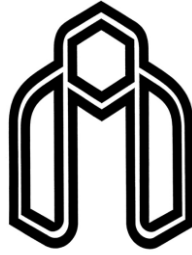


بہ نام پروردگار گمانہ



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

طراحی اولیه‌ی هندسی، تحلیل پایداری و تعیین سامانه‌ی نگهداری مغارهای ذخیره‌سازی
نفت خام، مطالعه‌ی موردی: مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام در بندر گناوه

دانشجو: ملیحه داودآبادی

استادهای راهنما:
دکتر احمد رمضان‌زاده
دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

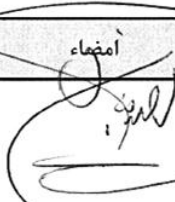
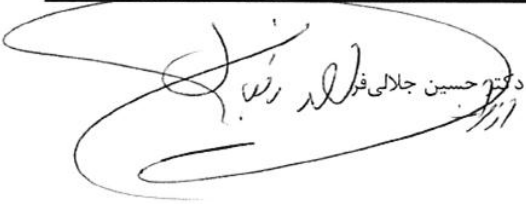
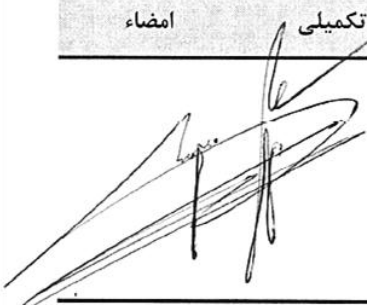
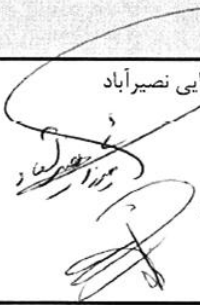
استاد مشاور:
دکتر حسین جلالی‌فر

پایان‌نامه برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد
تابستان ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خانم ملیحه داودآبادی
تحت عنوان: طراحی اولیه‌ی هندسی، تحلیل پایداری و تعیین سامانه‌ی نگهداری مغاره‌های ذخیره‌سازی
نفت خام. مطالعه‌ی موردی: مغاره‌های ذخیره‌سازی نفت خام در بندر گناوه

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۶/۲۰ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه‌ی بسیار
خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر احمد رمضان زاده
			دکتر سید محمد اسماعیل جلالی
امضاء	نمایندگی تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			دکتر حسین میرزایی نصیرآباد
	دکتر فرهنگ سرشکی		دکتر شکرالله زارع

تقدیم بہ:

مادر و پدر کرامی ترا ز جان

مہر داد نازنین

مسعود عزیز و محمد مہربان

باتقدیم سپاس و احترام حضور مادر و پدر گرامی و اساتید بزرگوار:

سرکار خانم زهرا کریمی

جناب آقای حسین داودآبادی

جناب آقای احمد رمضان زاده

جناب آقای سید محمد اسماعیل جلالی

جناب آقای حسین جلالی فر

تعهدنامه

اینجانب ملیحه داودآبادی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی استخراج معدن، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی طراحی اولیه‌ی هندسی، تحلیل پایداری و تعیین سامانه‌ی نگهداری مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام، تحت راهنمایی دکتر احمد رمضان‌زاده و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- این پایان‌نامه با همکاری و حمایت شرکت پایانه‌های نفتی ایران انجام شده است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در این پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ‌جا ارائه نشده است.
- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» یا «*Shahrood University of Technology*» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌شود.

ملیحه داودآبادی

۱۳۹۰/۰۶/۲۰

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

مغارهای زیرزمینی، نقش مهمی را در زیرساخت‌های زیربنایی یک کشور مانند نفت و گاز، برق و مخابرات، نظامی، هسته‌ای، آب و فاضلاب، گردشگری و تفریحی، غذایی و ... بر عهده دارند. در صنایع نفت و گاز، مغارهای بزرگ مقیاس سنگی یا نمکی برای ذخیره‌سازی انواع مواد هیدروکربوری با هر نوع هدف و ظرفیتی بکار برده می‌شوند. در مغارهای سنگی، سامانه‌ی پوشش یا پرده‌ی آب می‌تواند نشت سیال را با ضریب ایمنی بالایی مهار کرده و در نتیجه از آلودگی محیط زیست و هدر رفتن سیال ذخیره‌شده پیشگیری نماید. امروزه اکثر کشورهای جهان تلاش می‌کنند تا بازه‌ی گسترده‌ای از مواد به ویژه حامل‌های انرژی را در تأسیسات زیرزمینی نگهداری نمایند. در نهایت پس از گذشت نزدیک به یک سده از آغاز ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در آمریکا و اروپا، دولت‌مردان ایران نیز در اواسط دهه‌ی ۸۰ ش. به سمت فن‌آوری ذخیره‌سازی زیرزمینی در مغارهای سنگی روی آورده‌اند. در همین راستا، در این پژوهش به طراحی مفهومی مغارهای سنگی ذخیره‌سازی با هدف نگهداری ۱۰ میلیون بشکه نفت خام در بندر گناوه برای صادرات از راه پایانه‌ی خارگ پرداخته شده است. مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش طراحی هندسی، طراحی سامانه‌ی نگهداری اولیه و ارزیابی مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر پایداری مغارها با استفاده از روش عددی هستند. برای تأمین ظرفیت ذخیره‌سازی ضروری است، ۱۱ مغار موازی با ابعاد ۱۵ متر عرض، ۲۰ متر ارتفاع و ۵۰۰ متر طول احداث شوند. فاصله‌داری مغارها در حدود ۴۰ تا ۵۰ متر و عمق قرارگیری آن‌ها ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. ناپایداری گسترده‌ی مغارهای مارنی سبب انتخاب فاصله‌ی بیشتر و عمق قرارگیری کمتر شده است. با مد نظر قرار دادن شرایط ژئومکانیکی و هیدروژئولوژی ساختگاه، برای مهار نشت مغارهای گناوه، بکارگیری سامانه‌ی پوشش توصیه شده است. سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی نیز مرکب از ۳۰ سانتی‌متر بتن پاشیده در تمام جداره به همراه شبکه‌ی منظم پیچ‌سنگ‌های ۳۲ میلی‌متری تمام‌تزیق رزینی با ۱۲ متر طول در سقف و کف و ۱۵ متر طول در دیواره است. حساس‌ترین پارامترها نیز مقاومت برشی مارن و مدول شکل-پذیری ماسه‌سنگ در تحلیل پارامتریک و نسبت ابعاد مغارها در تحلیل حساسیت هستند.

واژگان کلیدی: ذخیره‌سازی زیرزمینی، نفت خام، مغار سنگی، مدلسازی سه‌بعدی، طراحی مفهومی، تحلیل

پارامتریک، تحلیل پایداری.

فهرست مطالب

۲	۱ کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۲-۱ ضرورت‌ها و مزایای ذخیره‌سازی زیرزمینی در ایران
۵	۳-۱ پیشینه‌ی ذخیره‌سازی درون مغارهای سنگی
۸	۱-۳-۱ طرح احداث مخازن ذخیره‌سازی سطحی و زیرسطحی نفت خام ایران
۸	۲-۳-۱ مطالعات امکان‌سنجی ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام و فرآورده‌های نفتی ایران
۱۰	۴-۱ تشریح مراحل اصلی پژوهش
۱۰	۵-۱ سامان‌دهی پایان‌نامه
۱۴	۲ مفاهیم ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۵	۲-۲ پیشینه‌ی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مغارهای سنگی
۱۸	۳-۲ جنبه‌های ویژه‌ی ایمنی و نگهداشت ذخیره‌سازی زیرزمینی
۱۹	۱-۳-۲ ایمنی زیست‌محیطی
۱۹	۲-۳-۲ ایمنی ماده‌ی ذخیره‌شده
۱۹	۳-۳-۲ ایمنی تأسیسات در برابر حوادث طبیعی
۱۹	۴-۳-۲ ایمنی در برابر تهدیدات برون‌مرزی
۲۰	۵-۳-۲ نگهداشت تأسیسات ذخیره‌سازی
۲۰	۴-۲ طراحی هندسی سازه‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی نفت خام
۲۳	۵-۲ روش‌های مهار نشت نفت خام به توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارهای سنگی
۲۵	۱-۵-۲ مغارهای سنگی دارای پوشش
۲۷	۱-۱-۵-۲ پوشش فولادی
۲۹	۲-۱-۵-۲ لایه‌ی لغزشی
۲۹	۳-۱-۵-۲ پوشش بتنی
۲۹	۴-۱-۵-۲ شبکه‌ی آرماتورها
۲۹	۵-۱-۵-۲ لایه‌ی بتن پاشیده
۳۰	۶-۱-۵-۲ سامانه‌ی زهکشی
۳۱	۷-۱-۵-۲ توده‌سنگ
۳۱	۲-۵-۲ مغارهای سنگی بدون پوشش

۳۲	۱-۲-۵-۲ پرده‌ی آب
۳۳	۲-۲-۵-۲ طراحی پرده‌ی آب
۳۴	۶-۲ مشکلات فنی و عملیاتی مرتبط با ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مغارهای سنگی
۳۵	۷-۲ مغارهای سنگی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در جهان
۴۰	۸-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۴۲	۳ معرفی ساختگاه گناوه و انتخاب روش طراحی
۴۲	۱-۳ مقدمه
۴۳	۲-۳ زمین‌شناسی عمومی سازند آغاچاری در ساختگاه گناوه
۴۴	۱-۲-۳ ویژگی‌های مقاومتی مارن و ماسه‌سنگ ساختگاه گناوه
۴۵	۲-۲-۳ پارامترهای مورد نیاز برای طراحی مفهومی مغارها
۴۵	۳-۲-۳ وضعیت ناپیوستگی‌های توده‌سنگ ساختگاه گناوه
۴۶	۳-۳ انتخاب روش مهار نشت مغارهای ذخیره‌سازی گناوه
۴۶	۴-۳ انتخاب روش طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی گناوه
۴۹	۵-۳ روش‌های عددی
۵۰	۱-۵-۳ مفاهیم روش اختلاف محدود
۵۱	۲-۵-۳ ساز و کار نرم‌افزار <i>FLAC</i>
۵۱	۶-۳ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۵۵	۴ طراحی هندسی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام
۵۵	۱-۴ مقدمه
۵۶	۲-۴ شکل سطح مقطع مغارهای ذخیره‌سازی
۵۷	۳-۴ حجم مخصوص مغارهای ذخیره‌سازی
۵۸	۴-۴ انتخاب شکل سطح مقطع، بازه‌ی ابعاد و عمق قرارگیری مغارهای گناوه
۶۰	۵-۴ مدلسازی مغارها با استفاده از نرم‌افزار <i>FLAC^{3D}</i>
۶۲	۶-۴ نتایج حاصل از مدلسازی‌های عددی
۶۴	۱-۶-۴ جابجایی‌ها
۶۶	۲-۶-۴ کرنش‌ها
۶۷	۳-۶-۴ گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارها
۷۱	۴-۶-۴ تنش‌ها
۷۲	۱-۴-۶-۴ آزادسازی تنش‌ها
۷۵	۲-۴-۶-۴ تمرکز تنش‌ها
۷۷	۳-۴-۶-۴ ضریب ایمنی
۸۰	۷-۴ انتخاب سطح مقطع مغارهای ذخیره‌سازی گناوه

۸۲	۸-۴ طراحی فاصله‌ی بین مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام
۸۳	۱-۸-۴ مغارهای بدون فشار ذخیره‌سازی
۸۶	۲-۸-۴ مغارهای دارای فشار ذخیره‌سازی نفت خام
۹۱	۹-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۹۴	۵ تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت
۹۴	۱-۵ مقدمه
۹۵	۲-۵ تحلیل پارامتریک مارن
۹۵	۱-۲-۵ مقاومت برشی
۹۹	۲-۲-۵ مقاومت کششی
۱۰۲	۳-۲-۵ مدول شکل‌پذیری
۱۰۴	۴-۲-۵ نسبت تنش افقی به قائم
۱۰۷	۳-۵ تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای مارنی
۱۰۷	۱-۳-۵ عمق قرارگیری مغارها
۱۱۰	۲-۳-۵ ابعاد مغارهای ذخیره‌سازی
۱۱۳	۳-۳-۵ فشار ذخیره‌سازی
۱۱۵	۴-۵ تحلیل پارامتریک ماسه‌سنگ
۱۱۶	۱-۴-۵ مقاومت برشی
۱۲۰	۲-۴-۵ مقاومت کششی
۱۲۲	۳-۴-۵ مدول شکل‌پذیری
۱۲۳	۴-۴-۵ نسبت تنش افقی به قائم
۱۲۷	۵-۵ تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای ماسه‌سنگی
۱۲۸	۱-۵-۵ عمق قرارگیری مغارها
۱۳۱	۲-۵-۵ ابعاد مغارهای ذخیره‌سازی
۱۳۴	۳-۵-۵ فشار ذخیره‌سازی
۱۳۶	۶-۵ جمع‌بندی نتایج بدست آمده از تحلیل‌های پارامتریک و حساسیت
۱۳۶	۱-۶-۵ مغارهای مارنی
۱۴۲	۲-۶-۵ مغارهای ماسه‌سنگی
۱۴۶	۷-۵ نتیجه‌گیری
۱۵۰	۶ تحلیل پایداری و پایدارسازی مغارها
۱۵۰	۱-۶ مقدمه
۱۵۰	۲-۶ سامانه‌ی نگهداری متداول برای مغارهای ذخیره‌سازی
۱۵۱	۱-۲-۶ مهارها

۱۵۲	۲-۲-۶ بتن پاشیده
۱۵۳	۳-۶ تحلیل پایداری مغارها
۱۵۴	۱-۳-۶ روش تخمین جابجایی نسبی
۱۵۶	۲-۳-۶ روش کرنش بحرانی
۱۵۸	۴-۶ شاخص کیفیت توده سنگ (Q)
۱۵۹	۱-۴-۶ فشار نهایی نگهداری
۱۶۰	۲-۴-۶ برآورد اولیه‌ی سامانه‌ی نگهداری مغارها
۱۶۲	۵-۶ نمودارهای اندرکنش زمین و تغییر شکل طولی مغار
۱۶۴	۶-۶ ارزیابی عملکرد سامانه‌ی نگهداری مغارها با بکارگیری روش عددی
۱۶۴	۱-۶-۶ مشخصات مکانیکی سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی
۱۶۷	۲-۶-۶ تحلیل پایداری مغارهای دارای سامانه‌ی نگهداری
۱۷۰	۳-۶-۶ نتایج مدلسازی عددی سامانه‌ی نگهداری مغار مارنی
۱۷۰	۱-۳-۶-۶ جابجایی‌ها و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغار مارنی
۱۷۲	۲-۳-۶-۶ وضعیت تنش‌ها و ضریب ایمنی توده سنگ
۱۷۳	۷-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۷۷	۷ جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی پیشنهادها
۱۷۷	۱-۷ جمع‌بندی نتایج
۱۷۹	۲-۷ ارائه‌ی پیشنهادها
۱۸۴	منابع پارسی
۱۸۵	منابع لاتین

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): موقعیت نقاط انتخاب‌شده و امتیاز آن‌ها در مطالعات امکان‌سنجی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی ۹
- شکل (۱-۲): (الف): نمایی از یک معدن متروکه برای ذخیره‌سازی نفت خام در سوئد؛ (ب): بکارگیری روش سوئدی ذخیره‌سازی نفت خام در زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی ۱۶
- شکل (۲-۲): مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی در عربستان: ابها ۱۸
- شکل (۳-۲): آرایش‌های گوناگون سازه‌های ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری ۲۱
- شکل (۴-۲): مقاطع متداول مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی فنلاندی ۲۲
- شکل (۵-۲): تأسیسات دارای پوشش ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع‌شده با ظرفیت ۳۲۰ هزار متر مکعب ۲۶
- شکل (۶-۲): سامانه‌ی چندلایه‌ی مهار نشست مغارهای دارای پوشش ۲۷
- شکل (۷-۲): نمونه‌ای از یک مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی به همراه سامانه‌ی پرده‌ی آب ۳۳
- شکل (۱-۳): موقعیت ساختگاه گناوه در تقسیمات کشوری و راه‌های اصلی مرتبط با آن ۴۳
- شکل (۲-۳): نمایی از سازند آغاچاری در محدوده‌ی روستای احمد حسین و روستای بینک ۴۴
- شکل (۳-۳): ترکیبات و رفتار گوناگون توده‌سنگ ۴۹
- شکل (۱-۴): شکل‌های متداول برای سطح مقطع سازه‌های زیرزمینی ۵۷
- شکل (۲-۴): تأسیسات ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در *Lyckebo* سوئد ۵۸
- شکل (۳-۴): شبکه‌ی اختلاف محدود در اطراف مدل شماره‌ی ۳ ۶۳
- شکل (۴-۴): کانتورهای کرنش برای مدل شماره‌ی ۳ ۶۷
- شکل (۵-۴): گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مدل شماره‌ی ۳ ۷۱
- شکل (۶-۴): کانتورهای جابجایی و تنش افقی و قائم در اطراف مغار مدل ۳ ۷۴
- شکل (۷-۴): کانتورهای بیش‌ترین تنش اصلی قبل و بعد از حفاری در مدل ۳ ۷۶
- شکل (۸-۴): کانتورهای کمترین تنش اصلی و تغییر شکل در جداره‌ی مغارها ۸۰
- شکل (۹-۴): بررسی وضعیت پایداری مغارهای مارنی (بدون فشار درونی) ۸۶
- شکل (۱۰-۴): بررسی وضعیت پایداری مغارهای مارنی (دارای فشار درونی) ۹۰
- شکل (۱۱-۴): تعیین بیش‌ترین فاصله‌داری مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام ۹۰

- شکل (۱-۶): اجزا تشکیل دهنده‌ی یک مهاری تزریق‌شده‌ی پیش‌تنیده ۱۵۱
- شکل (۲-۶): بتن پاشیده‌ی مسلح با الیاف فولادی ۱۵۳
- شکل (۳-۶): سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی: پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق ۱۶۷
- شکل (۴-۶): سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی: بتن پاشیده ۱۶۸
- شکل (۵-۶): کانتورهای جابجایی افقی و قائم (متر) مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری (الف و ب)؛ وضعیت تسلیم برشی و کششی مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری در مقطع طولی و عرضی مغار (ج و د) ۱۷۱
- شکل (۶-۶): کانتورهای تنش افقی و قائم (پاسکال) در اطراف مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری (الف و ب)؛ کانتورهای کمترین و بیش‌ترین تنش اصلی (پاسکال) در اطراف مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری (ج و د) ۱۷۳

فهرست جدول؛

- جدول (۱-۱): مشخصات تعدادی از مغارهای بزرگ مقیاس صنعت برق آبی ایران ۷
- جدول (۲-۱): ظرفیت تولید، ظرفیت مخازن سطحی ذخیره سازی نفت خام و فرآورده های نفتی و توان ذخیره سازی مخازن نفت خام در پالایشگاه های کشور ۷
- جدول (۳-۱): مشخصات فنی و مکان های احداث مخازن سطحی و مدفون ذخیره سازی نفت خام ۸
- جدول (۱-۲): مشخصات فنی تعدادی از مغارهای سنگی ذخیره سازی نفت خام و فرآورده های نفتی در کشورهای مختلف جهان ۳۶
- جدول (۱-۳): مقادیر برآورد شده و توصیف توده سنگ ساختگاه گناوه با استفاده از طبقه بندی مهندسی سنگ ۴۵
- جدول (۲-۳): پارامترهای برآورد شده برای توده سنگ ساختگاه گناوه ۴۵
- جدول (۱-۴): مشخصات ۴ حالت انتخاب شده برای مغارهای ذخیره سازی گناوه ۵۹
- جدول (۲-۴): ابعاد مرزهای خارجی مدل های در نظر گرفته شده در جدول ۱-۴ ۶۱
- جدول (۳-۴): تغییر شکل های پیش بینی شده در جداره ی مغارهای با ابعاد متفاوت ۶۶
- جدول (۴-۴): گسترش ناحیه ی تسلیم با تغییر ابعاد مغارها ۶۸
- جدول (۵-۴): درصد آزادسازی تنش های افقی در نقاط شاهد: سقف، دیواره و کف ۷۴
- جدول (۶-۴): درصد آزادسازی تنش های قائم در نقاط شاهد: سقف، دیواره و کف ۷۵
- جدول (۷-۴): بیش ترین ضریب تمرکز تنش در جداره ی مغارهای مارنی و ماسه سنگی ۷۶
- جدول (۸-۴): کمترین ضریب تمرکز تنش در جداره ی مغارهای مارنی و ماسه سنگی ۷۷
- جدول (۹-۴): مقادیر ضریب ایمنی محاسبه شده در سقف، دیواره و کف مغارهای مارنی ۷۹
- جدول (۱۰-۴): مقادیر ضریب ایمنی محاسبه شده در سقف، دیواره و کف مغارهای ماسه سنگی ۷۹
- جدول (۱۱-۴): نتایج حاصل از مدلسازی مغارهای مجاور و مغار تنها ۸۴
- جدول (۱۲-۴): میزان تغییرات جابجایی افقی و قائم و شعاع تسلیم در جداره ی مغارها در مقایسه با مغار تنها ۸۵
- جدول (۱۳-۴): مقایسه ی وضعیت پایداری مغارهای پر و خالی ۸۷
- جدول (۱-۵): بازه ی تغییرات در نظر گرفته شده برای پارامترهای مقاومتی مارن آغاچاری ۹۵
- جدول (۲-۵): مقادیر مختلف کمترین و بیش ترین نسبت تنش افقی به قائم برای نقاط مختلف جهان ۱۰۴
- جدول (۳-۵): بازه ی تغییرات پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای مارنی ۱۰۷

- ۱۱۶ جدول (۴-۵): بازه‌ی تغییرات پارامترهای مقاومتی ماسه‌سنگ آغاجاری
- ۱۲۷ جدول (۵-۵): بازه‌ی تغییرات پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای ماسه‌سنگی
- ۱۳۷ جدول (۶-۵): تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در سقف
- ۱۳۷ جدول (۷-۵): تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در دیواره
- ۱۳۷ جدول (۸-۵): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی در سقف و دیواره
- ۱۳۸ جدول (۹-۵): تحلیل حساسیت مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در سقف
- ۱۳۸ جدول (۱۰-۵): تحلیل حساسیت مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در دیواره
- ۱۳۸ جدول (۱۱-۵): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مغارهای مارنی در سقف و دیواره
- ۱۴۲ جدول (۱۲-۵): تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در سقف
- ۱۴۲ جدول (۱۳-۵): تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در دیواره
- ۱۴۲ جدول (۱۴-۵): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی در سقف و دیواره
- ۱۴۳ جدول (۱۵-۵): تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در سقف
- ۱۴۳ جدول (۱۶-۵): تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در دیواره
- ۱۴۳ جدول (۱۷-۵): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی در سقف و دیواره
- ۱۵۶ جدول (۱-۶): تحلیل پایداری مغارهای گناوه با استفاده از روش تخمین جابجایی نسبی
- ۱۵۸ جدول (۲-۶): برآورد مقادیر کیفیت توده‌سنگ (Q) برای ساختگاه گناوه
- ۱۵۹ جدول (۳-۶): محاسبه‌ی فشار نهایی نگهداری سقف و دیواره‌ی مغارهای مارنی
- ۱۶۴ جدول (۴-۶): مقادیر تغییر شکل نهایی بدون سامانه‌ی نگهداری و در زمان نصب سامانه‌ی نگهداری
- ۱۶۵ جدول (۵-۶): مشخصات بتن پاشیده‌ی مسلح
- ۱۶۵ جدول (۶-۶): مشخصات پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق رزینی
- ۱۶۶ جدول (۷-۶): مشخصات رزین بکار برده‌شده برای تزریق پیچ‌سنگ‌ها
- ۱۶۸ جدول (۸-۶): مقایسه‌ی مقادیر تغییر شکل نهایی جداره‌ی مغارهای مارنی بدون سامانه و دارای سامانه‌ی نگهداری
- ۱۷۲ جدول (۹-۶): مقایسه‌ی شعاع ناحیه‌ی تسلیم در جداره‌ی مغارهای مارنی بدون سامانه و دارای سامانه‌ی نگهداری
- ۱۷۳ جدول (۱۰-۶): ضریب ایمنی محاسبه‌شده برای جداره‌ی مغار بدون نگهداری و دارای نگهداری

فهرست نمودارها

- نمودار (۱-۱): حلقه‌ی تولید، پالایش و مصرف نفت خام (بدون در نظر گرفتن واردات) ۳
- نمودار (۲-۱): مراحل اصلی انجام پایان‌نامه ۱۰
- نمودار (۳-۱): سامان‌دهی پایان‌نامه ۱۲
- نمودار (۱-۲): روش‌های مهار نشت مواد هیدروکربوری به توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارهای سنگی ۲۴
- نمودار (۲-۲): درصد فراوانی عرض مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی (جدول ۱-۲) ۳۹
- نمودار (۳-۲): درصد فراوانی ارتفاع مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی (جدول ۱-۲) ۴۰
- نمودار (۱-۴): مراحل طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام ۵۶
- نمودار (۲-۴): بررسی تعادل مدل‌های مارنی ۶۴
- نمودار (۳-۴): جابجایی‌های بدست آمده با تغییر ابعاد مغارها ۶۵
- نمودار (۴-۴): تغییر مساحت ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارهای با ابعاد متفاوت در مدل‌های مارن و ماسه‌سنگ ۶۹
- نمودار (۵-۴): تغییرات حجم مخصوص مغار با افزایش سطح مقطع در طول ثابت ۵۰۰ متر ۸۱
- نمودار (۶-۴): تغییرات بیش‌ترین نیروی نامتعادل در مغارهای دارای فشار ذخیره‌سازی ۸۸
- نمودار (۱-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت برشی مارن ۹۹
- نمودار (۲-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت کششی مارن ۱۰۲
- نمودار (۳-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مدول شکل‌پذیری مارن ۱۰۴
- نمودار (۴-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به میدان تنش ناحیه ۱۰۷
- نمودار (۵-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به عمق قرارگیری ۱۱۰
- نمودار (۶-۵): بررسی پایداری مغار با تغییرات نسبت ابعاد ۱۱۳
- نمودار (۷-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به بارگذاری متناوب ۱۱۵
- نمودار (۸-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت برشی ماسه‌سنگ ۱۱۹
- نمودار (۹-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت کششی ماسه‌سنگ ۱۲۲
- نمودار (۱۰-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مدول شکل‌پذیری ماسه‌سنگ ۱۲۳
- نمودار (۱۱-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به میدان تنش ناحیه ۱۲۷
- نمودار (۱۲-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به عمق قرارگیری ۱۳۱
- نمودار (۱۳-۵): بررسی پایداری مغار با تغییرات نسبت ابعاد ۱۳۴
- نمودار (۱۴-۵): بررسی پایداری مغار در برابر بارگذاری متناوب ۱۳۶

- ۱۴۱ نمودار (۵-۱۵): تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت مغارهای مارنی
- ۱۴۶ نمودار (۵-۱۶): تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی
- ۱۵۷ نمودار (۶-۱): بررسی پایداری مغارهای ذخیره‌سازی گنوه با استفاده از روش کرنش بحرانی
- نمودار (۶-۲): تعیین سامانه‌ی نگهداری دائمی مغارهای مارنی با استفاده از شاخص کیفیت توده‌سنگ برای سنگ‌های سست
- ۱۶۱
- ۱۶۳ نمودار (۶-۳): منحنی اندرکنش زمین (توده‌سنگ دربرگیرنده: مارن)
- ۱۶۳ نمودار (۶-۴): منحنی تغییرات تغییر شکل جداره در طول مغار مارنی
- ۱۶۹ نمودار (۶-۵): مقایسه‌ی جابجایی سقف مغار بدون نگهداری و دارای نگهداری
- ۱۶۹ نمودار (۶-۶): مقایسه‌ی جابجایی دیواره‌ی مغار بدون نگهداری و دارای نگهداری
- ۱۷۰ نمودار (۶-۷): تحلیل پایداری مغارهای مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری

فصل اول:

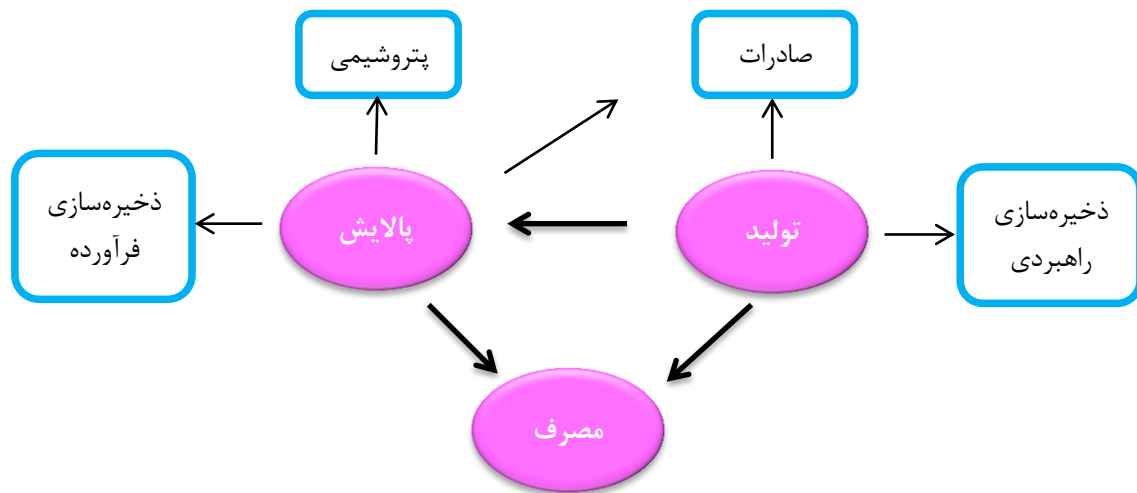
کلیات

۱-۱ مقدمه

ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام در مغارهای سنگی، مغارهای نمکی و معادن متروکه انجام می‌شود. انعطاف‌پذیری بالای مغارهای سنگی نسبت به شرایط زمین‌شناسی، بی‌نیازی مغارهای نمکی از بکارگیری تمهیدات ویژه‌ی مهار نشت و در اختیار داشتن فضای کافی بدون نیاز به انجام عملیات حفاری جدید در معادن متروکه، می‌تواند از برجسته‌ترین امتیازات هر کدام از روش‌ها باشد. در کنار این موارد مشکلات مهار نشت مغارهای سنگی و معادن متروکه، همچنین همگرایی و دشواری‌های تأمین آب کافی برای احداث مغارهای نمکی با استفاده از فن‌آوری معدنکاری انحلالی نیز می‌تواند از مهم‌ترین چالش‌های هر روش باشد.

در گذشته (تا دهه‌ی ۶۰ میلادی) روش متداول ذخیره‌سازی نفت خام بکارگیری مخازن سطحی بوده است؛ اما در حال حاضر ذخیره‌سازی زیرزمینی، یکی از اجزا اصلی زنجیره‌ی تولید تا مصرف نفت خام است (نمودار ۱-۱). در مقایسه با ذخیره‌سازی سطحی؛ ایمنی، سازگاری با محیط زیست و مقرون به صرفه بودن از جمله مزایای ارزشمند ذخیره‌سازی زیرزمینی هستند. ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام می‌تواند بلافاصله پس از فرآیندهای تولید یا پالایش انجام شود. علاوه بر این در هر کدام از فرآیندهای واسطه‌ای نیز ممکن است گزینه‌ی ذخیره‌سازی زیرزمینی بکار برده شود. به عنوان نمونه خوراک ورودی به پالایشگاه یا تأسیسات پتروشیمی می‌تواند از نفت ذخیره‌شده فراهم شود. بدین ترتیب در هنگام بروز هر گونه بحران یا نیاز به تعمیر و نگهداری و خدمات دوره‌ای

تأسیسات تولید، خوراک پالایشگاه و تأسیسات پتروشیمی بدون وقفه تأمین خواهد شد. همچنین نفت تولیدشده می‌تواند تا زمان فروش در پایانه‌های صادراتی ذخیره شده و امنیت کافی را برای تجارت جهانی نفت خام بوجود آورد (نمودار ۱-۱).



نمودار (۱-۱): حلقه‌ی تولید، پالایش و مصرف نفت خام (بدون در نظر گرفتن واردات)

در میان روش‌های گوناگون ذخیره‌سازی نفت خام، مغارهای سنگی به سبب انعطاف‌پذیری و همچنین ایمنی و پایداری بیش‌تر از اهمیت ویژه‌ای در میان کشورهای دارای فن‌آوری ذخیره‌سازی برخوردار هستند. این مغارها متناسب با شرایط ژئومکانیکی ساختگاه و قوانین زیست‌محیطی می‌توانند دارای پوشش یا بدون پوشش باشند. در ایران نیز بر مبنای مطالعات مقدماتی انجام شده، بکارگیری مغارهای سنگی برای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در نواحی جنوبی کشور پیشنهاد شده است و مراحل تصمیم‌گیری در این خصوص توسط یکی از زیرمجموعه‌های شرکت ملی نفت ایران (شرکت پایانه‌های نفتی ایران) در دست اقدام است.

با توجه به این توضیحات، هدف از این پایان‌نامه، طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام در محدوده‌ی عمومی بندر گناوه است. منظور از طراحی مفهومی، فرآیند طراحی هندسی مقدماتی مغارها، تحلیل پایداری و تعیین سامانه‌ی نگهداری اولیه‌ی آن‌ها و ارائه‌ی پیشنهاداتی برای طراحی پایه و تفصیلی این تأسیسات است.

۲-۱ ضرورت‌ها و مزایای ذخیره‌سازی زیرزمینی در ایران

ایران دارای سومین ذخیره‌ی قطعی نفت خام و دومین ذخیره‌ی قطعی گاز طبیعی جهان است. میزان ذخایر قطعی نفت و گاز ایران در سال ۲۰۱۱ م. به ترتیب در حدود ۱۴۰ میلیارد بشکه و ۳۰ هزار میلیارد متر مکعب است. همچنین ایران در منطقه‌ی خاورمیانه و در مرکز بیضی راهبردی انرژی جهان نیز (دارای ۷۰ درصد از ذخیره‌ی نفت خام و ۴۰ درصد از ذخیره‌ی گاز طبیعی جهان) واقع شده است. میزان تولید نفت خام ایران در حدود ۴۲۵۰ هزار بشکه در روز و میزان مصرف آن در حدود ۱۸۰۰ هزار بشکه در روز است (BP, 2011). با مد نظر قرار دادن این موارد، ضرورت‌های انجام ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در کشور را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- ۱ افزایش توان رقابت، قدرت مانور و حفظ استقلال سیاسی کشور در خاورمیانه و جهان
- ۲ جلب اعتماد مشتریان، زمینه‌سازی برای برنامه‌ریزی بلندمدت و تثبیت جایگاه کشور در بازارهای داخلی و بین‌المللی نفت
- ۳ کاهش مخاطرات تأمین نفت خام و فرآورده‌های نفتی به دلیل بروز موارد پیش‌بینی نشده
- ۴ تقلیل آسیب در زمان بروز حوادث طبیعی همچون زمین‌لرزه و بروز آسیب‌های عملیاتی مانند انفجار و آتش‌سوزی
- ۵ استفاده از ذخایر راهبردی کشور در زمان وقوع جنگ و خرابکاری و امکان مدیریت بهتر بحران در مواقع لزوم
- ۶ لزوم برداشت و انتقال نفت خام و سایر مواد هیدروکربوری میادین مشترک با عراق، عربستان و سایر کشورهای دارای منابع مشترک با ایران
- ۷ ایجاد فرصت مناسب برای بازسازی یا افزایش ظرفیت زیرساخت‌ها، پالایشگاه‌ها و خطوط انتقال موجود و ساخت تأسیسات جدید برای شبکه‌ی انتقال و تأسیسات پتروشیمی
- ۸ آزادسازی بخش زیادی از سطح اشغال‌شده توسط مخازن سطحی و مدفون به خصوص در مناطق شهری

با توجه به ضرورت‌های بیان‌شده، مزایای کاربرد فن‌آوری ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مقایسه با ذخیره‌سازی سطحی را می‌توان در موارد زیر بیان نمود:

- ۱ ظرفیت بسیار بیش‌تر ذخیره‌سازی و عمر طولانی‌تر تأسیسات
- ۲ کیفیت بهتر محصول در طول زمان نگهداری (به دلیل شرایط ثابت درون مخزن)
- ۳ امکان ایجاد پراکندگی در مخازن با توجه به مباحث آمایش سرزمین و نیازمندی‌های منطقه-ای، همچنین امکان ساخت مخازن در زیر تأسیسات و پالایشگاه‌های سطحی موجود
- ۴ محافظت بهتر از محیط زیست به دلیل تخلیه‌ی کمتر مواد به خارج در اثر حوادثی مانند شکست مخزن و آتش‌سوزی
- ۵ ایمنی بالا در برابر عملیات خرابکارانه و تهاجم نیروهای بیگانه از دیدگاه پدافند غیر عامل (پنهان بودن تأسیسات در اعماق زمین)
- ۶ ایمنی و پایداری بالاتر در مقابل حوادث طبیعی مانند زلزله، گردباد و صاعقه
- ۷ هزینه‌ی قابل مقایسه‌ی ساخت، مدیریت، نگهداری و بهره‌برداری سازه‌های زیرزمینی در مقایسه با مخازن سطحی و مدفون

۳-۱ پیشینه‌ی ذخیره‌سازی درون مغارهای سنگی در ایران

تا به امروز ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری درون مغارهای سنگی در تعداد زیادی از کشورهای اروپایی، آمریکایی و حتی آسیایی مانند ژاپن، کره‌ی جنوبی، عربستان سعودی و هند انجام شده است. به عنوان نمونه، نروژ با میزان ذخیره‌ی قطعی ۶۷ میلیارد بشکه نفت خام، تولیدی در حدود ۲۱۰۰ هزار بشکه در روز و میزان مصرف ۲۴۰ هزار بشکه در روز، دارای پایانه‌های متعددی مانند *Sture* و *Sjursoya Mongstad* بوده و بیش از ۷۰ مغار سنگی را برای ذخیره‌سازی انواع مواد هیدروکربوری احداث و بهره‌برداری نموده است (BP, 2011; IEA, 2009).

عربستان سعودی نیز با میزان ذخیره‌ی قطعی ۲۶۵ میلیارد بشکه نفت خام، تولید ۱۰ میلیون

بشکه در روز و مصرفی در حدود ۲۸۰۰ هزار بشکه در روز، از مغارهای بزرگمقیاس، برای ذخیره-سازی راهبردی مواد هیدروکربوری^۱ استفاده می‌کند (ر.ک. بخش ۲-۲). این تأسیسات در حوالی پنج شهر ریاض، جده، ابها، مدینه و بورایده، با کمک شرکت سوئدی *ABV Rock Group* احداث شده‌اند. مغارها دارای پوشش هستند و ابعاد آن‌ها با توجه به نیازهای نظامی یا شهری هر ناحیه طراحی شده است. به عنوان نمونه یکی از مغارهای جده دارای ابعادی برابر با ۴۰۰ متر طول، ۳۰ متر ارتفاع و ۲۰ متر عرض بوده و برای ذخیره‌سازی ۹۰۰ هزار بشکه بنزین احداث شده است. بیش‌ترین عمق قرارگیری این مغارها در حدود ۱۹۰ متر از سطح زمین است. دولت عربستان برای ساخت این تأسیسات بیش از ۳ میلیارد دلار سرمایه‌گذاری نموده است و این مجموعه با استفاده از ۷۰۰ کیلومتر خطوط لوله به کارخانه‌ها و پالایشگاه‌های عربستان متصل شده است (*Altowell, 2002; Aramco, 2003 & 2009; BP, 2011*).

به طور کلی در خاورمیانه به جز عربستان سعودی سایر کشورها فاقد تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی در مغارهای سنگی هستند. ایران نیز با وجود دارا بودن پتانسیل‌های مناسب در زمینه‌ی طراحی و ساخت سازه‌های بزرگمقیاس زیرزمینی، در حال حاضر فاقد مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی است. به عنوان نمونه در جدول ۱-۱ مشخصات تعدادی از مغارهای برق‌آبی کشور به عنوان دلیلی بر توانمندی‌های مهندسی داخلی آورده شده است. در عین حال تعداد قابل توجهی، مخازن سطحی و مدفون ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی نیز در پالایشگاه‌ها، نواحی شهری، پایانه‌های کشور و عسلویه موجود است که نیاز کشور به ذخیره‌سازی با ظرفیت‌های بالا را اثبات می‌نماید. در جدول ۱-۲ مشخصات تعدادی از مخازن سطحی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی پالایشگاه‌های کشور آورده شده است. بدیهی است که با گسترش سریع ظرفیت تولید مواد هیدروکربوری در دهه‌ی ۸۰ ش، سازه‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی باید جایگزین مخازن سطحی موجود در کشور شوند.

جدول (۱-۱): مشخصات تعدادی از مغارهای بزرگ مقیاس صنعت برق آبی کشور (خواجعه علی و همکاران، ۱۳۸۶؛ شرکت مشانیر، ۱۳۸۴؛ شرکت توسعه‌ی منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹ و شرکت جهاد توسعه‌ی منابع آب، ۱۳۸۹)

نام مغار	طول	عرض	ارتفاع	حجم تقریبی	نوع سنگ
آحاد	متر	متر	متر	هزار متر مکعب	-
نیروگاه دز	۷۶	۳۵	۱۷	۴۵	کنگلومرای بختیاری
نیروگاه توسعه‌ی کارون ۱	۱۴۵	۲۶	۴۹	۱۸۵	-
نیروگاه کارون ۳	۲۵۱٫۱	۲۵٫۴	۴۷٫۷	۲۲۷	آهک - آهک مازنی
ترانسفورمر کارون ۳	۲۳۴	۲۱٫۱	۲۷٫۸	۱۷۵٫۳	آهک - آهک مازنی
گالری شیرهای ورودی کارون ۳	۲۴۴٫۳	۹٫۷۸	۲۵٫۱	۶۰	آهک
نیروگاه سیاه‌بیشه	۱۳۱	۲۴٫۵	۴۶٫۵	۱۵۰	شیل - آهک - ماسه‌سنگ
ترانسفورمر سیاه‌بیشه	۱۶۰	۱۳	۲۲	۴۶	شیل - آهک - ماسه‌سنگ
نیروگاه مسجدسلیمان (فاز ۱)	۱۵۴٫۴	۳۰	۴۹٫۶	۲۳۰	کنگلومر - ماسه‌سنگ
ترانسفورمر مسجدسلیمان (فاز ۱)	۱۱۰	۱۳٫۶	۲۱	۳۱	کنگلومر - ماسه‌سنگ
نیروگاه مسجدسلیمان (فاز ۲)	۲۶۷	۳۰	۴۹٫۶	۳۱۶	کنگلومر - ماسه‌سنگ
ترانسفورمر مسجدسلیمان (فاز ۲)	۲۲۰	۱۴	۲۳	۷۱٫۵	کنگلومر - ماسه‌سنگ
فشارشکن نیروگاه گتوند (بالا)	۱۷۵٫۲	۱۶	۱۷٫۵	۴۹	کنگلومرای بختیاری
فشارشکن نیروگاه گتوند (پایین)	۱۷۲٫۲	۱۲٫۶	۱۲٫۶	۲۷	کنگلومرای بختیاری

جدول (۲-۱): ظرفیت تولید و ظرفیت مخازن سطحی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی و توان ذخیره‌سازی نفت خام در پالایشگاه‌های کشور (ترازنامه‌ی هیدروکربوری کشور، ۱۳۸۵)

پالایشگاه	ظرفیت تولید روزانه	ظرفیت مخازن نفت خام	ظرفیت مخازن فرآورده‌ها	توان ذخیره‌سازی نفت خام
آحاد	هزار بشکه	میلیون بشکه	میلیون بشکه	روز
بندرعباس	۲۷۰	۳	۳٫۸	۱۱٫۱
اراک	۱۷۷	۳	۲٫۳۶	۱۷
آبادان	۴۰۵	۲٫۱	۷٫۴	۵٫۲
تهران	۲۵۵	۱٫۹۵	۲٫۲	۷٫۶
اصفهان	۳۷۵	۱٫۷۸	۳٫۷۶	۴٫۷
تبریز	۱۱۵	۱٫۲	۱٫۴۹	۱۰٫۴
لاوان	۳۰	۰٫۵	۰٫۴	۱۶٫۷
کرمانشاه	۲۵	۰٫۴۸	۱٫۴	۱۹٫۳
شیراز	۵۵	۰٫۳۴	۲	۷٫۹
مجموع	۱۷۰۷	۱۴٫۳۵	۲۴٫۸۱	۹۹٫۹

با مد نظر قرار دادن توضیحات، ضرورت‌ها و مزایای بیان‌شده (ر.ک. بخش ۱-۲)، برنامه‌هایی نیز برای ذخیره‌سازی سطحی و زیرزمینی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در کشور برنامه‌ریزی و آغاز شده است که در ادامه به اختصار به آن‌ها اشاره می‌شود.

۱-۳-۱ طرح احداث مخازن ذخیره‌سازی سطحی و زیرسطحی نفت خام ایران

در اوایل دهه‌ی ۸۰ ش.، شرکت مهندسی و توسعه‌ی نفت، طرح احداث مخازن سطحی و زیرسطحی ذخیره‌سازی نفت خام را آغاز نموده است. این طرح در جهت افزایش و تثبیت تولید نفت خام و پیشگیری از نوسانات روزمره‌ی ناشی از مشکلات عملیاتی، به اجرا گذاشته شده است. بر اساس پیش‌بینی‌های انجام شده قرار است، ۷ مخزن فلزی با سقف شناور در اهواز، سیری و بهرگان و ۱۰ مخزن مدفون بتنی در امیدیه و گوره برای ذخیره‌سازی ۱۰ میلیون بشکه نفت خام احداث شود. مشخصات فنی این مخازن در جدول ۱-۳ مشاهده می‌شود (شرکت مهندسی و توسعه‌ی نفت، ۱۳۸۹).

جدول (۱-۳): مشخصات فنی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام (شرکت مهندسی و توسعه‌ی نفت، ۱۳۸۹)

بتنی مدفون		فلزی سطحی		آحاد	ویژگی مخزن
۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰	هزار متر مکعب	ظرفیت
-	-	۷۵	۵۵	متر	قطر
-	-	۱۹	۱۸	متر	ارتفاع

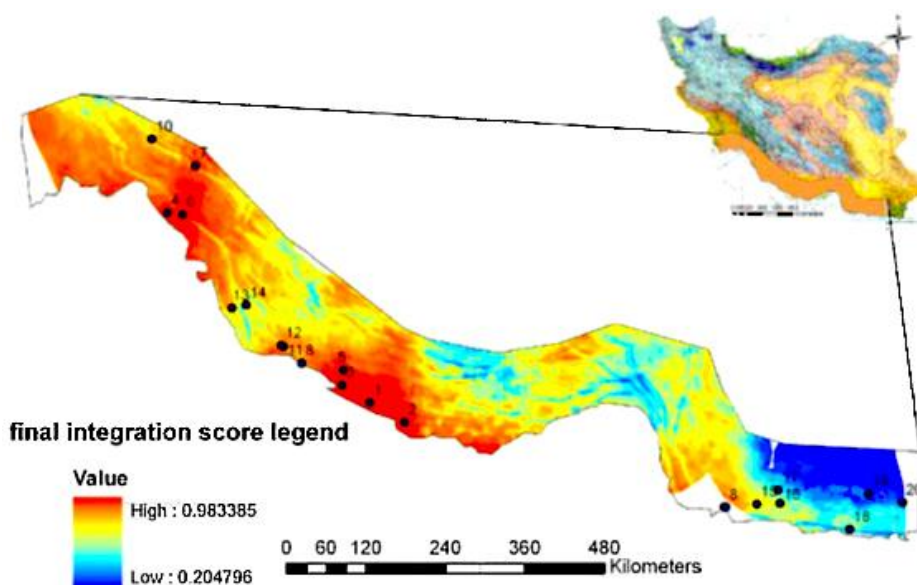
۲-۳-۱ مطالعات امکان‌سنجی ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام و فرآورده‌های نفتی

ایران

در اواسط دهه‌ی ۸۰ ش.، مطالعات امکان‌سنجی احداث مغارهای سنگی برای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی، توسط شرکت پایانه‌های نفتی ایران آغاز شده است. در این مطالعات ناحیه‌ای با عرض تقریبی ۱۰۰ کیلومتر در حاشیه‌ی ساحل خلیج فارس (ناحیه‌ی زاگرس) و دریای عمان (ناحیه-ی مکران) مورد بررسی قرار گرفته است. در فرآیند انتخاب ساختگاه مناسب مواردی متعددی بررسی

شده‌اند. برخی از این موارد عبارتند از: گزارش‌های زمین‌شناسی؛ نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و چینه‌شناسی؛ لرزه‌خیزی؛ مناطق حساس زیست‌محیطی؛ بارش‌های جوی؛ شرایط ژئومکانیکی؛ ضخامت لایه‌ها؛ مباحث پدافندی؛ نزدیکی به میدان‌های نفتی، پایانه‌های فعلی و آتی، خطوط انتقال و ایستگاه‌های پمپاژ (کریمی‌نسب و همکاران، ۱۳۸۸).

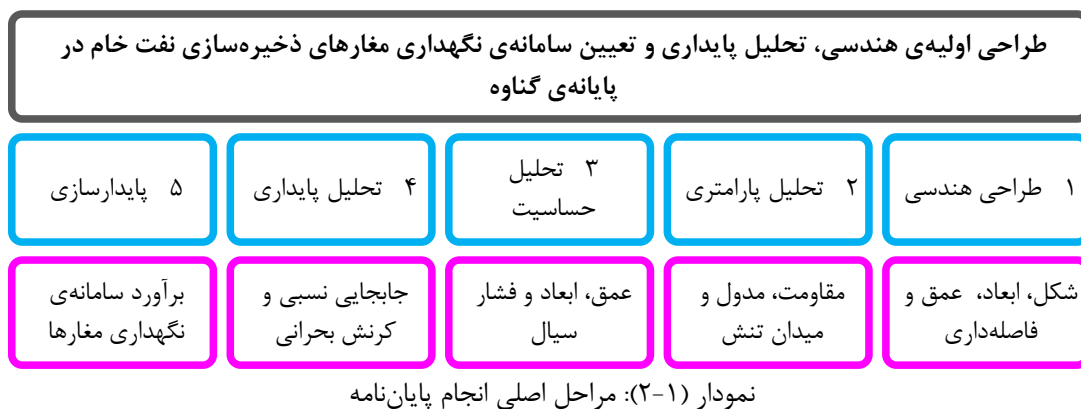
در این پژوهش ناحیه‌ی زاگرس به دو محدوده‌ی کلی تقسیم شده است. در محدوده‌ی اول دسترسی به توده‌سنگ آهک آسماری در اعماق ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری امکان‌پذیر است. علاوه بر این بررسی‌های اولیه‌ی رخنمون توده‌سنگ، امکان احداث مغاره‌های بدون پوشش را نشان می‌دهد؛ ولی قطعیت این موضوع در مطالعات بعدی مشخص خواهد شد. در محدوده‌ی دوم، امکان برخورد با توده‌سنگ آهک آسماری در عمق مناسب وجود نداشته و سازه‌ها باید دارای پوشش باشند. در شکل ۱-۱ موقعیت نقاط پیشنهادی به منظور ذخیره‌سازی نفت خام براساس ترکیبی از روش‌های هم‌پوشانی شاخص، فازی و تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی فازی به همراه امتیاز هر کدام آورده شده است (کریمی‌نسب و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل (۱-۱): موقعیت نقاط انتخاب‌شده و امتیاز آن‌ها در مطالعات امکان‌سنجی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی (کریمی‌نسب و همکاران، ۱۳۸۸)

۴-۱ تشریح مراحل اصلی پژوهش

با مد نظر قرار دادن مراحل اصلی پژوهش (نمودار ۱-۲) در ابتدا ترکیب بندی (شکل و ابعاد)، عمق قرارگیری و فاصله داری مغارها بر اساس نتایج مطالعات ژئومکانیکی اولیه‌ی ناحیه تعیین شده است. در گام بعدی به منظور تعیین پارامترهای بحرانی طراحی، تحلیل پارامتری بر روی مقاومت‌های برشی و کششی، مدول شکل‌پذیری و نیز نسبت تنش‌ها و تحلیل حساسیت بر روی عمق، ابعاد و فشار درونی سیال انجام شده است. سپس وضعیت پایداری مغارها با بکارگیری شاخص جابجایی برآورد و سامانه‌ی نگهداری اولیه برای مغارها تعیین شده است. در نهایت مدل‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و گزارش نهایی پایان‌نامه تدوین شده است.



۵-۱ سامان‌دهی پایان‌نامه

با توجه به اهداف بیان‌شده در بخش ۴-۱، گزارش نهایی پایان‌نامه در ۷ فصل به شرح زیر تهیه و تدوین شده است (نمودار ۱-۳).

۱ کلیات

در اولین فصل، کلیاتی در رابطه با ضرورت‌ها و مزایای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام، پیشینه‌ی ذخیره‌سازی درون مغارهای سنگی، مراحل اصلی پژوهش و سامان‌دهی پایان‌نامه آمده است.

۲ مفاهیم ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی

در فصل دوم، تاریخچه‌ی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی درون مغارهای سنگی، جنبه‌های مهم نگهداشت و ایمنی ذخیره‌سازی زیرزمینی، مفاهیم بنیادی سامانه‌ی مهار نشت و طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام تشریح شده است.

۳ معرفی ساختگاه گناوه و انتخاب روش طراحی

در سومین فصل، زمین‌شناسی عمومی و شرایط ژئومکانیکی ساختگاه گناوه بیان و پارامترهای مورد نیاز برای طراحی مفهومی ارائه شده‌اند. در انتها نیز روش مهار نشت و ابزار مورد نیاز برای طراحی مفهومی مغارها انتخاب شده است.

۴ طراحی هندسی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام

در فصل چهارم، پارامترهای هندسی مغارها با بکارگیری روش پیوسته‌ی عددی طراحی شده‌اند. علاوه بر این تحلیل جامعی بر روی حالات متفاوت ابعاد مغارها انجام شده و تأثیر آن بر وضعیت جابجایی، گسترش ناحیه‌ی تسلیم و تنش‌های القایی به عبارت دیگر پایداری مغارها بررسی شده است.

۵ تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت

در پنجمین فصل، تحلیل جامعی بر روی کلیه‌ی پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ (مارن و ماسه‌سنگ) و پارامترهای طراحی و عملیاتی انجام شده و حساس‌ترین پارامتر در هر گروه، برای هر دو نوع سنگ انتخاب شده است.

۶ تحلیل پایداری و پایدارسازی مغارها

در فصل ششم، پایداری مغارها با بکارگیری شاخص جابجایی (تخمین جابجایی نسبی و کرنش بحرانی) مطالعه شده و با توجه به نتایج سامانه‌ی نگهداری مورد نیاز برای آن‌ها تعیین شده است.

۷ جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی پیشنهادها

در فصل آخر، نتایج حاصل از تمام مدل‌ها و تحلیل‌ها جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی نیز برای

پژوهش‌های بعدی در این راستا و همچنین پیاده‌سازی این مطالعات برای مجموعه‌ی صنعت نفت کشور ارائه شده است.

• کلیات	فصل اول
• مفاهیم ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی	فصل دوم
• معرفی ساختگاه گناوه و انتخاب ابزار طراحی	فصل سوم
• طراحی هندسی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام	فصل چهارم
• تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت	فصل پنجم
• تحلیل پایداری و پایداری‌سازی مغارها	فصل ششم
• جمع‌بندی نتایج و ارائه‌ی پیشنهادها	فصل هفتم

نمودار (۱-۳): سامان‌دهی پایان‌نامه

فصل دوم:

مقایسه ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی

۱-۲ مقدمه

با وجود اینکه امروزه بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشید یا باد، گسترش چشم‌گیری یافته، اما هنوز نیز استفاده از سوخت‌های فسیلی، روشی متداول برای تأمین انرژی در جهان است. برای تولید برق، سرمایه‌ش، گرمایش، مواد صنعتی و کشاورزی و همچنین اهداف تجاری؛ مواد هیدروکربوری در احجام بسیار بالا بکار برده می‌شوند. در حقیقت دسترسی بدون وقفه به این مواد برای حفظ حیات اقتصادی جوامع مدرن بشری، امری ضروری است.

مطابق آمارهای موجود هر ساله میزان تقاضا، تولید، مصرف و ذخیره‌سازی محصولات هیدروکربوری نسبت به سال گذشته افزایش محسوسی می‌یابد. بنا به دلایل راهبردی و اقتصادی، حتی در زمان کسری عرضه یا بحران نیز محصولات هیدروکربوری باید در دسترس باشند. بنابراین باید حجم زیادی از این مواد در محلی ایمن ذخیره و نگهداری شود تا در هنگام نیاز مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که محصولات هیدروکربوری موادی سمی و اشتعال‌پذیر بوده و برای محیط زیست زیان‌آور هستند، برای نگهداری این مواد باید تأسیسات ذخیره‌سازی مناسب با ضریب بهره‌وری بالا طراحی شود تا استانداردهای ایمنی موجود برآورده شود.

در نگاه اول نگهداری مواد آلاینده‌ی محیط زیست در تأسیسات سطحی بسیار ساده‌تر از تأسیسات زیرزمینی است. اما امروزه دلایل متعددی وجود دارد که ذخیره‌سازی زیرزمینی این‌گونه مواد را توجیه‌پذیر و مقرون به صرفه می‌سازد. یکی از مهم‌ترین این دلایل، امنیت تأسیسات زیرزمینی

در برابر تهدیدات خارجی و خرابکاری‌ها، جنگ، شرایط نامساعد اقلیمی و خطر حریق در مناطق شهری است (ر.ک. بخش ۱-۲ و ۲-۳). از سوی دیگر با در نظر گرفتن مفاهیم ذخیره‌سازی زیرزمینی، استفاده از روش‌های دارای پوشش به سبب اطمینان از حفظ کیفیت ماده‌ی ذخیره‌شده در طول مدت بهره‌برداری، مباحث زیست‌محیطی و الزامات قانونی رو به افزایش است.

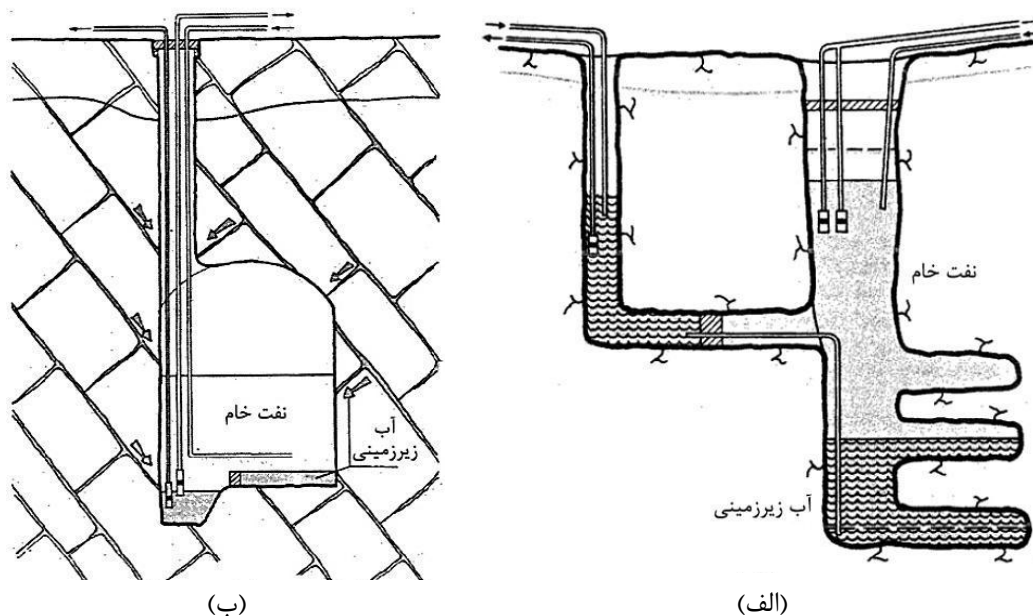
با توجه به مطالب بیان‌شده، در ابتدا، تاریخچه‌ی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مغارهای سنگی و دلایل گسترش روزافزون این فن‌آوری بیان می‌شود. در ادامه نیز مباحث مرتبط با ایمنی تأسیسات، مفاهیم پایه‌ی ذخیره‌سازی این مواد در مغارهای سنگی و روش‌های مهار نشت آن تشریح می‌شود. در نهایت برای جمع‌بندی موضوع مشخصات فنی تعدادی از مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی گردآوری‌شده، بیان و تحلیل می‌شود.

۲-۲ پیشینه‌ی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مغارهای سنگی

در جریان جنگ داخلی اسپانیا (۱۹۳۶-۱۹۳۹)، تانک‌های سطحی ذخیره‌سازی نفت خام هدف مناسبی در حملات هوایی تشخیص داده شده بودند. در این راستا دولت سوئد با بکارگیری گروهی از متخصصان، مطالعات امکان‌سنجی ساخت مخازن ایمن در مقابل بمباران هوایی را برای ذخیره‌سازی بنزین و نفت سوختی آغاز نمود. در آن زمان بهترین و تنها شیوه‌ی ایمن‌سازی، قرارگیری تانک‌های ذخیره‌سازی در مغارهای زیرزمینی تشخیص داده شد. با اثبات این امر که درزه‌های موجود در سنگ را نمی‌توان به طور کامل مسدود کرد، در سال ۱۹۳۸ دکتر *Tor Hagerman* ایده‌ی ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی، زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی را پیشنهاد نمود. منشأ این ایده، ذخیره‌سازی طبیعی آب، نفت و گاز برای میلیون‌ها سال در ساختارهای زیرزمینی بود. در آن زمان از مطالعات آزمایشگاهی در تانک‌های بتنی، نتایج رضایت‌بخشی حاصل شد؛ اما شروع جنگ جهانی دوم باعث ایجاد وقفه‌ای دو ساله در انجام آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس شد (*Morfeltd, 1983*).

اولین آزمایش بزرگ‌مقیاس ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای بدون پوشش، زیر سطح آب-

های زیرزمینی در سال ۱۹۴۰ انجام شد. این آزمایش در یک معدن فلدسپات متروکه در جزیره‌ی Archipelago نزدیک استکهلم صورت گرفت (شکل ۱-۲: الف). پس از آن در سال‌های ۱۹۴۷ تا ۱۹۵۰، دو معدن دیگر نیز به مخازن ذخیره‌سازی نفت سوختی سنگین تبدیل شدند. در سال ۱۹۴۹، به راهنمایی دکتر Hagerman و یک مهندس عمران به نام *Theo Host*، تانک‌های ذخیره‌سازی بنزین (از جنس بتن مسلح) در زیر سطح آب‌های زیرزمینی با موفقیت ساخته شدند. در نهایت روش سوئدی برای ذخیره‌سازی نفت خام، بر پایه‌ی حرکت مداوم آب زیرزمینی از درزه و ترک‌های توده‌سنگ به درون مغار برای پیشگیری از نشت هیدروکربور بنا نهاده شد (شکل ۱-۲: ب)؛ (Morfeldt, 1983).



شکل (۱-۲): (الف): نمایی از یک معدن متروکه برای ذخیره‌سازی نفت خام در سوئد؛ (ب): بکارگیری روش سوئدی ذخیره‌سازی نفت خام در زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی (Morfeldt, 1983)

در کنار این پژوهش‌ها از دهه‌ی ۴۰ به بعد، مطالعات و آزمایش‌های بنیادی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی سبک مانند بنزین در مغارهای سنگی بدون پوشش نیز توسط متخصصین و مهندسين^۱ دو شرکت بزرگ سوئدی^۲ آغاز شد. همچنین در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۴۸-۱۹۵۲ مجموعه

1. Geologist Prof. Carl Caldenius; Chief Eng. Herman Janson; Prof. Carl Ljungberg & Civ. Eng. Harald Edholm
 2. Svenska Entreprenad Aktiebolaget SENTAB (today a subsidiary of Skanska) & Svenska Vagaktiebolaget (today renamed as Johnson Construction Co: JCC)

مغارهای استوانه‌ای (سیلوشکل)^۱ دارای پوشش فولادی در زیر سطح آب‌های زیرزمینی توسط این گروه ساخته و فاصله‌ی بین صفحات فلزی و سنگ نیز با بتن پر شد. با وجود انجام عملیات گسترده‌ی تزریق، آب زیرزمینی با کمک لایه‌ی بتنی از مغارها دور می‌شد. این مغارها دارای قطری بین ۱۵ تا ۱۸ و ارتفاعی بین ۲۵ تا ۳۰ متر و دارای آرایش موازی بودند (Siosteen, 1979).

در دهه‌ی ۵۰ و ۶۰ تعداد زیادی از مغارهای ذخیره‌سازی نفت سوختی، نفت خام، فرآورده‌های سبک و ال.پی.جی^۲ در سوئد ساخته شد و به دنبال آن روش ذخیره‌سازی سوئدی در فنلاند نیز مورد استفاده قرار گرفت. امروزه در حدود ۵/۴ میلیون متر مکعب نفت خام و فرآورده‌های نفتی در مغارهای تأسیسات *Neste Oy Porvoo* ذخیره شده‌اند (ر.ک. بخش ۲-۴). فرانسوی‌ها نیز در دهه‌ی ۶۰، ال.پی.جی فشرده‌شده را، در مغارهای آهکی با استفاده از حفاری مکانیزه ذخیره نمودند (Siosteen, 1979).

به طور هم‌زمان، در هنگام جنگ جهانی دوم ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد نفتی در نروژ نیز آغاز شد. در آن زمان مغارهایی در سنگ گرانیت حفر شد و تانک‌های فولادی مشابه با انواع سطحی (شکل و ابعاد) در آن احداث شدند. این تأسیسات در *Trondheim* هنوز در حال بهره‌برداری است و دلیل اصلی احداث آن، ایمن بودن در برابر حملات هوایی در حین جنگ جهانی دوم بود. در سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۶۲ مغارهای سنگی دارای پوشش به وسیله‌ی وزارت دفاع سوئد برای ذخیره‌سازی نفت خام در نروژ ساخته شدند. هدف اصلی از ساخت این مغارها، دسترسی به سوخت از راه خطوط راه‌آهن در شرایط جنگ و یخبندان و نیز دسترسی سوئدی‌ها به اقیانوس اطلس بود (Haug & Broch, 2007).

در مجموع رخداد‌های پیش از شروع جنگ جهانی دوم، همچنین جنگ جهانی دوم و نیز بحران‌های پس از آن مانند بحران سوئز در سال ۱۹۵۶، جنگ شش‌روزه‌ی اعراب با رژیم اشغالگر فلسطین در سال ۱۹۶۷، افزایش قیمت‌های اوپک در سال ۱۹۷۳ و ... را می‌توان در زمره‌ی عوامل

1. Poly-tank Storage Facilities
2. LPG: Liquefied Petroleum Gas

اصلی رویکرد کشورهای جهان به خصوص سوئد، نروژ، ژاپن، کره ی جنوبی و آمریکا به ذخیره سازی زیرزمینی نفت خام و فرآورده های نفتی دانست. در همین راستا عربستان سعودی، دارنده ی بیشترین ذخیره ی قطعی نفت خام جهان نیز ساخت مغارهای بزرگ مقیاس ذخیره سازی فرآورده های نفتی را آغاز نمود (شکل ۲-۲). به سبب پایین بودن سطح ایستایی آب های زیرزمینی، این مغارها دارای پوشش فولادی هستند و در حدود ۳۰ میلیون بشکه مواد نفتی شامل بنزین، سوخت هواپیما، گازوئیل و روغن موتور را در خود جای داده اند (ر.ک. جدول ۲-۱)؛ (Aramco, 2003 & 2009).



شکل (۲-۲): مغارهای دارای پوشش ذخیره سازی فرآورده های نفتی در عربستان: ابها (Aramco, 2003 & 2009)

۳-۲ جنبه های ویژه ی ایمنی و نگهداشت ذخیره سازی زیرزمینی

بسته به هدف، ظرفیت مورد نیاز، ترکیب شیمیایی ماده، سطح حفاظت مورد نیاز در برابر تهدیدات خارجی و مسایل زیست محیطی می توان روشی خاص را برای ذخیره سازی زیرزمینی انتخاب و با استفاده از استانداردهای موجود ماده ی مورد نظر را نگهداری نمود. بدون توجه به نوع روش، برخی از جنبه های ذخیره سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری از اهمیت بیش تری برخوردار هستند که در ادامه به آن ها اشاره می شود.

۲-۳-۱ ایمنی زیست‌محیطی

حفظ کیفیت ماده به همراه حفاظت از محیط زیست در برابر هرگونه آلاینده در طول فرآیند ذخیره‌سازی و حتی پس از اتمام آن، از مهم‌ترین الزامات ذخیره‌سازی هستند. این دو عامل سبب شده‌اند که از میان روش‌های موجود، ذخیره‌سازی زیرزمینی و در میان روش‌های زیرزمینی، مغارهای دارای پوشش، مطلوبیت بیشتری را بدست آورند.

۲-۳-۲ ایمنی ماده‌ی ذخیره‌شده

مواد هیدروکربوری دارای ماهیتی اشتعال‌پذیر بوده و در مجاورت با اکسیژن و یک عامل محرک مانند حرارت یا جرقه به راحتی آتش می‌گیرند. بنابراین حفاظت در برابر آتش‌سوزی و انفجار در هنگام مراحل بهره‌برداری تأسیسات، یکی دیگر از جنبه‌های مهم ایمنی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری است. در این راستا پیشگیری از ورود هوا به مغار با استفاده از گازهای بی‌اثر باید به دقت انجام شود.

۲-۳-۳ ایمنی تأسیسات در برابر حوادث طبیعی

یکی از مهم‌ترین معایب سازه‌های سطحی آسیب‌پذیری این‌گونه تأسیسات در برابر حوادث طبیعی مانند سیل، زلزله، گردباد و صاعقه است. از این دیدگاه سازه‌های زیرزمینی بدون اینکه لازم باشد تمهیدات خاصی در این مورد اندیشیده شود؛ در برابر هرگونه آسیبی از ایمنی کافی برخوردار هستند.

۲-۳-۴ ایمنی در برابر تهدیدات برون‌مرزی

مواد هیدروکربوری در زمره‌ی انرژی‌های تجدیدناپذیر و سرمایه‌های ملی و راهبردی یک کشور هستند. از این رو حفاظت و صیانت از آن‌ها امری کاملاً بدیهی است. هنگامی که حجم زیادی از این مواد ارزشمند درون سازه‌های زیرزمینی نگهداری می‌شود، باید ایمنی آن در برابر حملات مسلحانه و تهاجمات بیگانگان تأمین شود. بنابراین پنهان بودن تأسیسات در زیر زمین یکی از بهترین روش‌های تأمین ایمنی برای آن‌ها است. از دیدگاهی دیگر، ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در نواحی

شهری به عنوان جایگزین تانک‌های سطحی، می‌تواند در کنار توجه داشتن به مباحث زیبایی‌شناسی، ایمنی و امنیت را برای جامعه نیز فراهم آورد.

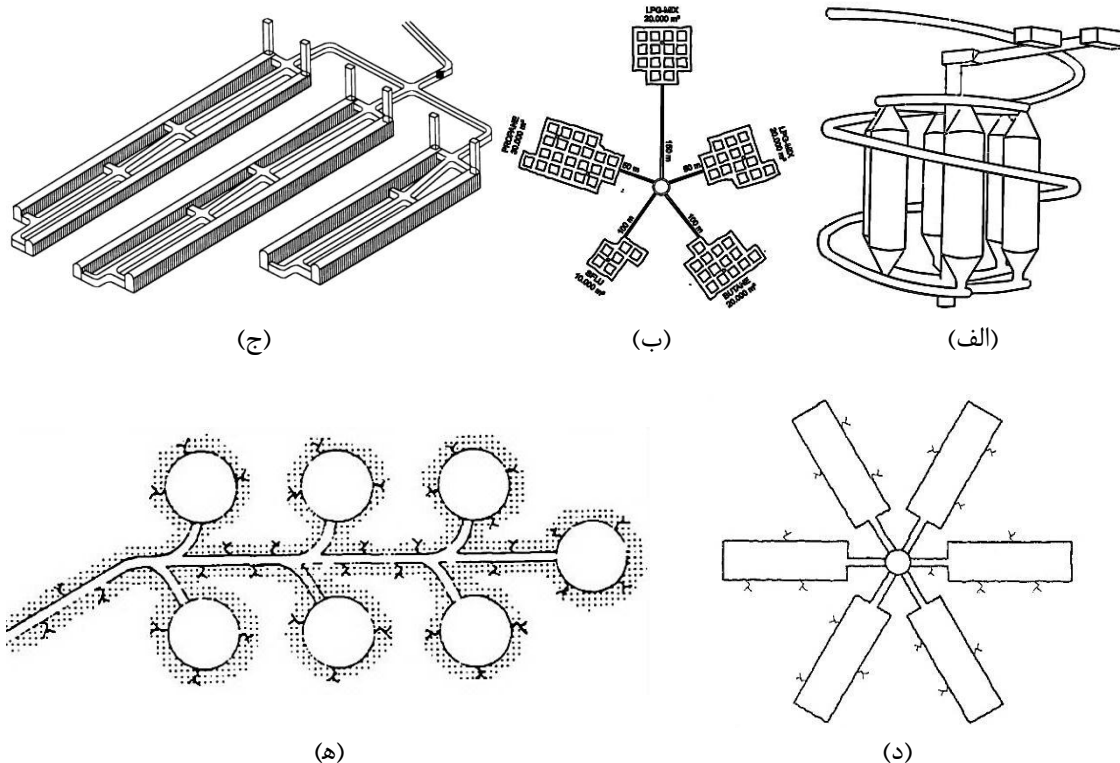
۵-۳-۲ نگهداشت تأسیسات ذخیره‌سازی

فعالیت مداوم تأسیسات ذخیره‌سازی فرآیند نگهداشت آن‌ها را با دشواری‌های خاصی همراه ساخته است. در ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری به خصوص برخی از انواع نفت خام و فرآورده‌های نفتی توجه به مباحث رسوب واکس و آسفالتین، رشد باکتری‌ها و تجمع مواد فرار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای رفع این‌گونه مشکلات حتی ممکن است نیاز به استفاده از مغار ذخیره نیز باشد. از سوی دیگر در صورتی که به تغییر کاربری تأسیسات نیاز باشد، انجام بازبینی و عملیات نگهداشت می‌تواند در این زمان نیز انجام شود (Fossum & Moe, 2008). البته تغییر کاربری سازه‌های ذخیره‌سازی به ندرت انجام شده و این فرآیند می‌تواند برای مواد با خواص مشابه انجام شود. به عنوان نمونه تغییر کاربری مغارهای ذخیره‌سازی تبریدی پروپان به ذخیره‌سازی تبریدی مخلوط ال.پی.جی و یا بوتان امری امکان‌پذیر به نظر می‌رسد. توجه به این نکته ضروری است که فرآیند تغییر کاربری سازه نیز به انجام عملیات نگهداشت گسترده‌ای نیاز دارد.

