

# تحلیل پایداری مغارهای سنگی بدون پوشش ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت در سازند آسماری

محمد حیدری‌زاده، ساناز کاسبی و رضا ضرغامی\*

گروه مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۲/۱

## چکیده

یکی از روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت، ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی بدون پوشش می‌باشد. پایداری مغار و کنترل نشت سیال از مهم‌ترین مسائل در ذخیره‌سازی زیرزمینی هستند. حفظ ایمنی سازه حین ساخت و بهره‌برداری و همچنین ممانعت از نشت نفت ذخیره‌شده از نتایج عمده و اصلی پایداری یک سازه می‌باشند؛ بنابراین تحلیل پایداری مغار از بخش‌های مهم روند طراحی، ساخت و بهره‌برداری آن خواهد بود. برای این منظور، در این تحقیق عوامل مختلف مؤثر بر پایداری مغار تعیین و بررسی شدند. بررسی‌ها نشان داد که به‌منظور انجام یک تحلیل پایداری قابل‌اطمینان و کاربردی، روندی مناسب و کلی صرف‌نظر از نوع روش عددی مورد استفاده، نیاز خواهد بود. بنابراین، علاوه بر بررسی عوامل مؤثر بر پایداری، روندی برای تحلیل پایداری مغارهای بدون پوشش بیان شده است. در ادامه تحلیل پایداری یک نمونه از مغارهای سنگی بدون پوشش در سازند آسماری با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. برای مدل‌سازی مغار از اطلاعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی و عمومی استفاده شده است. هدف از مدل‌سازی انجام شده، پیش‌بینی میزان تغییر شکل و جابه‌جایی رخ داده در طی حفاری و سپس طراحی سامانه نگهداری متشکل از پیچ‌سنگ و شاتکریت برای محدودسازی جابه‌جایی و تغییر شکل است. همچنین در پایان، ارزیابی حساسیت چندین پارامتر تأثیرگذار بر روی پایداری مغار و طراحی سامانه نگهداری انجام شده است.

**کلمات کلیدی:** ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت، مغارهای سنگی بدون پوشش، تحلیل پایداری، سازند آسماری، کنترل نشست سیال.

## مقدمه

به چهار دسته روش‌های کلی سطحی، زیرسطحی، شناور و زیرزمینی تقسیم‌بندی می‌شوند. حجم زیاد ذخیره‌سازی، ایمنی بالا و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری اندک موجب شده تا ذخیره‌سازی زیرزمینی بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه کشورهای جهان قرار گیرد.

یکی از نیازهای ضروری هر کشور، ایجاد مخازنی به‌منظور ذخیره‌سازی انواع مواد هیدروکربوری به‌ویژه نفت خام است. ذخیره‌سازی نفت خام

در این مقاله ابتدا پارامترهای مؤثر بر رفتار توده‌سنگ که شامل شرایط زمین‌شناسی و شرایط عملیاتی می‌باشد، شرح داده شده است. سپس روند تحلیل پایداری برای مغارهای ذخیره‌سازی زیرزمینی بدون پوشش بیان شده است. در ادامه، تحلیل پایداری یک نمونه مغار سنگی بدون پوشش در سازند آسماری مطابق با استانداردهای طراحی و ساخت انجام شده است. در پایان، ارزیابی حساسیت بر روی چندین پارامتر تأثیرگذار در پایداری و طراحی سامانه نگهداری موقت صورت گرفته است.

### پارامترهای مؤثر بر رفتار توده‌سنگ

توده‌سنگ در طبیعت اغلب دارای ناهمسان‌گردی‌هایی است که پیش‌بینی رفتار متقابل سازه ایجاد شده و توده‌سنگ دربرگیرنده را پیچیده می‌کند. از آنجایی که سازه می‌تواند از جنس سنگ باشد یا روی سنگ و یا در داخل آن ایجاد شود. برای هر کاربرد، داشتن دانش کافی از شرایط زمین‌شناسی، تنش‌های برجا، آب زیرزمینی، ناهمسان‌گردی و غیره، لازم و ضروری است [۶]. عوامل اولیه که با درجات مختلف بر پایداری مغار مؤثرند، به دو دسته اصلی شرایط زمین‌شناسی و عملیاتی تقسیم می‌شوند [۷]. پارامترهای مؤثر بر رفتار توده‌سنگ در جدول ۱ ذکر شده است.

### روند تحلیل پایداری در مغارهای سنگی بدون پوشش

به‌طور کلی می‌توان گفت، تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی با روش‌های تجربی، مشاهده‌ای، تحلیلی و عددی انجام می‌پذیرد. چگونگی استفاده از این روش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است، چرا که به‌ترتیب از روش تجربی به‌سوی روش عددی بر میزان دقت و اطمینان طراحی انجام شده افزوده می‌شود. برای ساخت حفاریات زیرزمینی از جمله مغار سنگی مراحل

ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام معمولاً در مغارهای نمکی و سنگی صورت می‌گیرد. ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی نسبت به مغارهای نمکی روش جدیدتری بوده و در عمق کم‌تری انجام می‌شود. نفت و فرآورده‌های نفتی را می‌توان در مغارهای سنگی با پوشش یا بدون پوشش ذخیره نمود. انتخاب هر یک از روش‌های ذخیره‌سازی به شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی سایت مورد نظر بستگی دارد و با مشکلات و پیچیدگی‌های مختص به خود همراه است. پایداری مغار و کنترل نشست سیال مهم‌ترین مسائل مرتبط با ذخیره‌سازی زیرزمینی هستند. مغارهای سنگی بدون پوشش در سنگ‌های با نفوذپذیری نسبتاً کم و زیر سطح آب زیرزمینی ساخته می‌شوند. وجود آب زیرزمینی حول مغار از جریان یافتن نفت درون سنگ و نشست آن جلوگیری می‌کند. برای این منظور، فشار هیدرواستاتیکی آب زیرزمینی باید بیش از فشار نفت ذخیره شده باشد. در شرایطی که فشار آب زیرزمینی کافی نباشد، آب به صورت مصنوعی و از طریق پرده آبی<sup>۱</sup> که در بالای مغار قرار می‌گیرد، تزریق می‌شود [۱].

مطالعات بسیاری در زمینه‌های مختلف مرتبط با تحلیل پایداری در دنیا انجام شده است. لی و همکاران به بررسی رفتار تنش و تغییرشکل مغار ذخیره‌سازی نفت در چین ساخت پرداختند. اودین به طراحی اولیه مغارهای ذخیره‌سازی پرداخت [۲]. عبدالهی‌پور و همکاران تأثیر فاصله بین مغارها را بر پایداری آن‌ها بررسی نمودند [۳]. آیزنستن و همکاران پایداری را با بررسی تنش و تغییرشکل مغار سنگی به‌صورت آزمایشگاهی و تئوری مورد مطالعه قرار دادند [۴]. در حالت کلی می‌توان چهار منشأ اساسی در ناپایداری سازه‌های زیرزمینی نام برد که عبارت‌اند از:

- ناپایداری ناشی از غیریکنواختی ساختمان زمین‌شناسی
- ناپایداری ناشی از تنش بیش‌ازحد
- ناپایداری ناشی از هوازگی و یا آماس<sup>۲</sup>
- ناپایداری ناشی از فشار یا جریان مداوم و شدید آب [۵].

