

تعیین شکل بهینه مغارهای نمکی ذخیره گاز با استفاده از روش‌های عددی

اصغر سیاه‌منصوری¹، محمد فاتحی مرجی²، ابوالفضل عبدالهی پور^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

2- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

3- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

(دریافت: آذر 1390، پذیرش: مهر 1394)

چکیده

استفاده از مغارهای نمکی برای ذخیره‌سازی هیدروکربن‌های سیال، به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها بکار گرفته می‌شود. اطمینان از پایداری مغارهای نمکی ذخیره گاز و در عین حال اقتصادی بودن نسبت گاز بیشینه به کمینه، همواره مسئله‌ای مهم بوده که تاکنون در ایران کمتر به آن پرداخته شده است. با توجه به خصوصیات سنگ نمک و عمق زیاد، تنش عمده در این ناحیه تنش ثقلی است که این تنش به صورت یک فشار خارجی به مغار وارد می‌شود و سبب کاهش حجم مغار می‌شود. در مقابل با توجه به اینکه در مغارهای نمکی امکان به کارگیری نگهداری‌های مرسوم در مغارهای سنگی مانند شاتکریت، پیچ‌سنگ و غیره وجود ندارد، پایداری مغار تنها با ایجاد یک فشار داخلی (عکس‌العمل) به وسیله گاز درون مغار تأمین می‌شود. این مقاله به بررسی پایداری مغارهای نمکی ذخیره گاز می‌پردازد. مشخصات هندسی و ژئومکانیکی محدوده مورد مطالعه در جنوب ایران، در نظر گرفته شده و در ادامه پایداری دو مغار کپسولی و هویجی شکل در محیطی پیوسته با استفاده از نرم‌افزارهای *Phase2* و *FLAC3D* بررسی شده است. با مدلسازی هندسی و مکانیکی این مغارها بر پایه روش اجزاء محدود و تفاضل محدود در عمق مربوط، فشار کمینه (پایه) و بیشینه گاز جهت پایداری مغارها تعیین گردید و بر این اساس نسبت گاز کاری برای مغارها محاسبه شد. مقایسه این نتایج نشان داد که در حالت پایداری مغار هویجی شکل دارای نسبت گاز کاری بیشتری بوده که این مطلب بیانگر صرفه اقتصادی بیشتر این نوع مغار است.

واژگان کلیدی

مدلسازی عددی، مغارهای نمکی، روش اجزاء محدود، روش تفاضل محدود، *Phase2*، *FLAC3D*

ارجاع به این مقاله:

سیاه‌منصوری، الف، فاتحی مرجی، م، عبدالهی پور، الف، (1394)، تعیین شکل بهینه مغارهای نمکی ذخیره گاز با استفاده از روش‌های عددی، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، 5(9)، 1-12.

[http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940911-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940911-X)

1- مقدمه

بی شک گاز طبیعی یکی از مهم ترین منابع انرژی حال حاضر جهان است؛ و میزان مصرف گاز و موارد آن در زمینه های مختلف خانگی، تولید برق، صنایع و غیره روند رو به رشدی را طی می کند. مسئله ای که همواره برای دست اندرکاران تولید و توزیع گاز طبیعی مشکلاتی را ایجاد نموده است، نوسان در تقاضای گاز است. در ماه های سرد سال افزایش تقاضا نگرانی ها را در مورد تأمین کافی گاز افزایش می دهد. برای نمونه در اروپای شمال غربی نزدیک به 67 درصد مصرف گاز طبیعی در ماه های سرد زمستانی (اکتبر تا مارس) صورت می گیرد. همچنین حدود 90 درصد مصرف خانگی گاز طبیعی در سال، در این ماه ها مصرف می شود و ممکن است تقاضای گاز در یک روز زمستانی به بیش 10 برابر یک روز تابستانی برسد [1، 2].

برای تأمین نیاز متغیر گاز طبیعی، سه گزینه به نظر می رسد. گزینه اول تولید متغیر است که با توجه به شرایط فنی مخازن و تأسیسات و خطوط انتقال گاز طبیعی، امکان افزایش شدید برداشت در ماه های سرد و تأمین تقاضای موجود وجود ندارد. گزینه دیگر واردات است که با توجه به افزایش قیمت گاز در ماه های سرد، انعطاف پذیری اندک قراردادهای وارداتی، طراحی خطوط انتقال گاز برای دبی مشخص و احتمال بحران های سیاسی، واردات نیز نمی تواند منبع مناسبی برای تأمین تقاضای متغیر گاز در درازمدت باشد. با توجه به معایب دو گزینه مطرح شده، ضرورت ذخیره سازی گاز مشخص می شود. برای کشورهایی که تولیدکننده گاز هستند، دلایل زیر نیز بر اهمیت ذخیره سازی می افزاید:

- ایجاد بازاری مطمئن برای خریداران گاز که خود منجر به انعقاد قراردادهای کلان اقتصادی می شود.
- فروش گاز با بیشترین قیمت و همچنین جلوگیری از نوسان قیمت ها.
- برقراری تعادل در خطوط انتقال گاز و استفاده بهینه از توان آن.

اکنون که هدف از انجام ذخیره سازی و اهمیت موضوع روشن گردید، به انواع روش های ذخیره سازی گاز طبیعی اشاره شده و روش ذخیره سازی گاز در مغارهای نمکی به طور مختصر شرح داده می شود. سپس در ادامه به تحلیل

پایداری این مغارها با روش های اجزاء محدود و تفاضل محدود و مسائل مربوط به آن پرداخته می شود. برای انجام این کار دو مغار نمونه کپسولی و هویجی شکل و محیط اطراف آنها با مشخصات هندسی و ژئومکانیکی سازندهای نمکی جنوب ایران در نرم افزارهای *Phase2* و *FLAC3D* مدلسازی شده و در هنگام بهره برداری، برای هر دو مغار فشار بیشینه و کمینه تعیین می شود. در نهایت ظرفیت گاز کاری و نسبت گاز کاری برای مغارها محاسبه شده و به منظور تعیین شکل بهینه نتایج با یکدیگر مقایسه می شود.

2- روش های ذخیره سازی گاز

در حال حاضر در جهان روش های متعددی به منظور ذخیره سازی گاز وجود دارد که به دو دسته کلی روش های سطحی و ذخیره سازی زیرزمینی¹ تقسیم می شود. رایج ترین روش سطحی ذخیره سازی گاز استفاده از مخازن سطحی است. در زیر زمین می توان گاز را در فضاهایی مانند مخازن تهی شده نفت و گاز²، سفره های آب زیرزمینی³، مغارهای نمکی⁴ معادن متروکه و مغارهای سنگی⁵ ذخیره نمود [3-5].

