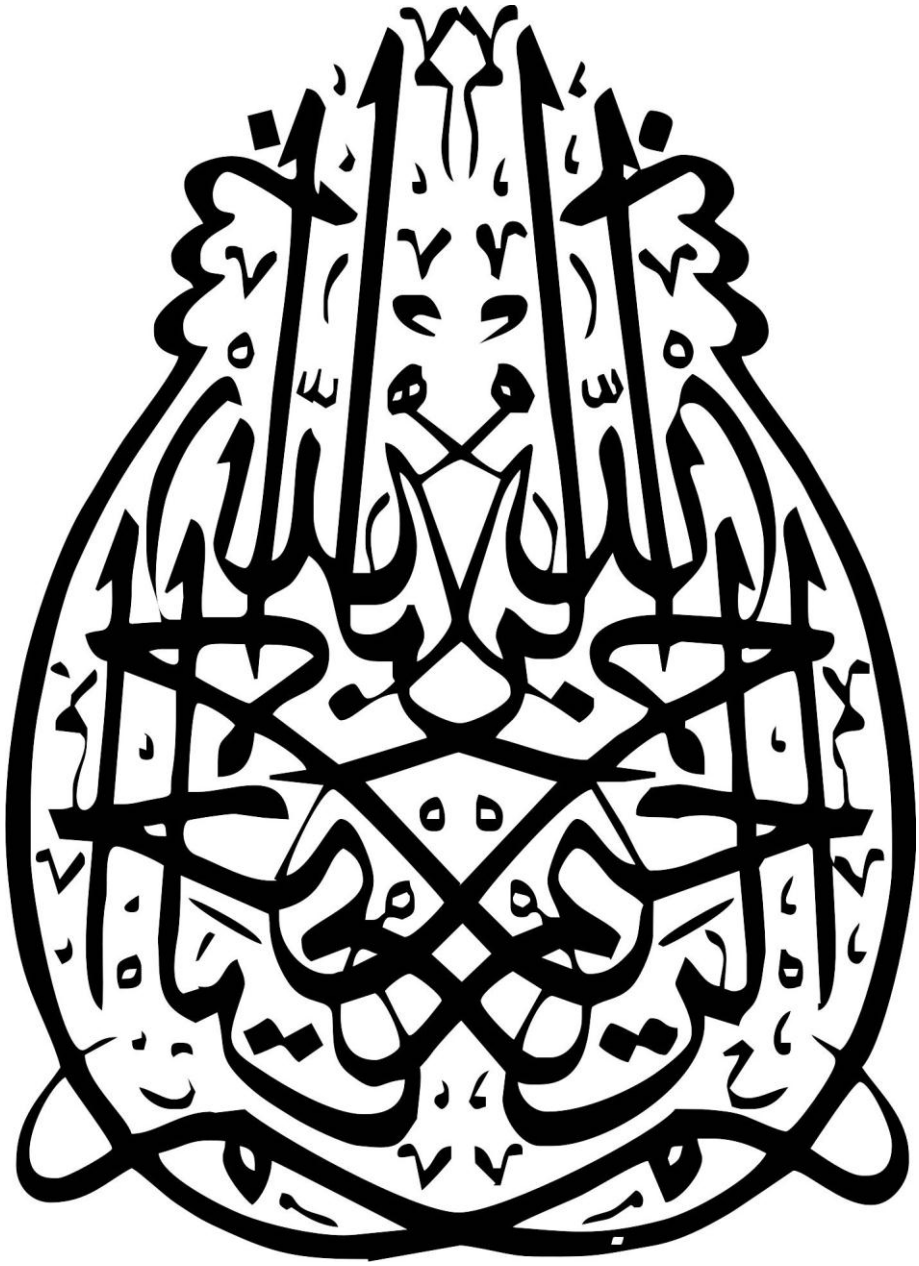

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل پایداری مغار نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی

امین عسگری

اساتید راهنما :
دکتر سید محمداسماعیل جلالی
دکتر احمد رمضان‌زاده

اساتید مشاور:
دکتر حسین جلالی‌فر
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 ذخیره‌سازی 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.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
سید محمد اسماعیل جلالی		حسین جلالی‌فر	
احمد رمضان‌زاده		فرید فرمانی	

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

تقدیم به

وسعت قلب پدرم

که آرامش را در سینه‌ام می‌نشاند 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 ذخیره‌سازی 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 .

