

پایداری مغار سنگی با نرم‌افزار FLAC3D، برای طراحی اولیه مخزن زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز فشرده شهر اردبیل

حسین ایمانی^۱، مهدی حسینی*^۲، حسین جلالی فر^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ه) قزوین

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ه) قزوین

۳- دانشیار، گروه مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت مرداد ۹۲، پذیرش آذر ۹۲)

چکیده

امروزه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در فضاهای زیرزمینی به عنوان یک راهکار اساسی جهت کنترل بازار مصرف به ویژه در ماه‌های سرد سال مورد توجه بسیار قرار گرفته است. بدین منظور روش‌های متعددی جهت ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز استفاده می‌شود که عبارت‌اند از: ذخیره‌سازی در میدان‌های تخلیه‌شده نفت و گاز، آبخوان‌ها (سفره‌های آب زیرزمینی)، حفريات نمکی، حفريات سنگی (حفريات سنگی آستر دار یا بدون آستر) و معادن متروکه که انتخاب هر کدام از این روش‌ها با توجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی و هیدرومکانیکی منطقه از قبیل نفوذپذیری، تخلخل، تراز سفره آب زیرزمینی، مقاومت فشاری و کششی سنگ و نیز فشار داخلی گاز ذخیره‌شده صورت می‌گیرد. در این تحقیق ضمن بررسی شرایط زمین‌شناسی مهندسی، هیدروژئولوژی و ژئومکانیکی سنگ‌های محدوده موردنظر (منطقه اردبیل) بهترین روش ذخیره‌سازی گاز فشرده‌شده تعیین شد. ارزیابی‌ها و بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که ذخیره‌سازی، در هر دو حالت حفريات سنگی بدون آستر و با آستر، امکان‌پذیر است. با به دست آوردن خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ منطقه مورد مطالعه، عمق قرارگیری مغار بدون آستر حداقل ۲۳۵ متر و مغار با آستر ۸۱ متر، تخمین زده شد. در این میان ایجاد حفريات سنگی با آستر از اولویت بیشتری برخوردار است. برای تحلیل پایداری مخزن ذخیره‌سازی از روش عددی استفاده گردید و با توجه به عدم وجود ناپیوستگی، نرم‌افزار FLAC^{3D} انتخاب شد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که جابجایی‌های اطراف مغار با آستر قبل و بعد از تزریق گاز کمتر از جابجایی‌های بحرانی به دست آمده از روابط ساکورایی است. در نتیجه مغار ذخیره‌سازی پایدار خواهد بود و امکان ذخیره‌سازی گاز در این مغار با فشار داخلی ۲ مگاپاسکال میسر است.

کلمات کلیدی

ذخیره‌سازی زیرزمینی، حفريات سنگی با آستر و بدون آستر، گاز فشرده.

۱- مقدمه

هدف از ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی، تنظیم عرضه و تقاضای گاز طبیعی در یک منطقه خاص به دلایل مختلف از قبیل تغییر الگوی مصرف و تغییرات فصلی مصرف گاز برای روزهای بسیار سرد زمستان است. به جزء این که می‌توان به اهداف راهبردی از قبیل امکان خرید و فروش گاز نیز اشاره کرد [۱]. اولین تجربه موفق در ذخیره‌سازی گاز در سال ۱۹۱۵ از طریق استفاده از مخزن تخلیه‌شده گازی در کشور کانادا مورد اجرا واقع شد [۲].

به طور کلی می‌توان انواع روش‌های مختلف ذخیره‌سازی را به صورت زیر خلاصه کرد [۳]:

• مغارهای نمکی

این نوع تأسیسات سالیان متمادی جهت ذخیره‌سازی گاز مورد استفاده قرار گرفته است. نخستین بار این روش در سال ۱۹۱۶ در ایالات متحده آمریکا در میشیگان مورد استفاده قرار گرفت.

اگر چه مدت زمان زیادی از ایجاد این‌گونه مغارها به روش انحلالی می‌گذرد، اما به‌کارگیری آن‌ها برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی یک ابداع جدید است. مغارهای درون نمک با شستشوی نمک به وسیله آب خالص شکل می‌گیرند. به کمک فن آوری جدید می‌توان فضاهایی با چند صد هزار مترمکعب در نمک ایجاد نمود که دیوارهای آن نیز پایدار است [۳].

• آکیوفرها (سفره‌های آب زیرزمینی)

اولین پروژه استفاده از مخازن سفره‌های آب زیرزمینی به عنوان نوع دوم مخازن گاز زیرزمینی در ایالت ایلینوی آمریکا در سال ۱۹۵۳ به ظرفیت ۳۰۰ میلیون مترمکعب مورد بهره‌برداری قرار گرفت [۲].

• معادن متروکه

در مورد استفاده از معادن متروکه موفقیت‌های چندانی حاصل نشده است.