2-1- ذخیره سازی گاز در مغارهای نمکی

از زمان های گذشته نمک برای استفاده تجاری از روش های مختلفی استخراج شده است. یکی از این روش ها معدن کاری انحلالی نمک از گنبد های نمکی و بسترهای نمکی بوده است. در طی این عملیات فضای خالی نسبتاً بزرگی در میان نمک ایجاد می شود که بعدها این فضا به منظور ذخیره سازی مواد هیدروکربنی قابل استفاده خواهد بود. ناتراوی نمک و ظرفیت و قابلیت انتقال بالای این مغارها از مزایای این روش است. از معایب این روش می توان به هزینه بالای آن در ابتدای کار اشاره کرد [3، 5].

در ایران مناطقی که گنبد های نمکی به تعداد فراوان در آن ها یافت شده است، استان های فارس، هرمزگان، بوشهر، خوزستان و سمنان است [6].

در روش معدنکاری انحلالی با حفر یک چاه از سطح زمین تا عمق مورد نظر و با برقراری یک سیستم گردش، آب خالص را به عمق چاه فرستاده که آب پس از انحلال نمک دوباره به سطح برمی گردد. گاز طبیعی را می توان از طریق همین چاه و یا چاه های دیگر به درون مغار فرستاده

حجم)، تأسیسات، شکل و پایداری مکانیکی مغار و کارایی روش های عملیاتی بستگی دارد.

– کل گاز موجود در مغار⁸: حجم کل گاز موجود در مغار در یک زمان مشخص است.

– گاز پایه⁹: کمینه حجمی از گاز که جهت تأمین فشار داخلی و پایداری مغار به صورت دائم در مغار باقی می ماند.

– ظرفیت گاز کاری¹⁰: برابر اختلاف ظرفیت کل با گاز پایه است.

– گاز کار¹¹: حجم گاز در دسترس برای برداشت در یک زمان مشخص و برابر اختلاف کل گاز موجود با گاز پایه است.

– نرخ گردش گاز¹²: متوسط تعداد دفعات تزریق و برداشت گاز کاری در یک بازه زمانی (به طور معمول یک سال).

– قابلیت تزریق¹³: بیشینه حجم گازی که می توان در یک بازه زمانی (معمولاً یک روز) به مغار تزریق نمود.

– قابلیت برداشت¹⁴: بیشینه حجم گازی که می توان در یک بازه زمانی (معمولاً یک روز) از مغار برداشت نمود.

با توجه به وابستگی حجم گاز به دما و فشار محیط، کمیت های بالا در شرایط استاندارد گزارش می شود. همچنین قابل ذکر است که این پارامترها ثابت نبوده و در طول زمان دچار تغییر می شود. برای نمونه هر چه حجم گاز درون مغار بیشتر باشد، فشار درون آن بالاتر رفته و قابلیت برداشت بیشتر می شود. عکس آن در مورد قابلیت تزریق صادق است. همچنین به دلیل رفتار خزشی سنگ نمک با گذشت زمان حجم مغار کاهش یافته که موجب کاهش ظرفیت کلی ذخیره سازی می شود.

4- مشخصات هندسی و ژئومکانیکی مغار و سازند نمکی

با توجه به این که در زمان نگارش این پژوهش، مغار نمکی در ایران اجرا نشده است و داده های واقعی از یک مغار در ایران در دسترس نبود، مغاری فرضی با خصوصیات مقاومتی گنبد های نمکی جنوب غربی ایران در نظر گرفته شد. سازند نمکی با عمق کمتر از 1000 متر که تا عمق 100 متری بالا آمده است در نظر گرفته شد. روباره های به ضخامت 100 متر متشکل از شیل، ژئیس و انیدریت گنبد نمکی را پوشانده است. با توجه به جنس سنگ نمک و عمق زیاد، محیط نمکی همسانگرد بوده و تنش عمده در

و ذخیره نمود. کیفیت این عملیات به قابلیت انحلال نمک سازند بستگی دارد. قاعده شستشو در صنعت معدنکاری انحلالی این گونه است که هر 7 تا 8 متر مکعب آب شیرین پمپ شده به مغار خواهد توانست 1 متر مکعب نمک سدیم را حل کند. معمولاً سازند نمکی مورد نظر در اعماق بزرگ تر از 400 تا 500 متر و گاهی پایین تر از 2000 متر است. معدنکاری انحلالی به دو روش گردش مستقیم و گردش معکوس انجام می شود [7].

از دیگر خصوصیات نمک، خزش آن است که در اعماق بزرگ تر از 2000 متر این پدیده بیشتر نمایان می شود. خزش از یک طرف به مرور زمان حجم مغار را کاهش می دهد و از طرف دیگر باعث مسدود شدن مغار می شود. با اینکه کاهش حجم مغار زیان اقتصادی به حساب می آید، ولی مسدود شدن مغار برای ذخیره سازی مواد فرار و ضایعات ضروریست [7].

آغاز استفاده از مغارهای نمکی برای ذخیره سازی مواد به سال 1916 (آلمان، ذخیره سازی نفت خام) برمی گردد و تاکنون در جهان ترکیباتی چون نفت خام، هیدروکربن های سبک، گاز، ضایعات میدان های نفتی، هوای فشرده⁶ و باطله های هسته ای در مغارهای نمکی ذخیره شده است [5, 8].

استیون و همکاران در سال 1997 بحث های مکانیک سنگی مربوط به مغارهای نمکی را مطرح نمودند [9]. پس از آن استیدمستر و روکار به طراحی مکانیک سنگی مغارهای نمکی ذخیره گاز پرداختند [10]. هوسرمن و همکاران مراحل حفاری مغار با معدنکاری انحلالی را در سنگ های نمکی با استفاده از روش اجزاء محدود مدلسازی نمودند [11]. در سال 2011 هانگ و ژیونگ مغارهای نمکی حفر شده در لایه های نمکی در چین را با روش های عددی مدلسازی نمودند [12].

3- پارامترهای ذخیره سازی

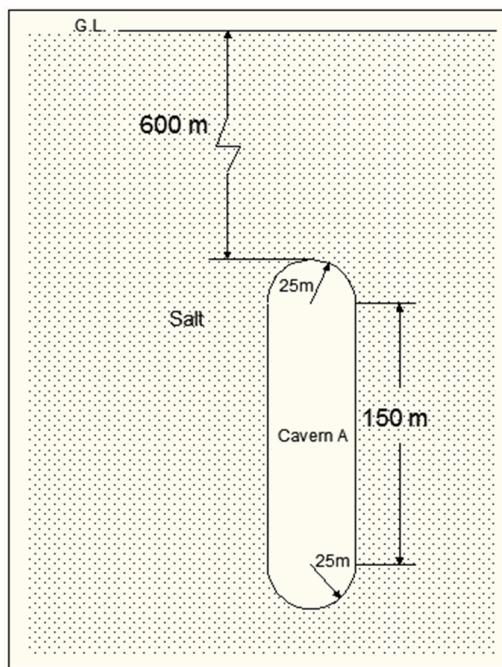
هر مغار توسط پارامترهایی از دیگر مغارها متمایز می شود. برخی از پارامترهای مهم در این رابطه عبارتست از [2]:

– ظرفیت کلی ذخیره سازی گاز⁷: بیشترین مقدار گازی که می توان در مغار ذخیره نمود و به مشخصات فیزیکی (مانند

این ناحیه تنش ثقلی است. مشخصات هندسی ژئومکانیکی سنگ نمک و سنگ روباره در جدول 1 آمده است.

