دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده محیط‌زیست

# برآورد میزان آب مصرفی و بهینه‌سازی منابع تأمین آب در حفر مغارهای نمکی

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی‌ارشد**

**در رشته مهندسی محیط‌زیست - گرایش منابع آب**

**نگارنده: حامد شهیدی نیا**

اساتید راهنما:

دکتر محمدحسین نیک‌سخن

دکتر حسن قاسم‌زاده

**شهریورماه ۱۳۹۷**

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده محیط‌زیست

# برآورد میزان آب مصرفی و بهینه‌سازی منابع تأمین آب در حفر مغارهای نمکی

**پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی‌ارشد**

**در رشته مهندسی محیط‌زیست - گرایش منابع آب**

**نگارنده: حامد شهیدی نیا**

اساتید راهنما:

دکتر محمدحسین نیک‌سخن

دکتر حسن قاسم‌زاده

**دانشگاه تهران**

**پردیس دانشکده‌های فنی**

**دانشکده محیط‌زیست**

# گواهی دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

هیأت داوران پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آقای / خانم ..... به شماره دانشـــجویی.....در رشـــته ..... گرایش ..... را در تاریخ ..... بـــا عـــنـــوان.....

.....

| | به عدد | به حروف |
|---|---|---|
| با نمره نهایی | | |

و درجه [ ] ارزیابی کرد.

| ردیف | مشخصات هیئت داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه دانشگاهی | دانشگاه یا مؤسسه | امضاء |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | **استاد راهنمای اول** | | | | |
| ۲ | **استاد راهنمای دوم** | | | | |
| ۳ | **استاد مشاور** | | | | |
| ٤ | **استاد داور داخلی** | | | | |
| ٥ | **استاد داور خارجی** | | | | |
| ٦ | **نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده / گروه** | | | | |

نام و نام خانوادگی معاون تحصیلات تکمیلی و پژوهشی دانشکده / گروه:

تاریخ و امضاء:

نام و نام خانوادگی معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی پردیس دانشکده‌های فنی:

تاریخ و امضاء:

**تعهدنامه اصالت اثر**

**باسمه‌تعالی**

**اینجانب ..... تائید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نشده است.**

**کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.**

**نام و نام خانوادگی دانشجو:**

**امضای دانشجو:**

تقدیم به **همسرم، فاطمه**

که در تمام سختی‌ها یگانه همراهم است

– با تشکر و سپاس از استاد دانشمند و پرمایه‌ام جناب آقای ***دکتر نیک‌سخن*** که از محضر پرفیض تدریسشان، بهره‌ها برده‌ام؛ و همچنین استاد گرانقدر و فرزانه‌ام جناب آقای ***دکتر قاسم‌زاده*** که ایده اصلی این پایان‌نامه از ایشان بود و اگر راهنمایی‌های ایشان نبود، به‌هیچ‌وجه این تحقیق به ثمر نمی‌نشست.

– با امتنان بیکران از مساعدت‌های بی‌شائبه جناب آقای ***دکتر اردستانی*** ریاست محترم دانشکده محیط‌زیست.

– با سپاس بی‌دریغ خدمت دوستان گران‌مایه‌ام آقایان ***بهنام نکویی و سعید ایزدپناه*** که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داده‌اند.

