



بررسی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در گندهای نمکی

سازگراسی* علی وطنی، عباس بحرودی، مریم بهرامی تهنیش‌زاده، دانشگاه تهران

چکیده

به منظور ارتقای امنیت عرضه گاز طبیعی، از ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی استفاده می‌شود. این نوع ذخیره‌سازی در مخازن گازی یا نفتی تخلیه‌شده، سفره‌های آب زیرزمینی، مغارهای نمکی، مغارهای سنگی یا معادن مترو که انجام می‌شود. ذخیره‌سازی گاز در سازندهای نمکی از سال ۱۹۶۱ انجام شده و این روش، جایگاهی ویژه در جهان دارد. طی سال‌های اخیر، مطالعه و اجرای طرح ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی در ایران نیز آغاز شده است. تخلخل و نفوذپذیری ناچیز سازندهای نمکی شرایط مناسبی را برای ذخیره‌سازی گاز فراهم می‌کند. عملکرد بهینه مغارهای نمکی در درازمدت مستلزم طراحی صحیح و ساخت دقیق آن‌هاست. در این مقاله، عوامل مؤثر در طراحی مغارهای نمکی و مراحل شبیه‌سازی آن بررسی شده است.

واژگان کلیدی: ذخیره‌سازی، گاز طبیعی، آمار جهانی، مغار نمکی، طراحی

مقدمه

گاز طبیعی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حامل‌های انرژی، نقشی کلیدی را در تأمین انرژی بخش‌های مختلف کشور دارد. به‌دلایل مختلف از جمله نوسانات دمای فصلی و بروز بحران، عرضه و تقاضای گاز طبیعی در تمام فصول سال برابر نیست. از این رو، ذخیره‌سازی گاز طبیعی به‌منظور تزریق به شبکه گازرسانی در مواقع خاص، ضروری است. در ظرفیت‌های کم تا متوسط، ذخیره‌سازی گاز به‌صورت فشرده‌سازی گاز طبیعی (CNG) یا گاز طبیعی مایع (LNG) انجام می‌شود. برخلاف مخازن روزمینی، حجم عظیمی از گاز طبیعی را می‌توان با فشار بالا در زیر زمین ذخیره کرد. برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز، مساحت کمتری از زمین مورد نیاز بوده و از لحاظ پدافندی نیز این روش برتری دارد. بنابراین، در ظرفیت‌های بالا،

ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ایمن‌ترین و اقتصادی‌ترین روش است.

اگر ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به‌طور مناسب انجام شود، می‌توان نیازهای فصلی گاز طبیعی را تأمین نموده و از کمبود گاز در زمان اوج مصرف جلوگیری کرد. در فصول سرد سال، برای جلوگیری از کمبود گاز در بخش خانگی، معمولاً گاز مورد نیاز نیروگاه‌ها با سوخت‌های دیگر جایگزین می‌شود. با در اختیار داشتن ذخیره مناسب گاز، می‌توان سوخت پاک مورد نیاز نیروگاه‌ها و صنایع را در تمام فصول تأمین نمود.

معمولاً این نوع ذخیره‌سازی گاز طبیعی، در مخازن گازی یا نفتی تخلیه‌شده، سفره‌های آب زیرزمینی، مغارهای نمکی، مغارهای سنگی یا معادن مترو که انجام می‌شود. مخازنی که به‌منظور ذخیره‌سازی گاز انتخاب می‌شوند، باید در نزدیکی خطوط سراسری انتقال گاز و مراکز نقل

مصرف قرار داشته باشند.

ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مغارهای نمکی در مقایسه با سایر روش‌های ذخیره‌سازی، روش مناسبی است. امروزه این روش به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های ذخیره‌سازی در جهان مورد توجه است. در این مقاله، ویژگی‌های این روش ذخیره‌سازی و چگونگی طراحی و ساخت آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۱- روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

۱-۱- ذخیره‌سازی در مخازن گازی یا نفتی تخلیه‌شده

همان‌طور که گفته شد، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مخازن گازی یا نفتی تخلیه‌شده، متداول‌ترین و اقتصادی‌ترین روش ذخیره‌سازی است. این مخازن، به‌طور طبیعی

* نویسنده‌دار مکاتبات (S-Kasebi@ut.ac.ir)



قابلیت نگهداری مواد هیدروکربنی را داشته و امکان انتقال این مواد از عمق زمین به سطح وجود دارد. بنابراین، می‌تواند برای ذخیره‌سازی گاز مورد استفاده قرار گیرد. اولین بار در سال ۱۹۱۵، میدان گازی تخلیه شده‌ای در کانادا به مخزن ذخیره‌سازی گاز تبدیل شد. تا سال ۲۰۰۹ میلادی، تعداد تأسیسات ذخیره‌سازی جهان در مخازن گازی تخلیه شده ۴۲۸ و در مخازن نفتی تخلیه شده ۳۹ مورد بوده است [۱]. مخازن گازی یا نفتی تخلیه شده، معمولاً دارای تخلخل و تراوایی مناسب هستند. با این حال، باید اطمینان یافت که مخزن، قابلیت تزریق و برداشت مقادیر زیاد گاز در زمانی کوتاه را داشته و گاز ذخیره شده، از چاه‌ها و پوش سنگ نشت نکند [۲]. اغلب، این مخازن دارای تعدادی چاه و تأسیسات سرچاهی هستند که پس از تعمیر می‌توانند برای تزریق و برداشت گاز مورد استفاده قرار گیرند. مزیت دیگر این روش این است که مطالعات زمین‌شناسی منطقه قبلاً انجام شده است. اما قدیمی بودن چاه‌ها و تأسیسات سرچاهی، احتمال نشت گاز را افزایش می‌دهد. تزریق گاز در فصول گرم و برداشت آن از این مخازن معمولاً در فصول سرد انجام می‌شود. درصد گاز پایه حدود ۵۰ درصد است [۳]. گاز پایه حداقل حجمی از گاز است که برای تأمین فشار داخلی به صورت دائم در مخزن باقی می‌ماند.

