بررسی ویژگی‌های مخازن زیرزمینی پوشش دار ذخیره‌سازی گاز

علی درخشانی[۱]، اسدا... حسومی[۲]
موسسه مهندسین مشاور ساحل، گروه سازه‌های زیرزمینی، تهران

چکیده

ملاحظات زیست محیطی، دیدگاه‌های استراتژیک و مسایل اقتصادی موجب شده است تا استفاده از مغارهای زیرزمینی برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی در کانون توجهات قرار گیرد. برای اقتصادی‌تر شدن به کارگیری این گونه مغارها، استفاده از مغارهای بدون پوشش برای ذخیره‌سازی در اولویت است. از آنجاییکه نشت از این نوع مخازن موجب آلودگی آبهای زیرزمینی و وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیر به محیط زیست خواهد شد، لذا این مغارها بطور مصنوعی یا طبیعی زیر تراز سطح ایستابی قرار می‌گیرند و در نتیجه فشار آب باعث جلوگیری از نشت مواد داخل مغار به بیرون می‌شود. اما همیشه شرایط برای بهره‌گیری از مخازن بدون پوشش ممکن و یا اقتصادی نیست. در این صورت لازم است مغار ذخیره‌سازی مجهز به پوشش نفوذناپذیر گردد. در این مقاله فناوری نوین ذخیره‌سازی گاز در مغار زیرزمینی پوشش‌دار مورد بررسی قرار گرفته و اولین پروژه اثبات تجربی و تجاری‌سازی اجراء شده در جهان معرفی می گردد.

واژه‌های کلیدی: *مغار ذخیره‌سازی پوشش‌دار، مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی، مخزن زیرزمینی تحت فشار، طراحی پوشش*

مقدمه

ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی در سازه‌های زیرزمینی به علت ایمنی بالا، تأثیرات سوء کمتر بر محیط زیست و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری پایین‌تر بعنوان جایگزینی مناسب برای مخازن سطحی روز به روز بیشتر شده و فناوری احداث و بهره‌برداری از این فضاها در حال توسعه است. در کشور ایران نیز به خصوص در چند سال گذشته مطالعات تحقیقاتی و امکان‌سنجی در این ارتباط آغاز شده است.

لزوم استفاده حداکثری از میادین مشترک گازی و نفتی با کشورهای همسایه بر کسی پوشیده نبوده و انتقال و ذخیره‌سازی این مواد درون کشور و نیز احداث مخازن استراتژیک (بمنظور استفاده در مواقع بحرانی و زمان‌های اوج مصرف)، پشتیبان و تأمین کننده انرژی کشور خواهد بود. بعلاوه افزایش قابلیت ذخیره‌سازی این مواد باعث ارتقاء و نقش موثر در بازارهای جهانی این محصولات خواهد شد.

مغارهای ذخیره‌سازی را می‌توان به دو صورت پوشش‌دار و بدون پوشش اجرا نمود. مغارهای بدون پوشش بدلیل حذف پوشش بتنی یا فلزی نفوذناپذیر، با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های ساخت، بسیار مورد توجه بوده و در سراسر دنیا بیشتر مغارهای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی بدلیل مذکور از نوع بدون پوشش هستند. برای جلوگیری از نشت مواد ذخیره شده در این نوع مغارها، از فشار آب ناشی از سطح ایستابی استفاده می‌شود. اما در بعضی مواقع با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه امکان اجرای مغار بصورت بدون پوشش وجود ندارد که در اینصورت باید از مغارهای پوشش‌دار استفاده شود.

طراحی این پوشش باید طوری باشد که علاوه بر تأمین پایداری طولانی مدت بتواند با ضریب ایمنی مناسب در شرایط مختلف از نشت مواد ذخیره شده جلوگیری نماید. در میان انواع مخازن ذخیره‌سازی پوشش‌دار، طراحی و ساخت مغارهای نگهداری گاز طبیعی تحت فشار زیاد در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به نوظهور بودن این فناوری بسیاری از جنبه‌های فنی در این خصوص محرمانه می‌باشد. ولیکن با وجود محدودیت‌های ذکر شده، در این تحقیق تلاش شده است تا معرفی مناسبی از ویژگی‌های پوشش مورد نیاز برای مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز طبیعی ارائه شده و مراحل اصلی تکامل این فناوری نوین در تحقیقات مهم پژوهشگران مورد بررسی قرار گیرد.