۱۳۹۰/۱۱/۱٤

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 پایان‌نامه

- عسگری امین، جلالی سید محمد اسماعیل، رمضان زاده احمد، (۱۳۹۰)، **"مخاطرات ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در سازندهای نمک وراهکارهای مقابله با آن"**، اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی 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. شبیه‌سازی های 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

۱-۲ ضرورت ذخیره سازی گاز طبیعی ۲

۱-۳ سابقه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ۶

۱-۴ ضرورت ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سازندهای نمکی ۷

۱-۵ اهداف تحقیق ۹

۱-۶ ساختار تحقیق ۱۱

فصل دوم: روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

۲-۱ مقدمه ۱۴

۲-۲ روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ۱۵

۲-۲-۱ مخازن تهی شده گاز و نفت ۱۶

۲-۲-۲ آبخوان‌ها ۱۸

۲-۲-۳ مغارهای سنگی با پوشش ۱۹

۲-۲-۴-۱ ذخیره‌سازی گاز طبیعی درمغارهای نمکی ۲۱

۲-۲-۴ سایر روش‌ها ۳۳

۲-۳ مقایسه روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ۳۳

۲-۴ جمع بندی ۳۶

فصل سوم: پتانسیل‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در سازندهای نمکی ایران

۳- ۱ مقدمه ۳۹

۳-۲ کلیاتی در موردگنبدهای نمکی ۳۹

۳-۳ معیارهای انتخاب گنبد نمکی مناسب برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی ۴۳

۳-۳-۱ شرایط سطحی ۴۳

۳-۳-۲ شرایط زیرسطحی ۴۵

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

فصل چهارم: تبیین پارامترهای طراحی مغارهای نمکی

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

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

فصل پنجم: تحلیل پایداری مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی

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

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

۵-۴-۲-۵ ضریب خزش ۱۴۴
۵- ۵ جمع‌بندی ۱۴۵

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۵۰
۶-۲ پیشنهادات ۱۵۲
منابع ۱۵۴

فهرست اشکال

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

شکل (۴-۳): 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 (۴-۵): فاکتور تراکم‌پذیری گاز متان بر حسب تابعی از دما (۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد) و فشار(۰ تا ۳۰ مگاپاسکال) ۷۳

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

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

شکل (۴-۸): ضخامت ناحیه تحت تاثیر Δr از دیواره مغار تا ناحیه پیک بر حسب تابعی از دوره سیکل بهره‌برداری ۷۶

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

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)..... ۸۳

شکل (۴-۱۱): دسته بندی روش‌های عددی ۸۵

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

شکل (۵-۳): نحوه مش‌بندی مدل ۹۷

شکل (۵-۲): مشخصات هندسی مدل مرجع ۹۷

شکل (۵-۴): مش‌بندی مدل مرجع ۹۸

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

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

شکل (۵-۷): تبادل گرمایی میان گاز و دیوارهمغار ۱۰۲

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

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

شکل (۵-۱۰): وضعیت تنش بیشینه اصلی در راستای شعاعی از مرکز مغار مرجع در عمق ۱۰۰۰ متر۱۰۷