۱-۲- ذخیره‌سازی در سفره‌های آب زیرزمینی

سفره‌های آب زیرزمینی در صورتی که دارای فضایی با تخلخل و تراوایی کافی، پوش سنگ مناسب و تاقدیسی با بستگی کافی باشند، می‌توانند به عنوان مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی مورد استفاده قرار گیرند. دوباره باید ضخامت کافی داشته باشد تا بتوان گاز را با فشار بالا ذخیره کرد. وجود آب باعث محبوس شدن گاز و مانع از فرار آن می‌شود [۲]. در سال ۱۹۴۶ اولین سفره آب زیرزمینی در ایالت کنتاکی آمریکا به مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی تبدیل شد. تا سال ۲۰۰۹ میلادی، تعداد سفره‌های آب زیرزمینی که برای ذخیره‌سازی گاز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ۸۶ مورد بوده

است [۱].

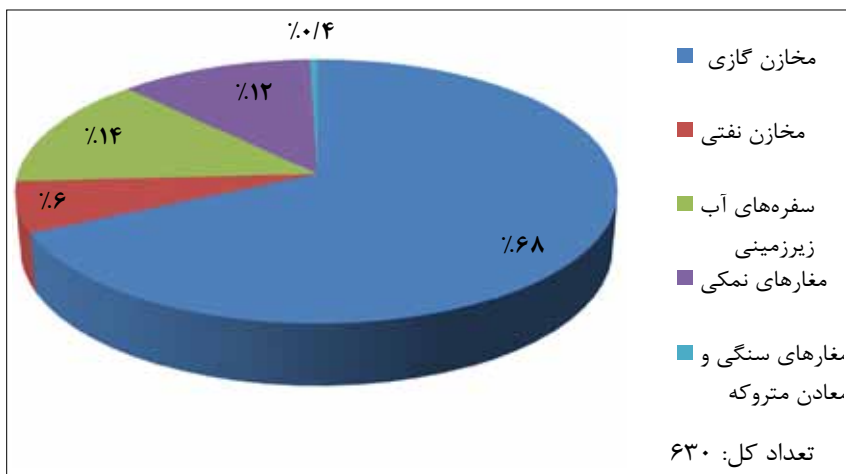
سفره‌های آب زیرزمینی، قابلیت ذخیره حجم بالای گاز را داشته و معمولاً به محل‌های مصرف نهایی نزدیک هستند. اما طولانی بودن زمان تبدیل یک سفره‌ی آب زیرزمینی به مخزن ذخیره‌سازی گاز، هزینه‌ی بالای شناسایی سفره‌ی آب زیرزمینی مناسب و انجام مطالعات زمین‌شناسی آن، تولید مقداری آب همراه با گاز و بالا بودن درصد گاز پایه، استفاده از این روش را محدود می‌سازد. در این نوع مخازن درصد گاز پایه حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد است [۳].

۱-۳- ذخیره‌سازی در مغارهای نمکی

ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی روش دیگری است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، پس از رسیدن چاه به عمق مورد نظر، آب شیرین به فضای نمکی تزریق شده و پس از حل کردن نمک و ایجاد فضای خالی، آب نمک تخلیه می‌شود. وقتی مغار به ابعاد مورد نظر رسید، گاز، تزریق شده و آب نمک باقی مانده خارج می‌شود. مغار نمکی را می‌توان در لایه‌های نمکی یا گنبد‌های نمکی ایجاد کرد. ضخامت لایه‌های نمکی، کمتر از گنبد‌های نمکی است. بنابراین، سقف مغار ایجاد شده در لایه‌های نمکی بیشتر در معرض تنش و خطر ریزش قرار دارد. نمک در گنبد‌های نمکی، خلوص

بیشتری دارد، اما نمک موجود در لایه‌های نمکی حاوی مواد انحلال‌ناپذیر مانند شیل و انیدریت است. اگر مقدار این ناخالصی‌ها کم باشد، به صورت ذرات حل نشده در ته مغار باقی می‌ماند و قسمتی از فضای مغار را اشغال می‌کند. اما اگر مقدار ناخالصی‌ها زیاد باشد، در فرایند انحلال نمک، اختلال ایجاد می‌کند. از این رو، ذخیره‌سازی گاز در گنبد‌های نمکی نسبت به لایه‌های نمکی از نظر فنی و اقتصادی ارجحیت دارد [۴]. نخستین مغار نمکی ذخیره‌سازی گاز طبیعی در سال ۱۹۶۱ در ایالت میشیگان آمریکا بهره‌برداری شد. تا سال ۲۰۰۹ میلادی تعداد تأسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی ۷۴ مورد بوده است [۱].

