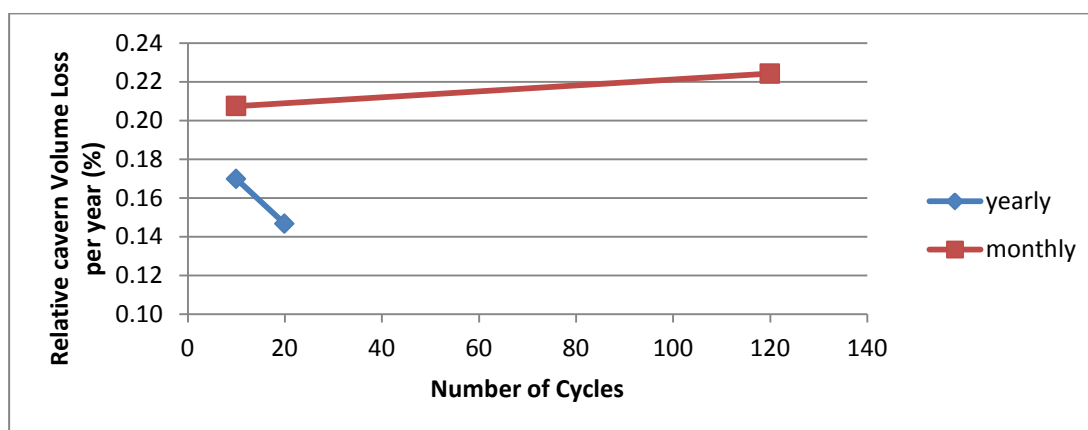
شکل (۵-۴۱): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای دو فشار کمینه  $0.2$  و  $0.4$  فشار روباره در پاشنه چاه و دو فشار بیشینه  $0.75$  و  $0.85$  فشار روباره در پاشنه چاه برای عمق‌های  $500$  تا  $1500$  متر، E: تنش موثر

#### ۵-۴-۱-۷ تعداد سیکل‌ها

برای بررسی اثر تعداد سیکل‌ها بر پایداری و رفتار مغار، دو نوع سیکل سالانه و ماهانه مد نظر قرار گرفتند در سیکل سالانه، هر سیکل تزریق و برداشت مجموعاً یک سال به طول می‌انجامد. این عدد برای سیکل ماهانه، یک ماه است. در سیکل سالانه تعداد  $10$  و  $20$  سیکل و در سیکل ماهانه نیز تعداد  $10$  و  $120$  سیکل مدل‌سازی شدند که نتایج حاصل از تحلیل آنها در ادامه آمده است. سایر مشخصات مدل مرجع در مدل سیکل سالانه ثابت است (تحلیل شماره ۷-جدول ۵-۹).

در شکل (۵-۴۲) به بررسی اثر تعداد سیکل در دو حالت سیکل‌های سالانه و ماهانه بر آهنگ افت حجم نسبی مغار پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در سیکل سالانه، افت حجم مغار حساسیت بیشتری نسبت به تعداد سیکل‌ها دارد. نکته مهم‌تر آنکه در سیکل‌های سالانه، با افزایش تعداد سیکل‌ها، آهنگ افت حجم مغار کاهش می‌یابد اما این موضوع برای سیکل‌های ماهانه عکس است و با افزایش تعداد سیکل‌های ماهانه، آهنگ افت حجم نسبی افزایش می‌یابد.

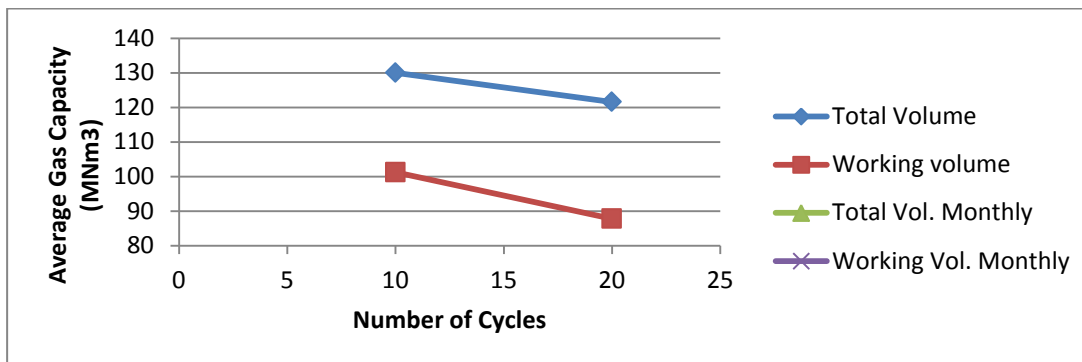
علت این رفتار دوگانه به نحوه تعریف آهنگ افت حجم نسبی سالانه مغار برمی‌گردد. در این تحقیق برای محاسبه آهنگ افت حجم نسبی، زمان شروع به ساخت مغار (یعنی روز صفر) تا انتهای آخرین سیکل برداشت در نظر گرفته شده است. به دلیل آنکه قبل از شروع بهره‌برداری، آماده‌سازی مغار مجموعاً سه سال طول می‌کشد، لذا این زمان به زمان سیکل‌های ذخیره‌سازی اضافه شده و مجموع زمان‌ها در نظر گرفته شده است. سیکل‌های ذخیره‌سازی ماهانه طول دوره بسیار کمتری نسبت به سیکل‌های سالانه دارند، بنابراین زمان آماده‌سازی مغار که سه سال است، بر مقدار آهنگ افت حجم نسبی سیکل‌های ماهانه اثر بیشتری نسبت به سیکل سالانه دارد.



شکل (۵-۴۲): اثر تعداد سیکل بهره‌برداری بر آهنگ افت حجم نسبی مغار برای سیکل‌های سالانه و ماهانه

در شکل (۵-۴۳) اثر تغییر تعداد سیکل‌ها در دو حالت سالانه و ماهانه بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی نشان داده شده است. تغییر تعداد سیکل‌های ماهانه تقریباً بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و

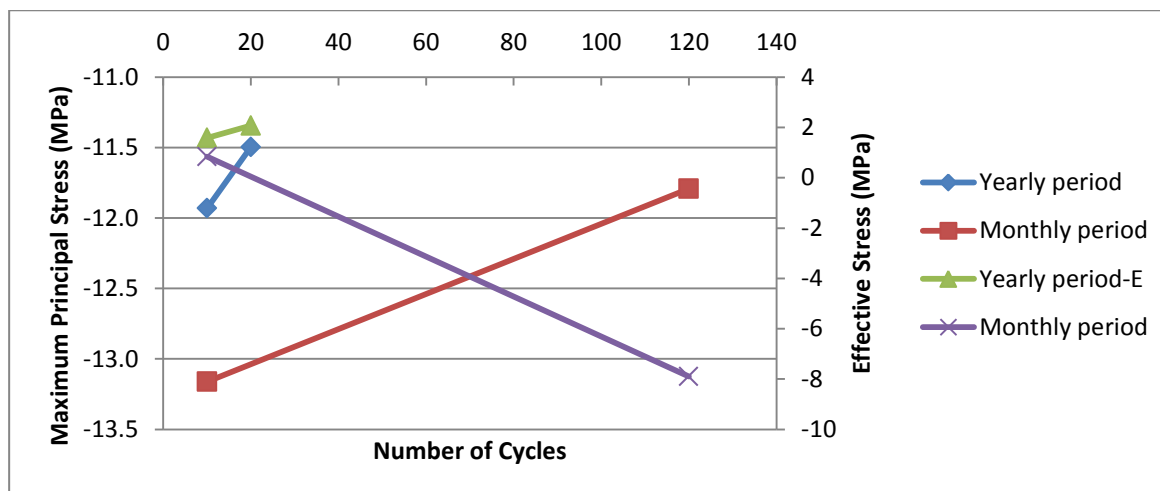
عملیاتی بی‌تاثیر است. ولی در سیکل سالانه، افزایش تعداد سیکل‌ها از ۱۰ به ۲۰ عدد، باعث کاهش ۶/۶ درصدی ظرفیت کلی و ۱۳/۲ درصدی گاز عملیاتی شده است.



شکل (۴۳-۵): اثر تعداد سیکل بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی مغار

در شکل (۴۴-۵) اثر تعداد سیکل بر تنش بیشینه اصلی و موثر برای دو حالت سیکل‌های سالانه و ماهانه در ناحیه پاشنه چاه نشان داده شده است. با افزایش تعداد سیکل‌ها تنش اصلی بیشینه افزایش می‌یابد. آهنگ این افزایش برای سیکل سالانه بیشتر از ماهانه است.

اما در مورد تنش‌های موثر، وضعیت سیکل سالانه و ماهانه متفاوت است. در سیکل سالانه، با افزایش تعداد سیکل‌ها، تنش موثر افزایش می‌یابد ولی در سیکل ماهانه روند نزولی طی می‌کند و مقدار آن منفی‌تر می‌شود (شکل ۴۴-۵).

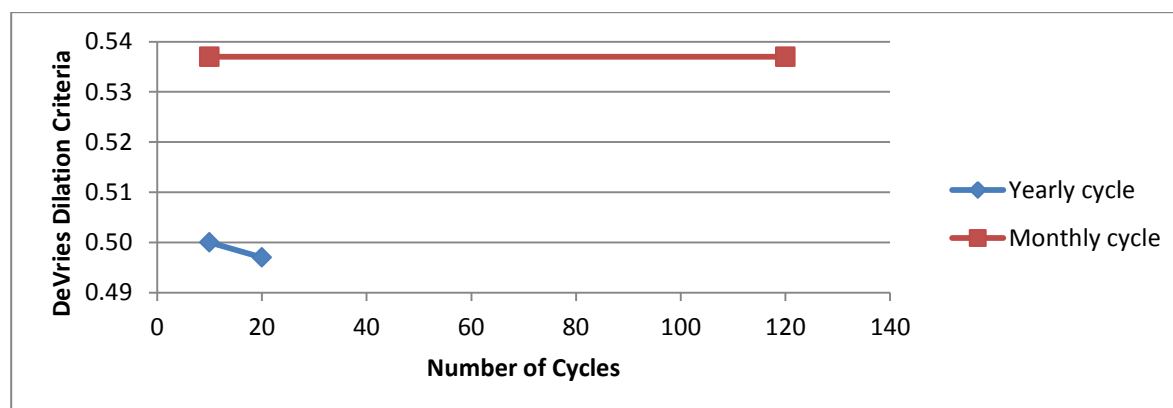


شکل (۴۴-۵): اثر تعداد سیکل بر وضعیت تنش بیشینه اصل و موثر در اطراف پاشنه چاه برای دو نوع سیکل سالانه



و ماهانه

اثر تغییر تعداد سیکل‌ها بر اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه در شکل (۵-۴۵) ارایه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش تعداد سیکل در سیکل ماهانه تاثیری بر وضعیت اتساع سنگ نمک ندارد، اما در سیکل سالانه باعث کاهش احتمال اتساع می‌شود.

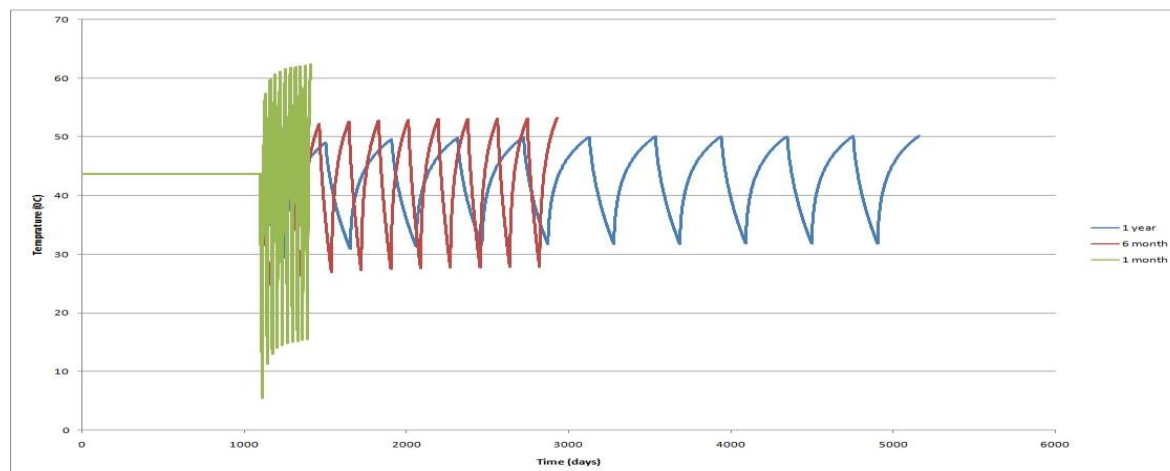


شکل (۵-۴۵): اثر تعداد سیکل بر وضعیت اتساع در پاشنه چاه برای دو نوع سیکل سالانه و ماهانه بر اساس معیار دوریس

#### ۵-۴-۱-۸ زمان سیکل‌ها

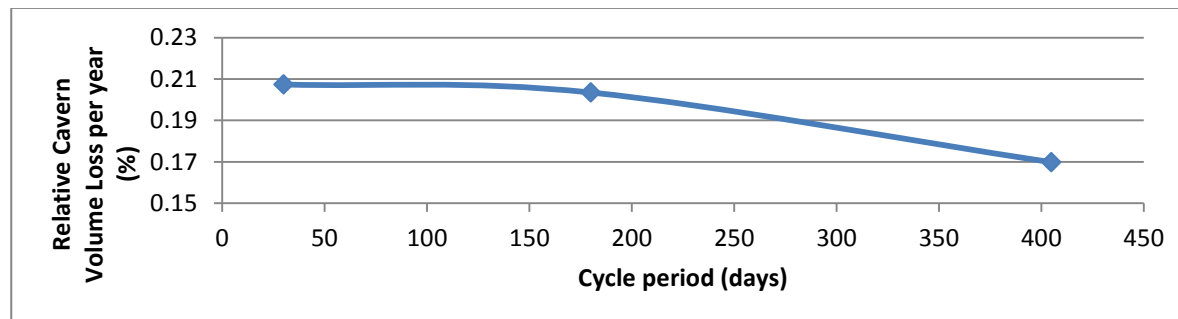
برای بررسی اثر زمان سیکل بر پایداری و رفتار مغار، سه سیکل مختلف با زمان یک ماهه، شش ماهه و یک‌ساله در نظر گرفته شدند. به جز تغییر زمان سیکل، سایر پارامترها مشابه مدل مرجع است (تحلیل شماره ۸- جدول ۵-۹).