جدول 1: مشخصات هندسی و ژئومکانیکی توده‌های سنگی نمک و روباره [14-16]

پارامتر	واحد	نوع سنگ			
		سنگ نمک	انیدریت	ژیپس	شیل
ضخامت (t)	m	>1000	50	30	20
چگالی (γ)	kN/m^3	21/6	29	23/2	27/5
مقاومت فشاری تک محوره (UCS)	MPa	25	25	30	27
مقاومت کششی (σ_t)	MPa	1/4	2/2	1/2	1/6
مدول یانگ (E)	GPa	26	65	28	18
نسبت پواسون (ν)	-	0/35	0/28	0/35	0/3
چسبندگی (C)	MPa	3	18/7	8	7/4
زاویه اصطکاک داخلی (Φ)	Deg	50	38	36	33
اندیس سنگ (m_i)	-	10	12	10	7



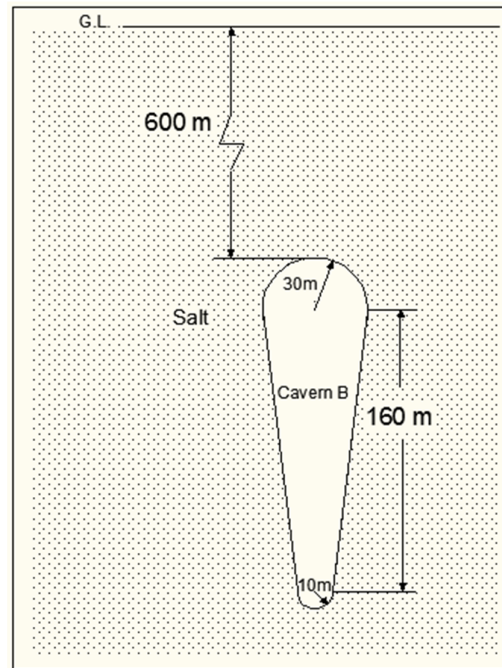
شکل 1: مشخصات هندسی مغار مدل نوع A

5- مدلسازی مغار نمکی نوع A در Phase2

برای مدلسازی مغار نوع A ابتدا از Phase2 استفاده شده است. این نرم‌افزار بر اساس روش المان محدود است و مدلسازی در آن به صورت دوبعدی با فرض کرنش صفحه‌ای انجام می‌شود. پیوستگی محیط سنگ نمک و همچنین سرعت بالا در مدلسازی حفاری‌های چند مرحله‌ای، دلیل

تاکنون مغارهای نمکی ذخیره گاز با اشکال و حجم‌های مختلفی در عمق 300 تا 2000 متر اجرا شده است. حجم این مغارها بین 5000 تا 1000000 متر مکعب است [13]. شکل‌های متفاوت آن بیشتر به دلیل ناهمگنی سازند نمکی و انحلال غیریکنواخت آن است. مغارها معمولاً کپسولی شکل هستند و با توجه به نوع سازند نمکی، قائم و یا افقی حفر می‌شوند. با توجه به این مسئله مغاری از نوع اول (قائم) انتخاب شد و به شکل یک کپسول از عمق 600 تا 800 متری مدلسازی شد. قطر مغار 50 متر و ارتفاع تمام‌شده آن 200 متر است. حجم نهایی مغار در حدود 360000 متر مکعب است. این مدل که با نام A مشخص می‌شود در Phase2 و FLAC3D مدلسازی و تحلیل پایداری شده است. البته پایدارترین شکل برای مغارهای نمکی قائم هویجی شکل است که قسمت نوک تیز آن به سمت پایین است. برای بررسی این نوع از مغارها، از مدل B با ارتفاع 200 متر، قطر بزرگ 60 متر و قطر کوچک 20 متر استفاده شده است. حجم نهایی این مغار در حدود 300000 متر مکعب است. این نوع مغار در Phase2 مدلسازی شده و نتایج آن با مدل A مقایسه شده است. مشخصات هندسی مدل‌های A و B در شکل 1 و 2 نشان داده شده است.

انتخاب این نرم افزار برای تحلیل پایداری مغار نمکی بود [17].



شکل 2: مشخصات هندسی مغار مدل نوع B

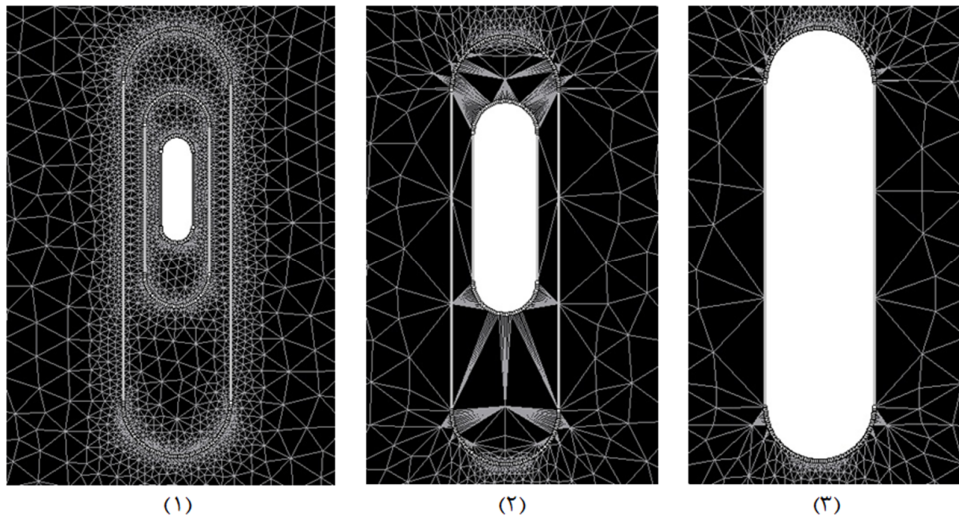
مغار در سه مرحله مطابق با روش معدنکاری انحلالی حفاری شده است. مراحل حفاری مغار در شکل 3 نشان داده شده است. گسترش مرزهای مدل از طرفین مرزهای حفاری 5 برابر قطر مغار است.