## چکیده

ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به عنوان یک روش مهم در مدیریت تقاضا و نوسانات قیمت گاز و همین‌طور اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین روش ذخیره‌سازی گاز در جهان مطرح است. تکنولوژی معدنکاری انحلالی گنبدهای نمکی، ضمن آنکه یکی از قدیمی‌ترین روش‌ها برای تولید نمک در جهان است؛ روشی بسیار ارزان جهت حفاری احجام بزرگ ذخیره‌سازی به شمار می‌رود که شکل مغارها را به‌خوبی کنترل می‌کند. اگرچه روش معدنکاری انحلالی گنبدهای نمکی، امروزه یکی از متداول‌ترین و بهینه‌ترین روش‌های ذخیره‌سازی گاز به شمار می‌رود و در حدود ۱۲ درصد تأسیسات ذخیره‌سازی موجود در جهان را شامل می‌شود، اما بالا بودن میزان آب مصرفی به منظور عملیات انحلال نمک و تولید شورابه‌های عظیم، از محدودیت‌های این روش بوده، و لذا انجام این گونه از ذخیره‌سازی نیازمند مطالعات ویژه جهت برآورد میزان آب مصرفی و بهینه‌سازی تأمین آب موردنیاز، و همچنین مدیریت شورابه حاصله است. در این مطالعه با استفاده از تئوری میانگین‌گیری حجمی، محیط موردنظر به یک محیط متخلخل تبدیل و با استفاده از روش احجام محدود، عملیات انحلال مدل‌سازی شده است. بدین منظور، برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب انجام گردیده است. مطابق با نتایج میزان آب مصرفی حدود ۱۰/۵ برابر حجم نمک برداشت‌شده می‌باشد.



*واژگان کلیدی: مغار نمکی، ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروکربن‌ها، معدنکاری انحلالی، حجم محدود.*

# فهرست مطالب


فصل ۱: کلیات تحقیق ..... ۱

۱-۱- بیان مسئله ..... ۱

۱-۲- پرسش یا پرسش‌های تحقیق ..... ۶

۱-۳- اهداف تحقیق ..... ۶

۱-۴- روش تحقیق و روش‌های اجرائی طرح ..... ۷

۱-۵- خلاصه فصل‌ها ..... ۷

فصل ۲: پیشینه و چهارچوب نظری تحقیق ..... ۹

۲-۱- ذخیره‌سازی گاز طبیعی و ضرورت‌های آن ..... ۹

۲-۱-۱- نقش مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در امنیت تأمین گاز کشور ..... ۱۰

۲-۱-۱-۱- نوسانات فصلی ..... ۱۰

۲-۱-۱-۲- تنظیم‌های مقطعی (هفتگی و روزانه) ..... ۱۰

۲-۱-۱-۳- اوج تقاضای زمستان ..... ۱۰

۲-۱-۱-۴- نقش امنیتی (مخازن راهبردی) ..... ۱۱

۲-۱-۱-۵- بهینه‌سازی شبکه ..... ۱۱

۲-۱-۱-۶- تنظیم‌های چندین ساله ..... ۱۱

۲-۱-۲- عوامل مؤثر در تعیین ظرفیت مخازن زیرزمینی و تأسیسات وابسته ..... ۱۲

۲-۲- تاریخچه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ..... ۱۲

جدول ۲-۱ تاریخچه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در جهان ..... ۱۳