در شکل (۵-۴۶) نوسان دمایی مغار برای سیکل‌های یک ماهه، شش ماهه و یک‌ساله (هرکدام ۱۰ سیکل)، نشان داده شده است. با کاهش زمان سیکل از یک سال به یک ماه نوسان دمایی از ۲۸ به ۶۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. پرواضح است که سرعت تغییر دمای درون مغار نیز در این حالت به شدت افزایش می‌یابد.



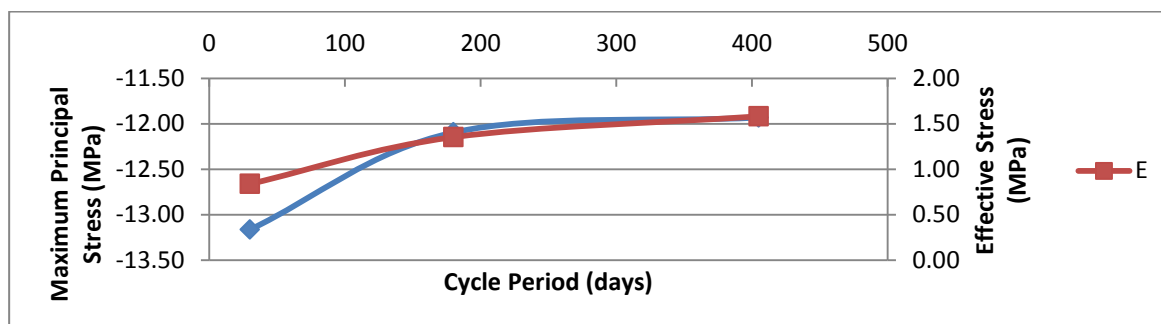
شکل (۵-۴۶): نوسان دمایی مغار برای زمان سیکل یک ماهه، شش ماهه و یک ساله، (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل)

اثر زمان سیکل بر آهنگ افت حجم نسبی مغار، در شکل (۵-۴۷) آرایه شده است. با افزایش زمان سیکل، آهنگ افت حجم نسبی مغار با روندی فزاینده رو به کاهش می‌گذارد. تغییر زمان سیکل تاثیری بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی ندارد.



شکل (۵-۴۷): اثر زمان سیکل بر آهنگ افت حجم نسبی مغار (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل)

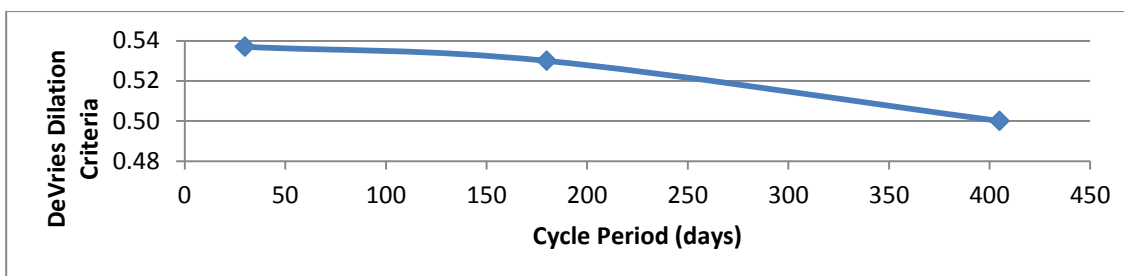
تنش بیشینه اصلی و موثر در ناحیه پاشنه چاه، با افزایش دوره سیکل، افزایش می‌یابند. بر اساس شکل (۵-۴۸) در سیکل‌های با دوره بزرگتر از ۶ ماه، افزایش دوره سیکل تقریباً اثری بر تنش بیشینه اصل و موثر ندارد.



شکل (۵-۴۸): اثر زمان سیکل بر وضعیت تنش بیشینه اصلیدو موثر در پاشنه چاه (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل)

بر اساس شکل (۵-۴۹) افزایش دوره سیکل منجر به کاهش احتمال اتساع در سنگ نمک پاشنه

چاه می‌شود.



شکل (۵-۴۹): اثر زمان سیکل بر وضعیت اتساع در پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس (هر کدام تعداد ۱۰ سیکل)

#### ۵-۴-۱-۹ دمای گاز تزریقی

برای بررسی اثر دمای گاز تزریقی بر پایداری و رفتار مغار، سه دمای ۲۱، ۳۷ و ۵۴ درجه سانتیگراد

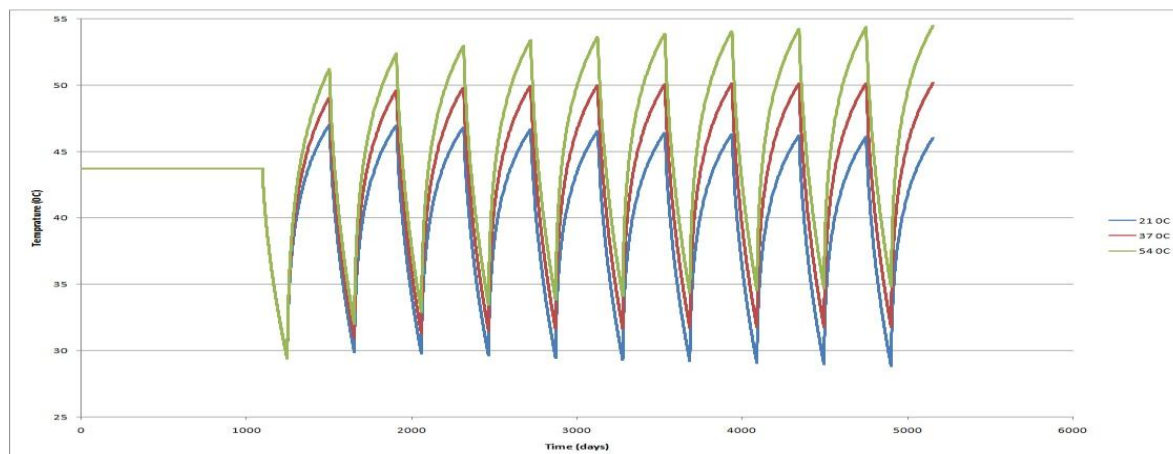
برای گاز تزریقی در نظر گرفته شده است. (تحلیل شماره-۹ جدول ۵-۹)

افزایش یا کاهش دمای گاز تزریقی باعث افزایش یا کاهش دمای متوسط مغار می‌شود، اما بر مقدار

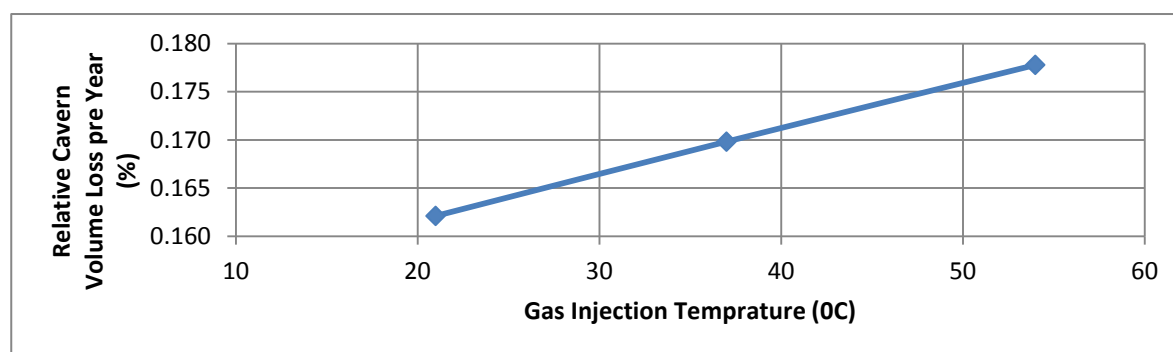
نوسان دما در مغار بی تاثیر است (شکل ۵-۵۰).

طبق شکل (۵-۵۱)، افزایش دمای گاز تزریقی همچنین باعث افزایش آهنگ افت حجم نسبی مغار

می‌شود، بگونه‌ای که با افزایش ۳۳ درجه‌ای دما گاز تزریقی، آهنگ افت حجم ۰.۱۵٪/۰٪ افزایش می‌یابد.

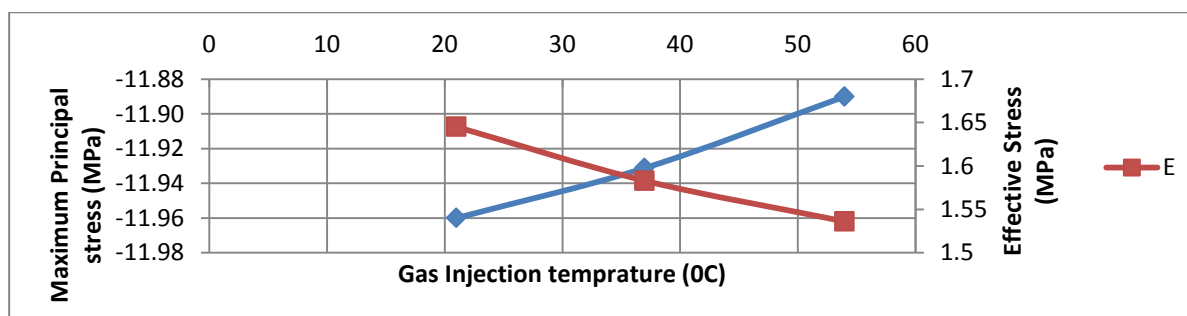


شکل (۵-۵۰): تغییر دمای گاز تزریقی (۲۱، ۳۷ و ۵۴ درجه سانتیگراد) و نوسانات دمایی مغار



شکل (۵-۵۱): اثر تغییر دمای گاز تزریقی بر آهنگ افت حجم نسبی مغار

افزایش دمای گاز تزریقی بر تنش بیشینه اصلی و موثر در ناحیه پاشنه چاه اثر معکوسی دارد،  
 بگونه‌ای که با افزایش دمای گاز تزریقی، تنش‌های بیشینه کمی افزایش و تنش‌های موثر کاهش می‌یابد  
 (شکل ۵-۵۲). تغییر دمای گاز بر رفتار اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه بی تاثیر است.

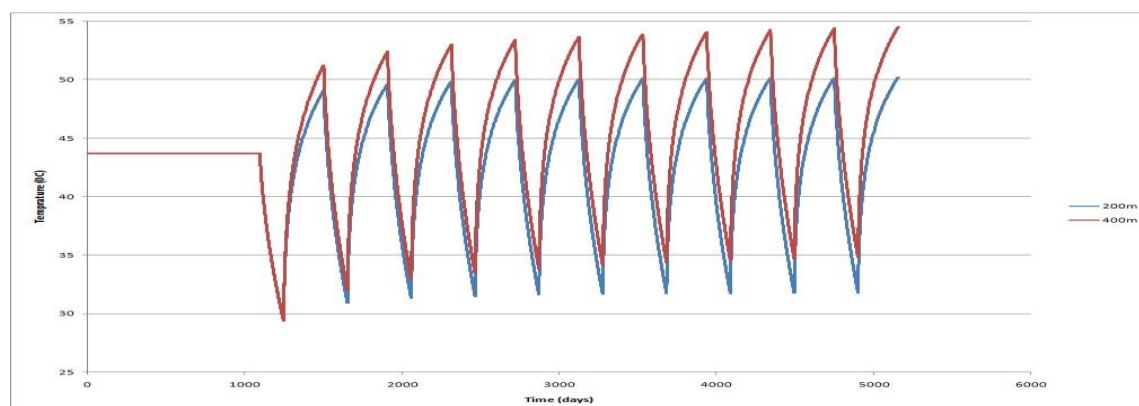


شکل (۵-۵۲): اثر تغییر دمای گاز تزریقی بر وضعیت تنش بیشینه اصل و موثر در پاشنه چاه

## ۵-۴-۱-۱۰ عمق گنبد

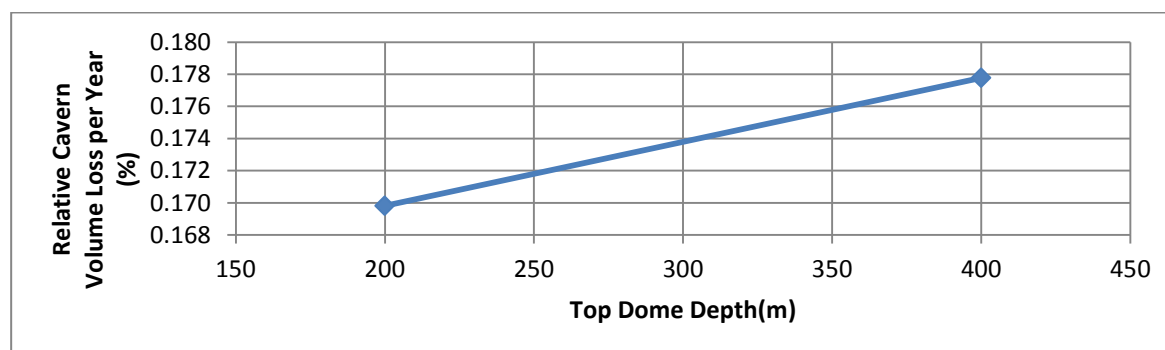
برای بررسی اثر عمق گنبد نمکی، بالا آمدگی گنبد تا دو عمق ۲۰۰ و ۴۰۰ متر لحاظ شده است. (تحلیل شماره-۱۰ جدول ۵-۹).

در شکل (۵-۵۳) نوسانات دمایی برای دو عمق گنبد ۲۰۰ و ۴۰۰ متری مشاهده می‌شود. افزایش عمق گنبد از ۲۰۰ به ۴۰۰ متر، تنها باعث افزایش دمای متوسط مغار شد و بر مقدار نوسان بی‌تاثیر است.