5-1- تحلیل پایداری مغار و تعیین فشار کمینه و بیشینه

همان طور که گفته شد فشار درون مغار به عنوان یک سیستم نگهداری عمل می کند؛ بنابراین اگر این فشار از یک حد کمینه کمتر شود، دیواره های مغار به شدت همگرا شده و در نهایت باعث بسته شدن و خرابی مغار می شود. همچنین در صورتی که فشار درون مغار از حد بیشینه خود تجاوز کند، شکست بدنه مغار و هدررفت گاز را در پی دارد. برای تعیین بیشترین فشار مجاز گاز نیز دو معیار اساسی وجود دارد که از میان آن دو، عدد کوچک تر برای فشار بیشینه انتخاب می شود.

– بیشینه فشاری که با توجه به تأسیسات سر چاهی می توان ایجاد نمود.

– میزان تنش قائم در محل ایجاد مغار، که فشار بیشینه باید از آن کمتر باشد.



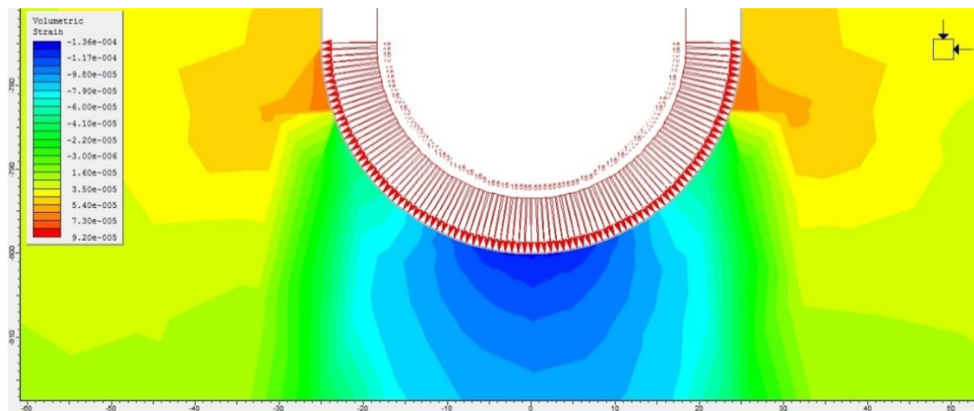
شکل 3: مراحل حفاری مغار نمکی نوع A در Phase 2

همواره باید از این مقدار کمتر باشد. چان¹⁵ و همکاران عدد 0/015 را به عنوان مقدار بحرانی اتساع¹⁶ برای بروز خزش مرحله سوم پیشنهاد کردند. دوریس¹⁷ و همکاران برای مغارهای نمکی ذخیره سازی گاز طبیعی عدد 0/0025 را برای این منظور در نظر گرفتند. امروزه در طراحی ها بیشتر

وقتی فشار درون مغار از حد مجاز کمینه کمتر شود، ریزترک هایی در محیط اطراف مغار تشکیل شده که باعث ایجاد کرنش حجمی (اتساع) می شود و به مرور زمان حجم مغار را کاهش می دهد. به این منظور، معیار اتساع بحرانی معرفی شده که در طراحی ها، میزان اتساع در دیواره مغار

جابجایی‌ها، اتساع و ضریب ایمنی در اطراف مغار محاسبه شد. با مقایسه این مقادیر با معیارهای طراحی و ایجاد تغییر در فشارهای داخلی و بررسی مجدد به صورت سعی و خطا، در نهایت فشار کمینه 8 مگاپاسکال و فشار بیشینه 15 مگاپاسکال تعیین شد. برای نمونه اتساع محاسبه شده در فشار بیشینه که بیشترین مقدار آن در کف مغار روی می‌دهد، در شکل 4 نشان داده شده است. در جدول 2 نیز مقادیر محاسبه شده برای بیشترین جابجایی و اتساع و کمترین ضریب ایمنی در فشارهای بیشینه و کمینه آمده است.

از معیار دوریس و همکاران برای تعیین حد بحرانی اتساع استفاده می‌شود [18، 19]. همچنین حد کمینه 1/5 و حد بیشینه 10 سانتی‌متر به عنوان حدود معیار (مجاز) کمترین ضریب ایمنی و بیشترین جابجایی در نظر گرفته شد. در مدلسازی مکانیکی از مدل رفتاری موهر-کولمب برای تحلیل مغار A استفاده شد. گرچه سنگ نمک معمولاً رفتار ویسکوز دارد ولی کارهای انجام شده نشان می‌دهد که تقریب الاستوپلاستیک نتایج قابل قبولی ارائه داده است [9-12]. پس از مدلسازی مغار، فشارهای مختلفی به صورت یکنواخت و عمود بر جداره داخلی مدل اعمال شد و در هر حالت مدل اجرا شد. با اجرای مدل، تنش‌ها،



شکل 4: اتساع محاسبه شده در اطراف مغار نوع A برای فشار بیشینه 15 مگاپاسکال در Phase2

جدول 2: مقادیر بیشترین جابجایی و اتساع و کمترین ضریب ایمنی فشارهای بیشینه و کمینه برای مغار نوع A در Phase2

فشار کمینه (8 مگاپاسکال)		فشار بیشینه (15 مگاپاسکال)		پارامتر
مقدار	مکان	مقدار	مکان	
$3/1 \times 10^{-4}$	کف مغار	$1/3 \times 10^{-4}$	کف مغار	بیشترین اتساع
$3/88 \times 10^{-2}$	دیواره پایین	$4/85 \times 10^{-2}$	دیواره پایین	بیشترین جابجایی (m)
1/51	کف مغار	1/57	سقف مغار	کمترین ضریب ایمنی

نتایج تحلیل حساسیت پایداری مغار نسبت به پارامترهای مکانیکی سنگ نمک با توجه به معیارهای ذکر شده در جدول 4 نشان داده شده است. با توجه به جدول 4 مشاهده می‌شود که مقدار بیشترین جابجایی دیواره مغار روند مناسب‌تری را نسبت به معیار کمترین ضریب ایمنی نشان داده است. از این رو برای تعیین تأثیرگذارترین پارامتر بر وضعیت پایداری مغارها، از مقدار بیشترین جابجایی استفاده شده است. برای این منظور نتایج تحلیل حساسیت پایداری مغار نسبت به پارامترهای مکانیکی

6- تحلیل حساسیت پارامترهای مکانیکی سنگ نمک

به منظور بررسی میزان پایداری مغارها در برابر تغییرات شرایط توده‌سنگ نمک، پارامترهای مکانیکی سنگ نمک در بازه 20- تا 20+ درصد تغییر داده شده و واکنش معیارهای پایداری مغار مانند بیشترین جابجایی و کمترین ضریب ایمنی به این تغییرات بررسی شد. این پارامترها و بازه تغییرات آنها در جدول 3 آمده است.