۴-۲ طراحی هندسی سازه‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی نفت خام

تأسیسات زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری شامل چندین سازه در مجاورت همدیگر است. تعداد و ابعاد سازه‌ها در یک تأسیسات خاص بیش‌تر تابعی از ظرفیت کل ذخیره‌سازی، تنوع محصولات ذخیره‌شده در تأسیسات و نیز شرایط ژئومکانیکی توده‌سنگ است. سازه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی به طور معمول از مغارها، چاه‌ها و تونل‌ها تشکیل می‌شوند. آرایش و پیکربندی^۱ این سازه‌ها به عواملی مانند الزامات عملیاتی، توزیع سه‌بعدی تشکیلات مناسب زمین‌شناسی، روش حفاری و الزامات طراحی ساختار پوشش (در صورت وجود) بستگی دارد (شکل ۲-۳)؛ (Morfeldt, 1983).

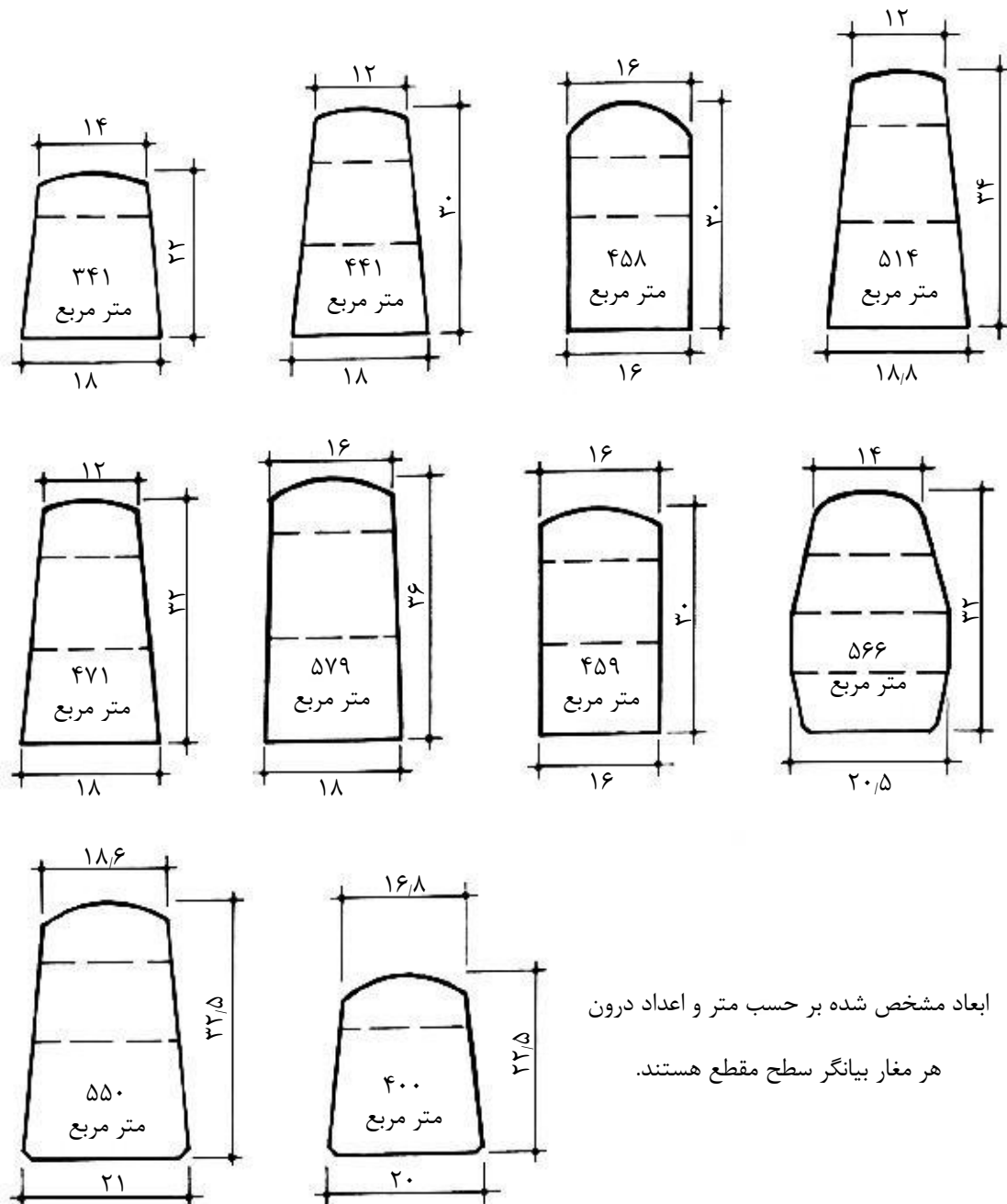
1. Layout & Configuration



شکل (۲-۳): آرایش‌های گوناگون سازه‌های ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری: (الف): آرایش شعاعی سیلوه‌های ذخیره‌سازی، ارتفاع = ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، با تونل‌های دسترسی در بالا و پایین؛ (ب): آرایش شعاعی انبارهای اتاق و پایه‌ی ذخیره‌سازی ال.پی.جی؛ (ج): آرایش موازی مغارهای ذخیره‌سازی *Mongstad* در نروژ، ظرفیت کل ۱/۳ میلیون متر مکعب نفت خام؛ (د): آرایش ستاره‌ای مغارها، طول = ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر، عرض = ۲۰ متر و ارتفاع = ۳۰ متر؛ (ه): سیلوه‌های موازی ذخیره‌سازی، دارای قابلیت گسترش تأسیسات (Morfeldt, 1983; PB-KBB, 1998; Willett, 1996)

سازه‌های ذخیره‌سازی نفت خام، معمولاً از مجموعه مغارهای موازی همانند شکل ۲-۳: ج تشکیل می‌شوند. شکل سطح مقطع و ابعاد آن‌ها نیز بسته به عوامل بیان‌شده می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان نمونه در شکل ۲-۴، تعدادی از مقاطع متداول مغارهای ذخیره‌سازی فنلاندی آورده شده است. عرض این مغارها در بازه‌ی ۱۲ متر تا ۲۱ متر، ارتفاع آن‌ها در بازه‌ی ۲۲ متر تا ۳۶ متر و سطح مقطع آن‌ها در بازه‌ی ۳۴۰ متر مربع تا ۵۸۰ متر مربع متغیر است. این مجموعه در تأسیسات *Neste Oy Porvoo*، از ۲۷ مغار ذخیره‌سازی نفت خام با ظرفیت کل ۳/۳ میلیون متر مکعب و ۱۰ مغار ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی با ظرفیت کل ۲/۱ میلیون متر مکعب تشکیل شده است. این مغارها زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی و در سنگ‌های گرانیت و گنایس احداث شده و بدون پوشش

هستند (Johansson, 1987).



شکل (۲-۴): مقاطع متداول مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی فنلاندی (Johansson, 1987)

در انتخاب ابعاد مغارهای ذخیره‌سازی باید شرایط ژئومکانیکی و هیدروژئولوژی ساختگاه مغارها و همچنین مباحث فنی و عملیاتی در رابطه با ظرفیت ذخیره‌سازی و نوع ماده در نظر گرفته شود. علاوه بر این موارد برای بهینه‌سازی ابعاد مغارها باید بر روی پارامترهایی مانند هزینه‌های

حفاری، سامانه‌ی نگهداری، نصب پوشش یا پرده‌ی آب، سامانه‌ی زهکشی و تزریق نیز بررسی‌های اقتصادی لازم انجام شود. به عنوان نمونه پس از بررسی‌های انجام‌شده برای تعیین ابعاد مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام در پایانه‌ی *Sture* نروژ، ابعاد بهینه در بازه‌ی ۱۸ متر تا ۲۰ متر عرض و ۳۲ متر تا ۳۴ متر ارتفاع انتخاب شده است (Midtlien, 2007).

۵-۲ روش‌های مهار نشت نفت خام به توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارهای سنگی

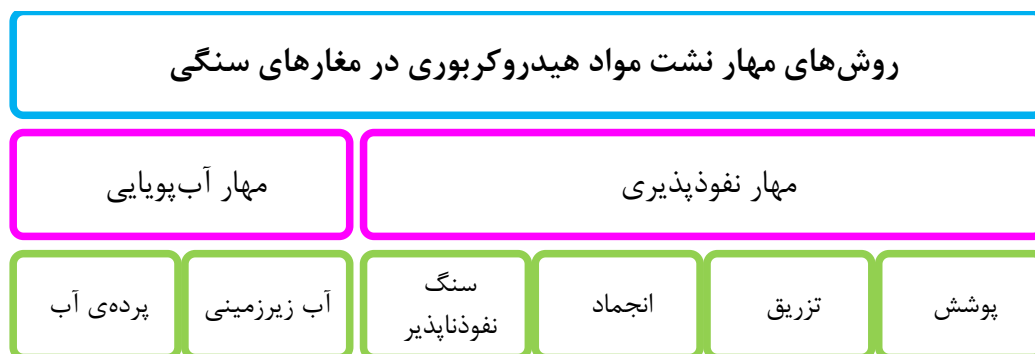
در فرآیند ذخیره‌سازی درون مغارهای سنگی، باید از نشت و فرار نفت خام به توده‌سنگ دربرگیرنده پیشگیری شود. مهار نشت سیال، کلید اصلی توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی طرح و همچنین حفاظت از آلودگی محیط پیرامون مغارها است. امروزه روش‌های مهار نشت بر پایه‌ی ۲ اصل زیر استوار هستند: مهار نفوذپذیری و مهار آب‌پویایی^۱ (نمودار ۲-۱). مهار نفوذپذیری بدین معناست که با بکارگیری روش‌هایی مانند پوشش، تزریق و انجماد، نشت سیال به طور کامل حذف یا به حد قابل قبولی کاهش داده می‌شود. منظور از پوشش، لایه‌های فولادی، بتنی یا ترکیبی از لایه‌های فولادی-بتنی است. برای تزریق توده‌سنگ باید تعداد زیادی از چال‌های متقاطع با درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها حفر و با دوغاب سیمانی پر شود. در مناطقی که دارای سنگ‌های سست است، عملیات تزریق حتی می‌تواند پیش از حفاری مغارها نیز آغاز شود. مهار نفوذپذیری بوسیله‌ی انجماد معمولاً برای ذخیره‌سازی ال.پی.جی و ال.ان.جی^۲ بکار برده می‌شود. در این حالت توده‌سنگ دربرگیرنده تحت تأثیر ذخیره‌سازی تبریدی گاز منجمد می‌شود. با بکارگیری این شیوه به همراه مهار آب‌پویایی، یک حصار دوگانه در برابر نشت سیال ایجاد می‌شود. در نهایت انتخاب ساختگاهی که نفوذپذیری پایینی داشته باشد نیز می‌تواند در این روش مهار نشت بسیار موثر باشد (Grosv, 2007).

در مهار آب‌پویایی، فشار آب‌های زیرزمینی (در برابر فشار ذخیره‌سازی) نشت سیال را مهار می‌نماید. فشار مورد نیاز می‌تواند با قرارگیری مغارها در عمق مناسب، زیر سطح ایستایی آب‌های

1. Hydrodynamic Method

2. LNG: Liquefied Natural Gas

زیرزمینی یا با استفاده از پرده‌ی آب^۱ مصنوعی تأمین شود. بر اساس قوانین کشور نروژ برای مهار آب-پویایی، کمترین فشار آب زیرزمینی باید در حدود ۰٫۲ مگا پاسکال بیش‌تر از فشار ذخیره‌سازی باشد. در این حالت جانمایی مغارها در توده‌سنگی که دارای نفوذپذیری پایینی است، در کنار استفاده از عملیات پیش‌تزریق برای بهسازی زمین می‌تواند هزینه‌های عملیاتی مهار آب‌پویایی را کاهش دهد (Kjorholt & Broch, 2007).

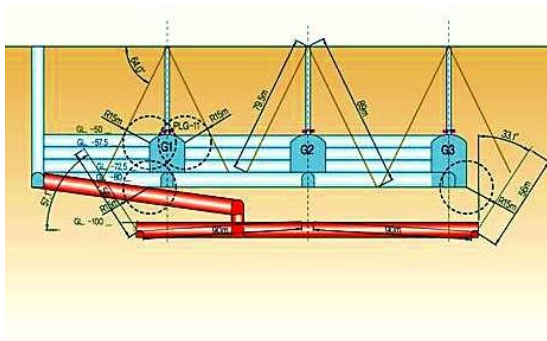


نمودار (۱-۲): روش‌های مهار نشت مواد هیدروکربوری به توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارهای سنگی (Kjorholt & Broch, 2007)

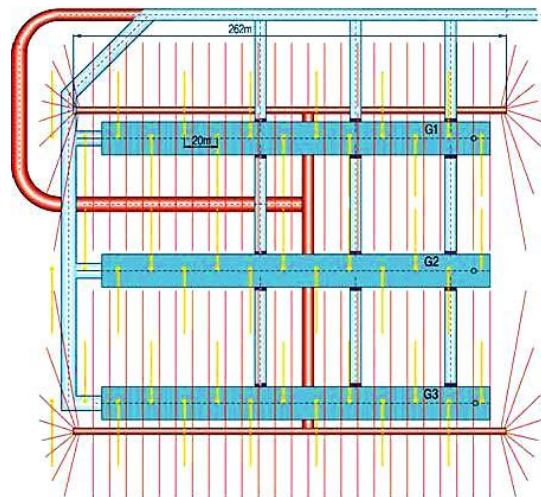
با توجه به این توضیحات، مغارهای سنگی ذخیره‌سازی نفت خام به ۲ گروه دارای پوشش و بدون پوشش تقسیم می‌شوند. در مغارهای دارای پوشش وظیفه‌ی اصلی مهار نشت بر عهده‌ی پوشش فولادی است. در گذشته برخی از مغارهای ذخیره‌سازی دارای پوشش بتنی بودند؛ اما امروزه این شیوه‌ی ذخیره‌سازی تقریباً منسوخ شده است. در مغارهای بدون پوشش نشت سیال، بوسیله‌ی آب زیرزمینی، پرده‌ی آب یا ترکیبی از آن‌ها مهار می‌شود. بکارگیری مستقل روش‌هایی مانند تزریق، انجماد و انتخاب سنگ نفوذناپذیر نمی‌تواند در مقیاس کامل از دیدگاه‌های فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر باشد؛ اما در مغارهای دارای پوشش و بدون پوشش از روش‌های تزریق و انجماد نیز استفاده می‌شود. انتخاب توده‌سنگ با نفوذپذیری مناسب نیز اولین گام در انتخاب ساختگاه مغارهای ذخیره‌سازی است و در مرحله‌ی مطالعات امکان‌سنجی به صورت گسترده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۵-۲ مغارهای سنگی دارای پوشش

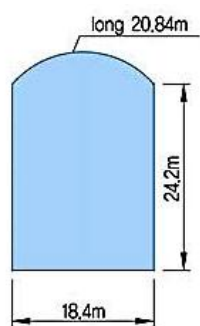
تأسیسات دارای پوشش ذخیره‌سازی نفت خام از سازه‌هایی با کاربری و ابعاد متفاوت تشکیل می‌شوند. به طور معمول این سازه‌ها شامل مغارهای ذخیره‌سازی، تونل‌های دسترسی، تونل‌های ارتباطی و گالری‌های زهکشی هستند (شکل ۲-۵). بر اساس قوانین زیست‌محیطی در اروپا و آمریکا، مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام باید دارای سامانه‌ی مهار نشت کارا با ضریب اطمینان بالا باشند. این سامانه باید به گونه‌ای طراحی شود تا از مهاجرت نفت خام به توده‌سنگ دربرگیرنده، آب‌های زیرزمینی و جو پیشگیری نماید. قوانین زیست‌محیطی برخی از کشورهای اروپایی مانند آلمان وجود مجموعه‌ای شامل چندین حصار مستقل را لازم می‌داند (Reik & Rahen, 2006).



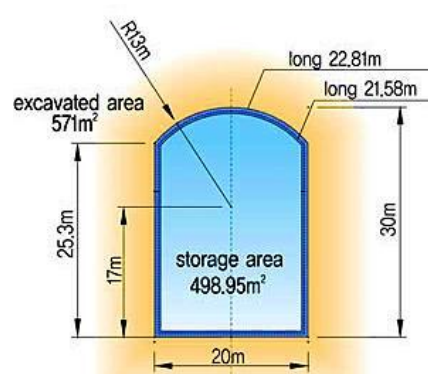
(ب)



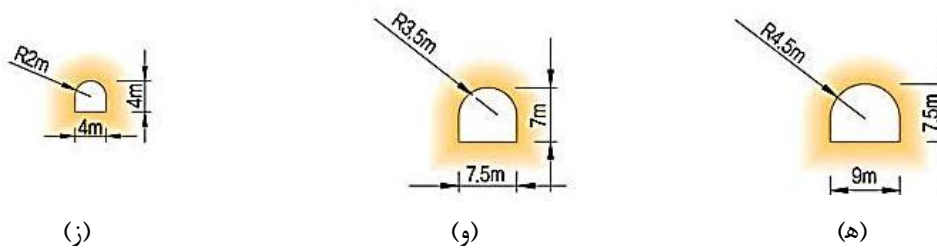
(ف)



(د)

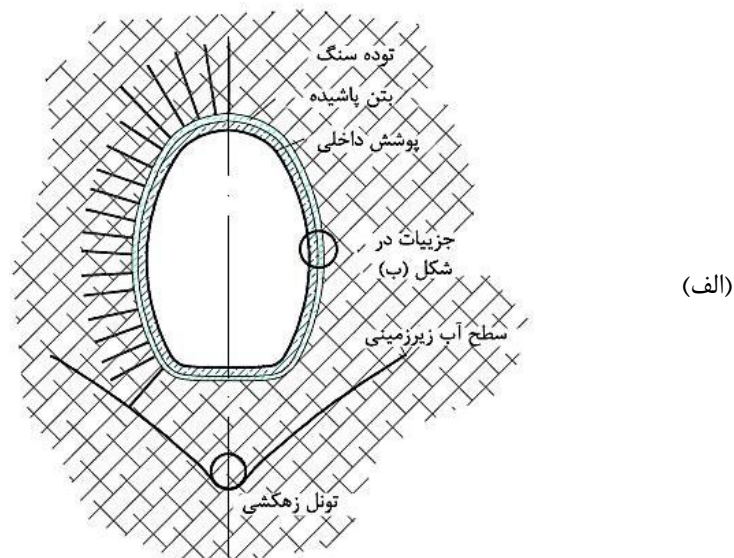


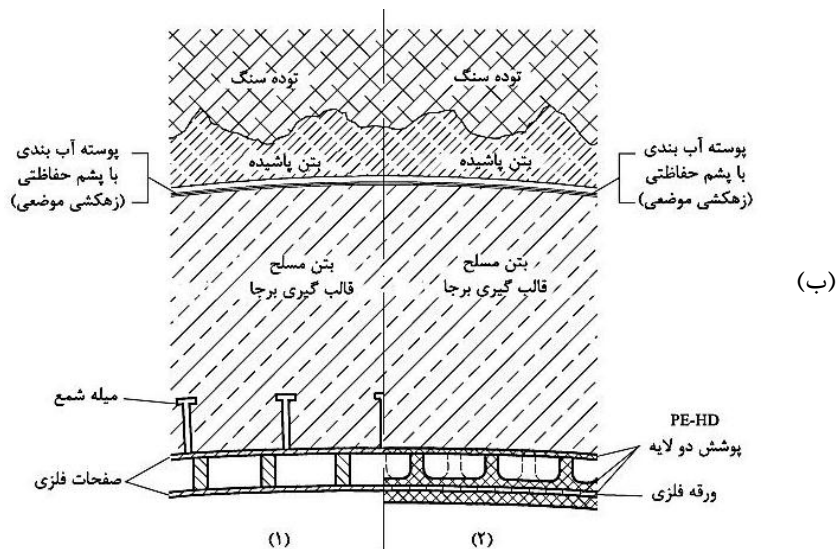
(ج)



شکل (۲-۵): تأسیسات دارای پوشش ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع‌شده با ظرفیت ۳۲۰ هزار متر مکعب؛ (الف): پلان کلی تأسیسات به همراه سامانه‌ی زهکشی مغارها؛ (ب): مقطع قائم تأسیسات به همراه تونل‌های دسترسی و ارتباطی؛ (ج): مغار دارای پوشش؛ (د): فضای درونی مغار؛ (ه): تونل دسترسی با سطح مقطع ۵۹ متر مربع؛ (و): تونل ارتباطی با سطح مقطع ۴۷ متر مربع؛ (ز): گالری زهکشی با سطح مقطع ۱۴ متر مربع (Kim, et al., 2009)

یکی از کلیدی‌ترین مراحل ساخت یک مغار با هر نوع کاربری، ایجاد دیواره‌ی نهایی صاف و تا حد امکان با گوشه‌های مدور است. این امر در مغارهای ذخیره‌سازی برای استفاده از ظرفیت باربری بهینه‌ی توده‌سنگ و ساخت لایه‌های پوشش پر اهمیت‌تر است. لایه‌های پوشش بعد از حفاری و پایدارسازی مغار، هنگامی که تغییر شکل توده‌سنگ به سطح رضایت‌بخشی رسید، درون مغار نصب می‌شوند. در شکل ۲-۶ سامانه‌ی مهار نشت یک مغار دارای پوشش ذخیره‌سازی نفت خام به همراه جزئیات آن مشاهده می‌شود. این سامانه از درون مغار به سمت بیرون آن از لایه‌های متعددی تشکیل شده است:





شکل (۲-۶): سامانه‌ی چندلایه‌ی مهار نشت مغاره‌های دارای پوشش؛ (الف): کلیات سامانه‌ی مهار نشت؛ (ب): جزئیات دو نمونه از مغاره‌های دارای تانک ذخیره‌سازی یا پوشش فولادی (Reik & Rahen, 2006)

۲-۵-۱-۱ پوشش فولادی

کارکرد اصلی درونی‌ترین پوشش مغار، مهار نشت نفت خام است و ضخامت آن می‌تواند در حدود ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر باشد. ماده‌ای که برای درونی‌ترین پوشش مغار در نظر گرفته می‌شود، باید در برابر نفت خام نفوذناپذیر بوده و از نظر شیمیایی نیز در برابر نفت، ناخالصی‌های همراه آن و محیط خارج مقاوم باشد. به همین دلیل پس از انجام پژوهش‌های متعدد فولاد ضد زنگ به عنوان بهترین ماده برای پوشش درونی مغاره‌های ذخیره‌سازی نفت خام انتخاب شده است. خواص اصلی پوشش فولادی شامل ضریب کشسانی، مقاومت تسلیم و ظرفیت نهایی کرنش و خستگی است. از دیدگاه ساختاری، پوشش فولادی مغار قابلیت باربری ندارد؛ به همین دلیل با پوشش بتنی نگهداری و این پوشش نیز بوسیله‌ی توده‌سنگ نگهداری می‌شود. پوشش فولادی باید بتواند در برابر تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از تغییر شکل‌های کشسان و شکل‌پذیر دیواره‌ی مغار مقاومت نماید. همچنین مقاومت آن در برابر خستگی، کماتش و خوردگی نیز باید به دقت مورد بررسی قرار گرفته و ارزیابی شود (Damjanac, et al., 2002 & Okuno, et al., 2006).

در شکل ۲-۶: ب، دو نمونه از تانک‌های دولایه‌ی ذخیره‌سازی نشان داده شده است. بخش

(۱)، کاربرد صفحات فولادی پیش‌ساخته^۱ را نشان می‌دهد. این صفحات فولادی دوقلو هستند و با استفاده از جداکننده‌های جوش‌خورده^۲ به هم متصل شده‌اند. همچنین این صفحات به وسیله‌ی پایه-هایی (میله شمع)^۳ به طور کامل در بتن فرو رفته و محکم شده‌اند. به همین دلیل صفحات فولادی می‌توانند به عنوان قالب^۴ در فرآیند قالب‌گیری بتن نیز بکار برده می‌شوند. فضای بین دو صفحه‌ی فولادی باید به قطعات مجزایی تقسیم شود تا جمع‌آوری هرگونه نشت احتمالی از تانک درونی را تسهیل نماید. بسته به نوع نفت خام، برای پیشگیری و محافظت از پدیده‌ی خوردگی در صفحات فولادی، باید روشی خاص مانند حفاظت کاتدی- آندی یا پوشش‌های ضد خوردگی بکار برده شود (Reik & Rahen, 2006).

شکل ۲-۶: ب، بخش (۲)، کاربرد اجزا دولایه‌ی پیش‌ساخته از جنس پلی‌اتیلن چگال^۵ را نشان می‌دهد. این نوع پلی‌اتیلن، نوعی پلاستیک سخت قابل بازیافت است که در اثر حرارت شکل‌پذیر می‌شود. این پلاستیک دارای مقاومت کششی بالا بوده و در برابر حلال‌ها مقاوم است. ورقه‌ی فلزی نیز در این حالت به عنوان حصار انتشار^۶ عمل می‌کند و در طرفی که نفت خام قرار دارد نصب می‌شود. از آنجا که پلی‌اتیلن هدایت الکتریکی بسیار کمی دارد، برای اجتناب از بارگیری الکتریکی در هنگام تزریق یا برداشت، باید از روکش‌های سطحی و تدابیر خاصی استفاده شود. دو صفحه با کمک جداکننده‌هایی از همان جنس به همدیگر ثابت می‌شوند. در این حالت نیز صفحات با استفاده از پایه-هایی مانند بخش (۱) یا با کمک چسب^۷ و تجهیزات مکانیکی موضعی به بتن متصل می‌شوند (Reik & Rahen, 2006).

-
1. Pre-Fabricated Twin Steel Plates
 2. Welded Spacer
 3. Stud
 4. Formwork
 5. PE-HD: High Density Poly-Ethylene
 6. Diffusion Barrier
 7. Adhesive

۲-۱-۵-۲ لایه‌ی لغزشی

این میان‌لایه بین پوشش فولادی و بتنی قرار می‌گیرد. جنس لایه‌ی لغزشی از قیر^۱ و وظیفه‌ی اصلی آن کاهش اصطکاک، کاهش کرنش‌های محیطی فولاد و محافظت از پوشش فولادی در برابر خوردگی است. هر چه مقاومت برشی لایه‌ی قیری کمتر باشد، اثر مطلوب‌تری در کاهش اصطکاک بین فولاد و بتن خواهد داشت. ضخامت این لایه می‌تواند در حدود ۱ تا ۶ میلی‌متر باشد (Johansson, 2004).

۳-۱-۵-۲ پوشش بتنی

این لایه‌ی میانی، بین پوشش فولادی و توده‌سنگ نصب می‌شود. وظیفه‌ی اصلی آن انتقال فشار ذخیره‌سازی درون مغار به توده‌سنگ، توزیع یکنواخت تغییر شکل‌ها و کاهش کرنش در پوشش فولادی است. در عین حال شالوده‌ای صاف و صیقلی برای پوشش فولادی نیز به شمار می‌آید. ضخامت این لایه بسته به مقاومت توده‌سنگ می‌تواند در حدود ۰٫۵ متر تا ۱٫۲ متر باشد (شکل ۲-۶)؛ (Charnaval, et al., 2004 & Johansson, 2004).

۴-۱-۵-۲ شبکه‌ی آرماتورها

آرماتور برای مسلح کردن بتن بکار برده می‌شود و کرنش مماسی را بین تعداد زیادی از ترک‌های کوچک موجود در بتن، توزیع می‌نماید. میزان تقویت بتن به شرایط زمین‌شناسی و نوع پوشش فولادی بستگی دارد. هر چه مقاومت توده‌سنگ بیش‌تر باشد، نیاز به تقویت بتن نیز کاهش می‌یابد. هر چند اگر فراوانی درزه‌ها بسیار کم باشد یا تعداد کمی، شکستگی‌های بزرگ در توده‌سنگ وجود داشته باشد، نیاز به تقویت بتن افزایش می‌یابد (Charnaval, et al., 2004).

۵-۱-۵-۲ لایه‌ی بتن پاشیده

معمولاً یک لایه‌ی بتن نفوذپذیر با مقاومت کم، با اهداف محافظت از سامانه‌ی زهکشی، بهبود تماس

1. Bitumen

هیدرولیکی با سامانه‌ی زهکشی و نیز کاهش درهم قفل‌شدگی بین بتن و سنگ بر روی سطح توده- سنگ پاشیده می‌شود (شکل ۲-۶)؛ (Charnaval, et al., 2004 & Johansson, 2004).

۲-۵-۱-۶ سامانه‌ی زهکشی

سامانه‌ی زهکشی مغاره‌های دارای پوشش معمولاً از لوله‌های پلاستیکی موج‌دار و مشبک با قطر خارجی تقریبی ۸۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر تشکیل می‌شود. همچنین سامانه‌ی زهکشی شامل قسمت‌های متقاطع^۱ و لوله‌های جمع‌آوری با قطر ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر است. سراسر سامانه‌ی زهکشی با لایه‌ای از ژئوتکستایل^۲ سنگین و نیز لایه‌ای از بتن پاشیده‌ی نفوذپذیر و کم مقاومت پوشانده می‌شود. لوله‌های زهکشی ممکن است جهت عبور از تمام ترک‌های افقی و قائم موجود در سنگ و بتن به صورت زاویه‌دار نیز نصب شوند. از آنجایی که مغاره‌های سنگی دارای پوشش در عمقی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر جانمایی می‌شوند، فشار همه‌جانبه‌ی ستون آب زیرزمینی در بیرون مغار می‌تواند در حدود ۱ تا ۲ مگا پاسکال باشد. اگر فشار عملیاتی ذخیره‌سازی کمتر از این مقدار شود، یا اگر فشار مغار به فشار جو برای انجام بازرسی، تعمیر و نگهداری کاهش داده شود، پوشش فولادی در معرض بارگذاری خارجی قرار می‌گیرد. سامانه‌ی زهکشی که در بیرون از مغار نصب می‌شود، دارای کارکرد کاهش فشار همه-جانبه‌ی آب زیرزمینی است. در واقع این سامانه، فشار آب در برابر پوشش فولادی را کاهش داده و از ایجاد پدیده‌ی کماتش^۳ نیز در پوشش فولادی پیشگیری می‌نماید (Damjanac, et al., 2002 & Ratigan & hall, 1999).

پایش میزان نشت نفت خام و زهکشی آن نیز، یکی دیگر از وظایف مهم این سامانه است. از این رو سامانه‌ی زهکشی نقشی دوگانه جهت زهکشی آب و زهکشی نفت به صورت هم‌زمان دارد. هرگونه نشت نفت به خارج توسط جریان‌سنج‌ها و فشارسنج‌ها به سرعت آشکار و توسط لوله‌های زهکشی جمع‌آوری می‌شود (Charnaval, et al., 2004).

1. X-Cross Pieces
2. Geotextile
3. Buckling

علاوه بر این موارد، بین ساختار خارجی پوشش بتنی مغار و توده سنگ می‌تواند پوسته‌ی آب-بندی^۱ با پشم حفاظتی^۲ نیز برای پیشگیری از نفوذ آب از سنگ به بتن و فولاد و محافظت از آن‌ها در برابر خوردگی قرار داده شود (شکل ۲-۶). در مواردی که پوشش درونی در اثر انفجار و آتش‌سوزی آسیب شدیدی دیده باشد، پوسته‌ی آب‌بندی بین بتن و توده سنگ، به عنوان حصار تکمیلی عمل می‌کند. هنگامی که این لایه نیز نتواند تراوش نفت را مهار کند، سامانه‌ی زهکشی آب زیرزمینی، نفت‌نشت‌کرده را جمع‌آوری می‌نماید (Reik & Rahen, 2006).

۲-۵-۱-۷ توده سنگ

توده سنگ در برگرفته، آخرین لایه‌ی یک مغار دارای پوشش ذخیره‌سازی است. فشار ذخیره‌سازی و تغییر شکل‌های ایجادشده در اثر بارگذاری‌های متناوب، توسط این لایه تحمل می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های توده سنگ در برگرفته مغارهای دارای پوشش می‌توان به مقاومت و مدول آن و همچنین شرایط هیدروژئولوژی آن اشاره نمود (Brandshaug, et al., 2001).

۲-۵-۲ مغارهای سنگی بدون پوشش (روش سوئدی)

در این روش، نفت خام درون مغاری بدون پوشش و در تماس مستقیم با دیواره‌ی مغار دارای بستر ثابت آب ذخیره می‌شود. نشت نفت خام به توده سنگ با استفاده از جریان پایدار آب به درون مغار مهار و آب جمع‌شده در کف مغار نیز توسط پمپ به بیرون منتقل و تصفیه می‌شود (در سوئد محتوی نفت آب خروجی باید کمتر از ۵ پی.پی.ام باشد (Siosteen, 1979)). برای ذخیره‌سازی در مغارهای بدون پوشش به توده سنگ با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ژئومکانیکی مناسب نیاز است تا بتوان در آن مغاری بزرگ‌مقیاس را با سامانه‌ی نگهداری کم تا متوسط، حفر نمود. نفوذپذیری توده سنگ در برگرفته باید مناسب بوده و مغار نیز در عمق مناسبی زیر سطح آب‌های زیرزمینی قرار داشته باشد.

1. Sealing Membrane
2. Fleece

در صورتی که میزان آب ورودی به مغار بیش از حد مورد نیاز باشد، هزینه‌های پمپاژ یا زهکشی افزایش یافته و برای کاهش نفوذپذیری باید توده‌سنگ دربرگیرنده تزریق شود (Haug, 2007).

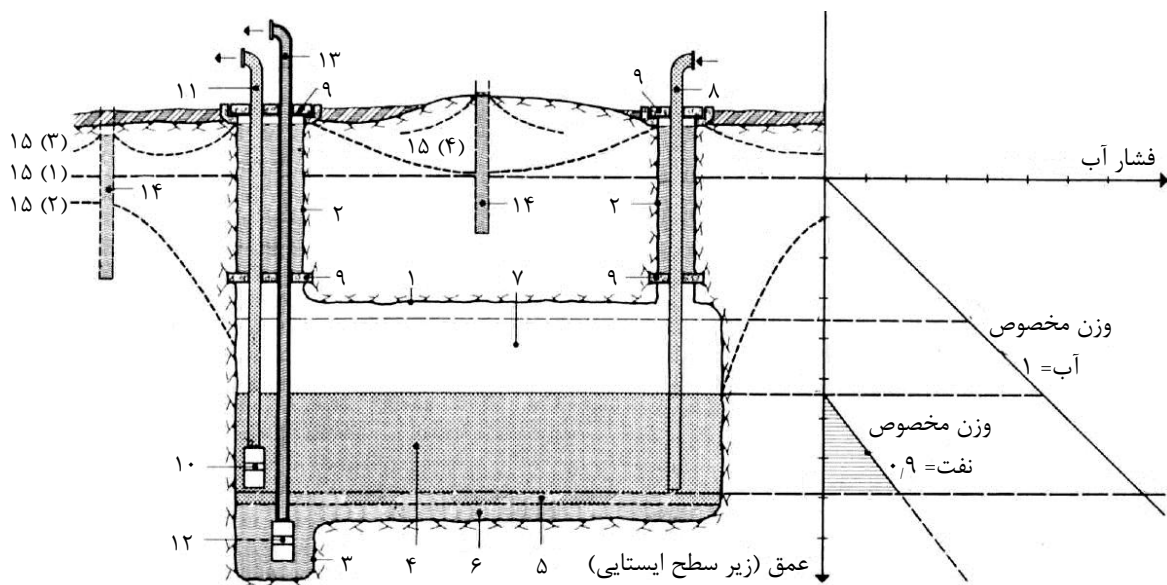
تأمین آب مورد نیاز برای عملکرد بهینه‌ی تأسیسات الزامی است. از این‌رو مغارها باید در نزدیکی منابع بزرگ آب مانند دریا، دریاچه، کانال‌ها، رودخانه‌ها یا عوارض زیرزمینی مانند سفره‌های آب یا غارهای کارستی پر از آب قرار داشته باشند. در صورتی که فاصله‌ی تأسیسات تا منابع آب زیاد باشد، نشت را می‌توان به وسیله‌ی ترواش آب^۱ از چال‌ها، گالری‌ها یا تونل‌هایی در بالای تاج مغار مهار نمود. این چال‌ها و گالری‌ها پرده‌ی آب نامیده می‌شوند (Kjorholt & Broch, 2007).

در شکل ۲-۷، یک مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام در زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی به همراه سامانه‌ی پرده‌ی آب مشاهده می‌شود. توضیح مربوط به اعداد درون شکل به ترتیب عبارتند از: ۱- مغار سنگی؛ ۲- چاه پرشده با آب؛ ۳- حوضچه‌ی پمپاژ؛ ۴- نفت خام؛ ۵- سطح مشترک نفت خام و آب؛ ۶- بستر آب؛ ۷- گازهای فرار نفتی؛ ۸- لوله‌ی تزریق نفت خام؛ ۹- پلاگ بتنی؛ ۱۰- پمپ نفت؛ ۱۱- لوله‌ی برداشت نفت خام؛ ۱۲- پمپ آب؛ ۱۳- لوله‌ی برداشت آب؛ ۱۴- چال پرده‌ی آب؛ ۱۵- سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی (Calminder & Hahn, 1982).

۲-۵-۲ پرده‌ی آب

همان‌طور که اشاره شد، پرده‌ی آب مجموعه‌ای از چال‌ها برای تزریق آب با فشار در بالای تاج مغار است. این چال‌ها می‌توانند از تونل‌های کوچکی واقع در بالای مغار یا از سطح زمین حفر شوند. در صورتی که مغارهای مجاور دارای مواد متفاوتی باشند، پرده‌ی آب باید در بین مغارها نیز احداث شود. فاصله‌ی بین چال‌ها به نفوذپذیری توده‌سنگ، میزان آب مورد نیاز و تجربه‌ی طراح بستگی دارد. چال‌های پرده‌ی آب باید قبل از ورود نفت و فرآورده به مغارها حفر و آماده‌سازی شوند. در غیر این صورت ممکن است باکتری‌های موجود، انواعی از پلیمر لجن‌مانندی را تولید کرده و سبب بسته شدن چال‌ها

شوند. شرایط مناسب برای رشد این باکتری‌ها در PH ۴ تا ۱۱ است. از این رو باید سعی شود تا PH آب در این بازه قرار نگیرد. همچنین بکارگیری کلر و ضد یخ نیز می‌تواند در این زمینه موثر باشد (Haug, 2007).



شکل (۲-۷): نمونه‌ای از یک مغار بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت خام زیر سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی به همراه سامانه‌ی پرده‌ی آب (Calmindar & Hahn, 1982)

۲-۲-۵-۲ طراحی پرده‌ی آب

به دلیل طبیعت نامنظم ناپیوستگی‌های توده‌سنگ، طراحی پرده‌ی آب همواره با دشواری‌های خاصی همراه است. به همین دلیل طراحی کاربردی آن باید بر اساس ترکیبی از تجربه، محاسبات تئوری و آزمایش‌های آب‌شناسی برجا انجام شود. پرده‌ی آب بوسیله‌ی ۴ پارامتر فاصله‌داری چال‌ها، فاصله‌ی چال‌ها از مغارها، وسعت پرده و فشار پرده‌ی آب نسبت به فشار ذخیره‌سازی توصیف می‌شود. بنابراین در طراحی پرده‌ی آب باید پارامترهایی مانند آنچه در ادامه آورده می‌شود، مورد توجه قرار گیرد (Kjorholt & Broch, 2007):

۱ ضریب اطمینان و ایمنی مورد نیاز برای پیشگیری از نشت نفت خام

۲ فشار ذخیره‌سازی در برابر فشار آب زیرزمینی و روباره

۳ هندسه‌ی مغارها

۴ میدان تنش و درزه‌داری توده‌سنگ

۵ بیش‌ترین فشار پرده‌ی آب برای پیشگیری از باز شدن درزه‌های موجود^۱

۶ مباحث اقتصادی با مد نظر قرار دادن هزینه‌های احداث و بهره‌برداری

۷ بیش‌ترین طول و میزان انحراف مجاز چال‌ها

۶-۲ مشکلات فنی و عملیاتی مرتبط با ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی

در مغارهای سنگی

برای انجام اولین تزریق نفت خام به تأسیسات لازم است تا اکسیژن درون مغارها برای پیشگیری از احتمال وقوع انفجار به طور کامل تخلیه شود.^۲ بدین منظور می‌توان اولین مغار را با آب پر کرده و سپس با انتقال تدریجی آب به مغارهای مجاور فضای خالی ایجادشده را با گاز بدست آمده از گازوئیل یا گازهای بی‌اثر مانند نیتروژن و دی‌اکسید کربن که دارای هزینه‌ی بیش‌تری هستند، پر نمود. در صورت بکارگیری گازهای بی‌اثر می‌توان در مراحل بعدی این گازها را با گاز ماده‌ی ذخیره‌شده تعویض نمود^۳ (Midtlien, 2007).

در ذخیره‌سازی نفت خام مشکلاتی مانند رسوب ناخالصی‌ها، به وجود آمدن واکس و پارافین و تجمع گازهای فرار^۴ در بالای مغار باید مورد توجه قرار گیرد. بستر ثابت آب برای رسوب ماسه و سایر ناخالصی‌های همراه نفت خام الزامی است. بدین ترتیب از ورود این مواد به لوله‌های تزریق و برداشت و آسیب دیدن آن‌ها پیشگیری می‌شود. همچنین در هنگام برداشت، نفت خام (نفت خام سنگین و نفت‌های سوختی سنگین) تا دمای ذوب واکس حرارت داده می‌شود، تا بتواند در لوله‌ها حرکت کند. البته دمای ذخیره‌سازی نفت خام در بازه‌ای بین دمای اتمسفر تا ۷۰ و ۹۵ درجه‌ی سانتی‌گراد برای

1. Hydraulic Jacking

2. Inertising

3. Purging

4. VOC: Volatile Oil Components

نفت خام سنگین و نفت سوختی سنگین می‌تواند متغیر باشد. دمای ذخیره‌سازی بر مبنای دمای اشتعال نفت و همچنین دمای ذوب واکس انتخاب می‌شود. در ذخیره‌سازی نفت خام تجمع گازهای فرار نیز امری اجتناب‌ناپذیر است. از آن‌جا که تأسیسات ذخیره‌سازی معمولاً از چندین مغار کنار هم تشکیل می‌شود، بنابراین می‌توان در هنگام تزریق و برداشت، گازهای جمع‌شده را به مغارهای مجاور انتقال داد. علاوه بر این می‌توان اجزا فرار را جمع‌آوری و به صورت ترکیبی از ال.پی.جی (پروپان و بوتان) و نفتا (پنتان و هگزان) پالایش و ذخیره نمود. در رابطه با فرآورده‌های نفتی برای اجتناب از مشکلات باکتریایی، تلاش می‌شود تا سطح مشترک آب و ماده به کمترین مقدار ممکن کاهش داده شود. به همین دلیل مغارهای ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی فاقد بستر ثابت آب و دارای کف بتنی هستند و برای کاهش ورود آب به درون مغار، تزریق گسترده‌ای در توده‌سنگ دربرگیرنده انجام می‌شود (Dahl, 2007 & Midtlien, 2007).

۷-۲ مغارهای سنگی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در جهان

در جدول ۱-۲ مشخصات فنی تعدادی از مغارهای سنگی ذخیره‌سازی انواع نفت خام و فرآورده‌های نفتی موجود در کشورهای مختلف جهان گردآوری شده است. مواد ذخیره‌شده شامل نفت خام سبک و سنگین، نفت سوختی سبک و سنگین، سوخت جت، گازوئیل، بنزین، پروپان، بوتان و مخلوط آن‌ها، روغن موتور، نفتالین، آمونیاک و میعانات گازی هستند. برای ذخیره‌سازی این مواد در مغارهای سنگی بسته به خواص شیمیایی و شیوه‌ی ذخیره‌سازی آن‌ها، فشار و دمای عملیاتی در بازه‌ی گسترده‌ای تغییر می‌کند. به عبارت دیگر این مواد در فشاری بین ۰٫۵ تا ۱۰ بار (مطلق) و دمایی بین ۴۲- تا ۹۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قابل ذخیره‌سازی هستند (Froise, 1987; Grov, 2007 & Ignatius, et al., 1982). شکل سطح مقطع بیش‌تر مغارها به صورت دی‌شکل و نعل اسبی است؛ اما تعدادی از مغارهای قدیمی‌تر مانند *Harare* در زیمبابوه و *Kristiansand* در نروژ و *Stavenger*، *Hovringen*، *Llsvika* دارای مقطع سیلوشکل نیز هستند. از این‌رو به جای عرض مغار، مقدار قطر آن‌ها در جدول آورده شده

است. علاوه بر این تعدادی از مغارهای دی‌شکل فنلاندی نیز دارای دیواره‌های با شیب منفی هستند که سطح مقطع آن‌ها در شکل ۲-۴ قابل مشاهده است.

طول مغارها در بازه‌ای بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ متر و عرض و ارتفاع آن‌ها در بازه‌ای بین ۱۰ تا ۳۶ متر متغیر است. اعداد داخل پرانتز برای طول، نشانگر طول کل مغارهای ذخیره‌سازی در آن تأسیسات است. همچنین به سبب در دسترس نبودن عرض و ارتفاع تعدادی از مغارها، سطح مقطع آن‌ها در جدول آورده شده است. با مقایسه‌ی طول مغارها مشاهده می‌شود که مغارهای *Gargenville* در فرانسه، مغارهای *U1* و *U2* در کره جنوبی، مغارهای هندی و مغارهای *Kushikino* و *Kuji* در ژاپن در زمره‌ی بلندترین مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی هستند. همچنین با در نظر گرفتن تعداد و مجموع طول مغارها، مغارهای سنگی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی کشورهای ناحیه‌ی اسکاندیناوی، کره جنوبی، ژاپن، عربستان سعودی و سنگاپور در زمره‌ی بزرگ‌ترین تأسیسات سنگی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری جهان هستند (جدول ۱-۲).

تراز قرارگیری مغارهای سنگی در بازه‌ی ۱۰- تا ۱۴۰- متر و عمق قرارگیری آن‌ها در بازه‌ی ۴۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است. سنگ دربرگیرنده‌ی مغارها نیز بیش‌تر شامل گرانیت، گنایس، گابرو، آنورتوزیت، سنگ آهک، میکا شیست، کوارتز دیوریت، فیلیت، آندزیت، توف، سیلت، ماسه‌سنگ و چالک است. سرعت تزریق به هر مغار در بیش‌تر تأسیسات، ۲۰۰۰، ۲۴۰۰ و ۴۰۰۰ متر مکعب در ساعت و سرعت برداشت از هر مغار ۱۶۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۰۰۰ متر مکعب در ساعت است (ر.ک. منابع جدول ۱-۲).

جدول (۱-۲): مشخصات فنی تعدادی از مغارهای سنگی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در کشورهای مختلف جهان (Aramco, 2003 & 2009; Benardos & Kaliampakos, 2005; Froise, 1987; Geostock, 2010; Grov, 2007; Ignatius, et al., 1982; Hoshino, 1993; Johansson, 1987; JTC, 2007; Lee & Song, 2003; Mandal, et al., 2010; Midtlien, 2007; Siosteen, 1979; Sturk & Stille, 1995; Tezuka & Seokab, 2003; Willett, 1996; Zhao & Christensen, 1996 & Zhao & lee, 1996)

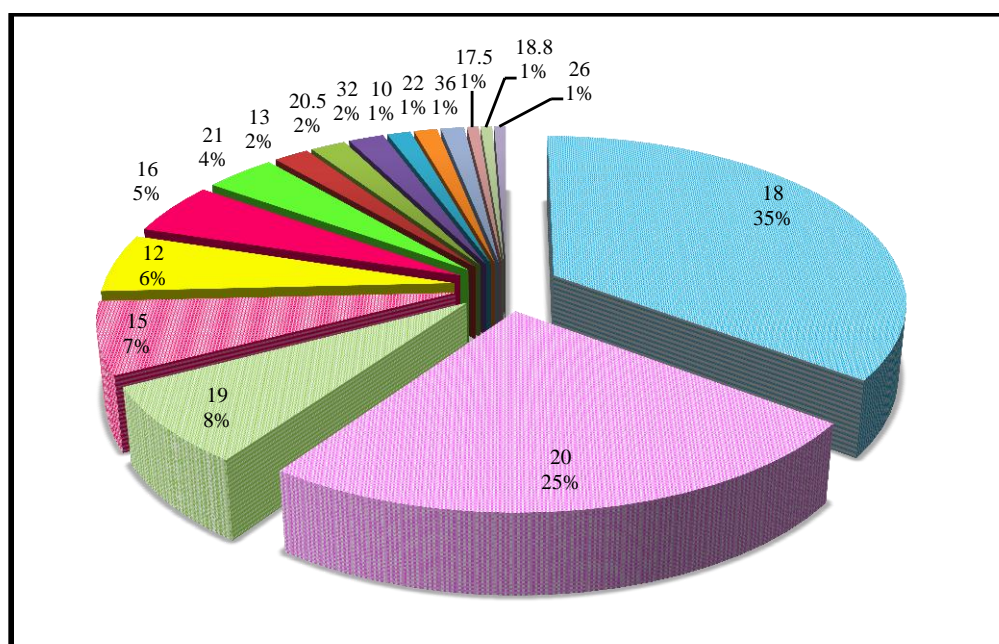
نام	کشور	طول (متر)	عرض (متر)	ارتفاع (متر)	ظرفیت (هزار متر مکعب)	عمق (متر)	تعداد
Gothenburg	سوئد	۵۰۰	۲۰	۳۰	۱۲۰۰	-	۴

-	۵۵	۱۸۰۰	۳۳	۱۸	۵۱۰	نروژ	Mongstad
-	-	-	۳۰	۲۲	-	نروژ	Mongstad
۳	-	۳۰	۱۶	۱۳	۶۴	نروژ	Mongstad
۲	-	۱۲۰	۳۳	۲۱	۱۳۴	نروژ	Mongstad
۱	-	۹۰	۳۳	۲۲	۱۴۰	نروژ	Mongstad
۱	-	۱۰۰	۲۲	۱۹	۲۵۶	نروژ	Rafnes
۴+۱	-	۱۰۰۰	۳۳	۱۹	۳۱۴	نروژ	Sture
-	-	۶۰	۳۰	۲۱	۱۱۸	نروژ	Sture
-	-	-	۱۵	۳۲ (قطر)	-	نروژ	Llsvika
-	-	-	۱۵	۱۲	-	نروژ	Llsvika
-	-	-	۱۵	۳۲ (قطر)	-	نروژ	Hovringen
-	-	-	۱۵	۱۲	-	نروژ	Hovringen
۱	-۹۰	۵۰	۱۲	۱۰	-	نروژ	Heroya
-	-۹۰	-	۱۵	۱۰	-	نروژ	Heroya
۱	-	۶۰	۲۰	۱۶	-	نروژ	Clomffjord
۲	-	۲۵۰	۳۳	۲۰	۱۹۰	نروژ	Karsto
۱	-	۶۳	۳۳	۲۱	۹۵	نروژ	Aukra
۱	-	۱۸۰	۳۳	۲۱	۲۷۰	نروژ	Aukra
-	-	-	-	۱۵ (قطر)	-	نروژ	Stavenger
-	-	-	۱۵	۳۲ (قطر)	-	نروژ	Kristiansand
-	-۴۵	-	۱۰	۱۲	-	نروژ	Ekeberg
-	-۴۵	-	۱۰	۱۵	-	نروژ	Ekeberg
-	-	-	۱۴	۱۲	-	نروژ	Harstad
-	-	-	۲۲	۱۸	-	فنلاند	U1:U3
-	-	-	۳۰	۱۸	-	فنلاند	U4:U6
-	-	-	۳۰	۱۸	-	فنلاند	U7:U10
-	-	-	۳۰	۱۸	-	فنلاند	U13
-	-	-	۳۰	۱۶	-	فنلاند	U11:U12
-	-	-	۳۴	۱۸,۸	-	فنلاند	U14
-	-	-	۳۲	۱۸	-	فنلاند	U15:U16
-	-	-	۳۶	۱۸	-	فنلاند	U17:U18
-	-	-	۳۰	۱۶	-	فنلاند	U19
۷	۴۰	۸۰۰	۳۲	۲۰,۵	-	فنلاند	U20:U22
-	-	-	۳۲,۵	۲۱	-	فنلاند	U23
-	-	-	۲۲,۵	۲۰	-	فنلاند	U24
۲	-۱۱۴	۱۷۳	۱۹,۵	۱۵	۴۰۰ (۵۹۰)	کره‌ی جنوبی	Yosu
۲	-۶۰	۱۲۳	۲۱	۱۶	(۳۷۰)	کره‌ی جنوبی	Yosu
-	-۱۱۹	۳۱۰	۲۱	۱۹	۳۱۰ (۸۳۰)	کره‌ی جنوبی	Ulsan

-	-۶۳	۲۴۰	۳۴۲ (متر مربع)	۳۱۰ (۶۲۹)	کره‌ی جنوبی	Ulsan
-	-۱۱۵	۲۷۷	۲۲ ۱۷,۵	۲۷۸ (۷۴۰)	کره‌ی جنوبی	Pyongtaek
۳	-۱۳۷	۲۷۰	۳۲۰ (متر مربع)	(۷۴۰)	کره‌ی جنوبی	Pyongtaek
۴	-۱۱۵	۴۲۰	۴۴۰ (متر مربع)	(۸۱۵)	کره‌ی جنوبی	Pyongtaek
۴	-۱۱۵	۱۸۹	۳۵۰ (متر مربع)	(۵۶۸)	کره‌ی جنوبی	Pyongtaek
۳	-۶۰	۱۲۰	۳۵۰ (متر مربع)	(۳۸۷)	کره‌ی جنوبی	Pyongtaek
۳	-۱۳۰	۳۴۳	۳۴۳ (متر مربع)	(۸۰۰)	کره‌ی جنوبی	Inchon
۲	-۱۱۰	۱۳۶	۳۴۳ (متر مربع)	(۴۴۴)	کره‌ی جنوبی	Inchon
-	-۱۰	۲۵۱	۱۹۵ تا ۲۷۷ (متر مربع)	(۱۱۰۰)	کره‌ی جنوبی	Seoul
-	-۳۰	۴۴۵۲	۳۰ ۱۸	۱۰۳۰ (۸۶۸۵)	کره‌ی جنوبی	U1
۱۲	-۳۰	۴۲۹۳	۳۰ ۱۸	۸۷۵ (۸۸۱۴)	کره‌ی جنوبی	U2
-	-۳۰	۱۹۰۸	۳۰ ۱۸	۶۷۸ (۳۷۹۴)	کره‌ی جنوبی	U2
-	-۳۰	۸۰۰	۳۰ ۱۸	۴۵۰ (۱۵۰۵)	کره‌ی جنوبی	U2
-	-۱۱۵	۳۰۰	۲۲,۵ ۱۸	۱۳۵ (۸۷۹)	کره‌ی جنوبی	L1
-	-۶۰	۳۱۵	۲۲,۵ ۱۸	۲۱۰ (۸۳۰)	کره‌ی جنوبی	L1
-	-۱۳	۲۳۱	۲۰,۵ ۱۵	۲۳۵ (۱۲۶۲)	کره‌ی جنوبی	K1
-	-۱۰	۱۵۹	۲۲,۵ ۱۸	۳۹۴ (۴۴۰)	کره‌ی جنوبی	K1
-	-۱۱۴	۴۶۵	۲۶ ۱۶	۲۷۵ (۱۱۳۳)	کره‌ی جنوبی	Y2
۱۰	۱۰۰	۱۷۵۰	۲۲ ۱۸	۵۵۵	ژاپن	Kushikino
۷	۲۰۰	۱۵۰۰	۲۰ ۱۵	۱۱۲	ژاپن	Kikuma
۳	۱۵۰	۳۰۰ (هزار تن)	۳۰ ۲۶	۴۸۵	ژاپن	Namikata
۱۰	۲۵۰	۱۷۵۰	۲۲ ۱۸	۵۵۵ تا ۲۳۰	ژاپن	Kuji
۲	۱۱۵	۱۱۱	۳۰۴ (متر مربع)	(۳۰۴)	چین	Shantou
۲	۵۵	۱۰۸	۳۰۴ (متر مربع)	(۳۰۴)	چین	Shantou
۲	۱۲۵	۲۶۱	۴۰۰ (متر مربع)	۱۷۵ تا ۲۵۰	چین	Ningbo
۲	۶۵	۲۵۹	۴۰۰ (متر مربع)	۲۸۵ تا ۲۶۰	چین	Ningbo
۲	۱۳۲	۱۳۰	۴۹ (متر مربع)	۱۳۰۰ و ۱۴۰۰	فرانسه	Gargenville
۳	۱۰۰	۱۲۳	۲۲۷ (متر مربع)	(۵۶۶)	فرانسه	Lavera
۲	۶۵	۱۳۳	۲۰۰ (متر مربع)	(۶۹۵)	فرانسه	Lavera
۲	۶۵	۴۹,۵	۲۰۰ (متر مربع)	(۳۰۷)	فرانسه	Lavera
۲	۱۱۲	۸۰	۳۳۶ (متر مربع)	(۱۱۶)	فرانسه	Donges
-	۱۴۰	۸	۱۳ تا ۵۰ (متر مربع)	(۲۲۵)	فرانسه	Sennecey
۴	۱۲۴	۱۳۵	۱۴۲ (متر مربع)	(۹۱۰)	استرالیا	Sydney
۵	۱۸۰	۲۰۰	۱۸ ۱۲	۲۶۰	یونان	Perama
۲	۱۶۲	۱۲۷,۶	۳۳۸ (متر مربع)	۳۴۲	هند	Visakhapatnam
۲	-۱۳۰	-	۳۰ ۲۰	۸۴۰ تا ۳۶۰	هند	-
۳	۱۳۷	۸۳	۱۴۳ (متر مربع)	(۵۷۰)	پرتقال	Sines
-	۱۹۰	۳۰×۱۰ ^۶ (بشکه)	۳۰ ۲۰	۴۰۰	عربستان	SSSP

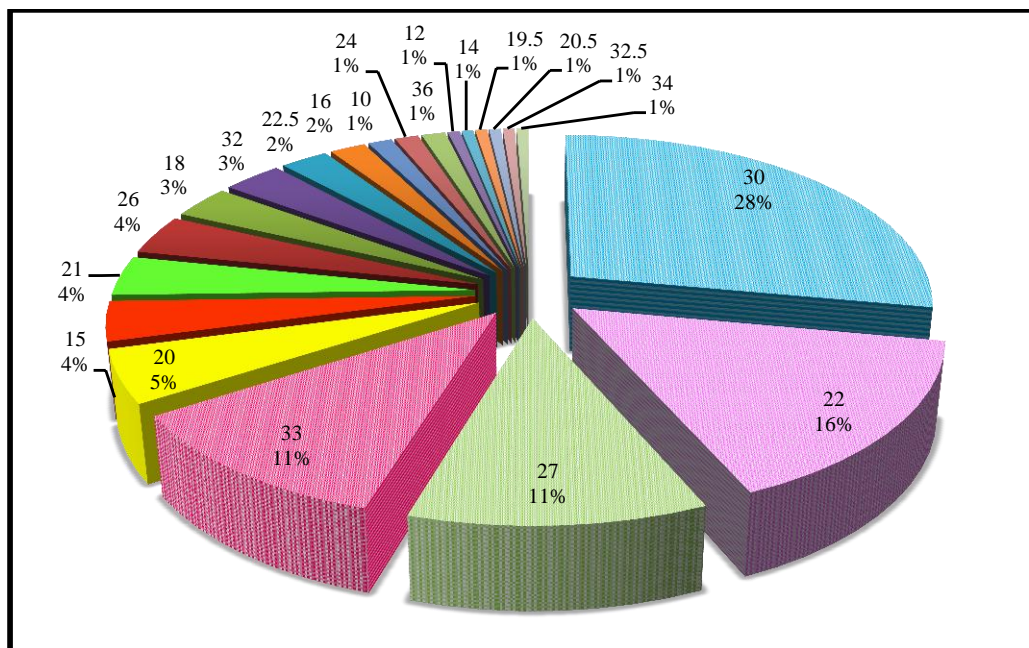
۵	-۳۰	۸۰۰	۳۳	۱۹	۳۲۵	سنگاپور	Jurong
۱۸	-	۱۴۷۰	۲۷	۲۰	۳۰۰	سنگاپور	Jurong
۲	۱۳۵	۱۰۰	۲۱	۱۸	۱۴۵	سنگاپور	Pandan
۲	۵۰	-	۲۴	۲۰	-	زیمباوه	Harare
۲	۵۰	-	۲۱	۱۶	-	زیمباوه	Harare
۲	۴۰	-	-	۳۶ (قطر)	-	زیمباوه	Harare
۴	۱۷۰	۱۲۰	۸۵ (متر مربع)	-	۱۴۰۰	انگلستان	Killingholme

با بررسی مقادیر عرض مغارها و میزان فراوانی آنها، مشاهده می‌شود که بیش تر مغارها دارای عرضی برابر با ۱۸، ۲۰، ۱۹ و ۱۵ متر هستند. از این رو بازه‌ی متداول عرض مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در شرایط توده‌سنگ متوسط تا مقاوم می‌تواند بین ۱۵ متر تا ۲۰ متر متغیر باشد (نمودار ۲-۲).



نمودار (۲-۲): درصد فراوانی عرض مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی (جدول ۱-۲)

بررسی مقادیر ارتفاع مغارها و میزان فراوانی آنها نیز نشان می‌دهد که بیش تر مغارها دارای ارتفاعی برابر با ۳۰، ۲۲، ۲۷ و ۳۳ متر هستند. بنابراین بازه‌ی متداول ارتفاع مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی در شرایط توده‌سنگ متوسط تا مقاوم می‌تواند بین ۲۰ متر تا ۳۵ متر متغیر باشد (نمودار ۳-۲).



نمودار (۲-۳): درصد فراوانی ارتفاع مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی (جدول ۲-۱)

۸-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل برخی از مباحث پایه‌ی ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی درون مغارهای سنگی تشریح شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، امروزه برای ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی بیش‌تر از مجموعه مغارهای دی‌شکل یا نعل اسبی با آرایش موازی استفاده می‌شود. همچنین مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده‌ی شیوه‌ی مهار نشت مغارها، شرایط ژئومکانیکی و آب‌شناسی ساختگاه مورد نظر هستند. عمق متداول قرارگیری مغارهای سنگی در حدود ۵۰ تا ۲۰۰ متر است. همچنین عرض متداول این مغارها در بازه‌ی ۱۵ تا ۲۰ متر و ارتفاع متداول آن‌ها در حدود ۲۰ تا ۳۵ متر می‌تواند در نظر گرفته شود.

فصل سوم:

معرفی ساختمان‌گاه کناوه و انتخاب روش طراحی

۳-۱ مقدمه

در فرآیند طراحی سازه‌های زیرزمینی بسته به اطلاعات موجود برای پیش‌بینی نوع رفتار و نحوه‌ی شکست توده‌سنگ، ابزارهای گوناگونی برای مدلسازی، برآورد وضعیت پایداری و در صورت لزوم طراحی سامانه‌ی نگهداری بکار برده می‌شود. به بیانی دیگر هر گونه رفتار زمین، به شیوه‌ای خاص برای محاسبه و طراحی نیاز دارد. در ابتدا باید داده‌های توده‌سنگ شامل پارامترهای سنگ بکر، شرایط درزه‌ها، وضعیت تنش‌های برجای ناحیه و آب‌های زیرزمینی با دقت مناسبی برآورد شود. معمولاً در نخستین مراحل طراحی، داده‌های توده‌سنگ بیش‌تر به صورت کیفی و بر اساس مشاهدات و قضاوت مهندسی کارشناسان توصیف می‌شود. بنابراین کمی‌سازی خصوصیات در این مرحله امری الزامی است. سپس طراحی سازه‌ها با بکارگیری یکی از روش‌های موجود مانند تجربی، تحلیلی، عددی یا ترکیبی از چند روش انجام می‌شود. در نهایت، در هنگام احداث سازه‌ها از ابزارهای پایش رفتار توده-سنگ، برای جمع‌آوری اطلاعات واقعی و مقایسه با فرضیات طراحی استفاده خواهد شد. در حقیقت طراحی‌های انجام‌شده در این مرحله، ارزیابی و اعتبارسنجی می‌شود.

با توجه به این توضیحات، در این فصل ضمن معرفی ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی سازند آغاچاری در ساختگاه گناوه، پارامترهای توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارها نیز برآورد شده است. علاوه بر این شیوه‌ی مناسب مهار نشت مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام تعیین و روش مناسب طراحی مفهومی آن‌ها انتخاب شده است.

۲-۳ زمین‌شناسی عمومی سازند آغاچاری در ساختگاه گناوه

سازند آغاچاری به ضخامت تقریبی ۲۹۶ متر، متشکل از تناوب چرخه‌های ۱۰ تا ۱۰۰ متری است که به طرف بالا ریزدانه می‌شود. هر چرخه با لایه‌های ۲ تا ۵ متری ماسه‌سنگ و آهک قهوه‌ای تا خاکستری‌رنگ آغاز شده و با لایه‌ی ضخیمی از مارن سرخ‌رنگ در تناوب با نازک‌لایه‌های سیلت و ماسه‌ی ریزدانه ادامه می‌یابد. در یک نگاه منطقه‌ای، سازند آغاچاری شامل دو رخساره، با خصوصیات مکانیکی متفاوت است. در شرق استان بوشهر و جنوب استان‌های فارس و هرمزگان سازند آغاچاری رخساره‌ای ماسه‌سنگی و در استان خوزستان و غرب استان بوشهر (ساختگاه گناوه)، دارای رخساره‌ی مارنی است. موقعیت انتخاب‌شده برای مغارهای ذخیره‌سازی گناوه نیز در شمال غرب استان بوشهر و بندر گناوه و جنوب روستای احمدحسین قرار گرفته است (شکل ۳-۱)؛ (شرکت پایانه‌های نفتی ایران، ۱۳۸۸).



شکل (۳-۱): موقعیت ساختگاه گناوه در تقسیمات کشوری و راه‌های اصلی مرتبط با آن (شرکت پایانه‌های نفتی ایران،

۱۳۸۸)

در حوالی روستای احمد حسین (ایستگاه شماره ۱) سازند آجاجاری شامل تناوبی از مارن کرم‌رنگ، گچ‌دار و فرسایش‌پذیر و ماسه‌سنگ کرم‌رنگ است (شکل ۳-۲: الف). پهنه‌های گلی حاصل از فرسایش مارن‌های منطقه نیز از دیگر واحدهای حاضر در این محدوده هستند. همچنین در محدوده‌ی روستای بینک (ایستگاه شماره ۲)، سازند آجاجاری شامل تناوبی از مارن قرمز، مارن کرم تا سبزرنگ با فرسایش‌پذیری بالا و لایه‌های ماسه‌سنگ به رنگ کرم تا کرم تیره با درزه‌های پرشده از ژئوس و میزان هوازدگی متوسط است (شکل ۳-۲: ب)؛ (شرکت پایانه‌های نفتی ایران، ۱۳۸۸).



(ب)



(الف)

شکل (۳-۲): نمایی از سازند آجاجاری در محدوده‌ی روستای احمد حسین (الف) و روستای بینک (ب)؛ (شرکت پایانه‌های نفتی ایران، ۱۳۸۸)

۳-۲-۱ ویژگی‌های مقاومتی مارن و ماسه‌سنگ ساختگاه گناوه

با توجه به موجود نبودن گمانه‌های اکتشافی و آزمون‌های آزمایشگاهی در این مرحله از مطالعات، ویژگی‌های مقاومتی سنگ با انجام آزمون‌های صحرایی مقدماتی بر روی رخنمون‌های سطحی برآورد شده است. مقاومت تراکمی تک‌محوری ماسه‌سنگ در حدود ۴۰ تا ۵۰ مگا پاسکال و مقاومت تراکمی تک‌محوری مارن در حدود ۵ تا ۱۵ مگا پاسکال برآورد شده است. در نتیجه ماسه‌سنگ آجاجاری در زمره‌ی سنگ‌های متوسط و مارن آجاجاری در زمره‌ی سنگ‌های ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند. نتایج حاصل از طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ نیز در جدول ۳-۱ آورده شده است (شرکت پایانه‌های نفتی ایران، ۱۳۸۸).

جدول (۳-۱): مقادیر برآوردشده و توصیف توده سنگ ساختمانی گناوه با استفاده از طبقه بندی مهندسی سنگ (شرکت پایانه های نفتی ایران، ۱۳۸۸)

RQD		RMR _{basic}		GSI		طبقه بندی نوع سنگ
توصیف	مقدار	توصیف	مقدار	توصیف	مقدار	
متوسط	۷۵-۹۰	متوسط	۳۹-۵۵	بلوکی	۵۰-۶۵	ماسه سنگ
ضعیف	۳۵-۵۵	ضعیف	۲۷-۴۳	بلوکی تا آشفته	۲۵-۳۸	مارن

۲-۲-۳ پارامترهای مورد نیاز برای طراحی مفهومی مغارها

پارامترهای مورد نیاز برای انجام طراحی ها با استفاده از روابط تجربی *Hoek & Brown* (۲۰۰۶) و نرم افزار *Roclab Ver 1.031* برآورد شده است. داده های مبنای تخمین مقادیر مقاومت فشاری تک-محوره و شاخص زمین شناسی مارن و ماسه سنگ آغا جاری برای سنگ بکر است (ر.ک. بخش ۳-۲-۱). به سبب مشخص نبودن شرایط تنش بر جای ناحیه، وضعیت تنش ها نیز هیدروستاتیک فرض شده است. با توجه به عدم قطعیت داده های ورودی، در مراحل بعدی پژوهش، میزان حساسیت پارامترهای ورودی تحلیل شده و تأثیرگذارترین داده ها در وضعیت پایداری مغارها تعیین خواهد شد.

جدول (۳-۲): پارامترهای برآوردشده برای توده سنگ ساختمانی گناوه

پارامتر	واحد	ماسه سنگ	مارن
مدول شکل پذیری	گیگا پاسکال	۳٫۵	۰٫۱۵۲
نسبت پواسون	-	۰٫۲۴	۰٫۲۹
چسبندگی	مگا پاسکال	۰٫۶۷	۰٫۱۵۸
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۵۲	۲۹
مقاومت کششی	کیلو پاسکال	۸۰	۸
نسبت تنش ها	-	۱	۱
چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب	۲۵۰۰	۲۰۰۰

۳-۲-۳ وضعیت ناپیوستگی های توده سنگ ساختمانی گناوه

ناپیوستگی های ساختمانی گناوه از دو دسته درزه و لایه بندی های مارن و ماسه سنگ تشکیل شده است. دسته درزه ی ۱، دارای شیب تقریبی ۷۵ درجه و فاصله داری ۲۰ تا ۶۰ سانتی متر است. دسته درزه ی ۲،

دارای شیب تقریبی ۸۵ درجه و فاصله‌داری ۶۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است. همچنین شیب لایه‌بندی‌ها نیز در حدود ۲۵ درجه و ضخامت لایه‌های ماسه‌سنگ در حدود ۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت لایه‌های مارن کمتر از ۲۰ سانتی‌متر است (شرکت پایانه‌های نفتی ایران، ۱۳۸۸).

۳-۳ انتخاب روش مهار نشت مغارهای ذخیره‌سازی گناوه

هنگامی که توده‌سنگ دربرگیرنده فاقد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز بوده، سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی پایین یا تأمین آب کافی با دشواری‌های عملیاتی و هزینه‌ی بالا همراه باشد، از پوشش فولادی برای مهار نشت نفت خام به توده‌سنگ دربرگیرنده استفاده می‌شود. توده‌سنگ منطقه‌ی گناوه، تناوبی از مارن و ماسه‌سنگ آجاجاری با خواص مقاومتی متوسط تا ضعیف است. سطح ایستایی آب‌های زیرزمینی نیز پایین و در مجموع ناحیه‌ی گناوه از دیدگاه اقلیمی خشک است. علاوه بر این مشکل هوازگی و تورم مارن، عامل مهم دیگری است که در صورت استفاده از روش مهار آب-پویایی، سبب ناپایداری مغارها می‌شود. جذب رطوبت توسط مارن در مجاورت هوا به همراه آزادسازی تنش‌ها، می‌تواند فشار زیادی را به سامانه‌ی نگهداری مغارها وارد کند. بنابراین با توجه به تجربیات و توانمندی‌های مهندسی داخلی، برای مهار نشت مغارهای ذخیره‌سازی گناوه باید از پوشش فولادی استفاده شود. بکارگیری پوشش فولادی برای مغارهای ذخیره‌سازی سبب بهبود کارایی و افزایش بازدهی تأسیسات زیرزمینی می‌شود. به عنوان نمونه می‌توان به تغییرات نامحسوس دما، افزایش کیفیت نفت ذخیره‌شده، سرعت تزریق و برداشت بالا و سازگاری بیش‌تر با محیط زیست اشاره نمود. از سوی دیگر مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی نفت خام فاقد مشکلاتی از قبیل نیاز به پایش منظم سطح تراز، فشار و سرعت آب، مسدودشدگی و مشکلات باکتریایی چال‌های پرده‌ی آب و نیز تخلیه و تصفیه‌ی مداوم آب‌های جمع‌شده در بستر مغار هستند.

۴-۳ انتخاب روش طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی گناوه

طراحی سازه‌های زیرزمینی، بررسی وضعیت پایداری و طراحی سامانه‌ی نگهداری مناسب برای آن‌ها

بدون داشتن درک صحیحی از رفتار زمین امکان‌پذیر نیست. منظور از رفتار زمین، واکنش توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی سازه در برابر نیروهای وارده در هنگام احداث و بهره‌برداری شامل وضعیت میدان تنش، آب‌های زیرزمینی، زمین‌لرزه و انفجار و نیز شرایط عملیاتی پروژه شامل ابعاد و هندسه‌ی سازه، روش حفاری و نصب سامانه‌ی نگهداری است. در یک دید کلی، رفتار زمین می‌تواند تحت تأثیر ۳ عامل زیر باشد (Palmstrom & Stille, 2007; Stille & Palmstrom, 2008):

۱ نیروی گرانش: در این حالت شکست سنگ، تحت تأثیر ناپیوستگی‌های آن یعنی جدایش، لغزش و فرو افتادگی بلوک‌های سنگی و حرکت سریع حجم زیادی از قطعات سنگی^۱ است.

۲ آب‌های زیرزمینی: در این حالت شکست سنگ در اثر آماس سنگ‌های رس‌دار و ریزش بلوک‌ها در اثر کاهش مقاومت برشی مواد پرکننده‌ی درزه‌ها رخ می‌دهد. هجوم ناگهانی و همه‌جانبه‌ی آب به همراه خاک یا سنگ‌های خردشده به درون سازه^۲ و هجوم مواد بدون چسبندگی خشک یا آب‌دار (سنگ خردشده یا خاک)^۳ نیز از دیگر موارد شکست در اثر آب‌های زیرزمینی هستند.