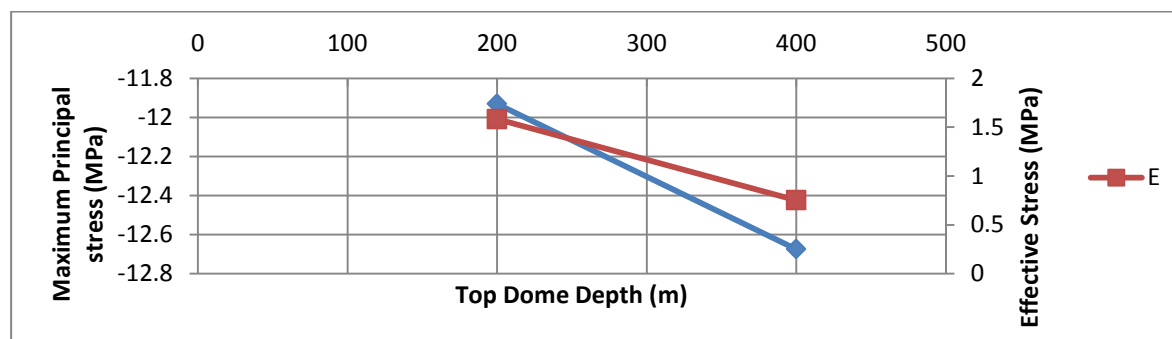
شکل (۵-۵۳): اثر تغییر عمق گنبد (۲۰۰ و ۴۰۰ متر) بر نوسانات دمایی مغار

افزایش عمق گنبد باعث افزایش نسبتاً کم آهنگ افت حجم نسبی مغار شده است (شکل ۵-۵۴).

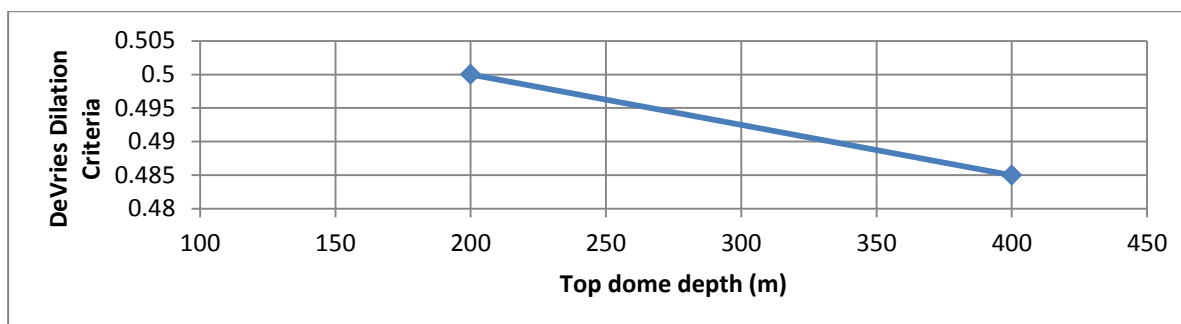


شکل (۵-۵۴): اثر تغییر عمق گنبد بر آهنگ افت حجم نسبی مغار

افزایش عمق گنبد بر وضعیت تنش‌های بیشینه و موثر و همچنین اتساع در ناحیه پاشنه چاه اثر مثبتی مختصری دارد و باعث کاهش مختصر این دو نوع تنش شده است (به ترتیب شکل‌های ۵-۵۵ و ۵-۵۶).



شکل (۵-۵۵): اثر تغییر عمق گنبد بر تنش بیشینه اصلینو موثر در پاشنه چاه



شکل (۵-۵۶): اثر تغییر عمق گنبد بر وضعیت اتساع پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس

#### ۵-۴-۱۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تحلیل حساسیت

در جدول‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) مقایسه‌ای تطبیقی بین نتایج حاصل از مطالعه آقای نیلند<sup>۱</sup> و نتایج حاصل از این تحقیق در مورد اثر پارامترهای هندسی و بهره‌برداری بر مقدار گاز عملیاتی ارایه شده است. باید توجه داشت بازه انتخاب شده برای دو پارامتر فشار بیشینه و عمق مغار در این دو تحقیق با یکدیگر کمی متفاوت است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که برای سه پارامتر تعداد سیکل بهره‌برداری، دمای گاز تزریقی و فشار کمینه تطابق بسیار خوبی وجود دارد. برای دو پارامتر دیگر که شامل فشار بیشینه و عمق مغار است، روند افزایشی و کاهشی حاصل از نتایج دو تحقیق یکسان است اما مقدار آن با یکدیگر متفاوت است. بیشترین دلیل آن نیز به تفاوت بازه‌های انتخاب شده برای بررسی این دو پارامتر برمی‌گردد.

جدول (۵-۱۰): میزان اثر پارامترهای مختلف بر مقدار گاز عملیاتی (Neiland, 2008)

<sup>1</sup>Neiland

| پارامتر                       |                                       |                      |                       |                    |                 |
|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| تعداد سیکل بهره‌برداری در سال | دمای گاز تزریقی<br>$^{\circ}\text{F}$ | فشار کمینه<br>psi/ft | فشار بیشینه<br>psi/ft | عمق سقف مغار<br>ft |                 |
| (۱ تا ۱۲)                     | (۷۰ تا ۱۳۰)                           | (۰/۴ تا ۰/۲)         | (۰/۷۵ تا ۰/۹۵)        | (۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰)     |                 |
| -۱۱                           | -۶                                    | -۳۳                  | ۳۸                    | ۶۹                 | گاز عملیاتی (%) |

جدول (۵-۱۱): میزان اثر پارامترهای مختلف بر مقدار گاز عملیاتی

| پارامتر                       |                                       |                      |                       |                    |                 |
|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| تعداد سیکل بهره‌برداری در سال | دمای گاز تزریقی<br>$^{\circ}\text{F}$ | فشار کمینه<br>psi/ft | فشار بیشینه<br>psi/ft | عمق سقف مغار<br>ft |                 |
| (۱ تا ۱۲)                     | (۷۰ تا ۱۳۰)                           | (۰/۴ تا ۰/۲)         | (۰/۷۵ تا ۰/۹۰)        | (۱۶۰۰ تا ۵۰۰۰)     |                 |
| -۱۱                           | -۶                                    | -۳۱                  | ۱۲                    | ۲۸۵                | گاز عملیاتی (%) |

### ۵-۴-۲ تحلیل پارامتری

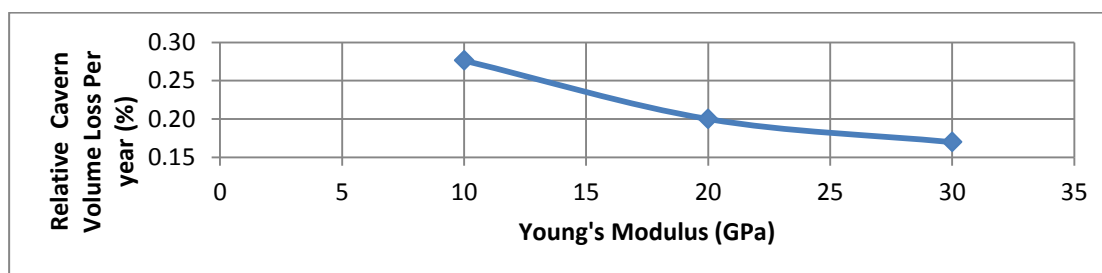
هدف از انجام تحلیل پارامتری، بررسی تاثیر تغییر خواص سنگ بر رفتار و پایداری مغار است. اثر دو گروه از خواص سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گروه اول پارامترهای الاستیک سنگ نمک شامل مدول یانگ و نسبت پواسون و در گروه دوم پارامترهای خزشی سنگ نمک شامل ثابت‌های "n"، "A" و انرژی فعال‌سازی یعنی "Q:R" مورد بررسی قرار می‌گیرند. همانطور که ملاحظه می‌شود، پارامترهای خزشی مورد بررسی فقط شامل پارامترهای خزش پایای مدل رفتاری M-D است و پارامترهای خزش انتقالی در نظر گرفته نشده‌اند. علت این امر نامشخص بودن گستره‌ی تغییر ثابت‌های خزش انتقالی است. به همین دلیل تنها به بررسی پارامترهای خزش پایا که گستره تغییرات پارامترهای آن معلوم است، پرداخته می‌شود.

## ۵-۴-۲-۱ مدول یانگ

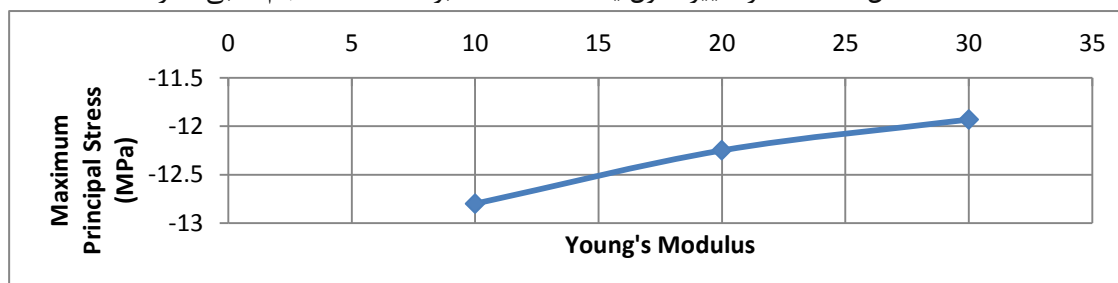
برای بررسی اثر تغییر مدول الاستیک (مدول یانگ) ، سه مقدار ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گیگاپاسکال برای سنگ نمک در نظر گرفته شده است (تحلیل شماره-۱۱ جدول ۵-۹). تغییر خواص الاستیک و خزش پایاسنگ نمک ، هیچ اثری بر نوسانات دمایی مغار ندارد.

همانطور که در شکل (۵-۵۷) ملاحظه می‌شود، کاهش مدول یانگ سنگ نمک از ۳۰ به ۱۰ گیگاپاسکال باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در آهنگ افت حجم نسبی مغار می‌شود و این افزایش تقریباً حالت نمایی دارد.

تغییر مدول الاستیسیته بر وضعیت تنش‌ها نیز تاثیرگذار است. در شکل (۵-۵۸) ملاحظه می‌شود که با افزایش مدول یانگ، تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه زیاد می‌شود.



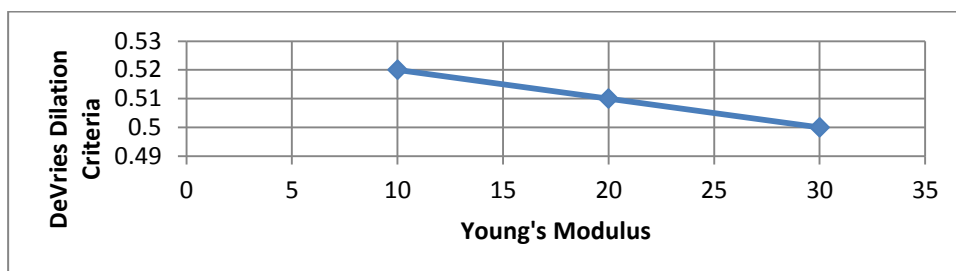
شکل (۵-۵۷): اثر تغییر مدول یانگ سنگ نمک بر آهنگ افت حجم نسبی مغار



شکل (۵-۵۸): تاثیر مدول یانگ بر تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه

همچنین افزایش مدول یانگ، باعث کاهش احتمال اتساع در ناحیه پاشنه چاه شده است (شکل ۵-۵۹).

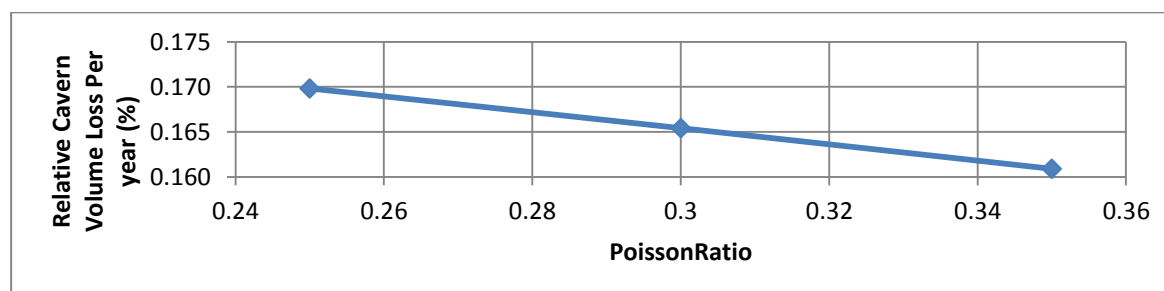




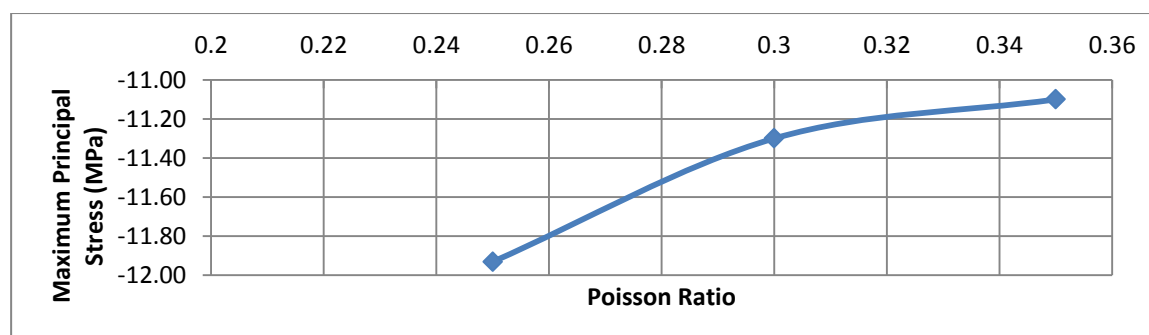
شکل (۵-۵۹): اثر مدول یانگ بر احتمال اتساع در سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس

#### ۵-۴-۲ نسبت پواسون

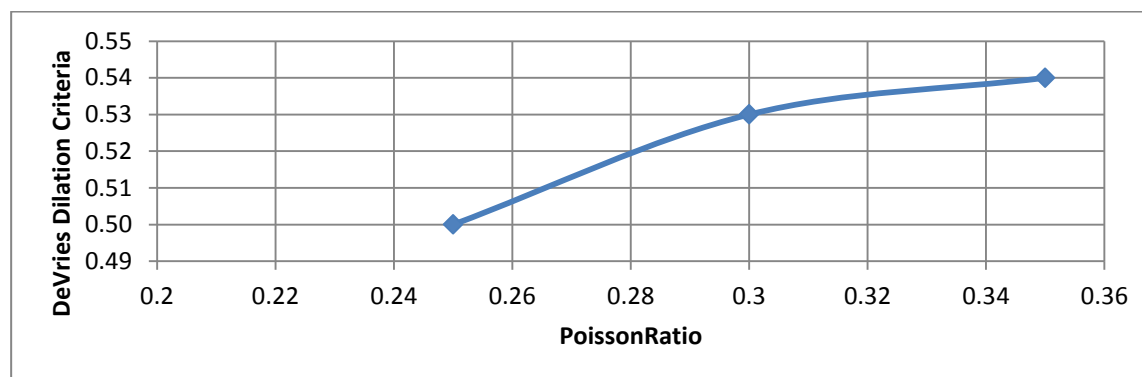
برای بررسی اثر نسبت پواسون بر پایداری و رفتار مغار، سه مقدار  $0/۲۵$ ،  $0/۳$  و  $0/۳۵$  برای نسبت پواسون در نظر گرفته شده است (تحلیل شماره-۱۲ جدول ۵-۹). افزایش نسبت پواسون باعث کاهش نسبی آهنگ افت حجم مغار می‌شود (شکل ۵-۶۰). با افزایش نسبت پواسون تنش‌های بیشینه در ناحیه پاشنه چاه با آهنگی کند شونده، افزایش می‌یابند (شکل ۵-۶۱). این وضعیت برای احتمال اتساع نیز صدق می‌کند (شکل ۵-۶۲).