1. Water Curtain

2. Swelling

جدول ۱ پارامترهای مؤثر بر رفتار توده سنگ		
نحوه تأثیر	نام پارامتر	
خواص مقاومتی و فیزیکی سنگ بکر و خواص ناپیوستگی‌ها مانند زبری، تداوم، فاصله‌داری <sup>۱</sup> ، پرشدگی <sup>۲</sup> ، شیب، جهت شیب، فراوانی و غیره در رفتار سنگ مؤثرند [۸].	سنگ بکر	پارامترهای زمین‌شناسی
	ناپیوستگی‌ها	
در طراحی سامانه نگهداری، راستا، شکل و فاصله بین مغارها تأثیرگذار می‌باشند [۹].	تنش‌های بکر منطقه	
با تغییر فشار منفذی، تنش‌های مؤثر دچار تغییر شده و متعاقب آن باعث تغییر رفتار توده‌سنگ می‌شود [۱۰].	نفوذپذیری ماده‌سنگ	فشار منفذی آب
	جریان سیال در درزه	
ناهمسان‌گردی و ناهمگنی باعث ایجاد خواص مختلف تغییرشکل، نفوذپذیری و فراوانی درزه‌ها در نقاط و جهات مختلف می‌شود [۸].	ناهمسان‌گردی و ناهمگنی	
رفتار سنگ طی زمان تحت تأثیر پدیده‌هایی مانند خزش <sup>۳</sup> و رهایی <sup>۴</sup> تنش قرار می‌گیرد [۱۱].	تأثیر زمان	
دما بر روی پارامترهای مقاومتی الاستیک، پلاستیک تأثیرگذار است [۱۲].	تأثیر دما	
حفاری سبب ایجاد تغییر در تمرکز تنش و بروز جابه‌جایی‌های احتمالی در اطراف فضای حفاری شده می‌شود [۹].	شرایط حفاری	فاصله بین مغارها
	با قرار گرفتن چندین مغار در مجاورت هم، امکان بروز شرایط نامساعد در تنش‌های حاکم بر ستون سنگی بین مغارها و در نتیجه ناپایداری سازه وجود دارد [۹].	
در اعماق زیاد، تنش‌های بالا و یا ناهمسان‌گرد در توده‌سنگ ممکن است به‌صورت محلی بیش‌تر از مقاومت سنگ یا توده سنگ باشد و در نتیجه پدیده انفجار سنگ، مچاله شدن و سایر ناپایداری‌های ناشی از تنش ایجاد شوند [۱۳].	عمق قرارگیری، شکل و امتداد مغار	شرایط عملیاتی
شکل مقطع مغار باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که هزینه حفاری و سامانه نگهداری مورد نیاز را به حداقل برساند [۱۴].		
رایج‌ترین نگهداری نهایی سقف مغارهای بزرگ در سنگ‌های نسبتاً خوب تا خوب، استفاده از نصب پیچ‌سنگ <sup>۵</sup> به‌صورت منظم <sup>۶</sup> و شاتکریت <sup>۷</sup> می‌باشد. دیواره‌های مغار نسبت به سقف به نگهداری سبک‌تری نیاز داشته و از نصب پیچ‌سنگ موضعی <sup>۸</sup> ، منظم و یا شاتکریت <sup>۹</sup> برای آن استفاده می‌شود. به‌طور کلی از پیچ‌سنگ، شاتکریت و آستر بندی بتنی <sup>۱۰</sup> برای نگهداری موقت و دائم و در نتیجه تأمین پایداری سازه‌های ایجاد شده در سنگ، استفاده می‌شود [۹].	روش نگهداری	

اصلی شناسایی، طراحی و اجرا باید انجام شود.

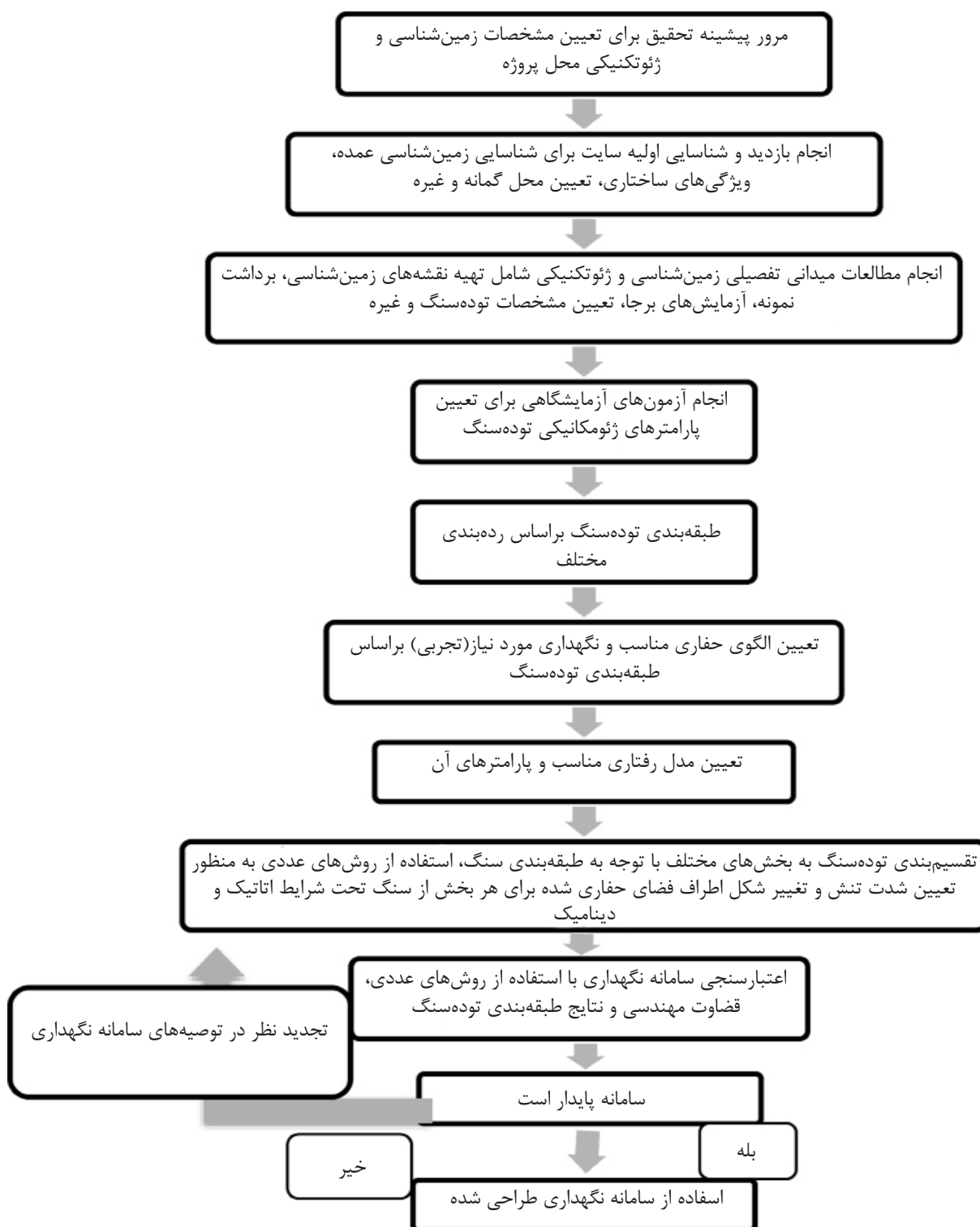
داده شد، مدل‌سازی مغارهای سنگی با استفاده از روش‌های عددی، یکی از مراحل اصلی روند تحلیل پایداری می‌باشد.