• میدان‌های گازی و نفتی تخلیه شده

ذخیره‌سازی گاز در مخازن هیدروکربنی تخلیه‌شده یکی از بهترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها است. زیرا یک

مخزن هیدروکربنی قبلاً خود به عنوان محل تجمع مواد هیدروکربنی عمل می‌کرده است. اولین ذخیره‌سازی گاز با این روش در سال ۱۹۱۵ با تزریق گاز در میدان گازی تخلیه‌شده در ولاندکاستی (Voland kastie) کانادا صورت گرفت. دومین تزریق برای ذخیره‌سازی گاز در سال ۱۹۱۶ در میدان نفتی زوار (zoar) آمریکا در جنوب بوفالو انجام شد و در سومین مورد در سال ۱۹۱۹ در میدان کنتاکی (Kentucky) صورت پذیرفت و تا سال ۱۹۳۰ مقدار کل گاز ذخیره‌شده در آمریکا با این روش به $216000000 m^3$ رسید [۲]. در ایران مطالعات ذخیره‌سازی گاز چند سالی است آغاز شده است و تنها یک پروژه ذخیره‌سازی گاز در تاکدیس سراجه که یک مخزن گازی تخلیه شده است به بهره‌برداری رسیده است. این تاکدیس دارای ۲۸ کیلومتر طول و حدود ۵ تا ۶ کیلومتر عرض است و ساختمان تقریباً متقارن دارد [۴].

• ایجاد مغار در سنگ‌های سخت

در طول ۲۰ سال گذشته یک فناوری ذخیره‌سازی جدید تحت توسعه برای بازار جهانی بوده است. اولین مغار سنگی آستر دار در سوئد برای ذخیره‌سازی گاز تحت فشار بالا، ساخته شده در اسکالن (Skallen)، در جنوب غربی سوئد حفاری کار در پایان سال ۲۰۰۰ به اتمام رسید [۵]. نیاز به حمایت از صنعتی شدن سریع از سال ۱۹۷۰ و جلوگیری از بحران نفت باعث شد مغارهای زیرزمینی در چین برای ذخیره‌سازی نفت و گاز ساخته شده است [۶]. همچنین در پی تحریم نفتی کره در سال ۱۹۷۹، اولین پروژه ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت در سال ۱۹۸۱ آغاز شد، پس از آن پنج مغار بدون آستر در این کشور برای ذخیره‌سازی گاز تحت فشار توسط دولت و بخش خصوصی در این کشور ساخته شد [۷].

هر یک از این روش‌ها با توجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی و هیدرومکانیکی منطقه از قبیل نفوذپذیری، تخلخل، تراز سفره آب زیرزمینی، مقاومت فشاری و کششی سنگ انتخاب می‌شود و از لحاظ اقتصادی نیز هزینه‌های آماده‌سازی، نرخ برداشت و قابلیت استفاده مجدد باید مد نظر قرار گیرد. با توجه به این خصوصیات است که شایستگی روش مورد نظر به اثبات می‌رسد.

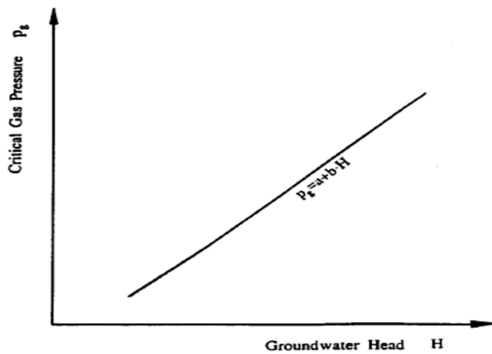
شده و آستر بندی فقط مسئول جلوگیری از تراوش گاز است. در طرح ذخیره سازی زیرزمینی گاز فشرده با عایق بندی هیدرودینامیک یک گرادیان آب در همه جهات به خصوص در سقف حفاریات باید وجود داشته باشد تا از نشت گاز به بیرون مغار جلوگیری نماید. عمق مغار نیز فقط به وسیله فشار گاز داخلی و فشار آب زیرزمینی تعیین می شود. معمولاً در عایق بندی هیدرودینامیک حد اکثر فشار گاز در مغار در محدوده ۷۰ تا ۱۰۰ بار است [۸].

۲-۱- مغارهای بدون آستر قرار گرفته در عمق زیاد

اگر از آب زیرزمینی برای جلوگیری از نشت گاز استفاده شود مغار یا سازه باید در عمق معینی زیر سطح ایستابی قرار گیرد. رابطه بین سطح ایستابی و فشار بحرانی گاز تقریباً خطی است (شکل ۱) و می توان آن را به صورت رابطه ۱ بیان کرد [۹]:

$$P_g = a + b.H \quad (1)$$

که در این رابطه P_g فشار بحرانی گاز (مگاپاسکال)، H سطح ایستابی (متر)، a, b ثابت های مرتبط با تعداد، هندسه سطح و فاصله مغارها از یکدیگر هستند.