خصوصیات ویژه‌ی نمک، سازندهای نمکی را برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی ایده‌آل می‌سازد. تخلخل و نفوذپذیری نمک در برابر گاز، نزدیک به صفر است، بنابراین از نشت گاز جلوگیری می‌کند [۴]. مغارهای نمکی قابلیت چندین بار تزریق و برداشت گاز در سال را دارند. عملیات تزریق و برداشت را می‌توان از طریق یک چاه انجام داد و امکان برداشت گاز با دبی زیاد وجود دارد. زمان آماده‌سازی مغار نمکی نسبت به روش‌های دیگر کوتاه‌تر است. احتمال نشت گاز بسیار پایین است و مقدار گاز پایه کم و در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد است [۳]. هزینه‌بر بودن فرایند شست‌وشوی نمک و دفع شورابه‌ی حاصل و مشکلات زیست‌محیطی



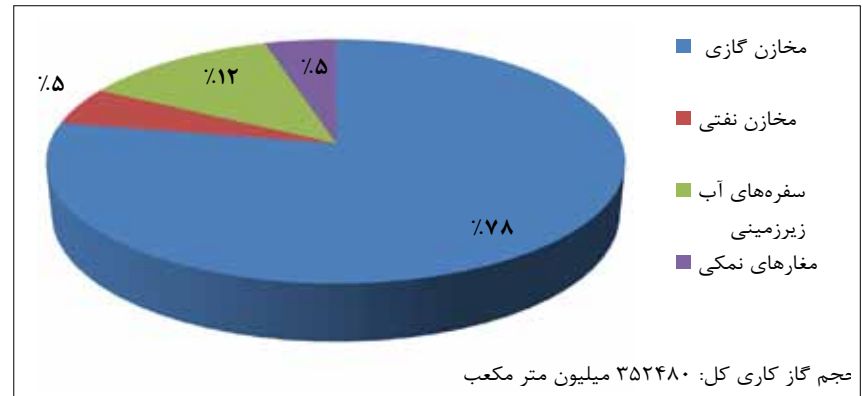
۱ | تعداد تأسیسات ذخیره‌سازی موجود در جهان تا سال ۲۰۰۹ [۱]

دفع شورابه مهم‌ترین اشکال این روش است.

۲- ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مغارهای نمکی در جهان

تأسیسات ذخیره‌سازی در مخازن گازی به لحاظ تعداد در رتبه اول است. پس از آن،

سفره‌های آب زیرزمینی، مغارهای نمکی، مخازن نفتی، مغارهای سنگی و معادن متروکه قرار دارند. مغارهای سنگی بیشتر برای ذخیره‌سازی نفت و فرآورده‌های نفتی و گازی مایع کاربرد دارند. در شکل ۱- تعداد تأسیسات ذخیره‌سازی موجود در جهان تا سال ۲۰۰۹



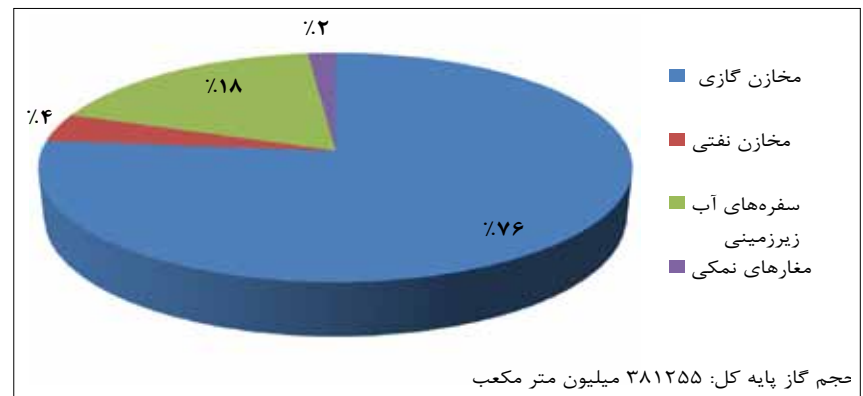
شکل ۲ | حجم گاز کاری تأسیسات ذخیره‌سازی موجود در جهان تا سال ۲۰۰۹ [۱]

نشان داده شده است. شکل‌های ۲- و ۳- حجم گاز کاری و پایه موجود در تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز را نشان می‌دهد. سفره‌های آب زیرزمینی ۱۲ درصد حجم گاز کاری را در خود جا داده‌اند. در حالی که به ۱۸ درصد گاز پایه نیاز دارند. بالا بودن میزان گاز پایه از مهم‌ترین دلایلی است که استفاده از این روش را محدود می‌کند. مغارهای نمکی ۵ درصد گاز کاری را ذخیره کرده‌اند، اما تنها به ۲ درصد گاز پایه نیاز دارند. مقایسه این دو شکل، پایین بودن درصد گاز پایه در مغارهای نمکی را به روشنی نشان می‌دهد.

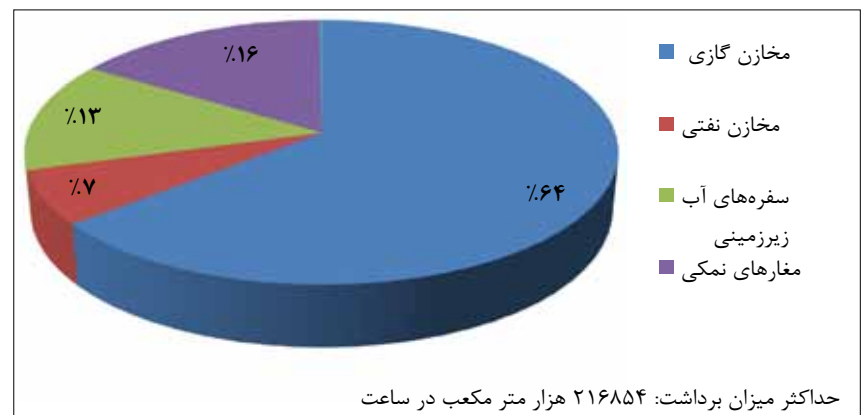
شکل ۴- حداکثر میزان برداشت گاز از تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی را نشان می‌دهد. مقایسه این شکل و شکل‌های ۲- و ۳- قابلیت برداشت بالای گاز از مغارهای نمکی را آشکار می‌کند.