سنگ نمک در شکل 5 نشان داده شده است. شیب هر نمودار بیانگر میزان تأثیرگذاری پارامتر مربوط است. با توجه به شکل 5، پیداست که مدول یانگ از بین دیگر پارامترها، دارای شیب بیشتری بوده و بنابراین تأثیرگذارترین پارامتر است. پس از مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی، نسبت پواسون و چسبندگی به ترتیب بیشترین تأثیر را در میزان جابجایی و در نهایت پایداری مغارها دارد. با توجه به این تحلیل، پایداری مغارها نسبت

به مقاومت کششی سنگ نمک بر اساس معیارهای بیشترین جابجایی و کمترین ضریب ایمنی، هیچگونه حساسیتی را نشان نداد. همچنین با توجه به شکل مشاهده می شود که روند تغییرات بیشترین جابجایی نسبت به تغییرات مدول یانگ و نسبت پواسون غیرخطی و نسبت به دیگر پارامترها خطی است.

جدول 3: پارامترهای مؤثر بر پایداری مغار و بازه تغییرات آنها از 20- تا 20+ درصد

پارامترهای مؤثر	واحد	بازه تغییرات	
		حد پایین	حد بالا
مدول یانگ	GPa	20/8	31/2
مقاومت کششی	MPa	1/12	1/68
چسبندگی	MPa	2/4	3/6
زاویه اصطکاک داخلی	Deg	40	60
نسبت پواسون	-	0/28	0/42

جدول 4: نتایج تحلیل حساسیت پایداری مغارها نسبت به پارامترهای مؤثر بر اساس معیارهای بیشترین جابجایی و کمترین ضریب ایمنی

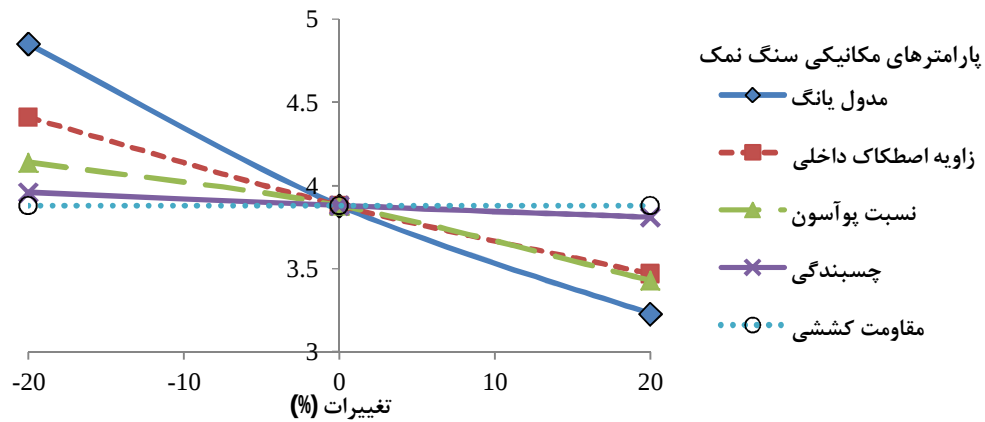
پارامتر	بیشترین جابجایی (cm)				کمترین ضریب ایمنی	
	حد پایین	حد بالا	درصد تغییرات	حد پایین	حد بالا	درصد تغییرات
مدول یانگ	4/85	3/23	33 % -	1/48	1/55	5 +
مقاومت کششی	3/88	3/88	-	1/51	1/51	-
چسبندگی	3/96	3/81	4 -	1/50	1/52	1 +
زاویه اصطکاک داخلی	4/41	3/47	21 -	1/40	1/59	14 +
نسبت پواسون	4/14	3/43	17 % -	1/51	1/54	2 +

7- مدل سازی مغار نمکی نوع A در FLAC3D

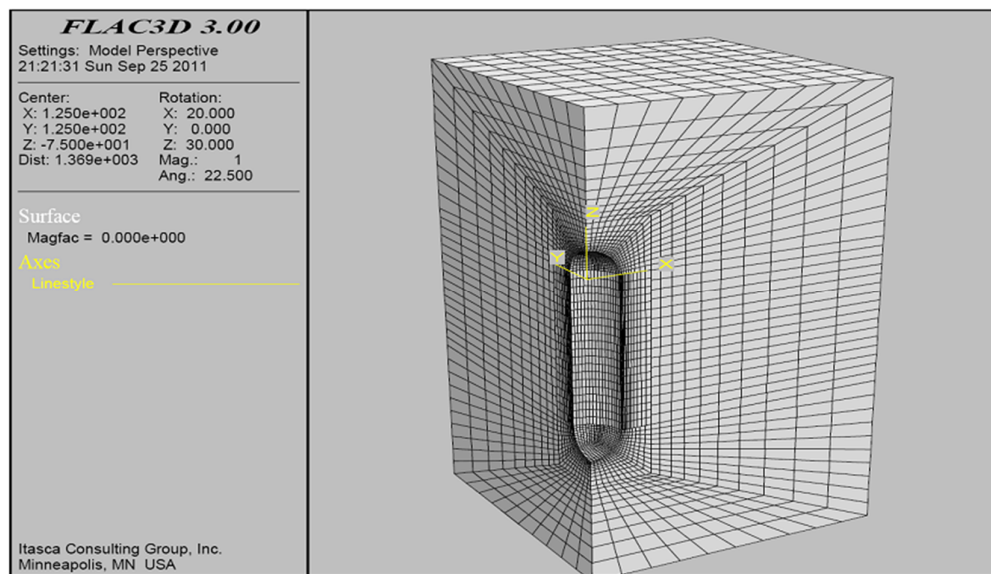
به منظور بررسی دقیق تر پایداری مغار نوع A، این مغار به صورت سه بعدی در نرم افزار FLAC3D مدل سازی شد. نرم افزار FLAC3D محصول گروه Itasca است. مدل سازی در این نرم افزار بر پایه روش تفاضل محدود و به صورت سه بعدی بوده و این نرم افزار برای محیط های پیوسته طراحی شده است. پیوسته بودن توده سنگ نمکی و دقت این نرم افزار برای مدل سازی مدل های سه بعدی باعث شد تا این نرم افزار برای مدل سازی دقیق تر مغار نوع A انتخاب شود [20].