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=۱، H:D=۵ و H:D=۹ با فشار بهره‌برداری (۰/۲- ۰/۸۵فشار 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 (H:D= ۱تا۹) .۱۱۹
شکل (۵-۲۴): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای شکل‌های مختلف مغار (H:D= ۱تا۵)، 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 مختلفبر اساس معیار دوریس ۱۲۱
شکل (۵-۲۶): نوسان دمایی مغار برای دو حجم ۴۰۰ و ۸۰۰ هزار متر مکعبدر عمق ۱۰۰۰ متری و فشار بهره‌برداری (۰/۲- ۰/۸۵فشار 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 ۱۰۰۰متری بر اساس معیار دوریس ۱۲۳
شکل (۵-۳۱): آهنگ افت حجم نسبی مغار برای مغارهای با فاصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰متر ۱۲۴
شکل (۵-۳۲): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی برای مغارهای با فصله‌داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰متر ۱۲۴
شکل (۵-۳۳): وضعیت تنش بیشینه اصلی در پاشنه چاه برای مغارهای با فاصله داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰متر ۱۲۵
شکل (۵-۳۴): وضعیت اتساع در پاشنه چاه برای مغارهای با فاصله داری ۳۰۰ و ۱۰۰۰متر بر اساس معیار دوریس ۱۲۵
شکل (۵-۳۵): نوسان دمایی مغار برای سه فشار کمینه مختلف ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴فشار روباره در پاشنه چاه ۱۲۶
شکل (۵-۳۶): آهنگ افت حجم نسبی مغار کروی (H:D=۱) با فشارهای کمینه (۰/۲ و ۰/۴فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵فشار روباره در پاشنه چاه) ۱۲۶
شکل (۵-۳۷): آهنگ افت حجم نسبی مغار سیلندری (H:D=۳) برای دو فشار کمینه (۰/۲ و ۰/۴فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵فشار روباره در پاشنه چاه)..... ۱۲۷
شکل (۵-۳۸): احتمال اتساع در پاشنه چاه برای دو فشار کمینه (۰/۲ و ۰/۴فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵فشار روباره در پاشنه چاه) بر اساس معیار دوریس ۱۲۷
شکل (۵-۳۹): نوسان دمایی مغار برای فشارهای بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵فشار روباره در پاشنه چاه) ۱۲۸
شکل (۵-۴۰): ظرفیت ذخیره‌سازی کلی و عملیاتی دو مغار با فشار بهره‌برداری (۰/۲، ۰/۸۵فشار روباره در پاشنه چاه) و (۰/۴، ۰/۷۵فشار روباره در پاشنه چاه) در عمق ۱۰۰۰ متری (حجم مغار ۴۰۰هزار مترمکعب) ۱۲۸

شکل (۵-۴۱): وضعیت تنش بیشینه اصلی و تنش موثر در پاشنه چاه برای دو فشار کمینه (۰/۲ و ۰/۴فشار روباره در پاشنه چاه) و دو فشار بیشینه (۰/۷۵ و ۰/۸۵فشار 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 بروضعیت 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 (۱-۲): نسبت میزان گاز برداشت شده از انواع مخازن ذخیره‌سازی طی سال‌های ۱۹۹۸تا ۲۰۰۸. ۹
جدول (۲-۱): نمونه‌ای از برنامه زمان‌بندی احداث یک مغار ۲۹
جدول (۲-۲): پارامترهای هندسی مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در گنبدهای نمک ۳۳
جدول (۲-۳): مقایسه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی با میدان‌های تهی شده نفت و گاز و آبخوان‌ها (داودآبادی و همکاران، ۱۳۹۰) ۳۴
جدول (۲-۴): نسبت میزان گاز برداشت شده از انواع مخازن ذخیره‌سازی طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۳۵
جدول (۲-۴): تقسیم بندی حوادث بر حسب نوع روش ذخیره سازی ۳۵
جدول (۳-۱): معیارها، پارامترهای اکتشافی و تاثیر آنها در انتخاب مکان ذخیره‌سازی درون مغارهای نمکی ۵۰
جدول (۴-۱): تعدادی از مدل‌های رئولوژیکی (منشی‌زاده، ۱۳۸۷) ۶۷
جدول (۴-۲): تنش‌های اضافه ترموالاستیک برای شکل‌های ساده از مغار ۸۳
جدول (۵-۱): مشخصات لایه‌های زمین در مدل مرجع ۹۳
جدول (۵-۲): مشخصات سنگ نمک برای مدل مرجع ۹۵
جدول (۵-۳): ویژگی‌های فیزیکی و ترمودینامیکی گاز طبیعی (متان) (LOCAS user's giude) ۹۶
جدول (۵-۴): مشخصات هندسی مدل مرجع مغار نمکی ۹۶
جدول (۵-۵): مشخصات نقاط شماره گذاری شده در شکل (۵-۵) ۱۰۰
جدول (۵-۶): معیارهای تحلیل اثر تغییر پارامترها بر رفتار مغار نمکی ۱۰۱
جدول (۵-۷): پارامترهای ظرفیت ذخیره‌سازی گاز طبیعی برای مدل مرجع ۱۰۴
جدول (۵-۸): مقدار مولفه‌های معیار اتساع دوریس ۱۰۹
جدول (۵-۹): 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