۱- عضو گروه سازه‌های زیرزمینی و استادیار مهندسی عمران دانشگاه شاهد
۲- مسئول بخش سازه گروه سازه‌های زیرزمینی، ۲۳۰۱۵۵۹۳، a.hasoomi@yahoo.com

مخازن زیرزمینی پوشش‌دار ذخیره‌سازی گاز:

تاریخچه توسعه

مفهوم مخزن زیرزمینی پوشش‌دار از اواسط دهه هشتاد میلادی در سوئد توسعه یافت. دلایل متنوعی برای ترجیح این مفهوم نسبت به گزینه‌های دیگر ذخیره‌سازی وجود داشت. مخازن بدون پوشش را تنها در شرایط ویژه زمین شناسی در جایی که مخازن تهی شده نفت وگاز، سفره آب زیرزمینی و مغار نمکی وجود داشته باشد، می‌توان احداث کرد. در این مخازن حضور فشار آب زیرزمینی در سنگ برای متعادل‌سازی فشار گاز لازم است. بطور مثال برای ساخت مخزن بدون پوشش گاز با فشار ۱۵ مگاپاسکال نیاز به احداث فضای بسیار بزرگی در عمق ۱۵۰۰ متری زمین خواهد بود. با توجه به مشکلات اشاره شده احداث مخازن پوشش‌دار در عمق نسبتاً کم مورد توجه قرار گرفته است.

در آن زمان نیاز به ذخیره‌سازی گاز متشکل از سه بخش بود [۱]:

ذخیره‌سازی استراتژیک: برای استفاده در شرایط بحرانی مانند جنگ

ایمنی گاز رسانی: ذخیره برای رفع نیازهای ضروری حین تعمیرات در هنگام قطع واردات/تولید

متعادل‌سازی بار: ذخیره بمنظور متعادل ساختن تغییرات در مصرف در زمان‌های مختلف سال با هدف صرفه اقتصادی

پس از پایان جنگ سرد عملاً از اهمیت ذخیره‌سازی استراتژیک کاسته شده و متعادل‌سازی بار به مهم‌ترین بخش از کل نیاز ذخیره‌سازی تبدیل شد.

تاریخچه توسعه فناوری مخزن زیرزمینی پوشش‌دار به طور خلاصه در شکل ۱ نمایش داده شده است. این مراحل به ترتیب عبارتند از:

- ایده‌های مفهومی پایه
- مطالعات مفهومی
- آزمایش‌های تجربی
- ارزیابی
- فناوری، اقتصاد، بازار
- پروژه اثبات تجربی
- تجاری‌سازی

توصیف کلی سیستم ذخیره‌سازی

مبانی سیستم مخزن زیرزمینی پوشش‌دار شامل دو بخش اصلی رو زمینی و زیر زمینی در شکل ۲ نمایش داده شده است. امکانات رو زمینی تا حدود زیادی مشابه دیگر مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی مانند مغارهای ذخیره‌سازی نمکی می‌باشد. این بخش شامل یک ایستگاه کمپرسور، تجهیزات گرمایش/ سرمایش، لوله‌کشی، شیرها، اندازه‌گیرها و سیستم کنترل است. در حقیقت نوآوری مربوط به قسمت‌های زیر زمینی مجموعه مغار زیرزمینی پوشش‌دار می‌باشد. این قسمت شامل چند بخش است: یک یا بیش از یک مغار ذخیره‌سازی، یک شفت قائم برای هر مغار و یک مجموعه از تونل‌ها که مغارها را به سطح زمین متصل می‌کنند. مغارهای ذخیره‌سازی به صورت استوانه‌های قائم با یک گنبد نیم کره در بالا و یک نیم کره صاف شده در پایین در سنگ حفر می‌شوند. مغارها در عمق حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری زیر سطح زمین جای می‌گیرند (شکل ۳).