۲-۳- روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ..... ۱۳

۲-۳-۱- ذخیره‌سازی گاز در مخازن تخلیه‌شده ..... ۱۳

۲-۳-۲- ذخیره‌سازی در سفره‌های آب زیرزمینی ..... ۱۴

۲-۳-۳- ذخیره‌سازی در مغارهای نمکی ..... ۱۵

۲-۳-۴- ذخیره‌سازی در مغارهای سنگی ..... ۱۵

۲-۳-۵- ذخیره‌سازی در معادن متروکه ..... ۱۶

۲-۴- مزایا و معایب انواع روش‌های ذخیره‌سازی ..... ۱۶

جدول ۲-۲ خلاصه‌ای از مزایا و معایب روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ..... ۱۷
۲-۵- ذخیره‌سازی گاز طبیعی در مغارهای نمکی ..... ۱۸
۲-۵-۱- سازندهای نمکی ..... ۱۸
2-5-2- گنبدهای نمکی ..... ۱۸
2-5-3- لایه‌های نمکی ..... ۱۹
۲-۵-۴- معیارهای مؤثر در انتخاب مکان مناسب ذخیره‌سازی ..... ۲۰
جدول ۲-۳ معیارهای تعیین مکان مناسب حفر مغارهای نمکی و روش تشخیص آنها ..... ۲۱
۲-۵-۴-۲- دیاپیریسم نمکی ..... ۲۲
۲-۵-۴-۳- شرایط ساختاری زیرسطحی نمک ..... ۲۲
۲-۵-۴-۴- شرایط سطحی نمک ..... ۲۳
۲-۵-۴-۵- تکتونیک و لرزه‌خیزی ..... ۲۳
۲-۵-۴-۶- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سازند نمکی ..... ۲۴
۲-۵-۴-۷- وضعیت هیدرولوژی (آب‌شناسی) و هیدروژئولوژی (آب‌زمین‌شناسی) ..... ۲۴
۲-۵-۴-۸- ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ..... ۲۵
۲-۵-۵- ایجاد مغار نمکی ..... ۲۵
۲-۵-۵-۱- معدنکاری انحلالی نمک ..... ۲۵
۲-۵-۵-۲- طراحی چاه انحلالی ..... ۲۶
۲-۵-۵-۳- روش‌های معدنکاری انحلالی ..... ۲۷
۲-۵-۵-۴- سیال محافظ سقف ..... ۲۸
۲-۵-۵-۵- معرفی فروشویی درجا ..... ۲۸
۲-۵-۵-۶- انواع فروشویی درجا ..... ۲۹
۲-۵-۵-۷- کاربردهای فروشویی غرقابی درجا ..... ۲۹
2-5-6- تأمین آب شیرین و دفع شورابه ..... ۳۰
۲-۵-۶-۱- راه‌های تأمین آب: ..... ۳۰
۲-۵-۶-۲- راه‌های دفع یا فرآوری شورابه تولیدی ..... ۳۱
2-5-7- پایداری مغار نمکی ..... ۳۲
۲-۵-۸- پارامترهای تأثیرگذار در طراحی مغارهای نمکی ..... ۳۳
۲-۵-۸-۱- پارامترهای مکانیک‌سنگی ..... ۳۳

۲-۵-۸-۲- پارامترهای زمین‌شناسی ۳۳
۲-۵-۸-۳- پارامترهای هندسی ۳۴
۲-۵-۹- ایمنی تأسیسات ذخیره‌سازی گاز در مغارهای نمکی ۳۶
۲-۵-۱۰- عوامل اصلی ناپایداری، نشت و ریزش مغارهای نمکی ذخیره‌سازی ۳۶
۲-۵-۱۰-۱- خزش نمک ۳۶
۲-۵-۱۰-۲- انحلال کنترل نشده ۳۷
2-5-10-3- وجود ناحیه‌های آنومالی ۳۷
۲-۵-۱۰-۴- عمق کم سازند نمک ۳۸
۲-۵-۱۰-۵- نزدیکی مغار به مرزهای سازند نمکی ۳۸
۲-۵-۱۰-۶- متروک نمودن مغار نمکی ۳۸
2-6- ساختارهای نمکی ایران ۳۹
۲-۶-۱- گنبدهای نمکی حوزه ایران مرکزی ۳۹
2-6-2- گنبدهای نمکی جنوب سمنان ۳۹
2-6-3- توده‌های نمکی شرق و جنوب‌شرقی تهران ۳۹
2-6-4- گنبدهای نمکی حوالی اردکان ۴۰
۲-۶-۵- گنبدهای نمکی قم ۴۰
۲-۶-۶- ساختار نمکی نصرآباد ۴۰
2-7- ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مغارهای نمکی در جهان ۴۱
۲-۸- ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در مغارهای نمکی در ایران ۴۲
۲-۹- تبیین سابقه علمی (پایان‌نامه‌ها، و طرح‌های پژوهشی) ۴۲
فصل ۳: مواد و روش‌ها ۴۸
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- روش تحقیق ۴۸
۳-۳- نحوه انجام کار ۴۹
۳-۴- انواع مدل‌های فصل مشترک متحرک از نقطه‌نظر عددی ۵۰
3-4-1- مدل‌های فصل مشترک حاد ۵۰
3-4-2- مدل‌های فصل مشترک پخشیده ۵۰
۳-۵- مدل انحلال جامد-مایع ۵۲