شکل ۱: فشار بحرانی گاز و سطح آب زیرزمینی [۹]

۲-۲- مغارهای عایق بندی شده در عمق کم

از مشخصه های این طرح می توان به وابستگی کم آن به شرایط هیدرولوژیکی اشاره کرد. در این جا غشاء پوسته جهت عایق بندی و سنگی که آن را در بر گرفته برای تحمل فشارهای داخلی مورد استفاده قرار می گیرد. نکته حائز اهمیت این است که در این گونه طرحها نیز مقاومت بالای سنگ مورد توجه بوده در حالی که خصوصیات نفوذپذیری کمتر اهمیت می یابد [۸].

در کشور ایران نیز در مناطق سردسیر و مناطقی که فاصله آن ها از مخازن نفت و گاز زیاد است با توجه به مزایای گفته شده نیازمند ذخیره سازی گاز فشرده با روش های مناسب است. استان اردبیل که از مناطق سردسیر کشور به شمار می رود نیازمند چنین مخازنی است؛ که با توجه به درخواست شرکت گاز استان اردبیل، امکان سنجی و طراحی این نوع مخازن مورد مطالعه قرار گرفت.

مطالعات زمین شناسی اولیه انجام گرفته در منطقه ی مورد مطالعه گویای آن است که این محدوده به لحاظ زمین شناسی فاقد گنبد های نمکی، میدان های نفتی و گازی تخلیه شده و معدن متروکه زیرزمینی مناسب جهت ذخیره سازی بوده، پس در نتیجه این روش های ذخیره سازی را نمی توان به کار برد. همچنین بررسی های اولیه زمین شناسی نشان می دهد روش ذخیره سازی گاز در مغارهای ایجاد شده در سنگ با توجه به پتانسیل مطلوب جهت ذخیره سازی در سنگ مناسب است.

۲-۲- ذخیره سازی گاز در مغارهای ایجاد شده در سنگ سخت

ایجاد مغار در سنگ های توده ای با مقاومت بالا و نفوذپذیری کم که ترجیحاً در زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارند، بهترین گزینه برای ذخیره سازی هستند. به لحاظ اجرایی امکان اجرای ذخیره سازی در هر محیطی وجود دارد ولی هر چه محیط به لحاظ ژئومکانیکی پایدار باشد، هزینه های اجرا به مراتب کاهش خواهد یافت. بنابراین در انتخاب ساختگاه پروژه های ذخیره سازی، زمین شناسی، هیدروژئولوژی و خواص مکانیک سنگی باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

برای جلوگیری از تراوش گاز فشرده شده (فشار گاز ممکن است به ۷۰ الی ۱۵۰ بار برسد) از داخل مغار ذخیره سازی، دو نوع عایق بندی وجود دارد:

- عایق بندی با به کارگیری آستر (حفاریات آستر شده)
- عایق بندی هیدرودینامیک (حفاریات بدون آستر)

در حالت آستر بندی شده مقاومت و وزن پوش سنگ، عمق مورد نیاز جهت فشار داخلی گاز را تعیین می کند. در این جا فشار داخلی توسط سنگ های اطراف مغار تحمل

۳- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

استان اردبیل بین طول‌های جغرافیایی $48^{\circ} 55'$ تا $17^{\circ} 44'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $39^{\circ} 42'$ تا $37^{\circ} 06'$ شمالی قرار دارد. مساحت استان ۱۷۸۸۱ کیلومتر مربع بوده و مرکز آن شهرستان اردبیل است. ارتفاع از سطح دریا ۱۳۱۴ متر، حداقل مطلق دما $33/8-$ درجه سانتی‌گراد و حداکثر مطلق دما $38/2$ درجه سانتی‌گراد است. از نظر مورفولوژی حدود یک سوم ورقه $1:100000$ را دشت اردبیل می‌پوشاند که توسط رسوبات آبرفتی از جنس سیلت و رس پوشیده شده است. ارتفاعات سیلان از گدازه‌های آتشفشانی تشکیل شده و به علت مقاومت در برابر ژرف به وجود آورده، ولی ارتفاعات جنوب به علت رخساره سست مارنی بیشتر در معرض فرسایش قرار گرفته و توپوگرافی پستی را با دره‌های کم ژرفا و ملایم ساخته است.

۴- مکان‌یابی جهت ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغار

با توجه به مطالبی که به آن اشاره شد، مکان‌یابی در مناطقی با سنگ‌های توده‌ای با مقاومت بالا و نفوذپذیری کم، بهترین گزینه برای ذخیره‌سازی هستند. از این رو با بررسی و مطالعات اولیه نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مشخص شد، سنگ‌های این استان بیشتر از نوع سنگ‌های سخت به شمار می‌روند. مناطقی با سنگ‌های آهکی ماسه‌سنگ و مارن و نیز مناطقی با سنگ‌های تناوب توف، توف برش، پومیس، لاهار و آهک آب شیرین، دارای استعداد ذخیره‌سازی در مغار تشخیص داده شده‌اند.