جمع‌آوری اطلاعات اولیه، مطالعات امکان‌سنجی، تعیین مشخصات تفصیلی ساختگاه مورد نظر، تحلیل پایداری، طراحی و ساخت مغار، مراحل اصلی در فرآیند ساخت مغار به شمار می‌روند. با توجه به هدف تحقیق حاضر، روندی برای تحلیل پایداری مغار ارائه شده است. روند پیشنهادی و کلی برای تحلیل پایداری مغار سنگی بدون پوشش در شکل ۱ ارائه شده است.

**تحلیل پایداری مغار سنگی بدون پوشش ذخیره‌سازی نفت در سازند آسماری**

همان‌طور که در روند تحلیل پایداری در شکل ۱ نشان

1. Spacing
2. Filling
3. Creep
4. Relaxation
5. Rock Bolt
6. Systematic Bolting
7. Shotcrete
8. Spot Bolting
9. Shotcrete (بتن یا ملاتی که با فشار و سرعت بالا بر روی یک سطح پاشیده می‌شود تا لایه‌ای متراکم، خود نگهدار و برابر ایجاد گردد).
10. Concrete Lining



شکل ۱ روند کلی تحلیل پایداری مغاره های سنگی بدون پوشش ذخیره سازی زیرزمینی نفت.

سنگی بدون پوشش به صورت دوبردی در حالت کرنش صفحه ای انجام شده است. از روش المان محدود برای تحلیل و پایداری استفاده شده است.

از این رو، در این بخش برای پیش بینی اولیه و کلی از تحلیل و پایداری مغاره های سنگی احداث شده در سازند آسماری، یک تحلیل پایداری مغار

مش‌بندی مغار مدل‌سازی شده و مراحل حفاری مغار نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل ۳ مشخص است شرایط مرزی دور در کناره‌ها به صورتی است که جابه‌جایی در راستای قائم آزاد و در راستای محور افقی ثابت شده است. همچنین در مرز پایین جابه‌جایی‌ها در هر دو راستا ثابت شده است. شرایط بارگذاری در محیط به‌گونه‌ای است که محیط تنها تحت بار روباره قرار دارد و میدان تنش‌های اولیه به مدل اعمال نمی‌شود. حفاری در نرم‌افزار به این صورت انجام شده است که، در گام اول بار گسترده‌ای معادل با تنش‌های قبل از حفاری به دیواره قسمت‌های حفاری شده اعمال می‌شود (این قابلیت به‌صورت خودکار در نرم‌افزار وجود دارد). با انجام این کار شرایط قبل از حفاری برای هر مقطع حفاری فراهم می‌شود. سپس با کاهش تدریجی بار گسترده اعمالی (شبیه‌سازی فرآیند رهاسازی تنش) می‌توان سامانه نگهداری مورد نظر را در زمان مناسب نصب کرد. به‌صورت کلی در این مدل‌سازی سطح مغار براساس مراحل حفاری به ۸ قسمت تقسیم شده که در ۱۰ مرحله حفاری و تعدیل بار می‌شود. میزان آزادسازی بار در مراحل مختلف که در اثر جابه‌جایی دیواره‌ها ایجاد می‌شود از این لحاظ اهمیت دارد که براساس نمودار تنش-جابه‌جایی (نمودار اندرکنش زمین)، زمان دقیق و مناسب نصب نگهداری تعیین می‌شود. در مدل‌سازی اخیر بعد از ارزیابی‌های انجام شده مشخص شد که زمان مناسب برای نصب نگهداری بعد از آزادسازی ۷۰٪ بار اولیه می‌باشد. برای به‌دست آوردن جابه‌جایی انجام شده در هر مرحله از حفاری باید جابه‌جایی گام اول از میزان جابه‌جایی در گام‌های بعدی کم شود. برای این منظور جابه‌جایی یک نقطه بحرانی در سقف تونل انتخاب و به‌صورت نمودار رسم شده است تا در گام بعد از نصب نگهداری بتوان مقایسه‌ای را انجام داد. شکل ۴ نشان‌دهنده نمودار جابه‌جایی در نقطه مورد نظر است.

### خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ مورد استفاده در مدل‌سازی

پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده برای مدل‌سازی در جدول ۲ ذکر شده است. این پارامترها نتیجه آزمون‌های برجا و آزمایش‌های مکانیک‌سنگی انجام شده در ساختگاه سد خرسان ۳ واقع در سازند آسماری می‌باشد. از بین پارامترهای ذکر شده، پارامترهایی نظیر ضریب پواسون، تخلخل از نتایج آزمایشگاهی استخراج شدند. برای بررسی تغییر شکل و جابه‌جایی‌های (رفتار پلاستیک) رخ داده در توده‌سنگ از معیار موهر-کولمب<sup>۱</sup> استفاده شده است.

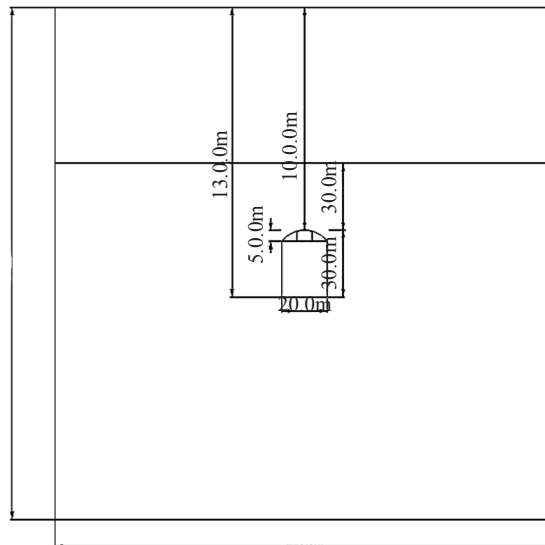
جدول ۲ پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ استفاده شده در مدل‌سازی.

نام پارامتر	واحد	اندازه میانگین
مدول تغییر شکل‌پذیری (E)	GPa	۵/۸
ضریب پواسون (ν)	-	۲۶/۰
زاویه اصطکاک (φ)	درجه	۳۴
زاویه اتساع (ψ)	درجه	۷
مقاومت کششی (T)	MPa	۳/۰
چسبندگی (C)	MPa	۴/۰
چگالی (ρ)	kg/m <sup>3</sup>	۲۶۰۰
نفوذپذیری (k)	m <sup>2</sup>	۵/۳×۱۰ <sup>-۱۰</sup>
تخلخل (φ)	%	۳