۳-۶- مدل فصل مشترک پخشیده برای مسئله انحلال جامد-مایع ..... ۵۴
۳-۷- روش‌های عددی و گسسته‌سازی ..... ۵۶
۳-۷-۱- روش‌های حل عددی معادله دیفرانسیل ..... ۵۶
۳-۷-۲- روش احجام محدود ..... ۵۷
۳-۷-۳- روش‌های حل مسائل غیردائمی ..... ۵۸
۳-۷-۴- روش کاملاً ضمنی برای معادلات PDE ..... ۵۹
۳-۷-۴-۱- قدم اول: تولید شبکه ..... ۵۹
۳-۷-۴-۲- قدم دوم: گسسته‌سازی ..... ۶۰
I ) گسسته سازی معادله موازنه جرم فاز جامد ..... ۶۰
II ) گسسته‌سازی معادله موازنه جرم فاز مایع ..... ۶۱
III ) گسسته‌سازی معادله موازنه جرم جزء A در فاز مایع ..... ۶۲
IV ) طرح اختلاف بالادست برای معادله موازنه جرم جزء A در فاز مایع ..... ۶۴
V ) گسسته‌سازی معادله مومنتوم (دارسی) ..... ۶۵
VI ) جمع‌بندی معادلات گسسته شده: ..... ۶۷
VII ) ترکیب معادلات و کاستن از مجهولات ..... ۶۸
۳-۷-۴-۳- قدم سوم: اعمال شرایط مرزی ..... ۷۳
( I شرط مرزی تقارن ..... ۷۳
II ) شرایط مرزی ورودی ..... ۷۳
III ) شرط مرزی خروجی ..... ۷۴
IV ) شرط مرزی دیواره ..... ۷۵
-3-7-4-4 قدم چهارم: حل معادلات دستگاه معادلات ..... ۷۹
( I حدس اولیه برای مقادیر سهم جرمی نمک در فاز مایع ( $\Omega_{Al}$ ) ..... ۷۹
( II محاسبه نشانگر فازی ( $\varepsilon_l$ ) از رابطه موازنه جرم فاز جامد بر اساس $\Omega_{Al}$ حدس زده شده ..... ۷۹
( III محاسبه ضریب تبادل جرم ( $\alpha$ )، نفوذپذیری ( $K$ ) و وزن مخصوص فاز مایع ( $\rho_l$ ) از روابط مربوطه ..... ۸۰
( IV محاسبه فشارهای گره‌ای ( $P_l$ ) ..... ۸۱
( V محاسبه مقادیر $\Omega_{Al}$ ..... ۸۱
( VI مقایسه مقادیر $\Omega_{Al}$ محاسبه‌شده مقادیر حدس زده شده ..... ۸۱

فصل ۴: یافته‌ها و نتایج ..... ۸۳
۴-۱- مقدمه ..... ۸۳
۴-۲- مسئله نمونه شبیه‌سازی مدل انحلال مغار نمکی ..... ۸۴
جدول ۴-۱ مشخصات سنگ نمک بکار رفته در مسائل مدل‌سازی شده ..... ۸۴
۴-۲-۲- آماده سازی مدل ..... ۸۶
۴-۲-۳- شرایط مرزی و اطلاعات ورودی به مدل ..... ۸۷
۴-۲-۴- نتایج حاصل از مدلسازی ..... ۸۷
۴-۲-۵- مقایسه عملکرد مدل با مدل لو و همکاران ..... ۹۲
فصل ۵: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ..... ۹۳
۵-۱- مقدمه ..... ۹۳
۵-۲- جمع‌بندی ..... ۹۳
۵-۳- پیشنهادها ..... ۹۴
i. منابع ..... ۱