شکل (۵-۶۰): اثر تغییر نسبت پواسون سنگ نمک بر آهنگ افت حجم نسبی مغار



شکل (۵-۶۱): تاثیر نسبت پواسون بر تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه



شکل (۵-۶۲): اثر نسبت پواسون بر احتمال اتساع در سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس

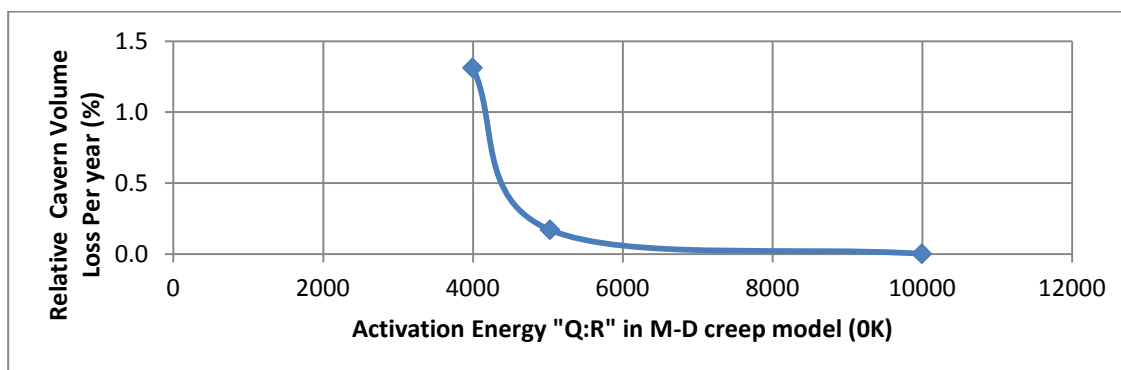
#### ۵-۴-۲-۳ نسبت انرژی فعال‌سازی (Q/R)

برای بررسی اثر انرژی فعال‌سازی بر پایداری و رفتار مغار، نسبت انرژی فعال‌سازی از ۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تغییر داده شده و اثر آن مورد مطالعه قرار گرفته است. (تحلیل شماره- ۱۳ جدول ۵-۹)

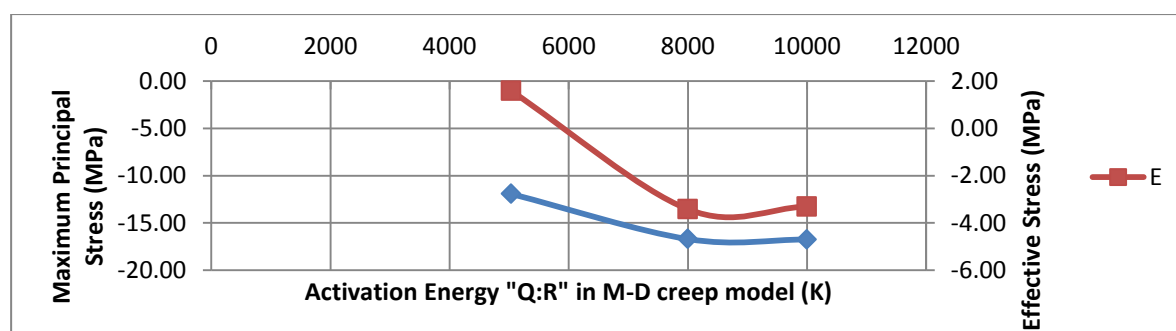
همانگونه که در شکل (۵-۶۴) مشاهده می‌شود نسبت (Q:R) بر آهنگ افت حجم نسبی مغار تاثیر بسیار زیادی دارد. به گونه‌ای که در (Q:R=۴۰۰۰) آهنگ افت حجم حدود ۱/۳٪ در سال و در (Q:R=۱۰۰۰۰) آهنگ افت حجم بسیار کم و نزدیک به صفر است.

همچنین افزایش نسبت (Q:R) باعث کاهش تنش بیشینه اصلی و موثر در ناحیه پاشنه چاه می‌شود (شکل ۵-۶۴). به تدریج با افزایش نسبت (Q:R)، روند کاهش تنش‌های بیشینه و موثر کم شده و تقریباً در (Q:R) بیشتر از ۸۰۰۰ به مقدار ثابتی می‌رسد.

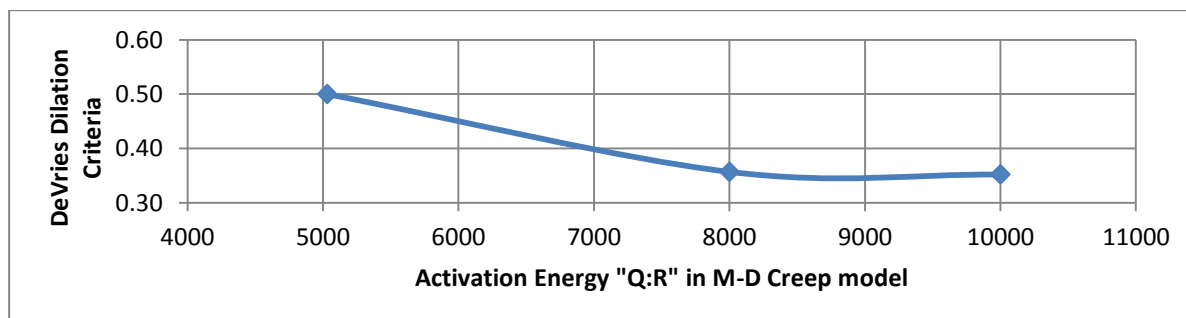
در مورد وضعیت اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه نیز اوضاع مثل تنش بیشینه اصلی و موثر است (شکل ۵-۶۵) و افزایش نسبت انرژی فعال‌سازی به کاهش احتمال اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه منجر می‌شود.



شکل (۵-۶۳): اثر تغییر انرژی فعالسازی سنگ نمک بر آهنگ افت حجم نسبی مغار



شکل (۵-۶۴): اثر تغییر انرژی فعالسازی سنگ نمک بر وضعیت تنش‌های بیشینه و موثر در پاشنه چاه، E: تنش موثر



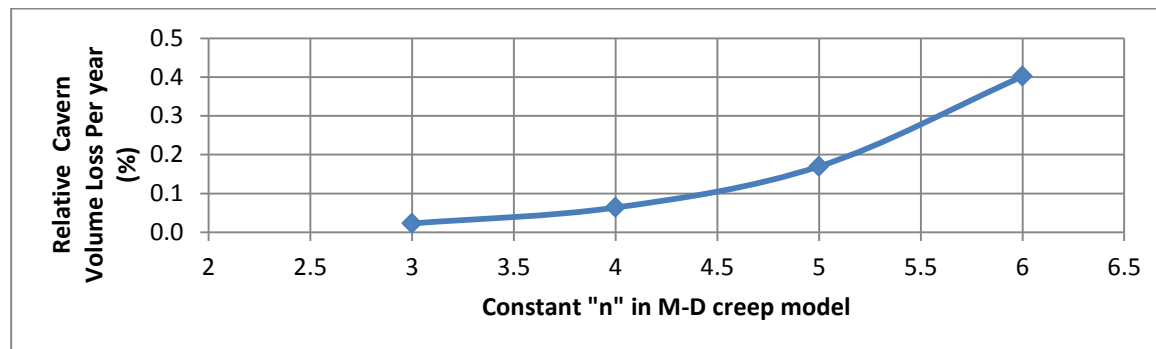
شکل (۵-۶۵): اثر تغییر انرژی فعالسازی سنگ نمک بر وضعیت اتساع پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس

#### ۵-۴-۲-۴ توان خزش

برای بررسی اثر ثابت " $n$ " (توان خزش) بر پایداری و رفتار مغار، چهار مقدار ۳، ۴، ۵ و ۶ برای  $n$  در

نظر گرفته شد (تحلیل شماره-۱۴ جدول ۵-۹).

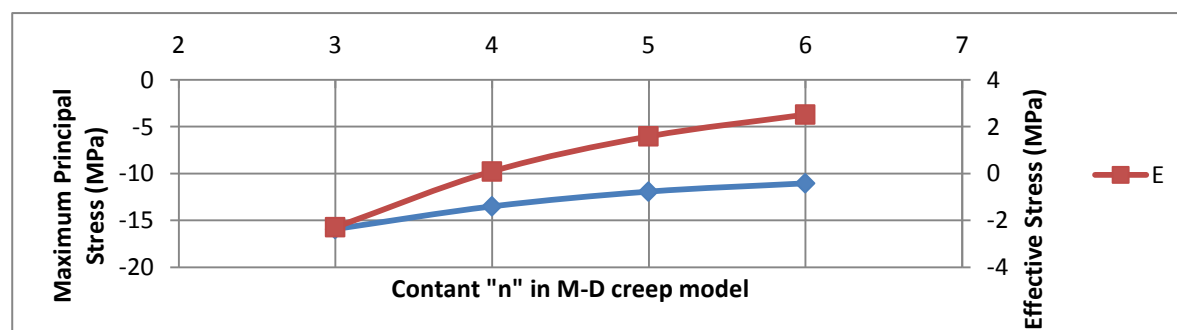
در شکل (۵-۶۶) آهنگ افت حجم نسبی مغار برای  $n$  ۳ تا ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت، با افزایش مقدار  $n$ ، آهنگ افت حجم به شکل نمایی افزایش پیدا می‌کند.



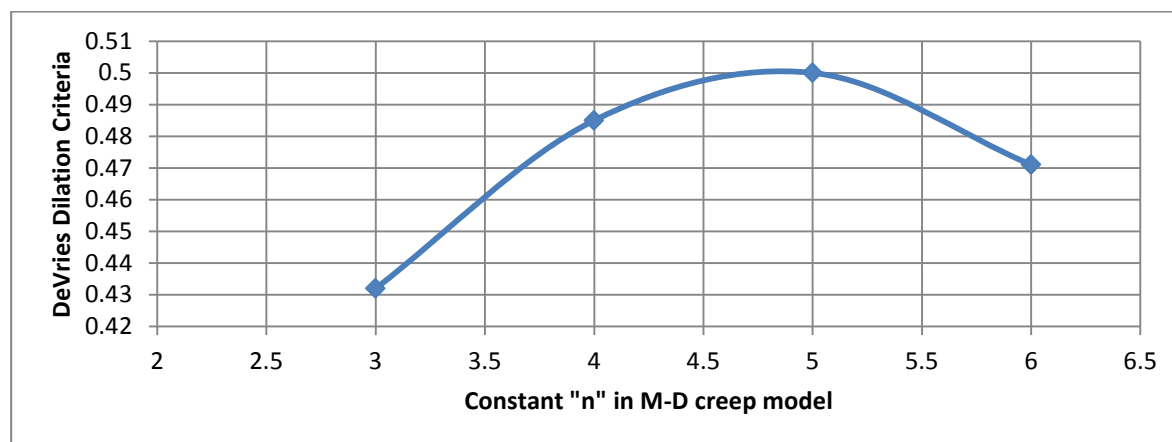
شکل (۵-۶۶): اثر تغییر ثابت  $n$  بر آهنگ افت حجم نسبی مغار

تنش بیشینه اصلی و موثر در ناحیه پاشنه چاه، با افزایش  $n$  افزایش می‌یابند ولی این روند افزایشی کند شونده است (شکل ۵-۶۷).

در شکل (۵-۶۸) احتمال اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه برای  $n$ های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل با زیاد شدن  $n$  از ۳ تا حدود ۵ باعث افزایش احتمال اتساع در سنگ نمک ناحیه پاشنه چاه شده است ولی در مقادیرهای بیشتر از ۵، افزایش  $n$  منجر به کاهش احتمال اتساع در سنگ شده است.