۳ تنش: در این حالت شکست سنگ به سبب تمرکز تنش‌های القایی که مقدار آن بیش‌تر از مقاومت موضعی سنگ است، رخ می‌دهد. رفتار تحت تنش سنگ شامل دو حالت زیر است:

۱ رفتار شکننده مانند کمانش^۴، ورقه‌شدن^۵ و انفجار سنگ^۶

۲ رفتار شکل‌پذیر تابع زمان در مواد نرم و شکل‌پذیر (خاک و سنگ‌های به شدت درزه‌دار)، فشارندگی^۷ و خزش

هر کدام از انواع شکست توده‌سنگ در اثر ۳ عامل اشاره‌شده یا ترکیبی از آن‌ها، می‌تواند

توسط رفتار پیوسته یا گسسته ارزیابی شود. توده‌سنگ در صورتی محیطی پیوسته در نظر گرفته می‌-

-
1. Cave-in
 2. Flowing Ground
 3. Ravelling Ground
 4. Buckling
 5. Slabbing
 6. Rock Burst
 7. Squeezing

شود که بدون ناپیوستگی یا دارای ناپیوستگی‌های بسیار زیاد (شبه پیوسته) باشد. در حالت شبه پیوسته، رفتار توده‌سنگ بر اساس محیط معادل در فرآیند همگن‌سازی تعیین می‌شود. علاوه بر این اگر توده‌سنگ دارای ناپیوستگی‌های کم و بدون بازشدگی بوده و این ناپیوستگی‌ها بلوک‌های کاملی را جدا نکرده باشند، در این صورت نیز شرایط پیوستگی در محیط برقرار است. در نهایت توده‌سنگ در شرایطی محیطی ناپیوسته است که دارای فراوانی متوسط شکستگی‌ها بوده و جابجایی‌های بزرگ-مقیاس بلوک‌های منفرد نیز امکان‌پذیر باشد (Varadarajan & Sharma, 2008).
















با توجه به رفتاری که توده‌سنگ در شرایط متفاوت از خود بروز می‌دهد، روش‌های متعددی نیز برای طراحی و مدلسازی سازه‌های زیرزمینی توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به ۴ گروه اصلی زیر تقسیم‌بندی نمود (Jing & Hudson, 2002):

- ۱ روش‌های بر مبنای تجربیات قبلی و استانداردهای موجود
- ۲ روش‌های بر مبنای مدل‌های ساده‌ساز: روش‌های تحلیلی
- ۳ روش‌های بر مبنای مرتبط‌ترین ساز و کار: روش‌های عددی پیوسته، گسسته و ترکیب روش-های پیوسته و ناپیوسته^۱
- ۴ روش‌های جامع: روش‌های عددی ترکیبی^۲

با مد نظر قرار دادن این توضیحات، در این پژوهش شرایط حاکم بر توده‌سنگ گناوه با توجه به هندسه‌ی ناپیوستگی‌ها و مقیاس مسئله، شبه‌پیوسته‌ی شکل‌پذیر و ناپایداری توده‌سنگ تحت تأثیر تنش و آب‌های زیرزمینی پیش‌بینی شده است (شکل ۳-۳). توده‌سنگ ناحیه‌ی گناوه، شامل لایه‌های رسوبی با مقاومت کم، به شدت درزه‌دار و خردشده و دارای رفتار آماسی (مارن) است. از این‌رو با فرض محیط معادل پیوسته، روش عددی اختلاف محدود و نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به عنوان مناسب‌ترین روش برای طراحی مفهومی مغارها در نظر گرفته شده است. در روش پیوسته، هر نقطه در تمام مراحل

1. Hybrid Methods
2. Coupled Models

تغییر شکل یا انتقال در کنار نقطه‌ی مجاور خود باقی می‌ماند. از این رو یک مدل پیوسته می‌تواند همگرا شده و کرنش‌های بزرگ را مدلسازی نماید.

	MASSIVE ROCKS	JOINTED ROCKS or BLOCKY MATERIALS		PARTICULATE MATERIALS	SPECIAL MATERIALS
		occur often in weakness zones and faults			
	A	B	C	D	E
	Weak to strong rocks	Rocks intersected by joints and partings	Jointed rocks intersected by seams or weak layers	Highly jointed or crushed rocks, and soil-like materials	Soft and weak materials
1	 Brittle, homogeneous and foliated rocks (granite, gneiss, quartzite)	 Jointed homogeneous foliated and bedded rocks	 Jointed rocks intersected by seams (filled joints) (seamy and blocky ground)	 Highly jointed or crushed rocks with clay seams or shears	 Alternating soft and hard layers (as clay schist-sandstone-clay schist)
2	 Schistose (deformable) rocks with high content of platy minerals	 Jointed, schistose rocks	 Prominent weathering along joints	 Highly jointed or crushed rocks (sugar-cube etc.) little clay	 Rock fragments with few contacts, in a matrix of soft (clayish) material
3	 Rocks with plastic properties (soapstone, rock salt, many weathered rocks)	 Layered and bedded rocks with frequent partings (slate, flagstone)	 Jointed rocks with weak bedding layers	 Soil-like materials with friction properties (poorly cemented sandstones etc.)	 Soft or weak materials with plastic properties (mudstone, clay-like materials)

شکل (۳-۳): ترکیبات و رفتار گوناگون توده‌سنگ: رفتار پیوسته (A, D & E) و ناپیوسته (B & C); (Still & Palmstrom, 2008): رفتار توده‌سنگ ساخته‌گانه با کادر صورتی‌رنگ مشخص شده است.

۵-۳ روش‌های عددی

در فرآیند مدلسازی عددی، می‌توان بعضی از مسئله‌ها را به تعداد محدودی از اجزا تعریف شده تفکیک نمود. رفتار هر کدام از این اجزا یا به خوبی شناخته شده یا بوسیله‌ی محاسبات عددی قابل بررسی است. رفتار کلی مجموعه نیز با تعریف روابط درونی بین اجزا منفرد توصیف می‌شود. این گونه مسائل مهندسی، گسسته یا ناپیوسته نامیده می‌شوند. از مهم‌ترین روش‌های عددی ناپیوسته می‌توان به اجزای گسسته^۱ و روش‌های شبکه‌ی شکستگی گسسته^۲ اشاره نمود (Jing, 2003).

در سایر مسائل مهندسی، ممکن است تعریف این اجزا مستقل در حالت تئوری، نیازمند

1. DEM: Discrete/Distinct Element Method
2. DFN: Discrete Fracture Network Methods

تقسیم دامنه‌ی مسئله به تعداد نامتناهی از اجزا باشد. یعنی این مسائل با فرض اجزا بی‌نهایت کوچک قابل بررسی هستند. این مسائل پیوسته نامیده می‌شوند و دارای بی‌نهایت درجه‌ی آزادی هستند. از مهم‌ترین روش‌های عددی پیوسته می‌توان به اختلاف محدود^۱، اجزا محدود^۲ و اجزای مرزی^۳ اشاره نمود (Sinha, 1998).

مهم‌ترین تفاوت روش‌های پیوسته و ناپیوسته در سازگارسازی جابجایی‌ها بین اجزا مجموعه است. در روش‌های پیوسته جابجایی‌ها باید بین اجزا درونی مجموعه سازگار شده و مطابقت داده شوند. اما در روش‌های ناپیوسته، سازگاری جابجایی‌ها، بین بلوک‌ها ضرورتی نداشته و با شرایط مرزی بین بلوک‌ها جایگزین می‌شود (Jing, 2003).

با توجه به این که روش عددی مورد استفاده در این پژوهش پیوسته و اختلاف محدود تعیین شده، در ادامه شرح مختصری بر این روش عددی و نرم‌افزار *FLAC* آورده شده است.

۳-۵-۱ مفاهیم روش اختلاف محدود

اسلوب پایه‌ی روش اختلاف محدود، مجزاسازی معادلات دیفرانسیل جزئی بوسیله‌ی جایگزینی مشتقات جزئی با تفاضلات تعریف‌شده در گره‌های مجاور است. برای تحلیل مسائل پیوسته با استفاده از رایانه، دامنه‌ی مسئله به تعداد متناهی از اجزا تقسیم می‌شود. رفتار این اجزا بوسیله‌ی تعاریف ساده‌ی ریاضی با تعداد متناهی درجه‌ی آزادی تقریب زده می‌شود. این اجزا باید معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله و شرایط پیوستگی در سطح مشترک با اجزا مجاور را برآورده نمایند (مجزاسازی پیوستار). یعنی یک مجموعه‌ی پیوسته با بی‌نهایت درجه‌ی آزادی بوسیله‌ی مجموعه‌ای گسسته با تعداد متناهی از درجات آزادی تخمین زده می‌شود (Jing, 2003).

شبکه‌ی اختلاف محدود، روشی مناسب برای تشکیل مقادیر توابع هدف در هر نقطه با فواصل

1. FDM: Finite Difference Method
2. FEM: Finite Element Method
3. BEM: Boundary Element Method

کوچک است. در این روش هیچ ماتریسی تشکیل نشده و آرایش و راه‌حل‌های معادلات، موضعی می‌شوند که برای پیاده‌سازی در رایانه‌ها روشی بسیار کارآمد است. علاوه بر این برای تقریب زدن معادلات دیفرانسیل جزئی در گره‌های مجاور نیز تابع درونیابی تشکیل نمی‌شود. این رهیافت سبب شبیه‌سازی رفتارهای پیچیده‌ی مواد، بدون استفاده از راه‌حل‌های تکراری می‌شود (Jing & Hudson, 2002).

۳-۵-۲ ساز و کار نرم‌افزار FLAC

در تحلیل لاگرانژی نرم‌افزار FLAC، شبکه‌ی اجزا به همراه ماده‌ی تعریف‌شده تغییر شکل داده و حرکت می‌کند. در حالی که در تحلیل اویلری، ماده نسبت به یک شبکه‌ی ثابت تغییر شکل می‌دهد. برای مدل‌سازی در این نرم‌افزار، ابتدا هندسه‌ی مدل تعریف شده و شبکه‌ی اجزا منفرد ایجاد می‌شود. در گام بعدی حالت رفتاری ماده، شرایط اولیه و محدودیت‌های مرزی تعیین شده و پس از متعادل شدن مدل، پاسخ مجموعه بررسی می‌شود. سپس تغییرات مورد نیاز مانند حفر، نصب سامانه‌ی نگهداری و تغییر شرایط مرزی یا مدل رفتاری، اعمال شده و پس از تعادل مدل، پاسخ مجموعه بررسی و تفسیر می‌شود (ITASCA¹, 2009).

۳-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل با توجه به داده‌های موجود از ساختگاه گناوه، پارامترهای مورد نیاز برای طراحی مفهومی مغارها برآورد و روش عددی اختلاف محدود نیز برای مدل‌سازی، انتخاب شده است. استفاده از روش‌های عددی امکان ارزیابی رفتار سازه در مقیاس واقعی را فراهم آورده و با توجه به عدم قطعیت موجود در تخمین داده‌های ورودی، انجام تحلیل حساسیت بر روی این داده‌ها را تسهیل خواهد نمود. همچنین، با مد نظر قرار دادن شرایط توده‌سنگ گناوه، توانمندی‌های مهندسی داخلی و مزایای مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی، به منظور مهار نشت مغارهای گناوه، استفاده از پوشش فولادی امری ضروری به نظر می‌رسد.

بدیهی است که مهم‌ترین دلیل دشواری مدلسازی توده‌سنگ، طبیعی بودن آن است. در مقایسه با سازه‌های مصنوعی که خواص مصالح در آن‌ها جز عوامل قابل کنترل است، در سازه‌های طبیعی خواص مصالح بطور ذاتی جز عوامل غیر قابل کنترل محسوب می‌شود. توده‌سنگ عمدتاً محیطی ناهمگن و ناهمسانگرد است. همچنین توده‌سنگ محیطی متخلخل و درزه‌دار است که در شرایطی خاص سیالات مختلفی را در شرایط متفاوتی از دما، فشار و تنش در خود جای داده است. از این رو مدلسازی عددی و پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ حتی با استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته امروزی نیز فرآیندی پیچیده است.

از سوی دیگر تنش برجای زمین یکی از عوامل تأثیرگذار بر شرایط پایداری سازه‌های زیرزمینی است. اما اندازه‌گیری شرایط تنش برجا به خصوص در مراحل طراحی مفهومی اکثر پروژه‌ها با محدودیت‌های عملیاتی فراوانی همراه است. علاوه بر این، پارامترهای توده‌سنگ را نمی‌توان به طور مستقیم در مقیاس واقعی اندازه‌گیری نمود و خواص تعیین‌شده در آزمایشگاه نیز به دلیل تأثیر تغییر مقیاس نمی‌تواند مقادیر واقعی را نشان دهند. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، با افزایش ابعاد سازه و ناحیه‌ی مورد بررسی در سنگ سخت، مقاومت سنگ ممکن است به مقدار قابل توجهی کاهش یابد (Pan, et al., 2009; Yoshinaka, et al., 2008). اما در رابطه با سنگ‌های نرم، تا به حال پژوهش مناسبی در این زمینه انجام نشده است. به همین جهت روش متداول تعیین خواص سنگ استفاده از روش‌های تجربی است که با محدودیت‌های فراوانی نیز همراه است.

در این پژوهش برای برآورد داده‌های مورد نیاز در طراحی، روش تجربی و شاخص زمین-شناسی توده‌سنگ بکار برده شده است. به عبارت دیگر از یک معیار تجربی برای تبدیل پارامترهای سنگ بکر به توده‌سنگ با مد نظر قرار دادن وضعیت ناپیوستگی‌ها و هوازدگی استفاده شده است (اثر تغییر مقیاس). پیشنهاد می‌شود که در مراحل بعدی پژوهش از روابط تحلیلی- تجربی موجود برای تخمین داده‌های توده‌سنگ با بکارگیری مفهوم محیط معادل استفاده و با نتایج بدست آمده در این بخش مقایسه شود. از سوی دیگر همان‌طور که اشاره شد، تا کنون تحلیل جامعی بر روی اثر تغییر

مقیاس بر روی توده‌سنگ‌های سست صورت نگرفته است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود تا در پژوهشی دیگر با بکارگیری آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا و همچنین نرم‌افزارهای موجود به بررسی کاربردی تأثیر تغییر مقیاس و برآورد پارامترهای توده‌سنگ بدون استفاده از روش‌های تجربی نیز پرداخته شود.

فصل چهارم:

طراحی هندسی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام

۱-۴ مقدمه

فرآیند طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی از تحلیل نیازهای کاربری و مطالعات میدانی آغاز و تا مرحله‌ی تعیین سامانه‌ی نگهداری و ارائه‌ی پیشنهاداتی برای انجام مطالعات پایه ادامه می‌یابد (نمودار ۱-۴). در فرآیند طراحی این سازه‌ها باید کاربری و الزامات ویژه‌ی دوره‌ی بهره‌برداری و فعالیت عادی تأسیسات در نظر گرفته شود. به عنوان نمونه در طراحی شکل مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی، سطح درونی مغارها برای کمینه‌سازی هزینه‌های نصب پوشش فولادی، باید کاهش داده شود. آب‌های زیرزمینی نیز تا حد امکان برای کاهش خطر کمانش و خوردگی فولاد باید از توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارها دور شود. در صورتی که در مغارهای بدون پوشش وجود آب‌های زیرزمینی یکی از الزامات اساسی تأسیسات است و باید در تمام طول عمر مغارها در سطح تقریباً ثابتی نگهداری شود. در این حالت نفوذپذیری توده‌سنگ در برگیرنده باید تا حد قابل قبولی برای تعدیل هزینه‌های پمپاژ و انتقال آب‌های جمع‌شده در بستر مغار کاهش داده شود.

در فصل سوم نتایج حاصل از مطالعات میدانی انجام‌شده برای ساختگاه گناوه به صورت مختصر ارائه شده است. همچنین پارامترهای مورد نیاز طراحی و روش مهار نشت مغارها نیز تعیین شده است. بنابراین در ادامه‌ی فرآیند طراحی مفهومی تأسیسات ذخیره‌سازی گناوه، در این فصل به طراحی هندسی مغارها شامل شکل، ابعاد، تعداد، عمق قرارگیری و فاصله‌داری مغارها پرداخته می‌شود. در طراحی ابعاد مغارها چهار حالت با نسبت ابعاد متداول برای مغارهای ذخیره‌سازی در نظر

گرفته و تحلیل شده است. برای تفسیر مدل‌ها نیز معیارهایی مانند جابجایی، گسترش ناحیه‌ی تسلیم و تنش‌های القایی به عنوان شاخصی برای برآورد پایداری مغارها بررسی و مقایسه شده است.

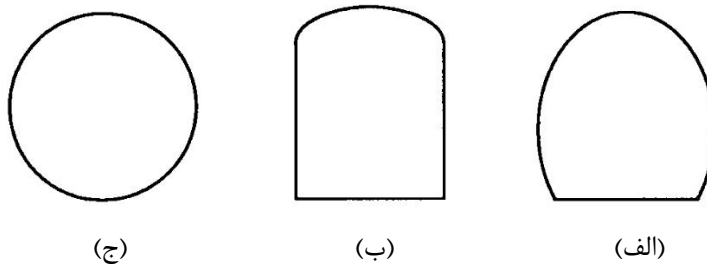


نمودار (۴-۱): مراحل طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام

۲-۴ شکل سطح مقطع مغارهای ذخیره‌سازی

انتخاب شکل و ابعاد یک سازه‌ی زیرزمینی به عوامل متعددی مانند کاربری، شرایط زمین‌شناسی ساختگاه، مقدار و جهت میدان تنش برجا، مقدار بارهای وارده و توزیع آن، وضعیت آب‌های زیرزمینی و درزه‌داری، روش حفاری و سامانه‌ی نگهداری طراحی شده بستگی دارد. با توجه به شکل ۴-۱، مقاطع متداول برای تونل‌ها و مغارهای بزرگ‌مقیاس، دایره‌ای، دی‌شکل (گنبدی) و نعل اسبی هستند. سطح مقطع دایره‌ای، بیش‌تر برای تونل‌های انتقال آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین در شرایط خاص، مانند توده‌سنگ نرم، فشارنده یا آماسی، به دلیل یکنواختی توزیع تنش، سطح مقطع دایره‌ای کاربرد گسترده‌تری دارد. علاوه بر این، اثر قوسی پوشش در مقاطع دایره‌ای، سبب توزیع مناسب‌تر نیروهای فشاری و گشتاورهای خمشی در سامانه‌ی نگهداری و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود (Sinha, 1989).

با توجه به مدارک موجود، برای مغارهای بزرگ مقیاس ذخیره‌سازی، بیش‌تر مقاطع دی‌شکل و نعل اسبی بکار برده شده‌اند. دلیل این امر می‌تواند هزینه‌ی کمتر و آسانی حفر این‌گونه مقاطع نسبت به مقطع دایره‌ای، با افزایش ابعاد سازه باشد. از سوی دیگر با افزایش ابعاد سازه امکان بکارگیری روش‌های تمام مقطع مکانیزه و قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی برای نگهداری کاهش یافته و بیش‌تر از روش حفاری و آتشفباری سنتی استفاده می‌شود.



شکل (۴-۱): شکل‌های متداول برای سطح مقطع سازه‌های زیرزمینی؛ (الف): نعل اسبی؛ (ب): دی‌شکل؛ (ج): دایره‌ای (Kovari, 1993)

۳-۴ حجم مخصوص مغارهای ذخیره‌سازی

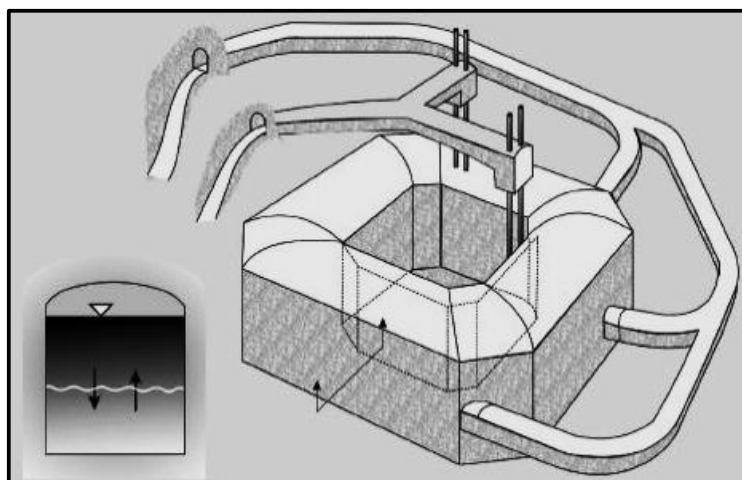
حجم مخصوص یک مغار ذخیره‌سازی، نسبت حجم هندسی به سطح جانبی (محیط) آن است. در مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی نفت خام با افزایش حجم مخصوص، ظرفیت نفت ذخیره‌شده، افزایش و میزان پوشش مورد نیاز و در نتیجه هزینه‌های مرتبط با آن کاهش می‌یابد. همچنین در مغارهای بدون پوشش با افزایش حجم مخصوص، میزان سطحی که نفت خام می‌تواند از آن به توده-سنگ دربرگیرنده تراوش کند، کاهش می‌یابد. از این دیدگاه، مغارهای با سطح مقطع نزدیک به رویه‌ی کروی مطلوب‌ترند؛ اما از دیدگاه مسائل عملیاتی برای حفاری مغارهای بزرگ‌مقیاس، سطح مقطع دی‌شکل مناسب‌تر است.

رهیافت دیگر در زمینه‌ی افزایش حجم مخصوص مغارهای ذخیره‌سازی، استفاده از سطح مقطع تروئیدی^۱ است. در مغارهای تروئیدی، سطح مقطع مغار حول یک محور قائم (خط مرکزی تروئید) دوران کرده است (شکل ۴-۲). برای یک مغار تروئیدی با عرض ۲۲ و ارتفاع ۴۴ متر، حجم

1. Torroidal Shape/Torus/Donut

مخصوص برابر با ۷ متر است؛ یعنی به از ۱ متر مربع سطحی که باید دارای پوشش باشد، ۷ متر مکعب نفت خام ذخیره می‌شود. علاوه بر کاهش سطح جانبی، حذف اثرات دیواره‌های انتهایی و کاهش مشکلات طراحی گوشه‌ها نیز از دیگر مزایای مغارهای تروئیدی است (Kovari, 1993; Nielsen, 2003).

یکی از نکات مهم طراحی مغارهای تروئیدی، انحنای منفی دیواره‌ی درونی آن‌ها است که سبب القای تنش کششی در پوشش مغار می‌شود. در این حالت کوچک‌ترین فشار ناشی از سست-شدگی سنگ‌ها می‌تواند سبب ایجاد درزه و ترک در پوشش و جداره‌ی مغار شود. بنابراین بکارگیری پوشش مسلح در این حالت اجتناب ناپذیر خواهد بود. اما در سنگ‌های مقاوم با فراوانی بسیار کم ناپیوستگی‌ها، می‌توان از مغارهای تروئیدی بدون نیاز به سامانه‌ی نگهداری موقت یا دائم استفاده نمود (Nielsen, 2003).



شکل (۴-۲): تأسیسات ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در Lyckebo سوئد؛ حجم حفاری‌شده: ۱۰۰ هزار متر مکعب (Nielsen, 2003)

۴-۴ انتخاب شکل سطح مقطع، بازه‌ی ابعاد و عمق قرارگیری مغارهای گناوه

با توجه به این‌که پروژه‌ی احداث مغارهای ذخیره‌سازی گناوه در مرحله‌ی مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی و طراحی مفهومی قرار دارد، هنوز اطلاعات دقیقی که حاصل از آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی باشد، برای بکارگیری در طراحی‌ها در دسترس نیست. از این‌رو مقطع انتخاب‌شده برای

مغارها دی‌شکل و با توجه به ابعاد مغارهای موجود ذخیره‌سازی، ۴ حالت مختلف نیز برای ابعاد مغارها در نظر گرفته شده است (جدول ۴-۱ و بخش ۲-۷). بدیهی است که سطح مقطع، ابعاد انتخاب شده و جهت قرارگیری مغارها در مراحل طراحی پایه و تفصیلی با در دست داشتن اطلاعات کامل از وضعیت تنش‌ها، درزه‌داری و آب‌های زیرزمینی ساختگاه پروژه تدقیق خواهند شد. برای تصحیح جهت قرارگیری، اگر ناپایداری بیش‌تر ناشی از میدان تنش باشد، با توجه به الزامات فنی و عملیاتی تلاش می‌شود تا بزرگ‌ترین بعد مغار در راستای بزرگ‌ترین تنش برجای اولیه قرار داده شود. علاوه بر این در شرایطی که ناپایداری بیش‌تر تابعی از ناپیوستگی‌ها باشد، راستای قرارگیری مغار به گونه‌ای انتخاب می‌شود که پتانسیل تشکیل بلوک‌های ناپایدار به کمترین مقدار ممکن برسد.

با توجه به ظرفیت تعیین‌شده (۱۰ میلیون بشکه نفت خام) برای تأسیسات ذخیره‌سازی گناوه و بازه‌ی متداول برای طول مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام (۲۰۰ تا ۶۰۰ متر)، طول ۵۰۰ متر برای مغارهای ذخیره‌سازی گناوه انتخاب شده است (بخش ۲-۷). در صورت امکان، طول مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام می‌تواند تا ۱۰۰۰ متر نیز افزایش یابد. به عنوان نمونه، طول مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام در تأسیسات *U-1* و *U-2* کره‌جنوبی ۱۰۳۰ و ۸۷۵ متر است (Lee & Song, 2003).

جدول (۴-۱): مشخصات ۴ حالت انتخاب‌شده برای مغارهای ذخیره‌سازی گناوه (نسبت ابعاد= نسبت ارتفاع به عرض)

مدل	عرض	ارتفاع	ارتفاع کمان	نسبت ابعاد	سطح مقطع	حجم هندسی	تعداد مغارها
آحاد	متر	متر	متر	-	متر مربع	هزار متر مکعب	-
۱	۲۰	۱۵	۵	۰٫۷۵	۲۷۸٫۵۴	۱۳۹٫۲۷	۱۲
۲	۱۰	۱۰	۲	۱	۹۵٫۷۱	۴۷٫۸۵	۳۴
۳	۱۵	۲۰	۴	۱٫۳	۲۸۷٫۱۲	۱۴۳٫۵۶	۱۱
۴	۲۰	۳۰	۶	۱٫۵	۵۷۴٫۲۵	۲۸۷٫۱۲	۶

بازه‌ی متداول عمق قرارگیری مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام بین ۵۰ تا ۲۰۰ متر برای انواع دارای پوشش و بدون پوشش است (بخش ۲-۷). مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری، انعطاف‌پذیری بالایی در برابر شرایط زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی و عمق

قرارگیری دارند. بنابراین برای کاهش هزینه‌ی احداث مسیره‌های دسترسی، افزایش سرعت انتقال مواد خردشده و تجهیزات، افزایش سرعت گردش ماده و کاهش هزینه‌ی سامانه‌ی نگهداری مغارها، سعی بر قرارگیری مغارهای دارای پوشش در عمق کم تا متوسط است. از سوی دیگر مغارهای بدون پوشش ذخیره‌سازی بستگی زیادی به شرایط زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی و عمق قرارگیری دارند و تعیین عمق قرارگیری مغارها یکی از عوامل اصلی توجیه‌پذیری فنی و اقتصادی تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی است. با توجه به این توضیحات و همچنین با مد نظر قرار دادن ملاحظات پدافندی، عمق قرارگیری مغارهای گناوه در این مرحله برابر با ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

به صورت کیفی اگر عمق قرارگیری سازه‌ی زیرزمینی بیش‌تر از ۷۰ متر در نظر گرفته شود، ملاحظات پدافندی تا حدودی رعایت شده است. اما با توجه به اهمیت مغارهای ذخیره‌سازی گناوه، عمق قرارگیری این سازه‌ها می‌تواند با بکارگیری تحلیل‌های دینامیکی تدقیق شود. از سوی دیگر الزامات کارفرما نیز از عوامل موثر در تعیین عمق مغارهای ذخیره‌سازی است. به عنوان نمونه روش برداشت مورد نیاز که می‌تواند از طریق چاه‌ها یا به صورت ثقلی برای تزریق به خطوط انتقال یا نفت-کش‌ها باشد نیز از نکات قابل توجه در این مورد است.

۵-۴ مدل‌سازی مغارها با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

همان‌طور که در فصل سوم توضیح داده شد، برای طراحی مغارها از نرم‌افزار اختلاف محدود $FLAC^{3D}$ با فرض محیط شبه پیوسته یا معادل استفاده شده است. از آن‌جا که اطلاعات دقیقی در مورد ستون چینه‌شناسی و توالی لایه‌بندی توده‌سنگ گناوه در حال حاضر در دسترس نیست، فرض شده است که مغارها به طور کامل در مارن یا ماسه‌سنگ جانمایی شوند. ابعاد توده‌سنگ مدل‌شده مطابق جدول ۴-۱ و پارامترهای بکار برده‌شده برای مدل‌ها مطابق با جدول ۳-۲ در نظر گرفته شده‌اند. فاصله‌ی مرزهای خارجی با توجه به ابعاد هر مغار ۲ برابر ارتفاع هر مغار از بالا و پایین و ۳ برابر عرض هر مغار از طرفین در نظر گرفته شده است. در ابتدا فاصله‌ی مرزهای خارجی در حدود ۵ برابر ابعاد هر مغار

فرض شده بودند و سپس با استفاده از روش سعی و خطا مرزها به نزدیک‌ترین حد ممکن انتقال داده شدند. با این روش کانتورهای تنش ثقلی، پس از حد تعیین‌شده دوباره به حالت لایه‌ای باز می‌گردد. علاوه بر این برای کاهش زمان محاسبات نرم‌افزار، تنها ۱۵۰ متر از طول هر مغار در مدل وارد و طول کل تمام مدل‌ها ۲۱۰ متر در نظر گرفته شده است (جدول ۴-۲).

جدول (۴-۲): ابعاد مرزهای خارجی مدل‌های در نظر گرفته‌شده در جدول ۴-۱

مدل	آحاد	۱	۲	۳	۴
طول	متر	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۱۰
عرض	متر	۱۰۰	۶۰	۹۰	۱۲۰
ارتفاع	متر	۷۵	۵۰	۱۰۰	۱۵۰

در اولین مرحله و پیش از حفر مغار، مدل‌ها با فرض حالت *CHILE*^۱ به تعادل رسانده شده‌اند. یعنی مدل رفتار ماده کشسان خطی، پیوسته، همسانگرد و همگن فرض شده است. سپس در مرحله دوم با تغییر خواص ماده به شکل‌پذیر، مغار به صورت تک‌مرحله‌ای حفر و دوباره به تعادل رسانده شده است. به عبارت دیگر با استفاده از مدل موهر-کلمب (شکل‌پذیر خطی) و با فرض محیط شبه‌پیوسته؛ رفتار ناپیوسته، ناهمگن و ناهمسانگرد (*DIANE*)^۲ محیط گناوه مدلسازی شده است. در این مرحله با کاهش نسبت بیش‌ترین نیروهای نامتعادل به مقدار متوسط نیروهای گرهی وارد بر تمام گره‌های شبکه به مقداری کمتر از 10^{-5} ، مدل به تعادل می‌رسد. در سومین مرحله برای ثابت شدن مقدار سرعت، جابجایی و تنش‌ها، مدل با طی مراحل زمانی بیش‌تر به تعادل کامل رسانده می‌شود. در شبکه‌ی اختلاف محدود، هر گره با حداکثر ۸ ناحیه که به آن نیرو وارد می‌کنند، احاطه شده است. در حالت تعادل مجموع جبری تمام این نیروها تقریباً برابر با صفر است. اگر نیروهای نامتعادل به مقدار ثابتی (به غیر از صفر) همگرا شود، در این حالت شکست و جریان شکل‌پذیر در مدل اتفاق افتاده است (*ITASCA*^۱, 2009).

1. *CHILE: Continuous, Homogeneous, Isotropic & Linearly-Elastic (Hudson & Harrison, 1997)*
 2. *DIANE: Discontinuous, Inhomogeneous, Anisotropic & Non-Elastic (Hudson & Harrison, 1997)*

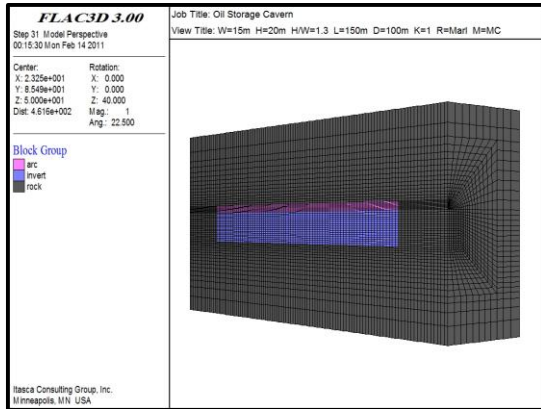
در هنگام مراحل محاسبه، بیشترین نیروی نامتعادل برای تمام شبکه تعریف می‌شود که مقدار آن برای تخمین وضعیت مدل بسیار مهم است. به همین دلیل مقدار آن باید با بزرگی نیروهای درونی وارد بر شبکه مقایسه شود. معرف بزرگی نیروی درونی یک گره از حاصل ضرب تنش در سطح تأثیر عمود بر نیرو محاسبه می‌شود. نسبت بیشترین نیروی نامتعادل به معرف نیروی درونی با درصد بیان شده و هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد. مقدار کوچک این نسبت نشان می‌دهد که نیروها در تمام گره-های شبکه در تعادل هستند. هر چند که ممکن است جریان پایدار شکل‌پذیر نیز در این حالت اتفاق بیفتد. به همین دلیل برای درک تعادل واقعی مدل باید سرعت‌ها و حالت تسلیم عناصر مدل نیز مورد بررسی قرار گیرند (ITASCA¹, 2009).

سرعت (نسبت جابجایی بر تعداد گام‌ها) و جابجایی‌ها نیز یکی دیگر از معرف‌های تعادل مدل هستند. اگر مولفه‌های سرعت در تمام نقاط گره به مقداری برابر با صفر همگرا شود، در این صورت مدل در تعادل مطلق است. علاوه بر این اگر مولفه‌های سرعت به مقداری ثابت و غیر صفر همگرا شود، جریان شکل‌پذیر در مدل رخ داده است و اگر هم‌چنان در حال نوسان باشد، مدل در شرایط گذار است (ITASCA¹, 2009).

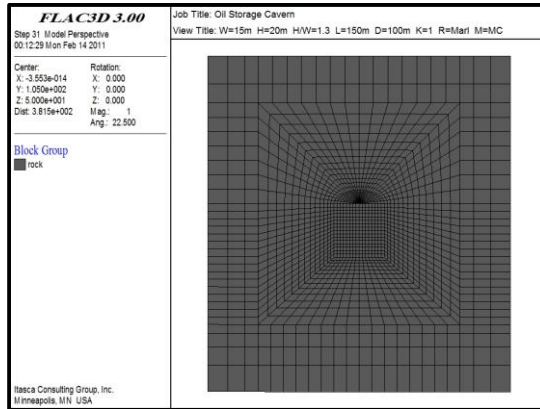
به عنوان نمونه در شکل ۴-۳، شبکه‌ی اختلاف محدود اطراف مغار شماره‌ی ۳ در مارن، با ۱۵ متر عرض و ۲۰ متر ارتفاع مشاهده می‌شود. همچنین در مجموعه نمودار ۴-۲، نمودارهای بیشترین نیروی نامتعادل شبکه، سرعت قائم و تنش افقی نقطه‌ی شاهد در سقف مغار و سرعت افقی و تنش قائم در دیواره‌ی مغار به عنوان اثبات متعادل بودن مدل‌ها آورده شده است.

۴-۶ نتایج حاصل از مدلسازی‌های عددی

پس از متعادل شدن هر مدل، مقادیر جابجایی‌ها، گسترش ناحیه‌ی تسلیم، بزرگی تنش‌های القایی در جهت محورهای مختصات و بزرگی بیشترین و کمترین تنش‌های اصلی در نقاط شاهد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نقاط شاهد در سقف، گوشه‌ها، دیواره و کف مغارها انتخاب شده‌اند.

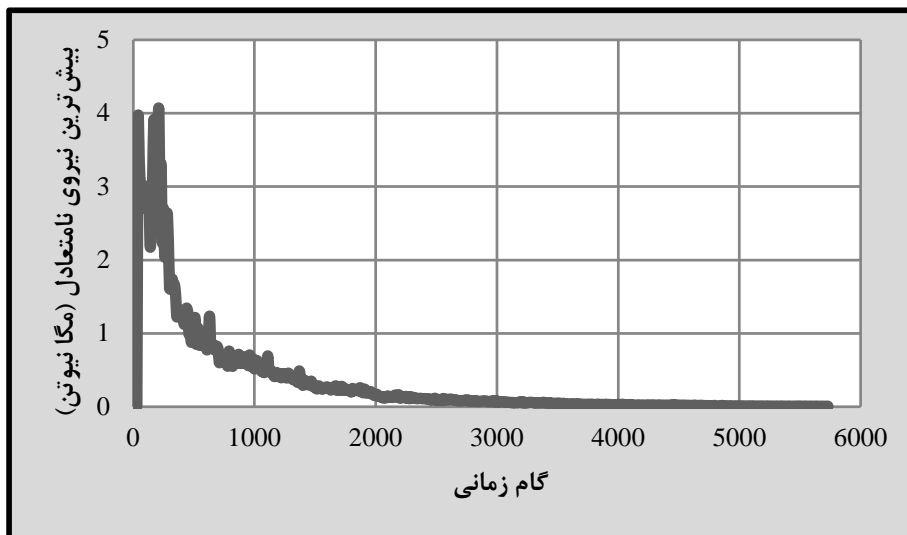


(ب)

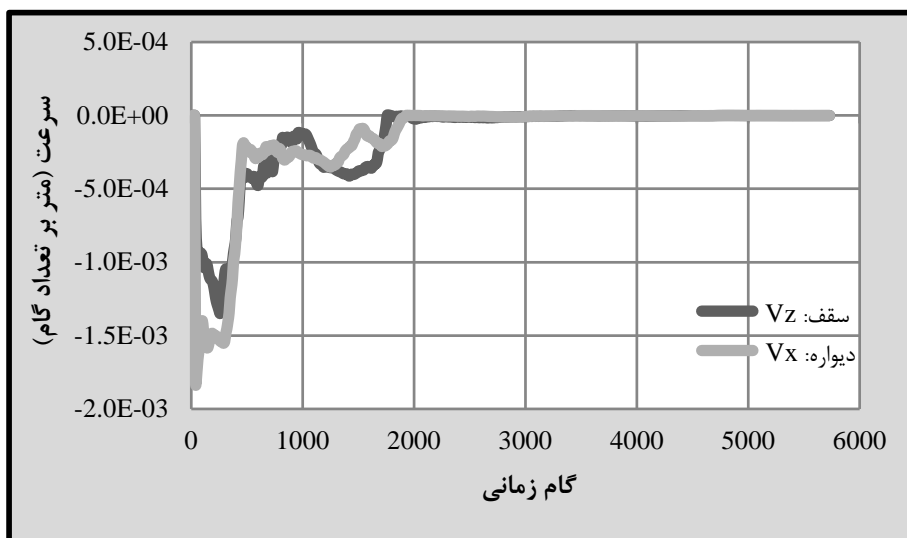


(الف)

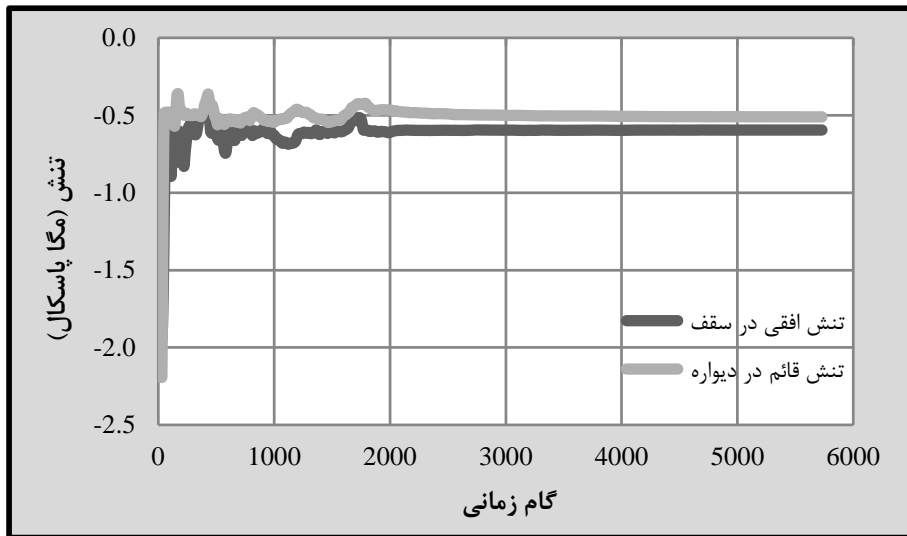
شکل (۳-۴): شبکه‌ی اختلاف محدود در اطراف مدل شماره‌ی ۳؛ (الف): نمای روبرو، (ب): نمای جانبی



(الف)



(ب)

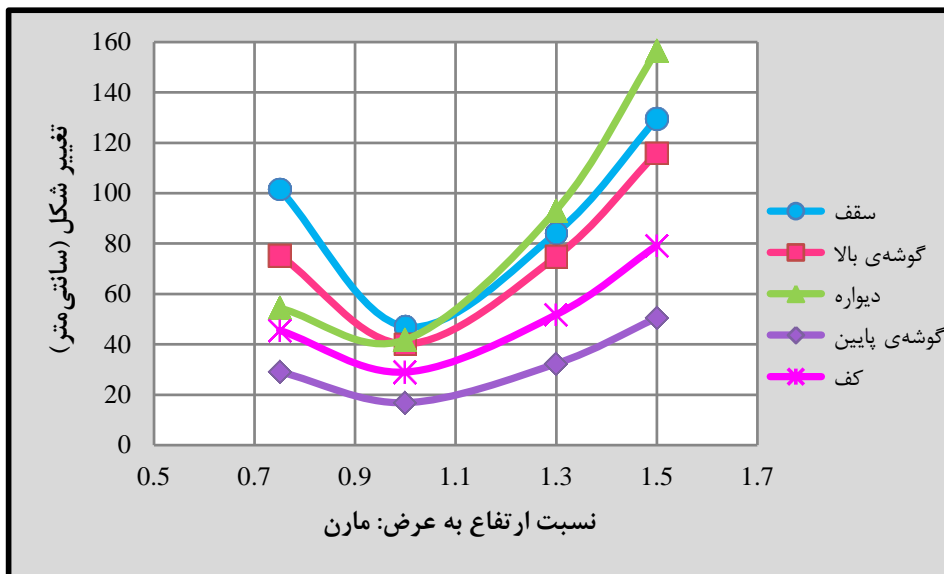


(ج)

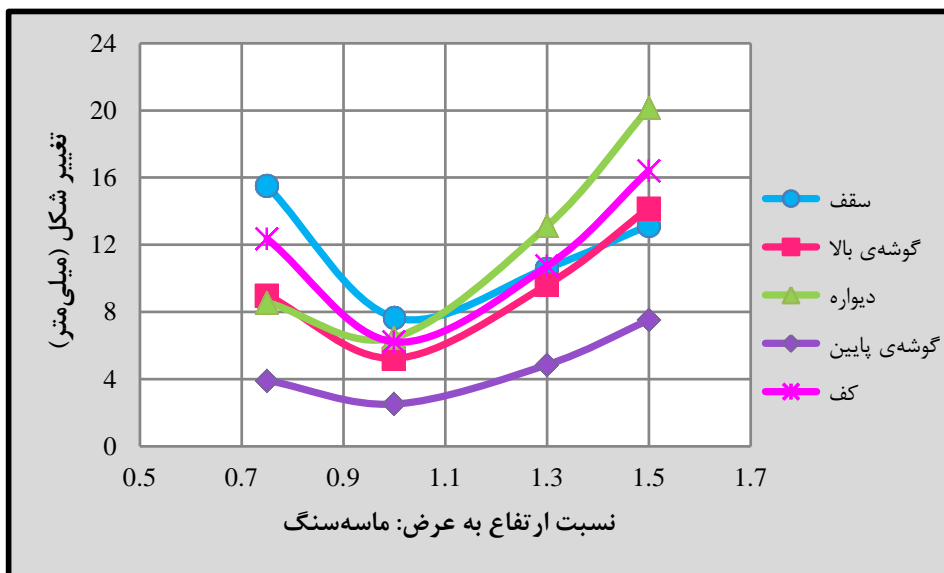
نمودار (۴-۲): بررسی تعادل مدل‌های مارنی؛ (الف): تغییرات بیش‌ترین نیروی نامتعادل، (ب): تغییرات سرعت قائم سقف و سرعت افقی دیواره، (ج): تغییرات تنش افقی سقف و تنش قائم دیواره (علامت منفی = تنش فشاری)

۴-۶-۱ جابجایی‌ها

در مجموعه نمودار ۴-۳ روند تغییرات جابجایی برآیند (تغییر شکل) در مدل‌های مارن و ماسه‌سنگ با تغییر ابعاد مغارها مشاهده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که تغییر شکل در سقف و کف مغار، بیش‌تر تابعی از جابجایی قائم، تغییر شکل در گوشه‌های مغار، حاصل از برآیند جابجایی‌های افقی و قائم و تغییر شکل دیواره‌ی مغار بیش‌تر متأثر از جابجایی افقی در آن نقطه است. در هر دو حالت مارن و ماسه‌سنگ، با ثابت بودن مقدار تنش‌های برجا و پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ، با افزایش ابعاد و در نتیجه افزایش سطح مقطع، میزان جابجایی‌ها در جداره‌ی هر مغار به سرعت افزایش می‌یابد. در مدل‌های ۳ و ۴، از آن‌جا که سطح مقطع انتخاب شده برای مغارها دی‌شکل است، بیش‌ترین میزان تغییر شکل در دیواره‌ی بلند هر مغار رخ می‌دهد. در مدل‌های مارن، پس از دیواره، سقف مغار و در مدل‌های ماسه‌سنگ، کف مغار دارای بیش‌ترین مقادیر تغییر شکل هستند. در مدل ۲، با مقدار ارتفاع و عرض برابر، بیش‌ترین مقدار تغییر شکل در سقف مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی پیش‌بینی شده و پس از آن دیواره‌ی مغارها دارای بیش‌ترین مقدار تغییر شکل است. در مدل ۱ نیز بیش‌ترین مقدار تغییر شکل در سقف مغار رخ می‌دهد و پس از آن در مدل مارن گوشه‌ی بالای مغار و در مدل ماسه‌سنگ کف مغار دارای بیش‌ترین مقادیر تغییر شکل هستند (نمودار ۴-۳: الف و ب).



(الف)



(ب)

نمودار (۳-۴): جابجایی‌های بدست آمده با تغییر ابعاد مغارها؛ (الف): توده سنگ دربرگیرنده‌ی مغارها: مارن، (ب): توده-سنگ دربرگیرنده‌ی مغارها: ماسه سنگ

با مقایسه‌ی مدل‌های ۱ و ۳ (دارای نسبت ارتفاع به عرض معکوس)، مشاهده می‌شود که میزان تغییر شکل سقف مدل ۱ بیش‌تر از تغییر شکل سقف مدل ۳، اما تغییر شکل دیواره‌ی این مدل کمتر از مدل ۳ است (نمودار ۳-۴: الف و ب). در مدل‌های ماسه سنگ مقدار تغییر شکل پیش‌بینی-شده در سقف مدل ۱ حتی از مقدار تغییر شکل بزرگ‌ترین مغار موجود یعنی مدل ۴ نیز بیش‌تر است (نمودار ۳-۴: ب).

همان‌طور که در فصل سوم بیان شد، در بررسی‌های سطحی انجام‌شده برای تخمین ویژگی-

های مقاومتی ساختگاه گناوه، توده سنگ این ناحیه در زمره‌ی سنگ‌های ضعیف تا متوسط ارزیابی شده است. علاوه بر این با مقایسه‌ی پارامترهای برآورد شده برای مارن و ماسه سنگ آجاجاری (جدول ۲-۳)، مشاهده می‌شود که مقاومت مارن بسیار کمتر از مقاومت ماسه سنگ است. به عنوان نمونه چسبندگی، مقاومت کششی و مدول مارن تنها در حدود ۲۴، ۱۰ و ۴ درصد چسبندگی، مقاومت کششی و مدول ماسه سنگ است. به همین دلیل مقادیر پیش‌بینی‌شده برای جابجایی‌های جداره‌ی مغارهای مارنی بسیار بیش‌تر از مقادیر جابجایی‌های جداره‌ی مغارهای ماسه‌سنگی است. با توجه به جدول ۳-۴، مقادیر تغییر شکل‌های پیش‌بینی‌شده برای جداره‌ی مدل‌های ماسه‌سنگی به جز کف مغارها، تنها در حدود ۱ تا ۱/۶ درصد تغییر شکل‌های جداره‌ی مدل‌های مارنی است. بازه‌ی تغییرات جابجایی کف مدل‌های ماسه‌سنگی نیز در حدود ۲ تا ۳ درصد مدل‌های مارنی است.

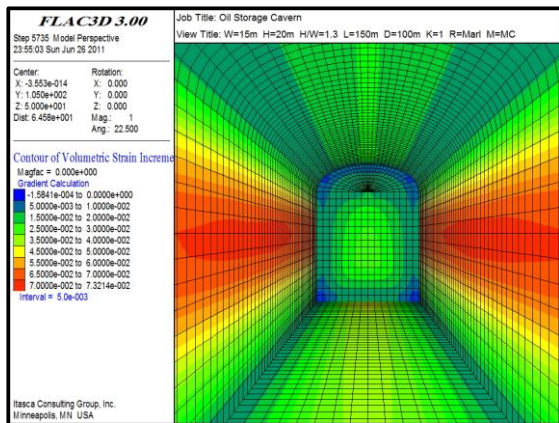
جدول (۳-۴): تغییر شکل‌های پیش‌بینی‌شده در جداره‌ی مغارهای با ابعاد متفاوت در دو حالت توده سنگ دربرگیرنده-ی مارن و ماسه سنگ؛ واحد تغییر شکل = سانتی‌متر

دیواره		گوشه‌ی پایین		گوشه‌ی بالا		کف		سقف		تغییر شکل (سانتی‌متر)
ماسه	مارن	ماسه	مارن	ماسه	مارن	ماسه	مارن	ماسه	مارن	مدل
۰/۸۶	۵۴/۴۰	۰/۳۹	۲۹/۱۴	۰/۹۰	۷۵/۳۷	۱/۲۴	۴۵/۵۷	۱/۵۵	۱۰/۱۶۰	۱
۰/۶۵	۴۱/۸۴	۰/۲۵	۱۶/۸۶	۰/۵۲	۴۰/۲۲	۰/۶۲	۲۹/۰۱	۰/۷۷	۴۷/۰۵	۲
۱/۳۱	۹۳/۳۲	۰/۴۹	۳۲/۳۵	۰/۹۶	۷۴/۸۴	۱/۰۷	۵۱/۸۰	۱/۰۶	۸۴/۲۲	۳
۲/۰۱	۱۵۶/۶۰	۰/۷۵	۵۰/۵۲	۱/۴۲	۱۱۶	۱/۶۴	۷۹/۲۵	۱/۳۲	۱۲۹/۶	۴

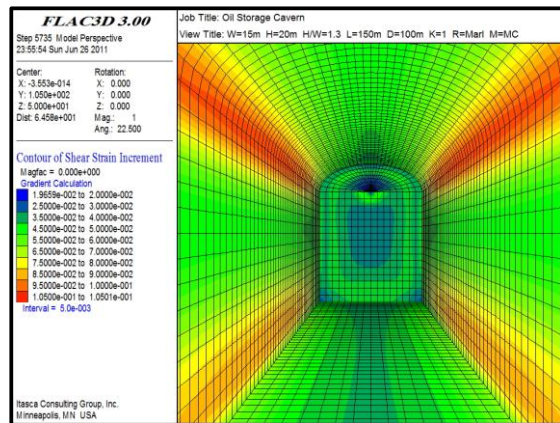
۴-۶-۲ کرنش‌ها

به عنوان نمونه، در مجموعه اشکال ۴-۴ کانتورهای کرنش برشی و حجمی برآوردشده برای مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی آورده شده است (مدل ۳). بیش‌ترین کرنش برشی پیش‌بینی‌شده برای مغار مارنی در حدود ۱۱ درصد در گوشه‌ی بالا و برای مغار ماسه‌سنگی در حدود ۰/۱۳ درصد در گوشه‌ی پایین است. همچنین کرنش برشی سقف و دیواره‌ی مغار مارنی در حدود ۵ تا ۶ درصد و کرنش برشی کف مغار در حدود ۳ تا ۵ درصد است. کرنش برشی دیواره‌ی مغار ماسه‌سنگی نیز در حدود ۰/۱ درصد و

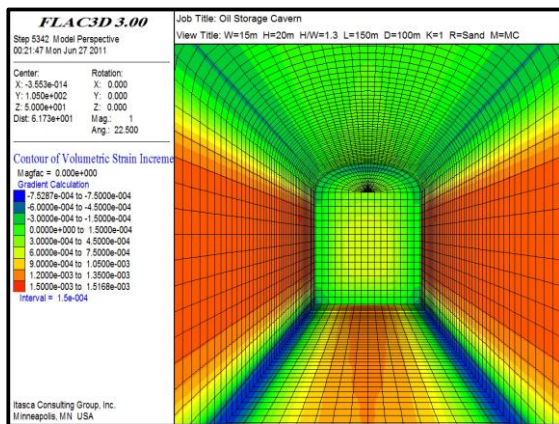
کرنش برشی سقف و کف مغار در حدود ۰٫۰۸ و ۰٫۰۹ درصد است (شکل ۴-۴: الف و ج). از سوی دیگر بیشترین کرنش حجمی در میانه‌ی دیواره‌ی مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی با مقادیر تقریبی ۷ و ۱۵ درصد پیش‌بینی شده است. کرنش حجمی در کف مغار مارنی در حدود ۲٫۵ تا ۴ درصد و در سقف مغار در حدود ۲ تا ۳ درصد است. همچنین کرنش حجمی در کف مغار ماسه‌سنگی در حدود ۰٫۰۹ تا ۰٫۱۴ درصد و در سقف آن در حدود ۰ تا ۰٫۰۲ درصد است (شکل ۴-۴: ب و د).



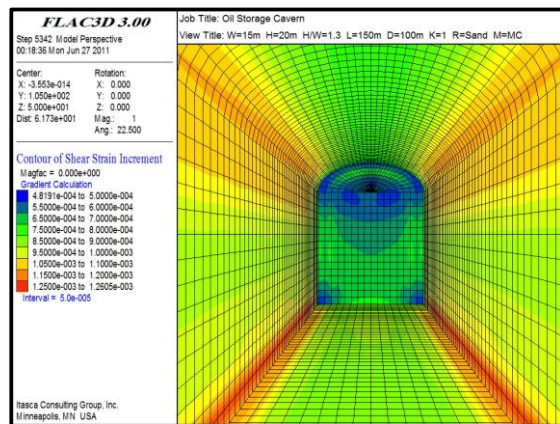
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۴-۴): کانتورهای کرنش برای مدل شماره ۳: کانتورهای کرنش برشی و حجمی برای مغار مارنی (الف و ب)؛ کانتورهای کرنش برشی و حجمی برای مغار ماسه‌سنگی (ج و د)

۴-۶-۳ گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارها

نرم‌افزار *FLAC^{3D}* می‌تواند دو حالت شکست برشی و کششی در زمان حال و گذشته را مدلسازی نماید. اگر در یک مرحله‌ی زمانی، تنش در یک ناحیه به حد تسلیم یا فراتر از آن برسد، آن ناحیه در

حالت شکست فعال^۱ قرار می‌گیرد و اگر یک ناحیه در مراحل زمانی گذشته شکسته باشد، اما در زمان حال تنش‌های این ناحیه در زیر حد تسلیم قرار داشته باشند، این ناحیه در حالت شکست منفعل^۲ و در وضعیت کشسان قرار می‌گیرد. از سوی دیگر، وجود یک نوار پیوسته از نواحی تسلیم‌شده‌ی فعال در مدل که در دو سطح با هم تلاقی دارند، بیانگر وقوع شکست در مدل است. همچنین اگر مقایسه‌ی مدل قبل و بعد از حفاری، گسترش نواحی فعال تسلیم را نشان دهد، می‌توان شکست نهایی و عدم تعادل مدل را انتظار داشت (ITASCA^۱, 2009).

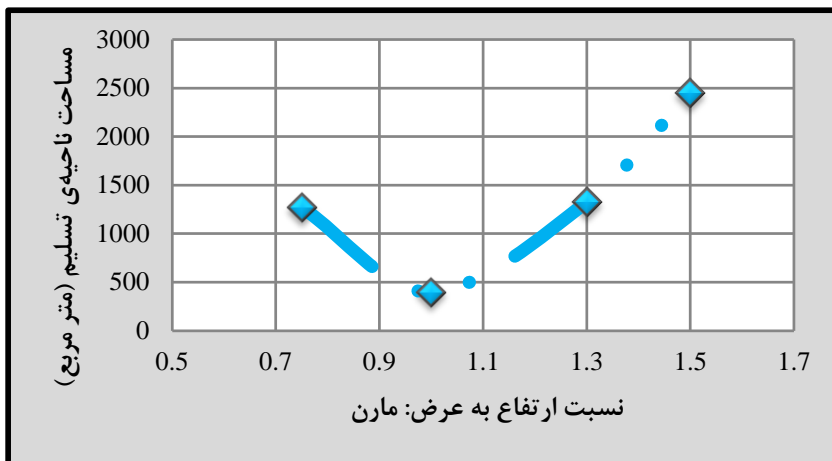
در جدول ۴-۴، شعاع و مساحت ناحیه‌ی تسلیم مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد مغارها، شعاع و مساحت ناحیه‌ی تسلیم افزایش یافته و در مدل‌های مارن، مساحت ناحیه‌ی تسلیم در حدود ۴ تا ۴٫۶ برابر و در مدل‌های ماسه‌سنگی در حدود ۰٫۳ تا ۰٫۵ برابر مساحت هر مغار است.

جدول (۴-۴): گسترش ناحیه‌ی تسلیم با تغییر ابعاد مغارها: بیش‌ترین شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی و برشی، مساحت ناحیه‌ی تسلیم و نسبت مساحت ناحیه‌ی تسلیم به مساحت هر مغار در مدل‌های مارن و ماسه‌سنگی

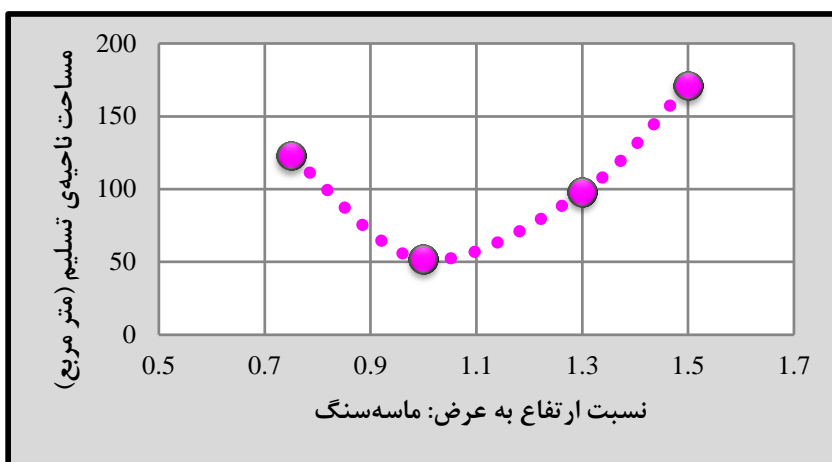
نسبت مساحت		مساحت (متر مربع)		شعاع: برش (متر)		شعاع: کشش (متر)		ناحیه‌ی تسلیم	مدل
۰٫۴۴	۴٫۵۶	۱۲۲٫۵۶	۱۲۷۰٫۴۱	۲	۱۳	۲	۲	۱	
۰٫۵۴	۴٫۱۶	۵۱٫۶۲	۳۹۷٫۹۱	۰٫۵	۹	۱	۱٫۶	۲	
۰٫۳۴	۴٫۶۲	۹۷٫۶۶	۱۳۲۷٫۰۶	۰٫۸	۱۶٫۵	۱٫۹	۴٫۵	۳	
۰٫۳۰	۴٫۲۷	۱۷۰٫۷	۲۴۵۲٫۱۳	۱	۲۶	۲	۷	۴	

روند افزایش مساحت ناحیه‌ی تسلیم اطراف مغارها در مجموعه نمودار ۴-۴ آورده شده است. با مقایسه‌ی مدل‌های ۱ و ۳ مشاهده می‌شود که در حالت مارن، مساحت ناحیه‌ی تسلیم مدل ۳ کمی بیش‌تر از مساحت ناحیه‌ی تسلیم مدل ۱ و در حالت ماسه‌سنگی، گسترش این ناحیه در حدود ۰٫۸ مساحت ناحیه‌ی تسلیم مدل ۱ است.

1. Shear-Now/Tension-Now
2. Shear-Past/Tension-Past



(الف)



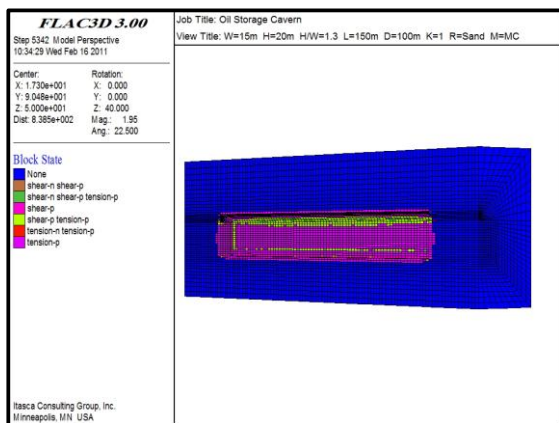
(ب)

نمودار (۴-۴): تغییر مساحت ناحیهی تسلیم در اطراف مغارهای با ابعاد متفاوت در مدل‌های مارن و ماسه‌سنگ

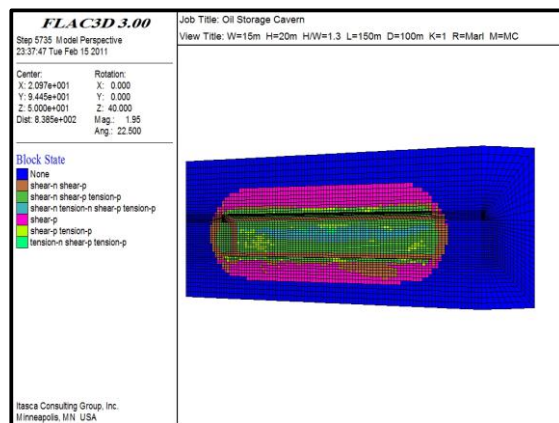
در مجموعه اشکال ۴-۵، گسترش ناحیهی تسلیم در مدل شماره ۳، با تغییر نوع توده‌سنگ دربرگیرنده مشاهده می‌شود. با نگرشی بر شکل‌های الف تا د، مشاهده می‌شود که مساحت ناحیهی تسلیم در مارن بسیار بزرگ‌تر از ماسه‌سنگ و در حدود $13/6$ برابر آن است. همان‌طور که در بخش جابجایی (۴-۶-۱) نیز توضیح داده شد، دلیل این امر کمتر بودن پارامترهای مقاومتی مارن نسبت به ماسه‌سنگ است. نکته‌ی قابل توجه در مدل مارن، بوجود آمدن یک منطقه‌ی فعال تسلیم برشی در تمام جداره‌ی مغار و یک منطقه‌ی فعال تسلیم کششی در میانه‌ی دیواره، در سرتاسر طول مغار است. با نگاهی به شکل ۴-۵: ه، ملاحظه می‌شود که در مدل مارن، شعاع ناحیهی تسلیم برشی، بزرگ‌تر از شعاع ناحیهی تسلیم کششی و در حدود $3/7$ برابر آن است. همچنین به جز گوشه‌های مغار تمامی جداره در وضعیت تسلیم کششی نیز قرار دارد. در حالی که در مدل ماسه‌سنگ، شعاع ناحیهی

تسلیم کششی، بزرگ‌تر و در حدود ۲/۴ برابر شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی است. همچنین در مدل ماسه‌سنگ تسلیم کششی در تمام جداره‌ی مغار به جز گوشه‌ی پایین بوجود آمده و تسلیم برشی تنها در گوشه‌های مغار رخ داده است (شکل ۴-۵: و).

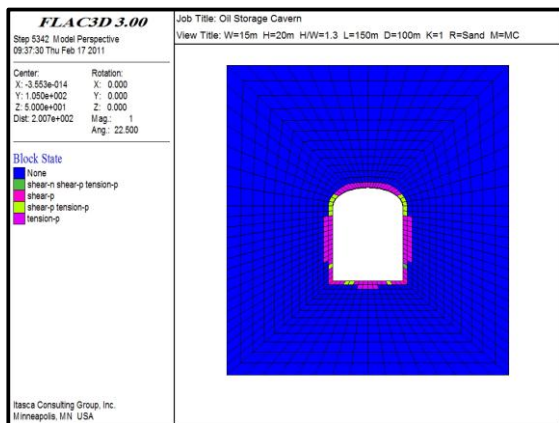
در مدل مارن، اکثر نواحی تسلیم‌شده‌ی تحت برش، در حالت فعال بوده و مقدار تنش در آنها از حد تسلیم برشی کمتر نشده است. علاوه بر این یک ناحیه‌ی فعال تسلیم کششی نیز در میانه‌ی دیوار مغار مشاهده می‌شود (شکل ۴-۵: ز). اما در مدل ماسه‌سنگ ناحیه‌ی تسلیم برشی فعال بسیار اندکی وجود داشته و ناحیه‌ی تسلیم فعال کششی نیز در اطراف جداره‌ی مغار مشاهده نمی‌شود (شکل ۴-۵: ح).



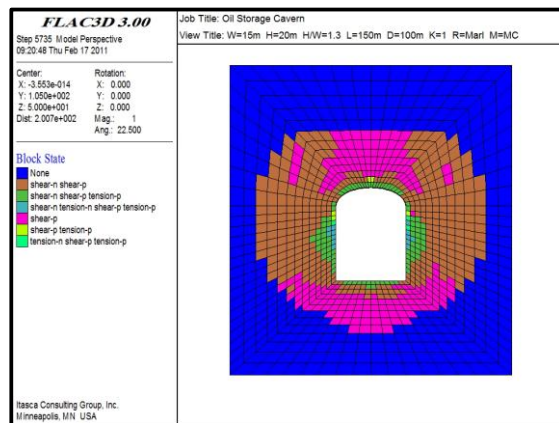
(ب)



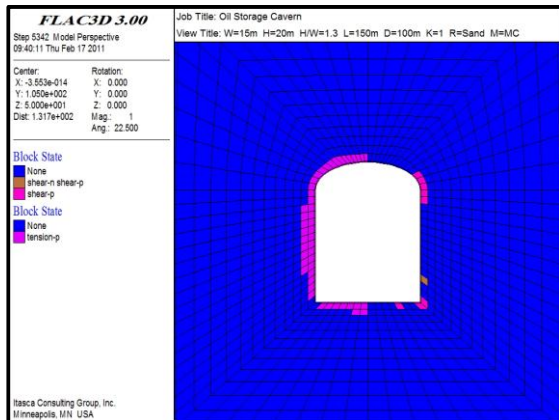
(ف)



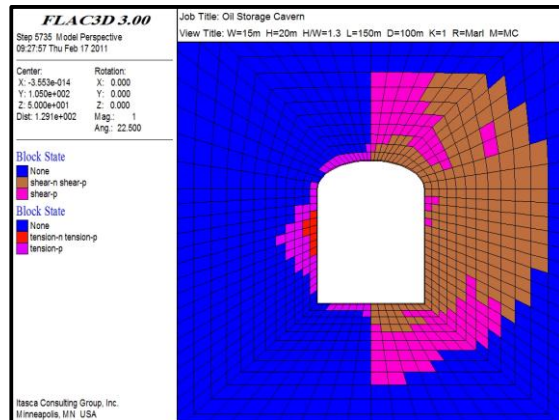
(د)



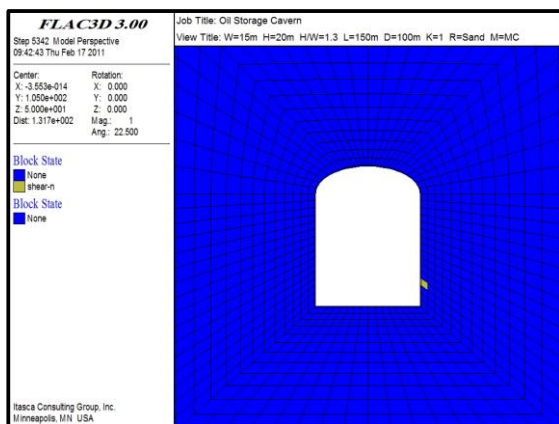
(ج)



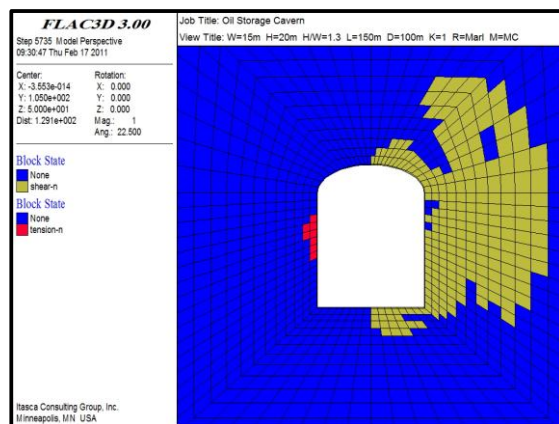
(و)



(ه)



(ح)



(ز)

شکل (۴-۵): گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مدل شماره‌ی ۳ در توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مارن (الف، ج، ه و ز) و ماسه‌سنگ (ب، د، و و ح)

(الف و ب): مقایسه‌ی گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغار، با تغییر نوع توده‌سنگ در مقطع طولی؛ (ج و د): مقایسه‌ی گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغار، با تغییر نوع توده‌سنگ در مقطع عرضی میانه‌ی طول مغار؛ (ه و و): مقایسه‌ی گسترش نواحی تسلیم برشی و کششی؛ (ز و ح): مقایسه‌ی گسترش نواحی فعال تسلیم برشی و کششی

۴-۶-۴ تنش‌ها

میدان تنش برجای زمین تأثیر زیادی بر وضعیت پایداری یک سازه‌ی زیرزمینی دارد. این اثر در شرایطی که مقدار تنش از مقاومت توده‌سنگ بیش‌تر باشد، محسوس‌تر است. علاوه بر مقادیر بالای تنش که سبب ناپایداری سازه می‌شود، میزان تنش پایین نیز می‌تواند در سنگ‌های درزه‌دار سبب القای ناپایداری شود. پس از حفر سازه، بسته به بزرگی و جهت تنش‌های برجا و هندسه‌ی سازه، تنش‌ها دوباره در اطراف سازه تنظیم می‌شوند. از دیدگاه تحلیلی، وضعیت این تنش‌ها در حاشیه‌ی جداری مغار از اهمیت خاصی برخوردار است. از آن‌جا که تنش‌های برجا ناهمسانگرد هستند، تنش-

های مماسی اطراف سازه حتی در مقاطع دایره‌ای نیز می‌تواند متغیر باشد. همچنین مقدار بزرگ‌ترین تنش مماسی بیش‌تر به شکل سازه و خواص شکل‌پذیری توده‌سنگ بستگی دارد تا به ابعاد آن. در این بخش برای بررسی وضعیت تنش‌های برجا و القایی در ناحیه‌ی گناوه، مقادیر آزادسازی تنش‌ها، تمرکز تنش‌ها و ضریب ایمنی در جداره‌ی مغارها برآورد و تحلیل شده است.

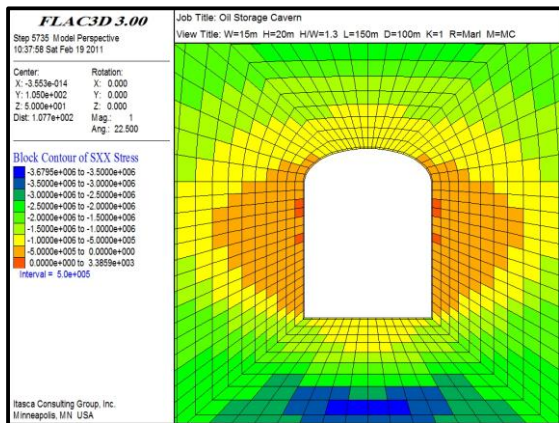
۴-۶-۴ آزادسازی تنش‌ها

پس از حفر یک سازه‌ی زیرزمینی بسته به مقاومت توده‌سنگ مقدار تنش‌ها در اطراف سازه، در حین تنظیم مجدد شروع به کاهش نیز می‌نماید. در سنگ‌های سست ممکن است مقدار تنش‌های القایی در جداره‌ی سازه (به خصوص در سقف) به صفر نیز برسد. یعنی همزمان با تغییر شکل توده‌سنگ، مقادیر زیادی از تنش و انرژی نیز آزاد می‌شود. بنابراین، مقدار کاهش تنش‌ها در راستای افقی یا قائم نسبت به مقادیر تنش‌های اولیه در همان راستا، آزادسازی تنش نامیده می‌شود.

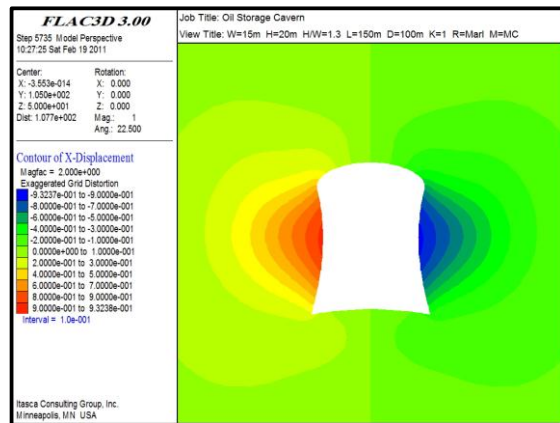
به عنوان نمونه در مجموعه اشکال ۴-۶، کانتورهای جابجایی و تنش افقی و قائم در جداره‌ی مدل ۳ در مارن و ماسه‌سنگ و در جداول ۴-۵ و ۴-۶ درصد آزادسازی تنش‌های افقی و قائم در اطراف تمامی مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش آزادسازی تنش‌های افقی از توده‌سنگ به طرف جداره‌ی مغار، مقدار جابجایی‌های افقی دیواره افزایش نیز یافته است. همچنین با افزایش آزادسازی تنش‌های قائم از توده‌سنگ به طرف جداره‌ی مغار، جابجایی‌های قائم در سقف و کف مغار نیز روند افزایشی نشان داده است (شکل ۴-۶).