گرچه تعداد اندکی از کشورها از روش ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در مغارهای نمکی بهره می‌گیرند، اما استفاده از این روش در جهان رو به افزایش است. آلمان در زمینه استفاده از این روش پیشگام بوده و ۳۹ درصد حجم گاز کاری تأسیسات ذخیره‌سازی این کشور در مغارهای نمکی ذخیره شده است. آمریکا پس از آلمان بیشترین تعداد تأسیسات ذخیره‌سازی در مغارهای نمکی را داراست [۱، ۵].

تا سال ۲۰۰۹، ۵ درصد حجم گاز کاری کل تأسیسات ذخیره‌سازی جهان در مغارهای نمکی ذخیره شده بود. در حالی که در سال ۲۰۰۶، سهم گاز کاری ذخیره شده در مغارهای نمکی ۹/۳ درصد بوده است. این آمار گرایش بیشتر کشورها به این روش ذخیره‌سازی را نشان می‌دهد. میزان استفاده از این روش در مناطق مختلف جهان متفاوت بوده و به ساختارهای زمین‌شناسی خاص هر منطقه و زیرساخت‌های صنعت نفت آن‌ها وابسته است. برای مثال، تا سال ۲۰۰۹، ۶۸ درصد حجم گاز کاری تأسیسات ذخیره‌سازی اروپا در مخازن گازی، ۱۸ درصد در آبخوان‌ها، ۱۲ درصد در مغارهای نمکی و تنها ۱ درصد در مخازن نفتی تخلیه شده ذخیره شده است [۱، ۶].



شکل ۳ | حجم گاز پایه تأسیسات ذخیره‌سازی موجود در جهان تا سال ۲۰۰۹ [۱]



شکل ۴ | حداکثر میزان برداشت تأسیسات ذخیره‌سازی موجود در جهان تا سال ۲۰۰۹ [۱]



۱-۲- ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مغارهای نمکی در ایران

گنبد نمکی نصرآباد کاشان با ابعاد $10 \times 5 \times 3/5$ کیلومتر، در حوالی کیلومتر ۵۰ اتوبان قم-کاشان و در منطقه نصرآباد کاشان واقع است. بر اساس مطالعات انجام شده، قابلیت ذخیره‌سازی در این گنبد نمکی تایید شده است [۷]. طبق مطالعات اولیه انجام شده توسط شرکت ذخیره‌سازی گاز طبیعی، این گنبد نمکی ظرفیت ذخیره ۳ تا ۴ میلیارد متر مکعب گاز را دارا بوده و برنامه‌ریزی برای تبدیل این میدان به مخزن ذخیره‌سازی گاز انجام شده است. انجام مطالعات تکمیلی زمین‌شناسی، عملیات گرانی‌سنجی و MT،

برنامه‌ریزی به‌منظور انجام عملیات لرزه‌نگاری برای شناسایی دقیق ابعاد و هندسه گنبد نمکی و مشخص نمودن محل مناسب برای حفر چاه اکتشافی در حال انجام است. به‌منظور تأمین منبع آب مورد نیاز برای شست‌وشوی نمک، مطالعاتی در منطقه انجام شده است. استفاده از فاضلاب تصفیه شده شهر کاشان می‌تواند گزینه مناسبی برای این منظور باشد.

۳- شناسایی و انتخاب گنبد یا لایه نمکی

به‌منظور شناسایی و انتخاب گنبد یا لایه نمکی مناسب برای ذخیره‌سازی، معیارهایی باید در نظر گرفته شوند. مهم‌ترین فاکتورها عبارتند از:

- دیاپیرسم نمکی: مراحل دیاپیرسم، شیب و ارتفاع گنبدها
- شرایط ساختاری زیرسطحی نمک: ضخامت و عمق نمک
- تکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه: میزان لرزه‌خیزی، گسل‌های موجود
- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سازند نمک: میزان خلوص و همگنی، میان‌لایه‌های غیرنمکی، نفوذپذیری و تخلخل
- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی: آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی
- ملاحظات زیست‌محیطی: مکان احداث سایت ذخیره‌سازی گاز، محل و روش دفع شورا به
- ملاحظات اقتصادی و اجتماعی: نزدیکی به مناطق پُر مصرف (شهرهای پرجمعیت، مراکز صنعتی)، نزدیکی به خطوط لوله انتقال گاز و راه‌های دسترسی، وجود نمک‌های معدنی (پتاس) [۸]

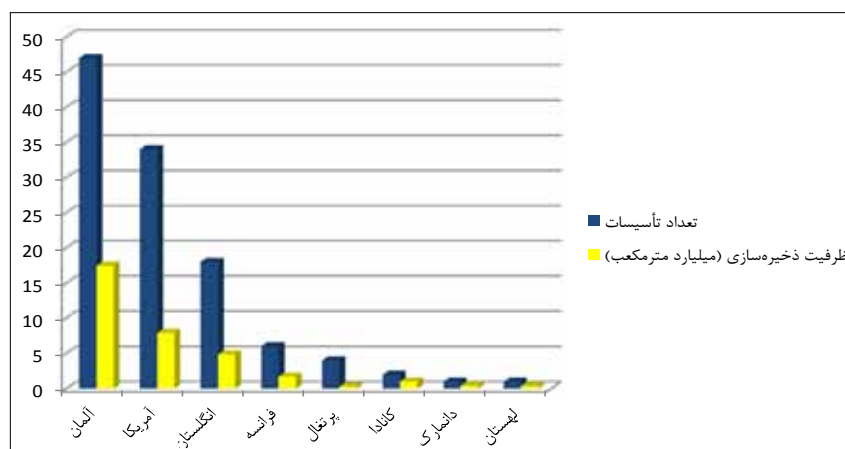
۴- ایجاد مغار نمکی

ساخت مغار نمکی با معدن کاری انحلالی و به دو روش انجام می‌شود:

- گردش مستقیم: در این روش، آب از لوله‌ی میانی چاه تزریق شده و آب‌نمک از فضای حلقوی بین لوله‌ی میانی و لوله‌ی خارجی، بیرون فرستاده می‌شود. (شکل ۶-الف)
- گردش معکوس: در این روش، آب از فضای حلقوی بین لوله‌ی میانی و لوله‌ی خارجی تزریق شده و آب‌نمک از لوله‌ی میانی، خارج می‌شود. (شکل ۶-ب)

میزان انحلال در اطراف محل ورود آب بیشتر است. بنابراین، برای ایجاد فضایی با شکل منظم معمولاً از هر دو روش به صورت متناوب استفاده می‌شود. با تغییر دادن تدریجی عمق لوله‌ها نیز می‌توان شکل مغار را کنترل کرد. با اندازه‌گیری غلظت نمک در آب ورودی و خروجی و دبی آب می‌توان حجم مغار را محاسبه کرد. برای اطلاع از شکل مغار از برداشته‌های صوتی استفاده می‌شود. وزن مخصوص آب تازه کمتر از آب‌نمک است، به همین دلیل، تمایل بیشتری به انحلال سقف

نام کشور	تعداد تأسیسات ذخیره‌سازی در مغارهای نمکی	ظرفیت ذخیره‌سازی (میلیون متر مکعب)
آلمان	۴۷	۱۷۴۵۵
آمریکا	۳۴	۷۹۰۵
انگلستان	۱۸	۴۸۶۰
فرانسه	۶	۱۷۱۶
پرتغال	۴	۳۰۱
کانادا	۲	۱۰۱۹
دانمارک	۱	۴۲۰
لهستان	۱	۳۶۸



۵- تعداد تأسیسات و ظرفیت ذخیره‌سازی گاز در مغارهای نمکی موجود و برنامه‌ریزی‌شده در جهان [۵]

مغار دارد. برای اطمینان از استحکام مغار و جلوگیری از گسترش رو به بالا، سقف با پوششی از هیدروکربن محافظت می‌شود [۹ و ۱۰]. برای این منظور، موادی مانند گاز طبیعی، گاز نیتروژن، پروپان و گازوئیل که از آب سبک‌تر هستند و نمک را حل نمی‌کنند، داخل مغار، تزریق شده و از تماس مستقیم آب با سقف مغار جلوگیری می‌کنند. حداقل حجم آب مورد نیاز برای شست‌وشوی نمک، ۸ برابر حجم مغار ایجاد شده است. از این رو، تأمین آب مورد نیاز و یافتن روشی اقتصادی و به‌لحاظ زیست‌محیطی ایمن برای دفع یا فرآوری شورابه تولیدی، از اهمیت زیادی برخوردار است. آب مورد نیاز می‌تواند آب‌های زیرزمینی غیرشرب و غیراشباع از

نمک، فاضلاب‌های شهری یا آب دریا باشد. برای دفع شورابه می‌توان از رسوب‌گیرهایی که کمترین تأثیر را روی آب‌های سطحی و زیرزمینی شُرب دارند، استفاده کرد. در صورت نزدیکی به دریا، می‌توان شورابه را به دریا ریخت. تزریق در سازندهای تراوای سطحی یا عمیق، با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. در صورتی که شورابه حاوی مواد با ارزشی از جمله پُتاس باشد، می‌توان واحدهای فراوری و تصفیه شورابه احداث نمود و آب تصفیه شده را مجدداً به چرخه حفر مغار برگرداند [۱۱].

مراحل ساخت مغار نمکی در شکل ۷- نشان داده شده است. انجام مراحل حفاری، استخراج

انحلالی و عملیات ذخیره‌سازی، نیازمند استفاده از تجهیزات سرچاهی خاص هر مرحله است.

۵- پارامترهای تأثیرگذار در طراحی مغارهای نمکی

هر سایت ذخیره‌سازی ممکن است در ساختارهای زمین‌شناسی و در اعماق متفاوت قرار گرفته باشد. در لایه‌های نمکی، مغارها فشرده‌تر بوده و در اعماق کمتر (حدود ۵۰۰ تا ۶۵۰ متر) قرار گرفته‌اند. در گنبد‌های نمکی، مغارهای بسیار بلند و باریک در اعماق بیشتر و بین ۱۴۰۰ تا ۱۸۵۰ متر قرار گرفته‌اند.

از نگاه بهره‌بردار، مغارها باید بیشترین ظرفیت ذخیره‌سازی (کمترین گاز پایه و بیشترین میزان گاز کاری) و بیشترین قابلیت برداشت را داشته باشند و همگرایی ناشی از خزش نمک کم باشد. به عبارت دیگر، به‌طور مؤثر و در دراز مدت، قابلیت بهره‌برداری داشته باشند [۱۲].