برای مدل سازی هندسی مغار نوع A به دلیل تقارن هندسی، تنها یک ربع قائم از مغار مدل سازی شد. به این منظور، ابتدا یک ربع استوانه ای شکل ساخته شده و سپس برای مدل سازی قوس های بالا و پایین (سقف و کف مغار)، بدلیل نبود هندسه از پیش تعیین شده از FISH نویسی استفاده شد. مرزهای مدل با فاصله ای به اندازه 10 برابر شعاع حفاری از مرزهای حفاری در نظر گرفته شد. مرزهای قائم در جهات افقی ثابت شدند. مدل ساخته شده در FLAC3D در شکل 6 نشان داده شده است. برای رسیدن مدل به تعادل اولیه، قبل از حفاری مدل بارگذاری و اجرا شد. نسبت نیروهای نامتعادل کننده به کمتر از 10^{-5} رسید.

این کار موجب شبیه‌سازی تنش‌های برجا در محیط شد. نمودار این نیروها در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 5: نتایج تحلیل حساسیت پایداری مغارها نسبت به پارامترهای مؤثر بر اساس مقدار بیشترین جابجایی

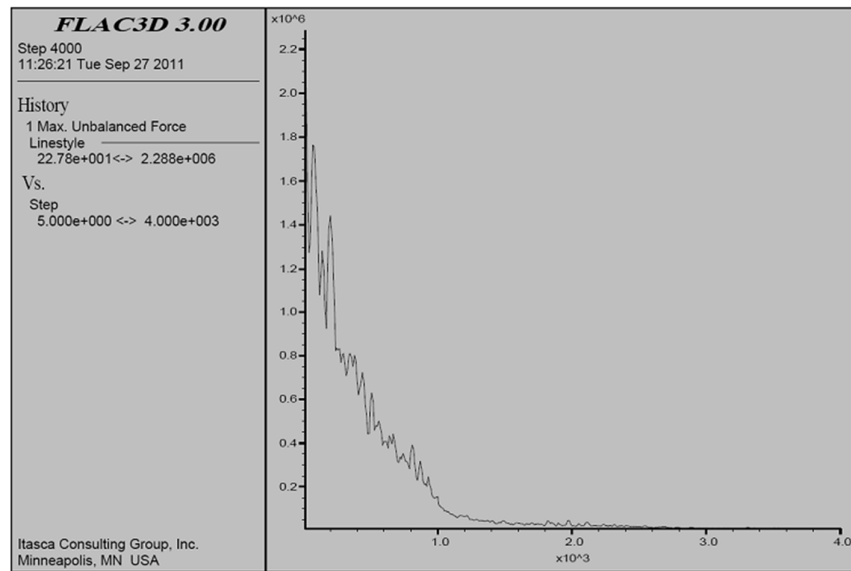


شکل 6: مدل ساخته شده مغار نوع A در FLAC3D

فشار داخلی گاز پایدار شد. حد کمینه و بیشینه این بازه به عنوان فشار کمینه مجاز و فشار بیشینه مجاز برای مغار تعیین گردید. این مقادیر به ترتیب برابر با 5 و 14/5 مگاپاسکال به دست آمد. مقادیر بیشترین جابجایی و کمترین ضریب ایمنی برای بحرانی‌ترین حالات (فشارهای بیشینه و کمینه) در جدول 5 آمده است.

7-1- تحلیل پایداری مغار و تعیین فشار کمینه و بیشینه

پس از میرا شدن نیروهای نامتعادل کننده، مغار حفاری شده و فشار داخلی گاز به صورت یکنواخت و عمود بر سطح داخلی اعمال شد. با در نظر گرفتن معیار مور-کولمب، مدل تا رسیدن به تعادل اجرا شد. برای بررسی پایداری مغار از مقادیر کمترین ضریب ایمنی و بیشترین جابجایی استفاده شد. بدین ترتیب مغار به ازای یک بازه از



شکل 7: نیروهای نامتعادل کننده برای مغار نوع A در FLAC3D

جدول 5: مقادیر بیشترین جابجایی و کمترین ضریب ایمنی برای مغار نوع A در FLAC3D

پارامتر	فشار کمینه (5 مگاپاسکال)		فشار بیشینه (14/5 مگاپاسکال)	
	مقدار	مکان	مقدار	مکان
بیشترین جابجایی (m)	$4/62 \times 10^{-2}$	دیواره پایین	$4/83 \times 10^{-3}$	دیواره پایین
کمترین ضریب ایمنی	1/5	کف مغار	3/9	سقف مغار

با تکرار مراحل مدل سازی مغار نوع A برای مغار نوع B در نهایت فشار کمینه 5 مگاپاسکال و فشار بیشینه 15 مگاپاسکال تعیین شد. برای نمونه اتساع محاسبه شده اطراف مغار در فشار بیشینه که بیشترین مقدار آن در دیواره های پایین مغار ایجاد می شود، در شکل 9 نشان داده شده است. در جدول 6 نیز مقادیر محاسبه شده برای بیشترین جابجایی و اتساع و کمترین ضریب ایمنی در فشارهای بیشینه و کمینه آمده است.

9- محاسبه ظرفیت گاز کاری برای مغارهای مدل

محاسبه ظرفیت کلی ذخیره سازی، گاز پایه و ظرفیت گاز کاری به صورت زیر است:

$$TSC = \frac{V_C}{V_{m,max}} \times V_{m,STP} \quad (1)$$

$$BG = \frac{V_C}{V_{m,min}} \times V_{m,STP} \quad (2)$$

8- مدل سازی مغار نمکی B در Phase2

برای مدل سازی مغار B و مقایسه نتایج آن با مغار A از نرم افزار Phase2 استفاده شده است. همان طور که گفته شد این نرم افزار علیرغم سادگی از دقت و توانایی کافی برای مدل سازی فضاهای زیرزمینی با شکل های نامتعارف و پیچیده برخوردار است [17].

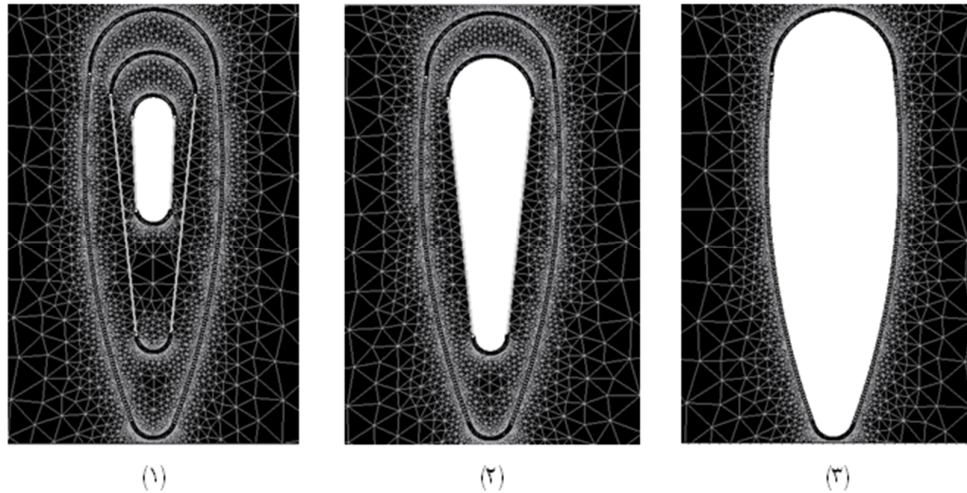
گسترش مرزهای مدل از طرفین مرزهای حفاری 5 برابر قطر بزرگ مغار است. برای مش بندی مدل از اجزاء سه وجهی استفاده شده است. این مدل از 29281 جزء و 14834 گره تشکیل شده است. مغار در سه مرحله مطابق با روش معدنکاری انحلالی حفاری شده است. مراحل حفاری مغار در شکل 8 نشان داده شده است. مدل رفتاری استفاده شده برای مغار نوع B مدل موهر-کولمب است.