حداکثر فشار مخزن در بازه ۱۵ تا ۳۰ مگاپاسکال است. قطر متداول مغارها ۳۵ تا ۴۰ متر و ارتفاع آنها ۶۰ تا ۱۰۰ متر می‌باشد. هر مغار ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۲ تا ۳۰ میلیون متر مکعب عادیِ گاز طبیعی را دارد [۲]. هر مقدار دلخواه از حجم ذخیره‌سازی با ساختن تعداد مناسبی مغار قابل دستیابی است. هر مغار با یک خط لوله گازِ عبور کرده از شفت قائم با سطح زمین مرتبط می‌شود. سیستم تونل‌ها برای حفر مغارها و برای دسترسی هنگام ساخت پوشش (فولادی و بتنی) ضروری است.

نکته اساسی در مخزن زیرزمینی پوشش‌دار گاز این است که بار فشار بالای گاز توسط توده سنگ اطراف تحمل می‌شود. پوشش تنها برای عایقِ نمودن کاملِ مغار استفاده شده و فقط بخش کوچکی از فشار گاز را دریافت می‌کند. به دلیل اینکه فشار گاز بیشتر از تنش‌های برجای سنگ است، در صورت نشت گاز توده سنگ نفوذپذیر بوده و نمی‌تواند جلوی فرار گاز را بگیرد. بنابراین حفظ یکپارچگی پوشش ضروری خواهد بود.

مخزن زیر زمینی پوشش‌دار یک سیستم کاملاً بسته است و گاز همیشه در مغار و لوله‌ها محاط شده است. سیستم دربرگیرنده سه خطر اصلی است: انرژی مکانیکی (گاز فشرده)، انرژی شیمیایی (قابلیت اشتعال شدید گاز) و مواد سمی (ایجاد خفگی ناشی از گاز در محیط بسته). بنابراین طراحی باید طوری باشد که اجازه خروج به گاز داده نشود.

دیواره مغار

عملکرد دیواره مغار (شکل ۴) مبتنی بر اندرکنش عناصر تشکیل‌دهنده آن مطابق زیر می‌باشد [۳ و ۴]:

۱. *پوشش فولادی* تنها نقش عایق‌بندی گاز را دارد و فشاری را جذب نکرده و می‌تواند ترک‌های کوچک را ببندد.
۲. *لایه لغزنده* بین پوشش فولادی و بتنی قرار می‌گیرد و کاربرد اصلی آن کاهش اصطکاک است. کاربرد ثانویه آن حفاظت از خوردگی فولاد و آب‌بندی سطح بتن در صورت نشت گاز است.
۳. *پوشش بتنی* یک لایه میانی است و بین سنگ و پوشش فولادی قرار می‌گیرد. کاربری اصلی آن انتقال فشار گاز مغار به سنگ و توزیع یکنواخت تغییرشکل‌ها است. این پوشش بطور همزمان بعنوان یک سطح صاف برای پوشش فولادی نیز عمل می‌کند.
۴. یک لایه *مش* برای توزیع کرنش‌ها و کنترل ترک‌های کوچک در پوشش بتنی قرار داده می‌شود.
۵. یک لایه *شاتکریت کم مقاومت نفوذپذیر* روی سنگ قرار می‌گیرد. این لایه برای حفاظت سیستم زهکشی و بهبود ارتباط هیدرولیکی با سیستم زهکشی می‌باشد.
۶. *سیستم زهکشی* مرکب از لوله‌های مشبک ثابت شده به صورت مورب است. سیستم زهکشی اجازه می‌دهد که فشار مقابل پوشش فولادی هنگام پایین بودن فشار گاز در مغار کاهش یابد و به این ترتیب از خطر کمانش در پوشش فولادی جلوگیری شود. همچنین این مجموعه یک سیستم ایمنی مهم حین بهره‌برداری بمنظور بررسی عایق‌بندی گاز است.
۷. *نهایتاً توده سنگ* اطراف، بار فشار گاز روی دیواره را تحمل می‌کند.

مخازن با بتن مسلح به ضخامت تقریبی ۱ متر و پوشش نازک فولادی ۱۲ تا ۱۵ میلیمتری پوشانده می شوند. برای کاهش کرنش‌های محلی در پوشش فولادی لایه لغزنده به ضخامت تقریباً ۵ میلیمتر بین بتن و فولاد اجرا می‌گردد.