به‌طور کلی برای مکان‌یابی سایت ذخیره‌سازی، بر اساس دو روش مغاره‌های ذخیره‌سازی بدون آستر و با آستر، دو منطقه باید در الویت قرار گیرند.

منطقه‌ای که در آن مغار بدون آستر مناسب است، باید خصوصیات زیر را دارا باشد:

۱. سطح ایستابی با سطح زمین نباید اختلاف قابل ملاحظه‌ای داشته باشد (به لحاظ اقتصادی).
۲. منطقه از لحاظ ژئوتکنیکی باید دارای سنگ‌هایی با مقاومت بالا و نفوذناپذیر باشد.

۳. نزدیکی مخزن به خطوط اصلی لوله‌گاز و یا مرکز عرضه خطوط توزیع.

البته قابل ذکر است که لازم نیست همه توده سنگ بالای مغار نفوذناپذیر و نامتخلخل باشد. بلکه بهترین موقعیت هنگامی به وجود می‌آید که توده سنگ اطراف مغار نامتخلخل و توده سنگی که دورتر از مغار قرار می‌گیرد متخلخل باشد. زیرا این خود باعث شده تا با نفوذ آب به توده سنگ اطراف مغار، عایق‌بندی لازم جهت جلوگیری از نشت گاز حاصل گردد بنابراین مناطق شمالی شهر اردبیل که در سطح زمین به صورت رسوبات دشت، پادگانه‌های آبرفتی جوان و مخروط افکنه‌ها و در عمق با توجه پروفیل مقاطع زمین‌شناسی موجود متشکل از گدازه‌های برشی، برش‌های ولکانیکی عمدتاً با قطعات پیروکسن آندزیت و بازالت و کمتر گدازه‌های جریان پیروکسن آندزیت است (شکل ۲-الف). با توجه به وضعیت سطح آب زیرزمینی و نوع سنگ منطقه (به علت توده‌ای و مقاوم بودن) برای ایجاد مغار بدون پوشش جهت ذخیره‌سازی مناسب تشخیص داده می‌شود.

این منطقه دارای خصوصیات زیر است:

- متوسط وزن مخصوص سنگ‌ها 25000 نیوتن بر مترمکعب.
- عمق تراز آب زیرزمینی منطقه 1345 متر [۱۰].

برای منطقه‌ای که در آن مغار با پوشش و آستر مناسب است خصوصیات زیر الزامی است:

۱. مقاومت بالای توده سنگ‌های اطراف مغار
۲. منطقه موردنظر عاری از هر نوع گسل و ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس باشد.
۳. نزدیکی مخزن به خطوط اصلی لوله‌گاز و یا مرکز عرضه خطوط توزیع.

بر این اساس منطقه‌ای که در حاشیه روستای الماس قرار گرفته و از سنگ آهک توده‌ای با مقاومت بالا و بدون درزه تشکیل شده است برای ذخیره‌سازی گاز در مغار با پوشش، مناسب تشخیص داده شد (شکل ۲-ب)؛ که پس از مشاهدات صحرایی، منطقه‌ای که در فاصله‌ی حدود ۵ کیلومتری جنوب غربی روستای الماس قرار دارد، از لحاظ مقاومت و سختی توسط چکش اشمیت در مرحله اول مناسب ارزیابی شد که برای اطلاعات تکمیلی از محل

- نمونه برداری شد و در آزمایشگاه مکانیک سنگ خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ منطقه طبق جدول (۱) به دست آمد.
- فشار بیشینه گاز مخزن ۲۰ بار
- تراز آب در عمق ۳۵ متری است.
- متوسط ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا ۱۳۸۰ متر، از دو روش محاسبه می شود [۱۰].

۴-۱- تعیین عمق مغار بدون آستر

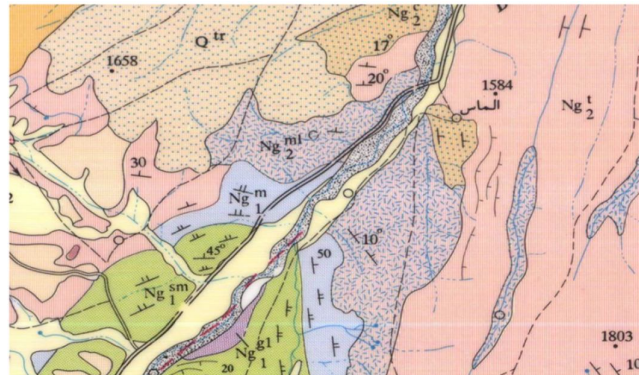
عمق مورد نیاز جهت ایجاد مغار با در نظر گرفتن:

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک توده ای منطقه برای طراحی و استفاده در مدل

نوع سنگ	جرم مخصوص (gr/cm^3)	فشار داخلی گاز (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	ضریب پواسن	مدول یانگ (GPa)
آهک	۲/۴۶	۲	۹/۶۶	۹/۴۱	۶۵/۵	۰/۲۲	۱۵/۵