8-1- تحلیل پایداری مغار و تعیین فشار کمینه و بیشینه

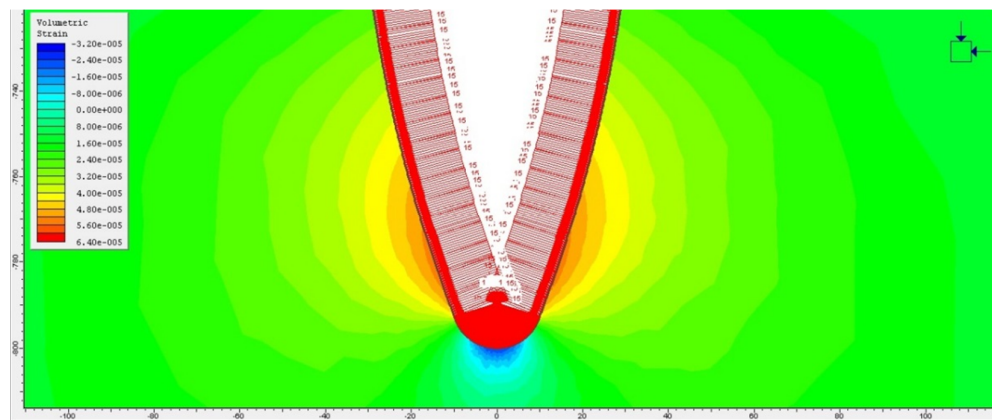
$$WGR = \text{نسبت گاز کاری، } V_C \text{ حجم مغار، } V_{m,\max} \text{ حجم} \quad (3)$$

$$WGR = \frac{WGC}{TSC} \times 100 \quad (4)$$

که TSC ظرفیت کلی ذخیره‌سازی، BG گاز پایه، WGC ظرفیت گاز کاری، همگی در شرایط استاندارد، مولی گاز طبیعی در مغار با فشار بیشینه، $V_{m,\min}$ حجم مولی گاز طبیعی در مغار با فشار کمینه و $V_{m,STP}$ حجم مولی گاز طبیعی در مغار با شرایط استاندارد است



شکل 8: مراحل حفاری مغار نمکی نوع B در Phase2



شکل 9: اتساع محاسبه شده در اطراف مغار نوع B برای فشار بیشینه 15 مگاپاسکال در Phase2

جدول 6: مقادیر بیشترین جابجایی و اتساع و کمترین ضریب ایمنی فشارهای بیشینه و کمینه برای مغار نوع B در Phase2

پارامتر	فشار کمینه (5 مگاپاسکال)		فشار بیشینه (15 مگاپاسکال)	
	مقدار	مکان	مقدار	مکان
بیشترین اتساع	$2/4 \times 10^{-4}$	دیواره پایین	$5/40 \times 10^{-5}$	دیواره پایین
بیشترین جابجایی (m)	$5/14 \times 10^{-2}$	دیواره پایین	$5/13 \times 10^{-3}$	دیواره پایین
کمترین ضریب ایمنی	1/4	کف مغار	3/7	کف مغار

مرکز مغار با توجه به شیب زمین گرمایی در حدود 320 درجه کلون است.

حجم مولی گازها با استفاده از معادله حالت لی – کسلر¹⁸ محاسبه شده و در جدول 7 آمده است. دما در

مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی دو بُعدی این مغار در بازه پایدار، فشارهای بیشینه و کمینه به ترتیب برابر 8 و 15 مگاپاسکال تعیین گردید. این مقادیر در حالت سه بُعدی به ترتیب در حدود 5 و 14/5 مگاپاسکال محاسبه شد که این میزان اختلاف به علت تحلیل محافظه کارانه دو بُعدی نسبت به سه بُعدی است. در ادامه با معرفی مغار هویجی شکل (مدل B)، به بررسی دو بُعدی این نوع مغار پرداخته شد. فشارهای بیشینه و کمینه برای این مغار برابر 5 و 15 مگاپاسکال تعیین گردید. در نتیجه بازه پایداری مغار نوع B بیشتر از مغار نوع A است. سپس بر اساس فشارهای بیشینه و کمینه نسبت گاز کاری برای هر دو مغار محاسبه شد. مقایسه مقادیر نسبت گاز کاری برای دو مغار در تحلیل دو بُعدی حاکی از این است که مغار هویجی شکل دارای بهره‌وری بالاتری بوده و استفاده از این مغار نسبت به مغار کپسولی شکل دارای صرفه اقتصادی بیشتری است ($63\% < 71\%$).

جدول 8: محاسبات نسبت گاز کاری برای مغارهای نوع A و B

پارامتر	مغار نوع A (تحلیل دو بُعدی)	مغار نوع A (تحلیل سه بُعدی)	مغار نوع B
ظرفیت کلی ذخیره سازی (m^3)	54394100	51604600	45328400
گاز پایه (m^3)	19976000	15723300	13102700
ظرفیت گاز کاری (m^3)	34418100	35881300	32225600
نسبت گاز کاری	63 %	69/5 %	71 %

با توجه به روابط بالا، ظرفیت کلی ذخیره سازی، گاز پایه، ظرفیت گاز کاری و در نهایت نسبت گاز کاری برای مغار نوع B و هر دو حالت دو بُعدی و سه بُعدی مغار نوع A محاسبه شد. نتایج این محاسبات در جدول 8 آمده است.