در هر دو حالت مارن و ماسه‌سنگ، تنش افقی تقریباً به طور کامل در دیواره‌ی مغارها آزاد شده است. اما در مدل‌های ماسه‌سنگ با آزادسازی تنش افقی در دیواره، تنش افقی در سقف مغار افزایش یافته و میزان تمرکز تنش با افزایش ابعاد مغارها بیش‌تر شده است. به عبارت دیگر در سقف مغارهای ماسه‌سنگی پدیده‌ی آزادسازی تنش افقی مشاهده نشده است. در صورتی که تنش افقی در سقف مغارهای مارنی تا حدود ۷۰ درصد آزاد شده است. همچنین میزان آزادسازی تنش افقی در کف

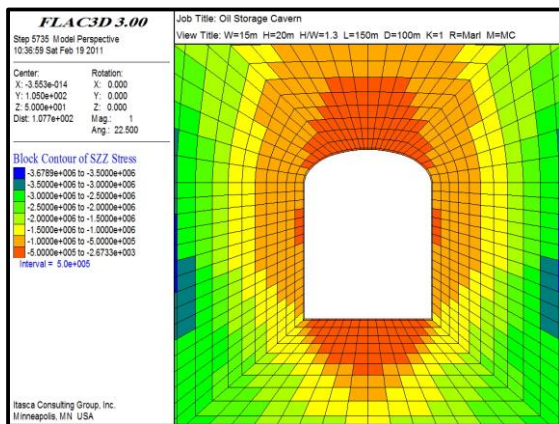
مغارهای ماسه‌سنگی نیز در مقایسه با مغارهای مارنی بسیار اندک بوده است (جدول ۴-۵). از سوی دیگر آزادسازی تنش‌های قائم نیز با مقادیر قابل توجهی در سقف و کف مغارهای مارن و ماسه‌سنگی روی داده است. اما در دیواره‌ی مغارهای ماسه‌سنگی مدل‌های ۱ و ۲ مقدار تنش‌های قائم افزایش یافته و در مدل‌های ۳ و ۴ نیز آزادسازی اندکی صورت گرفته است. اما در دیواره‌ی مغارهای مارنی آزادسازی تنش‌های قائم در حدود ۶۵ تا ۸۰ درصد بوده است (جدول ۴-۶).



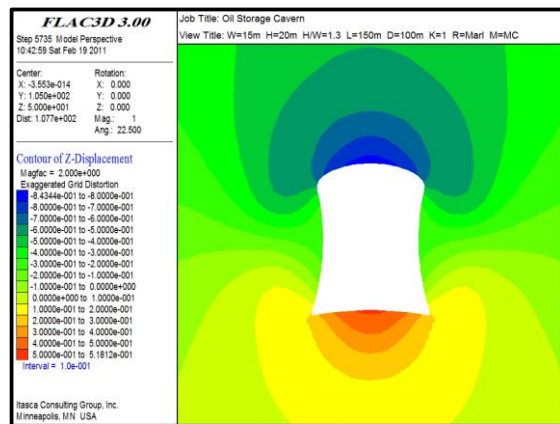
(ب)



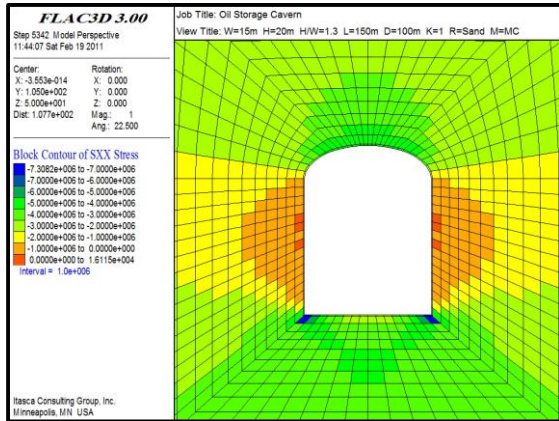
(الف)



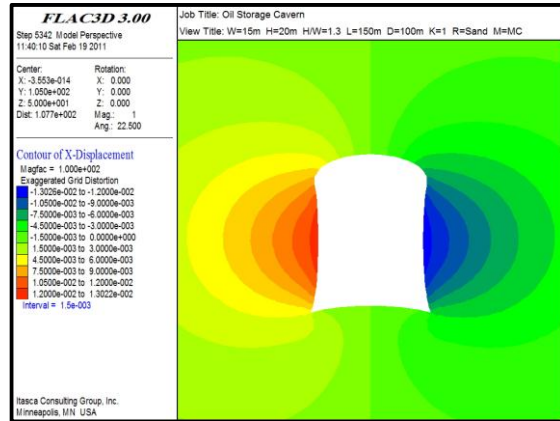
(د)



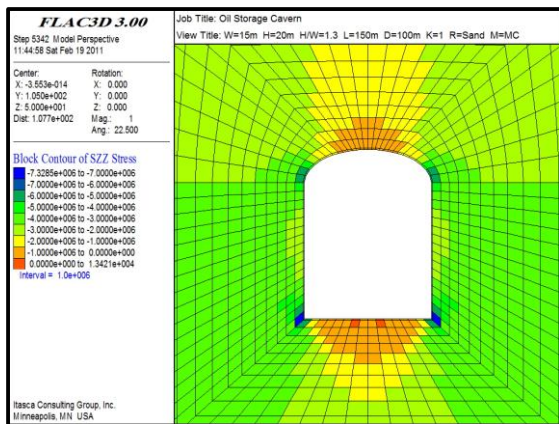
(ج)



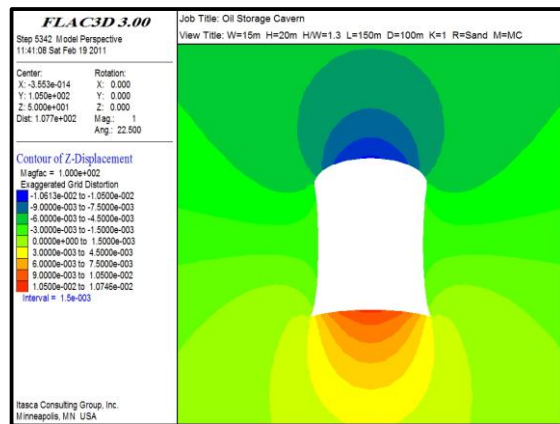
(و)



(ه)



(ح)



(ز)

شکل (۴-۶): کانتورهای جابجایی (متر) به همراه تغییر شکل جداره‌ی مغار و کانتورهای تنش افقی و قائم (پاسکال) در اطراف مغار مدل ۳ در توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مارن (الف، ب، ج و د) و ماسه‌سنگ (ه، و، ز و ح) (الف و ه): کانتورهای جابجایی افقی؛ (ج و ز): کانتورهای جابجایی قائم؛ (ب و و): کانتورهای تنش افقی؛ (د و ح): کانتورهای تنش قائم

جدول (۴-۵): درصد آزادسازی تنش‌های افقی در نقاط شاهد: سقف، دیواره و کف (اعداد مثبت نشانگر آزادسازی تنش و اعداد منفی نشانگر تمرکز تنش هستند)

کف		دیواره		سقف		آزادسازی تنش افقی (درصد)	مدل
۱۷٫۲	۷۲٫۷	۹۱٫۰	۹۵٫۷	-۳۳٫۶	۷۲٫۲	۱	
۱۲٫۶	۷۵	۹۹٫۴	۹۹٫۷	-۴۱٫۸	۷۰٫۲	۲	
۸٫۹	۷۷٫۱	۹۹٫۴	۹۹٫۹	-۷۵٫۹	۶۹٫۵	۳	
۹٫۱	۷۸٫۸	۱۰۰٫۰	۹۹٫۹	-۹۲٫۷	۷۰٫۸	۴	

جدول (۴-۶): درصد آزادسازی تنش‌های قائم در نقاط شاهد: سقف، دیواره و کف (اعداد مثبت نشانگر آزادسازی تنش و اعداد منفی نشانگر تمرکز تنش هستند)

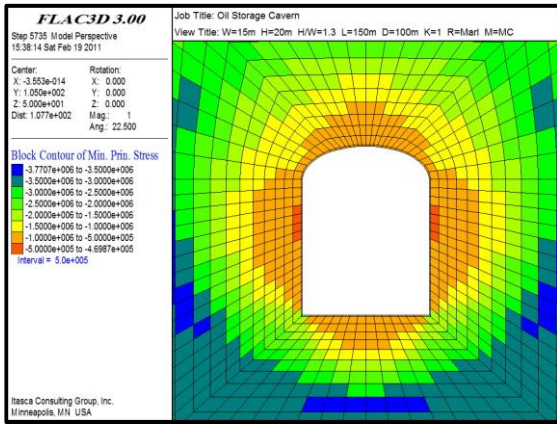
کف		دیواره		سقف		آزادسازی تنش قائم (درصد)	مدل
۹۷٫۸	۹۸٫۶	-۵۴٫۶	۶۶٫۰	۹۵٫۶	۹۹٫۸		۱
۹۹٫۹	۹۹٫۷	-۱۶٫۸	۷۳٫۷	۹۵٫۷	۹۹٫۱		۲
۹۸٫۹	۹۹٫۹	۷٫۵	۷۶٫۷	۹۲٫۰	۹۸٫۸		۳
۹۸٫۱	۹۹٫۸	۱۷٫۰	۷۹٫۹	۹۳٫۴	۹۹٫۲		۴

۲-۴-۶-۴ تمرکز تنش‌ها

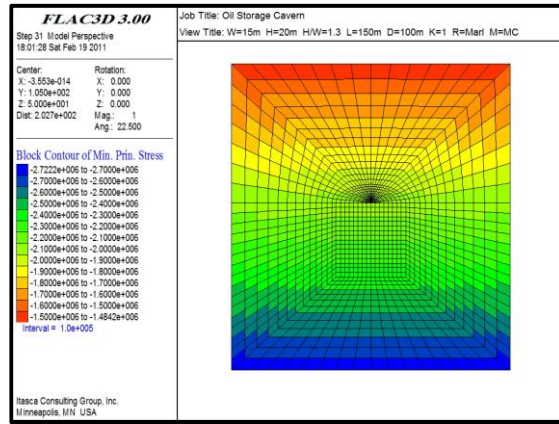
نسبت بیش‌ترین تنش اصلی پس از حفاری، در حالت کشسان- شکل‌پذیر (اشکال ۴-۷: ب و د) به بیش‌ترین تنش اصلی پیش از حفاری، در شرایط کشسان (اشکال ۴-۷: الف و ج)، ضریب تمرکز تنش نامیده می‌شود. ضریب تمرکز تنش به عواملی مانند شکل مغار، نسبت ابعاد، میدان و نسبت تنش‌های برجا (پیش از حفاری) و جهت قرارگیری مغار بستگی دارد. جهت قرارگیری، زاویه‌ی بعد بزرگ‌تر مغار نسبت به بیش‌ترین تنش اصلی پیش از حفاری است (Pariseau, 2007).

مقادیر ضریب تمرکز تنش محاسبه‌شده برای مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی در جدول ۴-۷ آورده شده است. با توجه به فرآیند آزادسازی تنش‌ها در مدل‌های مارن، تمامی مقادیر بدست آمده (به جز در گوشه‌ی پایین مغار مدل ۱) کمتر از ۱ هستند. در مغارهای مارنی با افزایش ابعاد، میزان تمرکز تنش در سقف مغارها روند مناسبی نشان نداده است؛ اما در دیواره و کف مغارها روند کاهشی نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقادیر ضریب تمرکز تنش نیز همان‌طور که انتظار می‌رود، در گوشه‌ی پایین مغارها مشاهده شده است (به همین ترتیب برای ماسه‌سنگ). در مغارهای ماسه‌سنگی اکثر مقادیر به دست آمده بزرگ‌تر از ۱ است و با افزایش ابعاد مغارها، تمرکز تنش در سقف و کف مغارها روند افزایشی و در دیواره‌ها روند کاهشی نشان داده است. با مقایسه‌ی مقادیر بدست آمده برای مارن و ماسه‌سنگ مشاهده می‌شود که ضرایب تمرکز ماسه‌سنگ (توده‌سنگ مقاوم‌تر) بسیار بیش‌تر از مارن (توده‌سنگ سست‌تر) است. بدین معنا که آزادسازی تنش‌ها در سنگ‌های مقاوم‌تر به مقدار و سرعت

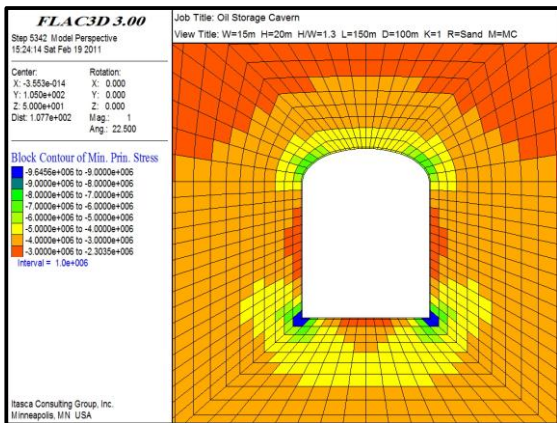
کمر انجام می‌شود. در جدول ۴-۸ نیز مقادیر کمترین ضریب تمرکز تنش یعنی نسبت کمترین تنش اصلی پس از حفاری به کمترین تنش اصلی قبل از حفاری تنها برای مقایسه آورده شده است.



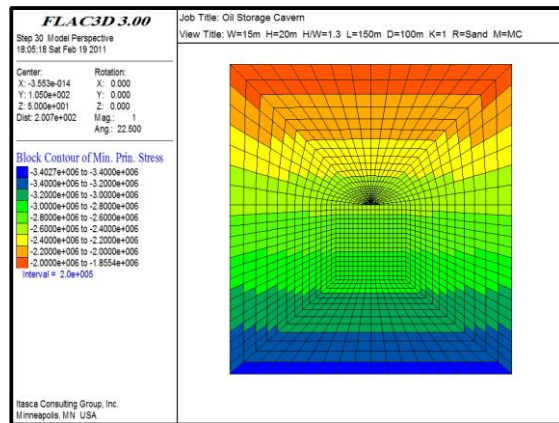
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۴-۷): (الف و ب): کانتورهای بیشترین تنش اصلی (پاسکال) قبل و بعد از حفاری در مدل ۳ مارن؛ (ج و د): کانتورهای بیشترین تنش اصلی (پاسکال) قبل و بعد از حفاری در مدل ۳ ماسه‌سنگ

جدول (۴-۷): بیشترین ضریب تمرکز تنش در جداره‌ی مغاره‌ی مارنی و ماسه‌سنگی

کف		گوشه‌ی پایین		دیواره		گوشه‌ی بالا		سقف		ضریب تمرکز تنش	مدل
								ماسه	مارن		
۰.۸۳	۰.۲۷	۲.۶۶	۱.۰۱	۱.۵۵	۰.۳۵	۲.۳۸	۰.۴۰	۱.۳۴	۰.۲۸	۱	
۰.۸۷	۰.۲۵	۲.۶۶	۰.۷۸	۱.۱۷	۰.۲۶	۲.۶۵	۰.۴۴	۱.۴۲	۰.۳۰	۲	
۰.۹۱	۰.۲۳	۳.۲۷	۰.۸۰	۰.۹۲	۰.۲۳	۲.۳۵	۰.۳۶	۱.۷۶	۰.۳۱	۳	
۰.۹۱	۰.۲۱	۳.۶۳	۰.۷۲	۰.۸۳	۰.۲۰	۲.۱۶	۰.۳۱	۱.۹۳	۰.۲۹	۴	

جدول (۴-۸): کمترین ضریب تمرکز تنش در جداره‌ی مغاره‌های مارنی و ماسه‌سنگی (علامت منفی = کشش)

کف		گوشه‌ی پایین		دیواره		گوشه‌ی بالا		سقف		ضریب تمرکز تنش	مدل
		ماسه	مارن	ماسه	مارن	ماسه	مارن	ماسه	مارن		
۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۸۷	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰	۱	
-۰/۰	۰/۰	۰/۷۹	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰	۰/۳۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۱	۲	
۰/۰۱	۰/۰	۰/۹۸	۰/۲۱	-۰/۰۱	۰/۰	۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۰۱	۳	
۰/۰۲	۰/۰	۱/۰۷	۰/۲۱	-۰/۰	۰/۰	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۱	۴	

۴-۶-۳ ضریب ایمنی

در مسائل مهندسی نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک، ضریب ایمنی نامیده می‌شود. در مباحث ژئومکانیکی نیروی مقاوم می‌تواند یکی از مقاومت‌های فشاری تک‌محوری، کششی یا برشی توده‌سنگ باشد. نیروی محرک نیز بیش‌ترین مقدار نیروی فشاری، کششی یا برشی وارده بر توده‌سنگ است. در این شیوه‌ی محاسبه، از مقادیر نیرو یا تنش در یک نقطه‌ی خاص استفاده می‌شود؛ بنابراین ضریب ایمنی حاصل به صورت موضعی قابل تعریف است. اگر نقطه‌ایی که دارای بیش‌ترین تنش در دیواره‌ی سازه است، دارای رفتار کشسان باشد، بنابراین سایر نقاط مجاور ضریب ایمنی بالاتری خواهند داشت. ضریب ایمنی ۴ در حالت فشاری و ۸ در حالت کششی، بیانگر میزان بسیار بالای پایداری و کمترین نیاز سازه به سامانه‌ی نگهداری است. در صورتی که ضریب ایمنی کمتر از ۱ بیانگر ناپایداری و نیاز به سامانه‌ی نگهداری دائمی برای پایدارسازی سازه است (Pariseau, 2007).

برای محاسبه‌ی ضریب ایمنی تعیین مقاومت و تنش مناسب، نیازمند توجهی هوشمندانه به جزئیات مقاومت و تنش توده‌سنگ و تغییرات آن‌ها در طول یک سازه است. ضریب ایمنی بر رفتار کشسان توده‌سنگ دلالت دارد و بازه‌ی تغییر شکل کشسان سنگ نیز با مقاومت آن محدود می‌شود. در شرایط کشسان تغییر شکل توده‌سنگ محدود و بازگشت‌پذیر است که چنین شرایطی به ندرت در مسائل مهندسی سنگ مشاهده می‌شود. به عنوان مثال نمک و شیل دارای رفتارهای وابسته به زمان خزش و فشارندگی هستند. همچنین سنگ‌های با فراوانی زیاد ناپیوستگی‌ها نیز می‌توانند رفتار شکل-

پذیر وابسته به زمان از خود نشان دهند (Pariseau, 2007).

در جداول ۴-۹ و ۴-۱۰ مقادیر ضریب ایمنی برای جداره‌ی مغاره‌های مارنی و ماسه‌سنگی با تغییر ابعاد مدل‌ها آورده شده است. برای قسمت‌هایی از جداره که تنش کششی در آن القا شده، ضریب ایمنی کششی نیز محاسبه شده است. منظور از ضریب محصور، برآورد ضریب ایمنی با فرض محصور بودن توده‌سنگ جداره‌ی مغار است (تحت تنش سه محوره). در این حالت مقاومت توده‌سنگ با استفاده از معیار موهر-کلمب محاسبه شده و مقدار تنش محرک نیز برابر با بیش‌ترین تنش اصلی القایی پیش‌بینی شده برای توده‌سنگ در نظر گرفته شده است. منظور از ضریب نامحصور، برآورد ضریب ایمنی با فرض نامحصور بودن توده‌سنگ جداره‌ی مغار است (تحت تنش تک‌محوره). در این حالت ضریب ایمنی از نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی توده‌سنگ به بیش‌ترین تنش اصلی القایی پیش‌بینی شده برآورد شده است.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که ضرایب محاسبه‌شده برای دیواره‌ی مغاره‌های مارنی و ماسه-سنگی در حالات محصور، نامحصور و کششی روندی صعودی را با افزایش ابعاد مدل‌ها داشته است. دلیل این امر می‌تواند کاهش مقادیر تنش‌های اصلی القایی و به دنبال آن کاهش مقادیر تمرکز تنش-های محاسبه‌شده برای دیواره با افزایش ابعاد مغارها باشد (جدول ۴-۷). از سوی دیگر ضریب ایمنی محاسبه‌شده برای سقف و کف مغاره‌های مارنی روند تقریباً ثابتی را با تغییر ابعاد مغارها نشان داده‌اند. اما در سقف و کف مغاره‌های ماسه‌سنگی، ضریب ایمنی با افزایش ابعاد روند کاهشی داشته است. دلیل این مسئله افزایش مقادیر تنش‌های اصلی القایی و همچنین افزایش تمرکز تنش‌های محاسبه‌شده در سقف و کف مغاره‌های ماسه‌سنگی با افزایش ابعاد مدل‌ها است (جدول ۴-۷).

علاوه بر این موارد در مدلسازی‌ها، مقادیر تنش‌های کششی القایی در جداره‌ی مغاره‌های ماسه‌سنگی بسیار کوچک‌تر از مقدار مقاومت کششی توده‌سنگ پیش‌بینی شده است. از این‌رو ضرایب ایمنی کششی محاسبه‌شده برای دیواره و کف مغاره‌های ماسه‌سنگی در بازه‌ی ۲ تا ۴ متغیر بوده و در کف مدل ۲ برابر با ۱۷ است؛ که نشانگر القای تنش بسیار کوچک کششی در این ناحیه است.

کانتورهای تنش کششی القایی در جداره‌ی مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی در اشکال ۴-۸: الف و ج آورده شده است. در مغارهای مارنی ناحیه‌ی تنش کششی القایی تنها در دیواره‌ی مغارهای بزرگ‌تر (مدل ۳ و ۴) بوجود آمده و ضخامت آن نیز در حدود ۱ تا ۳ متر در توده‌سنگ دیواره است. در مغارهای ماسه‌سنگی ناحیه‌ی تنش کششی القایی در دیواره و کف مغارها (به جز مدل ۱) بوجود آمده و ضخامت آن نیز در حدود ۱ تا ۲ متر در توده‌سنگ جداره است.

جدول (۹-۴): مقادیر ضریب ایمنی محاسبه‌شده در سقف، دیواره و کف مغارهای مارنی

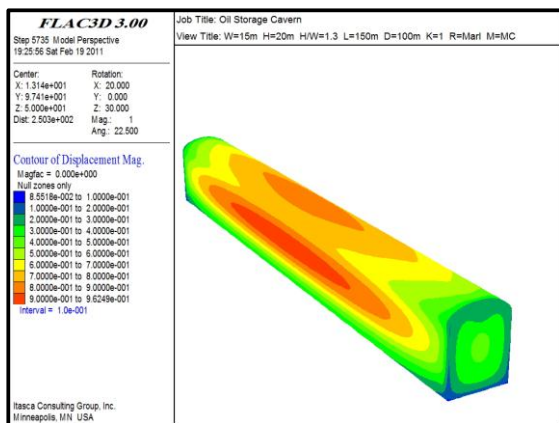
مدل	ضریب ایمنی (مارن)			سقف			دیواره			کف	
	محصور	نامحصور	کششی	محصور	نامحصور	کششی	محصور	نامحصور	کششی	محصور	کششی
۱	۱	۰٫۳۲	-	۱	۰٫۲۳	-	۱	۰٫۲۸	۱	۰٫۲۸	-
۲	۱	۰٫۳۰	-	۱٫۰۱	۰٫۳۲	-	۱٫۰۱	۰٫۳۲	۱٫۰۱	۰٫۳۲	-
۳	۱	۰٫۲۹	-	۱٫۰۵	۰٫۳۴	۱٫۶۷	۱	۰٫۳۲	۱	۰٫۳۲	-
۴	۱	۰٫۳۱	-	۱٫۱۳	۰٫۳۸	۲٫۰۸	۱	۰٫۳۲	۱	۰٫۳۲	-

جدول (۱۰-۴): مقادیر ضریب ایمنی محاسبه‌شده در سقف، دیواره و کف مغارهای ماسه‌سنگی

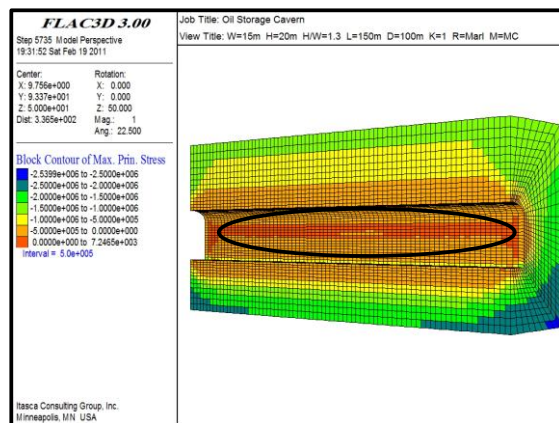
مدل	ضریب ایمنی (ماسه)			سقف			دیواره			کف	
	محصور	نامحصور	کششی	محصور	نامحصور	کششی	محصور	نامحصور	کششی	محصور	کششی
۱	۱٫۴۶	۰٫۹۲	-	۱٫۳۸	۰٫۷۱	-	۱٫۸۶	۱٫۲۷	۱٫۸۶	۱٫۲۷	-
۲	۱٫۳۷	۰٫۸۶	-	۱٫۳۳	۰٫۹۹	-	۱٫۶۴	۱٫۲۷	۱٫۶۴	۱٫۲۷	۱۶٫۹۹
۳	۱٫۲۸	۰٫۷۰	-	۱٫۴۸	۱٫۱۸	۲٫۴۴	۱٫۵۴	۱٫۱۱	۳٫۴۸	۱٫۱۱	۳٫۴۸
۴	۱٫۱۱	۰٫۶۳	-	۱٫۶۲	۱٫۲۵	۳٫۹۴	۱٫۵۱	۱٫۰۳	۲٫۵۱	۱٫۰۳	۲٫۵۱

در تحلیل‌های انجام‌شده، به نظر می‌رسد که شاخص ضریب ایمنی نمی‌تواند معیار مناسبی برای برآورد پایداری مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی باشد. همان‌طور که اشاره شد، با افزایش ابعاد مغارها ضریب ایمنی دیواره روند افزایشی داشته و بدین ترتیب مغارها پایدارتر شده‌اند. اما در سایر تحلیل‌ها، بیش‌ترین میزان آزادسازی تنش‌های افقی، شعاع ناحیه‌ی تسلیم و تغییر شکل‌ها، در دیواره‌ی مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی رخ داده است (جدول ۴-۵؛ اشکال ۴-۵ و ۴-۸: ب و د). علاوه بر این موارد، با افزایش ابعاد مغارها، مقادیر جابجایی‌ها افزایش و شعاع ناحیه‌ی تسلیم تشکیل‌شده در اطراف مغارها

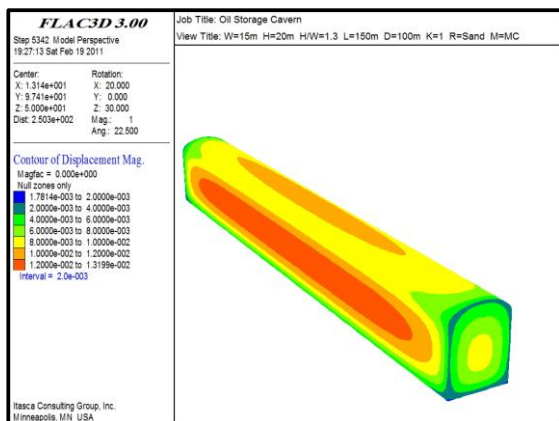
نیز گسترش یافته است. در مجموع این موارد نمادهای روشنی از ناپایداری مغارها هستند. با توجه به توضیحات بیان شده، بهتر است که برای سنجش وضعیت این مغارها و بررسی رفتار آنها پس از حد تسلیم توده سنگ، از شاخص‌های جابجایی به جای شاخص تنش استفاده شود تا برآورد مناسب‌تری از میزان پایداری یا ناپایداری مغارها بدست آید.



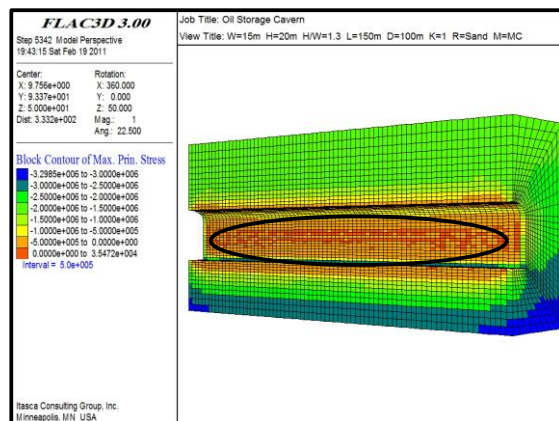
(ب)



(الف)



(د)



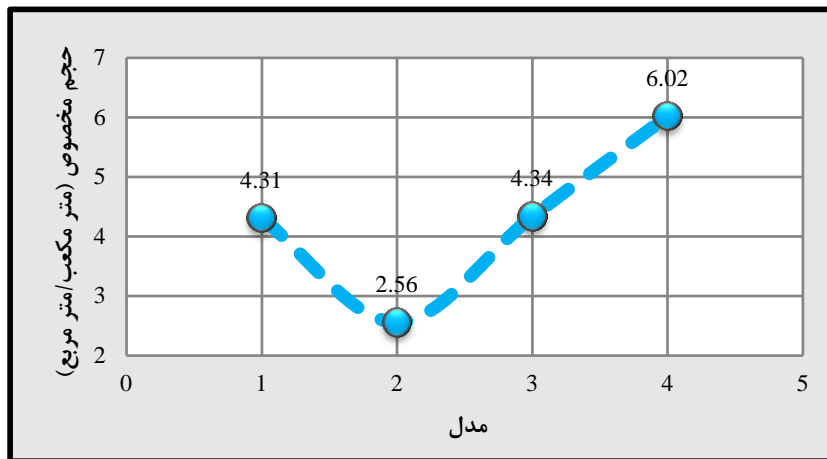
(ج)

شکل (۴-۸): کانتورهای کمترین تنش اصلی (پاسکال) در جداره‌ی مغارهای مارنی (الف) و ماسه‌سنگی (ج) و کانتورهای تغییر شکل (متر) در جداره‌ی مغارهای مارنی (ب) و ماسه‌سنگی (د)؛ ناحیه‌ی مشخص شده بیانگر ناحیه‌ی تحت تنش کششی در دیواره‌ی مغار است.

۷-۴ انتخاب سطح مقطع مغارهای ذخیره‌سازی گناوه

به دلایل فنی، انتخاب مقاطع بزرگ‌تر برای مغارهای ذخیره‌سازی مطلوب‌تر هستند. در مقاطع کوچک‌تر با نصب تجهیزات و سامانه‌ی مهار نشن مورد نیاز و در نتیجه کاهش حجم درونی، نیاز به

تعداد مغارهای بیش‌تر یا مغارهای با طول بیش‌تر برای تأمین ظرفیت مورد نیاز است. از سوی دیگر با افزایش ابعاد مغارها، حجم مخصوص آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نمودار ۴-۵ تغییرات حجم مخصوص مدل ۴ مورد نظر آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در یک طول ثابت (۵۰۰ متر)، با افزایش ابعاد، حجم مخصوص مغارها افزایش یافته و نیاز به پوشش درونی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب در هزینه‌های ساخت، نصب و نگهداشت پوشش صرفه‌جویی می‌شود. با افزایش ۳۰ درصدی ابعاد مغارها از مدل ۲ به ۳، حجم مخصوص در حدود ۷۰ درصد و با افزایش ۱۵ درصدی ابعاد مغارها از مدل ۳ به ۴، حجم مخصوص در حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.



نمودار (۴-۵): تغییرات حجم مخصوص مغار با افزایش سطح مقطع در طول ثابت ۵۰۰ متر

از سوی دیگر با افزایش ابعاد، جابجایی‌ها و ناحیه‌ی تسلیم تشکیل‌شده در اطراف مغارها افزایش یافته و در نتیجه سامانه‌ی نگهداری با استحکام و ظرفیت باربری بیش‌تری مورد نیاز است. علاوه بر این با افزایش طول مغارها، نگهداشت آن مشکل‌تر شده و نیاز به مغار ذخیره‌ی بزرگ‌تر برای جمع‌آوری رسوبات یا سایر عملیات نگهداشت تأسیسات ذخیره‌سازی است. به عبارت دیگر در یک مقطع ثابت با افزایش طول، حجم مخصوص ثابت و سطح بزرگ‌تری برای رسوب نفت خام وجود دارد. بنابراین ابعاد و طول مغارها باید پس از بررسی‌های دقیق فنی و اقتصادی با مد نظر قرار دادن خواص نفت خام، ماهیت توده‌سنگ و سایر عوامل فنی - عملیاتی مانند طراحی پوشش و سامانه‌ی نگهداری

مغارها به دقت تعیین شوند.

با مد نظر قرار دادن تحلیل‌های انجام‌شده و نتایج آن‌ها، مغار با عرض ۱۵ متر و ارتفاع ۲۰ متر برای ذخیره‌سازی نفت خام در بندر گناوه انتخاب شده است. در مقایسه‌ی مدل ۱ و ۳، در صورتی که مغار کاملاً پر نباشد، فضای خالی بیش‌تر و از سوی دیگر فضای بزرگ‌تری نیز برای رسوب نفت خام وجود دارد (عرض بزرگ‌تر مغار). اما در صورتی که تنش‌های افقی بزرگی در ناحیه‌ی گناوه وجود داشته باشد، از دیدگاه ژئومکانیکی مدل با عرض بزرگ‌تر مناسب‌تر است. از سوی دیگر در حالت‌های مارن و ماسه‌سنگ، بیش‌ترین جابجایی‌های مشاهده‌شده برای مدل ۱ در سقف مغارها و به ترتیب برابر با ۱۰/۱۶ و ۱/۵۵ سانتی‌متر است. همچنین برای مدل ۳ نیز در حالت‌های مارن و ماسه‌سنگ، بیش‌ترین جابجایی‌های مشاهده‌شده در دیواره‌ی مغارها و برابر با ۹۳/۳۲ و ۱/۳۱ سانتی‌متر است. بنابراین بیش‌ترین جابجایی‌های مدل ۳ در حدود ۸ درصد برای مارن و ۱۵ درصد برای ماسه‌سنگ کمتر از جابجایی‌های مدل ۱ برآورد شده است. دلیل انتخاب نشدن مدل ۴ نیز ناپایداری و گسترش زیاد ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارهای مارنی است.

۸-۴ طراحی فاصله‌ی بین مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام

در تأسیسات سطحی و زیرزمینی، تمایل به قرارگیری سازه‌ها با نزدیک‌ترین فاصله در کنار یکدیگر است. از سوی دیگر در سازه‌های زیرزمینی، فاصله‌ی بیش‌تر، سبب کاهش اندرکنش و در نتیجه کاهش تمرکز تنش در اطراف سازه‌ها می‌شود. تمرکز تنش ایجادشده در یک ردیف از سازه‌های مجاور به عواملی مانند وضعیت تنش‌های برجا، فاصله‌داری، جهت قرارگیری هر مقطع، جهت قرارگیری ردیف سازه‌ها و تعداد آن‌ها بستگی دارد (Pariseau, 2007).

در طراحی استاتیکی سازه‌های مجاور، فاصله‌ی دیوار به دیوار آن‌ها باید از یک برابر عرض هر سازه بیش‌تر باشد تا میزان اندرکنش سازه‌های مجاور کاهش یافته و تمرکز تنش به وضعیت یک سازه‌ی تنها باز گردد. در صورتی که تعداد سازه‌ها از ۵ بیش‌تر شود، اضافه شدن یک یا چند سازه‌ی

جدید تأثیر ملموسی بر پایداری سازه‌ی میانی نخواهد داشت. علاوه بر این مناسب‌ترین جهت قرارگیری سازه‌ها حالتی است که محور ردیف سازه‌ها موازی با جهت بزرگ‌ترین تنش بر جای ناحیه در نظر گرفته شده باشد (Pariseau, 2007).

تأسیسات متداول ذخیره‌سازی نفت خام، شامل چندین مغار موازی با ابعاد مشابه برای تأمین ظرفیت مورد نیاز است. در مرحله‌ی اول، برای کاهش اندرکنش سازه‌های مجاور و پایداری ژئومکانیکی آن‌ها، فاصله‌ی قرارگیری مغارها بوسیله‌ی تحلیل‌های استاتیکی تعیین می‌شود. سپس در مراحل بعدی با توجه به قوانین ایمنی در برابر آتش‌سوزی و ملاحظات پدافندی، فاصله‌ی طراحی شده می‌تواند بوسیله‌ی تحلیل‌های دینامیکی تدقیق شود. در صورت استفاده از پرده‌ی آب برای مهار نشت نفت خام، شرایط آب‌شناسی ناحیه نیز یکی از فاکتورهای طراحی فاصله‌ی بین مغارها است.

برای تعیین فاصله‌ی بین مغارهای ذخیره‌سازی گناوه، فرض شده است که مغارها به طور کامل در مارن قرار گرفته‌اند (یعنی بحرانی‌ترین شرایط). از آن جا که در این مرحله از پژوهش هنوز سامانه‌ی نگهداری مغارها طراحی نشده و بیش‌ترین اندرکنش بین مغارهای همسایه نیز با اضافه شدن مغارهای دوم و سوم رخ می‌دهد؛ از این‌رو در این بخش تنها به مدلسازی ۲ مغار ذخیره‌سازی بدون فشار ذخیره‌سازی پرداخته شده است. پس از تعیین فاصله‌ی مغارها، وضعیت مغارهای دارای فشار ذخیره‌سازی نیز تحلیل شده است.

۴-۸-۱ مغارهای بدون فشار ذخیره‌سازی

برای تعیین فاصله‌ی ایمن بین مغارها با استفاده از روش سعی و خطا، فاصله‌داری از یک برابر عرض مغار تا چندین برابر عرض آن تغییر داده شده است. حفر مغارها نیز به صورت تک‌مرحله‌ای و هم‌زمان انجام شده است. در حالت مغار تنها، جایجایی‌های سقف و دیواره، برابر با ۸۴ و ۹۳ سانتی‌متر و شعاع ناحیه‌ی تسلیم در این نواحی برابر با ۱۲ و ۱۶/۵ متر است. بنابراین میزان همگرایی، بالا و مغار ناپایدار است. وجود نواحی فعال تسلیم در سقف، کف و دیواره نیز، وقوع شکست در جداره‌ی مغار را پیش‌بینی

می‌نماید. از این‌رو، کمترین فاصله‌ی بین مغارها باید از ۳۳ متر بیش‌تر باشد تا از تلاقی نواحی تسلیم پیشگیری شود. تحلیل‌های انجام‌شده برای فاصله‌داری ۱۵ و ۳۰ متر نیز ناپایداری و ریزش مغارها را اثبات می‌کند. بنابراین کمترین فاصله‌ی مغارها برابر با ۴۵ متر در نظر گرفته شده است. در این فاصله‌داری مقادیر تمرکز تنش در جداره‌ی مغار تقریباً به مقادیر اولیه‌ی خود بازگشته اما مقدار تغییر شکل‌ها در سقف و دیواره‌ی مغار به میزان ۲۶ و ۳۳ درصد افزایش و در کف مغار به میزان ۶ درصد کاهش یافته است (جدول ۴-۱۱).

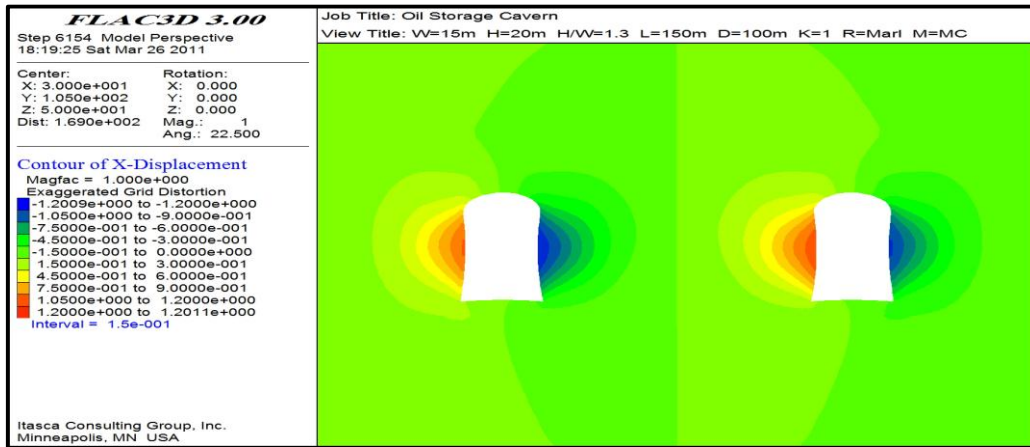
جدول (۴-۱۱): نتایج حاصل از مدل‌سازی مغارهای مجاور و مغار تنها (فاصله‌داری ۳ برابر عرض مغار = ۴۵ متر)

تعداد مغارها		سقف		گوشه‌ی بالا		دیواره		گوشه‌ی پایین		کف	
		۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱
پارامتر		۰٫۲۹	۰٫۳۱	۰٫۳۴	۰٫۳۶	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۰٫۷۷	۰٫۸۰	۰٫۲۳	۰٫۲۳
تمرکز تنش		۱۰۶٫۱	۸۴٫۲۲	۱۰۱٫۴	۷۴٫۸۴	۱۲۴	۹۳٫۳۲	۳۲٫۰۱	۳۲٫۳۵	۴۸٫۵۳	۵۱٫۸
تغییر شکل (سانتی‌متر)											

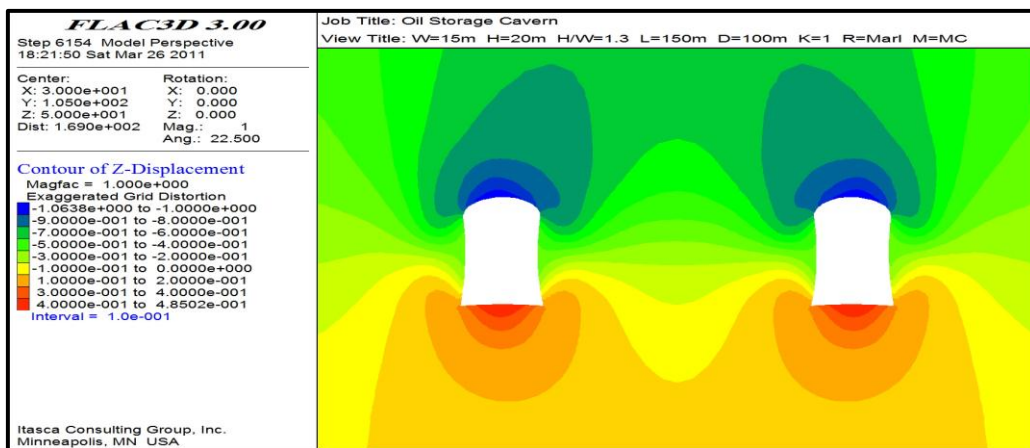
در جدول ۴-۱۲ و مجموعه اشکال ۴-۹ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دو مغار مجاور با فاصله‌داری ۴۵ متر، به همراه درصد تغییرات جابجایی‌ها و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارها آورده شده است. منظور از دیواره‌ی درونی، دیواره‌ی مجاور بین ۲ مغار است. در این حالت بیش‌ترین و کمترین میزان تغییرات جابجایی برای دیواره‌ی درونی و کف مغارها پیش‌بینی شده است. به عبارت دیگر جابجایی افقی دیواره‌های درونی، دارای ۲۷ درصد افزایش و جابجایی قائم کف دارای ۶ درصد کاهش نسبت به حالت مغار تنها است. روندی مشابه نیز در مورد گسترش ناحیه‌ی تسلیم برشی برای دیواره‌های درونی و کف مغارها مشاهده شده است. شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در دیواره‌ی مغار در حدود ۳۶ درصد افزایش و در کف مغار در حدود ۹ درصد کاهش داشته است. در حالی که شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در کف و دیواره‌ی بیرونی مغارها دارای ۵۰ و ۲۲ درصد افزایش بوده و در دیواره‌ی درونی مغارها تغییری نداشته است. همچنین مقدار تنش کششی القایی در دیواره‌ی مغارها به میزان ۳۰ درصد کاهش یافته و به ۳٫۵ کیلو پاسکال رسیده است. در حالت مغار تنها تنش کششی القایی در دیواره‌ی مغار در حدود ۵ کیلو پاسکال بوده است.

جدول (۴-۱۲): میزان تغییرات جابجایی افقی و قائم و شعاع تسلیم در جداره‌ی مغارها در مقایسه با مغار تنها

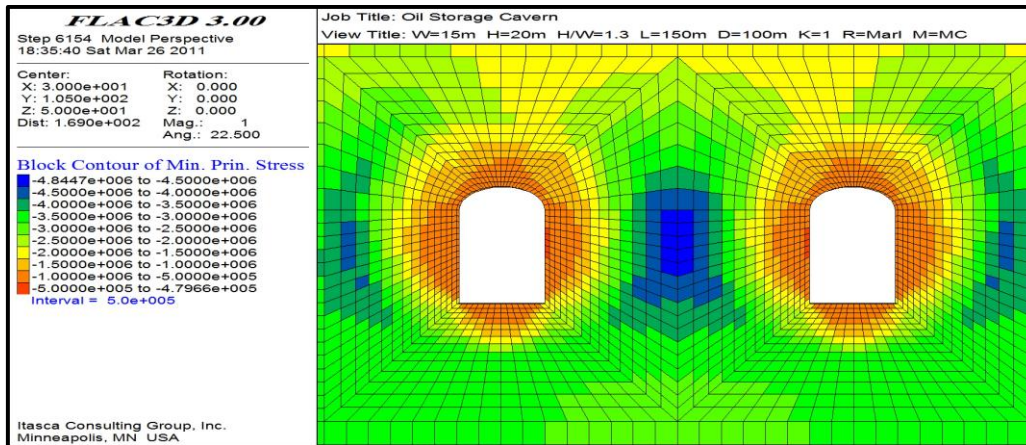
کف		دیواره‌ی بیرونی		دیواره‌ی درونی		سقف		تعداد مغارها پارامتر
۲	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۱	
۴۸,۵	۵۱,۸۱	۱۰۶,۹	۹۳,۲۴	۱۱۸,۶	۹۳,۲۴	۱۰۶,۱	۸۴,۳۴	جابجایی (سانتی‌متر)
-٪۰.۶		٪۰.۱۵		٪۰.۲۷		٪۰.۲۶		درصد افزایش
۱۰	۱۱	۱۹,۵	۱۶,۵	۲۲,۵	۱۶,۵	۱۵	۱۲	شعاع تسلیم برشی (متر)
-٪۰.۹		٪۰.۱۸		٪۰.۳۶		٪۰.۲۵		درصد افزایش
۳	۲	۵,۵	۴,۵	۴,۵	۴,۵	۲	۲	شعاع تسلیم کششی (متر)
٪۰.۵۰		٪۰.۲۲		٪۰		٪۰		درصد افزایش



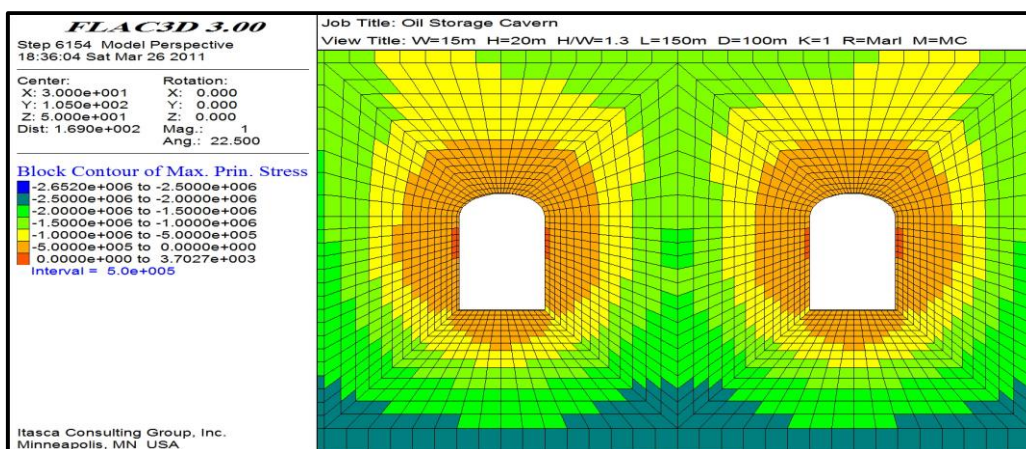
(الف)



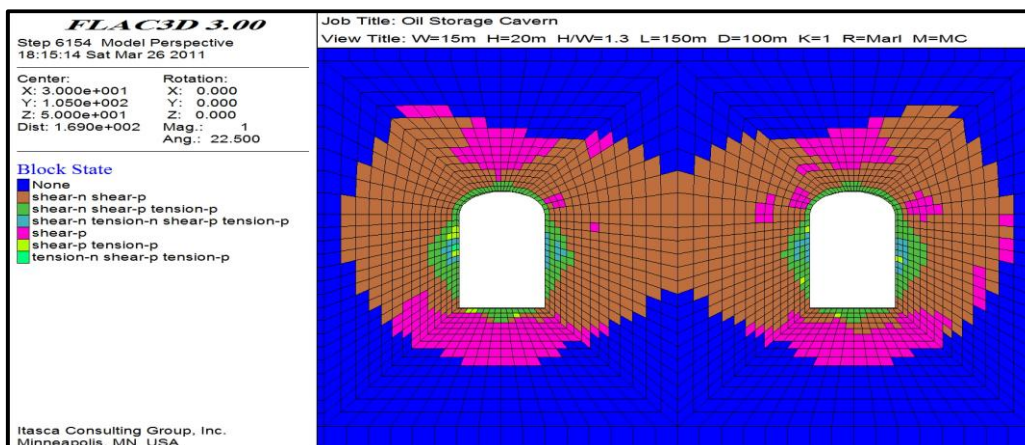
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل (۴-۹): بررسی وضعیت پایداری مغاره‌های مارنی (بدون فشار درونی) با فاصله‌داری ۳ برابر عرض مغار = ۴۵ متر (الف): کانتورهای جابجایی افقی (متر)؛ (ب): کانتورهای جابجایی قائم (متر)؛ (ج): کانتورهای بیش‌ترین تنش اصلی (پاسکال)؛ (د): کانتورهای کمترین تنش اصلی (پاسکال)؛ (ه): وضعیت نواحی تسلیم‌شده در اطراف مغارها

۲-۸-۴ مغاره‌های دارای فشار ذخیره‌سازی نفت خام

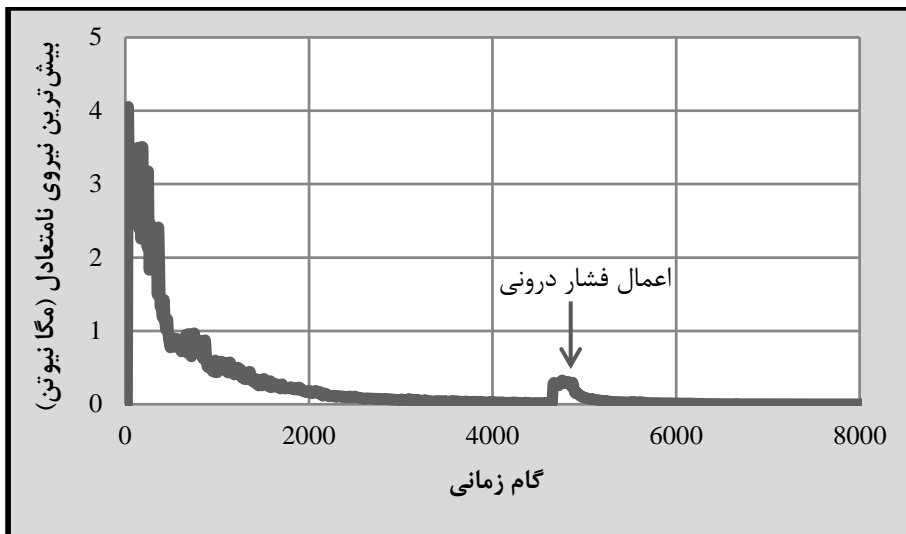
نفتی که قرار است در مغاره‌های بندر گناوه ذخیره شود، نفت صادراتی سنگین و سبک ایران با وزن

مخصوص ۸۸۰ و ۸۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. برای مدل‌سازی فشار درونی مغارها، وزن مخصوص نفت سنگین ایران بکار برده شده و مغارها نیز در حالت کاملاً پر مدل‌سازی شده‌اند. بنابراین بیش‌ترین فشار ذخیره‌سازی در کف مغارها برابر با ۰٫۱۷ مگا پاسکال و گرادیان تغییرات آن برابر با ۸۶۳۰ پاسکال بر متر است. برای وارد کردن فشار ذخیره‌سازی، در ابتدا مغارهای خالی به تعادل مکانیکی رسیده‌اند، سپس فشار سیال به جداره‌ی مغارها اعمال و مدل دوباره به تعادل رسانده شده است.

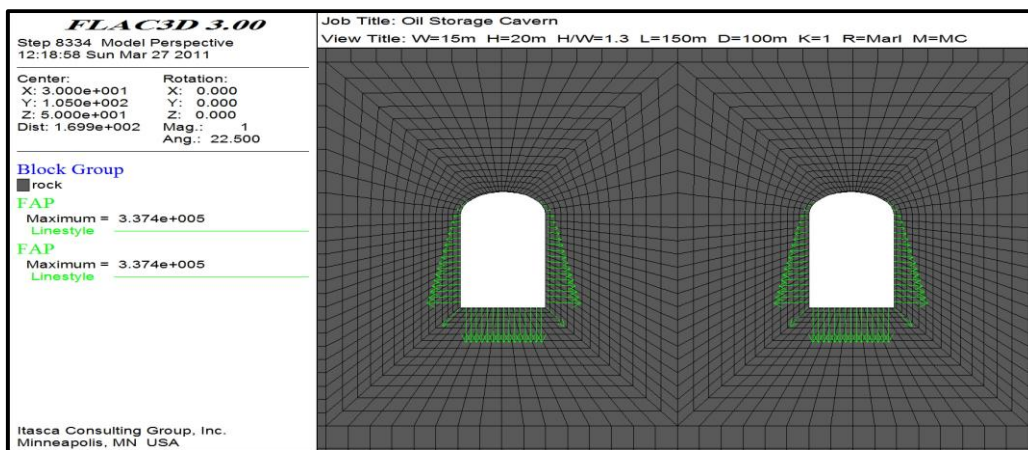
با اعمال فشار ذخیره‌سازی به جداره‌ی مغارها، وضعیت جابجایی‌های سقف و دیواره‌ی مغارها تغییر چندانی نمی‌کند و تنها در کف مغارها، جابجایی قائم به میزان ۴ درصد کاهش یافته است. با توجه به این‌که فشار ذخیره‌سازی در کف مغار در حدود ۷ درصد فشار روباره است (نمودار ۴-۶) و توده‌سنگ دربرگیرنده نیز کرنش شکل‌پذیر قابل توجهی را انجام داده است، بنابراین فشار ذخیره‌سازی نفت خام توانایی کاهش جابجایی‌های جداره‌ی مغار را ندارد. بیش‌ترین تنش اصلی نیز در سقف مغار به میزان ۶ درصد کاهش اما در دیواره و کف مغار به میزان ۶ و ۷ درصد افزایش یافته است. از سوی دیگر کمترین تنش اصلی در سقف مغار تنها به میزان ۹ درصد کاهش یافته اما در دیواره و کف مغار تا حدود زیادی افزایش یافته و ناحیه‌ی تحت تنش کششی در دیواره‌ی مغارها به طور کامل حذف شده است. همچنین با مد نظر قرار دادن فشار درونی، گسترش ناحیه‌ی تسلیم کششی و برشی در اطراف مغارها ثابت مانده، اما نواحی فعال تسلیم کششی و برشی تقریباً به طور کامل حذف شده و میزان تنش در توده‌سنگ به وضعیت کشسان بازگشته است (جدول ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۰).

جدول (۴-۱۳): مقایسه‌ی وضعیت پایداری مغارهای پر و خالی

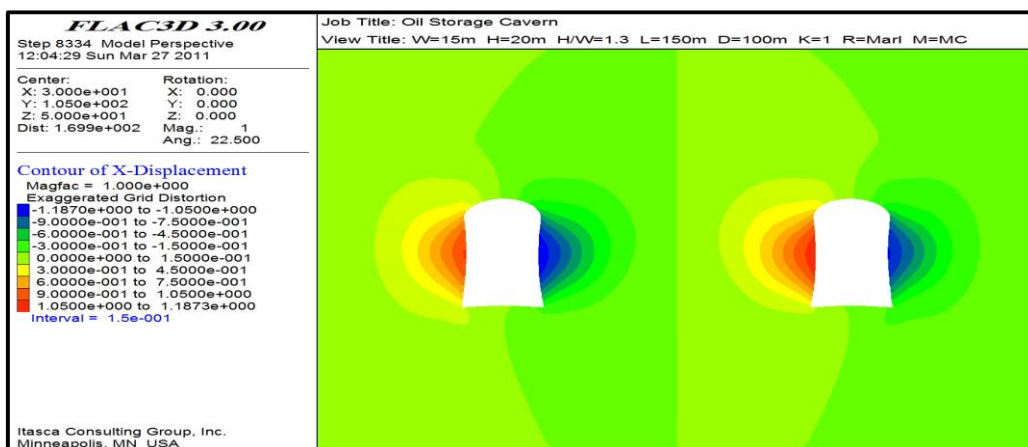
کف		دیواره		سقف		وضعیت مغار
پر	خالی	پر	خالی	پر	خالی	
۴۶٫۶۶	۴۸٫۵	۱۱۷٫۲	۱۱۸٫۶	۱۰۶٫۴	۱۰۶٫۱	جابجایی (سانتی‌متر)
	-%۴		-%۱		%۰	درصد افزایش
۰٫۵۸۲	۰٫۵۴۲	۰٫۵۲۴	۰٫۴۹۴	۰٫۵۳۱	۰٫۵۶۸	بیش‌ترین تنش اصلی (مگا پاسکال)
	%۷		%۶		-%۶	درصد افزایش
۰٫۱۷۸	۰	۰٫۱۰۱	۰	۰٫۱۲۷	۰٫۱۳۹	کمترین تنش اصلی (مگا پاسکال)
	-		-		-%۹	درصد افزایش



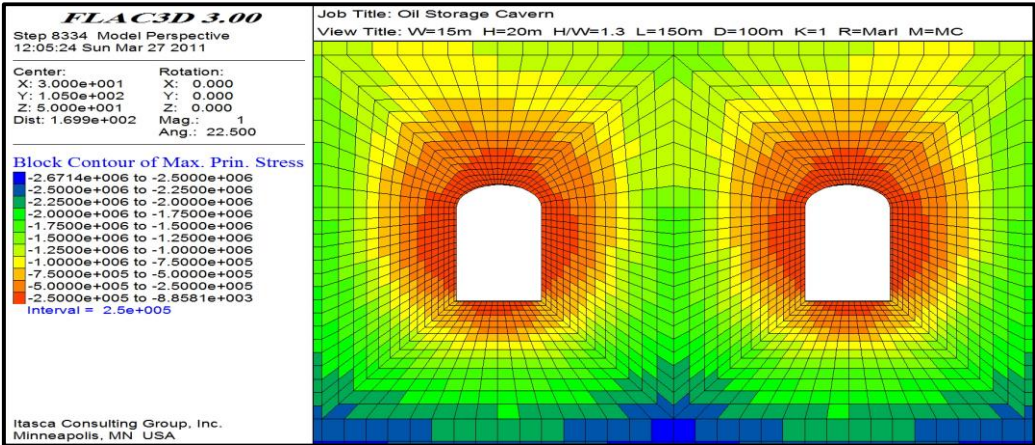
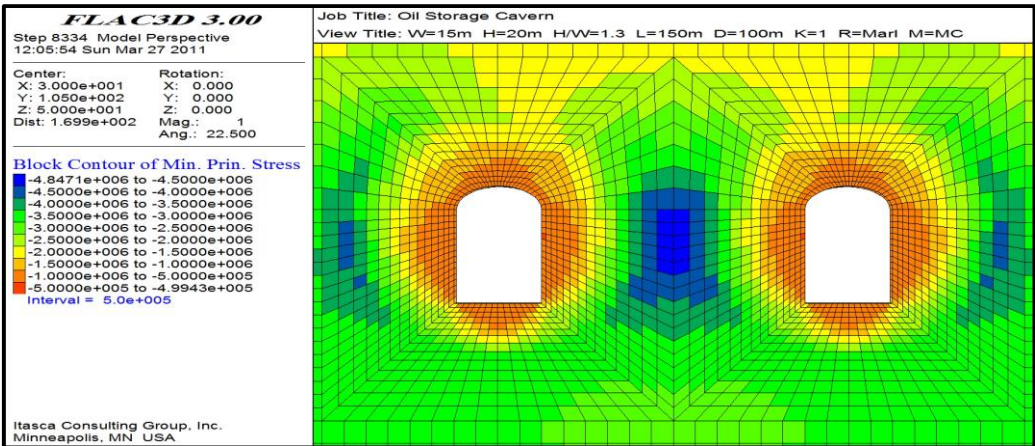
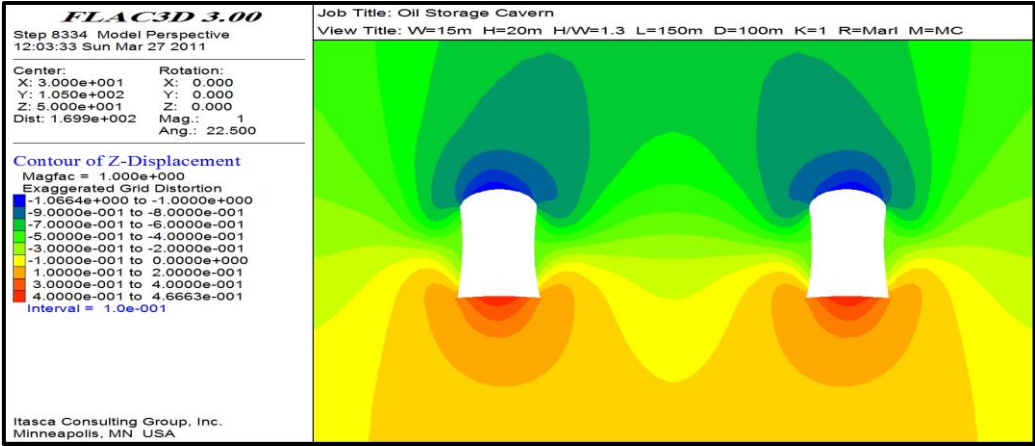
نمودار (۴-۶): تغییرات بیش ترین نیروی نامتعادل در مغارهای دارای فشار ذخیره سازی

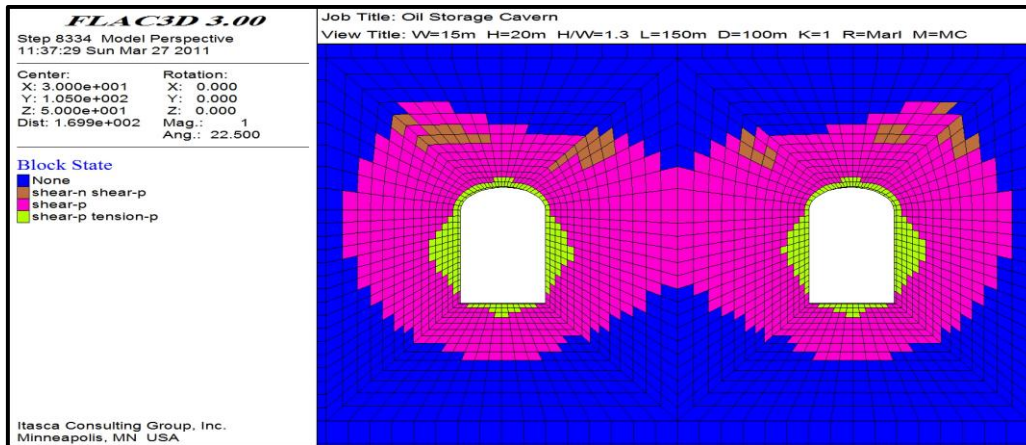


(الف)



(ب)

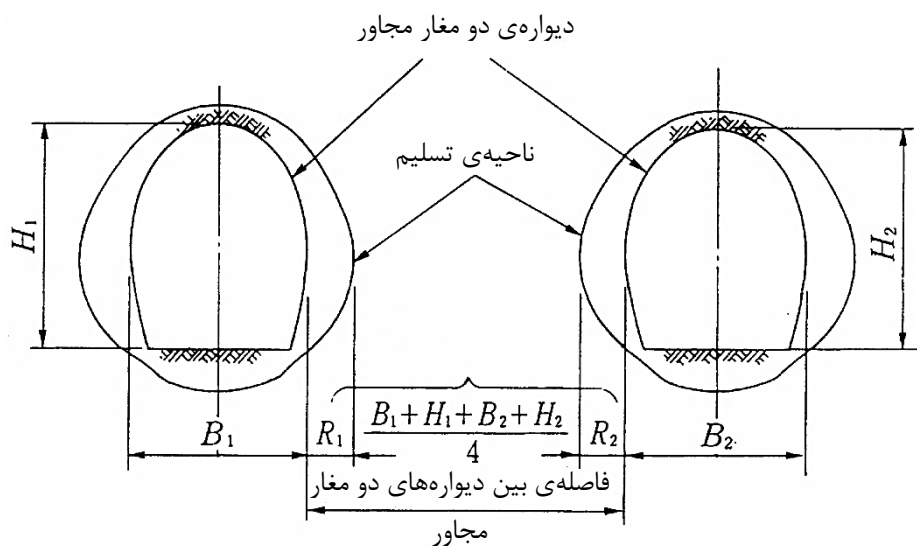




(و)

شکل (۴-۱۰): بررسی وضعیت پایداری مغارهای مارنی (دارای فشار درونی) با فاصله‌داری ۳ برابر عرض مغار = ۴۵ متر (الف): اعمال فشار ذخیره‌سازی = ۰٫۱۷ مگا پاسکال؛ (ب): کانتورهای جابجایی افقی (متر)؛ (ج): کانتورهای جابجایی قائم (متر)؛ (د): کانتورهای بیش‌ترین تنش اصلی (پاسکال)؛ (ه): کانتورهای کمترین تنش اصلی (پاسکال)؛ (و): وضعیت نواحی تسلیم شده در اطراف مغارها

در نهایت اگر حریم ایمنی مورد نیاز برای موارد پیش‌بینی‌نشده مانند انفجار نیز مد نظر قرار گیرد، بیش‌ترین فاصله‌ی قرارگیری مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام را می‌توان با بکارگیری تحلیل‌های دینامیکی و رابطه‌ی ۴-۱ بدست آورد (شکل ۴-۱۱)؛ (Tezuka & Seoka, 2003). در این صورت بیش‌ترین فاصله‌ی قرارگیری مغارهای گناوه می‌تواند تا حدود ۵۰ متر نیز افزایش یابد.



شکل (۴-۱۱): تعیین بیش‌ترین فاصله‌داری مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام (Tezuka & Seoka, 2003)

$$L = \frac{B_1 + H_1 + B_2 + H_2}{4} + R_1 + R_2 \quad (۴-۱)$$

L : فاصله‌ی بین دیواره‌های دو مغار مجاور

B_x : عرض مغارها

H_x : ارتفاع مغارها

R_x : شعاع ناحیه‌ی تسلیم در اطراف هر مغار

۹-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل بخشی از طراحی مفهومی مغارهای ذخیره‌سازی گناوه یعنی طراحی هندسی مغارها انجام شده است. بدین منظور مغارهایی با ابعاد مختلف در دو حالت توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مارن و ماسه‌سنگ مدلسازی و تحلیل شده است. در صورتی که وضعیت چینه‌شناسی ساختگاه گناوه در دسترس قرار گیرد، می‌توان توالی لایه‌های مارنی و ماسه‌سنگی را در تحلیل پیوسته مدلسازی نمود. بدیهی است که این حالت با شرایط واقعی تطابق بیشتری خواهد داشت. در مرحله‌ی طراحی مفهومی سطح مقطع مغارها، به صورت دی‌شکل در نظر گرفته شده است. در نتیجه بیش‌ترین جابجایی‌ها و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در دیواره‌ی بلند مغارها رخ داده است. در مرحله‌ی طراحی پایه شکل مغارها با مد نظر قرار دادن میدان تنش ناحیه و شرایط ناپیوستگی‌ها، به منظور بهبود شرایط پایداری می‌تواند به نعل اسبی یا هر شکل مناسب دیگر تغییر داده شود. ابعاد تعیین‌شده برای مغارهای گناوه ۱۵ متر عرض و ۲۰ متر ارتفاع است. طول مغارها نیز برابر با ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده است. عمق قرارگیری مغارها ۱۰۰ متر و فاصله‌داری آن‌ها در بازه‌ی تقریبی ۴۰ تا ۵۰ متر تعیین شده است.

تحلیل‌های انجام‌شده این‌طور نشان می‌دهند که با افزایش ابعاد، جابجایی‌های جداره و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغارها و به عبارت دیگر ناپایداری آن‌ها افزایش می‌یابد. هر چه توده‌سنگ مورد بررسی نیز سست‌تر باشد، این مطلب شدت بیشتری پیدا می‌کند. به عنوان مثال در مقایسه‌ی مدل‌های ۳ و ۴ با افزایش ابعاد، جابجایی‌های سقف، دیواره و کف مغارهای مارنی در حدود ۵۴، ۶۸ و ۵۳ درصد و جابجایی‌های سقف، دیواره و کف مغارهای ماسه‌سنگی در

حدود ۲۵، ۵۳ و ۵۳ درصد افزایش می‌یابد. اما برای احداث مغارهای ذخیره‌سازی، ابعاد بزرگ‌تر ارجحیت بیش‌تری دارد و ناپایداری‌های رخ داده را می‌توان با بکارگیری روش‌های ویژه‌ی حفاری و نصب سامانه‌ی نگهداری مناسب مهار نمود. در مجموع با بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های عددی، به نظر می‌رسد که مغارهای مارنی در شرایط ناپایدار و مغارهای ماسه‌سنگی در وضعیت پایداری نسبی قرار دارند. البته وضعیت پایداری مغارها با استفاده از شاخص‌های جابجایی در فصل ششم به دقت تحلیل خواهد شد. همان‌طور که توضیح داده شد، شاخص تنش و ضریب ایمنی روند مناسبی را در تحلیل‌ها نشان نداده و نمی‌تواند معیار درستی برای برآورد پایداری مغارهای ذخیره‌سازی گناوه باشد؛ اما در هر صورت در فصل پنجم روند تغییرات ضریب ایمنی نیز در کنار سایر شاخص‌ها در تحلیل‌های پارامتریک و حساسیت بررسی خواهد شد.

با توجه به این‌که مغارهای گناوه برای مهار نشت خام باید دارای پوشش فولادی باشند، بنابراین نفت ذخیره‌شده در محیطی کاملاً بسته قرار گرفته و اندرکنشی با محیط اطراف نخواهد داشت. از این‌رو، این شیوه‌ی ذخیره‌سازی از دیدگاه مباحث زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد. از دیدگاه ژئومکانیکی، در صورتی که فشار سیال ذخیره‌شده مقدار بالایی داشته باشد، لایه‌ی ضخیمی از بتن برای انتقال فشار درونی به توده‌سنگ دربرگیرنده پس از پوشش فولادی نصب می‌شود. در رابطه با نفت خام، فشار سیال در مقایسه با فشار روباره و میدان تنش برجا ناچیز به نظر می‌رسد؛ اما برای اطمینان از بی‌تأثیر بودن فشار ذخیره‌سازی بر وضعیت پایداری مغارها، در تعیین فاصله‌داری مغارها این پارامتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نیز نشان می‌دهد که فشار ذخیره‌سازی تأثیر چندانی بر میزان جابجایی‌ها و بیش‌ترین تنش اصلی ناحیه در مقایسه با حالت بدون فشار ذخیره‌سازی ندارد؛ اما بیش‌تر نواحی فعال تسلیم را در توده‌سنگ دربرگیرنده و تنش کشش القایی بر روی جداره‌ی مغارها را حذف نموده است.

فصل پنجم:

تخلیٰ پارامتریک و تخلیٰ حساسیت

۵-۱ مقدمه

همان‌طور که در فصل‌های پیشین نیز توضیح داده شد، عدم قطعیت در برآورد شرایط توده‌سنگ یکی از مهم‌ترین چالش‌های طراحی سازه‌های زیرزمینی است. از آن‌جا که این پژوهش در مرحله‌ی مطالعات اولیه و امکان‌سنجی است، در عمل امکان دسترسی به داده‌های حاصل از آزمایش‌های برجا یا آزمایشگاهی (مطالعات تکمیلی) مقدور نیست. از این‌رو طبیعی است که پارامترهای بکار برده‌شده در طراحی‌ها، مدلسازی‌های انجام‌شده و نتایج حاصل از آن‌ها با درصدی از عدم قطعیت همراه باشد. از این‌رو در این فصل برای بررسی تأثیری که هر پارامتر می‌تواند بر میزان پایداری مغارها داشته باشد، تحلیلی بر حساسیت پارامترهای توده‌سنگ و تعدادی از پارامترهای طراحی و عملیاتی مهم‌تر انجام شده است. با توجه به این‌که در طراحی هندسی فرض شده است که مغارها در توده‌سنگ مارنی یا ماسه‌سنگی قرار می‌گیرند، برای انجام این تحلیل‌ها نیز همین فرض در نظر گرفته شده است. پارامترهای توده‌سنگ شامل مقاومت برشی؛ مقاومت کششی؛ مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش افقی به قائم و پارامترهای طراحی و عملیاتی شامل عمق قرارگیری؛ فشار ذخیره‌سازی و نسبت ابعاد مغارها هستند.

برای انجام تحلیل پارامتریک و تحلیل حساسیت هر پارامتر در بازه‌ی پیش‌بینی‌شده یا متداول خود تغییر داده شده و با ثابت ماندن سایر پارامترها تغییرات رخ داده در مدل‌ها بررسی شده است. مهم‌ترین نتایجی که در تحلیل‌ها بررسی شده‌اند، شاخص جابجایی، گسترش ناحیه‌ی تسلیم و شاخص

تنش است. در تحلیل‌های انجام‌شده، بازه‌ی تغییرات هر پارامتر با دیگری کاملاً متفاوت است؛ به عنوان مثال بازه‌ی تغییرات پارامترهای مارن بین ۱۷+ تا ۲۰۰+ درصد است. همچنین نتایج حاصل نیز روندی غیر خطی را نشان داده‌اند. بنابراین برای جمع‌بندی و مقایسه‌ی نتایج با همدیگر، در ابتدا با استفاده از معادلات بدست آمده، نمودار خطی هر کدام از نتایج در بازه‌ی ۲۰- تا ۲۰+ رسم شده و شیب خط حاصل، حساس‌ترین پارامترها را تعیین می‌کند.

۲-۵ تحلیل پارامتریک مارن

در این بخش برای بررسی میزان تغییرات پایداری مغارها در برابر شرایط توده‌سنگ، هر پارامتر شامل مقاومت‌های برشی و کششی، مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها با توجه به بازه‌ی ممکن آن برای مارن آجاجاری تغییر داده شده است (جدول ۵-۱). سپس میزان تأثیر این تغییرات بر روی وضعیت جابجایی، تنش، گسترش ناحیه‌ی تسلیم و ضریب ایمنی بررسی شده است. نقاط شاهد نیز در سقف و دیواره‌ی مغارها در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۵-۱): بازه‌ی تغییرات در نظر گرفته‌شده برای پارامترهای مقاومتی مارن آجاجاری

پارامتر	میزان تغییرات		آحاد	درصد افزایش
	حد پایین	حد بالا		
چسبندگی	۰/۱۴	۰/۱۸	مگا پاسکال	+۲۹
زاویه‌ی اصطکاک	۲۶	۳۱	درجه	+۱۷
مقاومت کششی	۵	۱۱	کیلو پاسکال	+۱۲۰
مدول شکل‌پذیری	۰/۱۲۲	۰/۲۱۳	گیگا پاسکال	+۷۵
نسبت تنش‌ها	۰/۶	۱/۸	-	+۲۰۰

۱-۲-۵ مقاومت برشی

نتایج بررسی پایداری مغارها نسبت به تغییرات مقاومت برشی مارن یعنی چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مجموعه نمودار ۵-۱ مشاهده می‌شود. در این نمودارها نتایج بر اساس تغییرات چسبندگی نشان داده شده است؛ اما به طور هم‌زمان تغییرات زاویه‌ی اصطکاک نیز در تحلیل‌ها در

نظر گرفته شده است. بازه‌ی تغییرات این پارامترها با توجه به بازه‌ی شاخص زمین‌شناسی مارن گناوه در نظر گرفته شده است. چسبندگی مارن در بازه‌ی ۰٫۱۴ تا ۰٫۱۸ مگا پاسکال و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مارن در بازه‌ی ۲۶ تا ۳۱ درجه تغییر داده شده است.