# فصل ۱: کلیات تحقیق

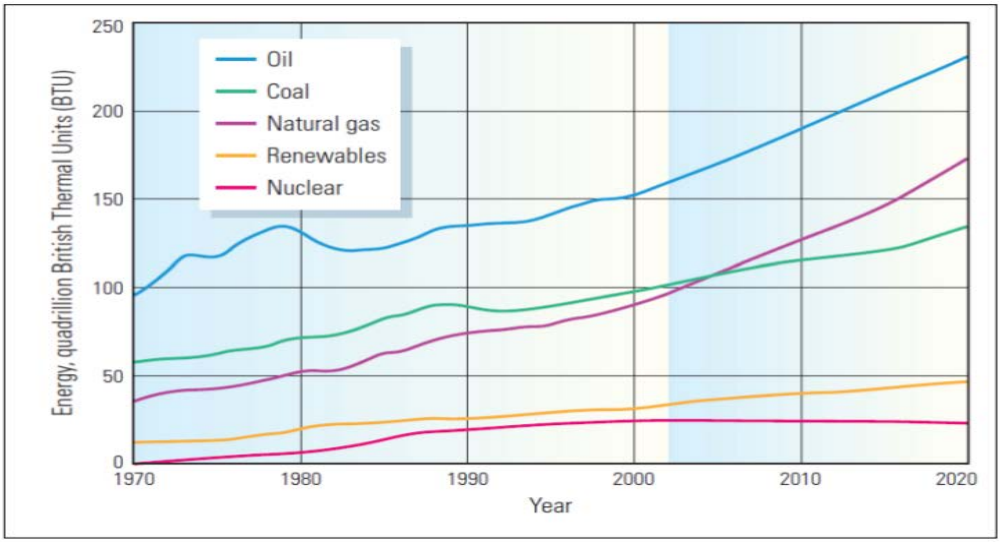
## ۱-۱- بیان مسئله

امروزه حفظ و صیانت از منابع آب و بهره‌برداری بهینه و عادلانه از آب یک مسئله جهانی به شمار می‌رود. به همین جهت، در قرن ۲۱ از آب به عنوان یک چالش فراگیر بشری یاد می‌شود. تأکید جامعه جهانی این است که دولت‌ها و ملت‌ها مقوله آب را کلید توسعه اجتماعی-اقتصادی خود در نظر بگیرند. منابع آب اگرچه تجدیدپذیر هستند ولیکن حجم آنها ثابت بوده و در مقابل، تقاضای بشری برای آن روبه افزایش است؛ به گونه‌ای که طی صد سال اخیر تقاضای جهانی برای آب بیش از شش برابر شده است در صورتی که جمعیت جهان سه برابر شده است. به‌این‌ترتیب سرانه آبی برای مردم جهان روبه کاهش است. از سوی دیگر، متأسفانه انواع گوناگون آلاینده‌ها اعم از پساب‌های صنعتی، زه‌آب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و روستایی، منابع آبی را آلوده و از استانداردهای مصرف خارج می‌کنند. لذا استفاده بهینه از منابع آب از اهمیت بسیاری برخوردار است.

کشور ما، ایران، در یکی از خشک‌ترین مناطق جهان قرار گرفته است. متوسط بارندگی کشور ۲۵۰ میلی‌متر (معادل یک‌سوم متوسط بارندگی در جهان) بوده و آن تحت شرایطی است که به دلیل پتانسیل بالای تبخیر در کشور، نزدیک به ۷۱ درصد این میزان مستقیماً از دسترس خارج می‌گردد. درعین‌حال،

کمبود آب یکی از عوامل اصلی محدودکننده توسعه فعالیت‌های اقتصادی در دهه‌های آینده به شمار می‌رود. توسعه شهرها، افزایش روزافزون جمعیت، رشد صنایع، و محدودیت‌های کمی منابع آب، مدیریت هدفمند منابع آب را بیش از پیش ضروری می‌نماید. از این رو، حفاظت از منابع آبی و اعمال مدیریت صحیح در بهره‌برداری از منابع فوق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