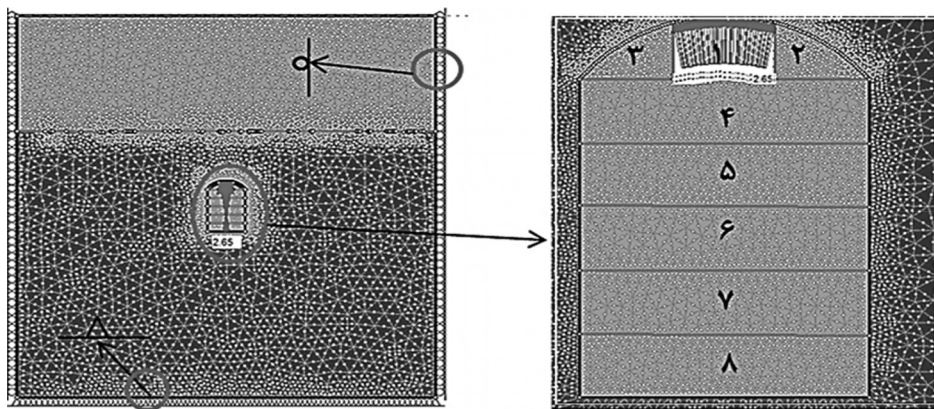
### مدل‌سازی مغار

با توجه به منابع موجود و تجربیات احداث مغارهای سنگی بدون پوشش برای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت [۱۵-۱۶]، هندسه مغار مطابق با شکل ۲ طراحی شده است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ارتفاع مغار ۳۰ m، عرض مغار ۲۰ m، ارتفاع قوس ۵ m، فاصله پرده آب تا تاج مغار ۳۰ m، عرض کلی مدل ۲۲۰ m، ارتفاع کلی مدل ۲۳۰ m، فاصله کف مغار تا سطح زمین ۱۳۰ m و فاصله تاج مغار تا سطح زمین ۱۰۰ m می‌باشد.

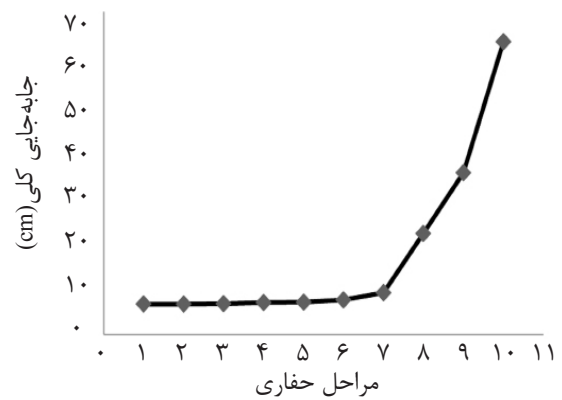
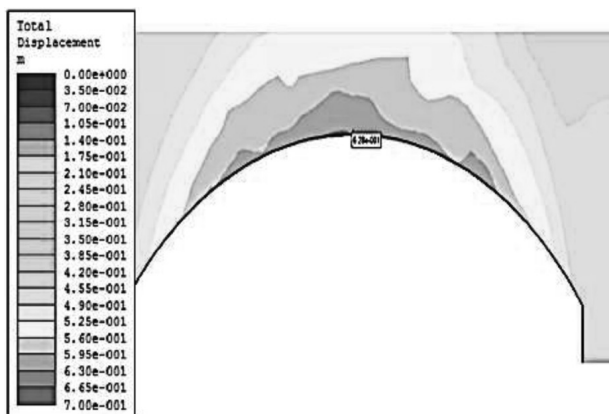
در شکل ۳ نمایی کلی از هندسه، شرایط مرزی،



شکل ۲ مشخصات هندسی مغار سنگی بدون پوشش برای مدل سازی.



شکل ۳ نمایی کلی از هندسه، شرایط مرزی و مش بندی مغار مدل سازی شده.



شکل ۴ جابه جایی در یک نقطه بحرانی در سقف بعد از ۱۰ گام.



و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با نصب نگهداری می‌توان به خوبی از جابه‌جایی‌های بیش از حد مجاز اطراف مغار جلوگیری کرد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در سامانه نگهداری مورد نظر برای شاتکریت چند نقطه دارای فاکتور اطمینان کمتر از یک هستند. این نقاط در گوشه‌های مغار قرار دارند و بالا بودن تمرکز تنش در این نواحی یکی از دلایل پایین بودن فاکتور اطمینان این نقاط می‌باشد. هر چند در واقعیت، هنگام حفر و نصب سامانه نگهداری این نواحی از لحاظ هندسی نرم‌تر می‌شوند. بنابراین، پایداری این نقاط خیلی متأثر از نوع و نحوه سامانه نگهداری نیست و در این تحلیل نیز حساسیت زیادی نسبت به این نقاط وجود نداشته است.

#### ارزیابی حساسیت پایداری مغار

برای تعیین اثر پارامترهای ژئومکانیکی مختلف بر روی پایداری مغار و همچنین عملکرد سامانه نگهداری، ارزیابی حساسیت محدودی بر مهم‌ترین پارامترها از لحاظ پایداری مانند مدول تغییر شکل‌پذیری، ضریب پواسون و نسبت تنش افقی به تنش قائم انجام شده است.

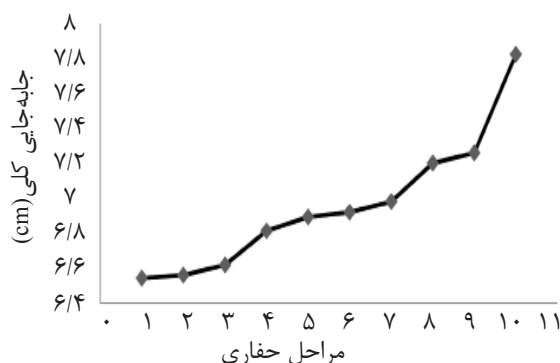
جدول ۳ خصوصیات مکانیکی پیچ‌سنگ

۲۲	قطر پیچ‌سنگ (mm)
۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۶	ظرفیت کششی (MN)
۰	ظرفیت کششی باقی‌مانده (MN)
۰/۱	نیروی پیش‌کشش (MN)

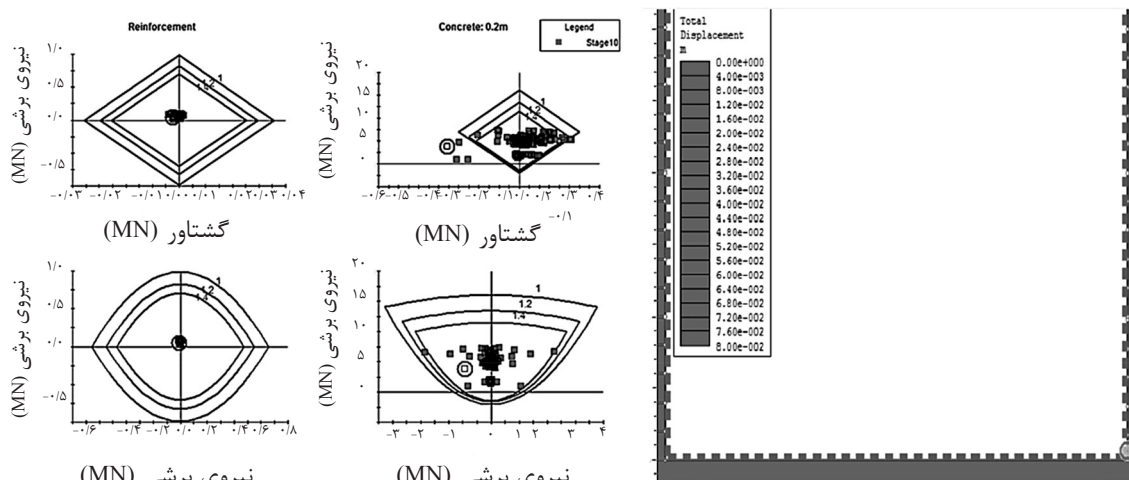
جدول ۴ خصوصیات شاتکریت و مش

تقویت (مش)		بتن شاتکریت	
۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)	۰/۲	ضخامت (m)
۰/۲۵	ضریب پواسون (v)	۲۱۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۴۰۰	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۰/۲۵	ضریب پواسون (v)
۴۰۰	مقاومت کششی (MPa)	۸۰	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)
۰/۰۰۰۰۰۰۴۷	ممان اینرسی (m <sup>4</sup> )	۱۰	مقاومت کششی (MPa)
۰/۰۰۲۴۷	مساحت سطح (m <sup>2</sup> )		