مودهای خرابی عمومی

خرابی عموماً بعنوان نشت قابل توجه در اندازه‌ای که ذخیره‌سازی دیگر از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر یا ایمن نباشد، تعریف می‌گردد. این تعریف همه اندازه‌های نشت را از مقادیر کوچک گرفته تا میزانی که موجب فرو ریزش فاجعه بار مخزن است، پوشش می‌دهد.

مودهای خرابی عمومی ذیل در مغار زیرزمینی پوشش‌دار قابل شناسایی است:

۱. خرابی کلی توده سنگ.
۲. خرابی پوشش فولادی (پارگی) ایجاد شده توسط تغییر شکل اولیه و بسیار بزرگ توده سنگ.
۳. خرابی پوشش فولادی (نشت) ایجاد شده توسط خستگی با سیکل کم.
۴. خرابی محلی پوشش فولادی (نشت) ایجاد شده توسط ضعف محلی در سنگ، بتن و جوش و نیز توسط خوردگی و... .

داده‌های لازم برای طراحی

پارامترهای بهره‌برداری یک مغار زیرزمینی پوشش‌دار ذخیره‌سازی گاز که طراحی پوشش مغار را تحت تأثیر قرار می‌دهند، توسط موارد زیر قابل توضیح هستند [۵]:

- تغییرات فشار گاز داخلی و دمای گاز ذخیره شده با زمان:
  - بیشینه و کمینه فشار گاز طی بهره‌برداری عادی.
  - فشار طراحی (بیشینه مجاز فشار گاز).
  - کمینه مجاز فشار گاز (حالت حدی).
  - نرخ تبادل (تعداد سیکل‌ها در سال).
  - نرخ‌های تزریق و استخراج.
  - تغییرات دما از بهره‌برداری مخزن.
- ترکیب گاز ذخیره شده، شامل عناصر ردیاب و محتوای آب.
- فشار خارجی آب زیرزمینی (برای مودهای بهره‌برداری مختلف سیستم زهکشی) و محیط شیمیایی خارجی.
- عمر طراحی.

در واقع همه موارد فوق باید برای هر پروژه به طور خاص تعریف شوند.

برای اقتصادی شدن پروژه، فشار مخزن باید بطور نسبی بالا باشد. فشار بیشینه مخزن با توجه به جنس ماده پوشش انتخاب شده (ظرفیت کرنش و مشخصات خستگی) و شرایط زمین‌شناسی تعیین می‌گردد [۲]. تغییرشکل‌ها نباید از ظرفیت کرنش و خستگی ماده پوشش تجاوز کنند. با لحاظ کردن این موارد یک حلقه طراحی برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی در ارتباط با یکدیگر و تحت شرایط زمین‌شناسی ارائه شده است (شکل ۵).

برخی محققین با توجه به پیچیدگی مسأله اندرکنش مواد مختلف در پوشش و عدم اطمینان ذاتی در مشخصات توده سنگ، رویکرد احتمالاتی را بعنوان جایگزین روش‌های متعارف (ضریب ایمنی) مطرح نموده‌اند [۶].

ویژگی‌های مواد

برای بتن استفاده شده در پوشش، حد مهم، مقاومت فشاری است. به دست آوردن بتنی با مقاومت فشاری بالاتر از سطح

بار (با حاشیه‌ای بالاتر از بیشینه فشار گاز) امکان‌پذیر است. مقاومت کششی خاصی برای بتن مدنظر نبوده و ترک‌خوردگی با توجه به انبساط کلی مغار اجتناب‌ناپذیر است.

در مورد لایه لغزنده، مقاومت برشی کمتر بهتر است. البته باید توجه نمود این مقاومت با کاهش دما افزایش می‌یابد.

پوشش فولادی مرکب از صفحات فولادی و جوش‌های بین آنها است. با در نظر گرفتن بارهای روی دیوار مغار در میان ویژگی‌های اصلی فولاد عملاً تنها مشخصات مربوط به خستگی عاملی مؤثر است. بار خستگی (بازه کرنش و تعداد سیکل‌ها) باید کمتر از ظرفیت خستگی باشد.