پارامترهای مؤثر در طراحی مغار را می‌توان در چهار دسته کلی طبقه‌بندی کرد:

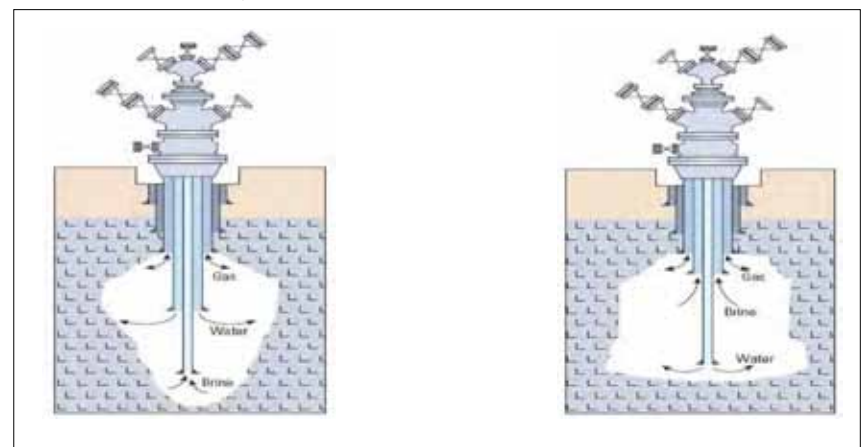
۱-۵- پارامترهای زمین‌شناسی

■ ضخامت لایه نمکی: حداقل ضخامت لایه نمکی به حجم مغار و برنامه‌ی شست‌وشو بستگی دارد اما از نظر اقتصادی نباید کمتر از ۲۰۰ متر باشد.

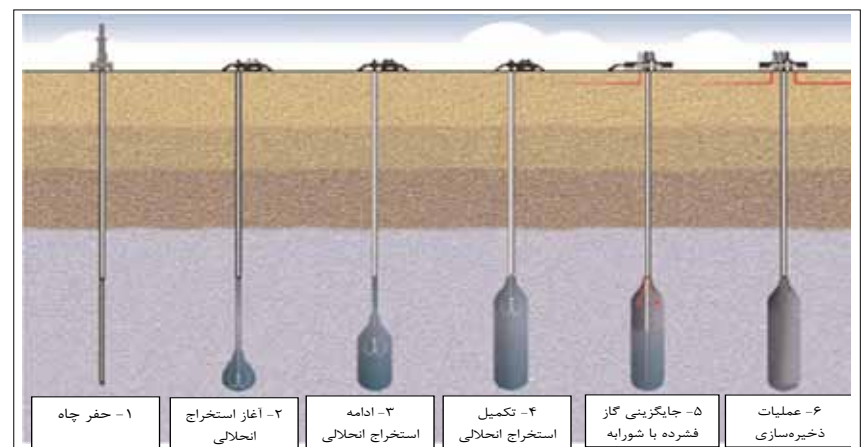
■ ماهیت نمک: هرچه نمک خالص‌تر باشد، شست‌وشوی مغار راحت‌تر بوده و شکل نهایی منظم‌تر است.

■ شرایط تکتونیکی محل: اگر سازند نمکی تغییر شکل پیدا کرده باشد، توزیع لایه‌های انحلال‌ناپذیر پیچیده شده و شست‌وشوی نمک دشوار می‌گردد. به‌علاوه، کشش‌های زیاد درون آن، شکل مغار را تغییر می‌دهد [۱۳].

■ عمق قرارگیری مغار: وقتی نمک تحت تأثیر فشار مداومی قرار گیرد، مثل یک سیال گران‌رو واکنش داده و مانند ماده پلاستیک رفتار می‌کند. این فرایند، خزش نامیده می‌شود. فشار مجاز با توجه به نرخ خزش تعیین می‌شود.



شکل ۶ الف) معدن‌کاری انحلالی با روش گردش مستقیم. ب) معدن‌کاری انحلالی با روش گردش معکوس [۹]



شکل ۷ مراحل ایجاد مغار نمکی ذخیره‌سازی گاز [۱۲]

با افزایش عمق مغار، حداکثر فشار بیشتر می‌شود، اما از سوی دیگر، حداقل فشار مجاز نیز افزایش می‌یابد. برای تعیین عمق بهینه مغار، نمودار تفاضل فشار حداکثر و حداقل در هر عمق، رسم می‌شود. بیشینه این نمودار نشان‌دهنده عمق بهینه است [۱۴].

۲-۵- پارامترهای مکانیک سنگی

پس از تعیین محل تقریبی قرارگیری مغار، ارزیابی‌های ژئومکانیکی در منطقه انجام می‌شود، خصوصیات مکانیکی سنگ نمک در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته و مدل ساختاری مناسب برای پیش‌بینی رفتار نمک تحت تنش ارائه می‌شود. سپس، داده‌های به‌دست آمده با اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی تلفیق شده، میدان تنش اولیه برآورد شده و با مدل‌های تئوری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۵- پارامترهای هندسی

قطر مغار، ارتفاع مغار، شکل سقف، فاصله مغارها از یکدیگر و فاصله مغار نمکی از سازندهای مجاور، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در طراحی مغار هستند [۱۴].