شکل ۲: (ب) منطقه مستعد روش مغار با آستر [۱۰]



شکل ۲: (الف) منطقه مستعد روش مغار بدون آستر

چون حجم ذخیره سازی پیشنهاد شده برای این طرح (۲۸۰۰۰ مترمکعب) مقدار کمی است، برای این طرح ایجاد یک مغار با ارتفاع ۱۵ و عرض ۱۲ متر کفایت می کند. به همین دلیل ضرایب a و b از جدول ۲ به ترتیب ۰/۳۷- مگاپاسکال و ۰/۰۰۹۵ مگاپاسکال انتخاب گردید. بنابراین:

$$P_g = a + b.H$$

$$2 = -0.37 + 0.0095H$$

$$H = 249.5m$$

همان طور که مشاهده می شود، اختلاف عددی ۴۹/۵ متر برای عمق مغار در دو روش بالا، مربوط به حاشیه امنیت است.

۴-۲- تعیین عمق مغار با آستر

عمق مورد نیاز جهت ایجاد مغار با در نظر گرفتن:

در روش اول با استفاده از مفهوم ساده به این صورت که فشار آب عمق مورد نظر باید بزرگ تر یا مساوی فشار بیشینه تزریق باشد تا از تراوش گاز جلوگیری کند (رابطه ۲) [۹].

$$P_{max} \leq \gamma_w H \quad (2)$$

که P_{max} بیشینه فشار تزریق (مگاپاسکال)، H عمق آب زیرزمینی (متر) است.

با توجه به مطالب ذکر شده، عمق مورد نیاز جهت ایجاد مغار برای طرح مورد نظر به صورت زیر تعیین می گردد:

$$H \geq \frac{P_{max}}{\gamma_w} = \frac{2000000}{10000} = 200$$

یعنی حداقل عمق ایجاد مغار، ۲۰۰ متر زیر سطح ایستابی است.

- فشار بیشینه ۲۰ بار
- تراز آب زیرزمینی منطقه در عمق ۲۳۹ متری
- متوسط ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا ۱۵۸۴ متر
- وزن مخصوص سنگ منطقه ۲۴۶۰۰ نیوتن بر مترمکعب محاسبه می‌شود [۱۰].

جدول ۲: تعیین ضرایب a و b برای مغارهای بدون آستر (عرض پایه‌ها با عرض مغار برابر است) [۹]

ارتفاع (متر)	عرض (متر)	تعداد مغار							
		1		2		3		4	
		a (MPa)	b (KPa)	a (MPa)	b (KPa)	a (MPa)	b (KPa)	a (MPa)	b (KPa)
10	6	-0.227	9.52	-0.405	9.5	-0.6	9.48	-0.725	9.41
	9	-0.284	9.54	-0.533	9.51	-0.756	9.41	-0.923	9.32
	12	-0.31	9.52	-0.581	9.43	-0.882	9.34	-1.039	9.17
	15	-0.365	9.54	-0.606	9.36	-0.97	9.24	-1.174	9.11
15	8	-0.338	9.53	-0.53	9.46	-0.769	9.41	-0.927	9.33
	12	-0.37	9.5	-0.681	9.44	-0.933	9.29	-1.156	9.21
	16	-0.415	9.49	-0.737	9.35	-1.107	9.22	-1.296	9.03
	20	-0.46	9.48	-0.805	9.31	-1.219	9.11	-1.436	8.92
20	10	-0.414	9.5	-0.678	9.45	-0.912	9.34	-1.114	9.27
	15	-0.473	9.49	-0.824	9.39	-1.131	9.22	-1.327	9.05
	20	-0.532	9.47	-0.868	9.27	-1.285	9.09	-1.49	8.85
	25	-0.597	9.48	-0.953	9.22	-1.43	8.99	-1.626	8.7
25	15	-0.544	9.49	-0.882	9.38	-1.155	9.18	-1.366	9.014
	20	-0.605	9.49	-0.951	9.26	-1.316	9.04	-1.552	8.83
	25	-0.657	9.47	-1.034	9.2	-1.469	8.93	-1.694	8.67
	30	-0.694	9.44	-1.129	9.17	-1.588	8.82	-1.795	8.49
30	20	-0.68	9.5	-1.074	9.31	-1.394	9.05	-1.581	8.79
	25	-0.696	9.44	-1.132	9.2	-1.518	8.9	-1.75	8.65
	30	-0.743	9.42	-1.231	9.19	-1.627	8.77	-1.847	8.45
	35	-0.852	9.48	-1.312	9.15	-1.848	8.78	-2.069	8.42