برای تأمین پایداری و جلوگیری از ریزش‌های رخ داده، انواع مختلفی از ترکیب‌های نگهداری در پیرامون مغار مورد آزمایش قرار گرفت. در انتها ترکیبی از پیچ‌سنگ و شاتکریت تقویت‌شده با مش استفاده شد. خصوصیات نگهداری مورد استفاده، در جدول ۳ و ۴ آورده شده است. پیچ‌سنگ به کار رفته در نگهداری از نوع مکانیکی ته‌گیردار است. که طولی معادل ۱۵ m در سقف و ۱۲ m در دیواره‌ها دارد و فاصله‌داری آن ۱×۱ می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان جابه‌جایی‌ها به شدت کاهش یافته و ریزش در سقف و دیواره‌های مغار کنترل شده است. حال برای نشان دادن این موضوع نمودار جابه‌جایی قائم نقطه بحرانی که در شکل ۴ برای حالت بدون نگهداری رسم شده بود، دوباره برای حالت دارای سامانه نگهداری رسم می‌شود. در شکل ۵ جابه‌جایی نقطه مورد نظر طی مراحل حفاری و سپس نصب سامانه نگهداری رسم شده است. حال با مقایسه نتایج شکل ۴ و شکل ۵ مشاهده می‌شود که جابه‌جایی بیشینه اطراف مغار، بعد از ۱۰ مرحله حفاری از ۵۹/۹۱۶۳ cm در حالت بدون نگهداری به ۱/۲۸۴۹ cm در حالت نصب نگهداری کاهش می‌یابد.



شکل ۵ نمودار جاب‌جایی نقطه بحرانی در طی مراحل حفاری در حالت با نگهداری.



شکل ۶ مکان نقاط بحرانی از نظر ظرفیت سامانه نگهداری.

تغییر شکل‌پذیری محاسبه شده و سپس بهترین خط بر آن‌ها برآزش می‌شود. قابل ذکر است که ارزیابی حساسیت انجام شده در حالت نصب سامانه نگهداری می‌باشد. شکل ۷ معرف نمودار برآزش شده بر جاب‌جایی قائم نقطه میانی سقف مغار در مقابل تغییرات مدول تغییرشکل بعد از مرحله دهم حفاری است. قابل ذکر است که این جاب‌جایی، ناشی از حفر مغار است و جاب‌جایی حاصل در نشست اولیه از آن کسر شده است.

#### ارزیابی حساسیت مدول الاستیسیته

همان‌طور که ذکر شد برای ارزیابی حساسیت یک پارامتر باید تمامی پارامترهای تأثیرگذار در نتایج به جز پارامتر مورد بررسی ثابت در نظر گرفته شوند. برای مدول تغییر شکل‌پذیری، همانند آنچه در جدول ۵ نشان داده شده است، سه مقدار متفاوت وجود دارد.

برای انجام ارزیابی حساسیت، پارامتر مورد مطالعه متغیر و سایر پارامترها ثابت فرض می‌شود. در جدول ۵ مقدار پایه و مقادیر متغیر پارامترهای ذکر شده آمده است. برای این منظور جاب‌جایی قائم یک نقطه مشخص واقع در وسط تاج مغار به‌عنوان مبنا قرار داده شده است و رابطه این جاب‌جایی با تغییرات هر پارامتر محاسبه و سپس نمودارهای آن رسم شده است.

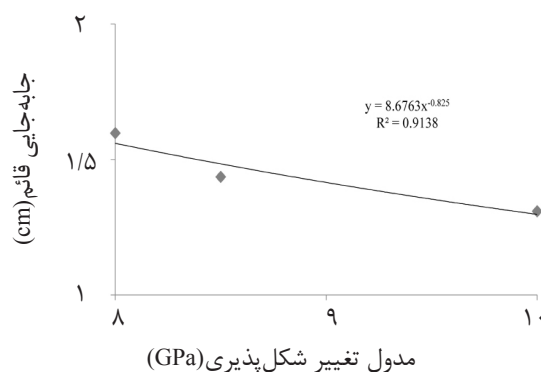
#### ارزیابی حساسیت مدول الاستیسیته

همان‌طور که ذکر شد برای ارزیابی حساسیت یک پارامتر باید تمامی پارامترهای تأثیرگذار در نتایج به جز پارامتر مورد بررسی ثابت در نظر گرفته شوند. برای مدول تغییر شکل‌پذیری، همانند آنچه در جدول ۵ نشان داده شده است، سه مقدار متفاوت وجود دارد. بنابراین تغییر جاب‌جایی قائم نقطه میانی سقف مغار در مقابل تغییرات مقدار مدول



جدول ۵ مقادیر پایه و متغیر پارامترهای مورد بررسی.

مقدار ۲	مقدار ۱	مقدار پایه	نام پارامتر
۱۰	۸	۸/۵	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)
۰/۳	۰/۲	۰/۲۶	ضریب پواسون
۱/۵	۱	۰/۵	ضریب شدت تنش