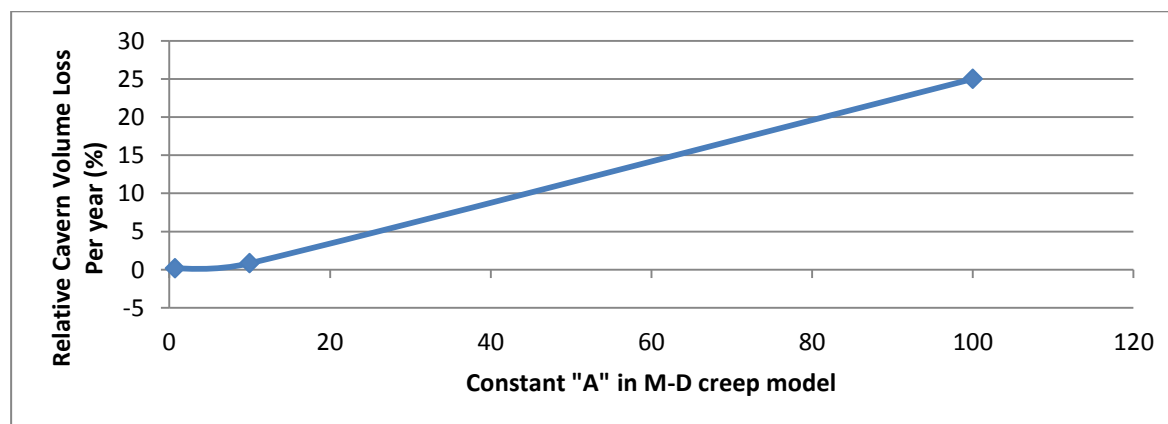
شکل (۵-۶۷): اثر تغییر ثابت  $n$  بر وضعیت تنش‌های بیشینه و موثر در پاشنه چاه



شکل (۵-۶۸): اثر تغییر ثابت  $n$  بر وضعیت اتساع پاشنه چاه بر اساس معیار دوریس

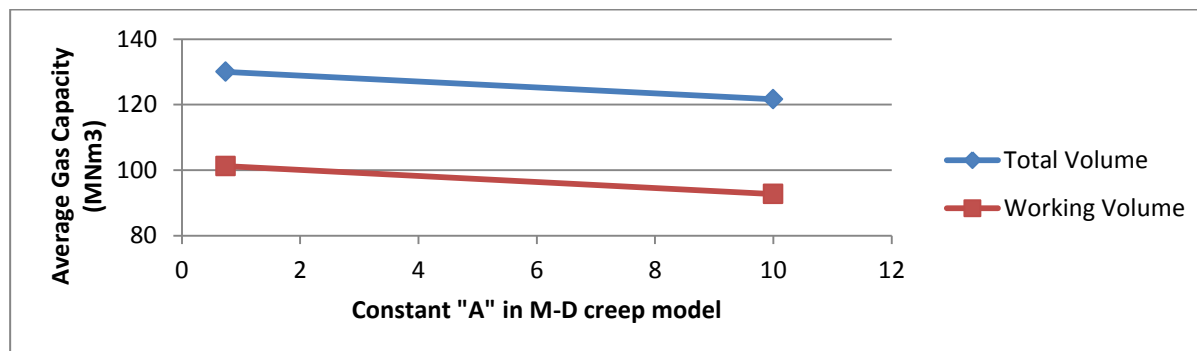
#### ۵-۴-۲-۵ ضریب خزش

برای بررسی اثر ضریب خزش ( $A$ )، سه مقدار  $0.74$ ،  $10$  و  $100$  برای این ضریب در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها مانند مدل مرجع است (تحلیل شماره- ۱۵ جدول ۵-۹).  
در شکل (۵-۶۹) اثر تغییر مقدار ضریب خزش ( $A$ ) بر آهنگ افت حجم نسبی مغار نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در مقدار  $A=100$  آهنگ افت حجم نسبی مغار  $25\%$  در سال خواهد بود.



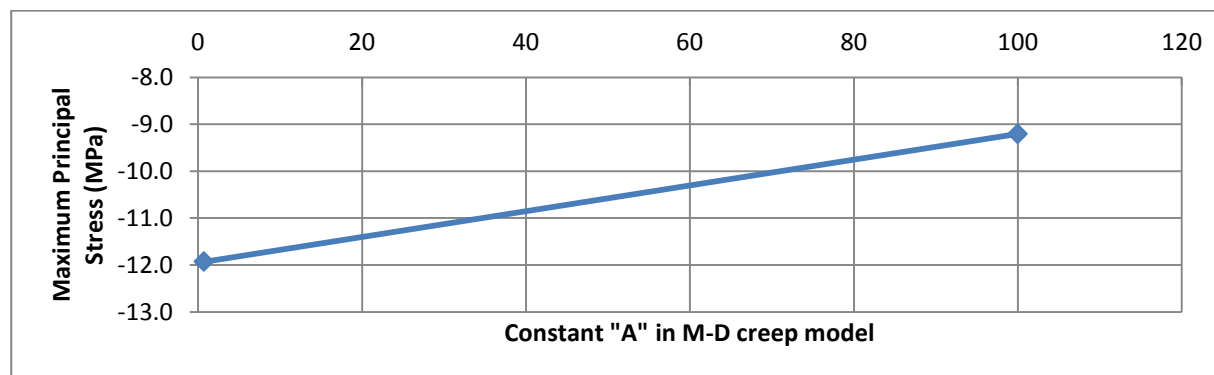
شکل (۵-۶۹): اثر تغییر انرژی فعال‌سازی بر آهنگ افت حجم نسبی مغار

افزایش ضریب خزش باعث کاهش بسیار زیاد ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی گاز طبیعی خواهد شد. این مطلب در شکل (۷۰-۵) نشان داده شده است. این رفتار به دلیل کاهش قابل ملاحظه حجم مغار است.



شکل (۷۰-۵): اثر تغییر انرژی فعال‌سازی بر ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی

افزایش ضریب خزش باعث افزایش تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه شده است (شکل ۷۱-۵). تغییر ضریب خزش بر احتمال اتساع سنگ نمک در ناحیه پاشنه چاه بی تاثیر است.



شکل (۷۱-۵): اثر تغییر انرژی فعال‌سازی بر وضعیت تنش بیشینه اصلی در ناحیه پاشنه چاه

## ۵-۵ جمع‌بندی

در این فصل به تحلیل رفتار مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی با کمک نرم‌افزار LOCAS پرداخته شد. مدلی از یک مغار نمک ساخته و از جنبه‌های فنی و عملیاتی مورد بررسی واقع شد. جنبه عملیاتی شامل ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی و جنبه فنی شامل وضعیت تنش بیشینه اصلی

تنش‌های موثر، وضعیت اتساع بر روی دیواره مغار و در اطراف آن و همچنین در نقطه پاشنه چاه است. همچنین وضعیت تغییرات دما و حجم مغار در طول دوره ساخت و بهره‌برداری از مغار تحلیل شد.

در بخش دوم این فصل به تحلیل حساسیت و پارامتری اجزای یک مغار پرداخته شد. در جدول (۵-۱۲) خلاصه این تحلیل‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که اثر تغییر هر عامل بر روی معیارهای رفتار مغار نمک، در گستره تغییرات آن عامل که در جدول (۵-۹) درج شده مد نظر قرار گرفته است. در این جدول، پیکان‌های رو به بالا نشان دهنده اثر مثبت بر پایداری و پیکان‌های رو به پایین نشانگر اثر منفی بر پایداری مغار است. اندازه پیکان‌ها نیز نشان دهنده میزان تاثیر نسبی آنها است. علامت ستاره نشان دهنده تاثیر دوگانه است. اگر این علامت در کنار یک پیکان قرار گیرد، به منزله آن است که بیشترین اثر آن پارامتر در جهت پیکان است اما حالت عکس پیکان نیز وجود دارد.

با توجه به جدول (۵-۱۲) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

به طور کلی افزایش سرعت خزش باعث افزایش افت حجم مغار، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی، افزایش تنش‌های بیشینه و موثر می‌شود. اما پتانسیل اتساع سنگ نمک با افزایش سرعت خزش نمک کاهش می‌یابد.

به طور کلی مغارهای سیلندری نسبت به مغارهای کروی پایدارترند اما افت حجم مغار و ظرفیت ذخیره‌سازی مغارهای کروی کمتر است. همچنین به طور کلی می‌توان گفت که مغارهای بزرگتر ناپایدارترند.

برخلاف انتظار، کاهش فاصله‌داری مغارها بر پایداری آنها اثر مثبت می‌گذارد. به این موضوع باید در تحقیقات بعدی بیشتر پرداخته شود.

افزایش فشار کمینه باعث بهبودی پایداری مغار می‌شود، اما ظرفیت ذخیره‌سازی را کاهش می‌دهد.

افزایش فشار بیشینه باعث کاهش افت حجم مغار و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی می‌شود. اما باعث ایجاد تنش‌های کششی موثر و ناپایداری مغار می‌شود.

با افزایش تعداد سیکل‌های ذخیره‌سازی، ظرفیت ذخیره‌سازی کاسته شده و پایداری مغار نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دوره سیکل‌های ذخیره‌سازی وضعیت تنش‌های بیشینه اصلی و موثر بحرانی‌تر شده اما پتانسیل اتساع نمک کاهش می‌یابد.

دمای گاز تزریقی اثر چندان زیادی بر پایداری مغار ندارد. همچنین افزایش عمق گنبد نمکی باعث بهبود شرایط تنش و کاهش پتانسیل اتساع می‌شود.

با افزایش مدول‌های الاستیک سنگ نمک شامل مدول یانگ و نسبت پواسون، ظرفیت ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد. تنش‌های اصلی بیشینه با افزایش مدول‌های الاستیک افزایش می‌یابند.



جدول (۵-۱۲): جدول حساسیت، تاثیر افزایش هر کدام از پارامترها در محدوده اشاره شده در جدول (۵-۹) برای هر پارامتر

| نوع                 | نماد              | دما     |             | افت<br>حجم | ظرفیت ذخیره‌سازی |         | پاشنه چاه  |                  |          |
|---------------------|-------------------|---------|-------------|------------|------------------|---------|------------|------------------|----------|
|                     |                   | میانگین | دامنه نوسان |            | Total            | Working | $S_{\max}$ | $S_{\text{eff}}$ | Dilation |
| هندسی               | h                 | ↑       | ↑           | ↓          | ↑                | ↑       | ↑          | ↓                | ↓        |
|                     | H/D               | ↓       | ●           | ↓          | ↓                | ↓       | ↑          | ↑*               | ↑        |
|                     | V                 | ↓       | ●           | ↓          | ↑                | ↑       | ↓          | ↓                | ↓        |
|                     | P.                | ●       | ●           | ↓          | ↓                | ↓       | ↓          | -                | ↓        |
| عملیاتی             | $P_{\min}$        | ↓       | ●           | ↑          | ↓                | ↓       | ↑          | ↑                | ↑        |
|                     | $P_{\max}$        | ●       | ↑           | ↑          | ↑                | ↑       | ●          | ↓                | ●        |
|                     | N                 | ●       | ●           | *          | ↓                | ↓       | ↓          | ↓*               | ↓        |
|                     | t                 | ↑       | ↓           | ↑          | ●                | ●       | ↓          | ↓                | ↑        |
|                     | T                 | ↑       | ●           | ↓          | ●                | ●       | ↓          | ↑                | ●        |
|                     | $h_{\text{Dome}}$ | ↑       | ●           | ↓          | ●                | ●       | ↑          | ↑                | ↑        |
| مدول‌های<br>الاستیک | E                 | ●       | ●           | ↑          | ●                | ●       | ↓          | -                | -        |
|                     | v                 | ●       | ●           | ↑          | ●                | ●       | ↓          | -                | -        |
| خزشی                | Q/R               | ●       | ●           | ↑          | ↓                | ↓       | ↑          | ↑                | ↑        |
|                     | n                 | ●       | ●           | ↓          | -                | -       | ↓          | ↓                | ↑*       |
|                     | A                 | ●       | ●           | ↓          | ↓                | ↓       | ↓          | ↓                | ●        |

↑: اثر مثبت؛ ↓: اثر منفی؛ ●: بی تاثیر، \*: رفتار دوگانه

## فصل ششم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق به طور خلاصه به شرح ذیل می‌باشد:

- ✓ با توجه به شرایط کنونی و پیش بینی‌های انجام شده در آینده برای مصرف گاز طبیعی در کشور، ذخیره‌سازی این ماده از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است.
- ✓ با توجه به مزایای بسیار زیاد ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به خصوص در سازندهای نمکی و همچنین وجود پتانسیل‌های بسیار زیاد ایران برای ایجاد مخازنی در سازندهای نمکی، شایسته و بایسته است نگرشی ویژه بر این روش ذخیره‌سازی انجام گیرد.
- ✓ معیارهای اکتشاف پتانسیل‌های سازندهای نمکی ایران باید با هدف ذخیره‌سازی گاز طبیعی انجام گیرد.
- ✓ به منظور مطالعه رفتار خزشی سنگ نمک برای مغارهای تحت بارگذاری متناوب (مثل ذخیره‌سازی گاز طبیعی)، استفاده از مدل‌های رفتاری که شامل خزش انتقالی و پایا هستند، ضروری می‌نماید.
- ✓ رفتار ترمودینامیکی گاز درون مغارهای نمکی تاثیر بسیار زیادی بر رفتار کلی مغار می‌گذارد. بنابراین در شبیه‌سازی رفتار مغار حتما این رفتار در نظر گرفته شود.
- ✓ معیارهای اصلی تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی شامل افت حجم مجاز مغار، عدم ایجاد و یا حداقل گسترش نواحی دارای تنش‌های کششی و اتساع در سازند دربرگیرنده مغار می‌شود.
- ✓ نرم‌افزار LOCAS امکان شبیه‌سازی و تحلیل پایداری انواع فضاهای زیرزمینی ساخته شده در سازندهای نمکی به ویژه مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی را دارد.
- ✓ دیواره بلافصل مغار همیشه در معرض اتساع قرار دارد.

- ✓ ناحیه یک سوم بالای مغار بیشترین احتمال ایجاد تنش‌های کششی را دارد. همچنین بیشترین احتمال ایجاد اتساع در سنگ‌های واقع در نزدیکی وسط مغار است.
- ✓ تغییر دمای درون مغار، منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی بر روی دیواره نمکی می‌شود. همچنین آهنگ تغییر دما به هنگام تخلیه مغار از گاز، شدت بیشتری نسبت به تزریق گاز دارد.
- ✓ به طور کلی با گذشت زمان، دمای متوسط مغار به دمای ژئوترمال در مرکز مغار نزدیکتر می‌شود.
- ✓ بطور کلی در محدوده فشارهای مجاز، افت حجم مغار یک پدیده‌ی طبیعی و همیشگی است که تنها می‌توان با انتخاب فشار بهینه مقدار آن را کنترل نمود.
- ✓ ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی در طول زمان تغییر می‌کند.
- ✓ بیشترین احتمال ایجاد تنش‌های کششی بر روی دیواره مغار در زمان‌های فشار کمینه است. همچنین با افزایش تعداد سیکل‌ها، پتانسیل ایجاد تنش‌های کششی به شدت افزایش می‌یابد.
- ✓ پتانسیل ایجاد تنش‌های کششی موثر در دیواره مغار در فشارهای کمینه زیاد می‌شود و با افزایش تعداد سیکل‌ها، این پتانسیل به شدت افزایش می‌یابد.
- ✓ سنگ‌های اطراف مغار تا فاصله بسیار زیادی تحت تاثیر ایجاد این فضا در دل زمین قرار می‌گیرند (تا پنج برابر قطر مغار). ضخامت تقریباً کمی از دیواره مغار (حدود یک متر) شدیداً تحت تاثیر تغییرات دما و فشار درون مغار قرار دارند و پتانسیل ایجاد کشش در این ناحیه بسیار بالاست.