۵- تحلیل پایداری مخزن ذخیره‌سازی به کمک نرم‌افزار $FLAC^{3D}$

کاندال در سال ۱۹۸۶ نرم‌افزار $FLAC$ را برای تحلیل برخی مسائل بر روی یک ریز رایانه IMB طراحی کرد. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ یک برنامه تفاضل محدود سه بعدی برای محاسبات مهندسی است. این برنامه رفتار ساختارهای خاک، سنگ و یا دیگر مواد را که ممکن است هنگام نزدیک شدن به محدوده شکست، رفتارهای گوناگون از خود نشان دهند را مدل‌سازی می‌کند. این برنامه در سال‌های اخیر گسترش زیادی یافته است که توسط شرکت مشاوره‌ای آیتسکا انجام گرفته است [۱۱]. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ امکان مدل‌کردن ساختارهای مختلف را به صورت سه بعدی برای کاربر فراهم می‌کند و دستیابی به جواب‌های دقیق‌تر را ممکن می‌سازد و برای مدل‌سازی در محیط‌های پیوسته و یا شبه پیوسته به کار می‌رود. چون در محدوده مدل‌سازی ناپیوستگی وجود ندارد محیط پیوسته است و می‌توان از

در این روش چون وزن لایه‌های سنگی فوقانی مغار برای تحمل فشار داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند بنابراین با استفاده از رابطه ۳ می‌توان عمق موردنیاز برای ایجاد مغار را تعیین نمود.

$$\gamma h \geq P_{max} \quad (3)$$

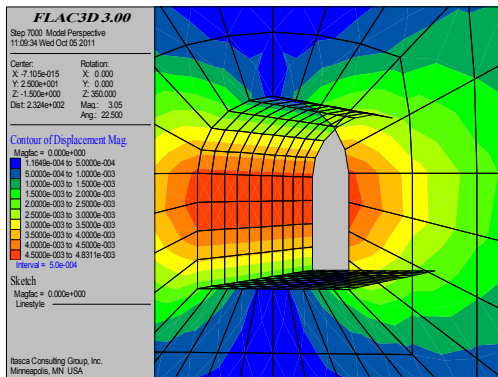
که γ متوسط وزن مخصوص سنگ‌های منطقه و برابر با ۲۴۶۰۰ نیوتن بر مترمکعب، h عمق از سطح زمین و P_{max} فشار بیشینه داخلی گاز است. بنابراین:

$$24600h \geq 2000000$$

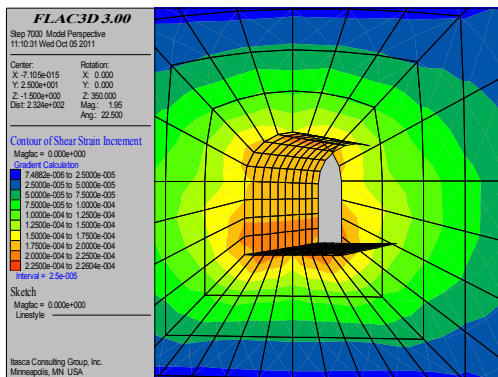
$$h \geq 81m$$

پس به این ترتیب حداقل عمق موردنیاز برای ایجاد مغار با آستر در منطقه موردنظر ۸۱ متر است. از میان دو روش ذخیره‌سازی ایجاد مغار با آستر و بدون آستر با توجه به عمق بیشتر مغار در حالت بدون آستر نسبت به مغار با آستر و خصوصاً در این تحقیق با فشار ذخیره‌سازی ۲ مگاپاسکال، از لحاظ اقتصادی روش ذخیره‌سازی مغار با آستر پیشنهاد می‌گردد.

میلی متر است. با توجه به شکل ۴ بیشینه کرنش برشی در حدود $۲/۳ \times ۱۰^{-۴}$ است.



شکل ۳: کنتورهای جابجایی در اطراف مغار قبل از تزریق گاز



شکل ۴: کنتورهای کرنش برشی در اطراف مغار قبل از تزریق گاز

۵-۲- حل مدل بعد از تزریق گاز

در این قسمت، تحلیل عددی مخزن در شرایطی بررسی می شود که گاز به داخل مخزن یا مغار تزریق شده است. یعنی به سطوح داخلی مغار فشاری معادل ۲ مگاپاسکال وارد خواهد شد. حال بررسی می شود که در این شرایط وضعیت مغار از لحاظ پایداری چگونه خواهد بود (شکل ۵). همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود بیشینه جابجایی بعد از تزریق گاز $۳/۵ \times ۱۰^{-۳}$ متر است. همچنین با توجه به شکل ۶ بیش ترین مقدار کرنش برشی $۱/۳ \times ۱۰^{-۴}$ به دست می آید.