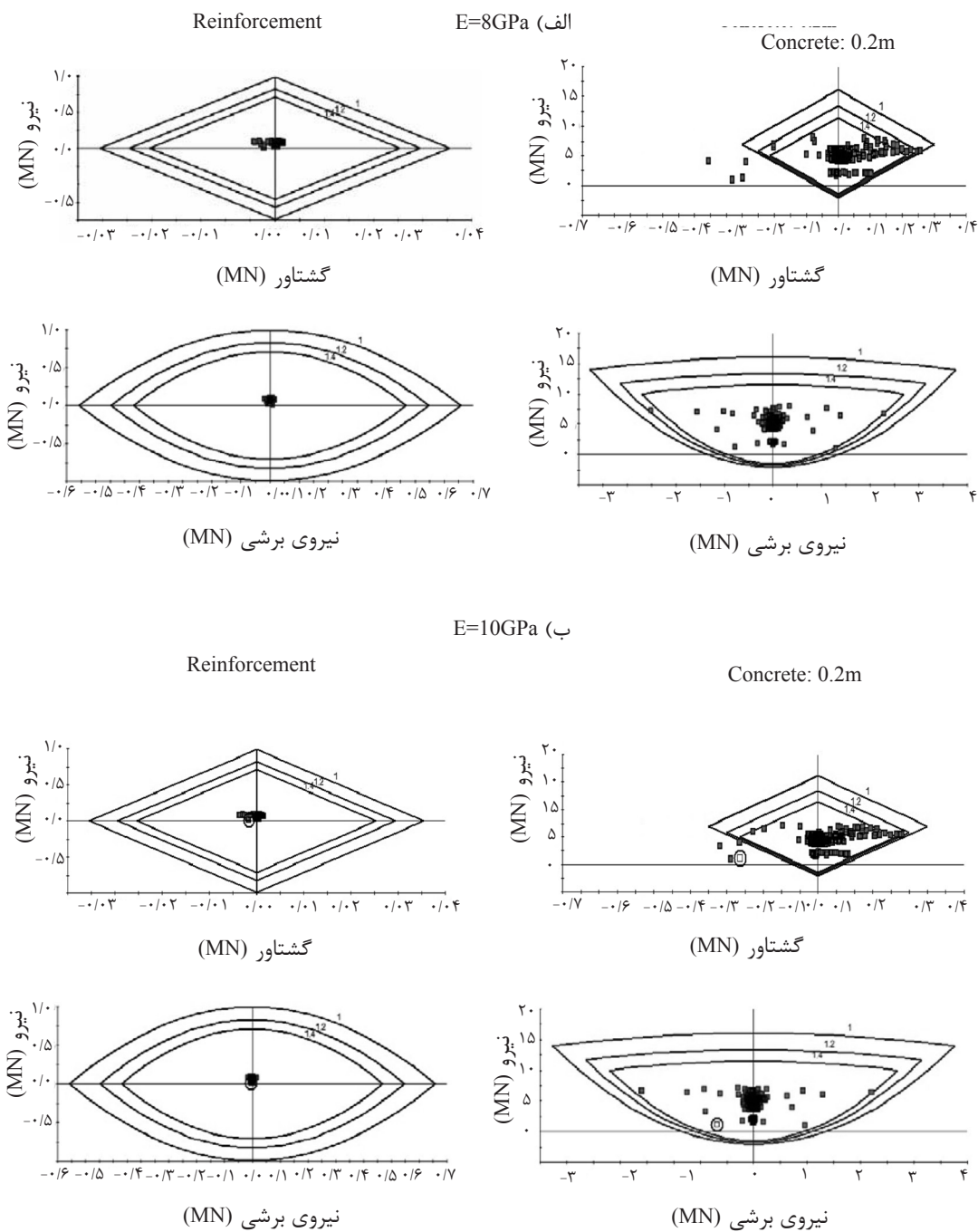
شکل ۷ نمودار برازش شده تغییرات جابه‌جایی قائم در سقف مغار به تغییرات مدول تغییر شکل توده‌سنگ.

شده برای هر دوی این حالت‌ها مناسب است و مانند حالت اول تنها در کف و بخش تقاطع کف و دیوار مشکل پایداری وجود دارد که از اهمیت زیادی برخوردار نیست.

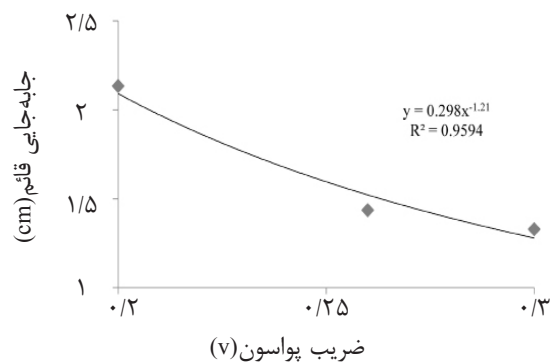
#### ارزیابی حساسیت برای ضریب پواسون

مراحل انجام شده برای آنالیز حساسیت نسبت پواسون همانند مدول تغییر شکل پذیری صورت گرفت. ابتدا با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، میزان تغییرات جابه‌جایی قائم نقطه میانی سقف مغار به ازای تغییر ضریب پواسون محاسبه شد. سپس با برازش مناسب معادله خط تغییرات را به دست آورده و در انتها تأثیر این پارامتر بر ظرفیت نگهداری بررسی شد. شکل ۹ نمودار برازش شده جابه‌جایی قائم سقف مغار در مقابل تغییرات ضریب پواسون را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۹ پیداست با افزایش ضریب پواسون مقدار جابه‌جایی سقف کاهش می‌یابد. شکل ۱۰ ظرفیت نگهداری دو مقدار ضریب پواسون ۰/۲ و ۰/۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نگهداری پیشنهاد شده مغار برای مقادیر مختلف ضریب پواسون (۷) مناسب است.

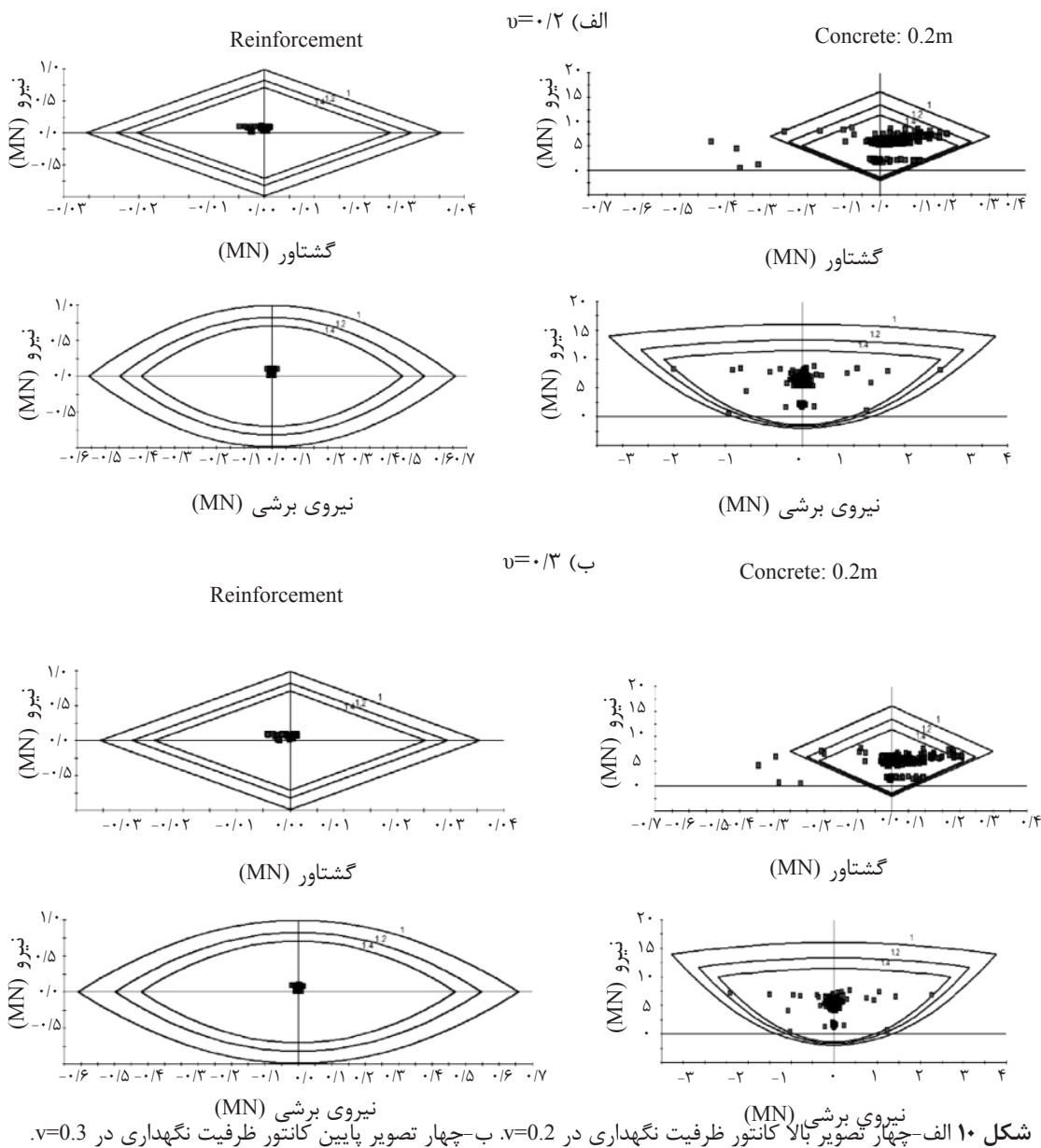
بنابراین تغییر جابه‌جایی قائم نقطه میانی سقف مغار در مقابل تغییرات مقدار مدول تغییر شکل پذیری محاسبه شده و سپس بهترین خط بر آن‌ها برازش می‌شود. قابل ذکر است که ارزیابی حساسیت انجام شده در حالت نصب سامانه نگهداری می‌باشد. شکل ۷ معرف نمودار برازش شده بر جابه‌جایی قائم نقطه میانی سقف مغار در مقابل تغییرات مدول تغییر شکل بعد از مرحله دهم حفاری است. قابل ذکر است که این جابه‌جایی، ناشی از حفر مغار است و جابه‌جایی حاصل در نشست اولیه از آن کسر شده است. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است با افزایش مدول تغییر شکل پذیری، جابه‌جایی نهایی سقف بعد از اتمام حفاری و نصب نگهداری کاهش می‌یابد. اما از سوی دیگر نکته‌ای که بیشتر حائز اهمیت می‌باشد، این نکته است که آیا تغییر در میزان مدول تغییر شکل پذیری نیاز به تغییر در نوع نگهداری را نیز ایجاب می‌کند یا نه. برای پاسخ به این سؤال کانتورهای ظرفیت نگهداری برای دو مقدار مدول تغییر شکل پذیری ۸ و ۱۰ GPa در شکل ۸ آورده شده است. با مشاهده شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که نگهداری پیشنهاد