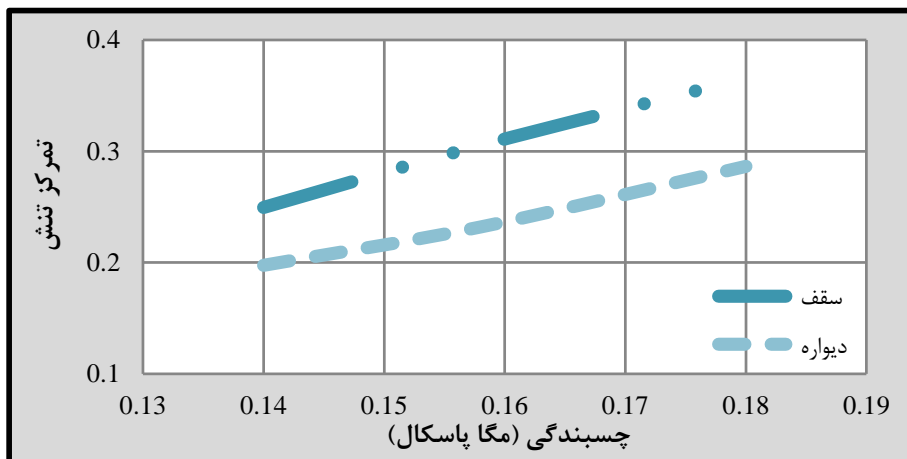
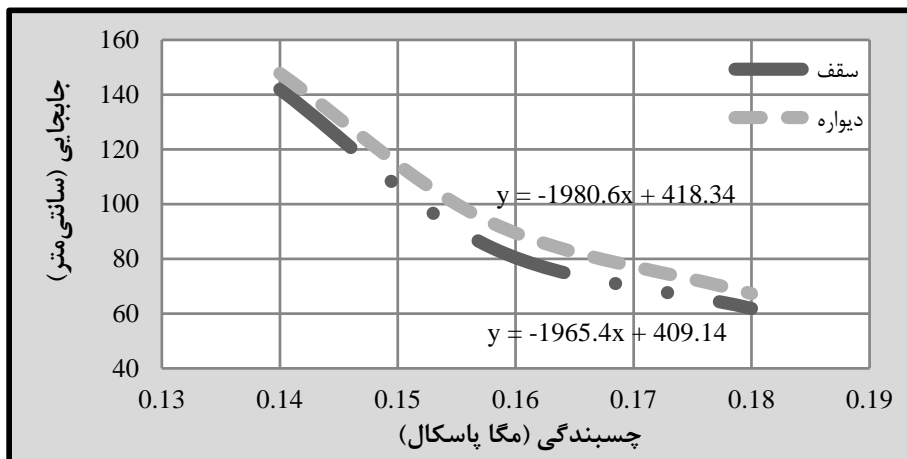
با افزایش مقدار مقاومت برشی، جابجایی‌ها در سقف مغار در بازه‌ی ۱۴۲ تا ۶۲ سانتی‌متر و در دیواره‌ی مغار در بازه‌ی ۱۴۸ تا ۶۷ سانتی‌متر تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر با افزایش ۲۹ درصدی چسبندگی و ۱۷ درصدی اصطکاک مارن، جابجایی قائم در سقف مغار در حدود ۵۶ درصد و جابجایی افقی در دیواره‌ی مغار در حدود ۵۴ درصد کاهش یافته است (نمودار ۵-۱: الف).

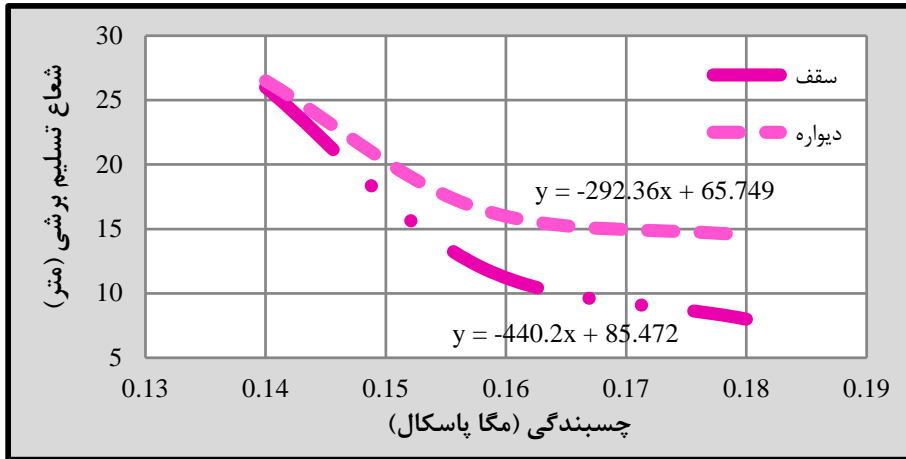
از سوی دیگر با افزایش مقاومت برشی مارن، تمرکز تنش در سقف مغار در بازه‌ی ۰٫۲۵ تا ۰٫۳۷ و در دیواره‌ی مغار در بازه‌ی ۰٫۲ تا ۰٫۲۹ تغییر کرده و در حدود ۴۵ درصد در جداره‌ی مغار افزایش یافته است (نمودار ۵-۱: ب). همچنین بیش‌ترین تنش کششی القایی در دیواره‌ی مغار، با مقدار ۵ کیلو پاسکال، در چسبندگی ۰٫۱۵۸ مگا پاسکال و کمترین تنش کششی القایی، با مقدار ۲٫۴ کیلو پاسکال در چسبندگی ۰٫۱۸ مگا پاسکال مشاهده شده است و همان‌طور که انتظار می‌رود گسترش ناحیه‌ی کشش در دیواره‌ی مغار با تغییرات مقاومت برشی مارن تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

در نهایت با افزایش پارامترهای مقاومت برشی مارن، شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در اطراف سقف مغار، از ۲۶ متر به ۸ متر رسیده و در حدود ۶۹ درصد کاهش می‌یابد. در اطراف دیواره‌ی مغار نیز شعاع ناحیه‌ی تسلیم از ۲۷ متر به ۱۵ متر رسیده و در حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۱: ج). همچنین با افزایش مقاومت برشی مارن، ناحیه‌ی فعال تسلیم برشی در سقف و کف مغار حذف شده، در حالی که ناحیه‌ی منفعل تسلیم برشی، باقی مانده اما وسعت آن کاهش می‌یابد. در دیواره‌ی مغار نیز در حالت کمترین مقاومت برشی، مقدار کمتری از نواحی فعال تسلیم برشی مشاهده می‌شود. از سوی دیگر با افزایش مقاومت برشی مارن، شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار از ۳ متر به ۱٫۵ متر رسیده و به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در دیواره‌ی مغار نیز شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی از ۵٫۵ متر به ۴ متر رسیده و در حدود ۲۷ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۱: د). همچنین

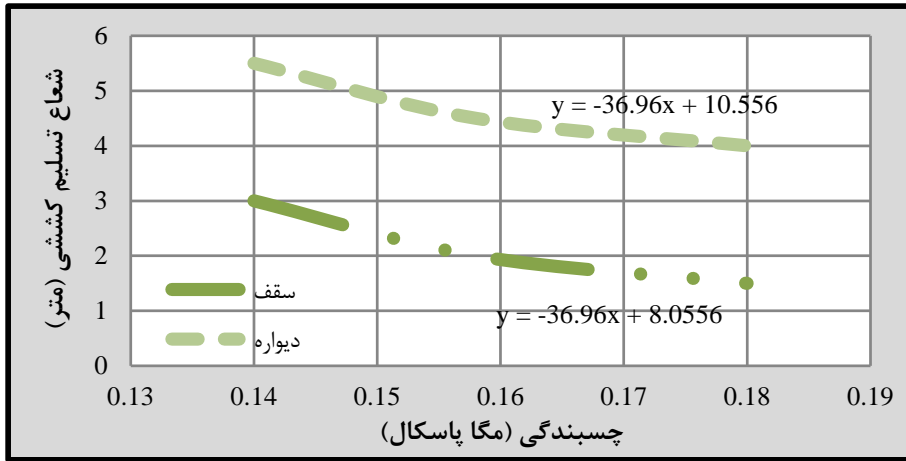
بیشترین نواحی فعال تسلیم کششی در دیواره‌ی مغار با چسبندگی ۰٫۱۵۸ مگا پاسکال مشاهده شده است.

با افزایش مقاومت برشی مارن، انتظار می‌رود که ضریب ایمنی جداره‌ی مغار افزایش یابد؛ اما نتایج تحلیل‌ها روندی معکوس را نشان می‌دهد. ضریب ایمنی نامحصور سقف در بازه‌ی ۰٫۳۶ تا ۰٫۲۵ تغییر کرده و در حدود ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. ضریب ایمنی نامحصور دیواره نیز در بازه‌ی ۰٫۴ تا ۰٫۲۸ تغییر نموده و در حدود ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش مقدار بیشترین تنش اصلی و در نتیجه تمرکز تنش در جداره‌ی مغار است. از سوی دیگر ضریب ایمنی محصور سقف دارای روندی ثابت (تقریباً برابر با ۱) است و ضریب ایمنی محصور دیواره نیز از مقدار ۱٫۰۴ به ۱٫۰۱ رسیده و تنها در حدود ۲٫۶ درصد کاهش یافته است (نمودار ۵-۱: ه و و).

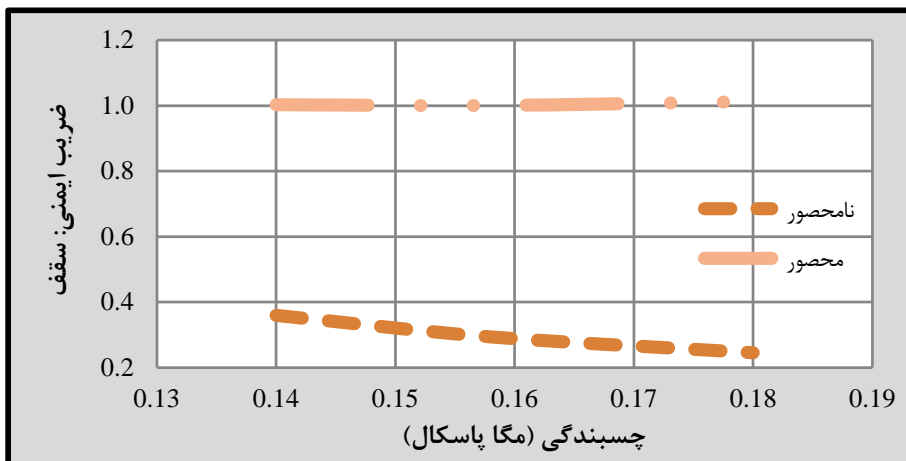




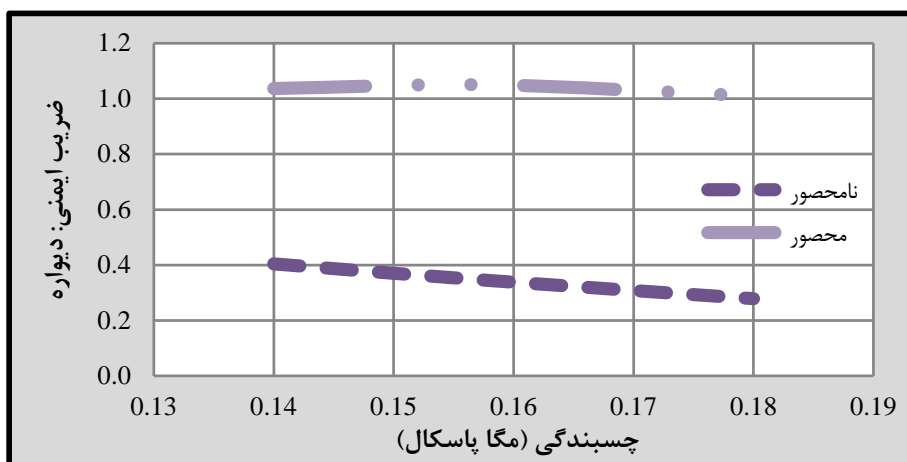
(ج)



(د)



(ه)



(و)

نمودار (۵-۱): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت برشی مارن؛ (الف): تغییرات جابجایی (سانتی‌متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ (ه): تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ (و): تغییرات ضریب ایمنی دیواره

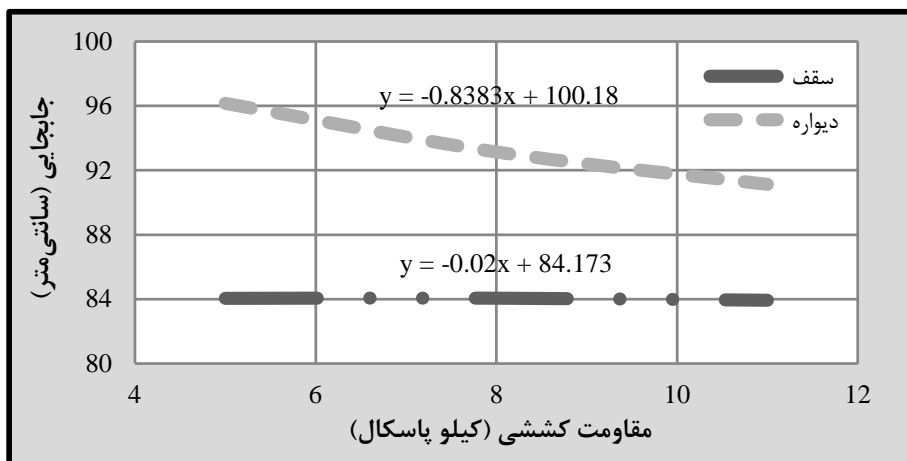
۵-۲-۲ مقاومت کششی

نتایج تحلیل پایداری مغارها نسبت به تغییرات مقاومت کششی در مجموعه نمودار ۵-۲ ملاحظه می‌شود. بازه‌ی تغییرات مقاومت کششی مارن بین ۵ تا ۱۱ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار ۵-۲: الف، مشاهده می‌شود که با افزایش ۱۲۰ درصدی مقاومت کششی، جابجایی قائم در سقف مغار تقریباً ثابت باقی مانده (۸۴ سانتی‌متر) و جابجایی افقی دیواره‌ی مغار در حدود ۵ درصد کاهش یافته و از ۹۶ سانتی‌متر به ۹۱ سانتی‌متر رسیده است.

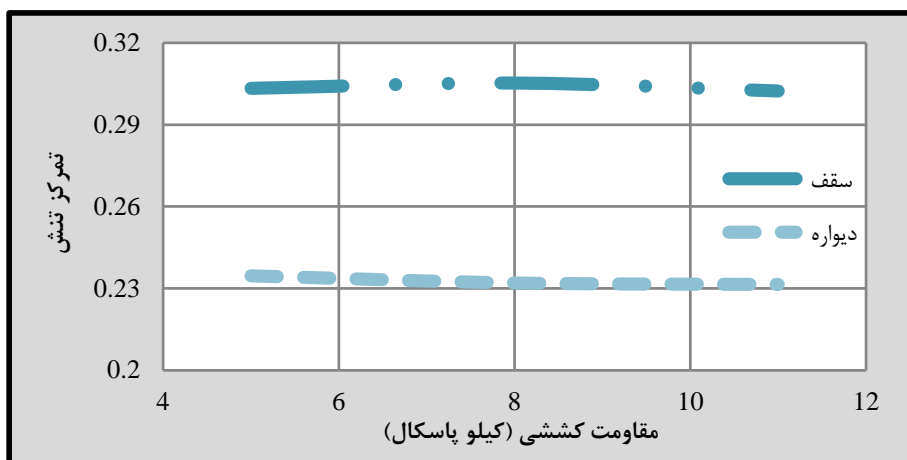
از سوی دیگر افزایش مقاومت کششی مارن تأثیر چندانی بر وضعیت تنش‌ها نیز نداشته و تمرکز تنش در سقف مغار مقداری در حدود ۰/۳ و در دیواره‌ی مغار در حدود ۰/۲۳ برآورد شده است (نمودار ۵-۲: ب). همچنین افزایش مقاومت کششی مارن، تأثیری بر گسترش ناحیه‌ی تسلیم برشی در اطراف مغار نداشته و شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف مغار در حدود ۱۲ متر و دیواره‌ی مغار در حدود ۱۶/۵ متر است (نمودار ۵-۲: ج). از سوی دیگر، افزایش مقاومت کششی در بازه‌ی در نظر گرفته شده، نتوانسته گسترش ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار را کاهش دهد و این شعاع در حدود ۲ متر ثابت باقی می‌ماند. در دیواره‌ی مغار نیز تنها کاهش اندکی در نواحی تسلیم کششی فعال

و منفعل مشاهده شده و شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی با افزایش ۶۰ درصدی مقاومت کششی در حدود ۱۸ درصد کاهش یافته و از ۵/۵ متر به ۴/۵ متر می‌رسد و پس از آن ثابت باقی می‌ماند (نمودار ۲-۵: د).

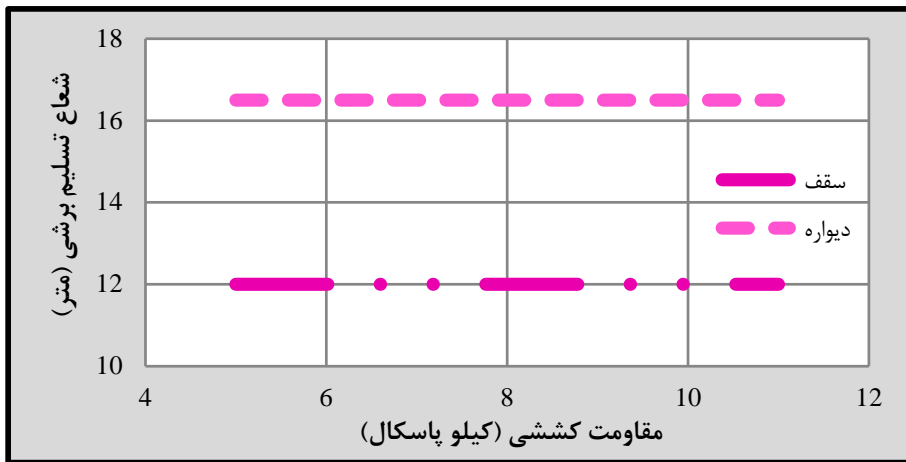
با بررسی کانتورهای کمترین تنش اصلی ناحیه، مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت کششی، گسترش ناحیه‌ی تحت کشش در دیواره‌ی مغار به مقدار اندکی گسترش یافته و مقدار تنش کششی از ۳/۵ کیلو پاسکال به ۶/۵ کیلو پاسکال رسیده و در حدود ۸۶ درصد افزایش یافته است. با توجه به این‌که، تغییرات مقاومت کششی تأثیر چندانی بر وضعیت تنش ناحیه نداشته است، ضریب ایمنی محاسبه‌شده نیز روند تقریباً ثابتی را نشان می‌دهد (نمودار ۲-۵: ه و و).



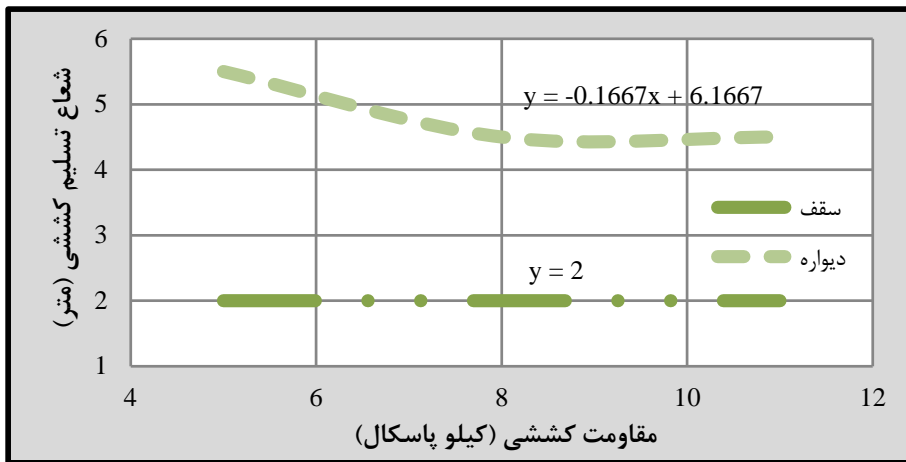
(الف)



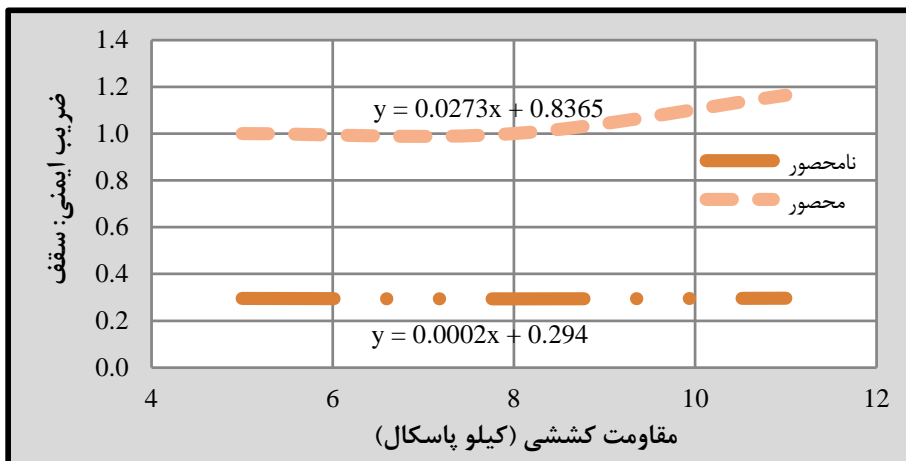
(ب)



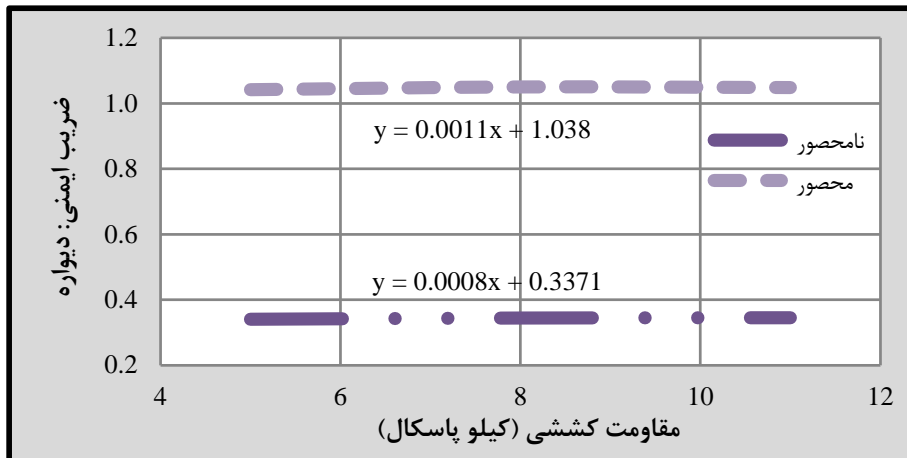
(ج)



(د)



(ه)



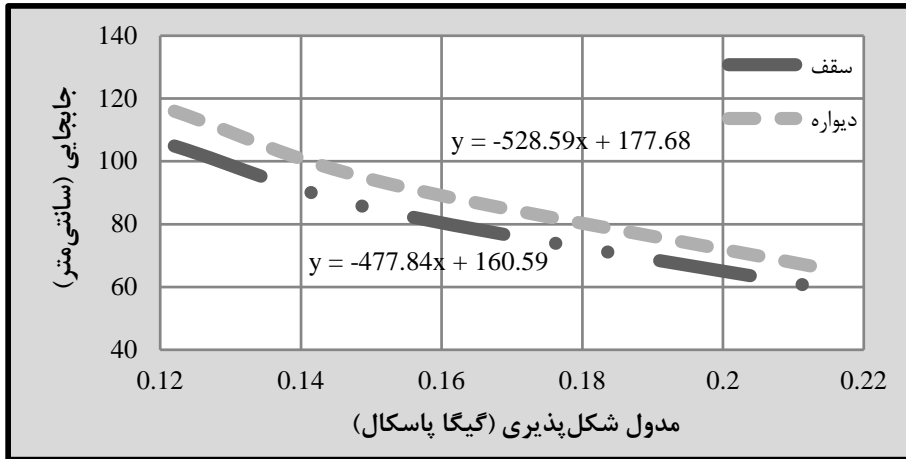
(و)

نمودار (۲-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت کششی مارن؛ (الف): تغییرات جابجایی (سانتی متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (ه): تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ (و): تغییرات ضریب ایمنی دیواره

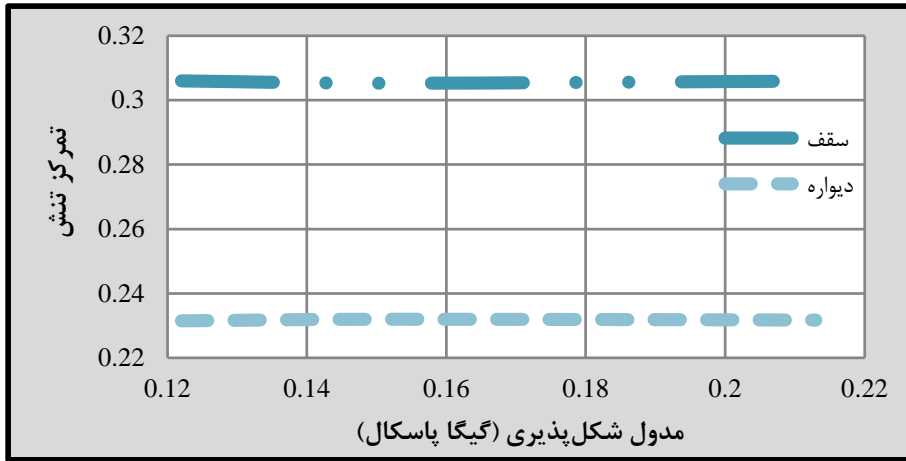
۳-۲-۵ مدل شکل پذیری

مدول شکل پذیری مارن در بازه‌ی ۰٫۱۲۲ تا ۰٫۲۱۳ گیگا پاسکال تغییر داده شده است. با افزایش ۷۵ درصدی مدول شکل پذیری، جابجایی‌های سقف و دیواره‌ی مغار در حدود ۴۳ درصد کاهش می‌یابد. یعنی جابجایی قائم سقف از ۱۰۵ سانتی متر به ۶۰ سانتی متر و جابجایی افقی دیواره نیز از ۱۱۶ سانتی متر به ۶۷ سانتی متر کاهش می‌یابد (نمودار ۳-۵: الف). علاوه بر این تغییرات مدول شکل پذیری بر روی وضعیت تنش ناحیه تأثیری نداشته و با افزایش مدول سنگ، تمرکز تنش روند ثابتی را نشان می‌دهد (نمودار ۳-۵: ب). همچنین روند مشابهی نیز برای گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارها مشاهده می‌شود. بدین معنا که تغییرات مدول شکل پذیری بر وضعیت تسلیم‌شدگی مارن تأثیرگذار نبوده و در تمام مدل‌ها، شعاع تسلیم برشی در اطراف سقف مغار در حدود ۱۲ متر و در اطراف دیواره‌ی مغار در حدود ۱۶٫۵ متر است. شعاع تسلیم کششی نیز در سقف مغار در حدود ۲ متر و در اطراف دیواره‌ی مغار در حدود ۴٫۵ متر است (نمودار ۳-۵: ج و د).

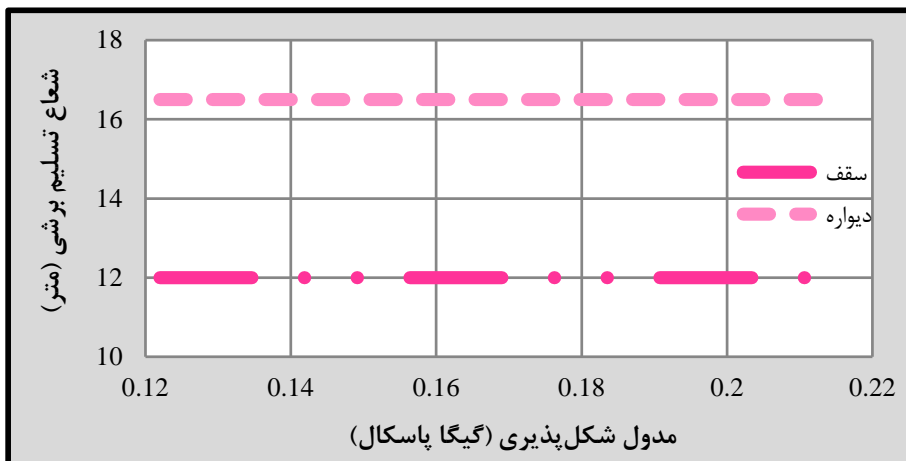
با توجه به این که تغییرات مدول شکل پذیری تأثیری بر وضعیت تنش‌ها نداشته، ضریب ایمنی نیز در جداره‌ی مغار روندی ثابتی را نشان می‌دهد. ضریب ایمنی نامحصور سقف و دیواره در حدود ۰٫۲۹ و ۰٫۳۴ و ضریب ایمنی محصور آن‌ها در حدود ۱ و ۱٫۰۵ برآورد شده است.



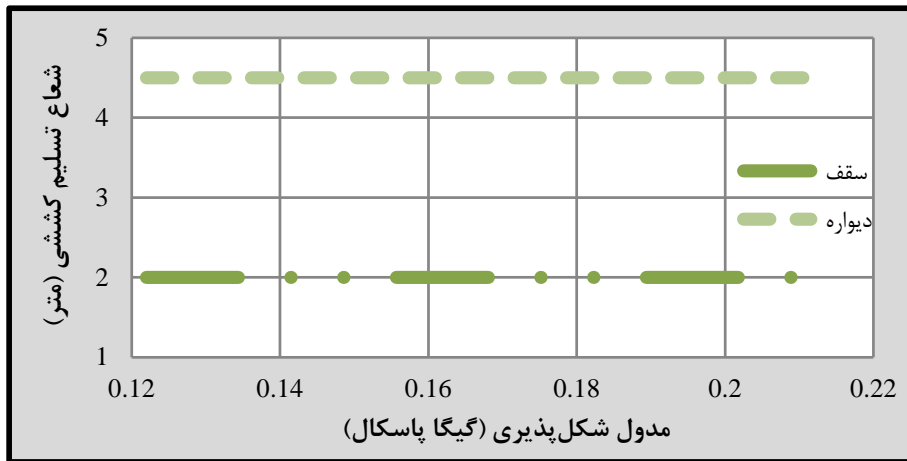
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

نمودار (۳-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به مدول شکل پذیری مارن؛ (الف): تغییرات جابجایی (سانتی متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)

۴-۲-۵ نسبت تنش افقی به قائم

برای محاسبه‌ی نسبت تنش‌ها روابط متعددی برای نقاط مختلف جهان بر اساس آزمایش‌های برجا ارائه شده است که تنها در همان نقاط معتبر هستند. در اکثر این روابط عمق قرارگیری از سطح زمین به عنوان تنها عامل متغیر معرفی شده است. درحالی که در وضعیت تنش‌های یک ناحیه عوامل متعددی مانند شرایط زمین‌شناسی، جغرافیایی و تکتونیکی نیز نقش مهمی دارند که البته به صورت اعداد ثابت در این روابط به چشم می‌خورند. به عنوان نمونه با استفاده از تعدادی از این روابط، وضعیت تنش‌های احتمالی برای ناحیه‌ی گناوه برآورد شده است (جدول ۲-۵). با توجه به این که در رابطه‌ی شئوری، مدول شکل‌پذیری مارن نیز وارد شده است؛ در نتیجه مقدار برآوردشده نامناسب به نظر می‌رسد. همچنین این رابطه نسبت تنش‌ها را برای ماسه‌سنگ آغاچاری برابر با ۰/۵۲ پیش‌بینی می‌کند. در مجموع با مد نظر قرار دادن روابط موجود در جدول ۲-۵، بازه‌ی منطقی نسبت تنش‌ها برای ناحیه‌ی گناوه بین ۰/۵ تا ۳ پیش‌بینی می‌شود.

جدول (۲-۵): مقادیر مختلف کمترین و بیش‌ترین نسبت تنش افقی به قائم برای نقاط مختلف جهان (Hoek, 2006;

Ramamurthy, 2008; Zang & Stephansson, 2009)

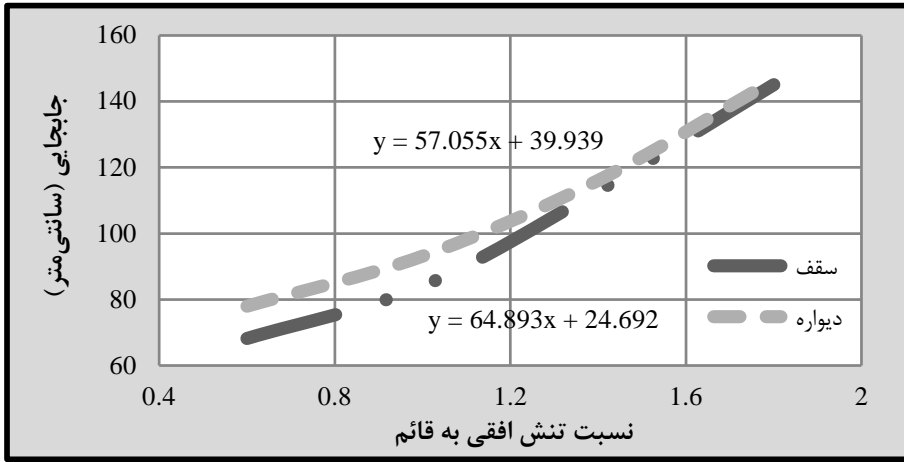
نام	Sheory	Terzaghi & Richart	Van heerden	Hoek & Brown	li	Sengupta	Stephansson	Herget	Rummel & Zoback
K_{min}	۰/۲۶	۰/۴۱	۲/۹۳	۱/۳	۱/۳	۲/۲۵	۲/۳۴	۲/۷۷	۲/۹۴
K_{max}	۰/۵۲	-	-	۱۵/۵	۴/۹	۳/۰۲	۳/۴۶	۵/۲۱	۶/۸۵

با توجه به توضیحات بیان شده، برای بررسی وضعیت میدان تنش ناحیه، نسبت تنش افقی به قائم، از ۰/۶ تا ۱/۸ تغییر داده شده است. با تغییر ۲۰۰ درصدی نسبت تنش‌ها، جابجایی‌ها در سقف مغار در حدود ۱۱۳ درصد و در دیواره‌ی مغار در حدود ۸۸ درصد افزایش می‌یابد. بازه‌ی تغییرات جابجایی قائم در سقف مغار بین ۶۸ تا ۱۴۵ سانتی‌متر و بازه‌ی تغییرات جابجایی افقی در دیواره‌ی مغار بین ۷۸ تا ۱۴۶ سانتی‌متر است. همچنین با افزایش مقدار نسبت تنش‌ها جابجایی‌های سقف و دیواره به سمت عددی واحد میل کرده و در نسبت ۱/۸ تقریباً بر هم منطبق می‌شود (نمودار ۴-۵: الف).

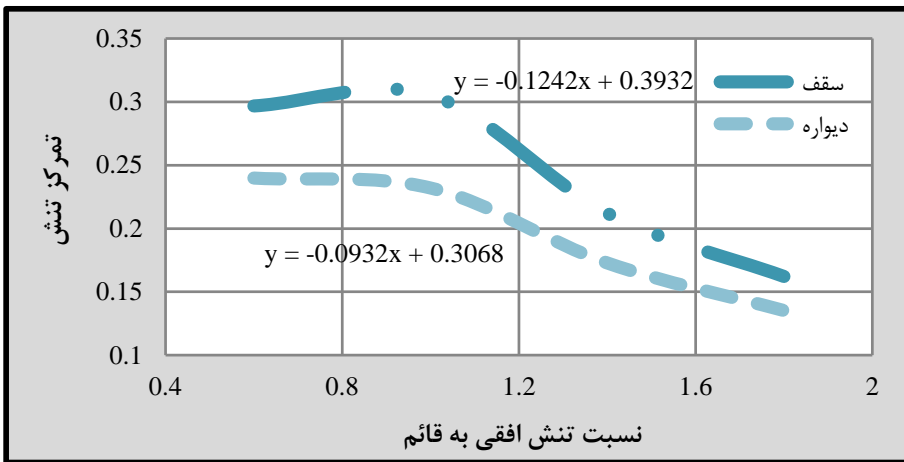
با افزایش نسبت تنش‌ها، تمرکز تنش در سقف مغار از ۰/۳ به ۰/۱۶ رسیده و به مقدار ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. در دیواره نیز مقدار تمرکز تنش از ۰/۲۴ به ۰/۱۴ رسیده و در حدود ۴۴ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۴-۵: ب). علاوه بر این با افزایش نسبت تنش‌ها، مساحت ناحیه‌ی تحت کشش در دیواره‌ی مغارها به تدریج کاهش می‌یابد. کمترین مقدار تنش کششی القایی در دیواره‌ی مغار در نسبت تنش ۱/۴، با مقدار ۱/۲۳ کیلو پاسکال و بیش‌ترین مقدار آن نیز در میدان تنش هیدروستاتیک با مقدار ۵ کیلو پاسکال برآورد شده است.

از سوی دیگر با افزایش مقدار تنش افقی، شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در دیواره‌ی مغار به مقدار ۱۶/۵ متر ثابت می‌ماند. اما در سقف مغار شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی از ۶ متر به ۲۳ متر رسیده و در حدود ۲۸۰ درصد افزایش می‌یابد (نمودار ۴-۵: ج). در نسبت تنش ۰/۶ نیز کمترین مقدار نواحی فعال تسلیم برشی در سقف و دیواره‌ی مغار مشاهده شده است. همچنین با افزایش میزان تنش افقی، شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف و کف مغار تقریباً ثابت باقی مانده؛ اما در دیواره‌ها از ۴/۵ متر به ۶/۵ متر رسیده و رشدی در حدود ۴۴ درصد را نشان می‌دهد (نمودار ۴-۵: د). علاوه بر این، از بین حالت‌های فرض شده، در میدان تنش هیدروستاتیک، بیش‌ترین نواحی فعال تسلیم کششی در دیواره‌ی مغار مشاهده و در نسبت ۰/۶، نواحی فعال تسلیم کششی دیواره در میانه‌ی طول مغار کاملاً

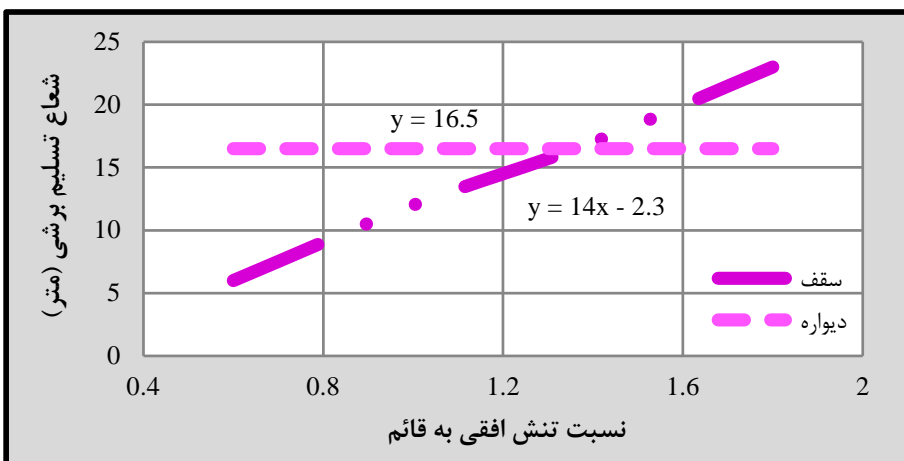
حذف شده است.



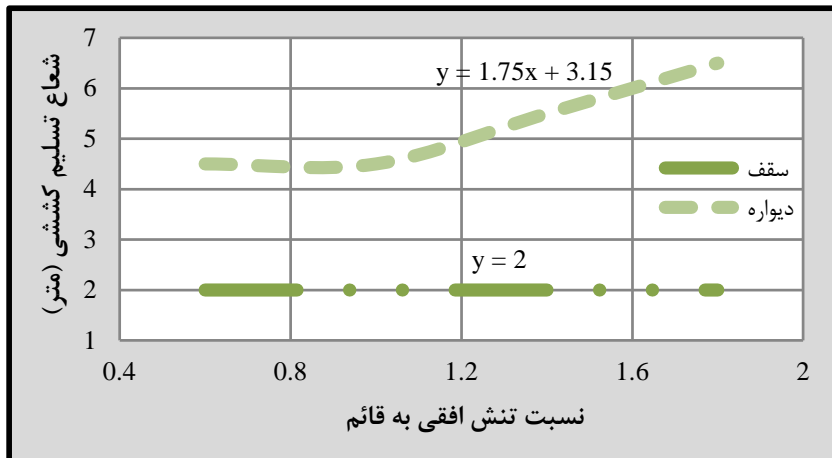
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

نمودار (۴-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به میدان تنش ناحیه؛ (الف): تغییرات جابجایی (سانتی‌متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)

۳-۵ تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای مارنی

در این بخش میزان تأثیر پارامترهای طراحی و عملیاتی شامل عمق قرارگیری، ابعاد مغارها و فشار ذخیره‌سازی در پایداری مغارها مورد بررسی قرار گرفته است. بازه‌ی تغییرات هر پارامتر در جدول ۵-۳ مشاهده می‌شود.

جدول (۳-۵): بازه‌ی تغییرات پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای مارنی

میزان تغییرات پارامتر	آحاد	بازه		درصد افزایش
		حد بالا	حد پایین	
عمق قرارگیری	متر	۱۸۰	۶۰	+۲۰۰
نسبت ارتفاع به عرض	-	۱٫۵	۱	+۵۰
فشار ذخیره‌سازی	مگا پاسکال	۰٫۱۷	۰	-

۱-۳-۵ عمق قرارگیری مغارها

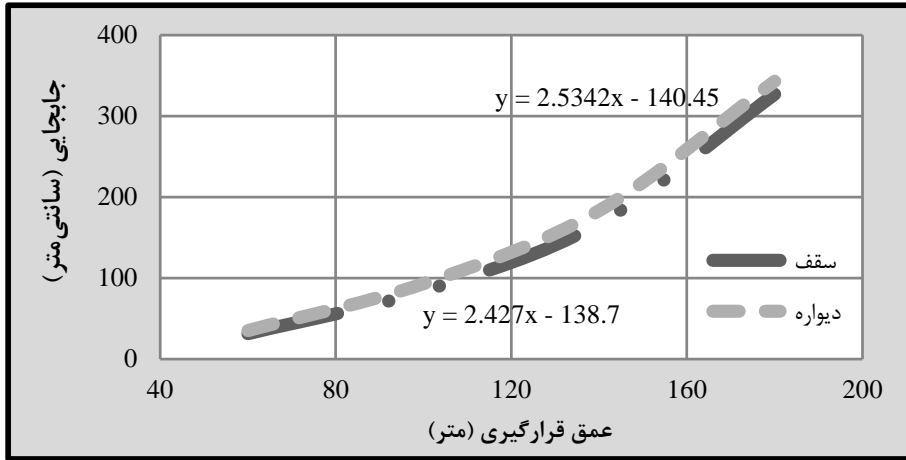
با توجه به این‌که عمق قرارگیری مغارهای ذخیره‌سازی دارای پوشش نسبت به مغارهای بدون پوشش، انعطاف‌پذیری بالایی دارد، بنابراین می‌توان برای کاهش هزینه‌های سامانه‌ی نگهداری و حفاری راه‌های دسترسی، عمق قرارگیری این مغارها را در بازه‌ی بین ۵۰ تا ۳۰۰ متر طراحی نمود. در این تحلیل نیز عمق قرارگیری مغارها بین ۶۰ تا ۱۸۰ متر تغییر داده شده است. در این بازه میزان تغییرات

جابجایی قائم در سقف مغار بین ۳۱ سانتی‌متر تا ۳۱٫۲۷ متر و میزان تغییرات جابجایی افقی در دیواره-ی مغار بین ۳۵ سانتی‌متر تا ۳۱٫۴۳ متر برآورد شده است. به بیان دیگر هنگامی که عمق قرارگیری مغارها ۳ برابر می‌شود، جابجایی‌های قائم سقف در حدود ۱۰٫۴ برابر و جابجایی‌های افقی دیواره در حدود ۹٫۸ برابر می‌شود (نمودار ۵-۵: الف).

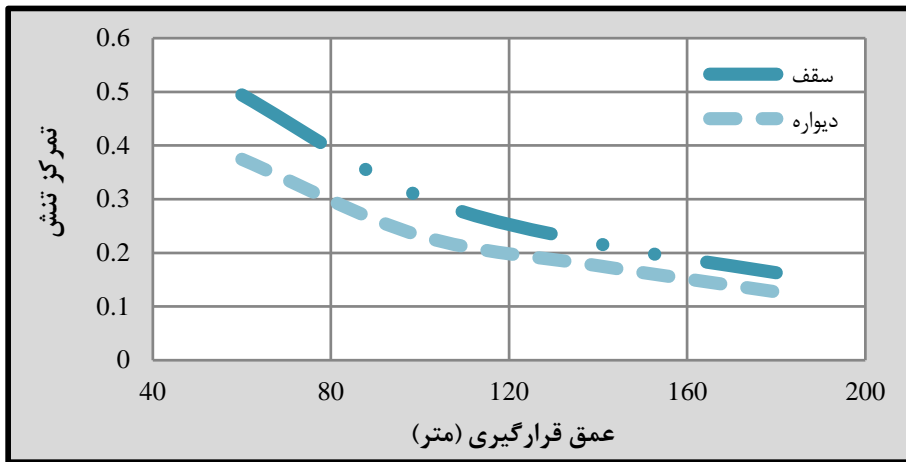
با افزایش عمق قرارگیری میزان تمرکز تنش در جداره‌ی مغارها کاهش می‌یابد. به بیان دیگر تمرکز تنش در سقف مغار از ۰٫۴۹ به ۰٫۱۶ رسیده و در حدود ۶۷ درصد کاهش می‌یابد. در دیواره‌ی مغار نیز تمرکز تنش از ۰٫۳۷ به ۰٫۱۳ رسیده و به مقدار ۶۶ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۵: ب). از سوی دیگر میزان تنش کششی القایی دیواره‌ی مغار در عمق ۶۰ متری، در حدود ۲٫۵ کیلو پاسکال بوده و در عمق ۱۰۰ متری به بیش‌ترین مقدار خود، برابر با ۵ کیلو پاسکال می‌رسد. در اعماق ۱۴۰ و ۱۸۰ متری، میزان تنش کششی القایی در حدود ۴٫۲ کیلو پاسکال و ۲٫۶ کیلو پاسکال برآورد شده است.

نتایج تحلیل‌ها این‌طور نشان می‌دهد که با افزایش عمق قرارگیری، شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف مغار، به میزان ۳۰۰ درصد افزایش یافته و از ۸ متر به ۳۲ متر می‌رسد. در دیواره‌ی مغار نیز شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی، با رشد ۱۵۲ درصدی، از ۱۲٫۵ متر به ۳۱٫۵ متر می‌رسد و در عمق ۱۸۰ متری شعاع نواحی تسلیم برشی در سقف و دیواره بر هم منطبق می‌شوند (نمودار ۵-۵: ج). علاوه بر این در عمق ۱۰۰ متری بیش‌ترین و در عمق ۱۸۰ متری کمترین میزان نواحی فعال تسلیم برشی به چشم می‌خورد.

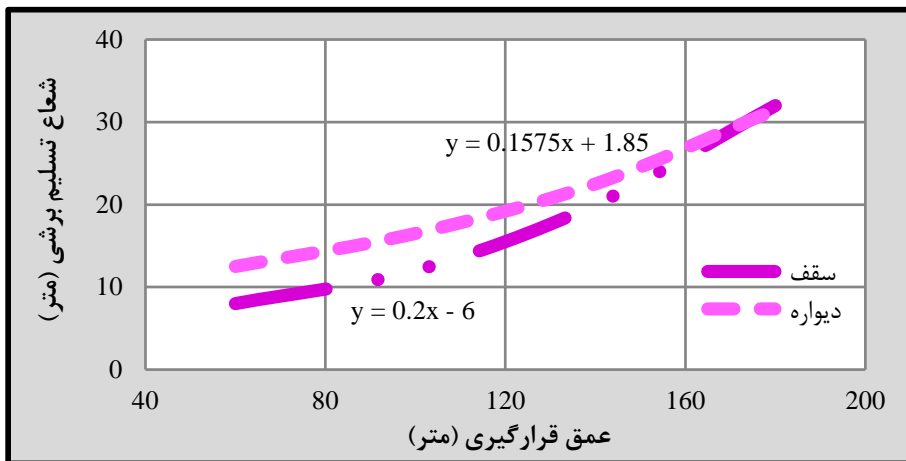
از سوی دیگر با افزایش عمق قرارگیری، شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی سقف، با رشد ۳۰۰ درصدی از ۱ متر به ۴ متر افزایش یافته و در دیواره‌ی مغار نیز شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی، با رشد ۲۲ درصدی از ۴٫۵ متر به ۵٫۵ متر رسیده است (نمودار ۵-۵: د). همچنین در این حالت نیز بیش‌ترین مقدار نواحی تسلیم فعال کششی در عمق ۱۰۰ متری و کمترین مقدار آن در عمق ۱۸۰ متری مشاهده شده است.



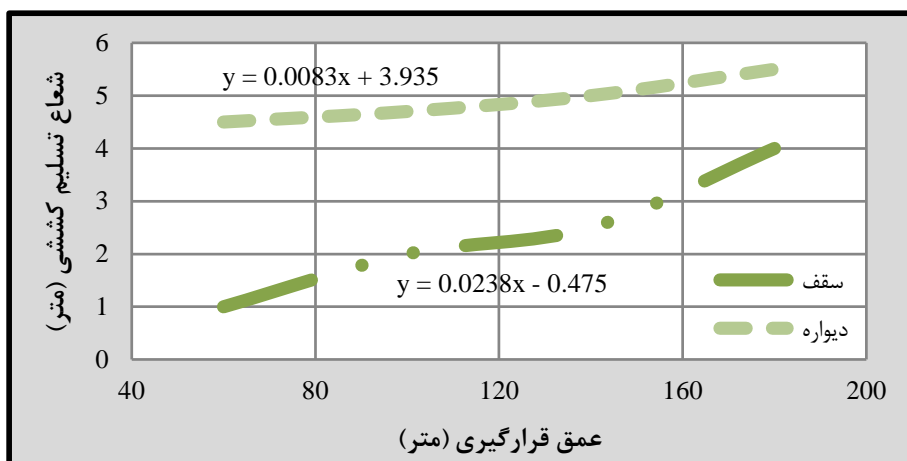
(الف)



(ب)



(ج)



نمودار (۵-۵): بررسی پایداری مغار نسبت به عمق قرارگیری؛ (الف): تغییرات جابجایی (سانتی متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)

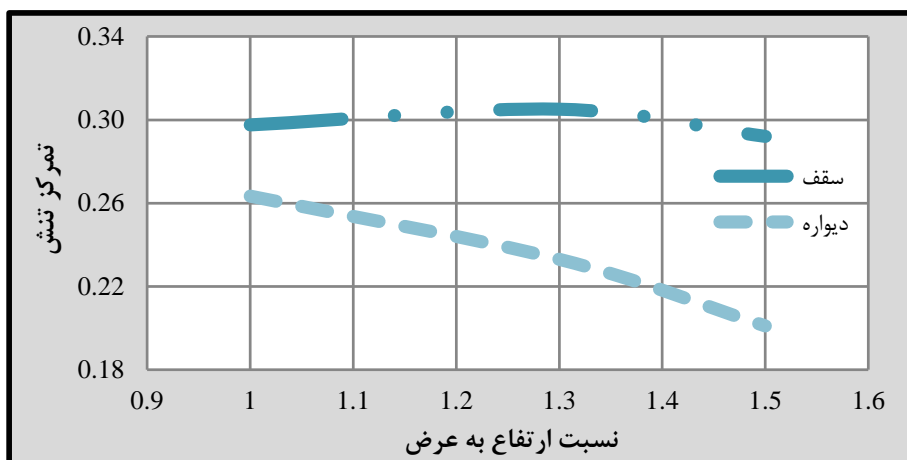
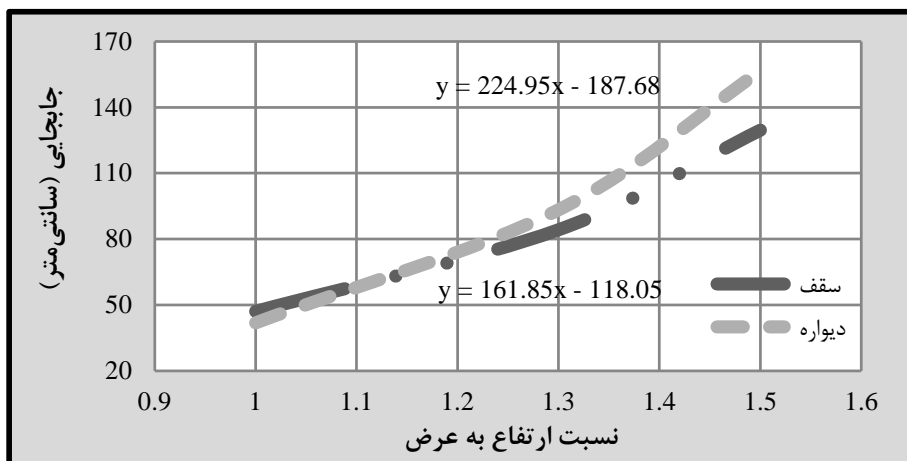
۲-۳-۵ ابعاد مغارهای ذخیره سازی

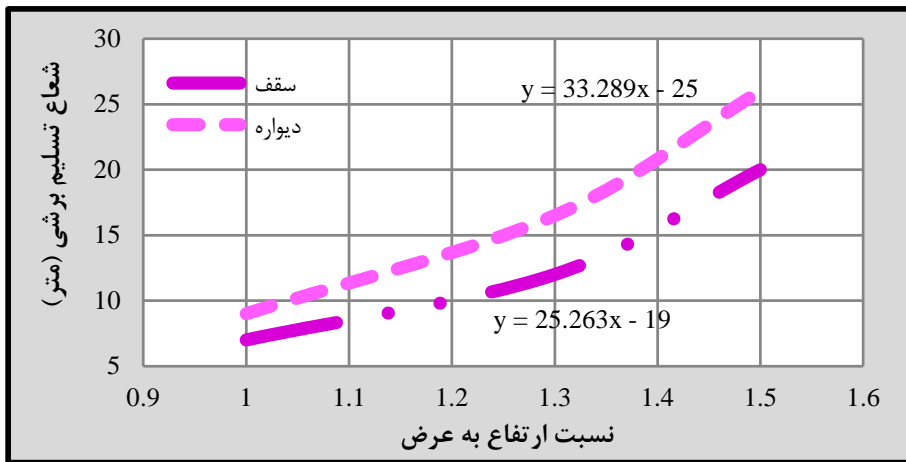
در این بخش برای بررسی پایداری مغارها در برابر تغییر ابعاد، نسبت ارتفاع به عرض در بازه‌ای بین ۱ تا ۱/۵ تغییر داده شده است. میزان تغییرات جابجایی‌های قائم سقف، بین ۴۷ تا ۱۳۰ سانتی متر و میزان جابجایی‌های افقی دیواره، بین ۴۲ تا ۱۵۷ سانتی متر است. به بیان دیگر با تغییر ۵۰ درصدی نسبت ابعاد، جابجایی سقف در حدود ۱۷۵ درصد و جابجایی دیواره در حدود ۲۷۴ درصد افزایش می‌یابد (نمودار ۵-۶: الف).

همچنین تغییر ابعاد مغارها، تأثیر چندانی بر وضعیت تمرکز تنش در سقف مغار نداشته اما در دیواره‌ی مغار سبب کاهش ۲۴ درصدی تمرکز تنش می‌شود. میزان تغییرات تمرکز تنش در سقف بین ۰/۳ تا ۰/۲۹ و در دیواره بین ۰/۲۶ تا ۰/۲ است (نمودار ۵-۶: ب). از سوی دیگر در نسبت ابعاد ۱، ناحیه‌ی کوچکی تحت تنش کششی ۶ کیلو پاسکال، در دو انتهای مغار مشاهده می‌شود. اما در نسبت ابعاد ۱/۳، ناحیه‌ی وسیعی در دیواره‌ی مغار تحت تنش کششی ۵ کیلو پاسکالی قرار گرفته و با افزایش نسبت ابعاد به ۱/۵، گسترش این ناحیه افزایش یافته، اما مقدار آن به ۳/۴ کیلو پاسکال کاهش می‌یابد. با افزایش ابعاد مغارها، به تدریج از میزان نواحی فعال تسلیم برشی کاسته شده اما شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف از ۷ متر به ۲۰ متر رسیده و در حدود ۱۸۶ درصد افزایش می‌یابد.

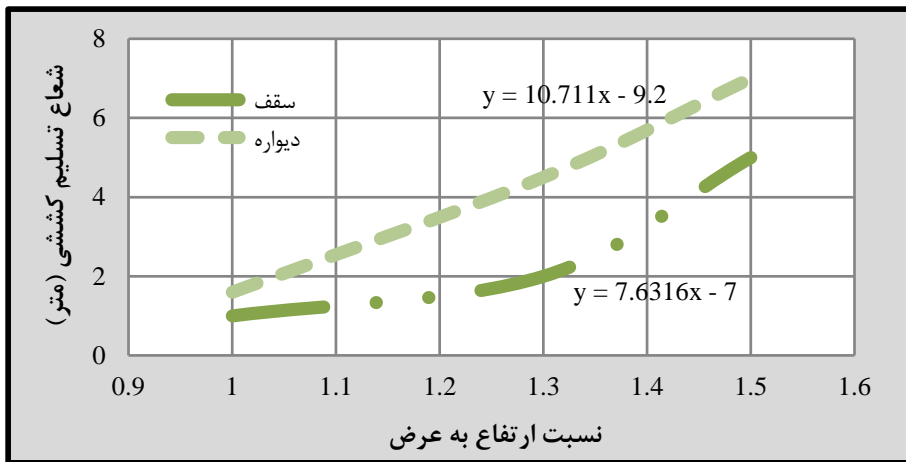
همچنین شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در دیواره از ۹ متر به ۲۶ متر رسیده و در حدود ۱۸۹ درصد افزایش می‌یابد. شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار نیز از ۱ متر به ۵ متر رسیده و به میزان ۴۰۰ درصد افزایش یافته و در دیواره‌ی مغار از ۱٫۶ متر به ۷ متر رسیده و رشدی به میزان ۳۴۰ درصد نشان می‌دهد. بزرگ‌ترین ناحیه‌ی فعال تسلیم کششی نیز در دیواره‌ی مغار با نسبت ابعاد ۱٫۳ مشاهده می‌شود (نمودار ۵-۶: ج و د).

با افزایش ابعاد مغارها، ضریب ایمنی سقف مغار تغییر چندانی نمی‌کند، اما ضریب ایمنی نامحصور و محصور دیواره به میزان ۱۷٫۳ و ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. بازه‌ی تغییرات ضریب ایمنی نامحصور و محصور دیواره بین ۰٫۳۲ تا ۰٫۳۸ و ۱٫۰۱ تا ۱٫۱۳ است (نمودار ۵-۶: ه و و).

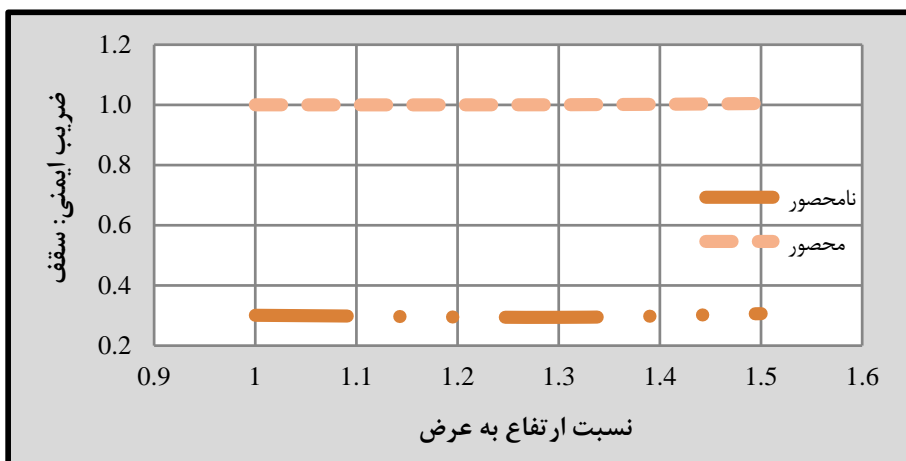




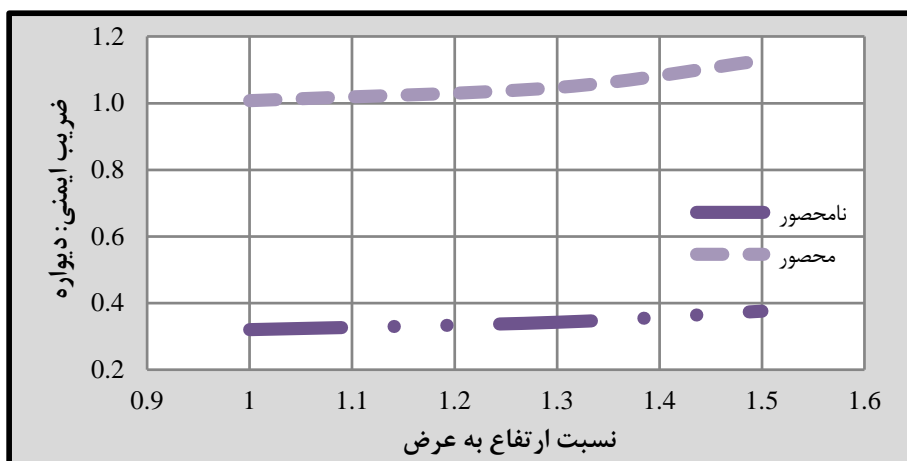
(ج)



(د)



(ه)



(و)

نمودار (۵-۶): بررسی پایداری مغار با تغییرات نسبت ابعاد؛ (الف): تغییرات جابجایی (سانتی‌متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ (ه): تغییرات ضرب ایمنی سقف؛ (و): تغییرات ضرب ایمنی دیواره

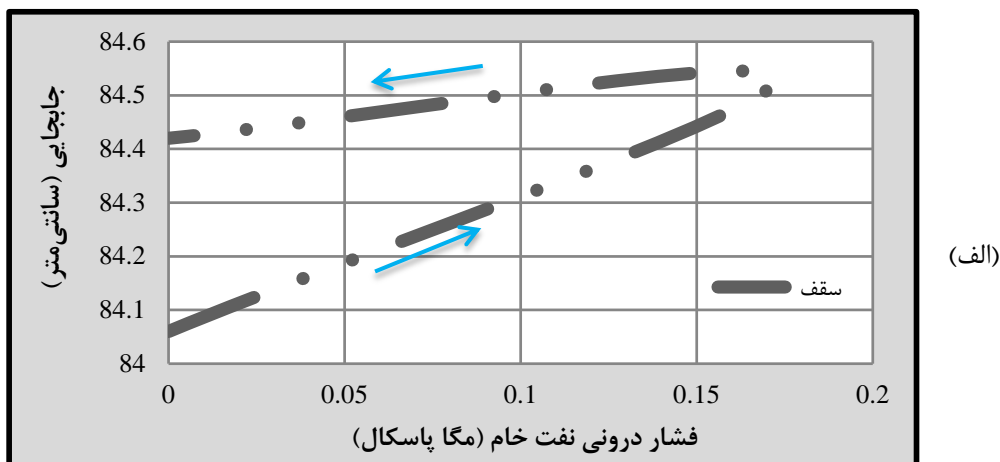
۳-۳-۵ فشار ذخیره‌سازی

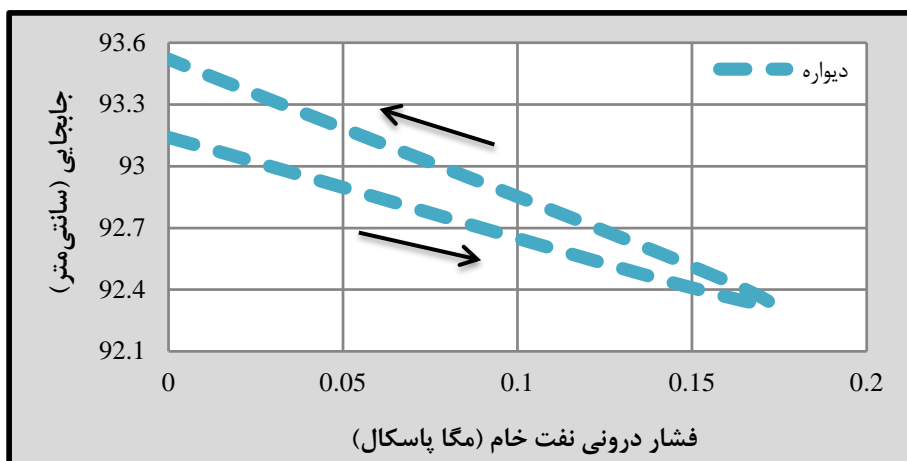
در مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام، فشار درونی در مقایسه با مغارهای ذخیره‌سازی گاز طبیعی، بسیار ناچیز و مقدار آن بین صفر تا چند دهم مگا پاسکال در ارتفاع مغار متغیر است. در حالت واقعی در مغارهای دارای پوشش ذخیره‌سازی پس از حفر مرحله‌ای مغار و نصب سامانه‌ی نگهداری، سامانه‌ی مهار نشست و تجهیزات مورد نیاز، نفت خام به درون مغار تزریق می‌شود. در نتیجه فشار درونی، نمی‌تواند تأثیر چندانی بر میزان پایداری مغارها داشته باشد. بنابراین در مدلسازی فشار درونی پس از به تعادل رسیدن مدل، فشار ذخیره‌سازی به مغار اعمال و مدل دوباره به تعادل رسانده می‌شود. اما در حالتی که بلافاصله پس از حفر مغار، نفت خام به درون آن تزریق شود، فشار درونی سبب بهبود وضعیت پایداری یعنی کاهش میزان جابجایی‌ها و ناحیه‌ی تسلیم تشکیل‌شده در اطراف مغارها می‌شود.

با اعمال فشار درونی (۰/۱۷ مگا پاسکال با گرادیان ۸۶۳۰ پاسکال بر متر)، جابجایی در سقف مغار به اندازه‌ی ۵ میلی‌متر افزایش یافته و پس از باربرداری به مقداری که بیش‌تر از مقدار اولیه‌ی خود و کمتر از حالت دارای فشار است، باز می‌گردد. اما در دیواره‌ی مغار با اعمال فشار درونی، جابجایی افقی به اندازه‌ی ۸ میلی‌متر کاهش یافته و پس از باربرداری به مقداری که بیش‌تر از دو

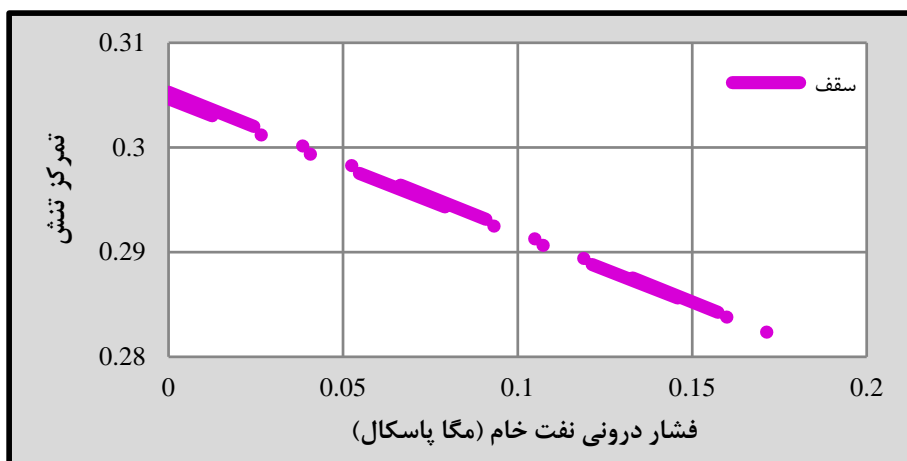
حالت قبلی است، باز می‌گردد (نمودار ۵-۷: الف و ب). به عبارت دیگر بارگذاری متناوب سبب افزایش اندکی در میزان جابجایی‌های جداره‌ی مغار می‌شود. میزان تمرکز تنش در سقف مغار نیز با اعمال بار به مقدار کمی کاهش یافته و پس از باربرداری به مقدار اولیه‌ی خود باز می‌گردد. اما در دیواره‌ی مغار پس از اعمال فشار، تمرکز تنش افزایش یافته و پس از باربرداری به مقدار اولیه‌ی خود باز می‌گردد (نمودار ۵-۷: ج و د).

از سوی دیگر با وارد شدن فشار ذخیره‌سازی شعاع ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغار تغییر چندانی نمی‌کند، اما نواحی فعال تسلیم برشی و کششی کاملاً حذف شده و پس از خالی شدن مغار تنها درصد کمی از این نواحی باز می‌گردند. علاوه بر این ناحیه‌ی تحت تنش کششی در دیواره‌ی مغار با مقدار ۵ کیلو پاسکال با اعمال فشار درونی از حالت کشش خارج شده و پس از خالی شدن مغار دوباره به مقدار ۴٫۴ کیلو پاسکال تحت تنش کششی قرار می‌گیرد.

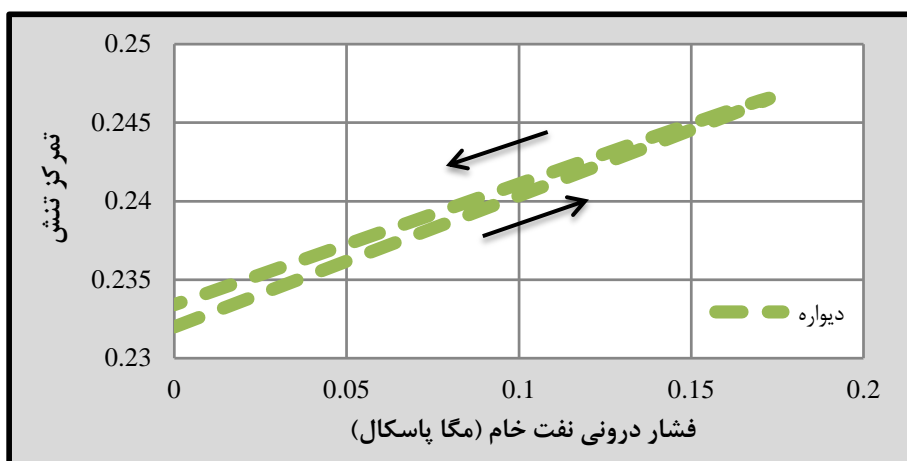




(ب)



(ج)



(د)

نمودار (۵-۷): بررسی پایداری مغار نسبت به بارگذاری متناوب؛ (الف): تغییرات جابجایی سقف مغار (سانتی متر)؛ (ب): تغییرات جابجایی دیواره‌ی مغار (سانتی متر)؛ (ج): تغییرات تمرکز تنش در سقف؛ (د): تغییرات تمرکز تنش در دیواره

۴-۵ تحلیل پارامتریک ماسه سنگ

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مقاومتی ماسه سنگ آغاچاری بر وضعیت پایداری مغارها، هر پارامتر

در بازه‌ی ممکن خود تغییر داده شده (جدول ۵-۴) و میزان تغییرات جابجایی، تمرکز تنش، گسترش ناحیه‌ی تسلیم و ضریب ایمنی دیواره و سقف مغار، مورد تحلیل قرار گرفته است.

جدول (۵-۴): بازه‌ی تغییرات پارامترهای مقاومتی ماسه‌سنگ آغاچاری

میزان تغییرات پارامتر	آحاد	بازه		درصد افزایش
		حد بالا	حد پایین	
چسبندگی	مگا پاسکال	۰٫۸۵	۰٫۵۴	+۵۷
زاویه‌ی اصطکاک	درجه	۵۴	۴۹	+۹
مقاومت کششی	کیلو پاسکال	۱۱۱	۴۷	+۱۳۶
مدول شکل پذیری	گیگا پاسکال	۴٫۹	۲٫۱	+۱۳۳
نسبت تنش‌ها	-	۱٫۸	۰٫۶	+۲۰۰

۵-۴-۱ مقاومت برشی

برای بررسی واکنش جداره‌ی مغار در برابر تغییرات مقاومت برشی توده‌سنگ دربرگیرنده، چسبندگی ماسه‌سنگ در بازه‌ی ۰٫۵۴ تا ۰٫۸۵ مگا پاسکال و زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن در بازه‌ی ۴۹ تا ۵۴ درجه تغییر داده شده است. این مقادیر با توجه به بازه‌ی شاخص زمین‌شناسی ماسه‌سنگ گناوه بدست آورده شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک بر روی مقاومت برشی ماسه‌سنگ نیز در مجموعه نمودار ۵-۸ مشاهده می‌شود. در این نمودارها تغییرات بر حسب چسبندگی نشان داده شده است؛ اما زاویه‌ی اصطکاک داخلی نیز به صورت هم‌زمان با آن تغییر می‌کند.

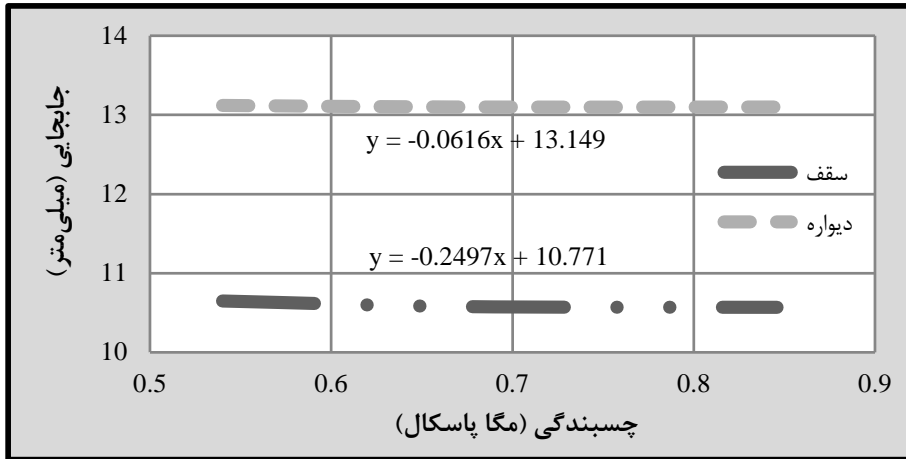
با افزایش مقاومت برشی ماسه‌سنگ تغییر محسوسی در میزان جابجایی‌های قائم سقف و جابجایی‌های افقی دیواره مشاهده نمی‌شود. در سقف مغار جابجایی‌ها از ۱۰٫۶۵ میلی‌متر به ۱۰٫۵۷ میلی‌متر می‌رسد. به عبارت دیگر با افزایش ۵۶٫۶۷ درصدی چسبندگی و ۹٫۳۷ درصدی زاویه‌ی اصطکاک داخلی، جابجایی سقف تنها در حدود ۰٫۷۵ درصد کاهش می‌یابد. جابجایی دیواره نیز با مقداری در حدود ۱۳٫۱ میلی‌متر، ثابت باقی می‌ماند (نمودار ۵-۸: الف).