معرفی اولین پروژه اثبات تجربی و تجاری‌سازی

در تاریخچه توسعه فناوری مخازن زیرزمینی پوشش‌دار ذخیره‌سازی گاز پس از طی مراحل اولیه، مفاهیم در یک پروژه آزمون تجربی در سوئد آزمایش شد (شکل ۳). در آن پروژه مغار توانست با موفقیت فشار بالای ۵۰ مگاپاسکال را تحمل کند. سپس برای اثبات و نمایش تجربی، ساخت مخزن زیرزمینی پوشش‌دار در اسکالن (Skallen) واقع در جنوب غربی سوئد شروع شده و تا سال ۲۰۰۲ تکمیل شد. سپس در سال ۲۰۰۴ بهره‌برداری تجاری از مجموعه آغاز شد.

این مجموعه شامل امکانات رو زمینی و یک مغار زیرزمینی ۴۰،۰۰۰ متر مکعبی و یک خط لوله به طول ۳/۲ کیلومتر برای ارتباط با شبکه گاز است. همانطورکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مغار استوانه‌ای است که بالای آن کره‌ای و پایین آن تابه مانند است. قطر آن ۳۶ متر و ارتفاعش ۵۲ متر بوده و بالای آن در عمق ۱۱۵ متری از سطح زمین قرار گرفته است.

شکل مخزن برای پروژه اثبات تجربی پس از مطالعه پنج شکل پیشنهاد شد. هدف از مطالعه بررسی سطح کرنش در اشکال مختلف مخزن بود. همچنین قابلیت ساخت و نیاز های بهره برداری مورد بحث قرار گرفت. در اصل شکل مغار برای به دست آوردن یک توزیع یکنواخت کرنش در پوشش حین اعمال فشار انتخاب شده است. علاوه بر این هندسه گنبد فوایدی نیز برای پایداری مخزن دارد. سقف گنبدی و کف دایروی به منظور بیشینه کردن پایداری حفاری و بهینه‌سازی تغییرشکل پوشش مخزن در حین بهره‌برداری طراحی شده است [۶،۲ و۷].

تونل دسترسی دارای مقطع عرضی به مساحت ۲۸ متر مربع و شیبی با نسبت ۱ به ۷ به سمت پایین است. این تونل شامل چهار بخش اصلی است: یک تونل ارتباطی، یک تونل بالای مخزن برای دسترسی به شفت، یک تونل در پایین مغار و در پای استوانه و یک تونل در بالای مغار در پای گنبد کروی. شفتی به طول ۹۰ متر و قطر ۱ متر مخزن گاز را به امکانات روزمینی متصل می‌کند [۷].

مراحل اجرای پروژه اثبات تجربی

الف- تونل‌های دسترسی بهمراه پوشش اولیهٔ شاتکریت و بولت حفر شدند (شکل ۷).

ب- شفت به طول ۱۶۰ متر از سطح زمین تا کف مخزن حفر شد (شکل ۷).

پ- دو تونل مارپیچی شیب‌دار از تراز ۸+ به راست و چپ به سمت تاج مخزن حفاری شدند. پس از حفاری طاق، قسمت کف گنبد در دو مرحله به سمت پایین حفر شد. بقیه قسمت‌های مخزن به ترتیب نشان داده شده در شکل حفاری گردیدند. در انتها حفاری کف مخزن نیز با تعداد زیادی چال بصورت زاویه‌دار انجام گرفت.

ت- حفاظت سنگ اطراف از طریق شاتکریت مسلح با فیبر و بولت در بخش‌های مختلف مخزن انجام گرفت.

شایان ذکر است که علاوه بر پروژه فوق‌الذکر در بعضی کشورهای دیگر نیز فعالیت‌های مشابهی انجام گرفته است. از آن جمله می‌توان به پروژه "مخزن گاز پیشرفته" (ANGAS) اشاره نمود که به هدف توسعه سیستم ذخیره‌سازی گاز در کشور ژاپن در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ انجام شد [۸].