از سوی دیگر، در سال‌های آینده به دلایل گوناگونی چون رشد جمعیت، اقتصاد و صنایع، با روند افزایشی تقاضای انرژی در دنیا مواجه خواهیم بود. در بسیاری از کشورها، درخواست برای توقف استفاده از انرژی هسته‌ای به علت مسائل زیست‌محیطی، روند فزاینده‌ای را شاهد است. در این راستا، انرژی پاکی چون گاز طبیعی مورد توجه بوده، و منبع مناسبی برای احتیاجات بشر در اوایل قرن ۲۱ است. شکل ۱-۱ پیش‌بینی مصرف انرژی دنیا تا سال ۲۰۲۰ را نشان می‌دهد (Höffler et. al, 2007). بر اساس این برآورد، تمامی منابع تأمین‌کننده انرژی به‌جز انرژی هسته‌ای، رشد افزایشی تقاضا را شاهد خواهند بود که در این میان، گاز طبیعی با شیب تقاضای بالاتری دیده می‌شود. ذخایر گازی جهان با حجم قابل استحصال ۱۴۶ تریلیون مترمکعب عمدتاً در کشور روسیه و منطقه خاورمیانه واقع شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد از سال ۲۰۲۰ به بعد شتاب تولید گاز از تولید نفت (معادل بشکه نفت خام) پیشی می‌گیرد. ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به عنوان یک روش مهم در مدیریت تقاضا و نوسانات قیمت گاز و همین‌طور اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین روش ذخیره‌سازی گاز در جهان مطرح است. کشور ایران به عنوان اولین کشور دارای ذخایر عظیم گاز طبیعی (با بیش از ۳۰ تریلیون مترمکعب گاز قابل استحصال) در افق چشم‌انداز ۱۴۰۴، اهداف مهمی چون رسیدن به جایگاه دومین تولیدکننده گاز در جهان، افزایش سهم سبد انرژی گاز در کشور، افزایش صادرات گاز و تزریق گاز به مخازن نفتی کشور را دنبال می‌کند. بر این اساس ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به عنوان یک ضرورت مطرح بوده و طبق این سند، حجم ذخیره‌سازی موردنیاز برابر ۱۰۰ میلیون مترمکعب در روز برآورد شده است. رسیدن به این اهداف نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت کلان در حوزه زنجیره ارزش صنعت گاز کشور است. در این میان، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی با شناخت کامل از بازار مصرف می‌تواند به عنوان بهترین گزینه استراتژیک، اقتصادی و پدافند غیرعامل مناسب برای نیل به اهداف چشم‌انداز، مخصوصاً تأمین نیاز مصرف داخلی در شرایط بحرانی و در ماه‌های سرد سال و یا هنگام قطع خطوط شبکه انتقال گاز مؤثر باشد.




شکل ۱-۱- *پیش‌بینی مصرف حامل‌های انرژی در دنیا تا سال ۲۰۲۰*

مخازن زیرزمینی اصلی و عمده گاز طبیعی در جهان به سه شکل وجود دارند: میادین تخلیه‌شده گاز یا نفت، آبخوان‌های شور و عمیق زیرزمینی، و مغارهای نمکی. خصوصیات زمین‌شناسی هر یک از این مخازن متفاوت است، و انتخاب هر یک بستگی به شرایط استفاده و هزینه‌های توسعه‌ای دارد. شکل ۱-۲ تعداد هر یک از این نوع مخازن را در سایت‌های ذخیره‌سازی جهان نشان می‌دهد (Wallbrecht, 2009). امروزه استفاده از مغارهای زیرزمینی به منظور ذخیره‌سازی نفت و گاز راهکاری مناسب برای مقابله با تغییرات ناگهانی در تولید و انتقال سوخت در کشورهای مختلف جهان متداول گردیده است. هیدروکربن‌های سبکی که به‌طور متداول در مغارهای نمکی ذخیره می‌شوند، شامل پروپان، بوتان، اتان، اتیلن و دیگر تولیدات پالایش‌شده هستند که می‌توانند انتقال یابند و به صورت مایع ذخیره شوند. در سال‌های اخیر حجم گاز طبیعی ذخیره‌شده در مغارهای نمکی در حال افزایش است. گنبدهای نمکی، یکی از انواع سازندهای نمکی هستند که به دلیل ساختار خاص زمین‌شناسی خود و همچنین خواص منحصربه‌فرد نمک، فضای بسیار مناسبی برای ایجاد مغار و مخازن ذخیره‌سازی هستند. به‌طور کلی برجستگی‌هایی که توسط نمک به علت حرکات و بالا آمدن آن ایجاد می‌گردد، گنبد نمکی نامیده می شود. هر گنبد نمکی شامل یک هسته مرکزی است که از نمک تشکیل شده و نیز بخشی که اطراف هسته مرکزی را احاطه می‌کند و از سنگ‌های رسوبی محلی تشکیل شده است.