- ✓ با گذشت زمان و در طی سیکل‌های متوالی بهره‌برداری، تنش‌های موجود در سنگ‌های اطراف مغار، حتی تا فاصله چند ده متر، از حالت تنش‌های فشاری کاهش می‌یابند.
- ✓ در فشار کمینه، سنگ‌های اطراف مغار تا فاصله بسیار زیادی به وضعیت اتساع نزدیک هستند. این پتانسیل با افزایش تعداد سیکل‌ها کمی کاهش می‌یابد. بنابراین بیشترین خطر اتساع در اولین فشار کمینه اتفاق می‌افتد. همچنین ضخامت نازکی از دیواره مغار (کمتر از یک متر) همیشه در معرض اتساع قرار دارد.
- ✓ به طور کلی، به ترتیب عمق مغار، پارامترهای خزشی سنگ نمک، فشار کمینه و بیشینه نسبت به سایر پارامترهای دیگر بیشترین اثر را بر رفتار مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی دارند.

## ۲-۶ پیشنهادات

- با توجه به اهمیت فراوان مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی، پیچیدگی‌های رفتاری سنگ نمک و تجربیات بومی اندک در زمینه طراحی و اجرای این پروژه‌ها، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:
- ✓ استفاده بهینه از تجربه‌های موفق و ناموفق گذشته که در قالب گزارش‌ها، مقالات علمی و آیین‌نامه‌های اجرایی در دسترس هستند.
- ✓ تحلیل سه بعدی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی با در نظر گیری رفتار ترمودینامیکی گاز
- ✓ انجام آزمایش‌های مختلف خزشی به ویژه آزمایش‌های خزش سه محوره بر روی سنگ نمک منطقه نصرآباد کاشان با هدف بررسی رفتار سنگ نمک در برابر تغییرات دما، رطوبت و شرایط بارگذاری.

- ✓ در پی وقوع چندین حادثه در تاسیسات ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در سازندهای نمکی در دنیا، شبیه‌سازی این حوادث و تحلیل آنها به منظور جلوگیری از بروزشان در تاسیسات ذخیره‌سازی که در آینده در کشور احداث می‌شوند، ضروری به نظر می‌رسد.
- ✓ توسعه یک مدل رفتاری خزش سنگ نمک متناسب با شرایط سنگ‌های نمک ایران به ویژه نصرآباد کاشان.
- ✓ استفاده از سایر نرم‌افزارهای برای شبیه‌سازی رفتار مغار مثل Abaqus یا  $FLAC^{3D}$  و مقایسه نتایج.
- ✓ استفاده از کامل‌ترین مدل‌های رفتاری مثل مدل رفتاری M-D با در نظر گرفتن ویژگی خزش معکوس<sup>۱</sup>.

---

<sup>1</sup>Inverse creep

## منابع:

- آذین رضا، (۱۳۸۸)، "ذخیره سازی گاز طبیعی در مخازن تخلیه شده نفت و گاز"، مجله مهندسی شیمی ایران، سال هشتم، شماره چهارم، ص ۴۵-۵۲
- آذین رضا، فراش داود، (۱۳۹۰)، "نقش ذخیره سازی زیرزمینی در تبدیل زنجیره عرضه گاز طبیعی"، اولین کنفرانس مجازی ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، مهر ۱۳۹۰، ص. ۱۳-۲۴
- خبرگزاری انقلاب اسلامی (<http://enghelabe-eslami.com>) ۲۸ اسفند ۱۳۸۹
- جلالی، سید محمد اسماعیل، و افتخاری مهرداد. (۱۳۸۸). "بررسی امکان استفاده از فضاهای بزرگ در معادن زیرزمینی سنگ نمک به عنوان سازه های پدافند غیر عامل". هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس. ص. ۴۴۳-۴۴۸.
- خبرگزاری پانا نیوز (<http://www.pana.ir>)، ۲۸ آذر ۱۳۸۹
- داودآبادی ملیحه، رمضان زاده احمد، جلالی سید محمد اسماعیل، (۱۳۹۰)، "مقایسه مفاهیم ذخیره سازی گاز طبیعی در ساختارها و سازه های زیرزمینی"، اولین کنفرانس مجازی ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، مهر ۱۳۹۰، ص. ۳-۱۲
- ذخیره، ماهنامه الکترونیکی شرکت ذخیره سازی گاز طبیعی، مرداد ۱۳۹۰، سال دوم، شماره بیست و چهارم
- رفیعی حسین، (۱۳۸۷). "ذخیره سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی، ارتباط هندسه مغار، پارامترهای عملیاتی و رفتار مکانیکی"، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه باهنر کرمان، ۸۲ ص.
- زارعیان جهرمی، ا. (۱۳۸۸). "تحلیل گسیختگی لوله جداری ناشی از رفتار خزشی سنگ نمک در مغارهای نمکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه باهنر کرمان. ۱۱۵ ص.
- سلسبیلی محمد، (۱۳۸۸)، "کاربرد سامانه اطلاعات مکانی (GIS) در اکتشاف مخازن مناسب جهت ذخیره سازی گاز طبیعی در بخش شمال ایران مرکزی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران
- کشاوری صفی مریم، گنجویان محمدعلی، بحرودی عباس، کاوسی محمدعلی، باقری جواد، (۱۳۹۰)، "بررسی ساختار نمکی نصرآباد (کاشان) با نگرشی ویژه بر ذخیره سازی گاز"، اولین کنفرانس مجازی ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، مهر ۱۳۹۰، ص. ۵۱-۶۰
- عسگری امین، جلالی سید محمد اسماعیل، رمضان زاده احمد، (۱۳۹۰)، "مخاطرات ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در سازه های نمک و راهکارهای مقابله با آن"، اولین کنفرانس مجازی ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، مهر ۱۳۹۰
- عطائی محمد و عسگری امین، (۱۳۹۰)، "اولویت بندی روش های ذخیره سازی نفت خام با استفاده از روش تصمیم گیری سلسله مراتبی فازی (FAHP)"، مجله نمک، سال اول شماره دوم، پاییز ۱۳۹۰، ص ۱-۱۲
- قره چلو سعید، (۱۳۸۸)، "مرفولوژی گنبد های نمکی به عنوان یکی از منابع مهم نمک ایران"، اولین همایش ملی نمک، دانشگاه سمنان، ص ۳۶۲-۳۷۱
- کریمی نسب، سعید، جلالی فر، حسین، و رنجبر، حسین، (۱۳۸۸)، "مبانی ذخیره سازی مواد هیدروکربوری و ضرورت احداث مخازن زیرزمینی نفت خام در ایران"، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ص. ۱۴۹۱-۱۵۰۳

مرادی قصر علی، (۱۳۸۵)، "شبیه‌سازی عددی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ناحیه قم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیرکبیر

منشی‌زاده تهرانی، فرشاد، (۱۳۸۷)، "تحلیل رفتار تونل‌های سنگی با در نظرگیری اثر زمان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Allen, K., (1972), "**Eminence Dome–Natural Gas Storage in salt comes of age**". Journal of Petroleum Technology, pp 1299-1301.

ALLISON, H. (1992), "**Conceptual Solutions to Reduce Base Gas Requirements in Salt Dome Caverns**" Solution Mining Research Institute, Fall Meeting 1992, Houston, Texas

API 1114, (1994), "Design of Solution-Mined Underground Storage Facilities", first edition, June 1994

Arnold R.D. DeVries K.L. Neiland J.D. Tiruneh H., (2011), "**Cyclic Fatigue Effects on the Mechanical Properties of Salt**", SMRI Spring 2011 Technical Conference, Galveston, Texas, USA

Berest P., Beruad J.F., Greef V., Brouard B., Hertz E., Lheur C., (2011), "**Creep Closure Rate of a Shallow Cavern**", SMRI Spring 2011 Technical Conference, Galveston, Texas, USA

Berest, P. and Brouard, B., (2003), "**Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage**", Oil&Gas Science Technology- Rev. IFP, Vol. 58, pp 361-384.

Bernhardt H. Boor S. Micus W., (2011), "**New Developments in the Gas First Fill Process of Natural Gas Storage Caverns**", SMRI Fall 2011 Technical Conference, York, United Kingdom

Blecker J. Foltas F. Rolletke F.J., (1994), "**Conversion of oil caverns to gas storage at the etzel salt dome**", SMRI Fall Meeting, Hannover, Germany

British Standard EN 1918:3, "Gas supply systems-Underground gas storage, part3: Functional recommendations for storage in solution-mined salt cavities"

British Standard EN 1918:4, "Gas supply systems-Underground gas storage, part4: Functional recommendations for storage in rock caverns"

Broome, Scott T., (2009), "**Geomechanical Testing of MRIG-9 Core for the Potential SPR Siting at the Richton Salt Dome**", Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 : Sandia National Laboratories.

Brouard B. Berest P. Karimi-Jafari M., (2007), "**Onset of tensile effective stresses in gas storage caverns**", SMRI Fall 2007 Conference, Halifax, Canada

Brouard B. Berest P., (1999), "**A tentative classification of salts according to their creep properties**", Centre commun X, Mines, Ponts, URA 317 CNRS, October 12, 1999

Brouard B. Frangi A. Berest P., (2011), "**Mechanical Stability of a Cavern Submitted to High-Frequency Cycles**", SMRI Spring 2011 Technical Conference, Galveston, Texas, USA

Brouard B., Karimi-Jafari M., Berest P., and Durup G., (2007), "**Pressure Build-up in a Sealed Cavern: he Effect of a Gas Blanket**". SMRI Spring 2007 Conference. Basel, Switzerland

Colin P. Laguerie P. de, (1990), "Conversion from Hydrocarbons to Natural Gas Storage at Manosque", SMRI Fall Meeting 1990, Paris

DeVries K., (2006), "Improved Modeling of Bedded Salt Cavern Stability", GasTIPS, Winter Edition

DeVries K.D. and Neiland J.D., (1999), "Feasibility Study for Lowering the Minimum Gas Pressure in Solution-Mined Caverns Based on Geomechanical Analyses of Creep-Induced Damage and Healing", Spring 1999 SMRI Meeting, Las Vegas, Nevada, USA

DeVries K.L., Mellegard K.D. and Callahan G.D., (2002), "**salt Damage Criterion Proof-of-**



### Concept research”

- Devries K.L. Mellegard K.D. Callahan G.D. Goodman W.M. (2005). “**Cavern roof stability for natural gas storage in bedded salt**”. FINAL REPORT. Contract DE-FG26-02NT41651. prepared for United States Department of Energy
- Energy Information Administration, (2005), “U.S. Underground Natural Gas Storage Developments: (1995- 2005)”.
- Evans D. Stephenson M. Shaw R., (2009), “**The present and future use of ‘land’ below ground**”, , Land Use Policy 265 (2009) S302-S316, Elsevier
- Evans, D. J., (2008)a, “An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology”, British Geological Survey.
- Evans D.J.,(2008)b, “Accidents at UFS (Underground Fuel Storage) Sites and Risk Relative to other Areas of the Energy Supply Chain, with particular Reference to Salt Cavern Storage”, SMRI Fall 2008 Technical Conference, Galveston, Texas, USA
- Fokker P.A. (1995), “**The behavior of salt and salt cavern**”, PhD Thesis, Delft university, Netherlands
- Folle S.,(2006), “**Middle East Salt Deposits - Distribution and Potential Use**”, SOLUTION MINING RESEARCH INSTITUTE, Spring 2006 Conference, Brussels, Belgium
- Folle, S., (2010), “Presentation of Salt Structures and Considerations about their Genesis as a Basis for the Evaluation of their Economical Use”, SMRI Spring 2010 Technical Conference, Grand Junction, Colorado, USA
- Gaz de France, (1987), “Improvements in Solution Mining Techniques as Applied to Gas Storage Experienced by Gaz de France”, Research Report
- Geluk, M. C., Paar, W. A and Fokker, P. A., (2007), “**Salt**”, ,Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences. pp 283-294.
- Gillhause A. & Horvath P.L., (2008), “**Compilation of Geological and Geotechnical Data of Worldwide Domal Salt Deposits and Domal Salt Cavern Fields**”, Solution Mining Research Institute, KBB-Project-No.: 7007-02, April 2008
- Haddenhorst H.G. Quast P., (1992), “**Underground Storage of Natural Gas in West Germany**”. Solution Mining Research Institute, Fall Meeting 1992, Houston, Texas
- Hardy H.R. Chabannes C.R. Mrugala M., (1983), “Laboratory and Theoretical Studies Relative to the Design of Salt caverns for the storage of natural gas”, Sixth International Symposium on salt
- Hoffler, R.L. and Kubler. M., (2007), “Demand for Storage of Natural Gas in Northwestern Europe: Trends 2005-30”
- Istvan J. A. Querio C. W.,(1983), “**Storage of Natural Gas in Salt Caverns**”, Sixth International Symposium on Salt, 1983-Vol. II
- Jahani S., (2005), “Salt tectonics, folding and faulting in the Eastern Fars and southern offshore provinces (Iran)”, PhD Thesis, Cergy University, France
- Jeremic, M. L., (1994), “**Rock mechanics in salt mining**” .Rotherdam: A. A.Balkema.
- Johnson, David. F. (2004), “**Underground Oil Storage Technology**”. Strategic Petroleum Reserve, U.S. Department of Energy. International oil stockpiling symposium “Petroleum Stockpiling In the 21st Century”. Houston USA.
- Karimi-Jafari M.,(2007), “**Sur le comportement transitoire des cavities salines profondes**”, PhD Thesis, ÉCOLE POLYTECHNIQUE university, Paris (in France)
- Kepplinger J. Crotofino F. Donadei S. Wohlers M., (2011), “**Present trends in compressed air energy and hydrogen storage in Germany**”, SMRI Fall 2011 Technical Conference, York, United Kingdom
- Kunstman A.S. Urbanczyk K.M. Gaska K., 2004), “Pressure and Temperature Changes at the