با افزایش مقاومت برشی ماسه‌سنگ، وضعیت تنش در جداره‌ی مغار تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. مقدار تمرکز تنش در سقف مغار در حدود ۱٫۷۶ و در دیواره‌ی مغار در حدود ۰٫۹۲ است و

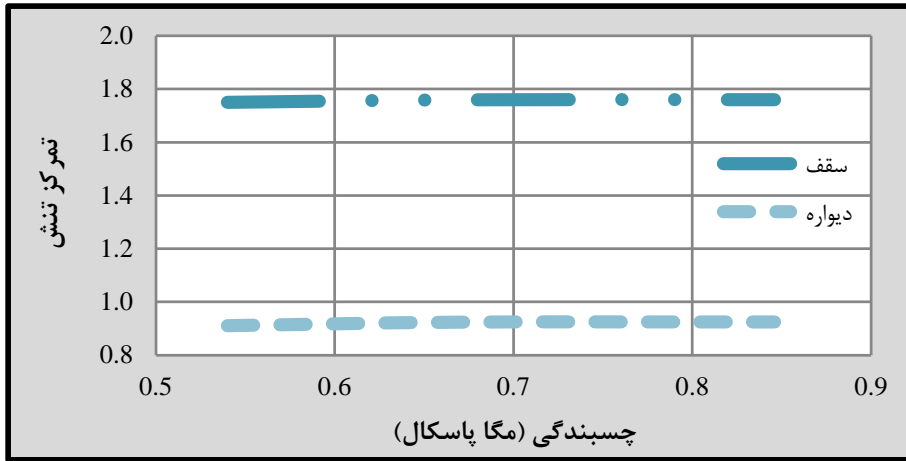
در سقف مغار تنها در حدود ۰/۵۶ درصد و در دیواره‌ی مغار تنها در حدود ۱/۵ درصد افزایش می‌یابد (نمودار ۵-۸: ب). علاوه بر این گسترش ناحیه‌ی تحت کشش در دیواره و کف مغار نیز تغییر محسوسی نداشته و در کمترین مقدار مقاومت برشی، دارای کمترین مقدار خود یعنی ۲۴/۵ کیلو پاسکال و در حد متوسط مقاومت برشی دارای بیش‌ترین مقدار خود یعنی ۳۲/۸ کیلو پاسکال در دیواره است. همچنین مقدار کشش پیش‌بینی‌شده در کف مغار در بازه‌ی ۱۰/۹ کیلو پاسکال تا ۱۴/۲ کیلو پاسکال در کمترین و بیش‌ترین مقاومت برشی ماسه‌سنگ متغیر است.

با افزایش مقدار مقاومت برشی ماسه‌سنگ، ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف و دیواره‌ی مغار به تدریج حذف شده؛ اما در گوشه‌های مغار همچنان نواحی تسلیم‌شده مشاهده می‌شود. هنگامی که ماسه‌سنگ دارای کمترین میزان مقاومت برشی است، شعاع ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف مغار در حدود ۱ متر و در دیواره در حدود ۱/۹ متر است. در این حالت تمام جداره‌ی مغار به جز ناحیه‌ی وسط دیواره‌ی آن، تسلیم شده و درصد کمی از نواحی فعال تسلیم نیز در دیواره‌ی پایین، کف و سقف مغار مشاهده می‌شود. از سوی دیگر گسترش ناحیه‌ی تسلیم کششی در جداره‌ی مغار تغییری نداشته و شعاع این ناحیه در سقف مغار در حدود ۱ متر و در دیواره‌ی مغار در حدود ۱/۹ متر است. همچنین تمام جداره به جز گوشه‌های پایین مغار در حالت تسلیم کششی قرار داشته اما نواحی فعال تسلیم کششی به ندرت مشاهده می‌شود (نمودار ۵-۸: ج و د).

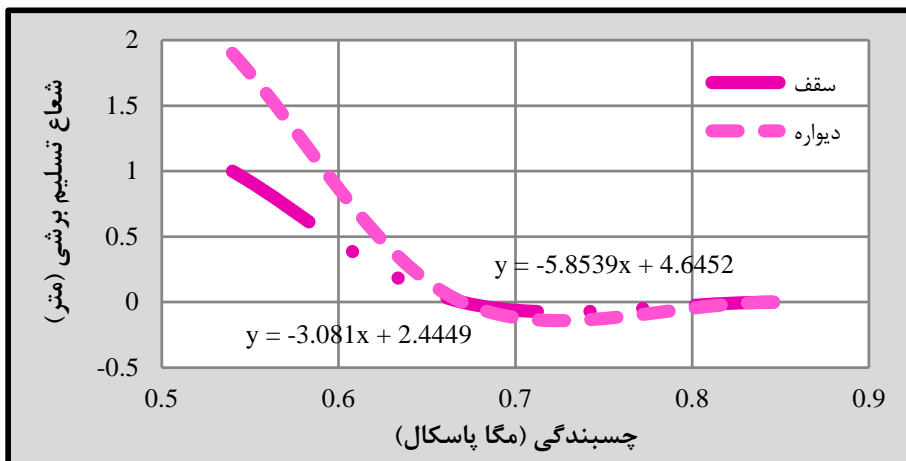
با افزایش مقاومت برشی ماسه‌سنگ، ضریب ایمنی نامحصور سقف و دیواره روند تقریباً ثابتی را نشان می‌دهند. این ضریب در سقف مغار در حدود ۰/۷ (۰/۵۶ درصد کاهش) و در دیواره در حدود ۱/۱۸ (۱/۵ درصد کاهش) است. دلیل این مسئله، ثابت بودن مقدار بیش‌ترین تنش اصلی جداره‌ی مغار با افزایش مقاومت برشی ماسه‌سنگ است. از سوی دیگر ضریب ایمنی محصور سقف در بازه‌ی ۱ تا ۱/۶۴ تغییر کرده و در حدود ۶۳ درصد افزایش می‌یابد. ضریب ایمنی محصور دیواره نیز در بازه‌ی ۱/۱۲ تا ۱/۹۹ تغییر کرده و در حدود ۷۷/۳ درصد افزایش می‌یابد (نمودار ۵-۸: ه و و).



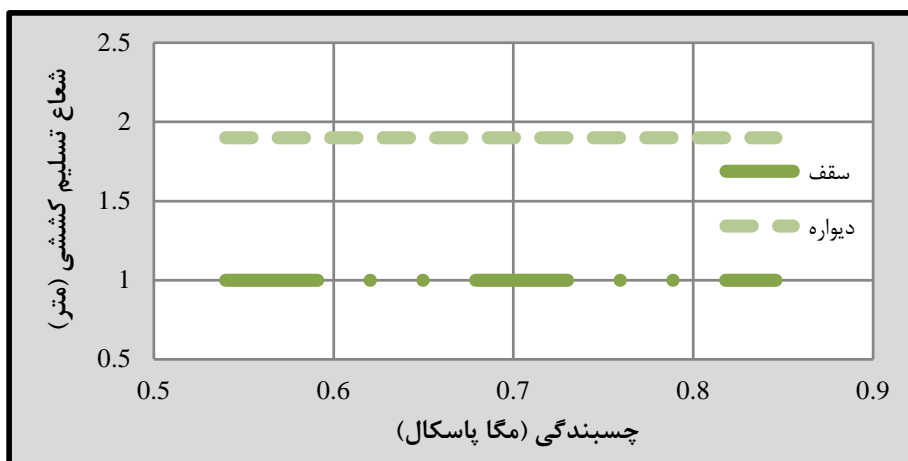
(الف)



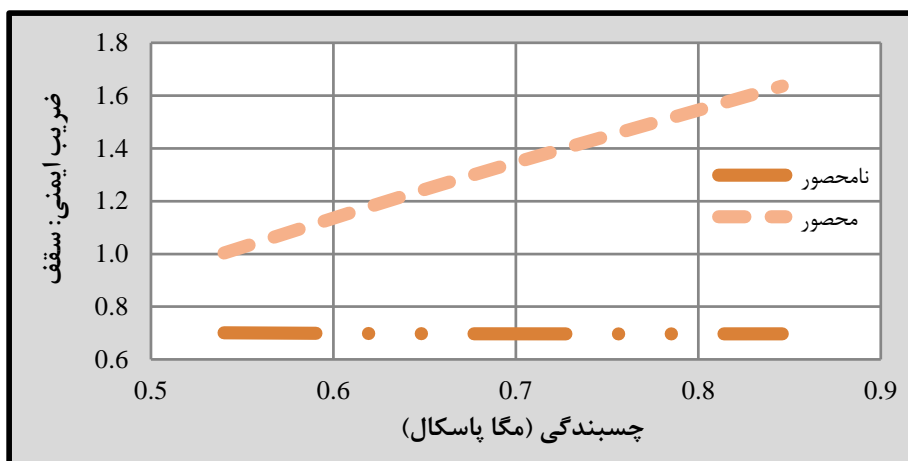
(ب)



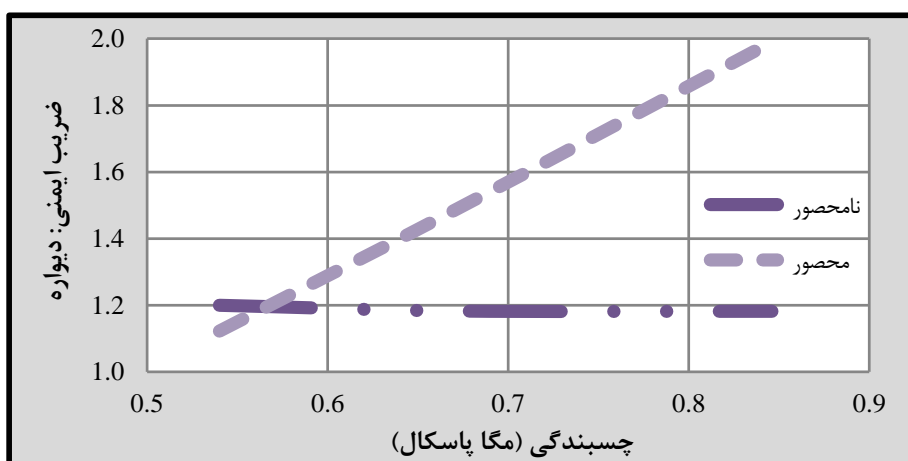
(ج)



(د)



(ه)



(و)

نمودار (۵-۸): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت برشی ماسه‌سنگ؛ (الف): تغییرات جابجایی (میلی‌متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ (و): تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ (ه): تغییرات ضریب ایمنی دیواره

۵-۴-۲ مقاومت کششی

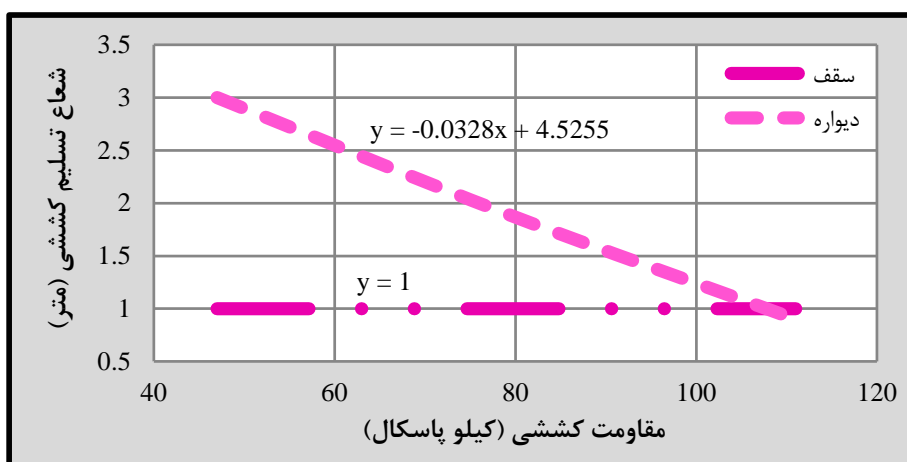
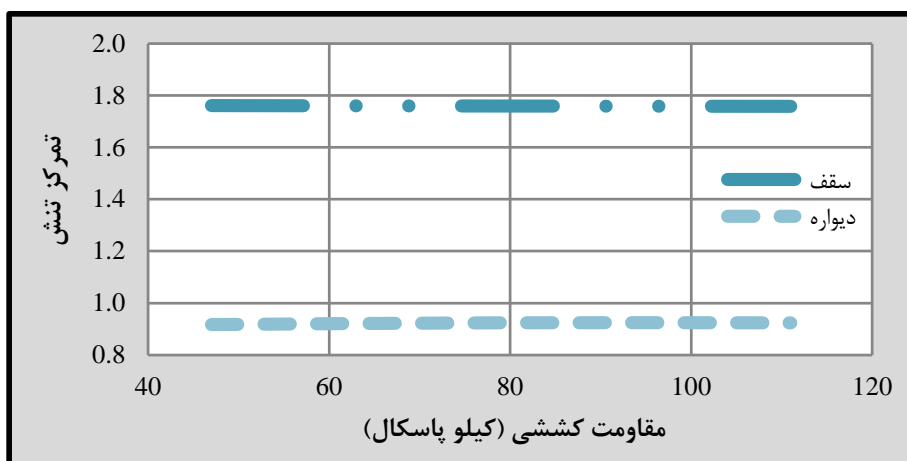
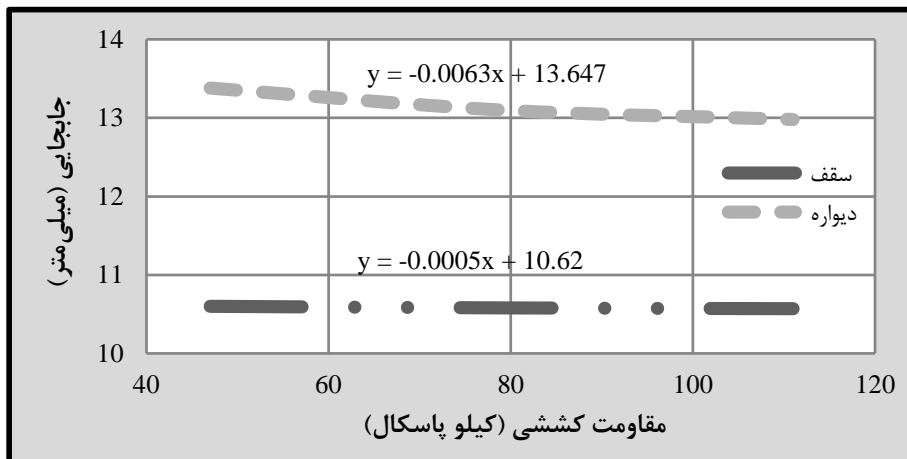
برای انجام تحلیل حساسیت بر روی مقاومت کششی ماسه‌سنگ، مقدار این پارامتر در بازه‌ی ۴۷ تا ۱۱۱ کیلو پاسکال (۱۳۶٫۱۷ درصد افزایش) تغییر داده شده است. با افزایش مقاومت کششی ماسه-سنگ، جابجایی قائم سقف در بازه‌ی ۱۰٫۶ تا ۱۰٫۵۷ میلی‌متر تغییر کرده و تنها در حدود ۰٫۲۸ درصد کاهش می‌یابد. جابجایی افقی دیواره نیز در بازه‌ی ۱۳٫۳۸ تا ۱۲٫۹۸ میلی‌متر تغییر کرده و در حدود ۳ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۹: الف).

مقادیر تمرکز تنش در جداره‌ی مغار نیز تغییر چندانی نداشته و در سقف مغار به میزان ۰٫۱۶ درصد کاهش و در دیواره‌ی مغار به میزان ۰٫۷۲ درصد افزایش می‌یابد. مقادیر متوسط تمرکز تنش در سقف و دیواره به ترتیب برابر با ۱٫۷۶ و ۰٫۹۲ هستند (نمودار ۵-۹: ب). از سوی دیگر با افزایش مقاومت کششی، مقدار تنش کششی القایی در دیواره‌ی مغار از ۱۷٫۱۲ کیلو پاسکال به ۳۶ کیلو پاسکال و در کف مغار از ۴٫۵ کیلو پاسکال به ۲۵٫۵۷ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش ۱۳۶ درصدی مقاومت کششی، تنش کششی القایی در دیواره به میزان ۱۱۰ درصد و در کف به میزان ۴۶۸ درصد افزایش یافته است.

با افزایش مقاومت کششی ماسه‌سنگ، در سقف و دیواره‌ی مغار، نواحی تسلیم برشی مشاهده نشده؛ اما گسترش این نواحی در گوشه‌های مغار افزایش می‌یابد. همچنین در حالات بررسی شده، تمام جداره‌ی مغار به جز گوشه‌های پایین، در وضعیت تسلیم کششی قرار دارند. با افزایش مقاومت کششی ماسه‌سنگ، شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار در حدود ۱ متر ثابت باقی مانده؛ اما در دیواره‌ی مغار، در بازه‌ی ۳ تا ۰٫۹ متر تغییر کرده و در حدود ۷۰ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۹: ج).

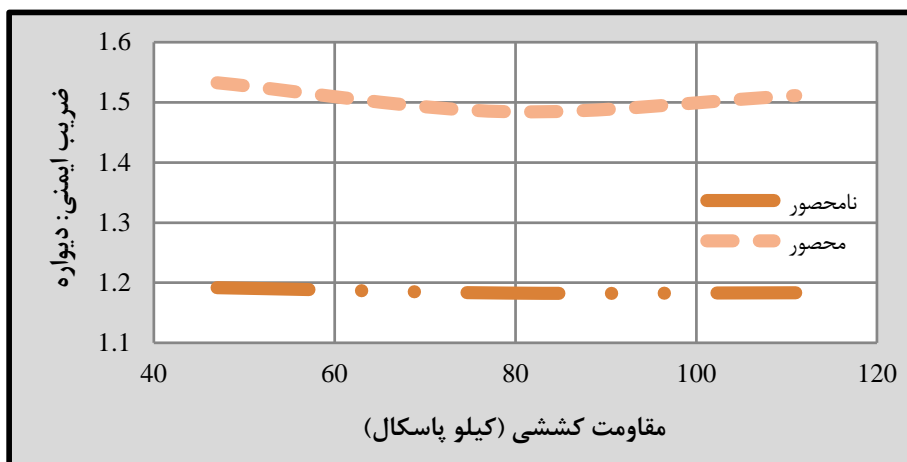
با افزایش مقاومت کششی ماسه‌سنگ تغییر چندانی نیز در ضریب ایمنی سقف و دیواره‌ی مغار مشاهده نمی‌شود. ضریب ایمنی متوسط نامحصور و محصور سقف مغار در حدود ۰٫۷ (۰٫۱۶) درصد افزایش) و ۱٫۲۹ (۰٫۸۱ درصد کاهش) است. همچنین ضریب ایمنی نامحصور دیواره دارای

مقدار متوسط ۱٫۱۸ با ۰٫۷۱ درصد کاهش است. ضریب ایمنی محصور دیواره نیز در بازه‌ی ۱٫۵۳ تا ۱٫۵۱ تغییر می‌کند (نمودار ۵-۹: د و ه).





(د)



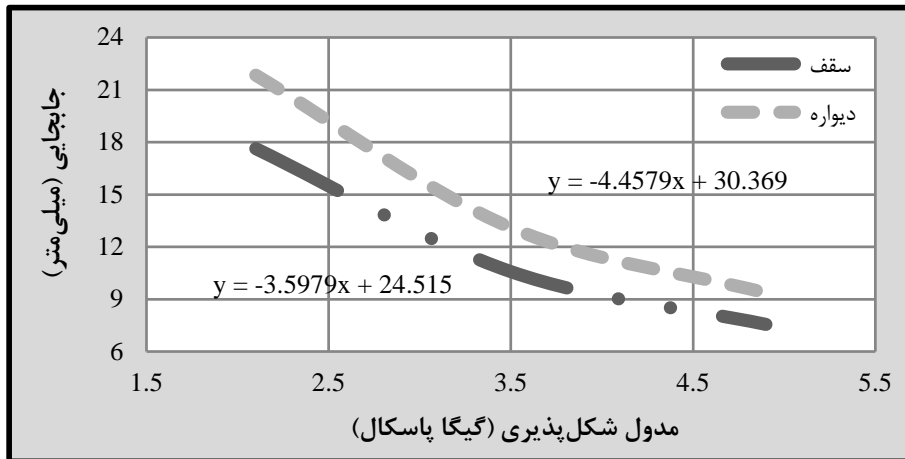
(ه)

نمودار (۵-۹): بررسی پایداری مغار نسبت به مقاومت کششی ماسه‌سنگ؛ (الف): تغییرات جابجایی (میلی‌متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ (د): تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ (ه): تغییرات ضریب ایمنی دیواره

۳-۴-۵ مدل شکل‌پذیری

بازه‌ی تغییرات مدل شکل‌پذیری ماسه‌سنگ بین ۲/۱ تا ۴/۹ گیگا پاسکال (افزایش ۱۳۳ درصدی) در نظر گرفته شده است. با افزایش مدل ماسه‌سنگ، جابجایی سقف در بازه‌ی ۱۷/۶۳ تا ۷/۵۶ میلی‌متر و جابجایی دیواره در بازه‌ی ۲۱/۸۴ تا ۹/۳۶ میلی‌متر تغییر کرده و در حدود ۵۷ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۱۰). سایر پارامترهای موثر در پایداری مغارها روند تقریباً ثابتی را نشان می‌دهند. تمرکز تنش در سقف مغار در حدود ۱/۷۶ و در دیواره‌ی مغار در حدود ۰/۹۲ است. همچنین شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار در حدود ۱ متر و در دیواره‌ی مغار در حدود ۱/۹ متر است و در این مناطق ناحیه‌ی تحت تسلیم برشی نیز مشاهده نشده است. ضریب ایمنی نامحصور و محصور در سقف

مغار دارای مقادیر، ۰٫۷ و ۱٫۲۹ و در دیواره‌ی مغار، دارای مقادیر ۱٫۱۸ و ۱٫۴۸ هستند.



نمودار (۵-۱۰): بررسی پایداری مغار نسبت به مدول شکل‌پذیری ماسه‌سنگ: تغییرات جابجایی (میلی‌متر)

۴-۴-۵ نسبت تنش افقی به قائم

برای بررسی میزان تأثیرگذاری وضعیت تنش ناحیه بر پایداری مغارها، نسبت تنش افقی به قائم در بازه‌ی ۰٫۶ تا ۱٫۸ تغییر داده شده و نتایج حاصل از تحلیل‌ها در مجموعه نمودار ۵-۱۱ آورده شده است. با افزایش ۲۰۰ درصدی نسبت تنش‌ها، جابجایی قائم سقف به میزان ۲۹٫۵۲ درصد کاهش، اما جابجایی افقی دیواره به میزان ۲۵۸٫۵۵ درصد افزایش یافته است. بازه‌ی تغییرات جابجایی سقف بین ۱۱٫۹ میلی‌متر تا ۸٫۳۹ میلی‌متر و بازه‌ی تغییرات جابجایی دیواره بین ۷٫۲ تا ۲۵٫۸۳ میلی‌متر است (نمودار ۵-۱۱: الف).

بازه‌ی تغییرات تمرکز تنش در سقف مغار بین ۰٫۸ تا ۱٫۶ و در دیواره‌ی مغار بین ۱٫۱۹ تا ۰٫۶۳ است. به عبارت دیگر تمرکز تنش سقف در حدود ۱۰۱ درصد افزایش و تمرکز تنش دیواره به میزان ۴۷٫۲۴ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این بیش‌ترین سطح تمرکز تنش در سقف مغار با مقدار ۱٫۸۹ در نسبت تنش ۱٫۴ مشاهده شده و پس از آن مقدار تمرکز تنش روندی نزولی را نشان می‌دهد (نمودار ۵-۱۱: ب). مقدار کمترین تمرکز تنش در سقف مغار، روندی صعودی داشته و در بازه‌ی ۰٫۰۶ تا ۰٫۱۵ تغییر می‌کند؛ اما در دیواره‌ی مغار برابر با صفر است. با افزایش مقدار نسبت

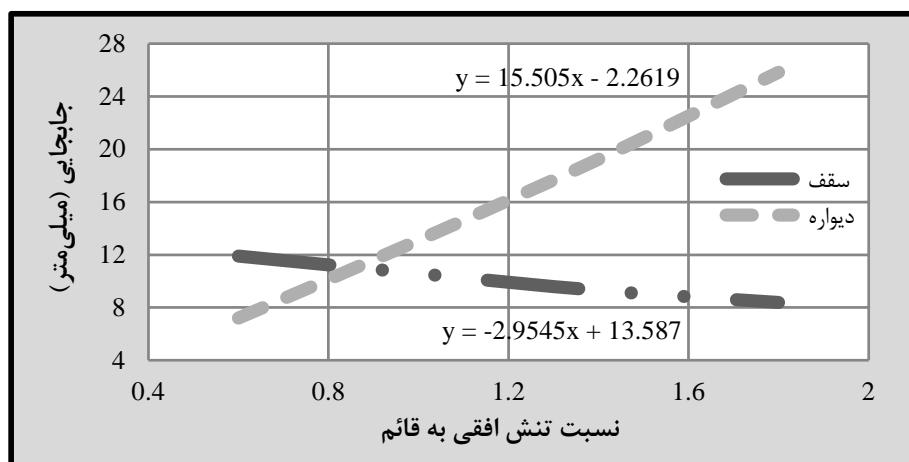
تنش‌ها، گسترش ناحیه‌ی کشش در دیواره‌ی مغار تغییر چندانی نشان نداده است. کمترین مقدار تنش کششی القایی، در نسبت ۰/۶ مشاهده و مقدار آن برابر با ۵/۷۷ کیلو پاسکال و بیش‌ترین مقدار آن در نسبت ۱ مشاهده و مقدار آن برابر با ۳۲/۷۸ کیلو پاسکال پیش‌بینی شده است. سپس تنش کششی القایی به مقدار ۲۴/۶۳ کیلو پاسکال در نسبت ۱/۸ کاهش می‌یابد. تنش کششی القایی در کف مغار دارای بیش‌ترین مقدار در نسبت ۰/۶ (۲۳/۵۳ کیلو پاسکال) و کمترین مقدار خود در نسبت‌های بزرگ‌تر از ۱ (صفر) است. در نسبت تنش ۱ نیز، تنش کششی القایی در کف مغار برابر با ۱۴/۱۵ کیلو پاسکال است.

در نسبت‌های تنش کوچک‌تر و مساوی ۱، هیچ ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف و دیواره‌ی مغار مشاهده نشده و تنها در گوشه‌های بالا و پایین مغار، نواحی تسلیم برشی بوجود آمده‌اند. در نسبت ۱/۴، در سقف و کف مغار ناحیه‌ایی به ضخامت ۱ متر، در وضعیت تسلیم برشی قرار گرفته و در نسبت تنش ۱/۸، تمام جداره‌ی مغار تسلیم شده و نواحی فعال تسلیم برشی نیز تنها در سقف مغار مشاهده می‌شود. در این حالت ضخامت ناحیه‌ی تسلیم در سقف مغار برابر با ۱ متر و در دیواره‌ی مغار برابر با ۳ متر است (نمودار ۵-۱۱: ج).

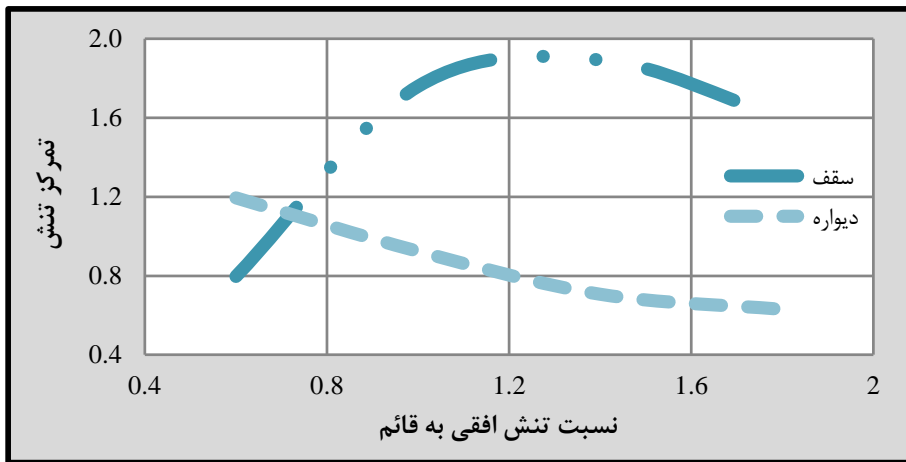
در نسبت‌های تنش کوچک‌تر از ۱/۴، تمام جداره‌ی مغار به استثنای گوشه‌های پایین، در وضعیت تسلیم کششی قرار دارند. شعاع این ناحیه در سقف مغار در حدود ۱ متر بوده و با افزایش نسبت تنش‌ها ثابت باقی می‌ماند؛ اما در دیواره بین ۰/۹ تا ۱/۹ متغیر است. در نسبت تنش‌های مساوی و بزرگ‌تر از ۱/۴، ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار به تدریج حذف می‌شود. در دیواره‌ی مغار نیز ضخامت ناحیه‌ی تسلیم کششی از ۲/۲ متر به ۳ متر می‌رسد. در مجموع ضخامت ناحیه‌ی تسلیم کششی در دیواره‌ی مغار در بازه‌ی ۰/۹ متر تا ۳ متر متغیر بوده و به میزان ۲۳۳/۳۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در تحلیل‌های انجام‌شده هیچ ناحیه‌ایی تحت تسلیم فعال کششی، در جداره‌ی مغارها مشاهده نشده است (نمودار ۵-۱۱: د).

با توجه به روند افزایشی بیش‌ترین و کمترین تنش اصلی و در نتیجه تمرکز تنش در سقف

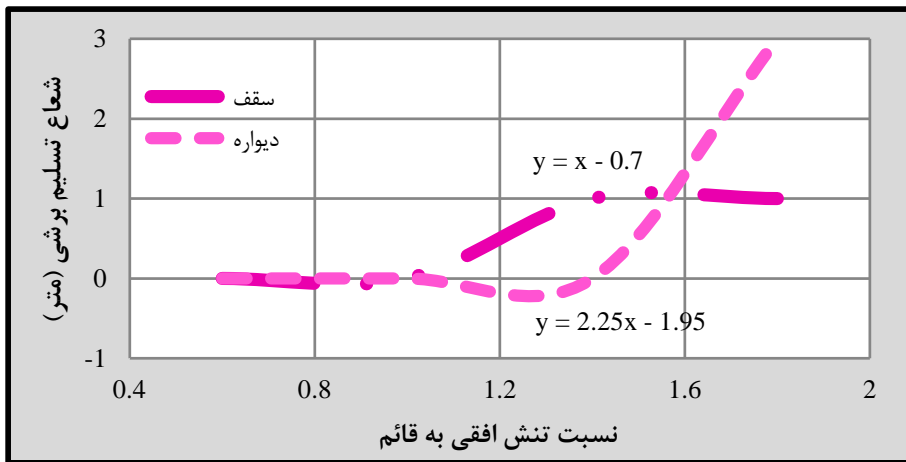
مغار، ضریب ایمنی در این قسمت از جداره، روند کاهشی نشان می‌دهد. ضریب ایمنی نامحصور سقف در بازه‌ی ۱٫۵۴ تا ۰٫۴۳ تغییر کرده و در حدود ۷۲٫۳۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ضریب ایمنی محصور سقف نیز در بازه‌ی ۲٫۴۱ تا ۱ تغییر کرده و در حدود ۵۸٫۳۵ درصد کاهش یافته است (نمودار ۵-۱۱: ه). ضریب ایمنی دیواره‌ی مغار نیز تا میدان تنش هیدروستاتیک روند افزایشی و پس از آن روند کاهشی نشان می‌دهد. ضریب ایمنی نامحصور دیواره به میزان ۲۹٫۳ درصد افزایش یافته و در بازه‌ی ۰٫۹۲ تا ۱٫۱۸ تا میدان تنش هیدروستاتیک تغییر می‌کند. ضریب ایمنی محصور دیواره نیز به میزان ۲۳٫۳ افزایش یافته و در بازه‌ی ۱٫۲ تا ۱٫۴۸ تغییر می‌کند. با افزایش مقدار تنش‌های افقی، ضریب ایمنی نامحصور دیواره در حدود ۱۸٫۵۶ درصد کاهش یافته و در بازه‌ی ۱٫۱۸ تا ۰٫۹۶ تغییر می‌کند. ضریب ایمنی محصور دیواره نیز در حدود ۱۶٫۹۴ درصد کاهش یافته و در بازه‌ی ۱٫۴۸ تا ۱٫۲۳ تغییر می‌کند (نمودار ۵-۱۱: و).



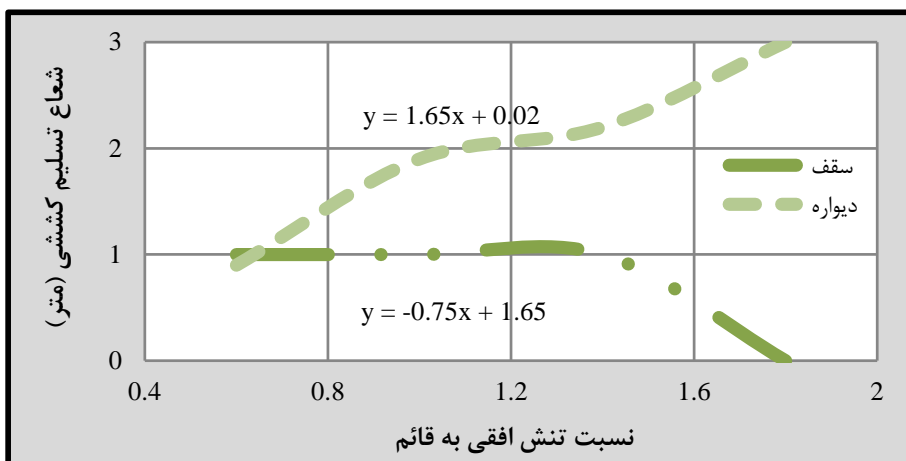
(الف)



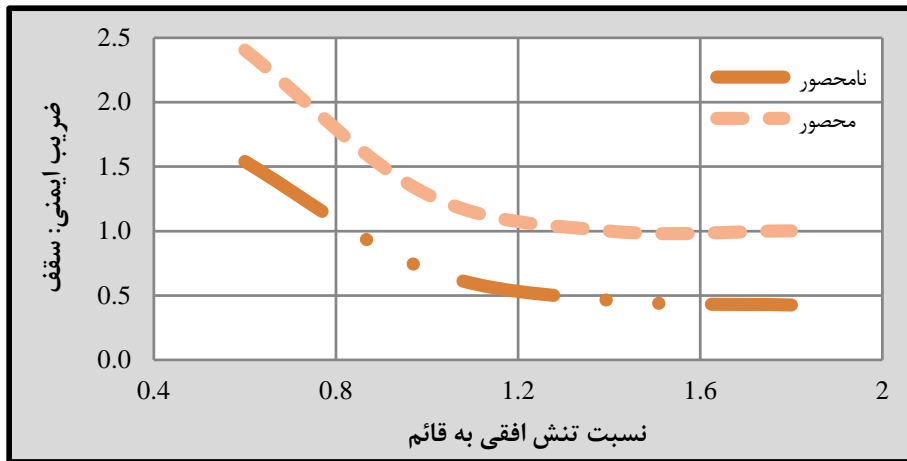
(ب)



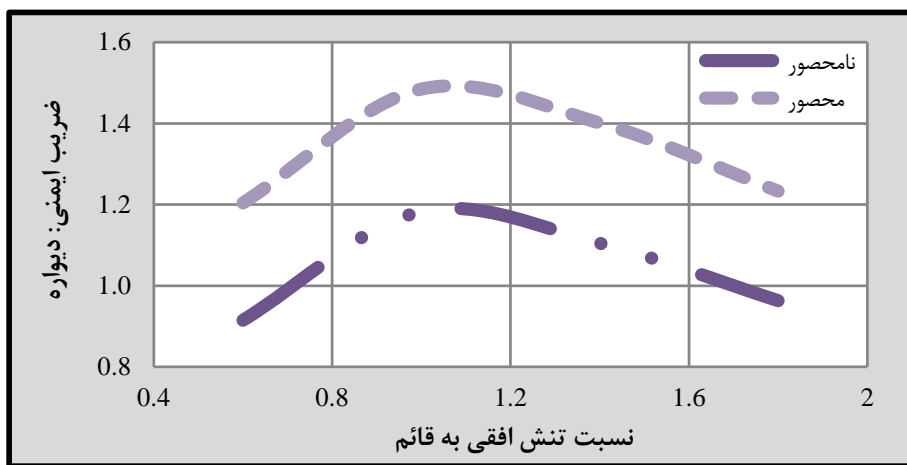
(ج)



(د)



(ه)



(و)

نمودار (۵-۱۱): بررسی پایداری مغار نسبت به میدان تنش ناحیه؛ (الف): تغییرات جابجایی (میلی متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ (و): تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ (ه): تغییرات ضریب ایمنی دیواره

۵-۵ تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای ماسه‌سنگی

پارامترهای طراحی و عملیاتی و نتایج مورد بررسی در این بخش نیز همانند حالت مغارهای مارنی

هستند و بازه‌ی تغییرات هر پارامتر در جدول ۵-۵ مشاهده می‌شود.

جدول (۵-۵): بازه‌ی تغییرات پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای ماسه‌سنگی

پارامتر	میزان تغییرات		آحاد	درصد افزایش
	حد بالا	حد پایین		
عمق قرارگیری	۱۸۰	۶۰	متر	+۲۰۰
نسبت ارتفاع به عرض	۱٫۵	۱	-	+۵۰
فشار ذخیره‌سازی	۰٫۱۷	۰	مگا پاسکال	-

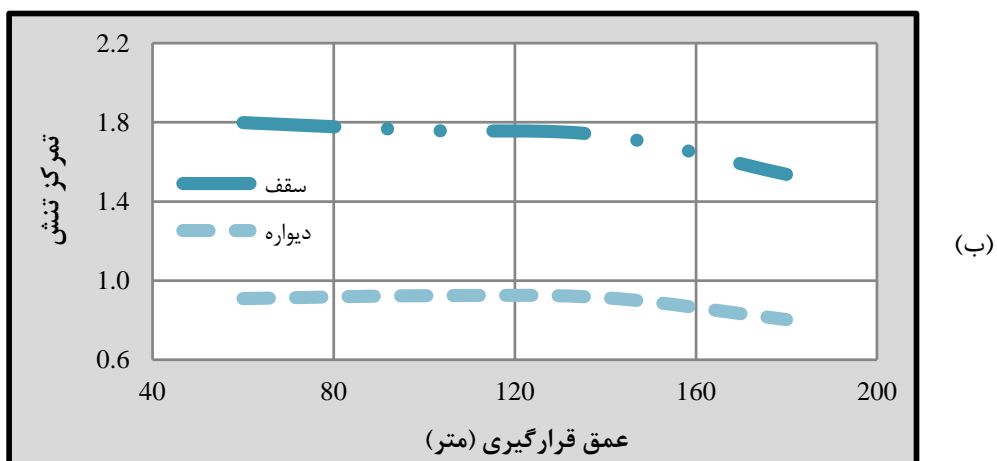
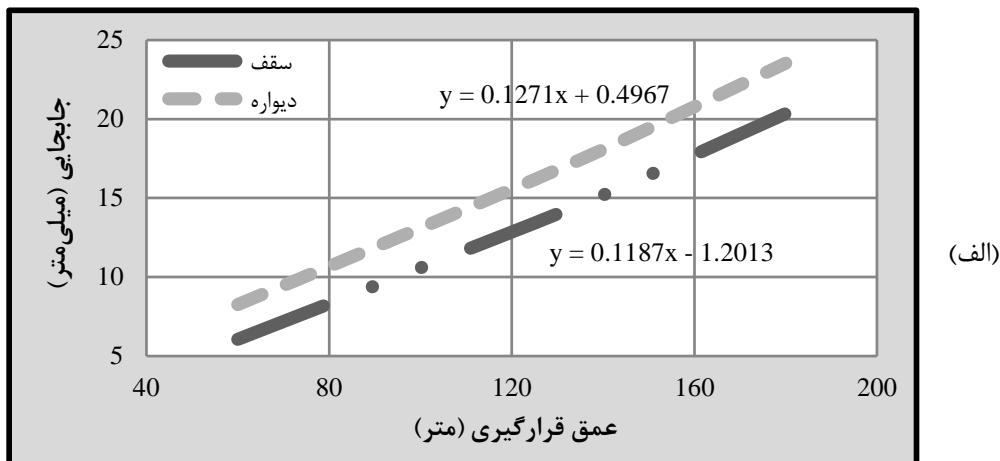
۵-۱-۵ عمق قرارگیری مغارها

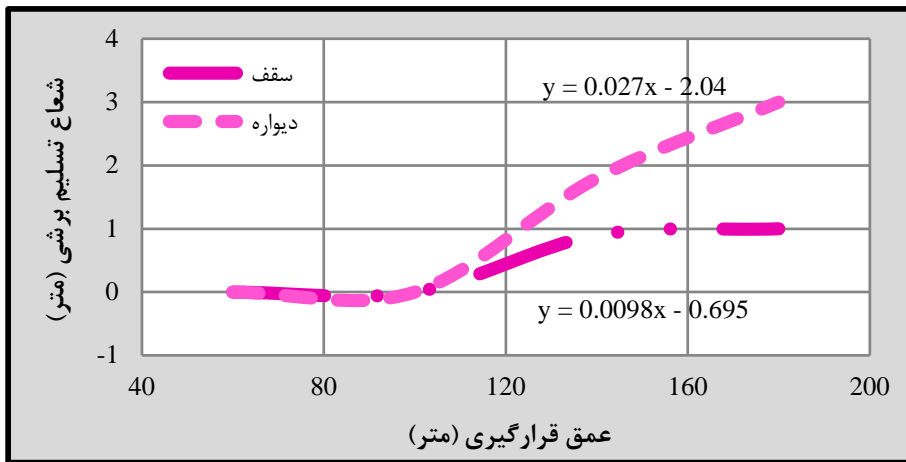
عمق قرارگیری مغارها، در بازه‌ای بین ۶۰ تا ۱۸۰ متر تغییر داده شده است. با افزایش ۲۰۰ درصدی عمق قرارگیری، جابجایی سقف مغار در بازه‌ی ۶/۰۶ میلی‌متر تا ۲۰/۳۵ میلی‌متر و جابجایی دیواره‌ی مغار در بازه‌ی ۸/۲۶ میلی‌متر تا ۲۳/۵۴ میلی‌متر تغییر کرده و رشدی ۲۳۶ درصدی و ۱۸۵ درصدی را نشان می‌دهد (نمودار ۵-۱۲: الف).

با افزایش عمق قرارگیری، تمرکز تنش در سقف مغار از ۱/۸ به ۱/۵۴ رسیده و به میزان ۱۴/۵۳ درصد کاهش می‌یابد. تمرکز تنش در دیواره‌ی مغار نیز از ۰/۹۱ به ۰/۸ رسیده و به میزان ۱۱/۶۷ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۱۲: ب). همچنین با افزایش عمق قرارگیری، گسترش ناحیه‌ی تحت تنش کششی در دیواره‌ی مغار به تدریج کاهش یافته و مقدار تنش کششی القایی دیواره از ۳۱/۴ کیلو پاسکال به ۹/۸۶ کیلو پاسکال کاهش می‌یابد.

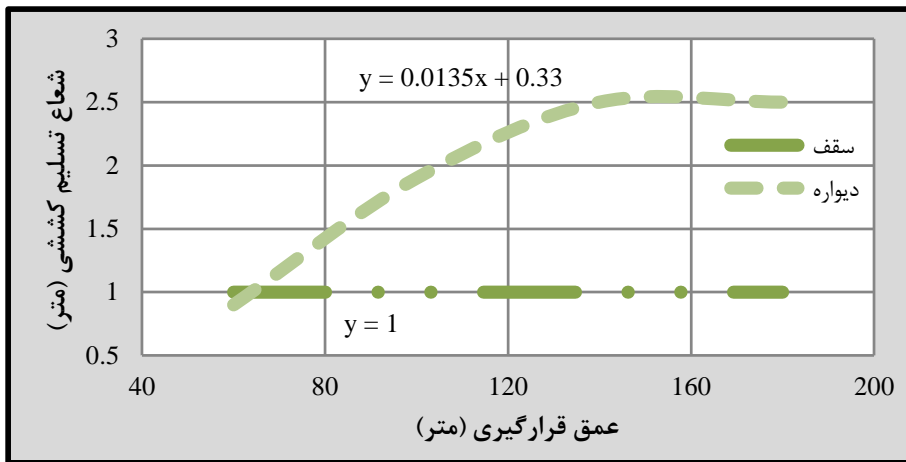
در اعماق کوچک‌تر و برابر با ۱۰۰ متر، در سقف و دیواره‌ی مغار هیچ ناحیه‌ی تسلیم برشی مشاهده نمی‌شود. به تدریج با افزایش عمق قرارگیری، تسلیم جداره‌ی مغار از گوشه‌های پایین و بالا، سقف، کف و در نهایت دیواره‌ی مغار شروع می‌شود. در اعماق بزرگ‌تر از ۱۰۰ متر، ضخامت ناحیه‌ی تسلیم برشی در سقف مغار در حدود ۱ متر است. ضخامت این ناحیه در دیواره نیز از ۱/۸ متر به ۳ متر رسیده و در حدود ۶۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در عمق ۱۸۰ متری، ناحیه‌ی وسیعی از اجزا فعال تسلیم برشی، در سرتاسر دیواره‌ی مغار مشاهده می‌شود (نمودار ۵-۱۲: ج). از سوی دیگر افزایش عمق قرارگیری مغارها تأثیری بر گسترش ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغار نداشته و شعاع این ناحیه در سقف مغار در حدود ۱ متر پیش‌بینی شده است. اما شعاع ناحیه‌ی تسلیم کششی در دیواره‌ی مغار از ۰/۹ متر به ۲/۵ متر رسیده و رشدی در حدود ۱۷۸ درصد را نشان می‌دهد. همچنین در تحلیل‌های انجام‌شده، تمام جداره‌ی مغار به استثنا گوشه‌ی پایین مغار در وضعیت تسلیم کششی قرار داشته، اما هیچ ناحیه‌ی تسلیم کششی فعالی در جداره‌ی مغار بوجود نیامده است (نمودار ۵-۱۲: د).

با توجه به افزایش مقدار بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین تنش اصلی در سقف و دیواره‌ی مغار، ضریب ایمنی محاسبه‌شده برای جداره‌ی مغار روند کاهشی نشان می‌دهد. در این مورد با افزایش عمق قرارگیری و جابجایی‌های جداره‌ی مغار، روند کاهشی ضریب ایمنی مورد انتظار است. ضریب ایمنی نامحصور سقف مغار بین ۱٫۱۴ تا ۰٫۴۴ و ضریب ایمنی محصور سقف در بازه‌ی ۱٫۸۴ تا ۱ تغییر می‌کند. به عبارت دیگر این ضرایب به ترتیب در حدود ۶۱٫۳۱ و ۴۵٫۴۶ درصد کاهش می‌یابند. همچنین ضریب ایمنی نامحصور دیواره نیز در بازه‌ی ۱٫۸۷ تا ۰٫۷۹ و ضریب ایمنی محصور دیواره از ۲٫۳۹ تا ۱٫۰۱ تغییر کرده و در حدود ۵۸ درصد کاهش می‌یابند (نمودار ۵-۱۲: ه و و).

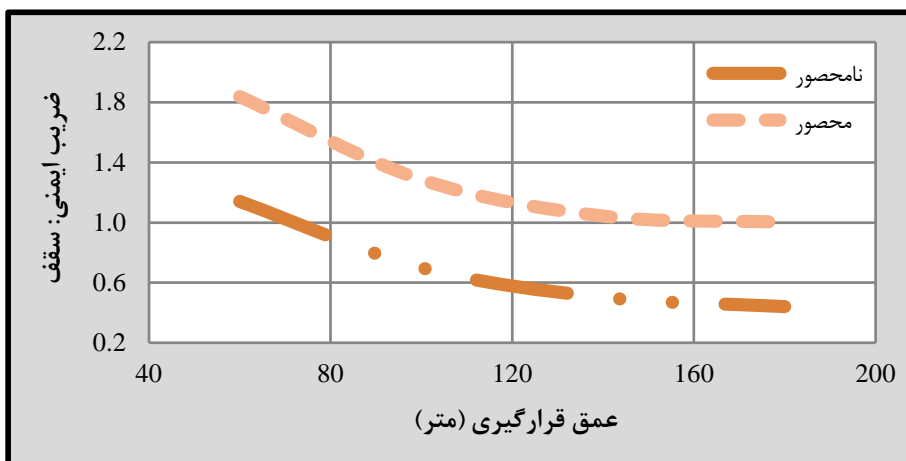




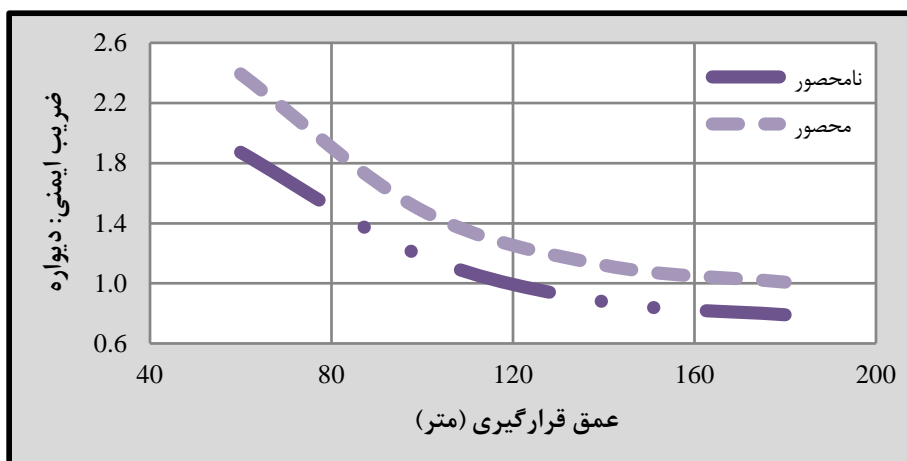
(ج)



(د)



(ه)



(و)

نمودار (۵-۱۲): بررسی پایداری مغار نسبت به عمق قرارگیری؛ (الف): تغییرات جابجایی (میلی متر)؛ (ب): تغییرات تمرکز تنش؛ (ج): تغییرات شعاع تسلیم برشی (متر)؛ (د): تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ (و): تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ (ه): تغییرات ضریب ایمنی دیواره

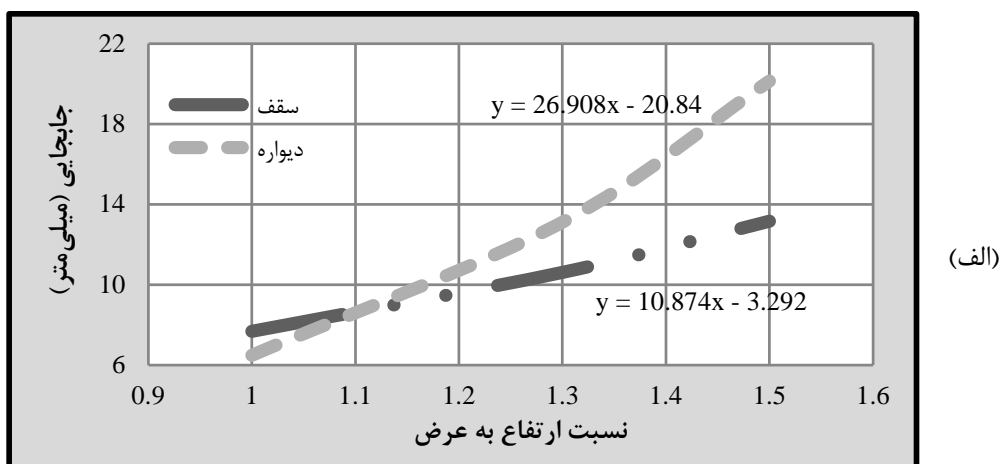
۵-۲-۵ ابعاد مغارهای ذخیره سازی

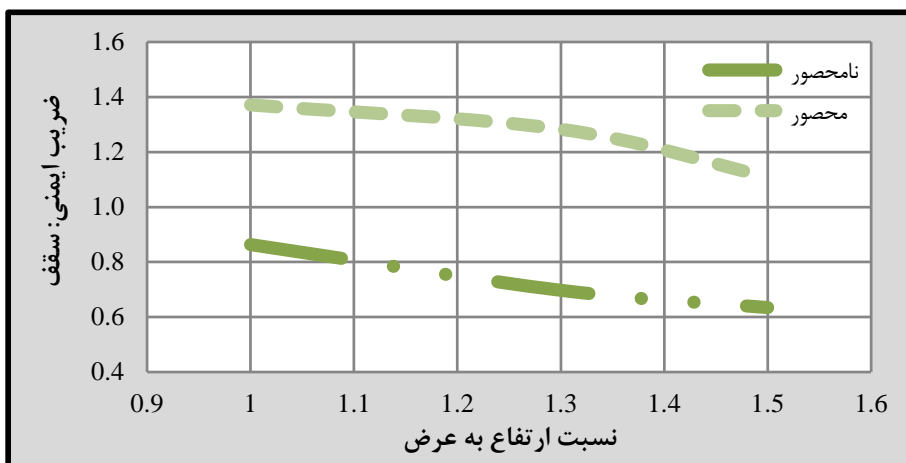
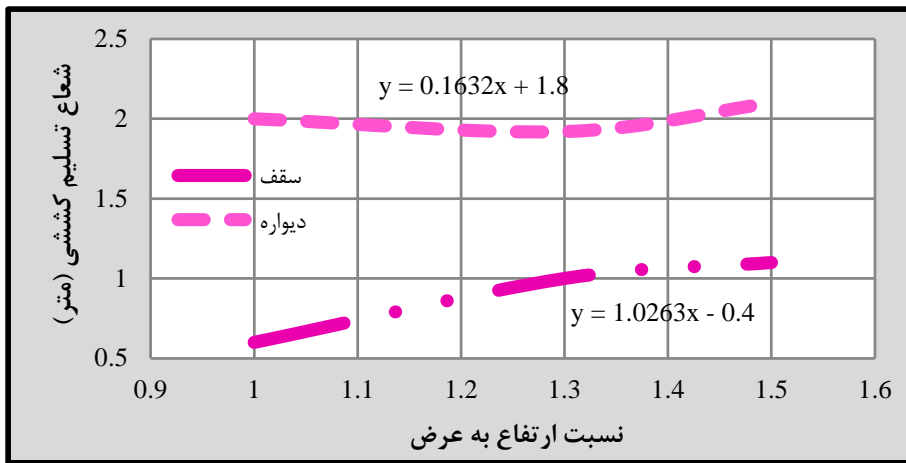
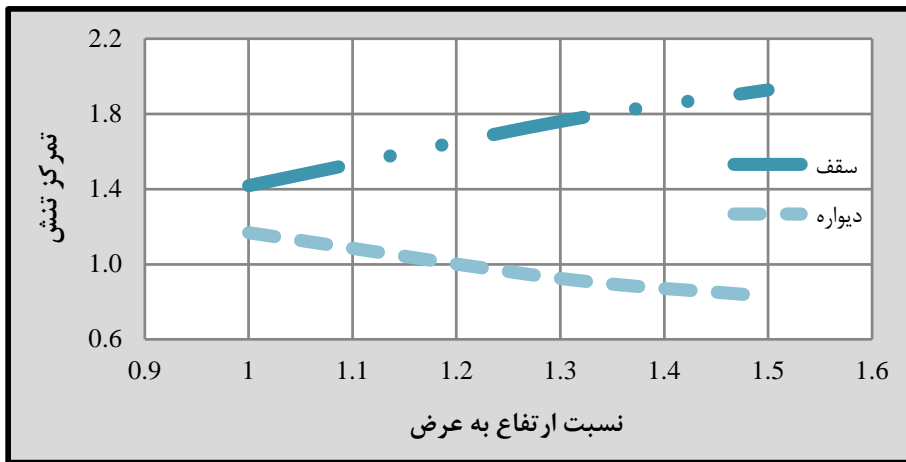
نسبت ارتفاع به عرض مغارهای ذخیره سازی در بازه ی ۱ تا ۱٫۵ تغییر داده شده و نتایج حاصل از این تغییرات بر میزان پایداری مغارها مورد تحلیل قرار گرفته است. با افزایش ۵۰ درصدی نسبت ابعاد، جابجایی سقف و دیواره ی مغار رشدی به میزان ۷۱٫۴۴ درصد و ۲۱۰٫۸ درصد را نشان داده اند. بازه ی تغییرات جابجایی قائم سقف بین ۷٫۶۸ تا ۱۳٫۱۶ میلی متر و بازه ی تغییرات جابجایی افقی دیواره بین ۶٫۴۸ تا ۲۰٫۱۴ میلی متر برآورد شده است (نمودار ۵-۱۳: الف).

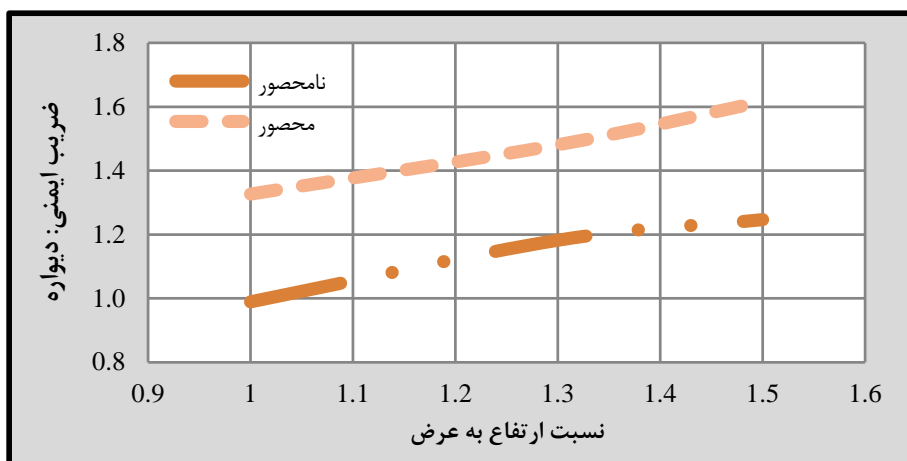
با بزرگ تر شدن ابعاد مغارها، میزان تمرکز تنش در سقف مغار در حدود ۳۵٫۹۱ درصد افزایش اما در دیواره ی مغار در حدود ۲۸٫۹۶ درصد کاهش می یابد. تمرکز تنش سقف بین ۱٫۴۲ تا ۱٫۹۳ و تمرکز تنش دیواره در بازه ی ۱٫۱۷ تا ۰٫۸۳ تغییر می کند (نمودار ۵-۱۳: ب). از سوی دیگر با افزایش ابعاد مغارها، گسترش ناحیه ی کشش در دیواره تا حدود زیادی افزایش می یابد؛ اما در کف مغار تغییر چندانی نشان نمی دهد. همچنین در نسبت ابعاد کوچک تر از ۱٫۳، دیواره ی مغار تحت تنش کششی قرار نمی گیرد. تنش کششی القایی در دیواره ی مغار بین ۳۲٫۷۸ کیلو پاسکال تا ۲۰٫۲۲ کیلو پاسکال متغیر است. تنش القایی در کف مغار نیز بین ۴٫۷۱ کیلو پاسکال تا ۳۱٫۸۶ کیلو پاسکال تغییر کرده و در حدود ۶٫۷۶ برابر می شود.

با افزایش ابعاد مغارها، گسترش ناحیه‌ی تسلیم برشی در گوشه‌های مغارها افزایش یافته اما در سقف، دیواره و کف، نواحی تسلیم برشی مشاهده نمی‌شود. در صورتی که تمام جداره‌ی مغارها به جز گوشه‌های پایینی در وضعیت تسلیم کششی قرار داشته و تعداد بسیار اندکی از نواحی فعال تسلیم کششی نیز در جداره‌ی مغارها مشاهده می‌شود. ضخامت ناحیه‌ی تسلیم کششی در سقف مغارها از ۰٫۶ متر به ۱٫۱ متر رسیده و در حدود ۸۳ درصد افزایش یافته و در دیواره‌ی مغارها، تقریباً به میزان ۲ متر بوده و در حدود ۵ درصد افزایش می‌یابد (نمودار ۵-۱۳: ج).

با توجه به افزایش مقدار بزرگ‌ترین تنش اصلی با افزایش ابعاد مغارها، ضریب ایمنی نامحصور سقف در بازه‌ی ۰٫۸۶ تا ۰٫۶۳ تغییر کرده و به میزان ۲۶٫۵۱ درصد کاهش می‌یابد. همچنین ضریب ایمنی محصور سقف نیز از ۱٫۳۷ به ۱٫۱۱ رسیده و در حدود ۱۹ درصد کاهش می‌یابد (نمودار ۵-۱۳: د). در صورتی که ضریب ایمنی نامحصور دیواره در بازه‌ی ۰٫۹۹ تا ۱٫۲۵ تغییر کرده و در حدود ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. ضریب ایمنی محصور دیواره نیز از ۱٫۳۳ به ۱٫۶۲ رسیده و به میزان ۲۱٫۸۴ درصد افزایش می‌یابد. دلیل این امر کاهش میزان تنش‌های اصلی در دیواره با افزایش ابعاد مغارها است (نمودار ۵-۱۳: ه).







(ه)

نمودار (۵-۱۳): بررسی پایداری مغار با تغییرات نسبت ابعاد: الف- تغییرات جابجایی (میلی متر)؛ ب- تغییرات تمرکز تنش؛ ج- تغییرات شعاع تسلیم کششی (متر)؛ د: تغییرات ضریب ایمنی سقف؛ و: تغییرات ضریب ایمنی دیواره

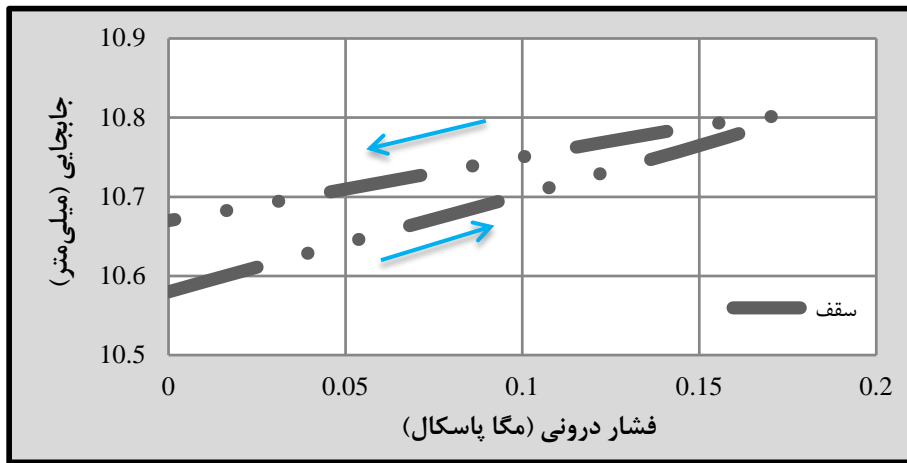
۳-۵-۵ فشار ذخیره سازی

با مد نظر قرار دادن فشار درونی ۰٫۱۷ مگا پاسکال با گرادیان ۸۶۳۰ پاسکال بر متر، جابجایی قائم سقف مغار، تنها به میزان ۲ درصد افزایش یافته و از ۱۰٫۵۸ میلی متر به ۱۰٫۸۰ میلی متر می رسد. پس از باربرداری و حذف فشار درونی، جابجایی سقف به مقدار ۱۰٫۶۷ میلی متر باز می گردد (نمودار ۵-۱۴: الف). برعکس، جابجایی افقی دیواره به میزان ۳ درصد کاهش یافته و از ۱۳٫۱ میلی متر به ۱۲٫۷۲ میلی متر می رسد. پس از باربرداری، جابجایی دیواره تقریباً به مقدار اولیه خود باز می گردد (نمودار ۵-۱۴: ب).

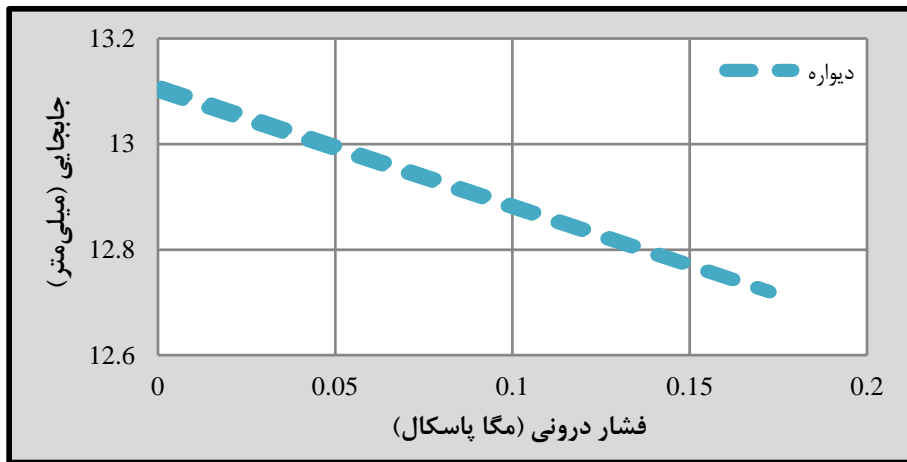
در هنگام بارگذاری متناوب، تمرکز تنش در سقف مغار، از ۱٫۷۶ به ۱٫۷۴ کاهش یافته و پس از باربرداری به مقدار اولیه خود باز می گردد (نمودار ۵-۱۴: ج). تمرکز تنش در دیواره ی مغار نیز از ۰٫۹۲ به ۰٫۹۴ افزایش یافته و سپس به مقدار ۰٫۹۳ باز می گردد (نمودار ۵-۱۴: د).

با اعمال فشار درونی، تنش کششی القایی در دیواره و کف مغار به طور کامل حذف شده و پس از باربرداری، دیواره و کف دوباره تحت تنش کششی قرار می گیرند. مقدار تنش کششی القایی پس از باربرداری به میزان ۳۲٫۷۸ کیلو پاسکال در دیواره و ۱۴٫۱۵ کیلو پاسکال در کف مغار است. از سوی دیگر فشار ذخیره سازی تأثیر بر وضعیت نواحی تسلیم برشی و کششی در جداره ی مغار نداشته

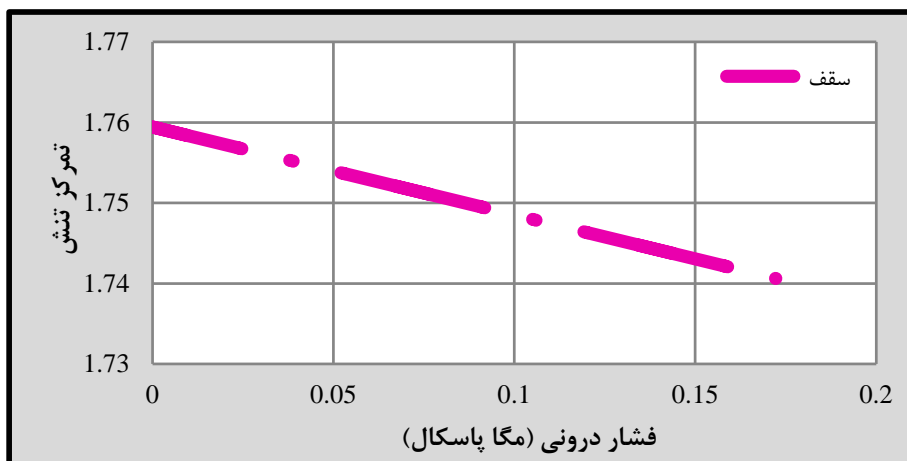
و تنها نواحی اندکی که در وضعیت تسلیم فعال برشی قرار داشته‌اند را حذف نموده است.



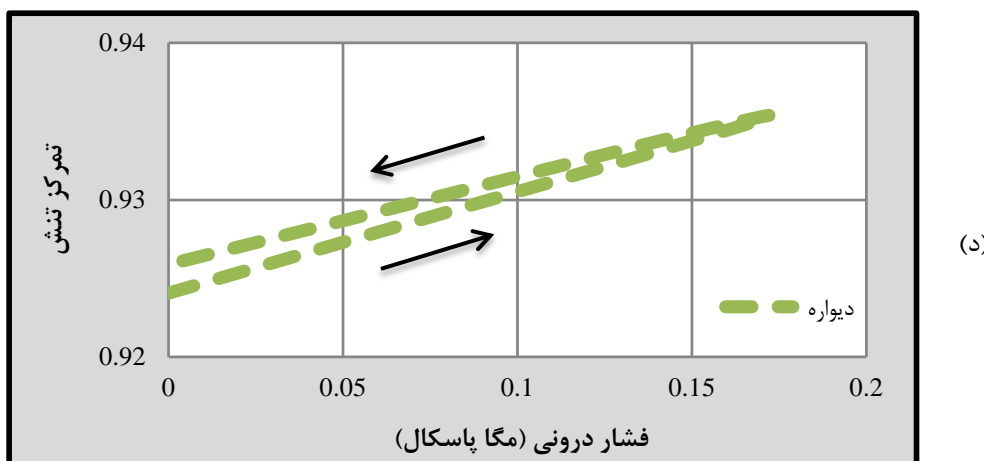
(الف)



(ب)



(ج)



نمودار (۵-۱۴): بررسی پایداری مغار در برابر بارگذاری متناوب؛ (الف): تغییرات جابجایی سقف مغار (میلی‌متر)؛ (ب): تغییرات جابجایی دیواره‌ی مغار (میلی‌متر)؛ (ج): تغییرات تمرکز تنش در سقف؛ (د): تغییرات تمرکز تنش در دیواره

۵-۶ جمع‌بندی نتایج بدست آمده از تحلیل‌های پارامتریک و حساسیت

در تحلیل‌های انجام‌شده، جابجایی‌های جداره‌ی مغار روند مناسب‌تری را در مقایسه با سایر معیارها (از قبیل تمرکز تنش و ضریب ایمنی یا گسترش ناحیه‌ی تسلیم) به خصوص در مدل‌های مارنی نشان داده‌اند. از این‌رو، برای تعیین تأثیرگذارترین پارامتر بر وضعیت پایداری مغارها، از شاخص جابجایی استفاده شده است. علاوه بر این، پارامترهای مورد بررسی مانند مقاومت‌ها یا مدول سنگ در بازه‌ای که با دیگر پارامترها متفاوت است، تغییر داده شده و نتایج حاصل نیز دارای روندی غیر خطی هستند. بنابراین جهت انجام تحلیل پارامتریک و حساسیت، تغییرات هر پارامتر در بازه‌ی ۲۰- تا ۲۰+ درصد، مورد بررسی قرار گرفته و شیب نمودار خطی حاصل از معادلات بدست آمده برای هر کدام از نتایج، مهم‌ترین پارامترها را تعیین می‌نماید.

۵-۶-۱ مغارهای مارنی

در ابتدا برای مرور و جمع‌بندی نتایج بدست آمده، برآوردهای انجام‌شده برای میزان جابجایی‌ها، ضریب تمرکز تنش و گسترش ناحیه‌ی تسلیم برشی و کششی همچنین درصد تغییرات هر کدام برای سقف و دیواره‌ی مغارها در جدول‌های ۵-۶ تا ۵-۱۱ آورده شده است. جدول‌های ۵-۶ تا ۵-۸ برای تحلیل پارامتریک و جدول‌های ۵-۹ تا ۵-۱۱ برای تحلیل حساسیت مغارهای مارنی هستند. در این

جدول‌ها منظور از حد پایین، نقطه‌ی ابتدایی تغییرات و منطبق با کوچک‌ترین مقدار پارامتر مورد نظر مانند مقاومت یا عمق در جدول‌های ۱-۵ و ۳-۵ است.

جدول (۵-۶): تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در سقف

پارامتر		میزان تغییرات		جابجایی (سانتی‌متر)		ضریب تمرکز تنش		شعاع برش (متر)		شعاع کشش (متر)	
		حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
مقاومت برشی		۱۴۲	۶۱٫۹۳	۰٫۲۵	۰٫۳۷	۲۶	۸	۳	۱٫۵		
مقاومت کششی		۸۴	۸۴	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۱۲	۱۲	۲	۲		
مدول شکل‌پذیری		۱۰۴٫۹	۶۰٫۰۹	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۱۲	۱۲	۲	۲		
نسبت تنش‌ها		۶۸٫۱۹	۱۴۵	۰٫۳	۰٫۱۶	۶	۲۳	۲	۲		

جدول (۵-۷): تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در دیواره

پارامتر		میزان تغییرات		جابجایی (سانتی‌متر)		ضریب تمرکز تنش		شعاع برش (متر)		شعاع کشش (متر)	
		حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
مقاومت برشی		۱۴۷٫۸	۶۷٫۳۵	۰٫۲	۰٫۲۹	۲۷	۱۵	۵٫۵	۴		
مقاومت کششی		۹۶٫۱۶	۹۱٫۱۳	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۱۶٫۵	۱۶٫۵	۵٫۵	۴٫۵		
مدول شکل‌پذیری		۱۱۶	۶۶٫۴۷	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۱۶٫۵	۱۶٫۵	۴٫۵	۴٫۵		
نسبت تنش‌ها		۷۸	۱۴۶٫۴	۰٫۲۴	۰٫۱۴	۱۶٫۵	۱۶٫۵	۴٫۵	۶٫۵		

جدول (۵-۸): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی در سقف و دیواره

پارامتر		میزان تغییرات		جابجایی		ضریب تمرکز تنش		شعاع برش		شعاع کشش	
		سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره
مقاومت برشی		-۵۶	-۵۴	+۴۵	+۴۵	-۶۹	-۴۵	-۵۰	-۲۷		
مقاومت کششی		-	-۵	-	-	-	-	-	-۱۸		
مدول شکل‌پذیری		-۴۳	-۴۳	-	-	-	-	-	-		
نسبت تنش‌ها		+۱۱۳	+۸۸	-۴۵	-۴۴	+۲۸۰	-	-	+۴۴		

با نگاهی به جدول ۵-۸، به نظر می‌رسد که نسبت تنش‌ها حساس‌ترین پارامتر مغارهای مارنی است؛ اما جدول ۱-۵ نیز نشان می‌دهد که نسبت تنش‌ها در بازه‌ی ۲۰۰ درصدی (بیش‌ترین بازه) تغییر می‌کند. بنابراین طبیعی است که نسبت تنش‌ها بیش‌ترین اثر را بر میزان جابجایی‌ها یا گسترش

ناحیه‌ی تسلیم نشان دهد. در فرآیند تحلیل پارامتریک، حساس‌ترین پارامتر باید در یک بازه‌ی مساوی با سایر پارامترها، بیش‌ترین اثر را بر میزان جابجایی‌ها یا هر شاخص دیگر نشان دهد. با توجه به این توضیحات و همچنین موارد بیان‌شده در بخش ۵-۶، در مرحله‌ی بعد با رسم نمودارهای خطی در بازه‌ای یکسان برای تمام پارامترها، تلاش می‌شود تا نتایج بدست آمده استاندارد شده و شیب خط حاصل مهم‌ترین پارامتر را تعیین خواهد نمود.