شکل ۸ الف- ۴ تصویر کانتور ظرفیت نگهداری در  $E=8\text{GPa}$ . ب- چهار تصویر پایین کانتور ظرفیت نگهداری در  $E=10\text{GPa}$ .

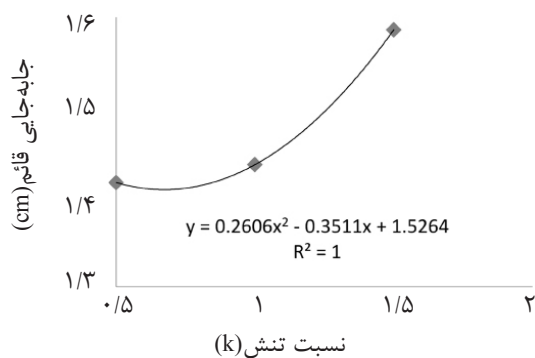


شکل ۹ نمودار برازش شده تغییرات جابه‌جایی قائم در سقف مغار به تغییرات ضریب پواسون.

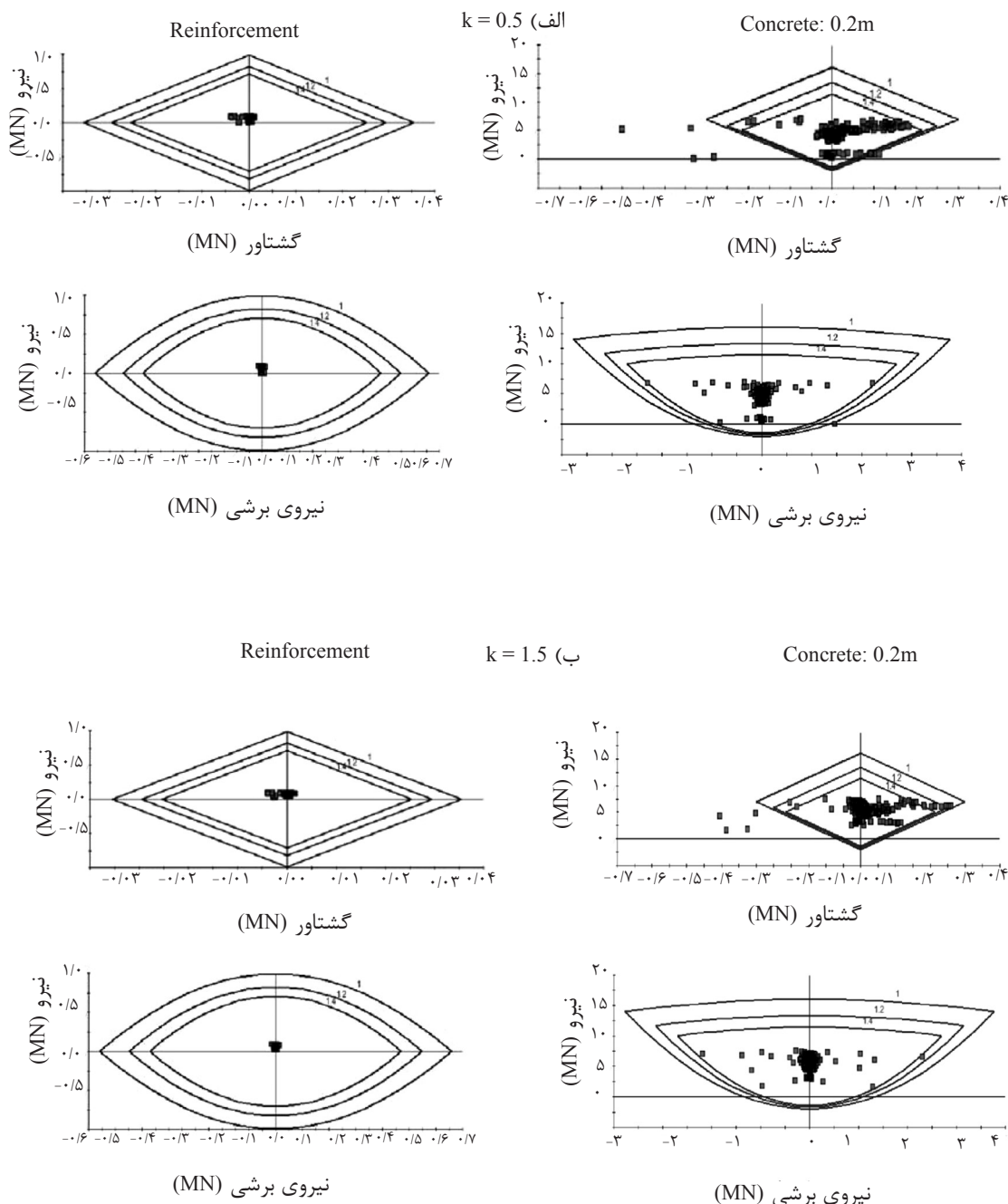


خیلی کم همراه است، اما از مقدار نسبت تنش ۱ تا ۱/۵ افزایش جابه‌جایی به‌صورت تدریجی و در مقایسه با حالت قبل، قابل توجه می‌باشد. دلیل آن را می‌توان در کاهش تنش روباره موجود در نسبت‌های تنش افقی به تنش قائم بزرگ (کاهش عمق روباره) بیان کرد. شکل ۱۲ معرف کانتور ظرفیت نگهداری در دو حالت  $k=0.5-1.5$  است که نشان می‌دهد نگهداری پیشنهادی در این حالت نیز مناسب خواهد بود.