- Wellhead of Natural Gas Storage Cavern - Long-term Computer Simulation Compared with Field Data”, SMRI Fall 2004 Conference, Berlin, Germany
- Leith, W., (2001), “Geologic and Engineering Constraints on the Feasibility of Clandestine Nuclear Testing by Decoupling in Large Underground Cavities”, Open file report, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 28 P.
- Lestringant C. Berest P. Brouard B., (2010), “**Thermo-mechanical effects in compressed air storage (CAES)**”, SMRI Fall 2010 Technical Conference, Leipzig, Germany
- LOCAS “**User’s Guide**”. Version 1.1.35. June 2011
- Lux K.H. Rokahr R.B., (1990), “International comparison of rock mechanical design concepts for salt cavities”, SMRI fall meeting, Paris, France
- Martinez J.D., (1989), “Salt dome caprock characteristics, origin and influence in salt dome utilization”, SMRI Spring Meeting 1989, new Orleans, Louisiana, USA
- Munson D.E., (2004), ‘M-D constitutive Model Parameters Defined for Gulf Coast Salt Domes and Structures’. ARMA/NARMS 04-549
- Natural Gas Storage Company (NGSC), **Invitation to Tender**, Tender No: (89/65/SH.G.Z/203)
- Neiland J.D., (2008), “**Salt Cavern Thermodynamics—Comparison Between Hydrogen, Natural Gas, and Air Storage**”, SMRI Fall 2008 Technical Conference, Galveston, Texas, USA
- Nelson P.E. Van Sambeek L.L., (2003), “State-of-the-Art-Review and New Techniques for Mechanical Integrity Tests of (Gas-filled) Natural Gas Storage Caverns”, SMRI Research Project Report 2003-2
- Pfeifle T. W., Vogt T. J. Brekken G. A., (1996), “Correlation of Chemical, Mineralogic, and Physical Characteristics of Gulf Coast Dome Salt to Deformation Properties and Strength Properties”, SMRI Spring Meeting 1996, Houston
- Plaat, H. (2009), “**Underground gas storage: Why and how**”, From: EVANS, D.J. & CHADWICK, R. A. (eds) *Underground Gas Storage: Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe*. The Geological Society, London, Special Publications, 313, 25–37.
- Rolfs O. Schmidt U. Zapke M., (2006), “**The Planning of a Gas Storage Facility Basis for an Investment Decision**”, SMRI Fall 2006 Conference, Rapid City, South Dakota, USA
- Saygun, I., (2008), “CompuRet Modeling of the Initial Cavern for Beypazari Trona Ore On the Basis Of Leaching Rates, Insoluble Contents and Thickness of Trona Layer”, The Graduate School of Natural and Applied Science of Middle East Technical University, Master Thesis,
- Sinha R.S., (1989), “**Underground Structures- Design and Instrumentation**”, Elsevier Science Publisher B.V.
- Slizowski J. Urbanczyk K. Wojtuszevska K. (2009), “**Convergence Estimation for Gas Storage Caverns Field**”, SMRI Spring 2009 Technical Conference, Krakow, Poland
- Sobolik S.R. Ehgartner B.L., (2006), “**Analysis of Simple Cavern Shapes for the Strategic Petroleum Reserve**”, SMRI Fall 2006 Conference, Rapid City, South Dakota, USA
- Staudtmeister K. and Zapf D., (2010), “**Rock Mechanical Design of Gas Storage Caverns for Seasonal Storage and Cyclic Operations**”, SMRI Spring 2010 Technical Conference, Grand Junction, Colorado, USA
- Staudtmeister K. Zapf D., (2009), “Aspects for the Design of Gas Caverns order Region of Salt Domes – Initial Conditions and Assumption”, SMRI Spring 2009 Technical Conference, Krakow, Poland
- Jackson M.P. Cornelius R.R. Craig C.H. Gansser A. Stocklin G. Talbot C.J., (1990), “**salt diapirs of the great kavir, central Iran**”. Published by Geological society of America
- Thompson M., (2008), “**Dewatering a Salt Cavern Using a Submersible Pump**”, SMRI Spring 2008 Meeting, Porto, Portugal
- Thoms, R.L. , Gehle, R.M., (2000), “**A Brief History of Salt Cavern Use**”, AGM, INC, College

- Station, Texas, U.S.A
- Van Sambeek L., (1998), “**solution mining of salts**”, 100th Annual General Meeting of CIM, Montreal, Quebec, Canada
- Warren, J. K., (2006), “Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons”, Springer, 1035 P.
- Wetchasat, K., (2002), “Assessment of the Mechanical Performance of rock Salt Formation for Nuclear Waste Repository in Northern Thailand”, Master of Engineering in Geotechnology, Suranaree University of Technology.
- White R.M. Spiers C.A., (1983), “**Characterization of Salt Domes for Storage and Waste Disposal**”, Sixth International Symposium on Salt, 1983-Vol.I
- Wolf J. A. (2008).“**A plasticity model to predict the effects of confinement on concrete**”. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology, Chapter 2
- www. Wikipedia.com\ Natural gas storage
- www.NGdir.ir
- Zander D., (2010),“High Frequency Cycling of Gas Storage Caverns Phase I Development of Appropriate Lab Tests & Design Criteria”, SMRI Research Report RR2010-01

## پیوست

جدول (A): معادلات خزش پایای سنگ نمک. R: ثابت جهانی گاز،  $T^* = 1\text{ K}$ ،  $\sigma^* = 1\text{ MPa}$

| معادله                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | مدل خزشی                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| $\dot{\epsilon}_S = A \cdot \exp[-Q/(RT)] \cdot (\sigma/\sigma^*)^n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | BGRa                    |
| $\dot{\epsilon}_S = \{A_1 \cdot \exp[-Q_1/(RT)] + A_2 \cdot \exp[-Q_2/(RT)]\} \cdot (\sigma/\sigma^*)^n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | BGRb                    |
| $\dot{\epsilon}_S = A \cdot \exp[-Q/(RT)] \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^2 \cdot \sinh(C_1 \cdot C_2 \frac{T}{T^*} \cdot \sigma)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Erlangen                |
| $\dot{\epsilon}_S = A \cdot \exp[-Q/(RT)] \cdot (\sigma/\sigma^*)^n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Carter                  |
| $\dot{\epsilon}_S = \dot{\epsilon}_{S1} + \dot{\epsilon}_{S2} + \dot{\epsilon}_{S3}$<br>$\dot{\epsilon}_{S1} = A_1 \cdot \exp[-Q_1/(RT)] \cdot (\sigma/\mu)^{n_1}$<br>$\dot{\epsilon}_{S2} = A_2 \cdot \exp[-Q_2/(RT)] \cdot (\sigma/\mu)^{n_2}$<br>$\dot{\epsilon}_{S3} = H(\sigma - \sigma_0) \cdot \left\{ B_1 \cdot \exp\left(-\frac{Q_1}{RT}\right) + B_2 \cdot \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \right\} \cdot \sinh\left(q \cdot \frac{\sigma - \sigma_0}{\mu}\right)$ | Munson                  |
| $\dot{\epsilon}_S = D \cdot \exp\left\{-\frac{Q_{CS}}{RT} \cdot \left[\ln(A) - \ln\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)\right]\right\} = D \cdot \left[\frac{\sigma}{\mu} \cdot \frac{1}{A}\right]^{Q_{CS}/RT}$                                                                                                                                                                                                                                                                     | Wawersik                |
| $\dot{\epsilon}_S = \sigma / [C \cdot \exp(m \cdot \sigma)]$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | LUBBY2                  |
| $\dot{\epsilon}_S = C \cdot \exp\left(-\frac{Q_2}{RT}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{E(T)}\right)^2 \cdot \sinh\left(b \cdot \Delta\alpha \cdot \frac{\sigma_{eff}}{(M \cdot k \cdot T)}\right)$                                                                                                                                                                                                                                                                            | Composite model, Hampel |

جدول (B): معادلات خزش گذرا سنگ نمک. R: ثابت جهانی گاز،  $\sigma^* = 1 \text{ MPa}$ ،  $T^* = 1 \text{ K}$  و  $t_N = 1 \text{ d}$

| معادله                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | مدل                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| $\varepsilon_{tr} = K \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \cdot \left(\frac{t}{t_N}\right)^m$ or $\varepsilon_{tr} = A \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^\beta \cdot \varepsilon_{tr}^{-\mu}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Menzel and Schreiner    |
| $\varepsilon = \varepsilon_{tr} + \varepsilon_{st}$ $\varepsilon_{tr} = \left(\frac{\sigma}{B}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{B}{A} \cdot \frac{t}{t_N}\right)\right]$ $\varepsilon_{st} = \left(\frac{\sigma}{C}\right) \cdot \left(\frac{t}{t_N}\right), \quad t_N = 1 \text{ d}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | LUBBY2                  |
| $\varepsilon_{tr} = A \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n \cdot \left(\frac{t}{t_N}\right)^m \cdot \left(\frac{T}{T^*}\right)^p$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Carter                  |
| $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{2G} + \left(\frac{1}{3K} \cdot \frac{1}{2G}\right) \dot{\sigma} + k_T \left[1 - \frac{W_T(t)}{H(\sigma)}\right] \frac{\partial F}{\partial \sigma} + k_S \frac{\partial S}{\partial \sigma}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Cristescu and Hunsche   |
| $\dot{\varepsilon} = F \cdot \dot{\varepsilon}_S$ $F = \exp\left[+\Delta \left(1 - \frac{\zeta}{\varepsilon^*}\right)^2\right] \text{ for } \zeta < \varepsilon^*$ $F = 1 \text{ for } \zeta = \varepsilon^*$ $F = \exp\left[+\delta \left(1 - \frac{\zeta}{\varepsilon^*}\right)^2\right] \text{ for } \zeta > \varepsilon^*$ $\dot{\varepsilon}_S = \dot{\varepsilon}_{S1} + \dot{\varepsilon}_{S2} + \dot{\varepsilon}_{S3}$ $\Delta = \alpha + \beta \cdot \log\left(\frac{\sigma}{\mu}\right) \quad \delta = \text{const.} \quad \varepsilon^* = K_0 \cdot \exp(c \cdot T) \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^m \quad \zeta = (F - 1) \cdot \dot{\varepsilon}_S$ | Munson                  |
| $\dot{\varepsilon} = \frac{\nu_0}{1 + F \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot \frac{b}{M} \cdot \rho \cdot \sinh\left(\frac{b \cdot \Delta \alpha \cdot \sigma_{eff}}{M \cdot k \cdot T}\right)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Composite model, Hampel |
| $\varepsilon = \frac{\hat{S}}{2G} + \frac{\hat{I}1}{9K_b} + A \left[\frac{\hat{X}_{ue} - R}{K}\right]^N + g_1 \left[1 - \frac{\varepsilon_e^i}{\varepsilon_L}\right]^{-g_2} \left[\frac{\sqrt{J_2} - F_0 F_*}{F_r}\right]^M \frac{\partial Q}{\partial \hat{\sigma}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Aubertin                |

جدول (C): پیشینه مطالعات طراحی مکانیک سنگی برای مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی

| سال  | محل پروژه | محقق / محققان                 | موضوع                                                                     |
|------|-----------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ۱۹۸۲ | آمریکا    | Hardy                         | طراحی و پایش پایداری مغارهای نمک با روش‌های تجربی                         |
| ۱۹۸۷ | فرانسه    | Gaz de France                 | معدنکاری انحلالی                                                          |
| ۱۹۸۸ | فرانسه    | Hugout & Chaudan              | بررسی اثر شکل و تعداد مغارها بر رفتار خزشی                                |
| ۱۹۸۹ | آمریکا    | Matinez                       | تاثیرات پوش سنگ بر گنبد‌های نمک                                           |
| ۱۹۹۰ | آلمان     | Staudtmeister & Struck        | تعیین معیارهای جلوگیری از شکست خزشی                                       |
| ۱۹۹۲ | آمریکا    | Allison                       | بررسی اثر کاهش گاز پایه در مغارهای نمک                                    |
| ۱۹۹۳ | آمریکا    | Serata & Mehta                | طراحی و پایداری مغارهای ذخیره سازی هوای فشرده                             |
| ۱۹۹۳ | آمریکا    | Ratigan et al.                | بررسی جنبه‌های مکانیک سنگی                                                |
| ۱۹۹۴ | آمریکا    | Fernandez                     | بررسی اصول مکانیک سنگ                                                     |
| ۱۹۹۶ | کانادا    | Adams                         | تعیین فشار بهره برداری با استفاده از مفاهیم مکانیک سنگی و روش‌های عددی    |
| ۱۹۹۷ | روسیه     | Avdeev et al.                 | تحلیل پایداری                                                             |
| ۱۹۹۷ | فرانسه    | Brouard et al.                | اثر معدنکاری انحلالی بر رفتار مکانیکی مغارهای نمکی                        |
| ۱۹۹۷ | روسیه     | Shafarenko et al.             | تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی                           |
| ۱۹۹۷ | آلمان     | Krieter et al.                | بررسی اثر انواع سیکل‌های ذخیره سازی بر همگرایی مغار                       |
| ۱۹۹۸ | آلمان     | Rokahr et al.                 | بررسی تاثیر فشار بیشینه بر رفتار مکانیکی مغار                             |
| ۱۹۹۹ | آمریکا    | DeVries & Neiland             | بررسی امکان پذیری کاهش فشار کمینه مغارهای نمک                             |
| ۲۰۰۲ | آمریکا    | Istvan et al.                 | بررسی فنی و اقتصادی ذخیره سازی گاز طبیعی در مغارهای نمک                   |
| ۲۰۰۲ | آمریکا    | Cole                          | بررسی تاثیرات بلند مدت ذخیره سازی گاز طبیعی با فشار بیشینه در مغارهای نمک |
| ۲۰۰۳ | آلمان     | Staudtmeister & Scheibenhofer | تحلیل مغارهای با فشار داخلی زیاد                                          |
| ۲۰۰۳ | آمریکا    | Nelson & Van Sambeek          | مطالعه تست سلامت مخصوص مغارهای ذخیره سازی گاز طبیعی                       |
| ۲۰۰۴ | آلمان     | Karl-Heinz et al.             | تعیین تاثیر گسل بر فشار بهره برداری مغارهای نمک                           |
| ۲۰۰۴ | آلمان     | Ralf et al.                   | تحلیل عددی مغارهای نمک هانتورف در ارتباط با فشار بیشینه داخلی             |
| ۲۰۰۴ | لهستان    | Andrzej el al.                | بررسی تغییرات دمایی در سازند نمکی اطراف مغار                              |
| ۲۰۰۶ | آمریکا    | Neiland & Ratigan             | ارزیابی ژئومکانیکی مغارهای ذخیره سازی گاز در خلیج مکزیک                   |
| ۲۰۰۶ | فرانسه    | Brouard et al.                | مطالعه عددی رفتار جداره بتنی چاه تحت تغییرات سریع و بزرگ فشار             |
| ۲۰۰۷ | فرانسه    | Brouard et al.                | تحلیل عددی و تجربی معیارهای پایداری مغار با کمک نرم افزار                 |