جدول (۵-۹): تحلیل حساسیت مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در سقف

شعاع کشش (متر)		شعاع برش (متر)		ضریب تمرکز تنش		جابجایی (سانتی‌متر)		میزان تغییرات پارامتر
						حد بالا	حد پایین	
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	عمق قرارگیری ابعاد مغارها بارگذاری متناوب
۴	۱	۳۲	۸	۰٫۱۶	۰٫۴۹	۳۲۷	۳۱٫۳۱	
۵	۱	۲۰	۷	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۱۲۹٫۶	۴۷٫۰۵	
۲	۲	۱۲	۱۲	۰٫۳۱	۰٫۳۱	۸۴٫۴۲	۸۴٫۰۶	

جدول (۵-۱۰): تحلیل حساسیت مغارهای مارنی: نقطه‌ی شاهد در دیواره

شعاع کشش (متر)		شعاع برش (متر)		ضریب تمرکز تنش		جابجایی (سانتی‌متر)		میزان تغییرات پارامتر
						حد بالا	حد پایین	
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	عمق قرارگیری ابعاد مغارها بارگذاری متناوب
۵٫۵	۴٫۵	۳۱٫۵	۱۲٫۵	۰٫۱۳	۰٫۳۷	۳۴۳	۳۵٫۱۶	
۷	۱٫۶	۲۶	۹	۰٫۲۰	۰٫۲۶	۱۵۶٫۶	۴۱٫۸۴	
۴٫۵	۴٫۵	۱۶٫۵	۱۶٫۵	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۹۳٫۵۲	۹۳٫۱۴	

جدول (۵-۱۱): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مغارهای مارنی در سقف و دیواره

شعاع کشش		شعاع برش		ضریب تمرکز تنش		جابجایی		میزان تغییرات پارامتر
دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	
+۲۲	+۳۰۰	+۱۵۲	+۳۰۰	-۶۶	-۶۷	+۸۷۶	+۹۴۴	عمق قرارگیری
+۳۴۰	+۴۰۰	+۱۸۹	+۱۸۶	-۲۴	-	+۲۷۴	+۱۷۵	ابعاد مغارها
-	-	-	-	-	-	+۰٫۴۱	+۰٫۴۳	بارگذاری متناوب

با توجه‌ی مشابه برای جدول ۵-۱۱ نیز به نظر می‌رسد که عمق قرارگیری مغارها، مهم‌ترین

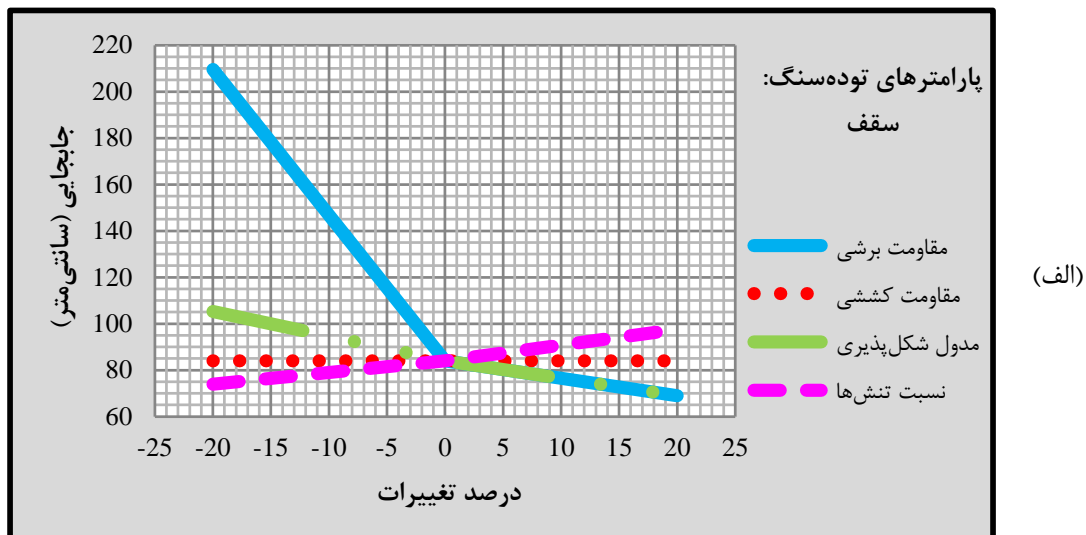
پارامتر در تحلیل حساسیت مغارهای مارنی است؛ در صورتی که دلیل این امر، بزرگ‌تر در نظر گرفته شدن بازه‌ی تغییرات عمق قرارگیری مغارها است (جدول ۵-۳).

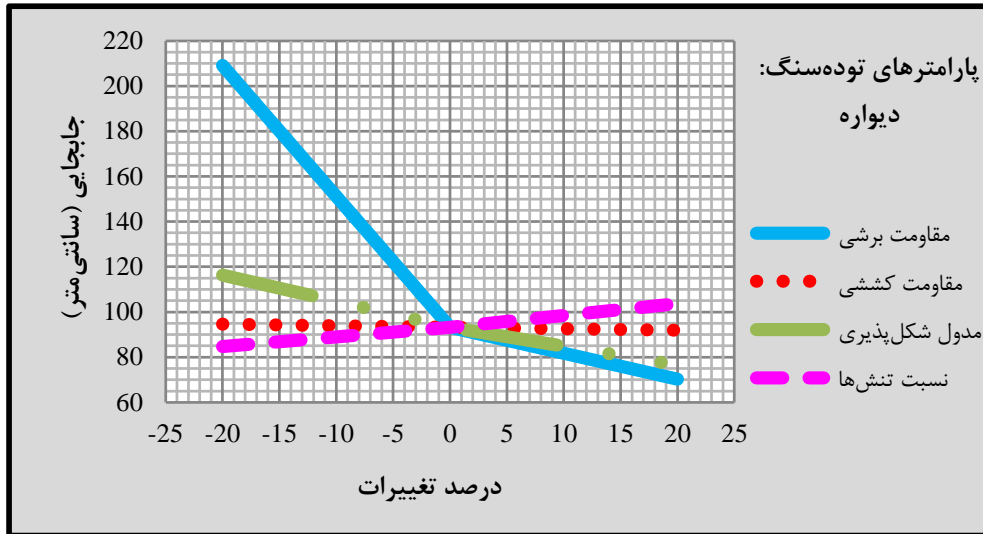
پس از بررسی نمودارهای خطی بدست آمده برای جابجایی‌های سقف و دیواره‌ی مغارها، مقاومت برشی مارن به عنوان حساس‌ترین داده‌ی تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی انتخاب شده است. با توجه به نمودارهای ۵-۱۵: الف و ب برای سقف و دیواره‌ی مغار، مقاومت برشی بیش‌ترین و مقاومت کششی کمترین شیب تغییرات را نشان داده‌اند. پس از مقاومت برشی، مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها دارای شیب تغییرات بزرگ‌تری نسبت به مقاومت کششی مارن هستند. همچنین نمودارهای مقاومت برشی و مدول شکل‌پذیری در طرف مثبت نمودار سقف، دارای شیب یکسان بوده و بر هم منطبق هستند. البته شیب تغییرات مقاومت برشی در قسمت منفی نمودار بسیار بیش‌تر از قسمت مثبت آن بوده و مقاومت برشی دارای رابطه‌ای معکوس با میزان جابجایی جداره و ناپایداری مغار است. بدین معنا که با کاهش مقدار مقاومت برشی مارن، مغار به مقدار زیادی همگرا شده و فرو می‌ریزد. اما با بهبود خواص مقاومت برشی مارن، میزان ناپایداری در جداره‌ی مغار نیز کاهش می‌یابد. مدول شکل‌پذیری نیز دارای روندی مشابه با مقاومت برشی است. در تحلیل‌های انجام‌شده، نسبت تنش‌ها دارای روندی معکوس نسبت به سایر پارامترها بوده و با افزایش میزان تنش‌های افقی ناپایداری مغار تشدید شده، اما کاهش مقدار تنش‌های افقی سبب کاهش جابجایی‌ها و افزایش پایداری مغار می‌شود. با توجه به توضیحات بیان‌شده، حساس‌ترین پارامترهای توده‌سنگ مارنی به ترتیب عبارتند از:

- ۱ مقاومت برشی: دارای نسبت مستقیم با پایداری مغار
- ۲ مدول شکل‌پذیری: دارای نسبت مستقیم با پایداری مغار
- ۳ نسبت تنش‌ها: دارای نسبت معکوس با پایداری مغار
- ۴ مقاومت کششی: بدون تأثیر

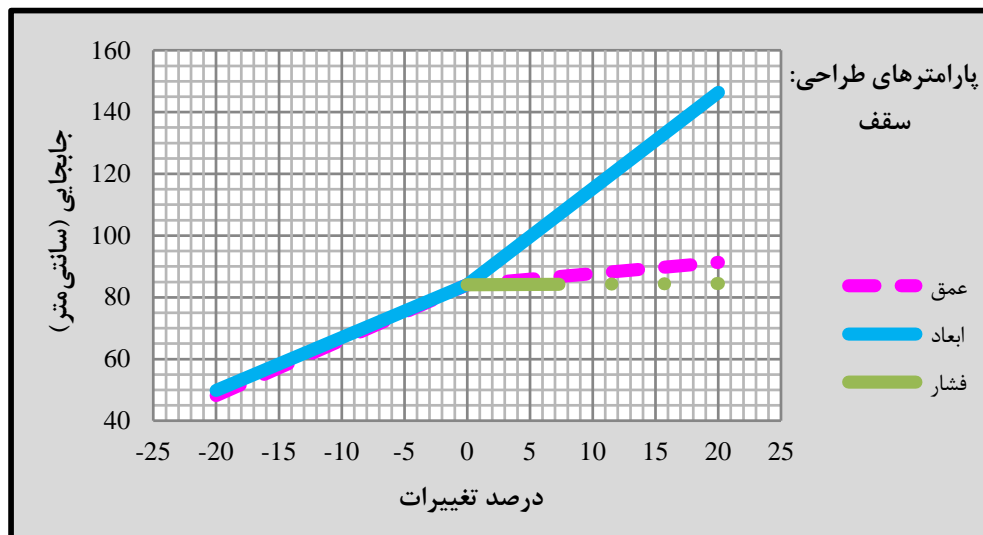
از میان پارامترهای طراحی و عملیاتی، ابعاد مغارها دارای بیشترین شیب بوده و مهم‌تر از سایر پارامترها است. همچنین شیب تغییرات در طرف مثبت نمودار، بیش‌تر از طرف از منفی نمودار بوده و پارامترهای طراحی دارای روندی یکسان و مستقیم با جابجایی جداره و ناپایداری مغار هستند. در قسمت منفی نمودار سقف، نمودارهای ابعاد و عمق قرارگیری، تقریباً بر هم منطبق بوده و روندی یکسان را نشان می‌دهند. علاوه بر این افزایش عمق قرارگیری تأثیر بسیار بیش‌تری بر دیواره‌ی مغار در مقایسه با سقف آن نشان می‌دهد (نمودار ۵-۱۵: ج و د). با توجه به توضیحات بیان‌شده، حساس-ترین پارامترهای طراحی و عملیاتی در توده‌سنگ مارنی به ترتیب عبارتند از:

- ۱ ابعاد مغارها: دارای نسبت معکوس با پایداری مغار
- ۲ عمق قرارگیری: دارای نسبت معکوس با پایداری مغار
- ۳ فشار ذخیره‌سازی: بدون تأثیر

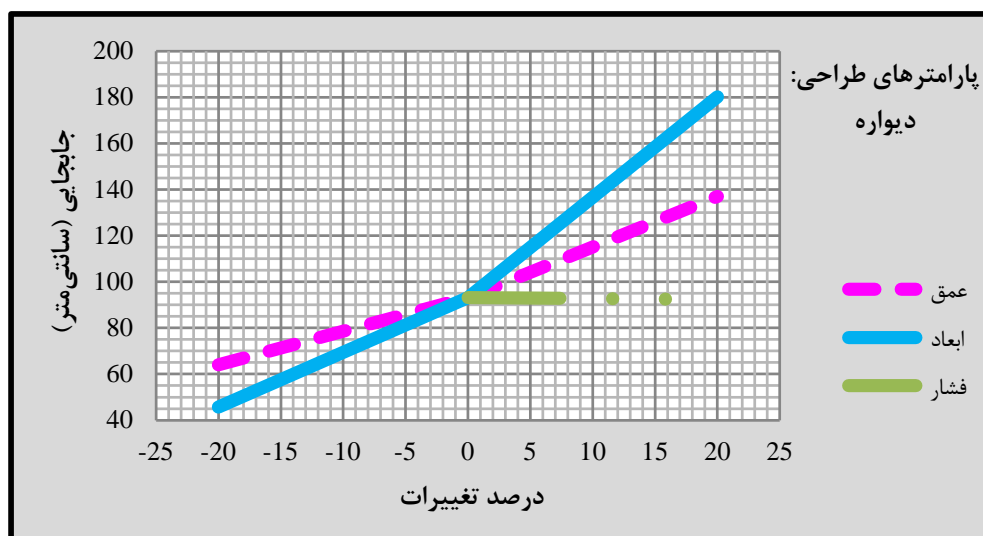




(ب)



(ج)



(د)

نمودار (۵-۱۵): تحلیل پارامتریک (الف و ب) و تحلیل حساسیت (ج و د) مغارهای مارنی

۵-۶-۲ مغارهای ماسه‌سنگی

همانند مغارهای مارنی، در این بخش نیز برای جمع‌بندی نتایج، برآوردهای انجام‌شده برای جابجایی-ها، ضریب تمرکز تنش و گسترش ناحیه‌ی تسلیم، همچنین درصد تغییرات هر کدام برای سقف و دیواره‌ی مغارها در جدول‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۷ آورده شده است. جدول‌های ۵-۱۲ تا ۵-۱۴ برای تحلیل پارامتریک و ۵-۱۵ تا ۵-۱۷ برای تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی هستند.

جدول (۵-۱۲): تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در سقف

شعاع کشش (متر)		شعاع برش (متر)		ضریب تمرکز تنش		جابجایی (میلی‌متر)		میزان تغییرات	پارامتر
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین		
۱	۱	۰	۱	۱٫۷۶	۱٫۷۵	۱۰٫۵۷	۱۰٫۶۵	مقاومت برشی	
۱	۱	۰	۰	۱٫۷۶	۱٫۷۶	۱۰٫۵۷	۱۰٫۶	مقاومت کششی	
۱	۱	۰	۰	۱٫۷۶	۱٫۷۶	۷٫۵۶	۱۷٫۶۳	مدول شکل‌پذیری	
۰	۱	۱	۰	۱٫۶۰	۰٫۸	۸٫۳۹	۱۱٫۹	نسبت تنش‌ها	

جدول (۵-۱۳): تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در دیواره

شعاع کشش (متر)		شعاع برش (متر)		ضریب تمرکز تنش		جابجایی (میلی‌متر)		میزان تغییرات	پارامتر
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین		
۱٫۹	۱٫۹	۰	۱٫۹	۰٫۹۲	۰٫۹۱	۱۳٫۱۰	۱۳٫۱۲	مقاومت برشی	
۰٫۹	۳	۰	۰	۰٫۹۲	۰٫۹۲	۱۲٫۹۸	۱۳٫۳۸	مقاومت کششی	
۱٫۹	۱٫۹	۰	۰	۰٫۹۲	۰٫۹۲	۹٫۳۶	۲۱٫۸۴	مدول شکل‌پذیری	
۳	۰٫۹	۳	۰	۰٫۶۳	۱٫۱۹	۲۵٫۸۳	۷٫۲۰	نسبت تنش‌ها	

جدول (۵-۱۴): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی در سقف و دیواره

شعاع کشش		شعاع برش		ضریب تمرکز تنش		جابجایی		میزان تغییرات	پارامتر
دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف		
-	-	-۱۰۰	-۱۰۰	+۱٫۵۲	+۰٫۵۶	-۰٫۱۵	-۰٫۷۵	مقاومت برشی	
-۷۰	-	-	-	+۰٫۷۲	-۰٫۱۶	-۳	-۰٫۲۸	مقاومت کششی	
-	-	-	-	-	-	-۵۷	-۵۷	مدول شکل‌پذیری	
+۲۳۳	-۱۰۰	*	*	-۴۷	+۱۰۱	+۲۵۹	-۳۰	نسبت تنش‌ها	

جدول (۵-۱۵): تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در سقف

میزان تغییرات		جابجایی (میلی‌متر)		ضریب تمرکز تنش		شعاع برش (متر)		شعاع کشش (متر)	
		حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
عمق قرارگیری	۶۰۶	۲۰۳۵	۱۸۰	۱۵۴	۱	۱	۱	۱	
ابعاد مغارها	۷۶۸	۱۳۱۶	۱۴۲	۱۹۳	۰	۰	۰	۰	
بارگذاری متناوب	۱۰۵۸	۱۰۶۷	۱۷۶	۱۷۶	۰	۰	۰	۰	

جدول (۵-۱۶): تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی: نقطه‌ی شاهد در دیواره

میزان تغییرات		جابجایی (میلی‌متر)		ضریب تمرکز تنش		شعاع برش (متر)		شعاع کشش (متر)	
		حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
عمق قرارگیری	۸۲۶	۲۳۵۴	۰۹۱	۰۸	۰	۰	۳	۰	
ابعاد مغارها	۶۴۸	۲۰۱۴	۱۱۷	۰۸۳	۰	۰	۰	۲	
بارگذاری متناوب	۱۳۱۰	۱۳۱۱	۰۹۲	۰۹۳	۰	۰	۰	۲	

جدول (۵-۱۷): درصد تغییرات نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی در سقف و دیواره

میزان تغییرات	جابجایی		ضریب تمرکز تنش		شعاع برش		شعاع کشش	
	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف	دیواره	سقف
عمق قرارگیری	+۲۳۶	+۱۸۵	-۱۵	-۱۲	*	*	-	+۱۷۸
ابعاد مغارها	+۷۱	+۲۱۱	+۳۶	-۲۹	-	-	-	+۸۳
بارگذاری متناوب	+۰/۸۵	-	-	-	-	-	-	-

با بررسی جدول ۵-۱۴ به نظر می‌رسد که نسبت تنش‌ها مهم‌ترین داده‌ی تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی است (با در نظر گرفتن تمامی عوامل مانند ناحیه‌ی تسلیم)؛ هر چند که مدول سنگ نیز دارای تأثیر مشهودی بر جابجایی و ناپایداری سقف مغار است. همچنین عمق قرارگیری نیز به عنوان تأثیرگذارترین پارامتر در تحلیل حساسیت مغارهای ماسه‌سنگی معرفی شده، در عین حال ابعاد مغارها نیز نقش مهمی را در جابجایی دیواره‌ی مغار ایفا می‌نماید (جدول ۵-۱۷). با توضیحی مشابه تحلیل مغارهای مازنی و با رسم نمودارهای خطی برای حالت ماسه‌سنگ، مشاهده می‌شود که مدول شکل‌پذیری ماسه‌سنگ بیش‌ترین میزان تغییرات را داشته و بیش‌ترین تأثیر را بر میزان

جابجایی‌ها و پایداری مغار نشان می‌دهد. بر خلاف مدل‌های مارنی، شیب تغییرات مدول توده‌سنگ تنها به میزان اندکی در قسمت مثبت نمودار کاهش یافته است (در مقایسه با مقاومت برشی به عنوان حساس‌ترین پارامتر مارن). پس از آن نسبت تنش‌ها دارای بیش‌ترین میزان تأثیر است؛ در صورتی که مقاومت‌های برشی و کششی ماسه‌سنگ دارای تغییرات بسیار اندکی هستند. در مدل‌های مارنی با افزایش مقدار تنش‌های افقی، جابجایی سقف و دیواره، هر دو افزایش یافته؛ اما در مدل‌های ماسه-سنگی با افزایش مقدار تنش‌های افقی، جابجایی سقف، روند معکوسی را نشان داده و کاهش می‌یابد. در دیواره‌ی مغار، تغییرات نسبت تنش‌ها دارای شیبی نزدیک به شیب تغییرات مدول ماسه‌سنگ بوده و در قسمت مثبت نمودار دیواره، شیب آن کمی بیش‌تر از شیب مدول شکل‌پذیری است (نمودار ۵-۱۶: الف و ب). در مجموع مهم‌ترین پارامترهای ماسه‌سنگ به ترتیب عبارتند از:

۱ مدول شکل‌پذیری: دارای رابطه‌ی مستقیم با پایداری مغار

۲ نسبت تنش‌ها: دارای رابطه‌ی مستقیم با پایداری مغار در سقف و رابطه‌ی معکوس با پایداری مغار در دیواره

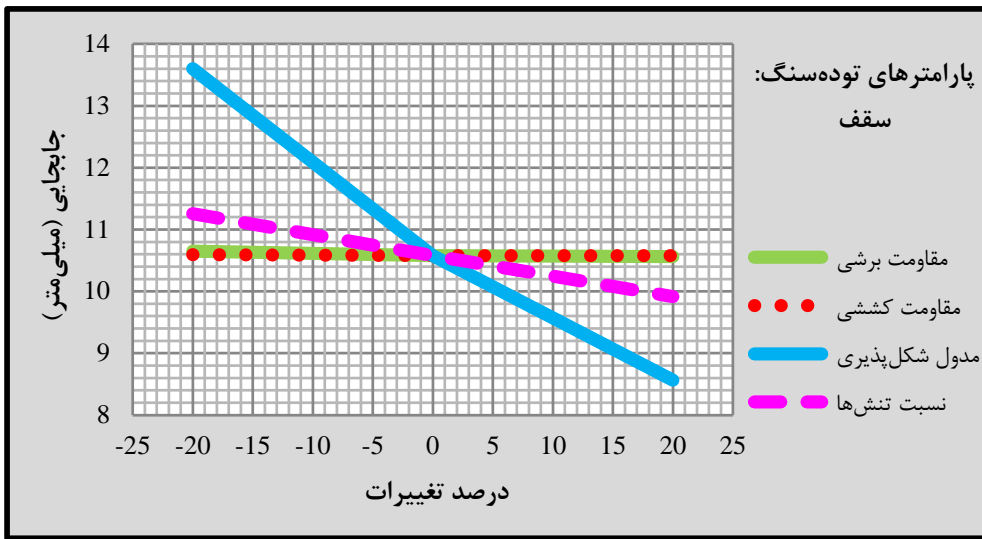
۳ مقاومت برشی و کششی: بدون تأثیر

در تحلیل حساسیت مدل‌های ماسه‌سنگی، ابعاد مغارها دارای بیش‌ترین شیب تغییرات در مقایسه با دو پارامتر طراحی دیگر است. همچنین تأثیر تغییر ابعاد در دیواره‌ی مغار بیش‌تر از سقف آن است. شیب تغییرات پارامترها در طرف مثبت نمودار، بیش‌تر از طرف از منفی آن بوده و ابعاد و عمق قرارگیری دارای رابطه‌ی مستقیم با جابجایی جداره و ناپایداری مغار هستند (نمودار ۵-۱۶: ج و د). با توجه به این توضیحات، حساس‌ترین پارامترهای طراحی و عملیاتی ماسه‌سنگ به ترتیب عبارتند از:

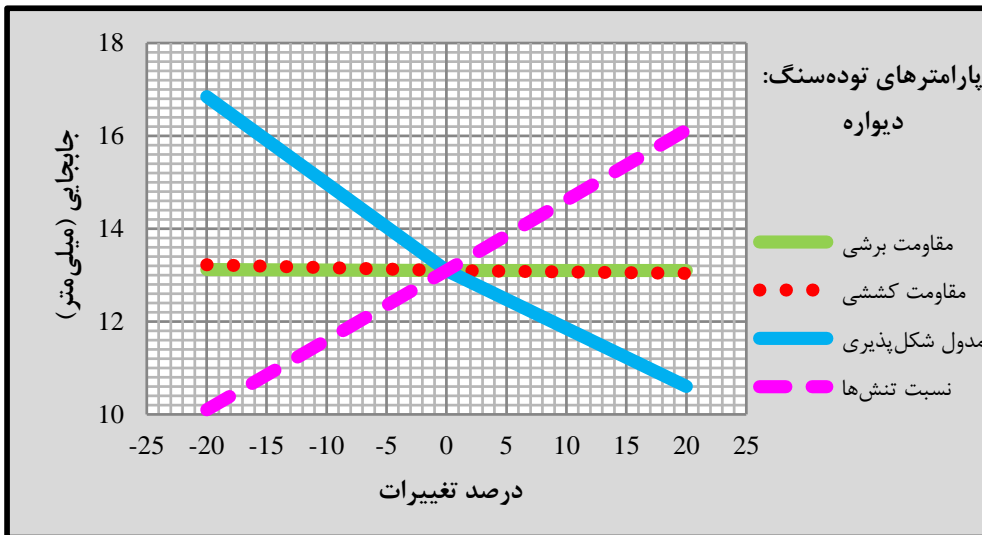
۱ ابعاد مغارها: دارای نسبت معکوس با پایداری مغار

۲ عمق قرارگیری: دارای نسبت معکوس با پایداری مغار

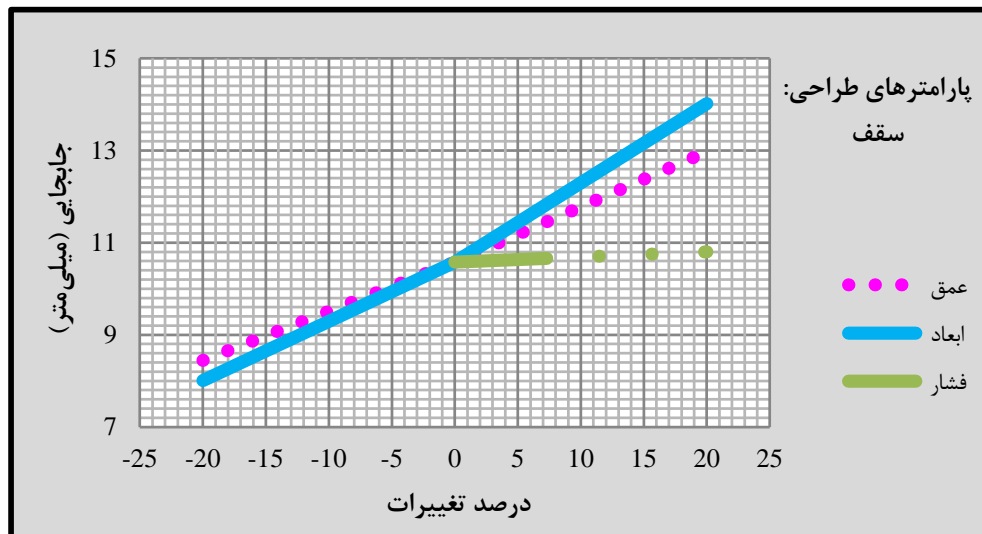
۳ فشار ذخیره‌سازی: بدون تأثیر



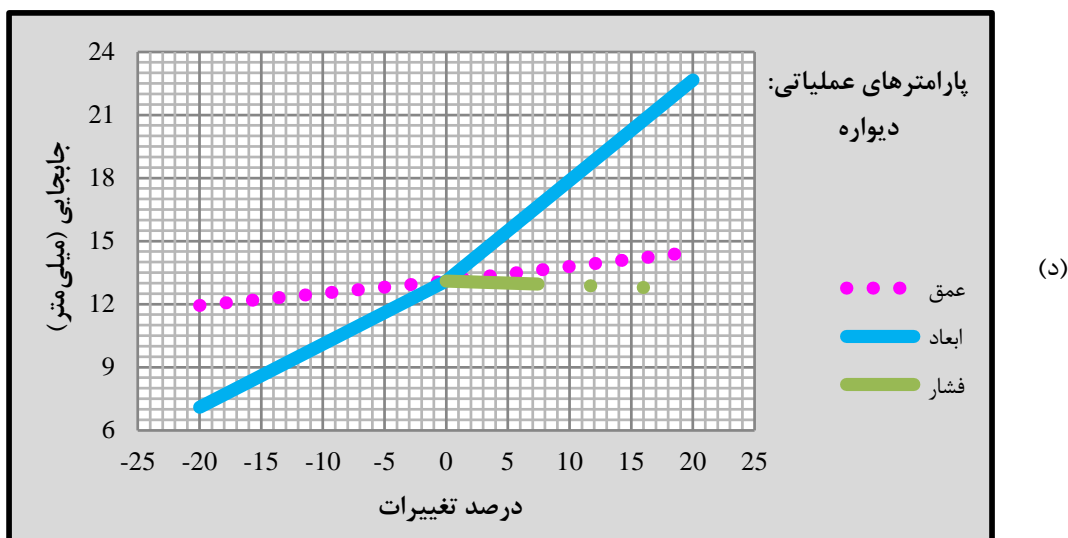
(الف)



(ب)



(ج)



نمودار (۵-۱۶): تحلیل پارامتریک (الف و ب) و تحلیل حساسیت (ج و د) مغارهای ماسه‌سنگی

۷-۵ نتیجه‌گیری

در این فصل، تحلیل جامعی بر روی پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ ساختگاه گناوه و همچنین تعدادی از پارامترهای طراحی و عملیاتی مغارهای ذخیره‌سازی انجام شده است. در حالت توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مارن، حساس‌ترین داده‌های تحلیل پارامتریک، مقاومت برشی و مدول شکل‌پذیری هستند و در حالت توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی ماسه‌سنگ، مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها، به عنوان حساس‌ترین پارامترهای مقاومتی انتخاب شده‌اند. علاوه بر این در تحلیل حساسیت انجام‌شده، ابعاد مغارها دارای بیش‌ترین سطح تأثیر بر میزان پایداری مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی است. به منظور جمع‌بندی تحلیل‌ها و ارائه‌ی نتایج بیان‌شده، از شاخص جابجایی در سقف و دیواره‌ی مغارها استفاده شده است. در تحلیلی دیگر بر روی گسترش ناحیه‌ی تسلیم مارن، به عنوان شاخص مهم دیگر در ناپایداری مغارهای مارنی نیز نتایجی مشابه با همین حالات بدست آمده که از بیان آن‌ها اجتناب شده است.

در مجموع می‌توان ۳ پارامتر مقاومت برشی، مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها را به عنوان کلیدی‌ترین پارامترهای توده‌سنگ ساختگاه گناوه معرفی نمود. بنابراین در مرحله‌ی مطالعات تکمیلی با بکارگیری آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا باید مقادیر صحیح این داده‌ها برآورد و بدقت تخمین زده

شود. از سوی دیگر پارامترهای بکار برده شده در تحلیل‌ها، حاصل از برداشت‌های سطحی و تحت تأثیر عواملی مانند هوازدگی و فرسایش هستند. بنابراین با انجام مغزه‌گیری در عمق مناسب و برداشت نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های، می‌توان انتظار داشت که ویژگی‌های مهندسی سنگ تا حدودی بهبود یافته و تحلیل‌های بعدی نیز نتایج منطقی‌تری را نشان دهد.

همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد، در دسترس نبودن اطلاعات کافی از شرایط چینه-شناسی ساختگاه گناوه سبب شده است که تحلیل‌ها با فرض قرارگیری کامل مغارها در مارن یا ماسه-سنگ انجام شود. بدیهی است که این فرض از شرایط واقعی دور و نتایج حاصل نیز دارای درصدی از عدم قطعیت است. بنابراین در این مرحله از پژوهش می‌توان با فرض حالات مختلفی از تناوب لایه-های مارنی و ماسه‌سنگی، تحلیلی را بر وضعیت لایه‌بندی ساختگاه گناوه و تأثیر آن بر میزان پایداری مغارها انجام داد. در این صورت، ۳ مجهول اصلی ضخامت، تناوب لایه‌ها و خواص سطح مشترک آن‌ها در مدلسازی مطرح می‌شود. به عبارت دیگر چه لایه‌ای (مارنی یا ماسه‌سنگی) و با چه ضخامتی می‌تواند در سقف، دیواره یا کف مغارها قرار گیرد. البته منظور از ضخامت، ضخامت لایه‌های اصلی مارنی و ماسه‌سنگی است که می‌تواند در بازه‌ای بین ۲ تا ۵ متر و حتی بیش‌تر از آن نیز متغیر باشد که با ضخامت‌های مطرح‌شده در فصل سوم برای ناپیوستگی‌های ساختگاه گناوه (بخش ۳-۲-۳) متفاوت است. در نهایت با توجه به تحلیل‌ها و نتایج بدست آمده، مشاهده می‌شود که با تغییر هر پارامتر بیش-ترین میزان جابجایی‌ها و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در دیواره‌ی مغارها مارنی و ماسه‌سنگی رخ می‌دهد. اما از سوی دیگر به نظر می‌رسد که مغارهای مارنی در شرایط بسیار ناپایدار و ریزشی و مغارهای ماسه‌سنگی در شرایط نسبتاً پایدار قرار دارند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که از قرارگیری دیواره در مارن اجتناب شده و تا حد امکان دیواره‌های مغارها در ماسه‌سنگ جانمایی شود. از سوی دیگر با مد نظر قرار دادن مشکل آماس مارن، بهتر است در جانمایی مغارها، کف نیز در لایه‌های ماسه‌سنگی قرار گیرد تا از بالازدگی و تورم آن پیشگیری شود.

در نهایت با توجه به تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده بر روی پارامترهای طراحی و عملیاتی،

می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی عمق قرارگیری مغارها، بازه‌ی مناسب می‌تواند بین ۸۰ تا ۱۲۰ متر متغیر باشد. با توجه به مجموعه نمودارهای ۵-۵ برای مارن و ۵-۱۲ برای ماسه‌سنگ، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق قرارگیری، میزان جابجایی‌ها و گسترش ناحیه‌ی تسلیم به سرعت افزایش و در نتیجه ضریب ایمنی و پایداری مغارها کاهش می‌یابد. به خصوص در مورد مغارهای مارنی با ۱۰ برابر شدن میزان جابجایی‌های جداره، اهمیت این مطلب بسیار مشهودتر است. بنابراین با توجه به ملاحظات ژئومکانیکی، پدافندی و سرعت گردش مورد نیاز، عمق قرارگیری مغارها باید تا حد امکان کمینه شود.

نسبت ابعاد مغارها (حساس‌ترین پارامتر طراحی) نیز می‌تواند در بازه‌ای بین ۱/۲ تا ۱/۴ تغییر نماید (نمودارهای ۵-۶ و ۵-۱۳). اگر چه همانند عمق قرارگیری با افزایش ابعاد مغارها میزان ناپایداری جداره افزایش می‌یابد، اما بکارگیری فنون حفاری ویژه و نصب هرچه سریع‌تر سامانه‌ی نگهداری می‌تواند ناپایداری‌های رخ داده را تا سطح قابل قبولی کاهش دهد. از این‌رو در این مورد تمایل به سمت انتخاب مقاطع بزرگ‌تر است. علاوه بر این در بخش طراحی هندسی فاصله‌داری مغارها در بازه‌ی ۴۰ تا ۵۰ متر تعیین شده است. در صورت قرارگیری بخش‌هایی از مغار در ماسه‌سنگ و همچنین با بکارگیری حفاری مرحله‌ای و نصب سامانه‌ی نگهداری مناسب، این فاصله می‌تواند تا حدود ۱۵ تا ۲۵ متر (برابر با یک تا ۱/۶ برابر عرض مغارها) نیز کاهش یابد.

فصل ششم:

تحلیل بیداری و بیدارسازی مغارها

۱-۶ مقدمه

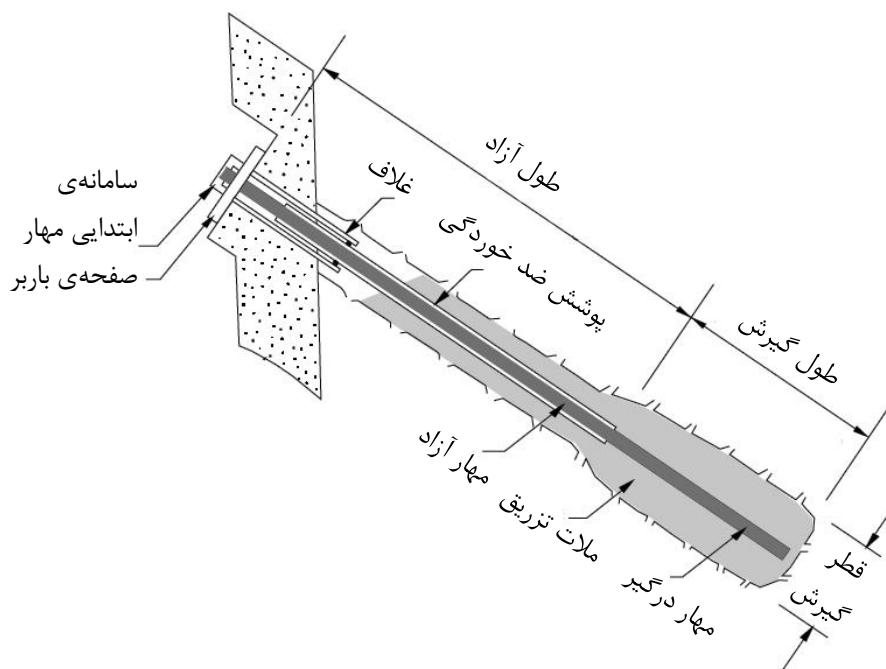
پس از حفر یک سازه‌ی زیرزمینی، بار وارده از طرف میدان تنش برجا و آب‌های زیرزمینی بوسیله‌ی ساختار مرکبی شامل زمین و پوشش تحمل می‌شود. زمان خودپایداری سازه‌ی زیرزمینی بدون سامانه‌ی نگهداری محدود و تغییر شکل توده‌سنگ نیز اجتناب ناپذیر است. یکی از معیارهای ارزیابی پایداری سازه، مقدار تغییر شکل رخ داده است. همچنین بار وارد بر پوشش نیز علاوه بر صلبیت سامانه با این مقدار مرتبط است. بنابراین مقاومت ذاتی توده‌سنگ باید تا حد امکان حفظ شده یا بهبود یابد، در عین حال باید اجازه داده شود تا بار وارد بر سامانه‌ی نگهداری نیز به سطح قابل قبولی کاهش یابد. با مد نظر قرار دادن این توضیحات در این فصل، سامانه‌ی نگهداری مناسب برای پایدارسازی مغارهای ذخیره‌سازی گنوه طراحی و تحلیل می‌شود. پس از بیان مقدمه‌ای بر مفاهیم سامانه‌های نگهداری، به تحلیل پایداری مغارها پرداخته شده و با بکارگیری روش‌های تجربی و عددی سامانه‌ی نگهداری مغارها طراحی می‌شود.

۲-۶ سامانه‌ی نگهداری متداول برای مغارهای ذخیره‌سازی

با گسترش کاربری پیچ‌سنگ یا مهاری‌ها (پیش‌تنیده و تزریقی) و بتن پاشیده (مسلح یا الیافی) برای نگهداری سازه‌های زیرزمینی به خصوص مغارها و تونل‌ها در این بخش به منظور آشنایی توضیح کوتاهی در مورد این ساختارها آورده شده است.

۱-۲-۶ مهاری‌ها

مهاری یک جز ساختاری است که در سنگ یا خاک نصب شده و برای تقویت آن‌ها یا انتقال بار کششی اعمال شده به زمین بکار برده می‌شود. مهارهای تزریق شده‌ی پیش‌تنیده، تای‌بک^۱ نامیده شده و شامل اجزایی از قبیل تکیه‌گاه^۲، طول بدون تنش یا آزاد^۳ و طول گیرش^۴ است (شکل ۱-۶). تکیه‌گاه شامل سامانه‌ی ابتدایی^۵، صفحه‌ی باربر^۶ و غلاف^۷ است. انتقال نیروی پیش‌تنیدگی از فولاد پیش‌تنیده (میله یا رشته) به زمین بر عهده‌ی غلاف است. طول آزاد، بخشی از فولاد پیش‌تنیده است که می‌تواند به صورت کشسان افزایش طول یافته و نیروی مقاوم را از طول گیرش به ساختار انتقال دهد. طول گیرش، طولی از فولاد پیش‌تنیده است که به دوغاب چسبیده و توانایی انتقال بار کششی به زمین را دارد (Sabatini, et al., 1999).



شکل (۱-۶): اجزا تشکیل‌دهنده‌ی یک مهاری تزریق‌شده‌ی پیش‌تنیده (Sabatini, et al., 1999)

1. Tieback
2. Anchorage
3. Free Stressing (Unbonded) Length
4. Bond Length
5. Anchor Head System
6. Bearing Plate
7. Trumpet

۲-۲-۶ بتن پاشیده

در مغارها و تونل‌ها، بتن پاشیده جز مهمی از سامانه‌ی نگهداری دائمی سازه را در کنار شبکه‌ی پیچ-سنگ‌ها تشکیل می‌دهد. به طور معمول پوشش بتنی شامل چندین لایه است و در میان هر لایه توری تقویتی را می‌توان نصب نمود. مشخصات فنی و زمان نصب سامانه به وسیله‌ی پایداری زمین تعیین می‌شود. پس از این‌که هر مرحله از حفاری انجام و مواد خردشده به خارج محدوده انتقال داده شد، بتن بر سطح سازه پاشیده می‌شود. هنگامی که ساخت هر بخش از پوشش کامل شود، مرحله‌ی بعدی حفاری نیز آغاز می‌شود.

بتن پاشیده در ابتدا نرم است و تحت بارهای وارده خزش می‌کند اما می‌تواند در همان مراحل اولیه، کرنش‌های بزرگ را تحمل نماید. از این‌رو با هدف اصلی پوشش یعنی اجازه دادن به تغییر شکل توده‌سنگ (تا حد مجاز) و توزیع مجدد تنش‌ها سازگار است. افزایش سختی و مقاومت بتن پاشیده با گذشت زمان، تغییر شکل‌های بیش‌تر را نیز مهار خواهد کرد (Thomas, 2009).

امروزه برای تقویت ظرفیت باربری کششی و قابلیت شکل‌پذیری بتن از الیاف فولادی یا مصنوعی^۱ به عنوان جایگزین توری سیمی استفاده می‌شود (شکل ۲-۶). طول متداول الیاف می‌تواند ۴۵ تا ۵۰ میلی‌متر و قطر آن‌ها ۰٫۸ تا ۱ میلی‌متر باشد. همچنین مقدار الیاف باید بیش‌تر از ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب باشد. از مزایای بکارگیری این الیاف در بتن پاشیده، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (Grimstad & Barton, 1993; Kolymbas, 2008):

- ۱ سرعت بالای نصب به میزان ۲۵ متر مکعب در ساعت
- ۲ بهره‌وری بیش‌تر و یکنواختی و کیفیت بالاتر بتن
- ۳ ضخامت کمتر (در حدود نصف بتن پاشیده‌ی غیر مسلح)
- ۴ گرد و غبار کمتر در فرآیند اجرای خشک
- ۵ بی‌نیازی از نصب شبکه‌ی توری و در نتیجه تشکیل نشدن حفره‌های هوا

۶ نفوذپذیری پایین به علت نسبت آب به سیمان کم

۷ وجود نداشتن مشکل خوردگی الیاف فولادی ضدزنگ

۸ اقتصادی و ایمن در تونل‌های بلند و فضاهای بزرگ‌مقیاس (مغارها)



شکل (۶-۲): بتن پاشیده‌ی مسلح با الیاف فولادی (Kolymbas, 2008)

۳-۶ تحلیل پایداری مغارها

مهار تغییر شکل توده‌سنگ دربرگیرنده، مناسب‌ترین روش تأمین پایداری سازه‌های زیرزمینی است. تغییر شکل بیش از حد جداره‌ی سازه، سبب سست شدگی سنگ و کاهش توانایی باربری آن می‌شود. برای مهار تغییر شکل توده‌سنگ، می‌توان راهکارهایی مانند حفاری مرحله‌ای، آتشباری آرام و نصب سامانه‌ی نگهداری را بکار برد. در این میان، تخمین میزان تغییر شکلی که سازه با رسیدن به آن از حالت پایدار به ناپایدار تغییر وضعیت می‌دهد، همچنین زمان مناسب نصب سامانه‌ی نگهداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاکنون تلاش‌های متعددی نیز جهت یافتن راهکاری برای تحلیل پایداری و تعیین سامانه‌ی نگهداری سازه‌های زیرزمینی صورت گرفته است؛ که بسته به نوع ابزار بکار برده‌شده از قابلیت اطمینان متفاوتی برخوردار هستند. در ادامه به چند مورد از این راهکارها به صورت

خلاصه اشاره شده است.

- ۱ یافتن راهکاری تحلیلی برای طراحی سامانه‌ی نگهداری (ضخامت بتن پاشیده و طول و چگالی پیچ‌سنگ‌ها) مغاره‌های تجاری کم عمق در سنگ‌های سست رسوبی (Pells, 2002).
 - ۲ استفاده از روش مشاهده‌ای برای طراحی و ساخت مغاره‌های بزرگ‌مقیاس، برآورد پایداری، گسترش ناحیه‌ی سست‌شده و تعیین سامانه‌ی نگهداری آن‌ها (Maejima, et al., 2003).
 - ۳ ارائه‌ی یک الگوریتم بهینه‌ی ترکیبی (شبکه‌ی عصبی تکاملی + روش اجزا محدود + الگوریتم ژنتیک) برای افزایش میزان پایداری مغاره‌های بزرگ‌مقیاس در توده‌سنگ رسوبی با تناوب سنگ‌های سخت و نرم (Feng & An, 2004).
 - ۴ ارائه‌ی رهیافتی تحلیلی برای طراحی پیچ‌سنگ‌های تزریقی فعال بر مبنای روش همگرایی (Fahimifar & Ranjbarnia, 2008).
 - ۵ بکارگیری مدل فیزیکی برای تحلیل پایداری ناپیوسته‌ی مغاره‌های بزرگ‌مقیاس برق‌آبی در شرایط میدان تنش بالا (Weishen, et al., 2011).
- با توجه به توضیحات بیان‌شده، دو مورد از روش‌های تحلیل پایداری بر مبنای شاخص جابجایی که قابل کاربرد در این پایان‌نامه است، تشریح شده و پایداری مغاره‌های گناره با استفاده از این روش‌ها تحلیل شده است.

۱-۳-۶ روش تخمین جابجایی نسبی

روش تخمین جابجایی نسبی، ترکیبی از روش‌های عددی و تجربی برای برآورد پایداری مجموعه مغاره‌های بزرگ‌مقیاس است. این شیوه برای سنگ‌های نسبتاً مقاوم چین با مدول شکل‌پذیری ۱۰ تا ۴۰ گیگا پاسکال، چسبندگی ۱ تا ۲ مگا پاسکال و زاویه‌ی اصطکاک ۴۵ تا ۵۵ درجه ابداع شده است. اعماق مورد بررسی بیش‌تر از ۱۰۰ متر و نسبت تنش‌ها نیز بیش‌تر از ۱ بوده است. در این شیوه نسبت جابجایی کشسان - شکل‌پذیر به جابجایی کشسان در نقطه‌ی کلیدی بر روی دیواره‌ی بلند مغار

به عنوان معیاری برای برآورد پایداری یا ناپایداری مجموعه در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۱-۶). اگر این نسبت از مقدار جابجایی نسبی بحرانی بیش‌تر شود، نواحی تسلیم تشکیل‌شده در اطراف مغارها به هم پیوسته و پایداری مغارها به خطر می‌افتد (رابطه‌ی ۲-۶)؛ (Zhu, et al., 2008 & 2010).

$$\theta = \frac{U_{ep}}{U_e} \quad (1-6)$$

$$= \frac{h[a(1000.k.\gamma.H/E)^2 + b(1000.k.\gamma.H/E) + c(B/H) + d] \times 10^{-3}}{b.h.k.\gamma.H/E}$$

$$\theta_c = 0.001403.H - 0.01138.E + 1.214375 \quad (2-6)$$

θ : جابجایی نسبی

θ_c : جابجایی نسبی بحرانی

U_{ep} : جابجایی کشسان - شکل‌پذیر (متر)

U_e : جابجایی کشسان (متر)

h : ارتفاع مغار (متر)

k : نسبت تنش‌ها

γ : چگالی (نیوتن بر متر مکعب)

H : ارتفاع روباره از کف مغار (متر)

E : مدول شکل‌پذیری توده‌سنگ (پاسکال)

B : فاصله‌داری مغارها (متر)

$a, b, c \& d$: ضرایب برازش خط

تخمین جابجایی نسبی، روشی مناسب برای برآورد جابجایی دیواره‌ی مغارهای بزرگ‌مقیاس است. در برآورد میزان جابجایی‌ها، پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ، میزان روباره و شرایط تنش ناحیه در نظر گرفته شده است که امتیاز مثبتی برای این روش است. برای شرایط ساختگاه گناوه میزان جابجایی‌ها با روش عددی یا بدست آوردن ضرایب برازش و بکارگیری روابط ارائه شده قابل محاسبه

است. اما ضرایب برآزش جابجایی نسبی بحرانی با شرایط ساختگاه گناوه تطابق چندانی ندارد و باید برای بکارگیری این روش در سنگ‌های سست نیز پژوهش بیش‌تری صورت گیرد.

با توجه به توضیحات بیان‌شده، مقادیر جابجایی‌های کشسان- شکل‌پذیر و کشسان مارن و ماسه‌سنگ (نتایج تحلیل عددی)، جابجایی نسبی و جابجایی نسبی بحرانی محاسبه‌شده در جدول ۶-۱ مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده این‌طور نشان می‌دهند که مغارهای مارنی ناپایدار و مغارهای ماسه‌سنگی پایدار هستند.

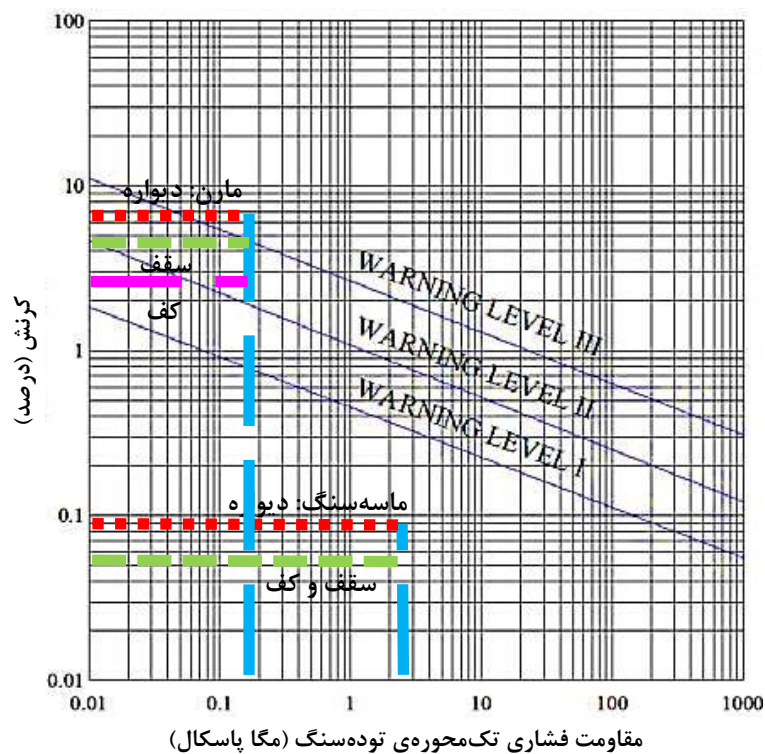
جدول (۶-۱): تحلیل پایداری مغارهای گناوه با استفاده از روش تخمین جابجایی نسبی

نوع سنگ	U_{ep} (سانتی‌متر)	U_e (سانتی‌متر)	θ	θ_c	وضعیت
مارن	۹۳/۱۴	۲۳/۳۸	۳/۹۸	۱/۳۵۴۵	ناپایدار
ماسه‌سنگ	۱/۳۱	۱/۲۶	۱/۰۴۴	۱/۳۵۰۷	پایدار

۶-۳-۲ روش کرنش بحرانی

یکی دیگر از روش‌های متداول برای بررسی پایداری سازه‌های زیرزمینی، شاخص کرنش بحرانی ساکورایی است. ساکورایی با استفاده از داده‌های حاصل از پایش تونل‌ها، رابطه‌ایی میان همگرایی تونل‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوره و همچنین کرنش برشی و مدول برشی توده‌سنگ به دست آورد و سه تراز هشدار را برای بررسی پایداری سازه‌های زیرزمینی معرفی نمود (نمودار ۶-۱). پایین‌تر از تراز هشدار ۱، سازه در شرایط پایدار قرار دارد. میان تراز هشدار ۱ و ۲، سازه هنوز در شرایط پایدار قرار داشته و عملیات حفاری می‌تواند ادامه یابد؛ اما برای اطمینان بیش‌تر میزان پایش و مشاهدات میدانی می‌تواند افزایش داده شود. میان تراز هشدار ۲ و ۳، ممکن است سازه دچار ناپایداری شود؛ از این‌رو می‌توان عملیات حفاری را موقتاً به تعویق انداخت و به بررسی پتانسیل‌های وقوع ناپایداری از قبیل ساز و کار شکست سنگ، کمیت سامانه‌ی نگهداری و زمان نصب آن و شیوه‌ی حفاری پرداخت. در این حالت ممکن است به افزایش میزان پایش تونل و تقویت سامانه‌ی نگهداری یا تجدید نظر در شیوه‌ی

ساخت نیاز باشد. بالاتر از تراز هشدار ۳، سازه ناپایدار بوده و عملیات ساخت باید تا هنگام پایداریسازی آن متوقف شود. در این حالت باید بازرسی دقیقی از شرایط پایداری سازه انجام شده و تناوب‌های پایش آن افزایش داده شود. سپس با بررسی عوامل ایجاد ناپایداری، تدابیر خاصی در این مورد اندیشیده شده و در طراحی سامانه‌ی نگهداری و شیوه‌ی حفاری سازه تجدید نظر شود (Sakurai, 1981; Sakurai, et al., 1993).



نمودار (۶-۱): بررسی پایداری مغاره‌های ذخیره‌سازی گنوه با استفاده از روش کرنش بحرانی (Sakurai, 1999)

با توجه به توضیحات بیان‌شده، در این پژوهش برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از روش تخمین جابجایی نسبی از روش کرنش بحرانی استفاده شده است. بر اساس میزان جابجایی‌های پیش-بینی‌شده، مغاره‌های مارنی در شرایط ناپایدار و مغاره‌های ماسه‌سنگی در وضعیت پایدار قرار دارند (نمودار ۶-۱). درصد کرنش سقف و دیواره‌ی مغاره‌های مارنی در تراز هشدار ۳ و بالاتر از آن یعنی در شرایط ناپایدار و درصد کرنش کف مغار بین تراز ۲ و ۳ قرار داشته و مشکوک به ناپایداری است. اما درصد کرنش‌های جداره‌ی مغاره‌های ماسه‌سنگی پایین‌تر از تراز هشدار ۱ قرار داشته و کاملاً پایدار

هستند. از این رو در ابتدا با بکارگیری روش تجربی سامانه‌ی نگهداری اولیه برای مغارهای مارنی تعیین شده و سپس با مدلسازی عددی کارایی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (نمودار ۶-۱).

۶-۴ شاخص کیفیت توده‌سنگ (Q)

شاخص کیفیت توده‌سنگ در ابتدا برای طراحی تجربی سامانه‌ی تقویت و نگهداری مغارها و تونل‌ها توسعه داده شده است؛ اما امروزه کاربردهای دیگری نیز در دانش مهندسی سنگ مانند پیش‌بینی، همبستگی و برون‌یابی داده‌های میدانی و بدست آوردن برآوردهای اولیه از داده‌های ورودی به مدل‌های پیوسته و ناپیوسته پیدا کرده است. سرعت موج، مدول توده‌سنگ، فشار نگهداری، تغییر شکل تونل، مقدار لوژان و پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ از جمله موارد قابل پیش‌بینی با این شاخص هستند (Barton, 2002).

در این پژوهش برای برآورد اولیه‌ی سامانه‌ی نگهداری مغارها، از روش کیفیت توده‌سنگ با توجه به قابلیت‌های آن برای طراحی مغارهای بزرگ‌مقیاس، استفاده شده است. با توجه به داده‌های در دسترس از شرایط توده‌سنگ گناوه، مقدار متوسط کیفیت توده‌سنگ برای مارن و ماسه‌سنگ آجاجاری برابر با ۱/۲۲ و ۴/۵۷ بدست آمده است. امتیازات هر پارامتر و بازه‌ی تغییرات شاخص کیفیت توده‌سنگ برای ساختگاه گناوه در جدول ۶-۲ مشاهده می‌شود.

جدول (۶-۲): برآورد مقادیر کیفیت توده‌سنگ (Q) برای ساختگاه گناوه

پارامتر	امتیاز	
	مارن	ماسه‌سنگ
RQD	۳۵-۵۵	۷۵-۹۰
J _n	۹	۹
J _r	۱	۱/۵
J _a	۴	۳
J _w	۱	۱
SRF	۱	۱
Q	۰/۹۷۲-۱/۵۲۸	۴/۱۶۷-۵
توصیف	خیلی ضعیف-ضعیف	خوب
مقدار متوسط	۱/۲۲	۴/۵۷

۱-۴-۶ فشار نهایی نگهداری

با مد نظر قرار دادن مقدار متوسط کیفیت توده سنگ برای مارن آجاجاری، فشار نهایی نگهداری سقف و دیواره‌ی مغار با استفاده از روابط *Singh* (Singh, et al., 1992) و *Bhasin* (Singh & Goel, 2006) و همچنین روش عددی محاسبه (روابط ۳-۶ تا ۵-۶) و نتایج حاصل در جدول ۳-۶ آورده شده است. ذکر این نکته ضروری است که برای محاسبه‌ی فشار دیواره و تعیین سامانه‌ی نگهداری دیواره‌ی مغار، مقدار ۲/۵ برابر شاخص کیفیت توده سنگ یعنی ۳/۱ باید بکار برده شود.

$$P_{ult} = \frac{0.2}{J_r} \cdot Q^{-0.33} \cdot f \cdot \dot{f} \quad (۳-۶)$$

$$f = 1 + \frac{H - 329}{800} \quad (۴-۶)$$

P_{ult} : فشار نهایی نگهداری (مگا پاسکال)

J_r : عدد زبری درزه

Q : شاخص کیفیت توده سنگ

f : فاکتور تصحیح روباره (بزرگ‌تر مساوی ۱)

H : عمق قرارگیری مغار (متر)

\dot{f} : فاکتور تصحیح همگرایی مغار در شرایط فشارنده (۰/۷)

$$P_{ult} = \frac{40 \cdot B}{J_r} \cdot Q^{-0.33} \quad (۵-۶)$$

P_{ult} : فشار نهایی نگهداری (کیلو پاسکال)

B : عرض مغار (متر)

جدول (۳-۶): محاسبه‌ی فشار نهایی نگهداری سقف و دیواره‌ی مغارهای مارنی

نام رابطه	آحاد	<i>Singh</i>	روش عددی	<i>Bhasin</i>	مکان در جداره
	مگا پاسکال	۰/۱۳۱	۰/۲۳۵	۰/۵۶۲	سقف
	مگا پاسکال	۰/۰۹۷	۰/۳۲۴	۰/۴۱۵	دیواره

رابطه‌ی *Bhasin* مقادیر بسیار بیش‌تری را (در حدود ۴ برابر در مقایسه با روش *Singh* و ۲ برابر در مقایسه با روش عددی) برای فشار نگهداری تخمین زده و ضریب ایمنی بالاتری را برای سنگ‌های سست (کیفیت کوچک‌تر از ۴) در نظر می‌گیرد. علاوه بر این فشار نگهداری را تابعی از ابعاد سازه نیز در نظر گرفته است.

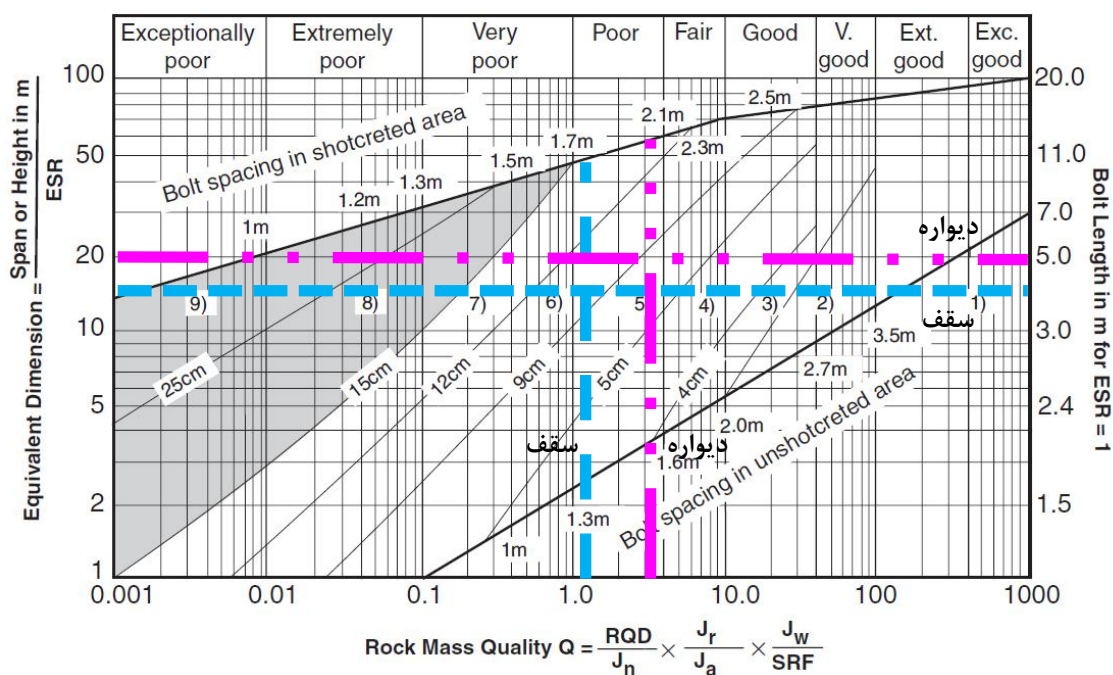
۲-۴-۶ برآورد اولیه‌ی سامانه‌ی نگهداری مغارها

با مد نظر قرار دادن مقدار ۱ برای نسبت حفاری-نگهداری مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام، بعد معادل برای سقف مغار، ۱۵ متر و برای دیواره‌ی مغار ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. با استفاده از جدول تصحیح‌شده‌ی طراحی سامانه‌ی نگهداری بر مبنای شاخص کیفیت توده‌سنگ، برای سقف مغار مارنی شبکه‌ی منظمی از داول‌های تزریق‌شده با فاصله‌داری ۱ تا ۱٫۵ متر به همراه ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر بتن پاشیده‌ی غیر مسلح در نظر گرفته شده است. طول داول‌ها برابر با ۶ متر (۰٫۴ بعد معادل سقف مغار) است. برای دیواره‌ی مغار نیز همین سامانه باید بکار برده شود؛ با این تفاوت که طول داول‌های دیواره برابر با ۷ متر (۰٫۳۵ بعد معادل دیواره‌ی مغار) در نظر گرفته شده است (*Hoek & Brown, 1990*).

علاوه بر این موارد *Barton* بکارگیری پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۳، ۵ یا ۷ متری و بکارگیری کابل‌های پیش‌تنیده را برای تقویت شبکه‌ی پیچ‌سنگ‌ها با فاصله‌داری ۲ تا ۴ متر پیشنهاد کرده است (*Barton, et al., 1974*). *Hoek* و *Brown* نیز بکارگیری شبکه‌ی توری سیمی جوش داده‌شده با آرایش مربعی را برای تقویت بتن پاشیده پیشنهاد داده‌اند. در این مورد از شبکه‌ی زنجیری نباید استفاده شود. به این دلیل که بتن نمی‌تواند به تمام فضاهای بین سیم‌ها نفوذ کرده و هوای تشکیل‌شده در این منافذ سبب زنگ‌زدگی سیم‌ها می‌شود. به طور معمول سیم‌های با قطر ۴٫۲ میلی‌متری در فواصل ۱۰۰ میلی‌متری برای تقویت بتن پاشیده کفایت می‌کند (*Hoek & Brown, 1990*).

در نمودار به روزشده‌ی کیفیت توده‌سنگ، سامانه‌ی نگهداری مورد نیاز برای سقف مغارهای مارنی، در گروه ۶ قرار می‌گیرد (نمودار ۶-۲). در این گروه برای پایدارسازی سقف مغار به ۹ تا ۱۲

سانتی متر بتن پاشیده‌ی الیافی و پیچ‌سنگ‌های با طول ۴ متر و فاصله‌داری تقریبی ۱٫۸ متر نیاز است. برای دیواره‌ی مغار نیز با در نظر گرفتن ۲٫۵ برابر شاخص کیفیت توده‌سنگ یعنی مقدار ۳٫۱، سامانه‌ی نگهداری مورد نیاز در گروه ۵ قرار می‌گیرد (نمودار ۶-۲). در این گروه برای پایدارسازی دیواره به ۵ تا ۹ سانتی متر بتن پاشیده‌ی الیافی و پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۵ متر و فاصله‌داری تقریبی ۲ متر نیاز است (Grimstad & Barton, 1993).



نمودار (۶-۲): تعیین سامانه‌ی نگهداری دائمی مغارهای مارنی با استفاده از شاخص کیفیت توده‌سنگ برای سنگ‌های سست (Grimstad & Barton, 1993)

نتایج حاصل از تحلیل پایداری مغارهای ماسه‌سنگی (بخش ۶-۳)، این‌طور نشان می‌دهد که در تحلیل پیوسته‌ی این مغارها نیازی به نصب سامانه‌ی نگهداری وجود ندارد؛ اما ممکن است در مراحل بعدی پژوهش و در تحلیل‌های ناپیوسته، این مغارها نیز ناپایدار باشند. از سوی دیگر با مد نظر قرار دادن شاخص کیفیت توده‌سنگ، به نظر می‌رسد که مغارهای ماسه‌سنگی نیز نیاز به نصب سامانه‌ی نگهداری داشته باشند.

در نمودار به روزشده‌ی کیفیت توده‌سنگ، سامانه‌ی نگهداری مورد نیاز برای سقف مغارهای ماسه‌سنگی، در گروه ۵ قرار می‌گیرد. در این گروه برای پایدارسازی سقف مغار تقریباً به ۵ سانتی متر

بتن پاشیده‌ی الیافی و پیچ‌سنگ‌های با طول ۴ متر و فاصله‌داری تقریبی ۲/۲ متر نیاز است. برای دیواره‌ی مغار نیز با در نظر گرفتن شاخص کیفیت دیواره یعنی مقدار ۱۱/۴۳، سامانه‌ی نگهداری مورد نیاز در گروه ۳ قرار می‌گیرد. در این گروه برای پایدارسازی دیواره به ۴ سانتی‌متر بتن پاشیده‌ی الیافی و پیچ‌سنگ‌هایی با طول ۵ متر و فاصله‌داری تقریبی ۲/۶ متر نیاز است (Grimstad & Barton, 1993). در هر صورت سامانه‌ی تعیین‌شده در این بخش تنها برای ایمنی بیش‌تر تأسیسات ذخیره‌سازی در طول مدت عمر آن‌ها هستند و کاربری به معنای واقعی یک سامانه‌ی نگهداری را ندارند.

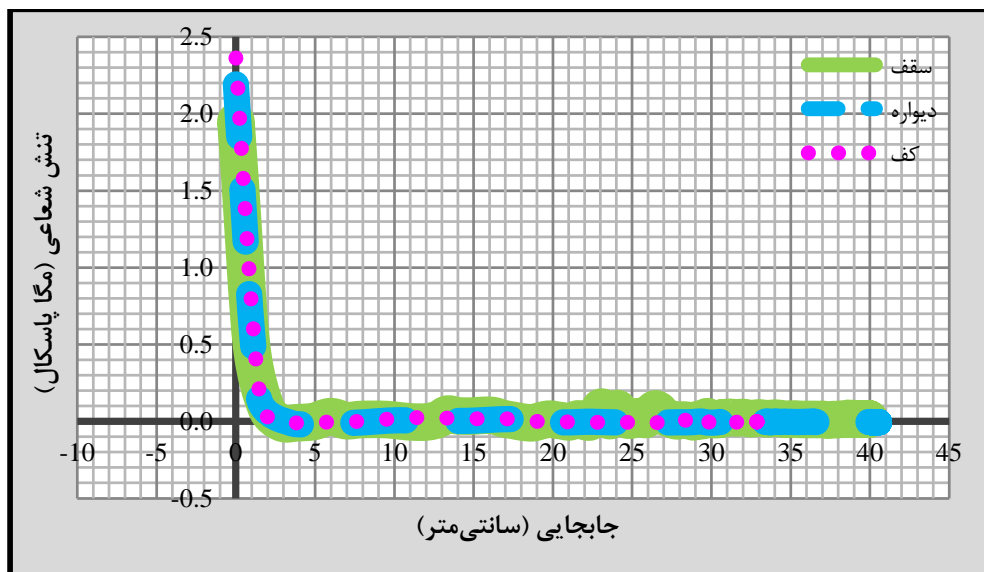
۵-۶ نمودارهای اندرکنش زمین و تغییر شکل طولی مغار

برای بررسی روند آزادسازی تنش به همراه میزان رشد جابجایی‌های جداره‌ی مغار مارنی از نمودار اندرکنش زمین و برای بررسی میزان تغییرات جابجایی جداره در طول مغار از نمودار تغییر شکل طولی استفاده شده است. نقاط شاهد در سقف، دیواره و کف مغار فرض (درون توده‌سنگ) و برای بدست آوردن میزان جابجایی‌ها و تنش‌های شعاعی، روش عددی بکار برده شده است. حفر مغار نیز به صورت تمام مقطع تا نیمه‌ی طول مغار انجام شده است (نمودارهای ۳-۶ و ۴-۶).

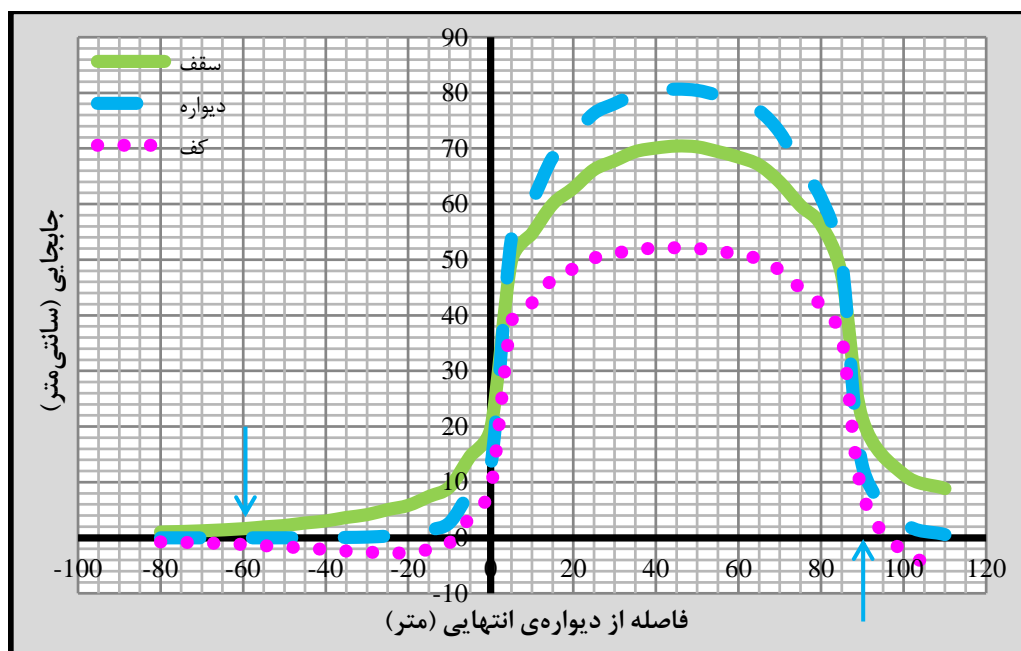
همان‌طور که در نمودار ۳-۶ مشاهده می‌شود، جداره‌ی مغار به سرعت تنش آزاد کرده و در جابجایی‌های کمتر از ۵ سانتی‌متر، مقدار تنش تقریباً به سمت صفر میل می‌کند. پس از آن جابجایی‌ها با گذشت زمان رشد کرده و مغار به سرعت همگرا می‌شود. علاوه بر این تغییر شکل سقف مغار از فاصله‌ای در حدود ۸۰ تا ۹۰ متری از دیواره‌ی انتهایی در توده‌سنگ آغاز شده و در فاصله‌ی ۳۵ تا ۵۵ متری از دیواره‌ی انتهایی در فضای حفاری شده به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. در این حالت، روندی مشابه نیز برای دیواره و کف مغار پیش‌بینی شده است (نمودار ۴-۶).

با توجه به توضیحات بیان‌شده و با استفاده از تحلیل عددی، پس از اینکه جابجایی سقف، دیواره و کف مغار به مقادیری در حدود ۷، ۱۲ و ۲۱ درصد از مقدار نهایی خود برسد، می‌توان سامانه‌ی نگهداری را در مدل نصب نمود (جدول ۴-۶). اگر سامانه‌ی نگهداری قبل از این مرحله نصب شود،

بار زیادی به سامانه وارد شده که ممکن است سبب تسلیم شدن بیش از حد آن شود. در صورتی که سامانه‌ی نگهداری پس از این مرحله نیز نصب شود، ناحیه‌ی تسلیم اطراف مغار به سرعت گسترش یافته و بار کمتری به سامانه وارد می‌شود؛ اما سامانه‌ی طراحی شده نمی‌تواند مقدار جابجایی‌ها را تا حد مطلوبی مهار نماید.



نمودار (۳-۶): منحنی اندرکنش زمین (توده سنگ دربرگیرنده: مارن)



نمودار (۴-۶): منحنی تغییرات تغییر شکل جداره در طول مغار مارنی (پیکان‌ها: نقاط ابتدا و انتهای مغار)

جدول (۴-۶): مقادیر تغییر شکل نهایی بدون سامانه‌ی نگهداری، تغییر شکل رخ داده در زمان نصب سامانه و نسبت تغییر شکل در زمان نصب سامانه به تغییر شکل نهایی مغارهای مارنی

نقطه‌ی شاهد	تغییر شکل		
	نهایی (بدون نگهداری)	در زمان نصب نگهداری	نسبت (در زمان نصب به مقدار نهایی)
آحاد	سانتی‌متر	سانتی‌متر	درصد
سقف	۸۴٫۲۲	۵٫۹۹	۷
دیواره	۹۳٫۳۲	۱۱٫۰۱	۱۲
کف	۵۱٫۸۰	۱۱٫۰۷	۲۱

۶-۶ ارزیابی عملکرد سامانه‌ی نگهداری مغارها با بکارگیری روش عددی

برای مدلسازی اولیه‌ی سامانه‌ی نگهداری با بکارگیری روش عددی، مغار مارنی به صورت تک‌مرحله‌ای حفر و نصب سامانه پس از گذشت مراحل زمانی معادل با جابجایی‌های ذکرشده در بخش ۵-۶ انجام شده است. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده در سنگ‌های سست، بتن پاشیده در مقایسه با پیچ‌سنگ‌ها فشار بیش‌تری را تحمل و پیچ‌سنگ‌های تمام تزریقی بسیار کاراتر از پیچ‌سنگ‌های پیش‌تنیده عمل می‌کنند (Singh & Goel, 2006). از این‌رو بتن پاشیده‌ی مسلح و پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق رزینی به عنوان سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی انتخاب شده‌اند. در انتخاب جزییات سامانه از روش شاخص کیفیت توده‌سنگ استفاده (بخش ۴-۶-۲) و سپس با روش عددی کمیت آن تدقیق شده است.