تنها مشکل پایداری همانند مراحل قبلی که برای مدول تغییر شکل‌پذیری وجود داشت، در کف و تقاطع کف و دیوار است که اهمیت چندانی ندارد. ارزیابی حساسیت برای نسبت تنش افقی به تنش قائم شکل ۱۱ نشان‌دهنده نمودار تغییرات جابه‌جایی قائم وسط سقف مغار در برابر تغییر نسبت تنش افقی به تنش قائم است. همان‌طور که مشخص است با افزایش تنش افقی از مقدار ۰/۵ تا ۱ افزایش جابه‌جایی با یک شیب ملایم و تغییرات



شکل ۱۱ نمودار برازش شده تغییرات جابه‌جایی قائم در سقف مغار به تغییرات ضریب فشار جانبی.



شکل ۱۲ الف) چهار تصویر بالا کانتور ظرفیت نگهداری در  $k=0.5$ . ب) -چهار تصویر پایین کانتور ظرفیت نگهداری در  $k=1.5$ .

### نتیجه گیری

پارامتر جابه‌جایی‌های قائم را کاهش می‌دهد.  
 - نوع نگهداری پیشنهادی در مقادیر مختلف ارزیابی شده برای مدول تغییرشکل مناسب بوده است.  
 - ارزیابی حساسیت انجام شده بر روی تغییرات ضریب پواسون نشان می‌دهد که افزایش این پارامتر جابه‌جایی‌های قائم را کاهش می‌دهد.  
 - نوع نگهداری پیشنهادی در مقادیر مختلف ارزیابی شده برای ضریب پواسون مناسب بوده است.  
 - ارزیابی حساسیت انجام شده بر روی تغییرات نسبت تنش افقی به تنش قائم نشان می‌دهد که افزایش این پارامتر جابه‌جایی‌های قائم را ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌دهد.  
 - نوع نگهداری پیشنهادی در مقادیر مختلف ارزیابی شده برای نسبت تنش افقی به تنش قائم مناسب می‌باشد.

### تشکر و قدردانی

لازم است از کمیون انرژی شورای عالی علوم، تحقیقات و فناوری و شرکت پایانه‌های نفتی ایران به خاطر حمایت‌های انجام شده و همچنین از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران به خاطر همکاری‌های لازم برای تهیه مشخصات سازند آسماری تشکر و قدردانی شود.

به‌طور کلی، شرایط زمین‌شناسی و شرایط عملیاتی بر پایداری مغار تأثیرگذار هستند. شرایط زمین‌شناسی شامل سنگ‌شناسی و ساختارهای زمین‌شناسی غیر قابل کنترل می‌باشند. شرایط عملیاتی که شامل مباحث هندسه مغار، حفاری و نگهداری مغار است، از طریق فعالیت‌های انسانی انجام شده و قابل کنترل می‌باشند. بررسی‌ها نشان داد که به‌منظور انجام یک تحلیل پایداری قابل اطمینان و کاربردی، روندی مناسب و کلی صرف‌نظر از نوع نرم‌افزار مورد استفاده، موردنیاز خواهد بود. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد:  
 - نوع نگهداری مناسب برای این مغار از نوع ترکیبی پیچ‌سنگ و شاتکریت تقویت شده است.  
 - طول پیچ‌سنگ‌ها در سقف ۱۵ m و در دیواره ۱۲ m است.

- ضخامت مناسب شاتکریت ۲۰ cm است که با مش تقویت می‌شود.  
 - عمده نقاط بحرانی بعد از نصب شاتکریت در محل تقاطع دیواره با کف و کف مغار است که عمدتاً به علت بالازدگی کف و تمرکز تنش در گوشه‌ها است.  
 - ارزیابی حساسیت انجام شده بر روی تغییرات مدول تغییر شکل نشان می‌دهد که افزایش این

### مراجع

- [1]. Lu M., "Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(4): pp. 289-297, 2010
- [2]. Lee Y. N., Suh Y. H., Kim D. Y. and Jue K. S., "Stress and deformation behaviour of oil storage caverns during excavation," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, Vol. 34, No. 3-4, pp. 305-305, 1997.
- [3]. Abdollahipour A. and Ghannadshirazi H., "Stability analysis and determination of rock pillar between two adjacent caverns in different regions of Asmari formation in Iran," *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 24, Issue 5, pp. 593-596, 2014.
- [4]. Aisenstein B., Denekamp S., Hayati G. and Tsur-Lavie Y., "Experimental and theoretical studies concerning the stability of oil-storage caverns excavated in chalk," *Storage in Excavated Rock Caverns*, Rockstore 77, pp. 283-288, 1977.

- [۵]. اولادریان، نقش ساختارهای سنگی در ژئوتکنیک از دیدگاه مکانیک سنگ، چاپ اول، ۱۳۸۷.
- [۶]. جلالی فرح، مکانیک سنگ: معدن، تونل، مکانیک سنگ، عمران، نفت، مؤسسه انتشارات ستایش، چاپ اول، ۱۳۹۲.
- [7]. Hui Chen, "A study of tunnel stability with special reference to the effect of the stress field environment," Thesis Submitted to the University of Nottingham for the Degree of Doctor of Philosophy, 1992.
- [8]. Naithani A., "Underground rock caverns for strategic crude oil storage in India- nature of studies, design and construction," Current Science(Bangalore), Vol. 103, No. 5, pp. 490-469, Sep. 2012.
- [9]. Usmani A., Nanda A., Mandal A. and Jain S. K., "Interaction mechanism between two large rock caverns," International Journal of Geomechanics, Vol. 15, No. 1, Feb. 2014.
- [10]. Kim H. M., Park D., Ryu D. W., Song W. K. , "Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns," Engineering Geology, Vol. 135-136, pp. 60-65, 15 May 2012.
- [11]. Hong wen J., Zhong yu Z. and Guo-an X., "Study of electromagnetic and acoustic emission in creep experiments of water-containing rock samples," Journal of China University of Mining and Technology, Vol. 18, No 1, pp 42-45, 2008.
- [12]. Misra A. K. and Murrell S. A. F., "An experimental study of the effect of temperature and stress on the creep of rocks. Geophysical Journal International," Vol. 9. No. 5, pp. 509-535, 1965.
- [13]. Amadei B. and Stephansson O., "Rock stress and its measurement," Springer, 1997.
- [14]. Hoek E., Kaiser P. K., and Bawden W. F., "Support of underground excavations in hard rock," CRC PreS, 2000.
- [15]. Wang Z., Li S., and Qiao L., "Design and test aspects of a water curtain system for underground oil storage caverns in China," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 48, pp. 20-34, 2015.
- [16]. Lee C. I., and Song J. J., "Rock engineering in underground energy storage in Korea, Tunnelling and underground space technology," Journal Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, No.5, pp. 467-483, 2003..