جدول 7: مقادیر حجم مولی گاز طبیعی در شرایط مختلف [21]

فشار (MPa)	دما (K)	حجم مولی ($m^3.mol^{-1}$)
0/1	273/15	0/022362
5	320	0/000512
8	320	0/000403
14/5	320	0/000156
15	320	0/000148

10- نتیجه گیری و بحث

در این مقاله ابتدا یک مغار ذخیره سازی گاز با شکل معمول مورد استفاده (کپسولی شکل، A) به صورت دو بُعدی و سه بُعدی در نرم افزارهای Phase2 و FLAC3D

6- مراجع

- [1] Höffler, F., & Kübler, M. (2007). Demand for storage of natural gas in northwestern Europe: Trends 2005–30. *Energy Policy*, 35(10), 5206-5219
- [2] Energy Information Administration; (2002); "The Basic of Underground Natural Gas Storage". U.S. Energy Information Administration.
- [3] Veil, J. A. (1997). Costs for Off-Site Disposal of Nonhazardous Oil Field Wastes: Salt Caverns Versus other Disposal Methods. ARGONNE NATIONAL LAB IL ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AND INFORMATION SCIENCES DIV.
- [4] U.S. Department of Energy; Argonne National Laboratory. (2010). "Argonne Home-Environmental Science Division -Programs/Projects" http://www.ead.anl.gov/titan_rutile.htm; pp. 1-2.
- [5] Thoms, R. L., & Gehle, R. M. (2000). A brief history of salt cavern use. In *The 8th World Salt Symposium*. [S. l.]: Elsevier (Vol. 2, pp. 207-214).
- [6] Arbent, M. (2001). "Environmental geology". Translated by Hormozi, Ahmad. Tehran Univestiy Publication Center.
- [7] Warren, J. K. (2006). *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*. Springer Science & Business Media.
- [8] Veil, J. A. (2000); "Salt cavern & their use for disposal of oil field wastes", By Argonne National Laboratory for the U.S. Department of Energy.
- [9] Istvan, J. A., Evans, L. J., Weber, J. H., & Devine, C. (1997). Rock mechanics for gas storage in bedded salt caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3), 142-e1.
- [10] Staudtmeister, K., & Rokahr, R. B. (1997). Rock mechanical design of storage caverns for natural gas in rock salt mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3), 300-e1.

-
- 1- Underground Storage
 - 2- Depleted Gas Reservoirs
 - 3- Aquifers
 - 4- Salt Caverns
 - 5- Hard-rock Caverns
 - 6- Compressed Air Energy Storage (CAES)
 - 7- Total Gas Storage Capacity (TSC)
 - 8- Total Gas in Storage
 - 9- Base Gas (BG)
 - 10- Working Gas Capacity (WGC)
 - 11- Working Gas (WG)
 - 12- Cycling Rate
 - 13- Injection Capacity
 - 14- Deliverability
 - 15- Chan
 - 16- Critical Dilation Value
 - 17- Devries
 - 18- Lee-Kesler Equation of State

- [11] Heusermann, S., Rolfs, O., & Schmidt, U. (2003). Nonlinear finite-element analysis of solution mined storage caverns in rock salt using the LUBBY2 constitutive model. *Computers & structures*, 81(8), 629-638.
- [12] Huang, X., & Xiong, J. (2011). Numerical simulation of gas leakage in bedded salt rock storage cavern. *Procedia Engineering*, 12, 254-259.
- [13] Berest, P., Brouard, B., Karimi-Jafari, M., & Van Sambeek, L. (2007). Transient behavior of salt caverns—interpretation of mechanical integrity tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 767-786.
- [14] Bahroudi, A., Talbot, C. J. (2008). “Shapes and timing of structures in Hormouz salt in the Zagros basin”, Hans Ramberg Tectonic Laboratory, Department of Earth science, Uppsala University.
- [15] Jackson, M. P. I., Cornelius, R. R., Craig, C. H., Gansser, A., Stocklin, J, Talbot, C. J. (1990). “Salt Diapirs of the Great Kavir, Central Iran”, *Geological Society of American*.
- [16] Hampson, G., Lonergan, L., Sepehr, M., Bahroudi, A. (2005). “Sedimentological and stratigraphic record of salt diapir evolution, Southern Iran”, Department of Earth Science and Engineering , Imperial College.
- [17] Rocscience Incorporation. (2005). Phase 2 Manual.
- [18] DeVries, K. L.; Mellegard, K. D.; Callahan, G. D. (2002). “Salt Damage Criterion Proof-of-Concept Research Final Report”, Rapid City, South Dakota, pp. 1-20.
- [19] DeVries K. L.; Mellegard K. D., Callahan G. D. (2003); “Cavern design using a salt damage criterion: proof-of-concept research final report. In: *Proceedings of the SMRI spring meeting*”, Houston, 1-18.
- [20] Itasca Consulting Group, Inc. (2005). “FLAC 3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions”. Ver. 3.00 User’s Manual. Minneapolis: Itasca.
- [21] Lee, B.; Kesler, M. (1975). “A Generalized Thermodynamic Correlation Based on Three-parameter Corresponding States”. *AIChE J.*, 21(3), 510-527.
- [22] Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Van Wylen, G. J., & Van Wyk, S. (1998). *Fundamentals of thermodynamics* (Vol. 6). New York: Wiley.

Numerical Determination of the Optimized Shape of Salt Caverns for Gas Storage

A. Siahmansouri¹, M. Fatehi Marji², A. Abdollahipour^{3*}

1- MSc Student, Dept. of Mining and Metallurgy, Yazd University

2- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgy, Yazd University

3- PhD Student, Dept. of Mining and Metallurgy, Yazd University

*Corresponding Author: abdollahipour@stu.yazd.ac.ir

(Received: November 2011, Accepted: October 2015)

Abstract

Using salt caverns is one of the most developed methods for fluid hydrocarbon storage. Certainty of caverns stability and simultaneously having an economical working gas ratio, are important factors that rarely have been considered in Iran. Considering salt rock characteristics and high overburden, the gravitational stress can be assumed dominant. In situ stress acts as an external pressure and causes cavern convergence. Since conventional rock supports e.g. shotcrete, rock bolt, etc. are not applicable in the salt caverns; the cavern stability can only be achieved by an internal pressure caused by the gas inside the cavern. The paper deals with salt cavern stability analysis for gas storage. Specific geometrical and geotechnical properties (with the general properties of salt domes located in the Southwest of Iran) have been modeled by Phase2 and FLAC3D softwares. Geometrical and mechanical modeling of these caverns in finite difference and finite element in desired depth, determined the minimum and maximum gas pressure for cavern stability and working gas pressure was calculated as well. Comparison of these results implies that carrot shape cavern is more economical.

Keywords

Numerical Modeling, Salt Caverns, Finite Element Method, Finite Element Difference, Phase2, FLAC3D

Cite this paper:

Siahmansouri, A., Fatehi Marji, M., Abdollahipour, A. (2015). "Numerical Determination of the Optimized Shape of Salt Caverns for Gas Storage." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 5(9): 1-12. [http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940911-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940911-X)