۴-۵- پارامترهای بهره‌برداری

- حداکثر فشار مجاز
- حداقل فشار مجاز
- نرخ تزریق بهینه گاز

- نرخ برداشت بهینه گاز
- دمای گاز تزریقی

■ طول عمر مفید مغار [۱۵]

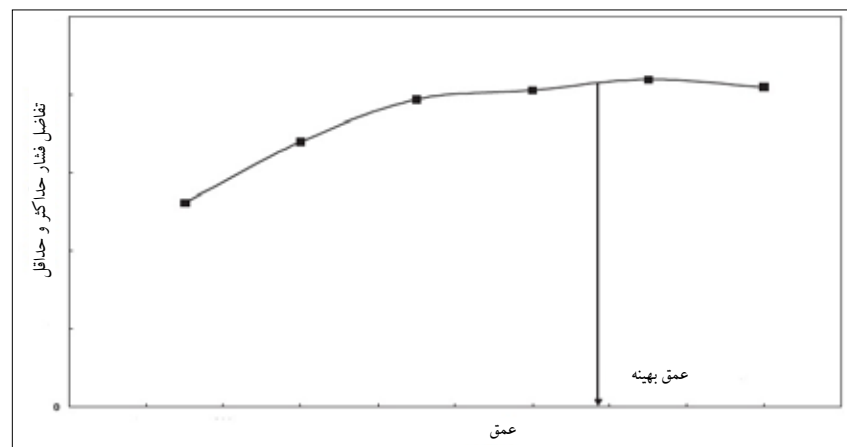
حوادث مشاهده شده در مخازن ذخیره‌سازی نمک عمدتاً به دلیل خزش نمک و افت حجم مغار، انحلال کنترل‌نشده نمک و کاهش پایداری یا ریزش مغار، نشت از لوله‌ها، نزدیکی مغار به مرزهای سازند نمکی و افزایش احتمال نشت گاز و ایجاد تنش‌های بُرش‌ی بالا و هم‌چنین وجود ناحیه‌های آنومالی که انحلال‌پذیرتر از نمک بوده و پایداری مغار و چاه را کاهش می‌دهند، رخ داده‌اند [۱۶].

۶- شبیه‌سازی مغار نمکی

الگوی بهره‌برداری از مغارهای ذخیره‌سازی گاز از ذخیره‌سازی فصلی (یک چرخه تزریق و برداشت در سال) تا چندین چرخه تزریق و برداشت در سال برای تأمین نیاز بازار مصرف و مقاصد اقتصادی، متغیر است. با پیچیده‌تر شدن حالت‌های بهره‌برداری، اهمیت طراحی دقیق مغار و نظارت بر تنش توده سنگ در حین بهره‌برداری افزایش می‌یابد.

۱-۱- مراحل شبیه‌سازی

- برای مطالعه ثبات یک مغار منفرد که یک چرخه فشار را تحمل کرده است، مراحل زیر باید برای شبیه‌سازی انجام گیرد:
- تعریف لایه‌های زمین‌شناسی منطقه ایجاد مغار و تعیین شرایط تنش اولیه



شکل ۸ | نمودار تعیین عمق بهینه مغار [۱۴]

- تعیین شکل و محل قرارگیری مغار
- اعمال فشار ثابت داخلی مغار، برابر فشار هیدرواستاتیک در عمق مربوطه. پس از این مرحله باید اجازه داد تا مدل به تعادل برسد و سپس خزش برای مدت سه ماه بررسی گردد.
- اعمال چرخه فشار برای مدت یک سال. نوسان فشار مغار بین فشار حداقل و فشار حداکثر صورت می‌گیرد. برای هر شبیه‌سازی، تنش سنگ و تغییر شکل باید ارزیابی شود. هم‌چنین، امکان ایجاد ریزش‌های سازندی و لغزش لایه‌ها در طول شیب و در میان رخساره باید بررسی شود [۱۷].

برای مشخص نمودن لایه‌های زمین‌شناسی از نرم‌افزارهای تخصصی زمین‌شناسی می‌توان استفاده کرد. تخمین حجم و ابعاد نمک در گنبد نمکی و تعیین تنش اولیه با استفاده از این نرم‌افزارها میسر خواهد بود. با در اختیار داشتن داده‌های چاه‌ها و داده‌های لرزه‌ای منطقه، داده‌های گرانی‌سنجی، تلفیق داده‌های ژئوفیزیکی، نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای و با به کارگیری نرم‌افزار مناسب، می‌توان فضای سه‌بعدی گنبد نمکی را شبیه‌سازی نموده و محل تقریبی ایجاد مغارهای نمکی را پیدا کرد.

برای تحلیل پایداری مغار نمکی، باید از دسته‌ای دیگر از نرم‌افزارها استفاده کرد. این نرم‌افزارها با استفاده از روش‌های عددی، رفتار مغار را تحت شرایط مختلف بررسی می‌کنند. مراحل انجام کار معمولاً به شرح زیر است:

- ایجاد هندسه مدل: هندسه‌سازی در این نرم‌افزارها با ایجاد یک سری المان که عموماً مش نامیده می‌شود، صورت می‌گیرد.
- تعیین مدل رفتاری و مشخص کردن خواص مواد
- اعمال شرایط مرزی و اولیه: پس از مشخص کردن مرزها، می‌توان نیروها و یا تنش‌ها را در مرزها یا بخشی از یک مرز مشخص نمود. تنش اولیه را با استفاده از نرم‌افزارهای زمین‌شناسی می‌توان تخمین زد.
- اجرای مدل و تفسیر نتایج: هدف از اجرای برنامه، بررسی تأثیر تنش‌های موجود در اثر

وزن یا فشار گاز ذخیره‌شده بر پایداری مغار است.

۲-۶- ارائه نتایج شبیه‌سازی

پس از شبیه‌سازی فضای گنبد نمکی و تعیین ابعاد و موقعیت قرارگیری نمک، مغار نمکی با استفاده از نرم‌افزارهای عددی شبیه‌سازی می‌شود. با تغییر پارامترهای زیر، پایداری مغار در هر حالت بررسی شده و بهترین حالت برای هر پارامتر انتخاب می‌شود.