۱-۶-۶ مشخصات مکانیکی سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی

مشخصات مکانیکی تعیین‌شده برای اجزا سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی با بکارگیری روش عددی در جداول ۵-۶ تا ۷-۶ مشاهده می‌شود. چگالی بتن پاشیده، معادل با چگالی بتن مسلح، از شن و ماسه‌سنگ‌های آهکی سخت یا گرانیت و بازالت در نظر گرفته شده است^۱. مدول کشسانی بتن پاشیده نیز با توجه به بازه‌ی مدول بتن پاشیده‌ی آنی تا ۲۸ روزه برابر با ۲۰ گیگا پاسکال فرض و ضخامت آن با روش سعی و خطای عددی بدست آمده است. همچنین با توجه به جابجایی رخ داده در کف مغار و

۱. برگرفته از وزن مخصوص ارائه شده توسط جامعه‌ی مهندسی مشاور ایران با شماره استاندارد ۵۱۹ ایران (۱۳۹۰)

ناپایداری آن، پوشش بتن پاشیده برای تمام جداره‌ی مغار بکار برده شده است (جدول ۶-۵).

جدول (۶-۵): مشخصات بتن پاشیده‌ی مسلح

پارامتر	ابعاد	آحاد	مقدار	بازه‌ی متداول (Thomas, 2009)
ضخامت	[L]	سانتی‌متر	۳۰	۱۰-۳۰
چگالی	[M/L ³]	کیلوگرم بر متر مکعب	۲۵۰۰	۲۱۴۰-۲۲۳۵
مدول کشسانی	[F/L ²]	گیگا پاسکال	۲۰	۱۵-۳۴
نسبت پواسون	-	-	۰٫۲۵	۰٫۱۸-۰٫۴۸

طول پیچ‌سنگ‌ها در سقف و دیواره، ۳ برابر مقادیر تعیین‌شده توسط روش تجربی هستند و فاصله‌داری آن‌ها نیز تا حداقل مقدار ممکن کاهش داده شده است. همچنین چگالی و مدول کشسانی پیچ‌سنگ‌های بکار برده‌شده، برابر با مشخصات میلگرد آجدار A3 با قطر ۳۲ میلی‌متر فرض شده است^۱. با توجه به حداقل حد جاری شدن فولاد A3، یعنی ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، مقاومت تسلیم کششی پیچ‌سنگ‌ها برابر با ۳۱۵/۵۹ کیلو نیوتن برآورد شده است. از آنجا که بتن پاشیده به تنهایی قادر به مهار جابجایی‌های رخ داده در کف مغار نیست (با مدلسازی عددی بررسی شده است)؛ از این‌رو سامانه‌ی منظمی از پیچ‌سنگ‌ها نیز برای کف مغار در نظر گرفته شده است (جدول ۶-۶).

جدول (۶-۶): مشخصات پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق رزینی

پارامتر	ابعاد	آحاد	مقدار
طول در سقف	[L]	متر	۱۲
طول در دیواره	[L]	متر	۱۵
طول در کف	[L]	متر	۱۲
فاصله‌داری سقف	[L×L]	متر مربع	۱×۱
فاصله‌داری دیواره	[L×L]	متر مربع	۱×۱
فاصله‌داری کف	[L×L]	متر مربع	۲×۱
سطح مقطع	[L×L]	میلی‌متر مربع	۸۰۴/۲۵
چگالی	[M/L ³]	کیلوگرم بر متر مکعب	۷۸۴۶
مدول یانگ	[F/L ²]	گیگا پاسکال	۲۰۰
مقاومت تسلیم کششی	[F]	کیلو نیوتن	۳۱۵/۵۹

۱. برگرفته از جدول ابعاد و مشخصات مکانیکی میلگرد ساده و آجدار ارائه شده توسط جامعه‌ی مهندسی مشاور ایران (۱۳۹۰)

به منظور برآورد پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی مشخصات مکانیکی رزین، فرض شده است که قطر چال‌ها ۴۶ میلی‌متر (شعاع آنالوس برابر با ۷ میلی‌متر) و مدول کشسانی رزین برابر با ۱۲ گیگا پاسکال است. با مد نظر قرار دادن نسبت پواسون ۰٫۲۵، مدول برشی رزین برابر با ۴٫۸ گیگا پاسکال بدست آمده است. علاوه بر این مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی رزین نیز برابر با ۷۰ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. با توجه به این توضیحات، برای محاسبه‌ی پارامترهای مورد نیاز برای رزین در تحلیل عددی، روابط ۶-۶ و ۶-۷ بکار برده شده‌اند (*Anagnostopoulos, et al., 2011*; *ITASCA², 2009*؛ (جدول ۶-۷).

$$C_g = \pi \cdot D \cdot \tau_I \cdot Q_B \quad (6-6)$$

C_g : مقاومت چسبندگی رزین (مگا نیوتن بر متر)

D : قطر پیچ‌سنگ (متر)

t : شعاع آنالوس (متر)

τ_I : نصف مقاومت فشاری تک‌محوره‌ی رزین

Q_B : ضریب چسبندگی (در بهترین شرایط برابر با ۱)

$$k_g = \frac{2\pi G}{10 \ln\left(1 + \frac{2t}{D}\right)} \quad (7-6)$$

k_g : سختی برشی رزین (گیگا پاسکال)

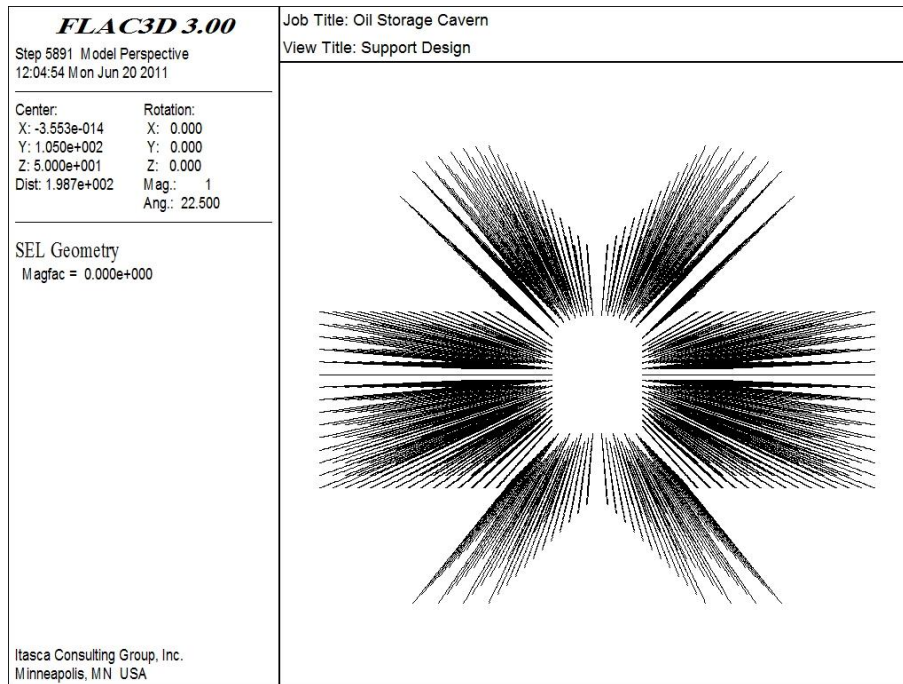
G : مدول برشی رزین (گیگا پاسکال)

جدول (۶-۷): مشخصات رزین بکار برده شده برای تزریق پیچ‌سنگ‌ها

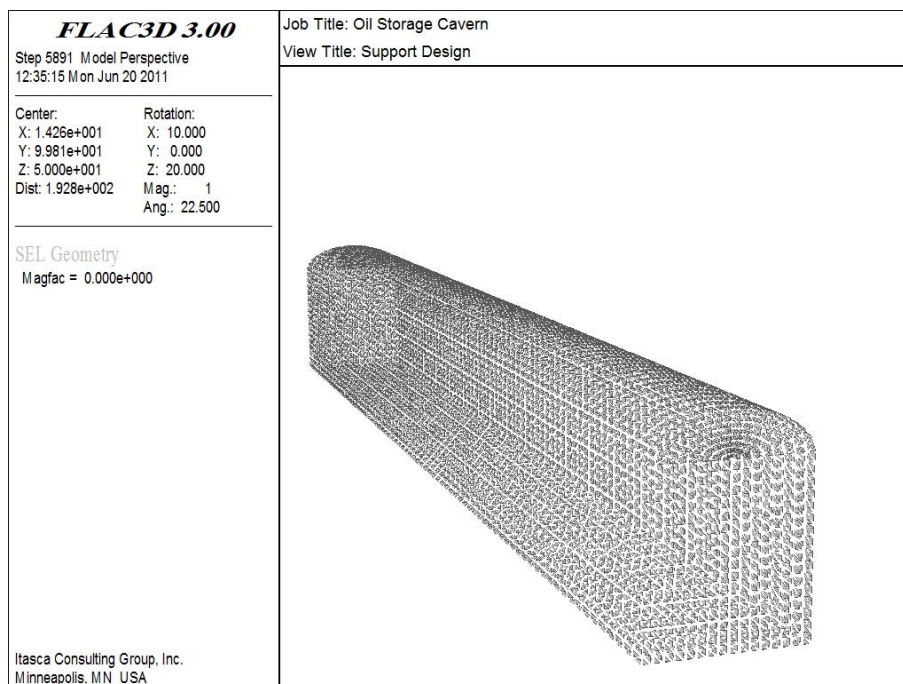
پارامتر	ابعاد	آحاد	مقدار
مقاومت برشی رزین	[F/L]	مگا نیوتن بر متر	۳٫۵۲
زاویه‌ی اصطکاک رزین	[degrees]	درجه	۳۰
سختی رزین	[F/L ²]	گیگا پاسکال	۸٫۳۱
محیط در معرض رزین	[L]	میلی‌متر	۱۴۴٫۵۱

۲-۶-۶ تحلیل پایداری مغارهای دارای سامانه‌ی نگهداری

در اشکال ۳-۶ و ۴-۶، سامانه‌ی نگهداری نصب‌شده در مدلسازی عددی مغار مارنی شامل بتن پاشیده و پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق رزینی مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۶): سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی: پیچ‌سنگ‌های تمام تزریق



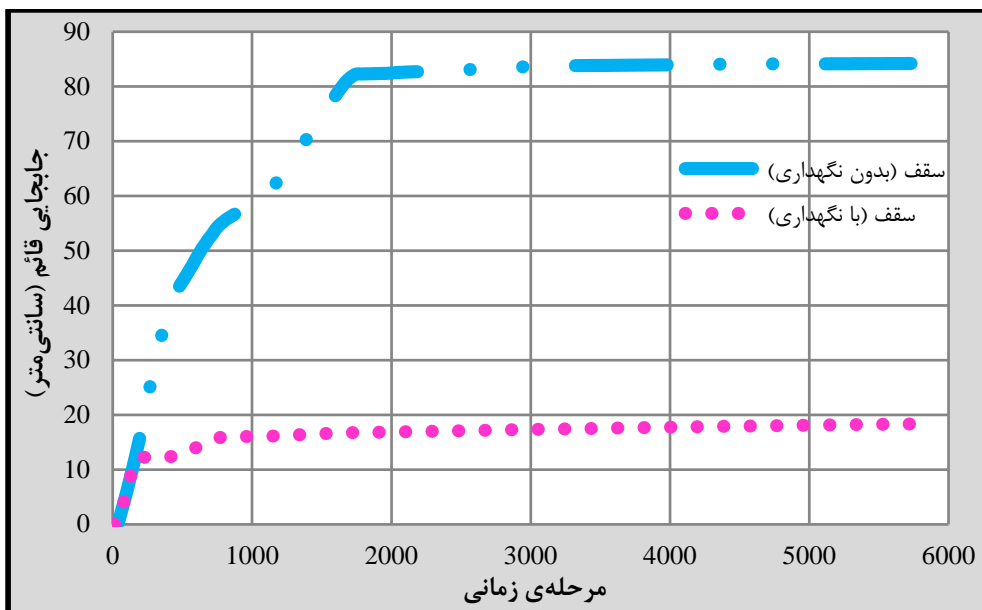
شکل (۴-۶): سامانه‌ی نگهداری مغارهای مارنی: بتن پاشیده

با بکارگیری این سامانه‌ی نگهداری جابجایی‌های جداره‌ی مغار در بازه‌ی ۴۰ تا ۸۰ درصد نسبت به حالت بدون سامانه‌ی نگهداری کاهش یافته است (جدول ۶-۸). در زمان نصب سامانه، جابجایی سقف مغار در حدود ۶ سانتی‌متر بوده و پس از نصب سامانه، سقف مغار در حدود ۱۲ سانتی‌متر دیگر نیز جابجا شده است. همچنین در زمان نصب سامانه، جابجایی دیواره و کف مغار در حدود ۱۱ سانتی‌متر بوده و پس از نصب سامانه، دیواره و کف در حدود ۱۴ و ۲۰ سانتی‌متر دیگر نیز تغییر شکل داده‌اند (جداول ۶-۴ و ۶-۸).

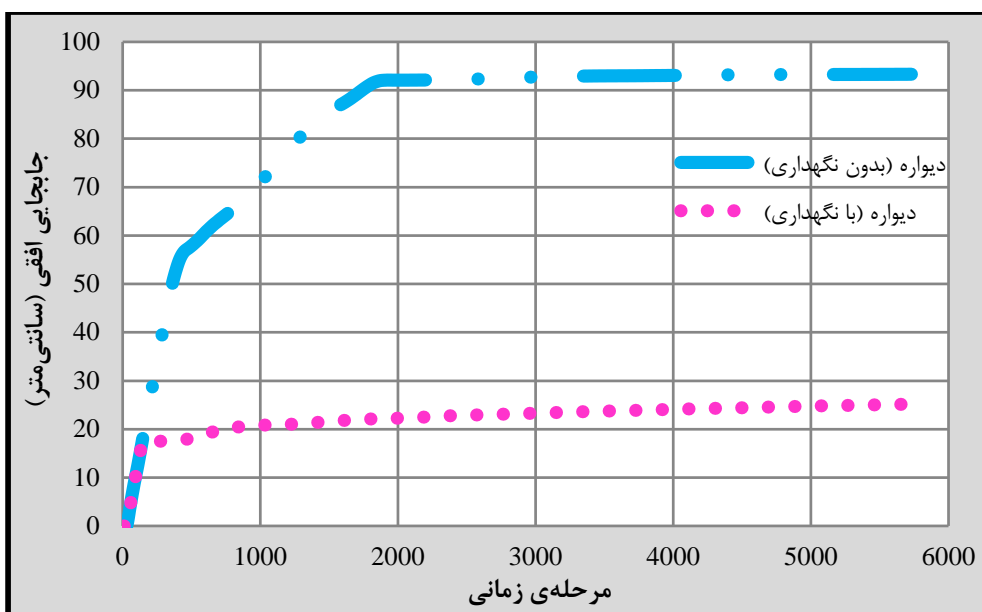
جدول (۶-۸): مقایسه‌ی مقادیر تغییر شکل نهایی جداره‌ی مغارهای مارنی بدون سامانه و دارای سامانه‌ی نگهداری

مقدار کاهش	با نگهداری	بدون نگهداری	تغییر شکل نهایی
			نقطه‌ی شاهد
درصد	سانتی‌متر	سانتی‌متر	آحاد
۷۸	۱۸٫۳۹	۸۴٫۲۲	سقف
۷۳	۲۵٫۲۸	۹۳٫۳۲	دیواره
۴۱	۳۰٫۷۶	۵۱٫۸۰	کف

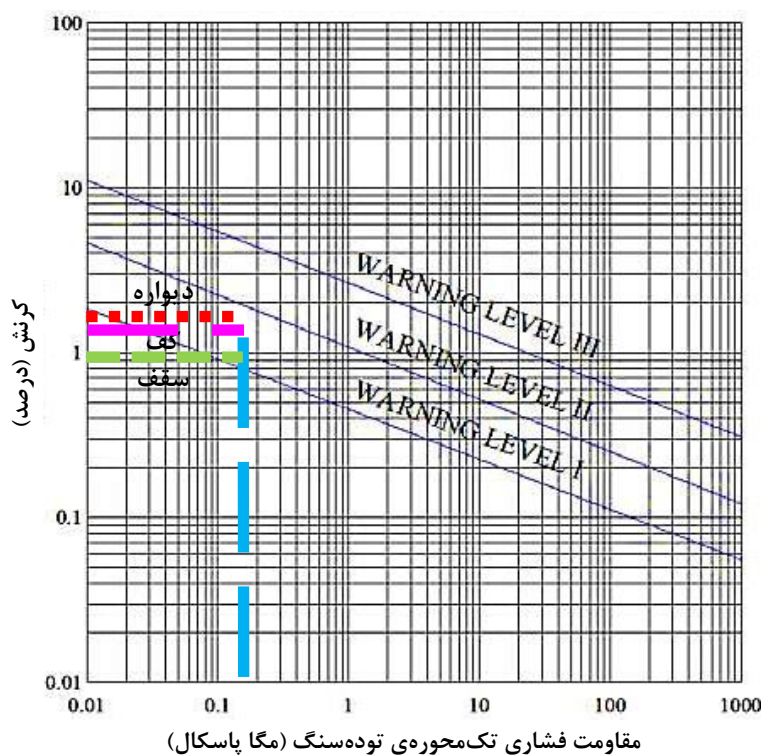
روند کاهش جابجایی‌های سقف و دیواره در نمودارهای ۶-۵ و ۶-۶، در حالات بدون سامانه‌ی نگهداری و دارای سامانه‌ی نگهداری مشاهده می‌شود. در نهایت تحلیل پایداری مغارهای دارای سامانه‌ی نگهداری با روش کرنش بحرانی، شرایط فعلی آن‌ها را پایدار ارزیابی می‌کند. همانطور که در نمودار ۶-۷ مشاهده می‌شود، مقادیر کرنش‌های جداره به سطوحی پایین‌تر از تراز هشدار ۲ کاهش یافته است. در فعالیت‌های عمرانی این تراز به عنوان سطح مبنای پایداری سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود.



نمودار (۵-۶): مقایسه‌ی جابجایی سقف مغار بدون نگهداری و دارای نگهداری



نمودار (۶-۶): مقایسه‌ی جابجایی دیواره‌ی مغار بدون نگهداری و دارای نگهداری



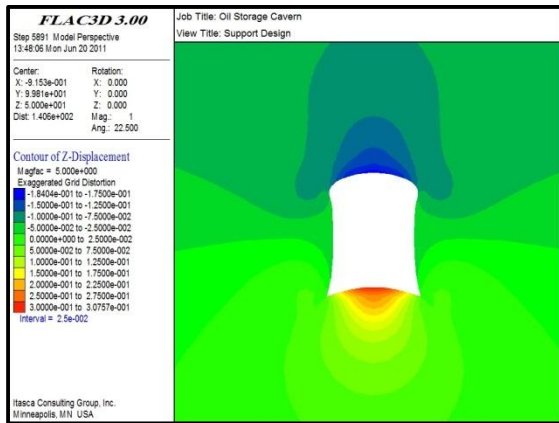
نمودار (۶-۷): تحلیل پایداری مغارهای مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری

۳-۶-۶ نتایج مدل‌سازی عددی سامانه‌ی نگهداری مغار مارنی

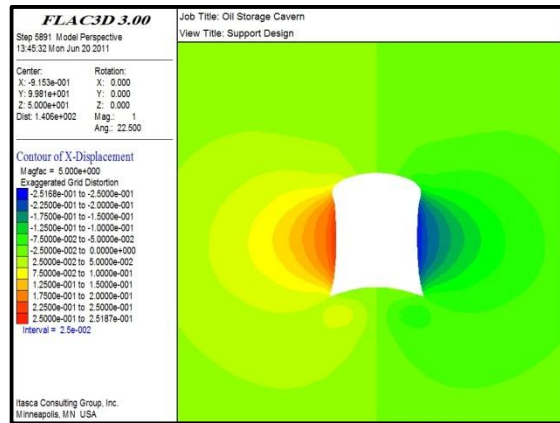
در این بخش تغییراتی که در اثر نصب سامانه‌ی نگهداری در میزان جابجایی‌ها، وضعیت تسلیم توده-سنگ و تنش‌های القایی رخ داده است، تحلیل می‌شود.

۱-۳-۶-۶ جابجایی‌ها و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغار مارنی

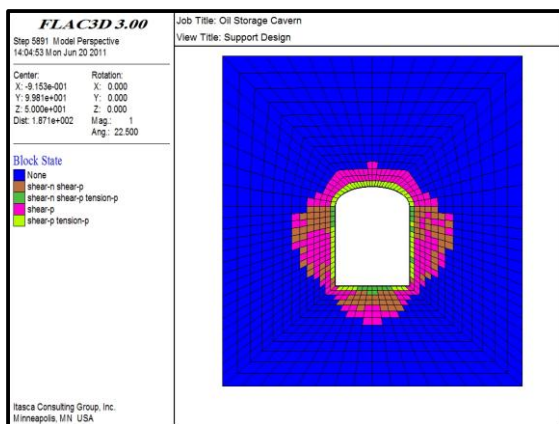
همان‌طور که در بخش پیشین نیز اشاره شد، با نصب سامانه‌ی نگهداری طراحی‌شده، جابجایی‌های جداره در بازه‌ای بین ۴۰ تا ۸۰ درصد کاهش یافته است (جدول ۶-۸ و نمودارهای ۶-۵ و ۶-۶). در مجموعه اشکال ۶-۵: الف و ب، کانتورهای جابجایی‌های افقی و قائم، به همراه تغییر شکل جداره‌ی مغار برای مقایسه با کانتورهای جابجایی جداره‌ی مغار بدون سامانه‌ی نگهداری در اشکال ۶-۵: الف و ج آورده شده است.



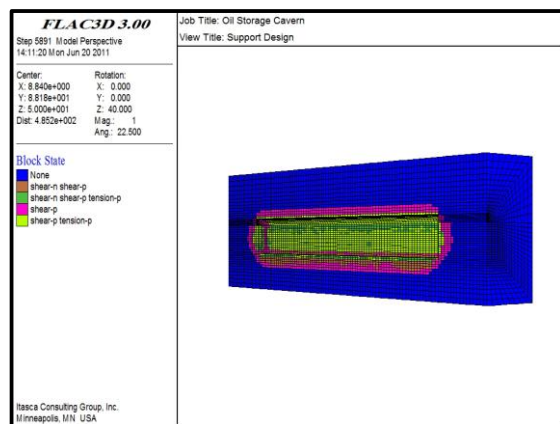
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل (۶-۵): کانتورهای جابجایی افقی و قائم (متر) مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری (الف و ب)؛ وضعیت تسلیم برشی و کششی مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری در مقطع طولی و عرضی مغار (ج و د)

بررسی وضعیت تسلیم توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغار نیز نشان می‌دهد که گسترش این ناحیه برای مغار دارای سامانه‌ی نگهداری در حدود ۳۵ تا ۷۰ درصد در مقایسه با وضعیت تسلیم مغار مارنی بدون سامانه‌ی نگهداری (ر.ک. شکل ۴-۴: الف و ج) کاهش یافته است (جدول ۶-۹). علاوه بر این تعداد اجزا فعال تسلیم نیز برای مغارهای دارای سامانه‌ی نگهداری در حدود ۸۰ درصد کاهش یافته است (شکل ۶-۵: ج و د). با توجه به این که پارامترهای مقاومتی مارن آغاچاری بسیار محافظه‌کارانه در نظر گرفته شده است، توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی مغار در همان مراحل اولیه‌ی پس از حفاری تسلیم شده و شعاع ناحیه‌ی تسلیم نیز به سرعت افزایش می‌یابد. همانطور که در جدول ۶-۹ نیز مشاهده می‌شود، شعاع ناحیه‌ی تسلیم در زمان نصب سامانه در حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد شعاع نهایی ناحیه‌ی تسلیم پس از نصب سامانه بوده است. بنابراین سامانه‌ی نگهداری نصب‌شده تا حدود زیادی گسترش

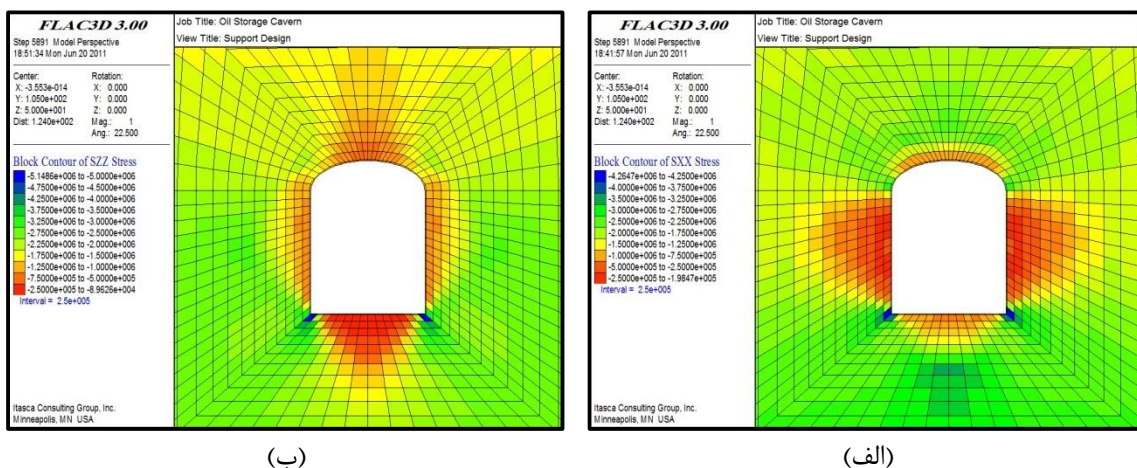
ناحیه‌ی تسلیم را مهار نموده است.

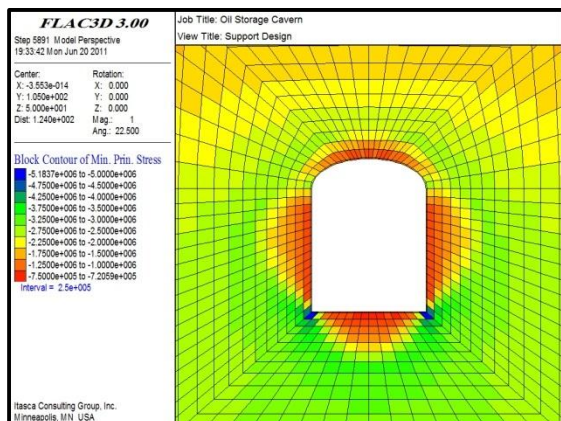
جدول (۶-۹): مقایسه‌ی شعاع ناحیه‌ی تسلیم در جداره‌ی مغارهای مارنی بدون سامانه و دارای سامانه‌ی نگهداری

مقدار کاهش	با نگهداری	نسبت (در زمان نصب به بدون نگهداری)	در زمان نصب	بدون نگهداری	شعاع ناحیه‌ی تسلیم
					نقطه‌ی شاهد
درصد	متر	درصد	متر	متر	آحاد
۶۷	۴	۲۵	۳	۱۲	سقف
۴۸	۸٫۵	۳۹	۶٫۵	۱۶٫۵	دیواره
۳۶	۷	۵۵	۶	۱۱	کف

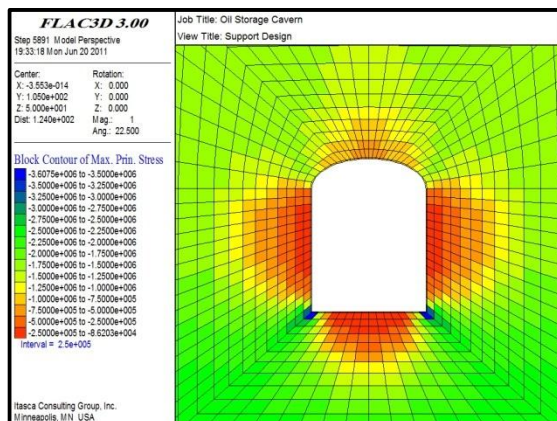
۶-۳-۲ وضعیت تنش‌ها و ضریب ایمنی توده‌سنگ

کانتورهای تنش در جهت محورهای مختصات و کانتورهای تنش‌های اصلی در مجموعه اشکال ۶-۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با نصب سامانه‌ی نگهداری مقادیر تنش‌ها دارای روند افزایشی هستند. از سوی دیگر، با افزایش مقدار مقاومت توده‌سنگ با بکارگیری سامانه‌ی نگهداری، ضریب ایمنی توده‌سنگ روند افزایشی را نشان می‌دهد. ضریب ایمنی در سقف مغار در حدود ۱۴۴ درصد و در دیواره‌ی مغار در حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است؛ اما در کف مغار مقدار افزایش تنها در حدود ۹ درصد بوده است (جدول ۶-۱۰).





(د)



(ج)

شکل (۶-۶): کانتورهای تنش افقی و قائم (پاسکال) در اطراف مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری (الف و ب)؛ کانتورهای کمترین و بیشترین تنش اصلی (پاسکال) در اطراف مغار مارنی دارای سامانه‌ی نگهداری (ج و د)

جدول (۶-۱۰): ضریب ایمنی محاسبه‌شده برای جداره‌ی مغار بدون نگهداری و دارای نگهداری

کف	دیواره	سقف	نقطه‌ی شاهد
			وضعیت مدل
۱	۱،۰۵	۱	بدون نگهداری
۱،۰۹	۱،۳۷	۲،۴۴	دارای نگهداری
+۹	+۳۰	+۱۴۴	درصد تغییر

۶-۷ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل پایداری مغارهای ذخیره‌سازی گناوه مورد تحلیل قرار گرفته و سامانه‌ی نگهداری اولیه برای پایدارسازی آن‌ها طراحی شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، مغارهای مارنی در شرایط ناپایدار و مغارهای ماسه‌سنگی در وضعیت پایدار ارزیابی شده‌اند. از این‌رو سامانه‌ای مرکب از بتن پاشیده و پیچ‌سنگ‌های ۳۲ میلی‌متری برای پایدارسازی مغارهای مارنی پیشنهاد شده است:

۱ بتن پاشیده با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در تمام جداره‌ی مغار

۲ پیچ‌سنگ‌های ۱۲ متری با فاصله‌داری ۱×۱ در سقف

۳ پیچ‌سنگ‌های ۱۵ متری با فاصله‌داری ۱×۱ در دیواره

۴ پیچ‌سنگ‌های ۱۲ متری با فاصله‌داری ۲×۱ در کف

با توجه به مزایای بیان‌شده برای بتن پاشیده‌ی الیافی و گسترش بکارگیری آن در صنعت

تونلسازی جهان، پیشنهاد می‌شود که برای تقویت و تسلیح بتن پاشیده از الیاف فولادی به جای توری سیمی استفاده شود. از آنجا که مغارهای گناوه باید دارای سامانه‌ی پوشش برای مهار نشت نفت خام باشند؛ می‌توان پوشش بتنی این سامانه را علاوه بر کاربری پایدارسازی ساختار تانک فولادی با کاربری پایدارسازی توده‌سنگ دربرگیرنده نیز طراحی نمود.

در این پژوهش برای مدلسازی بتن پاشیده از اجزا ساختاری پوسته^۱ استفاده و اندرکنش بین سطح مشترک بتن و توده‌سنگ نادیده گرفته شده است. در این حالت بتن (پوسته) کاملاً به توده-سنگ (شبه) چسبیده و تغییر شکل سنگ سبب القا و گسترش تنش در بتن شده است. علاوه بر این بتن پاشیده ماده‌ای همسان‌گرد، دارای رفتار کشسان خطی و بدون در نظر گرفتن حد تسلیم فرض شده است. اما برای مدلسازی اندرکنش مماسی (برش یا اصطکاک) بین بتن و توده‌سنگ می‌توان از اجزا ساختاری پوشش^۲ بهره گرفت. در این حالت، پوشش نیروهای فشاری و کششی را تحمل کرده و می‌تواند مستقل از شبکه، تسلیم شود. بنابراین در مراحل بعدی پژوهش برای مدلسازی دقیق رفتار بتن پاشیده، می‌توان اجزا ساختاری پوشش را با مد نظر قرار دادن حد تسلیم و خواص سطح مشترک بتن- توده‌سنگ بکار برد.

تحلیل‌های انجام‌شده این‌طور نشان می‌دهد که سرعت تغییر شکل و گسترش ناحیه‌ی تسلیم در کف مغار بیش‌تر از دیواره و سقف آن است. در زمان نصب سامانه‌ی نگهداری جابجایی کف مغار ۲۱ درصد جابجایی نهایی و جابجایی دیواره و کف در حدود ۱۲ و ۷ درصد جابجایی نهایی است (جدول ۶-۴). شعاع ناحیه‌ی تسلیم در کف مغار نیز در حدود ۵۵ درصد شعاع ناحیه‌ی تسلیم نهایی و شعاع ناحیه‌ی تسلیم سقف و دیواره در حدود ۳۹ و ۲۵ درصد شعاع ناحیه‌ی تسلیم نهایی مغار بدون نگهداری است (جدول ۶-۹). با مد نظر قرار دادن این توضیحات، نصب سامانه‌ی نگهداری باید بلافاصله پس از عملیات حفاری آغاز شده و بهتر است که نصب سامانه‌ی کف نیز همزمان با سقف و

1. Shell Structural Elements
2. Liner Structural Elements

دیواره‌ی مغار انجام شود. به عبارت دیگر مغار، باید کف‌بندی و گوشه‌های آن نیز تا امکان مدور شود. بدین ترتیب یک حلقه‌ی بسته در جداره‌ی مغار ایجاد و بهره‌وری سامانه نیز افزایش می‌یابد.

برای طراحی سامانه‌ی نگهداری مغارهای گناوه بحرانی‌ترین حالت استخراج یعنی حفر تمام مقطع در نظر گرفته شده و بدیهی است که احداث مغارها در مقیاس کامل، به صورت مرحله‌ای انجام خواهد شد. از این‌رو برای کاهش ناپایداری جداره می‌توان روش‌های خاص تونلسازی مانند دریافت چنگانه و روش مشاهده‌ای اتریشی را بکار برد. علاوه بر این پایش منظم داده‌های بدست آمده از ابزارها برای پیشگیری از هر گونه ریزش دیواره‌ی مغار نیز ضروری به نظر می‌رسد.

در این پژوهش بر اساس اطلاعات اولیه، از تحلیل پیوسته برای بررسی شرایط پایداری مغارها استفاده شده است. در مراحل طراحی پایه و تفصیلی با در دست داشتن اطلاعات دقیق از ناپیوستگی-های ناحیه‌ی گناوه، وضعیت بلوک‌ها و گوه‌ها نیز با بکارگیری ابزارهای ناپیوسته می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. تدقیق و بهینه‌سازی سامانه‌ی نگهداری نیز در پس از انجام اکتشافات تفصیلی امکان‌پذیر خواهد بود. همچنین مراحل حفاری مرحله‌ای و نصب سامانه‌ی نگهداری مناسب با این شرایط نیز در هر دو حالت پیوسته و ناپیوسته قابل مدلسازی است. بدیهی است که با مدلسازی حفاری مرحله‌ای میزان ناپایداری مغارهای مارنی تا درصد زیادی کاهش یافته و سامانه‌ی نگهداری سبک‌تری نیز مورد نیاز خواهد بود.

فصل ہفتم:

جمع بندی نتائج و اراءى پيشهادى

۱-۷ جمع‌بندی نتایج

امروزه تعداد بی‌شماری از مغارهای سنگی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در کشورهای مختلف در حال فعالیت هستند. بر مبنای مطالعات انجام‌شده در این پایان‌نامه، بیش‌تر این مغارها بدون پوشش بوده و در اعماق ۵۰ تا ۲۰۰ متری از سطح زمین جانمایی شده‌اند. برای ذخیره‌سازی نفت خام، معمولاً مغارهایی با سطح مقطع دی‌شکل به صورت موازی و با طول بلند در کنار یکدیگر حفر می‌شوند. عرض متداول این مغارها بین ۱۵ تا ۲۰ متر و ارتفاع آن‌ها در حدود ۲۰ تا ۳۵ متر است. برای ذخیره‌سازی نفت خام در مغارهای سنگی توجه به مباحث زیست‌محیطی و مهار نشت سیال امری الزامی است. از این دیدگاه مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام یا دارای پوشش فولادی هستند یا بدون پوشش بوده و آب زیرزمینی نشت سیال را مهار می‌نماید.

در مغارهای سنگی دارای پوشش از لایه‌های متعددی استفاده می‌شود که هر کدام کاربری متفاوتی دارند. پوشش فولادی برای مهار نشت نفت خام، لایه‌ی لغزشی برای کاهش اصطکاک بین لایه‌ها و پوشش بتنی برای پایدارسازی ساختار تانک فولادی است. برای کاهش احتمال کمانش فولاد، آب‌های زیرزمینی بوسیله‌ی سامانه‌ی زهکشی دور می‌شود. در مغارهای سنگی بدون پوشش با توجه به شرایط ناپیوستگی‌ها، نفوذپذیری و عمق قرارگیری، فشار آب زیرزمینی، پرده‌ی آب یا ترکیبی از هر دو از فرار نفت خام پیشگیری می‌کند.

ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام برای ایران از دیدگاه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و پدافند

غیرعامل دارای اولویت قطعی است و این پروژه به صورت جدی توسط زیرمجموعه‌های شرکت ملی نفت ایران دنبال می‌شود. شرکت پایانه‌های نفتی ایران، مطالعات امکان‌سنجی مقدماتی و مکان‌یابی ساختارهای مناسب زمین‌شناسی را در دی‌ماه ۱۳۸۸ به پایان رسانده است. در همین راستا با در نظر گرفتن عواملی مانند نزدیکی به پایانه‌ی صادراتی خارگ، دسترسی به خطوط انتقال، مباحث پدافندی، قوانین زیست‌محیطی و شرایط راهبردی، ساختگاه گناوه برای ذخیره‌سازی ۱۰ میلیون بشکه نفت خام انتخاب شده است.

توده‌سنگ ساختگاه گناوه، تناوبی از مارن و ماسه‌سنگ آجاجاری است. مقادیر متوسط GSI مارن و ماسه‌سنگ به ترتیب برابر با ۳۳ و ۵۸ و مقادیر متوسط RMR مارن و ماسه‌سنگ به ترتیب برابر با ۳۵ و ۴۷ است. بنابراین توده‌سنگ این ساختگاه در رده‌ی متوسط تا ضعیف ارزیابی می‌شود. با مد نظر قرار دادن شرایط ژئومکانیکی و هیدروژئولوژی ساختگاه گناوه، مغارهای گناوه برای مهار نشست باید دارای پوشش فولادی باشند. تجربیات مهندسی موجود در کشور و ویژگی‌های مثبت روش دارای پوشش در مقایسه با روش بدون پوشش نیز در این تصمیم‌گیری موثر بوده‌اند. از سوی دیگر با توجه به ماهیت لایه‌ای توده‌سنگ این ساختگاه و شرایط ناپیوستگی‌های آن، برای انجام فرآیند طراحی مفهومی از محیط شبه پیوسته استفاده و نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ بکار برده شده است.

برای انتخاب ابعاد سطح مقطع با توجه به ابعاد مغارهای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی موجود، چهار حالت با ابعاد و نسبت ابعاد مختلف در نظر گرفته شده است. عرض این مغارها بین ۱۰ تا ۲۰ متر و ارتفاع آن‌ها بین ۱۰ تا ۳۰ متر متفاوت است. بدین ترتیب نسبت ابعاد این مغارها در بازه‌ی ۰٫۷۵ تا ۱٫۵ تغییر می‌کند. مدلسازی‌ها با در نظر گرفتن دو حالت توده‌سنگ مارنی و ماسه-سنگی انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در ساختگاه گناوه با افزایش ابعاد و نسبت ابعاد مغارها جابجایی‌ها تا حدود زیادی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر جابجایی‌های محاسبه‌شده با تغییر نوع توده‌سنگ از ماسه‌سنگ به مارن نیز افزایش بسیار زیادی دارد. روند مشابهی نیز برای گسترش ناحیه‌ی تسلیم در اطراف مغارها مشاهده شده است. در نهایت ابعاد مغارهای ذخیره‌سازی گناوه برابر با

۱۵ متر عرض، ۲۰ متر ارتفاع و ۵۰۰ متر طول در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب به ۱۱ مغار ذخیره‌سازی و ۱ تا ۲ مغار ذخیره برای بازبینی، تعمیرات و نگهداشت مغارها نیاز است. عمق قرارگیری مغارها نیز ۱۰۰ متر و فاصله‌داری آن‌ها برابر با ۴۰ تا ۵۰ متر تعیین شده است.

در فرآیند تحلیل پارامتریک مغارهای مارنی، مقاومت برشی و مدول شکل‌پذیری و در فرآیند تحلیل پارامتریک مغارهای ماسه‌سنگی، مدول شکل‌پذیری و نسبت تنش‌ها به عنوان موثرترین پارامترهای طراحی انتخاب شده‌اند. در تحلیل حساسیت مغارهای مارنی و ماسه‌سنگی نیز ابعاد مغارها بیش‌ترین میزان تغییرات را نشان داده‌اند. بر مبنای تحلیل حساسیت انجام‌شده، عمق مناسب قرارگیری مغارها می‌تواند در بازه‌ی ۸۰ تا ۱۲۰ متر و نسبت ابعاد مغارها می‌تواند در بازه‌ی ۱/۲ تا ۱/۴ متغیر باشد.

در نهایت تحلیل پایداری مغارها با استفاده از روش‌های جابجایی نسبی و کرنش بحرانی این-طور نشان می‌دهد که مغارهای مارنی در شرایط ناپایدار و مغارهای ماسه‌سنگی در شرایط پایدار قرار دارند. سامانه‌ی نگهداری پیشنهادشده برای مغارهای مارنی توسط شاخص کیفیت توده‌سنگ، شامل ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر بتن پاشیده به همراه شبکه‌ی منظمی از داوول‌های تزریقی ۶ متری در سقف و ۷ متری در دیواره با فاصله‌داری ۱ تا ۱/۵ متر است. از سوی دیگر، سامانه‌ی طراحی شده با روش عددی شامل ۳۰ سانتی‌متر بتن پاشیده به همراه شبکه‌ی منظمی از پیچ‌سنگ‌های ۱۲ متری در سقف و کف و ۱۵ متری در دیواره است. فاصله‌داری پیچ‌سنگ‌ها نیز برابر با ۱ متر در سقف و دیواره و ۲ متر در کف در نظر گرفته شده است.

۲-۷ ارائه‌ی پیشنهادها

در این پایان‌نامه برای تخمین پارامترهای مورد نیاز طراحی از روش تجربی و شاخص زمین‌شناسی سنگ استفاده شده است. با توجه به مقادیر برآوردشده و نتایج حاصل از تحلیل‌ها، این‌طور به نظر می‌رسد که این روش، پارامترها را بسیار کمتر از حد قابل قبول برای سنگ‌های سستی مانند مارن

تخمین می‌زند. برآورد جابجایی‌های غیر قابل انتظار و بوجود آمدن ناحیه‌ی تسلیمی که گسترش آن در حدود چندین برابر ابعاد مغارها است، شاهدی بر این مطالب است. بنابراین برای انجام طراحی مفهومی سازه‌های زیرزمینی (که معمولاً در این مرحله داده‌های قابل اطمینانی از توده‌سنگ در دسترس نیست) باید تلاش شود تا به جای بکارگیری روش‌های تجربی از راهکارهای مناسب‌تری استفاده شود. تهیه‌ی چندین بلوک با کیفیت مناسب از ساختگاه مورد نظر و انجام آزمایش‌های مورد نیاز بر روی آن‌ها می‌تواند در این مرحله راهگشا باشد. نکته‌ی مهم دیگر، تبدیل پارامترهای سنگ بکر حاصل از آزمایش‌ها به پارامترهای توده‌سنگ است. برای شرایطی مانند ساختگاه گناوه به دلیل وجود لایه‌های کم‌ضخامت و درزه‌های با فاصله‌داری کم، می‌توان محیط را شبه پیوسته فرض و با استفاده از روابط موجود برای محیط معادل پارامترهای توده‌سنگ را برآورد نمود. قطعاً در صورت بکارگیری این موارد بخش بزرگی از مشکلات موجود در این پژوهش می‌توانست برطرف شود یا حداقل تا حدودی کاهش یابد.

در صورت وجود داده‌های کافی از ستون چینه‌شناسی ساختگاه گناوه، شرایط ناپیوستگی‌ها و وضعیت سطح مشترک لایه‌بندی‌ها پیشنهاد می‌شود که پس از انجام تحلیل پیوسته و یافتن درکی مقدماتی از شرایط پایداری مغارها، در صورت لزوم طراحی مفهومی با فرض محیط ناپیوسته انجام و سامانه‌ی نگهداری با این شرایط طراحی شود. بدیهی است که در این صورت نتایج منطقی‌تر و صحیح‌تری بدست خواهد آمد. همچنین پیشنهاد می‌شود که در تحلیل‌ها روش حفاری، مرحله‌بندی مغارها و سامانه‌ی پوشش نیز مدلسازی شده و اندرکنش لایه‌های مهار نشت و توده‌سنگ نیز بررسی شود. از سوی دیگر ضروری است که در فرآیند طراحی مغارهای ذخیره‌سازی، فاصله‌داری و عمق قرارگیری مغارها با مد نظر قرار دادن مباحث پدافندی و بوسیله‌ی تحلیل‌های دینامیکی تدقیق شود. یکی دیگر از مواردی که باید توسط تحلیل‌های دینامیکی تعیین شود، تغییرات پایداری مغارها در فرآیند گردش سریع سیال است. به خصوص در هنگام برداشت سریع سیال، ممکن است که پایداری مغارها تا حدود زیادی تحت تأثیر قرار گیرد. البته برای مغارهای گناوه که باید دارای پوشش فولادی و بتنی باشند،

اهمیت این موضوع می‌تواند بسیار کم باشد.

در این پایان‌نامه، مدل‌سازی‌ها با داده‌هایی که از دقت کافی برخوردار نبوده‌اند، انجام شده است. قطعاً بکارگیری داده‌های حاصل از مطالعات تکمیلی از عدم قطعیت نتایج می‌کاهد. بدین منظور مطالعات میدانی باید به صورت هوشمندانه انجام و با توجه به جانمایی مغارهای گناوه، عمق گمانه-گیری‌ها به دقت تعیین شود. بدین ترتیب فشارهای محصور مورد نیاز در آزمایش‌های سه‌محوره نیز می‌تواند به درستی انتخاب و شرایط واقعی‌تری در تخمین‌های آزمایشگاهی فراهم آورده شود. همچنین از آنجا که آب‌های زیرزمینی سبب بروز مشکلاتی مانند کمانش و خوردگی در پوشش فولادی می‌شوند، مباحث هیدروژنولوزی ساختگاه گناوه در مطالعات اکتشافی تفصیلی باید به دقت بررسی و آزمایش‌های مورد نیاز در این زمینه نیز انجام شود. نکته‌ی مهم دیگر در مطالعات اکتشافی، توجه به تناوب لایه‌بندی ساختگاه گناوه است. در صورت وجود لایه‌ی ضخیمی از ماسه‌سنگ که دارای شرایط مقاومتی بسیار مناسب‌تری است و جانمایی مغارها در این لایه، تا حدود زیادی می‌تواند از مشکلات ژئومکانیکی موجود کاسته شود. در صورتی که اجتناب از لایه‌های مارنی امکان‌پذیر نیست، برای کاهش ناپایداری مغارها پیشنهاد می‌شود تا از روش‌های حفاری ویژه و برای پوشش جداره از بتن پاشیده‌ی الیافی به جای بتن پاشیده‌ی سنتی استفاده شود. علاوه بر این رفتار شکل‌پذیر مارن و همچنین فشار وارده بر مجموعه نیز می‌تواند با مدل‌سازی عددی بررسی و برآورد شود.

با توجه به این‌که قرار است در مغارهای گناوه نفت خام ذخیره شود، باید برای مشکلات ناشی از آن نیز تدابیر مناسب اندیشیده شود. به عنوان نمونه در ذخیره‌سازی نفت خام مسائلی مانند رسوب ناخالصی‌ها و آسفالتین، تشکیل واکس و تجمع گازهای فرار در مغار باید مورد توجه قرار گیرد. در طراحی پوشش فولادی سامانه‌ی مهار نشت علاوه بر مسائل ژئومکانیکی و هیدروژنولوزی ساختگاه، پیشنهاد می‌شود تا پدیده‌های مانند خستگی، خوردگی و کمانش فولاد به دقت بررسی شده و برای پیشگیری از آن‌ها راه حل مناسبی انتخاب شود. در طراحی لایه‌ی بتنی می‌توان علاوه بر کاربری پایدارسازی تانک درونی، پایداری مکانیکی مغارها را نیز مورد توجه قرار داد. به عبارت دیگر این لایه

با کاربری دوگانه‌ی پایدارسازی توده‌سنگ و تانک فولادی طراحی شود. در طراحی لایه‌ی زهکشی علاوه بر کمانش و خوردگی پوشش فولادی باید مشکل آماس و فشارندگی مارن در مجاورت آب نیز بررسی شده و آب‌های زیرزمینی در صورت وجود با ضریب ایمنی بسیار بالا از محیط دربرگیرنده‌ی مغارها دور شود. همچنین برای حفاظت از محیط زیست در برابر هر گونه آلودگی احتمالی، سامانه‌ی زهکشی باید با کاربری دوگانه‌ی دور کردن آب‌های زیرزمینی و جمع‌آوری نشت نفت خام طراحی شود.

منابع و مراجع

ترازنامه‌ی هیدروکربوری کشور: عملیات تولید، واردات و عرضه‌ی نفت. (۱۳۸۵). وزارت نفت جمهوری اسلامی ایران، موسسه‌ی مطالعات بین‌المللی انرژی، تهران.

خواججه‌علی، غ. ج.، مزینی، ع. ا.، رستمی، م.، نوروزی، غ. ر.، خاک‌پور یگانه، ف.، و پیروی‌نسب، پ. (۱۳۸۶، ۲۶-۲۴ مه‌رمه‌ماه). تعیین روش حفاری مغار مخازن فشارشکن سد گتوند علیا با نگرشی ویژه به نتایج ابزار دقیق. سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران (ص. ۴۷۶-۴۷۱). تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

شرکت پایانه‌های نفتی ایران: امکان‌سنجی احداث مخازن زیرزمینی در ایران به منظور ذخیره‌سازی نفت خام: بررسی-های فنی، مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه گناوه. (۱۳۸۸، اسفندماه). شرکت پایانه-های نفتی ایران، اداره‌ی پژوهش و توسعه، تهران.

شرکت توسعه‌ی منابع آب و نیروی ایران: صفحه‌ی طرح‌های برق‌آبی بزرگ: در حال بهره‌برداری و اجرا. بازبینی در تاریخ ۵ دی‌ماه، ۱۳۸۹، از وب‌گاه شرکت توسعه‌ی منابع آب و نیروی ایران: <http://fa.iwpc.ir/default.aspx>

شرکت جهاد توسعه‌ی منابع آب: صفحه‌ی طرح‌ها و پروژه‌ها. بازبینی در تاریخ ۵ دی‌ماه، ۱۳۸۹، از وب‌گاه شرکت جهاد توسعه‌ی منابع آب: <http://jtma.ir/projectlist-fa.html>

شرکت مشاوران: مطالعات سیویل و جانمایی نیروگاه دوم سد دز. (۱۳۸۴). گزارش مرحله‌ی توجیهی: مشاوران-لامایر، شرکت مشاوران، بخش ژئوتکنیک، تهران.

شرکت مهندسی و توسعه‌ی نفت: صفحه‌ی طرح‌ها و پروژه‌های در دست اجرا: طرح احداث مخازن استراتژیک نفت خام. بازبینی در تاریخ ۵ دی‌ماه، ۱۳۸۹، از وب‌گاه شرکت مهندسی و توسعه‌ی نفت: <http://www.pedec.ir/projectdetail-fa-53.html>

کریمی‌نسب، س.، جلالی‌فر، ح.، و رنجبر، ح. ا. (۱۳۸۸، ۹-۷ بهمن‌ماه). مبانی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری و ضرورت احداث مخازن زیرزمینی نفت خام در ایران. سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران (ص. ۱۵۰۱-۱۴۹۳). یزد: انجمن مهندسی معدن ایران، دانشگاه یزد و شرکت سنگ آهن مرکزی ایران.

- Altowelli, K. (2002, September 04). *News Room Web Page*. Retrieved November 03, 2010, from Saudi Aramco (Saudi Arabian Oil Co.) Web Site: <http://www.saudiaramco.com> › News Room › News › Our World.
- Anagnostopoulos, C. A., Papaliangas, T., Manolopoulou, S., & Dimopoulos, T. (2011). Physical & Mechanical Properties of Chemically Grouted Sand (Article in Press, Corrected Proof). (C. Rogers , R. Sterling , & J. Zhao , Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Elsevier Ltd.* Doi:10.1016/j.tust.2011.05.006.
- Aramco: *Dimensions International*. (2003 & 2009, Spring). Retrieved November 03, 2010, from Saudi Aramco (Saudi Arabian Oil Co.) Web Site: <http://www.saudiaramco.com>.
- Barton, N. (2002, February). Some New Q-Value Correlations to Assist in Site Characterisation & Tunnel Design. (R. Zimmerman, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Pergamon Press, 39(2)*, 185–216. PII: S1365-1609 (02) 00011-4.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974, December). Engineering Classification of Rock Masses for The Design of Tunnel Support. (G. Barla, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Rock Engineering, Springer-Verlag, 6(4)*, 189-236. Doi: 10.1007/BF01239496.
- Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (2005, March). Hydrocarbon Storage in Unlined Rock Caverns in Greek Limestone. (C. Rogers, R. Sterling, & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Elsevier Ltd., 20(2)*, 175–182. Doi:10.1016/j.tust.2004.08.005.
- BP: *BP Statistical Review of World Energy*. (2011, June). Retrieved July 01, 2011, from Beyond Petroleum: BP p.l.c. Web Site: <http://www.bp.com>.
- Brandshaug, T., Christianson, M., & Damjanac, B. (2001, September). *Technical Review of Lined Rock Cavern (LRC) Concept & Design Methodology: Mechanical Response of Rock mass, Phase I*. Technical Report. Itasca Consulting Group, Inc. Morgantown, West Virginia, USA: US. Department of Energy & National Energy Technology laboratory. Ref: ICG01-2062-1-4.
- Calminder, A., & Hahn, T. (1982, May 26-28). Recent Developments in Underground Storage Techniques. *ISRM International Symposium* (pp. 893-901). Aachen, Germany: A.A.

Balkema & International Society for Rock Mechanics.

- Charnaval, Y., Cousin, J., Mansson, L., Tengborg, P., & Johansson, J. (2004, February). *Lined Rock Cavern Storage for Natural Gas*. Final Technical Report, Thermie B. Malmo, Sweden: Sydcraft AB & Gez de France. Project No: OG./270/97/SE/FR.
- Dahl, P. A. (2007, April). The Clients Design Requirements. In A. M. Hansen, A. Neby, & O. Woldmo (Eds.), *Underground Constructions for Norwegian Oil & Gas Industry* (Vol. 16, pp. 13-16). Oslo, Norway: International Committee of Norwegian Tunnelling Society. ISBN-NR: 978-82-92641-08-8.
- Damjanac, B., Torres, C. C., & Dexter, R. (2002, August). *Technical Review of Lined Rock Cavern(LRC) Concept & Methodology: Steel Liner Response, Phase 2*. Final Report. Itasca Consulting Group, Inc. Morgantown, West Virginia, USA: US. Department of Energy & National Energy Technology laboratory. Ref: ICG02-2062-8.
- Fahimifar, A., & Ranjbarnia, M. (2009, July). Analytical Approach for The Design of Active Grouted Rockbolts in Tunnel Stability Based on Convergence-Confinement Method. (C. Rogers, R. Sterling, & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Elsevier B.V.*, 24(4), 363-375. Doi: 10.1016/j.tust.2008.10.005.
- Feng, X. T., & An, H. (2004, June). Hybrid Intelligent Method Optimization of A Soft Rock Replacement Scheme for A large Cavern Excavated in Alternate Hard & Soft Rock Strata. (R. Zimmerman, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Elsevier B.V.*, 41(4), 655–667. Doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.01.005.
- Fossum, K., & Moe, E. (2008, August). The Use of the Underground. In K. Fossum, G. Gjæringen, & E. Moe (Eds.), *Underground Openings: Operations, Maintenance & Repair* (Vol. 17, pp. 9-11). Oslo, Norway: Norwegian Tunnelling Society:International Committee. ISBN-NR: 978-82-92641-10-1.
- Froise, S. (1987). Hydrocarbon Storage in Unlined Rock Caverns: Norway's Use & Experience. (C. Rogers, R. Sterling, & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Techonolgy, Pergamon Journals Ltd.*, 2(3), 265-268. Doi:10.1016/0886-7798 (87) 90033 -2.
- Geostock: *Underground Storage & References Web Page*. Retrieved April 17, 2010, from Geostock Company Web Site: <http://www.geostockgroup.com>.

- Grimstad, E., & Barton, N. (1993, October, 18-21). Updating of The Q-System for NMT. In R. Kompen, O. Opsahl, & K. Berg (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete—Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support* (pp. 46-66). Fagernes, Oslo: Norwegian Concrete Association.
- Grov, E. (2007, April). Geological Requirements & Challenges for Underground Hydrocarbon Storage. In A. M. Hansen, A. Neby, & O. Woldmo (Eds.), *Underground Constructions for Norwegian Oil & Gas Industry* (Vol. 16, pp. 27-34). Oslo, Norway: International Committee of Norwegian Tunnelling Society. ISBN-NR: 978-82-92641-08-8.
- Haug, S. M. (2007, April). Storage of Oil & Gas in Rock Caverns below The Ground Water Table: General Design Development. In A. M. Hansen, A. Neby, & O. Woldmo (Eds.), *Underground Constructions for Norwegian Oil & Gas Industry* (Vol. 16, pp. 19-25). Oslo, Norway: International Committee of Norwegian Tunnelling Society. ISBN-NR: 978-82-92641-08-8.
- Haug, S. M., & Broch, E. (2007, April). Storage of Oil & Gas in Rock Caverns: History & Development. In A. M. Hansen, A. Neby, & O. Woldmo (Eds.), *Underground Constructions for Norwegian Oil & Gas Industry* (Vol. 16, pp. 8-11). Oslo, Norway: Norwegian Tunnelling Society, International Committee. ISBN-NR:978-82-92641-08-8.
- Hoek, E. (2006). Insitu & Induced Stresses. In *Practical Rock Engineering* (pp. 167-189). Vancouver, Canada: Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1990). *Underground Excavations in Rock*. (F. N. Span, Ed.) London, UK: Institution of Mining & Metallurgy, Taylor & Francis. ISBN: 0419160302.
- Hoshino, K. (1993, October). Construction of Underground Caverns for Petroleum Storage in Orogenic Areas: Geological Stability. (G. B. Crosta, & R. J. Shlemon , Eds.) *Engineering Geology, Elsevier Science Publishers B.V.*, 35(3-4), 199-205. Doi:10.1016/0013-7952 (93) 90007-Y.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997). *Engineering Rock Mechanics, An Introduction to The Principles* (Vol. 1, pp. 103-106). Oxford, UK: Elsevier Science Ltd. ISBN: 0 08 041912 7 (Hard Bound) & 0 08 043864 4 (Flexi Bound).
- IEA: *Oil Information*. (2009, July 03). Retrieved November 28, 2010, from International Energy Agency (IEA) Web Site: <http://www.iea.org>. ISBN: 978-92-64-06099-9.

- Ignatius, Y., Johansson, S., & Ravaska, P. (1982, May 26-28). Underground Oil Cavern Project U20 - U22 Neste Oy Porvoo Works, Finland. *ISRM International Symposium* (pp. 923-934). Aachen, Germany: A.A. Balkema & International Society for Rock Mechanics.
- ITASCA¹: Problem Solving With FLAC^{3D}. (2009, December). *FLAC^{3D} Users Guide, 4th*. Minneapolis, Minnesota, United States of America: ITASCA consulting group, Inc.
- ITASCA²: Structural Elements. (2009, December). *FLAC^{3D} Users Guide, 4th*. Minneapolis, Minnesota, United States of America: ITASCA Consulting Group, Inc.
- Jing, L. (2003, April 20). A Review of Techniques, Advances & Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics & Rock Engineering. (R. Zimmerman, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Pergamon Press, 40(3)*, 283–353. Doi: 10.1016/S1365-1609 (03) 00013-3.
- Jing, L., & Hudson, J. A. (2002, June 13). Numerical Methods in Rock Mechanics. (R. Zimmerman, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Pergamon Press, 39(4)*, 409–427. Doi: 10.1016/S1365-1609 (02) 00065-5.
- Johansson, J. (2004). *High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns: Cavern Wall Design Principles*. Royal Institute of Technology (KTH), Division of Soil & Rock Mechanics. Stockholm, Sweden: Trita-Job LIC. ISSN:1650-951X.
- Johansson, S. (1987, August 30 - September 03). Excavation of Large Rock Caverns for Oil Storage At Neste Oy Porvoo Works In Finland. In G. Herget, & S. Vongpaisal (Ed.), *6th International Congress on Rock Mechanics* (pp. 148-153). Montreal, Canada: A.A. Balkema.
- JTC: *Jurong Rock Cavern, PeriScope (02)*. (2007, February). Retrieved July 14, 2011, from JTC Corporation Web Site: <http://www.jtc.gov.sg>.
- Kim, H. Y., Woo, S. W., Lee, D. H., & Cho, J. H. (2009, April 26-30). Economic & Technical Challenges in Lined Rock Cavern LNG Storage System. *9th Topical Conference on Natural Gas Utilization*. Tampa, Florida, USA: AIChE (American Institute of Chemical Engineers). ISBN: 978-0-8169-1052-6.
- Kjorholt, H., & Broch, E. (2007, April). The Water Curtain: A Successful Means of Preventing Gas Leakage from High Pressure Unlined Rock Caverns. In A. M. Hansen, A. Neby, & O. Woldmo (Eds.), *Underground Constructions for Norwegian Oil & Gas Industry*

- (Vol. 16, pp. 35-40). Oslo, Norway: International Committee of Norwegian Tunnelling Society. ISBN-NR: 978-82-92641-08-8.
- Kolymbas, D. (2008). *Tunnelling & Tunnel Mechanics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 131-157. Doi: 10.1007/978-3-540-28500-7.
- Kovári, K. (1993, January 01). Basic Consideration on Storage of Compressed Natural Gas in Rock Chambers. (G. Barla, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Rock Engineering, Springer Wien*, 26(1), 1-27. Doi: 10.1007/BF01019867.
- Lee, C. I., & Song, J. J. (2003, November). Rock Engineering in Underground Energy Storage in Korea. *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Pergamon Press*, 18(5), 467–483. Doi: 10.1016/S0886-7798 (03) 00046-4.
- Maejima, T., Morioka, H., Mori, T., & Aoki, K. (2003, April-June). Evaluation of Loosened Zones on Excavation of A Large Underground Rock Cavern & Application of Observational Construction Techniques. (C. Rogers , R. Sterling, & J. Zhao , Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Pergamon Press*, 18(2-3), 223-232. PII: S0886-7798 (03) 00031-2.
- Mandal, A., Chakravarthy, C. P., Nanda, A., Rath, R., & Jain, S. K. (2010, October 23-27). Analysis & Design of Large Storage Caverns. *6th Asian Rock Mechanics Symposium: Advances in Rock Engineering*. New Delhi, India: Central Board of Irrigation & Power (CBIP) & International Society for Rock Mechanics (ISRM).
- Midtlien, N. O. (2007, April). Cavern Storage Excavation: Sture. In A. M. Hansen, A. Neby, & O. Woldmo (Eds.), *Underground Constructions for Norwegian Oil & Gas Industry* (Vol. 16, pp. 47-56). Oslo, Norway: International Committee of Norwegian Tunnelling Society. ISBN-NR: 978-82-92641-08-8.
- Morfeldt, C. O. (1983). Storage of Petroleum Products in Man-Made Caverns in Sweden. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment, Springer Berlin/ Heidelberg*, 28(1), 17-30. Doi: 10.1007/BF02594793.
- Nielsen, K. (2003, January). *Thermal Energy Storage: A State-of-the-Art*. A Report Within The Research Program: Smart Energy-Efficient Buildings, NTNU, Department of Geology & Mineral Resources Engineering, Trondheim.
- Okuno, T., Wakabayashi, N., Takeuchi, K., Iwano, M., & Tsutsumi, Y. (2006, November 08-

- 10). Experimental Lined Rock Cavern for Natural Gas Storage in Japan. In C. F. Leung, & Y. X. Zhou (Ed.), *4th Asian Rock Mechanics Symposium: Rock Mechanics in Underground Construction*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN: 981-270-437-X.
- Palmstrom, A., & Stille, H. (2007, July). Ground Behaviour & Rock Engineering Tools for Underground Excavations. (C. Rogers, R. Sterling, & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Elsevier Ltd.*, 22(4), 363–376. Doi: 10.1016/j.tust.2006.03.006.
- Pan, P. Z., Feng, X. T., & Hudson, J. A. (2009, June). Study of Failure & Scale Effects in Rocks under Uniaxial Compression Using 3D Cellular Automata. (R. Zimmerman , Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, ElsevierLtd.*, 46(4), 674-685. Doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.11.001.
- Pariseau, W. G. (2007). *Design Analysis in Rock Mechanics*. Salt Lake City, Utah, USA: Taylor & Francis. pp. 87-226. ISBN 10: 0-415-40357-X.
- PB-KBB: *Advanced Underground Gas Storage Concepts: Refrigerated Mined Cavern Storage*. (1998, September). Houston, TX, USA: PB-KBB Inc.
- Pells, P. J. (2002, July). Developments in The Design of Tunnels & Caverns in The Triassic Rocks of The Sydney Region. (R. Zimmerman , Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Pergamon Press*, 39(5), 569–587. PII: S 1365-1609 (02) 00058 -8.
- Ramamurthy, T. (2008). Estimation of Stresses in Rock Mass. In T. Ramamurthy (Ed.), *Enginneering in Rocks for Slopes Foundations & Tunnels* (pp. 292-319). New Delhi, India: PHI Learning. ISBN: 978-81-203-3275-1.
- Ratigan, J. L., & Hall, O. (1999, November). *Commercial Potential of Natural Gas Storage in Lined Rock Caverns: LRC*. Topical Report. Sofergaz US Inc. & LRC Team. Morgantown, West Virginia, USA: U.S. Department of Energy & Federal Energy Technology Center. SZUS-0005 DE-AC26-97FT34348-01.
- Reik, G., & Rahen, W. (2006, November 08-10). Geotechnical, Environmental & Structural Aspects of Underground Storage of Hazardous Substances. In C. F. Leung, & Y. X. Zhou (Ed.), *4th Asian Rock Mechanics Symposium: Rock Mechanics in Underground Construction*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN: 981-270-437-X.

- Sabatini, P. J., Pass, D. G., & Bachus, R. C. (1999, June). Ground Anchors & Anchored Systems. *Geotechnical Engineering Circular No. 4*, 4-11. Washington D.C., USA: Federal Highway Administration, US Department of Transportation. Report No. FHWA-IF-99-015.
- Sakurai, S. (1981, June 29-July 02). Direct Strain Evaluation Technique in Construction of Underground Opening. *The 22nd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)* (pp. 278-282). Cambridge, MA: The Massachusetts Institute of Technology, American Rock Mechanics Association.
- Sakurai, S. (1999, August 25 - 28). Interpretation of Field Measurements in Tunneling Practice. *9th ISRM Congress* (pp. 278-282). Paris, France: A.A. Balkema, International Society for Rock Mechanics.
- Sakurai, S., Kawashima, I., & Otani, T. (1993, June 21-24). A Criterion for Assessing the Stability of Tunnels. In R. E. Sousa, & Grossmann (Ed.), *ISRM International Symposium-EUROCK 93* (pp. 969-973). Lisboa, Portugal: A.A. Balkema, International Society for Rock Mechanics. ISBN: 90 54 10 339 6.
- Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks* (1nd ed., Vol. 5, pp. 51-77). (J. A. Hudson, Ed.) Kidlington, Oxford, Great Britain: Elsevier Ltd. ISBN 13: 978-0-08-044987-6.
- Singh, B., & Jethwa, J. L., Dube, A. K. & Singh, B. (1992, January). Correlation Between Observed Support Pressure & Rock Mass Quality. *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Pergamon Press*, 7(1), 59-74. Doi: 10.1016/0886-7798(92)90114-W.
- Sinha, R. S. (1989). Introduction. In R. S. Sinha (Ed.), *Underground Structures Design & instrumentation* (Vol. 59A, pp. 1-32). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V. ISBN: 0-444-87462-3.
- Siosteen, B. (1979). Underground oil storage in Sweden. *Endeavour, Pergamon Press*, 3(4), 158-162. Doi: 10.1016/0160-9327(79)90034-6.
- Stille, H., & Palmstrom, A. (2008, January 01). Ground Behaviour & Rock Mass Composition in Underground Excavations. (C. Rogers , R. Sterling , & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Elsevier Ltd.*, 23(1), 46-64. Doi: 10.1016/j.tust.2006.11.005.

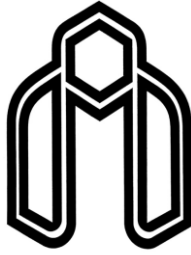
- Sturk, R., & Stille, H. (1995, April). Design & Excavation of Rock Caverns for Fuel Storage--A Case Study from Zimbabwe. *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Pergamon Press & Elsevier Science Ltd.*, 10(2), 193-201. Doi:10.1016/0886-7798 (95) 00007-L.
- Tezuka, M., & Seokab, T. (2003, April-June). Latest Technology of Underground Rock Cavern Excavation in Japan. (C. Rogers , R. Sterling, & J. Zhao , Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Pergamon Press*, 18(2-3), 127–144. PII: S0886-7798 (03) 00039-7.
- Thomas, A. (2009). *Sprayed Concrete Lined Tunnels*. Oxon, Abingdon, England: Taylor & Francis. pp. 1-10. ISBN: 0-203-02899-6.
- Varadarajan, A., & Sharma, K. G. (2008). Numerical Methods & Applications. In T. Ramamurthy (Ed.), *Engineering in Rocks for Slopes, Foundations & Tunnels* (pp. 481-516). New Delhi, India: PHI Learning. ISBN: 978-81-203-3275-1.
- Weishen, Z., Yong, L., Shucai, L., Shugang, W., & Qianbing, Z. (2011, February). Quasi-Three-Dimensional Physical Model Tests on A Cavern Complex Under High In-Situ Stresses. (R. Zimmerman , Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences, Elsevier B.V.*, 48(2), 199-209. Doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.11.008.
- Willett, D. C. (1996). Storage & Power Generation. In H. L. Hartman (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook* (2th ed., Vol. 2, pp. 2126-2135). Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Inc. ISBN: 0-87335-100-2.
- Yoshinaka, R., Osada, M., Park, H., Sasaki, T., & Sasaki, K. (2008, February 01). Practical Determination of Mechanical Design Parameters of Intact Rock Considering Scale Effect. (G. B. Crosta , & R. J. Shlemon , Eds.) *Int. J. Engineering Geology, Elsevier B.V.*, 96(3-4), 173–186. Doi: 10.1016/j.enggeo.2007.10.008.
- Zang, A., & Stephansson, O. (2009). Generic Stress Data. In *Stress Field of the Earth's Crust* (pp. 225-252). Springer Science B.V. Doi: 10.1007/978-1-4020-8444-7.
- Zhao, J., & Christensen, J. B. (1996, January). Construction & Utilization of Rock Caverns in Singapore, Part D: Two Proposed Cavern Schemes. (C. Rogers , R. Sterling , & J. Zhao , Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology, Pergamon Press & Elsevier Science Ltd.*, 11(1), 85-91. Doi:10.1016/0886-7798 (96) 00057-0.

- Zhao, J., & Lee, K. W. (1996, January). Construction & Utilization of Rock Caverns in Singapore, Part C: Planning & Location Selection. (C. Rogers, R. Sterling, & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology*, Pergamon Press & Elsevier Science Ltd., 11(1), 81-84. Doi:10.1016/0886-7798 (96) 00056-9.
- Zhu, W. S., Li, X. J., Zhang, Q. B., Zheng, W. H., Xin, X. L., Sun, A. H., et al. (2010, October). A Study on Side Wall Displacement Prediction & Stability Evaluations for Large Underground Power Station Caverns. (R. Zimmerman, Ed.) *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences*, Elsevier B.V., 47(7), 1055–1062. Doi: 10. 1016/j.ijrmms.2010.07.008.
- Zhu, W. S., Sui, B., Li, X. J., Li, S. C., & Wang, W. T. (2008, November). A Methodology for Studying The High Wall Displacement of Large Scale Underground Cavern Complexes & It's Applications. (C. Rogers, R. Sterling, & J. Zhao, Eds.) *Int. J. Tunnelling & Underground Space Technology*, Elsevier B.V., 23(8), 651–664. Doi: 10.1016/j.tust.2007.12.009.

Abstract

Underground caverns have an important role in the principal nations infrastructures e.g. oil and gas, electricity and communication, military, nuclear, sewage, tourism, food, etc. Large rock or salt caverns are used for storage of variety type of hydrocarbons in oil and gas industry. In rock caverns, liner system or water curtain controls fluid leakage and prevent environment contamination. In Iran, feasibility study of underground storage in rock caverns has been commenced in the middle of 80's. Therefore, in this thesis, the process of conceptual design of Genaveh rock caverns for storage of 10 Mbbl crude oil is clarified. The main scopes of this thesis are geometrical design, preliminary support system selection and evaluation of parameters that affect stability of caverns. Conceptual design process is done with numerical method and *FLAC^{3D}* software. Thus, the cavern dimensions are 15 m in width, 20 m in height and 500 m in length. Caverns distances are between 40 m to 50 m and their depth are about 100 m below the ground surface. Because of the geomechanical and hydrological properties of Aghajari formation, liner system is essential for oil leakage prevention. Determined support system of cavern consists of shotcrete and fully grouted rock bolts. The thickness of shotcrete is about 30 cm, the length of rock bolts are about 12m in the crown and 15 m in the walls and their diameter is 32 mm. In parametric analysis, shear strength is the most sensitive parameter and in sensitivity analysis, aspect ratio is the most important parameter.

Keywords: Underground Storage, Crude Oil, Rock Cavern, Three Dimensional Modeling, Conceptual Design, Parametric Analysis, Stability Analysis.



**Shahrood University of Technology
School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering
Exploitation Department**

**Preliminary Geometrical Design, Stability Analysis & Support System
Selection for Crude Oil Storage Caverns
A Case Study: Genaveh Port Crude Oil Storage Caverns**

By: Maliheh Davoodabadi

**Supervisors:
Dr. Ahmad Ramezanzadeh
Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali**

**Advisor:
Dr. Hosein Jalalifar**

**Master of Science Thesis
Summer 2011**