این نرم افزار استفاده کرد. در این تحقیق تحلیل پایداری مخزن ذخیره سازی در دو بخش انجام خواهد شد. در بخش اول مخزن قبل از تزریق گاز و در بخش دوم مخزن پس از تزریق گاز در نظر گرفته خواهد شد. در تحلیل عددی مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. به دلیل اینکه در طراحی های اولیه آزمایش های برجای اندازه گیری تنش انجام نمی شود. لذا تنش متوسط برجای قائم برابر عمق روباره (Z) ضرب در وزن مخصوص روباره (γ) در نظر گرفته شده است و تنش افقی نیز از رابطه (۴) تخمین زده می شود [۱۲].

$$\sigma_h = \frac{12.6}{\sqrt{3Z}} \sigma_v \quad (۴)$$

در این رابطه σ_v و σ_h بر حسب مگاپاسکال و Z (عمق) روباره ۸۱ متر در نظر گرفته شده است) بر حسب متر هستند. با در نظر گرفتن تنش عمودی ۲/۲ مگاپاسکال و تنش افقی ۶/۴ مگاپاسکال از رابطه ۴ به دست می آید. در ضمن در تحلیل های عددی مدول بالک (K) $۹/۲$ گیگاپاسکال و مدول برشی (G) $۶/۳$ گیگاپاسکال با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه شده است.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۵)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۶)$$

که در این روابط E مدول یانگ و ν ضریب پواسون است [۱۱].

۵-۱- حل مدل قبل از تزریق گاز به مخزن

یکی از پارامترهای مهم که معمولاً در تحلیل پایداری تونل مورد توجه قرار می گیرد، میزان جابجایی و نرخ کرنش در اطراف سازه زیرزمینی است. با برآورد میزان جابجایی در اطراف فضای زیرزمینی می توان به پایداری و یا عدم پایداری سازه موردنظر دست یافت. اگر میزان جابجایی و نرخ کرنش در اطراف حفریات زیرزمینی کمتر و یا مساوی مقدار بحرانی باشد، در این صورت می توان گفت که سازه موردنظر پایدار است. در غیر این صورت ناپایدار خواهد بود. بنابراین همان طور که از شکل ۳ مشاهده می شود بیشینه جابجایی قبل از تزریق گاز به داخل مغار معادل $۴/۸$

تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است. در کارهای مهندسی به دلیل این که کرنش بحرانی توده سنگ بزرگ‌تر از کرنش بحرانی سنگ بکر است. می‌توان از کرنش بحرانی سنگ بکر به عنوان سطح هشدار برای پایداری تونل در توده سنگ استفاده کرد. در این حالت ضریب ایمنی به صورت خودکار بین ۱ تا ۳ در محاسبات منظور می‌شود. طبق رابطه (۸) در این تحقیق کرنش بحرانی به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log(155000) - 1.22$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{cr} = 0.003$$

به منظور محاسبه جابجایی بحرانی توده سنگ، می‌توان از رابطه (۱۰) استفاده کرد.

$$U_{cm} = \varepsilon_{cr} \cdot a \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) a شعاع تونل ۶ متر (قبلاً با استفاده از جدول ۲ عرض تونل ۱۲ متر در نظر گرفته شده بود) و U_{cm} جابجایی بحرانی است. پس در مخزن مورد مطالعه:

$$U_{cm} = 0.003 \times 6 = 0.018m$$

کرنش برشی بحرانی در حالت سه محوره (γ_c) با استفاده از کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده (ε_{cr}) و نسبت پواسون (ν) از رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{cr} \quad (11)$$

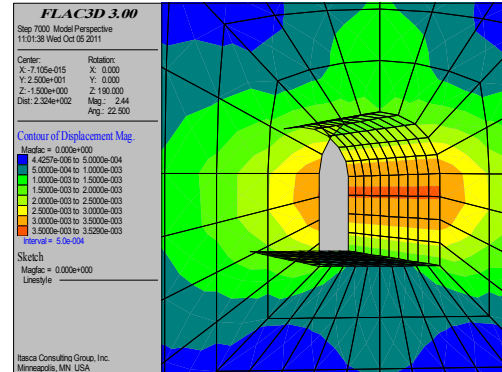
در نتیجه:

$$\gamma_c = (1 + 0.22) \times 0.003 = 3.66e-3$$

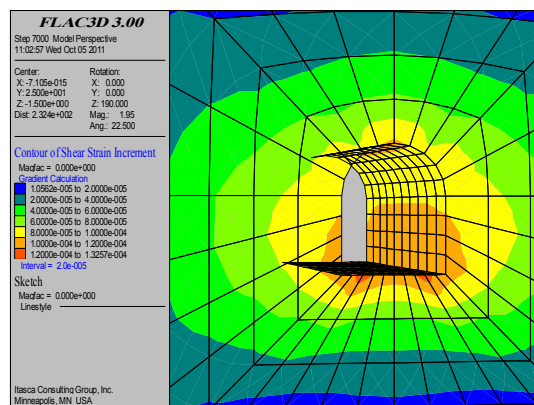
مقدار کرنش برشی حاصل شده از تحلیل عددی قبل از تزریق گاز ($2/3 \times 10^{-4}$) و بعد از تزریق گاز ($1/3 \times 10^{-4}$)، کمتر از کرنش برشی بحرانی ($3/66 \times 10^{-3}$) است. بنابراین می‌توان گفت مغار پایدار خواهد بود.