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

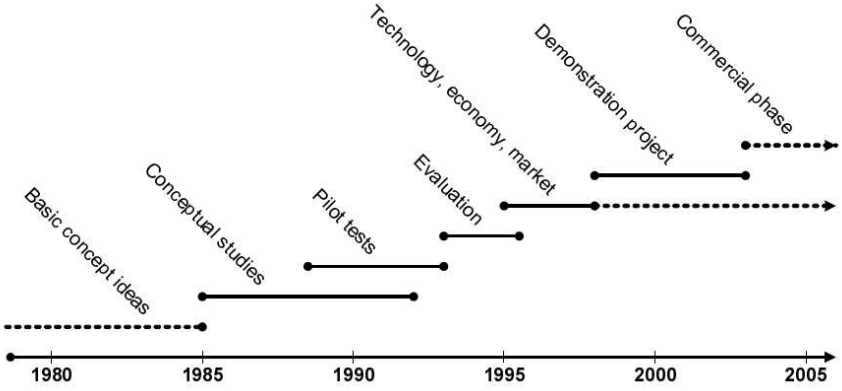
در این مقاله خلاصه‌ای از اطلاعاتی موجود از گزارش‌های فنی مربوط به کارهایی که، پیشتر در مورد طراحی پوشش مخازن زیرزمینی گاز انجام شده، ارائه شد. در نوشتار حاضر جهت معرفی فناوری نوین ذخیره‌سازی گاز در مغار زیرزمینی پوشش‌دار مطالبی به اختصار پیرامون تاریخچه توسعه، توصیف کلی سیستم ذخیره‌سازی، پوشش مغار، مودهای خرابی، داده‌های مورد نیاز برای طراحی، ویژگی‌های مواد و معرفی اولین پروژه اثبات تجربی و تجاری‌سازی عنوان شد.

مجموعاً در حال حاضر شناخت کافی از رفتار مکانیکی پوشش مغار برای طراحی بدست آمده است و تحقیقات در این زمینه در راستای ساده‌سازی و بهینه‌سازی روش‌های طراحی و ساخت قابل ادامه است. با توجه به وجود منابع غنی گاز در کشور ایران، امید است پژوهشگران، مهندسین و فعالان صنعت کشور با شتاب هر چه بیشتر گام‌های لازم را در جهت بومی‌سازی این فناوری استراتژیک بر دارند.

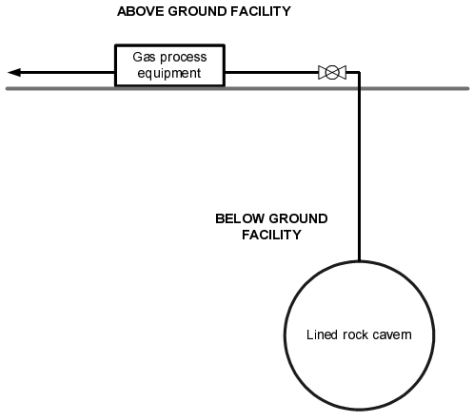
مراجع

1. Tengborg P., "Storage of natural gas in lined rock caverns – Studies for a future project in southern Sweden", Proc. of conference Storage of gasses in rock caverns, Balkema, Rotterdam, 1989.
2. U.S. Department of Energy, "Commercial potential of natural gas – Storage in lined rock caverns", 1999. CD "Advanced Gas Storage Concepts – Technologies for the Future", 2000.
3. Johansson J., "Cavern Wall – Demo Plant Design. LRC Demo Project", Confidential Project Report, 2000.
4. Johansson J., "Installation for storing of natural gas", United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2001/002969 A1, 2001.
5. Rosé M., "Basic design data", LRC Demo Project, Confidential Project Report, 1998.
6. Johansson, J., "High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns – Cavern Wall Design Principles", Licentiate Thesis. Div. of Soil and Rock Mech., Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.
7. Glamheden R. and Curtis P., "Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas", Tunnelling and Underground Space Technology, 21, pp. 56–67, 2006.
8. OKUNO T., WAKABAYASHI N., NIIMI K., KURIHARA Y. & IWANO M., "Advanced natural gas storage system and verification tests of lined rock cavern - ANGAS project in Japan -", Int. Journal of JCRM, Vol. 5, No. 2, pp. 95-102, 2009.