| سال  | محل پروژه | محقق / محققان        | موضوع                                                                                              |
|------|-----------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      |           |                      | LOCAS                                                                                              |
| ۲۰۰۷ | آمریکا    | Smith                | مطالعه پارامتریک مغارهای نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی                                                 |
| ۲۰۰۸ | فرانسه    | Berest et al.        | بررسی اثر تنش‌های انحرافی کوچک بر رفتار خزشی مغارهای نمک                                           |
| ۲۰۰۸ | آمریکا    | Thompson et al.      | بررسی روش‌های آبرانی در مغارهای نمک                                                                |
| ۲۰۰۸ | آلمان     | Rokahr et al.        | بررسی اثر سیکل‌های بارگذاری مختلف بر رفتار مکانیکی مغارهای نمکی در اعماق کم                        |
| ۲۰۰۸ | آمریکا    | Neiland              | بررسی و مقایسه ذخیره سازی هیدروژن، گاز طبیعی و هوای فشرده در مغارهای نمک از لحاظ اصول ترمودینامیکی |
| ۲۰۰۸ | فرانسه    | Karimi-Jafari et al. | بررسی تحلیلی نشست در تاسیسات ذخیره سازی                                                            |
| ۲۰۰۹ | آلمان     | Staudtmeister & Zapf | بررسی اثر مرزهای گنبد نمک بر رفتار مکانیکی مغارهای ذخیره سازی گاز نزدیک به آن                      |
| ۲۰۰۹ | لهستان    | Slizowski et al.     | تخمین افت حجم مغارهای ذخیره سازی گاز با روش‌های تحلیلی                                             |
| ۲۰۰۹ | آمریکا    | Bauer & Sobolik      | مقایسه آهنگ همگرایی مغارهای نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی و هوای فشرده                                 |
| ۲۰۱۰ | فرانسه    | Lestringant et al.   | بررسی ترمودینامیکی مغارهای نمک ذخیره سازی هوای فشرده و ارائه معادلات تحلیلی                        |
| ۲۰۱۰ | آمریکا    | Bauer et al.         | بررسی آزمایشگاهی اثر بارگذاری دوره‌ای بر تغییر شکل سنگ نمک                                         |
| ۲۰۱۰ | آلمان     | Scheibenhofner       | طراحی تست‌های آزمایشگاهی و معیارهای طراحی مغارهای ذخیره سازی گاز با قرکانس فشار بهره برداری بالا   |
| ۲۰۱۰ | آلمان     | Staudtmeister & Zapf | طراحی و مقایسه مغارهای ذخیره سازی گاز طبیعی با سیکل فصلی و روزانه از دیدگاه مکانیک سنگ             |
| ۲۰۱۰ | آلمان     | Dusterloh & Lux      | مقایسه مغارهای ذخیره سازی گاز طبیعی و هوای فشرده از دیدگاه‌های مختلف                               |
| ۲۰۱۱ | انگلیس    | Rokahr et al.        | طراحی مغار ذخیره سازی گاز در نمک‌های لایه‌ای                                                       |
| ۲۰۱۱ | انگلیس    | Pellizzaro et al.    | تحلیل پایداری مغارهای نمک ذخیره سازی گاز در نمک‌های لایه‌ای                                        |
| ۲۰۱۱ | فرانسه    | Karimi-Jafari et al. | بررسی رفتار مغارهای نمک یا سیکل‌های متعدد                                                          |
| ۲۰۱۱ | آمریکا    | Rodger et al.        | بررسی اثر خستگی سیکل‌های بهره برداری بر رفتار مکانیکی سنگ نمک                                      |
| ۲۰۱۱ | فرانسه    | Berest et al.        | بررسی آهنگ همگرایی مغارهای نمکی واقع در اعماق کم                                                   |
| ۲۰۱۱ | آلمان     | Drezen & Kurl-Heinz  | طراحی مغارهای نمک ذخیره سازی گاز با سیکل سریع بهره برداری                                          |
| ۲۰۱۱ | فرانسه    | Brouard et al.       | تحلیل پایداری مغارهای نمک با سیکل سریع بهره برداری                                                 |
| ۲۰۱۱ | آرژانتین  | Colome & Monardez    | شبیه سازی رفتار مغارهای نمک با استفاده از نرم افزار FLAC <sup>3D</sup>                             |

جدول (D): پروژه‌ها و مقالات که در آنها از نرم‌افزار LOCAS به شکل مستقیم و یا غیر مستقیم استفاده شده است

| year          | Titles                                                                                                                      | Prepared For                                                  |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Projects      |                                                                                                                             |                                                               |
| 2011          | Salt-Cavern Abandonment Field Test at Carresse – Update of the SMRI Research Report 2006-1.                                 | SMRI                                                          |
| 2010          | Tightness tests in Lorraine, France                                                                                         | Total E&P France and CSME                                     |
| 2009          | Geomechanical evaluation of the Preesall salt at Fleetwood for the construction of natural gas caverns                      | Canatxx Gas Storage Ltd., UK                                  |
|               | Long-term behavior of Carresse-Cassaber solution-mined caverns                                                              | Total E&P France                                              |
|               | Ridge (Texas) Dow-7 Geomechanical evaluation                                                                                | DOW Chemical Company USA                                      |
|               | in situ tests – Gellenoncourt, France                                                                                       | CSME                                                          |
| 2007          | Tightness Test Analysis                                                                                                     | Dow Chemical, USA                                             |
|               | Study of the long term behavior of the Tersanne Te02 gas storage cavern                                                     | Gaz de France                                                 |
|               | Modelling of the 1873 collapse at the Varangéville salt Mine                                                                | Géodéris                                                      |
| 2006          | Salt-Cavern Abandonment Field Test in Carresse. SMRI Project Report n°2006-1                                                | SMRI                                                          |
|               | Determination of the maximum allowable pressure at wellhead for Gaz de France caverns                                       | Gaz de France                                                 |
|               | Analysis of effects of tightness tests performed by Gaz de France on wellcement                                             | Gaz de France                                                 |
|               | Determination of the maximum allowable pressure at wellhead, Chemery Facility                                               | Gaz de France                                                 |
|               | Determination of the maximum allowable pressure at wellhead, Manosque facility                                              | Gaz de France                                                 |
|               | Determination of the maximum allowable pressure at wellhead, Etrez facility                                                 | Gaz de France                                                 |
|               | Determination of the maximum allowable pressure at wellhead, Tersanne facility                                              | Gaz de France                                                 |
| 2005          | Improvements in Mechanical Integrity Tests for Solution-Mined Caverns Used for Mineral Production or Liquid-Product Storage | SMRI                                                          |
|               | Compressibility test, Hauterives facility, France                                                                           | Chloralp (Arkema)                                             |
|               | Analytical and numerical modeling of water-filled annulus submitted to mechanical and thermal loadings                      | Gaz de France                                                 |
| 2004          | Analysis of geomechanical behavior of Carresse caverns, France                                                              | Total E&P                                                     |
|               | Analysis of situ creep test on SPR3 cavern at Carresse                                                                      | Total E&P                                                     |
|               | Numerical computations of the long term behavior of caverns at Carresse using LOCAS software                                | Total E&P                                                     |
|               | Numerical modeling of long-term behavior of Carresse caverns                                                                | Total E&P                                                     |
| Papers Titles |                                                                                                                             |                                                               |
| 2012          | Mechanical stability of a salt cavern submitted to high-frequency cycles                                                    | 7 <sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt |
| 2011          | Multi-cycle gas storage in salt caverns                                                                                     | SMRI                                                          |



| year | Titles                                                                                                      | Prepared For                                                      |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|      | Mechanical stability of a salt cavern submitted to high-frequency cycles                                    | SMRI                                                              |
| 2010 | Thermo-mechanical effectsIn compressed air storage (CAES)                                                   | SMRI                                                              |
|      | Effects of atmospheric pressure fluctuations in a closed cavern                                             | SMRI                                                              |
|      | The 1873 collapse at the Varangéville salt mine                                                             | Presses des Ponts et Chaussées                                    |
| 2009 | MIT interpretations can be wrong: apparent and actual leaks                                                 | 9 <sup>th</sup> Int. Symp.on Salt                                 |
|      | The effect of small deviatoric stresses on cavern creep behavior                                            | 9 <sup>th</sup> Int. Symp.on Salt                                 |
|      | A brine outflow test in a Gellenoncourt cavern                                                              | SMRI                                                              |
| 2008 | Long-term behavior of salt mines and salt caverns: Norton-Hoff or Lemaitre model?                           | Rev. Fr. Géotech                                                  |
|      | The 1873 Collapse of the Saint-Maximilien Panel at the Varangéville Salt Mine                               | Int. J. Rock Mech. Min. Sc                                        |
|      | The effect of small deviatoric stresses on cavern creep behavior                                            | SMRI                                                              |
|      | Adiabatic temperature changes in an oil-filled cavern                                                       | SMRI                                                              |
|      | The 1873 collapse at the Varangéville salt mine                                                             | Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur |
|      | Mechanical Behavior of a Marly Floor in two Mines where Brine or Water was abundant                         | SMRI                                                              |
|      | Subsidence, sinkholes and craters above salt caverns                                                        | SMRI                                                              |
|      | Interpretation of Mechanical Integrity Tests                                                                | ISRM International Symposium                                      |
| 2007 | Transient behavior of salt caverns                                                                          | Int. J. Rock Mech. Min. Sc.                                       |
|      | Deep salt-cavern abandonment                                                                                | 6 <sup>th</sup> Conf. Mech. Beh.Salt                              |
|      | Transient behavior of salt caverns                                                                          | 6 <sup>th</sup> Conf. Mech. Beh.Salt                              |
|      | Pressure Build-up in a Sealed Cavern: Effect of a Gas Blanket                                               | SMRI                                                              |
|      | Onset of tensile effective stresses in gas storage caverns                                                  | SMRI                                                              |
|      | Effect of natural convection on blanket dissolution rate in a cavern                                        | SMRI                                                              |
|      | Thermal Effects in Salt Caverns                                                                             | SMRI                                                              |
| 2006 | Brine Warming in a Sealed Cavern: What can be done?                                                         | SMRI                                                              |
|      | In situ Mechanical Tests in Salt Caverns                                                                    | SMRI                                                              |
|      | Using LOCAS Software to Better Understand the Behavior of Salt Caverns                                      | SMRI                                                              |
|      | computations of the mechanical behavior of cemented casings submitted to large and fast pressure variations | SMRI                                                              |
|      | Transient behavior of salt caverns                                                                          | SMRI                                                              |
|      | Assessment of Leaks in the vicinity of the casing of a Salt Cavern                                          | JNGG                                                              |
| 2005 | Transient Creep in Salt Caverns                                                                             | Conf. on Mech. and Materials                                      |
|      | In situ mechanical tests in salt caverns                                                                    | SMRI                                                              |

| year | Titles                                                               | Prepared For                   |
|------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|      | Interpretation of Mechanical Integrity Tests                         | SMRI                           |
|      | Long-term behavior of salt caverns                                   | EGU General Assembly           |
|      | Deep salt cavern abandonment                                         | Post-Mining                    |
| 2004 | Dry mine abandonment                                                 | SMRI                           |
|      | Salt mine abandonment, isfloodingrequired ?                          | Presses des Ponts et Chaussées |
|      | Decommissioning and abandonment procedure of LPG caverns at Carresse | SMRI                           |
|      | An in situ creep test in advance of abandoning a salt cavern         | SMRI                           |

## **Abstract**

Accelerated growing up of energy consumption in the world has been made humanities to be more dependent to energy sources. The consumption of natural gas as one of the most important energy sources has been grew up rapidly in last decade. Regarding gas consumption in Iran and so for other countries, limitation existence in natural gas production to consumption chain has been faced up such countries to energy shortage especially in cold months of the year. The main purpose of gas storage is to overcome this problem.

Nowadays, underground natural gas storage especially in salt formations (for its many advantages) has been used more and more in recent years. Existence of huge and favorite salt formations in Iran has been prepared good situation to use this underground storage method.

Consideration stability of salt cavern, the integrity of this underground space which used for gas storage purpose is vital. Various parameters such as cavern geometry and geologic parameters, operation conditions and geomechanic properties of surrounding rock of cavern has effect on behavior of this underground space. The purpose of this study is investigation of the manner of these parameters on stability of salt cavern under various situations by using LOCAS software. LOCAS is finite element software specially dedicated to salt caverns. The results of this study show that cavern depth, minimum and maximum operation pressures and creep properties of salt rock respectively are most important parameters which are effect on stability of salt caverns.

**Keywords:** Salt cavern, Underground storage, Natural gas, Stability, Salt dome



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics**

## **Stability Analysis of Natural Gas Storage in Salt Caverns**

**Amin Asgari**

Supervisors:

**Dr. Seyed-Mohammad Esmaeil Jalali**

**Dr. Ahmad Ramezan Zadeh**

Advisors:

**Dr. Hossein Jalalifar**

**Farid Farmani**

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)**

**In  
Mining Engineering**

January 2012