- عمق قرارگیری مغار
- حداقل و حداکثر فشار مجاز
- ابعاد مغار (نسبت ارتفاع به قطر بهینه)
- تعداد و فاصله مغارها از هم
- فاصله مغارها از سازندهای مجاور
- تعداد چرخه‌های تزریق و برداشت بهینه

۲-۷- متروک کردن مغار نمکی

عمر بهره‌برداری هر مغار روزی به پایان می‌رسد. بنابراین، حفاظت سطحی و

زیست‌محیطی در درازمدت باید در نظر گرفته شود. برای این منظور، رفتار مغارهای بلااستفاده و مهر و موم شده یا پُر شده با مایعات یا مواد جامد باید مورد مطالعه قرار گیرد. با وجود برتری روش پُر کردن مغار با مواد جامد نسبت به متروکه گذاشتن مغار، روش پُر کردن مغار با آب، در آلمان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. از مغارهای متروکه برای دفن پسماندهای هسته‌ای و مواد سمی صنعتی نیز می‌توان استفاده کرد. این مواد دورریز می‌تواند به صورت جامد و پودری شکل، مایع یا سوسپانسیونی باشد که پس از پمپ شدن در داخل مغار، سخت می‌شود. پُر کردن مغار با مواد جامد، تقریباً خالی از اشکال بوده و پایداری مغار پُر شده را تضمین می‌کند [۱۸].

نتیجه‌گیری

■ ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ضروری است.

■ برای رویارویی با افزایش ناگهانی مصرف گاز

طبیعی و جبران کمبود گاز در کوتاه‌مدت، ذخیره‌سازی گاز در مغارهای نمکی مناسب‌ترین روش است.

- استفاده از این روش ذخیره‌سازی در جهان، به‌سرعت در حال افزایش است. گسترش سازندهای نمکی در ایران، امکان استفاده از این روش ذخیره‌سازی را فراهم آورده است.
- ایجاد مغار در گنبد‌های نمکی نسبت به لایه‌های نمکی، ایمن‌تر و اقتصادی‌تر بوده و مشکلات عملیاتی کمتری دارد.
- خزش نمک و کاهش حجم مغارهای نمکی در درازمدت، مهم‌ترین چالش استفاده از این روش ذخیره‌سازی است. با طراحی دقیق مغار و بهره‌برداری صحیح از آن، می‌توان نرخ خزش را محدود کرد. در این مقاله، نکات و پارامترهای اصلی طراحی مرور گردید.
- پس از پایان عمر مفید مغارهای نمکی (در نقش مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی)، از آن‌ها به‌منظور دفن پسماندهای اتمی و مواد سمی صنعتی می‌توان استفاده کرد. ■

منابع

- مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری ۱۳۹۰: شاهرود.
- [1] 2006-2009 Triennium Work Report, 24th World Gas Conference, 2009: Buenos Aires, Argentina.
- [2] Sylvie Cornot, Underground Gas Storage in The World, CEDIGAZ, Center International d'Information, 1990.
- [3] Chabreliel, M., et al., Underground Gas Storage: Technological Innovation for Increased Efficiency, CEDIGAZ, France, 2000.
- [4] اسماعیل نژاد، احسان؛ رجیبی، میثم؛ «ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی»؛ نخستین همایش ملی فناوری‌های نوین در صنایع نفت و گاز ۱۳۸۹: دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه.
- [5] www.energydelta.org
- [6] 2003-2006 Triennium Work Report, 23th World Gas Conference, 2006: Amsterdam, The Netherlands.
- [7] کوچکی، احسان؛ «آشنایی با پروژه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در ایران»؛ اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری ۱۳۹۰: شاهرود.
- [8] سلسبیلی، محمد؛ «معیارهای مکان‌یابی مناطق مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در مغارهای نمکی»؛ اکتشاف و تولید؛ ۱۳۸۹؛ ۷۷.
- [9] رازانی، مجتبی؛ «روش‌های حفاری جهت ذخیره‌سازی گاز در مغارهای نمکی»؛ ششمین کنگره ملی مهندسی عمران ۱۳۹۰: سمنان.
- [10] Ikoku, C.U., Natural Gas Reservoir Engineering, 1984, Florida: Krieger Publishing Company.
- [11] سعید کریمی‌نسب، روح‌اله عزیزی؛ «چالش‌های تأمین آب در اجرای مغارهای نمکی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در ایران»؛ اولین کنفرانس
- [12] D. J. Evans, R.A.C., Underground Gas Storage: Worldwide Experiences and Future Development in the UK and Europe, 2009, London: The Geological Society.
- [13] اسماعیل نژاد، احسان؛ رجیبی، میثم؛ «پارامترهای تأثیرگذار در ایجاد مغارهای نمکی ذخیره‌سازی گاز»؛ اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری ۱۳۹۰: شاهرود.
- [14] A. Suat Bagci, E.Ozturk, Performance Prediction of Underground Gas Storage in Salt Caverns. Energy Sources, 2007. Part B: p. 155-165.
- [15] L. B. Hilbert, V.K.S., Salt Mechanics and Casing Deformation in Solution-Mined Gas Storage Operations. American Rock Mechanics Association, 2008. 08.
- [16] عسگری، امین؛ «مخاطرات ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری در سازندهای نمک و راهکارهای مقابله با آن»؛ اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری ۱۳۹۰: شاهرود.
- [17] Gang Han, M.B., Khang Lao, Luis Dorfmann, Jean Young, Gas Storage and Operations in Single Bedded Salt Caverns: Stability Analyses, 2006, American Rock Mechanics Association.
- [18] Langer, M., Use of solution-mined caverns in salt for oil and gas storage and toxic waste disposal in Germany. Elsevier Science Publishers B.V., Engineering Geology, 1993. 35: p. 183-190.