۷- نتیجه‌گیری

از مطالعات انجام شده پیرامون ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز فشرده به روش ایجاد مغار در سنگ سخت نتایج زیر قابل استنتاج است:



شکل ۵: کنتورهای جابجایی در اطراف مغار بعد از تزریق گاز



شکل ۶: کنتورهای کرنش برشی در اطراف مغار بعد از تزریق گاز

۶- تحلیل پایداری مغار ذخیره‌سازی گاز فشرده با استفاده از روش کرنش بحرانی

ساکورایی و آدانوچی در سال ۱۹۸۸ بر اساس مطالعات تجربی انجام گرفته بر روی تونل‌های مختلف ترازهای هشدار خطر را به صورت روابط تحلیلی (۷) تا (۹) ارائه دادند [۱۳].

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 0.85 \quad (7) \quad \begin{array}{l} \text{تراز هشدار} \\ \text{خطر ۱} \end{array}$$

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 1.22 \quad (8) \quad \begin{array}{l} \text{تراز هشدار} \\ \text{خطر ۲} \end{array}$$

$$\log \varepsilon_{cr} = -0.25 \log E - 1.59 \quad (9) \quad \begin{array}{l} \text{تراز هشدار} \\ \text{خطر ۳} \end{array}$$

در روابط ارائه شده توسط ساکورایی و آدانوچی، E مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع و ε_{cr} کرنش بحرانی است. تراز هشدار خطر ۲ به عنوان مبنا برای طراحی سیستم نگهداری

- [3] Tek, M.R., 1996, "natural gas underground storage Inventory and Deliverability", Pennwell book university of Michigan, Vol. 456.
- [4] <http://ugs.nigc.ir/Site.aspx>.
- [5] Glamheden, R., Curtis, p., 2006, "Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 56-67.
- [6] Li, Z., Wang, K., Wang, A., Liu, H., 2009, "Experimental study of water curtain performance for gas storage in an underground cavern", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 89-96.
- [7] Cha, S., Lee, J., Lee, D., Amantini, E., Lee, K., 2006, "Engineering characterization of hydraulic properties in a pilot rock cavern for underground LNG storage", Engineering Geology, Vol. 84, pp. 229-243.
- [8] Kovari, k., 1993, "Basic consideration on Storage of Compressed Natural Gas in Chambers", Rock Mech, Rock Engng, Vol. 27, pp. 1-27.
- [9] Liang, J., Lindblom, U., 1994, "Critical Pressure for Gas Storage in Unlined Rock Caverns", Vol. 4, pp. 377-381.

[۱۰] خدابنده، الف، ۱۳۷۹، گزارش زمین شناسی ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ اردبیل، سازمان زمین شناسی کشور.

[۱۱] قاسم پور، نادر و پناه بر، بهنام، ۱۳۸۸، تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی با استفاده از نرم افزار FLAC 3D، جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر.

[۱۲] رحیمی، ب.، شهریار، ک. و شریف زاده، م.، ۱۳۸۸، "برآورد تجربی پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای توده سنگ مسیر تونل شماره یک راه آهن قزوین-رشت"، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

[13] Sakurai, S., 1983, "Direct strain Evaluation Technique in construction of underground opening", In proc 22 U.S. symp, Rock Mech. Boston, pp. 278-282.

- (۱) مطالعات اولیه مکان یابی نشان می دهد منطقه ای که در ۵ کیلومتری جنوب غربی روستای الماس قرار دارد برای ایجاد مغار با آستر مناسب است.
- (۲) عمق مخزن ذخیره سازی گاز در صورت استفاده از نوع مخزن بدون آستر حداقل ۲۳۵ متر از سطح زمین و در صورت استفاده از مخزن با آستر این عمق حداقل ۸۱ متر از سطح زمین است.
- (۳) چون حجم ذخیره سازی پیشنهاد شده برای این طرح (۲۸۰۰۰ مترمکعب) مقدار کمی است، برای این طرح ایجاد یک مغار با ارتفاع ۱۵ و عرض ۱۲ متر (با توجه به جدول ۲) کفایت می کند.
- (۴) نتایج تحلیل عددی به کمک نرم افزار FLAC3D نشان می دهد که جابجایی اطراف مغار با آستر قبل و بعد از تزریق گاز به داخل مغار از جابجایی بحرانی کمتر است. بنابراین مغار پایدار خواهد بود.

۸- تشکر و قدردانی

از کارمندان شرکت گاز استان اردبیل به خصوص جناب آقای مهندس معز و جناب آقای حقیری که با اجرای این پروژه موافقت نمودند تشکر و قدردانی به عمل می آید.

۹- مراجع

- [1] Jongpradist, P., Kongkitkul W. & Tunsakul, J., 2009, "Investigation of failure behavior of rock mass around gas storage cavern with physical model test", Rock Mechanics, Fuenkajorn & Phien-wej (eds).
- [۲] دخانی، و.، فرزاد، ا.، ۱۳۸۸، "گسترش گاز طبیعی در قرن بیستم"، نشریه فنی تخصصی شرکت ملی نفت ایران.