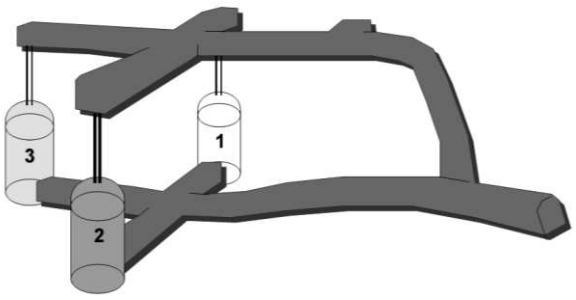
شکل‌ها و نمودارها



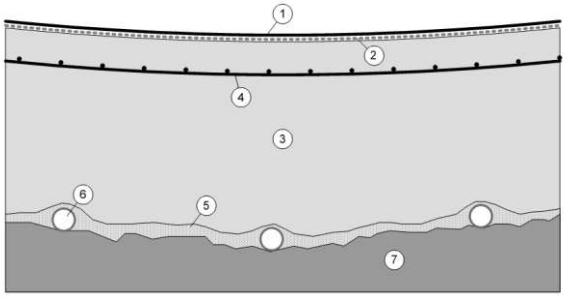
شکل۱- تاریخچه توسعه فناوری مغار زیرزمینی پوشش‌دار ذخیره‌سازی



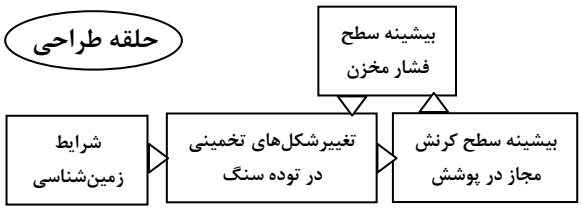
شکل۲- مبانی سیستم ذخیره‌سازی مغار زیرزمینی پوشش‌دار



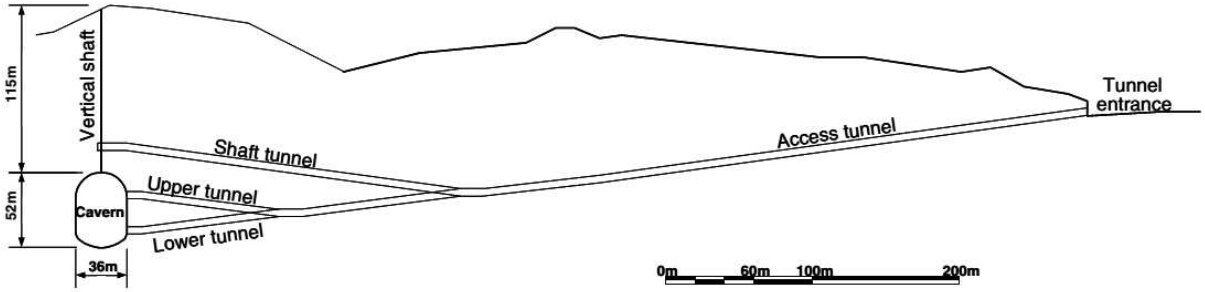
شکل۳- طراحی مغار زیرزمینی پوشش‌دار و تونل‌های دسترسی مربوط به پروژه آزمون تجربی مخزن گاز در کشور سوئد



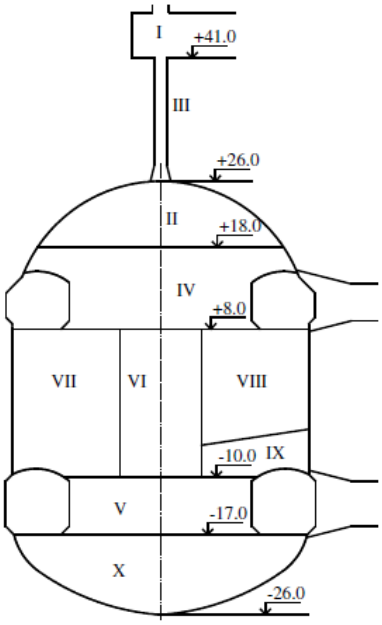
شکل۴- اجزاء اصلی دیواره مغار زیرزمینی پوشش‌دار



شکل۵- حلقه طراحی



شکل۶- طرح مغار ذخیره‌سازی و تونل‌های دسترسی در پروژه اثبات / نمایش تجربی در کشور سوئد



شکل۷- مقطع قائم مخزن به همراه مراحل و سطوح حفاری