

A Meta-Synthesis Approach for the Strategic Decision: Site Selection for Underground Natural Gas Storage

Azadeh Dabbaghi¹

Abstract

The underground gas storage, with more than a hundred years of experience, is considered as a global solution to regulate supply and demand in the natural gas transmission system. Due to the importance of selecting suitable underground structures for natural gas storage, as well as the necessity of considering various geological, economic and environmental criteria with uncertainties, site selection has gained increasing attention as a strategic decision in the literature. This research was conducted using the meta-synthesis method with reference to 58390 articles published in trusted scientific databases in English and Persian, which were screened using PRISMA method. The findings show that in order to achieve decision maturity, site selection as a strategic decision can be adopted in three stages of screening, ranking and optimization respectively. The purpose of decision-making, the required data and the methods used in each step are categorized. Finally, focusing on optimization studies is suggested as the direction of future studies in this field.

Keywords

Meta-Synthesis, Underground gas storage, Site Selection, Strategic decision.

1. Assistant professor, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran. Corresponding Autho. Dabbaghi@ut.ac.ir



فرا ترکیب تصمیم راهبردی: مکان‌یابی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

آزاده دباغی^۱

چکیده

ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز با بیش از یک قرن قدمت، به‌عنوان راهکاری جهانی برای تنظیم عرضه و تقاضا در سیستم انتقال گاز طبیعی در نظر گرفته می‌شود. لزوم توجه به معیارهای متعدد ژئولوژیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی از یک‌سو و از سوی دیگر عدم قطعیت‌های فراوان در این زمینه و نیز اهمیت انتخاب ساختارهای مناسب زیرزمینی برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی آن را به مسئله‌ای راهبردی تبدیل نموده که در ادبیات موضوع بیش‌ازپیش موردتوجه قرار گرفته است. با توجه به وجود شکاف مطالعاتی در خصوص احصاء رویکردهای ارزیابی و مکان‌یابی، پژوهش حاضر با رویکرد کیفی و استفاده از روش فرا ترکیب، امکان ارائه نگرش سیستماتیک به موضوع مکان‌یابی و ارائه ترکیب تفسیری از یافته‌های مطالعات پیشین در این زمینه را فراهم نموده است. این پژوهش با رجوع به ۵۸۳۹۰ مقاله از منابع معتبر داخلی و خارجی منتشر شده در پایگاه‌های اطلاعات علمی به زبان انگلیسی و فارسی صورت گرفت که با استفاده از روش پریسما غربال شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که به‌منظور دستیابی به بلوغ تصمیم، مکان‌یابی به‌عنوان تصمیمی راهبردی را می‌توان به‌ترتیب در سه مرحله «غربالگری»، «رتبه‌بندی» و «بهینه‌سازی» اتخاذ نمود. هدف از تصمیم‌گیری، داده‌های موردنیاز و روش‌های مورد استفاده در هر مرحله مشخص شده است. در پایان تمرکز بر مطالعات «بهینه‌سازی» به‌عنوان جهت‌گیری مطالعات آتی در این زمینه پیشنهاد شده است.

واژگان کلیدی: فرا ترکیب، ذخیره‌سازی گاز، مکان‌یابی، گاز طبیعی، تصمیم راهبردی

مقدمه

طراحی خطوط انتقال گاز طبیعی به لحاظ فنی دارای ظرفیت مشخص بوده و به لحاظ اقتصادی زمانی توجیه‌پذیر است که بتواند تقاضای معینی را به مدت طولانی تأمین نماید (Flanigan, 1995). با توجه به وجود تغییرات در تقاضای گاز (مانند نوسانات فصلی) ایجاد خطوط انتقال اضافی جهت تأمین ظرفیت مازاد در زمان‌های اوج مصرف اقدامی پرهزینه است. ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی مازاد و بازیافت آن در زمان کمبود راهکاری جهانی برای این موضوع بوده و به‌عنوان جزئی مهم از سیستم انتقال گاز طبیعی در کشورهای توسعه‌یافته صنعتی مدنظر قرار می‌گیرد (Bujok et.al, 2019).

نگاهی به ترازنامه هیدروکربوری کشور نشان می‌دهد که بالغ بر ۷۹ درصد از بخش صنعتی، ۱۳ درصد از بخش حمل‌ونقل و ۳۲ درصد از بخش کشاورزی کشور وابستگی مستقیم به مصرف گاز دارد (مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ۱۳۹۸)؛ با احتساب اثرگذاری غیرمستقیم گاز در تأمین برق برای بخش‌های مختلف مصرفی به‌طور کلی می‌توان ۷۰ درصد از بخش مصرفی کشور را وابسته به گاز قلمداد نمود. ادامه روند افزایشی مصرف در بخش‌های مختلف کشور باعث می‌شود بروز هرگونه ناترازی در عرضه و تقاضای گاز طبیعی در کشور به موضوعی جدی در هریک از بخش‌های مصرف و به‌تبع آن چالش تأمین پایدار انرژی در کشور منجر شود. ادامه این روند در سمت تقاضا به‌ویژه در ماه‌های سرد سال، روند تراز منفی گاز را افزایش داده و نه‌تنها در کوتاه‌مدت کشور را برای تأمین نیازهای داخلی و انجام تعهدات صادراتی به کشورهای همسایه با مشکلاتی روبرو خواهد کرد بلکه ایران را برای رفع ناترازی در فصول سرد به اتخاذ سیاست‌هایی در جانب عرضه مانند تبدیل‌شدن به واردکننده گاز وادار می‌نماید (صابری و دیگران، ۱۴۰۲). در کنار راهکارهایی مانند پیاده‌سازی طرح‌های افزایش تولید و بهینه‌سازی مصرف، بسیاری از کشورها نسبت به توسعه ذخایر گاز طبیعی اقدام نموده‌اند به‌گونه‌ای که متوسط ظرفیت ذخیره‌سازی گاز در دنیا ۱۱ درصد از کل مصرف گاز است و این رقم در کشورهای اروپایی به ۲۳ درصد می‌رسد. این در حالی است که در کشور ما علی‌رغم وجود منابع عظیم گازی و همچنین ساختارهای زیرزمینی مناسب برای ذخیره‌سازی گاز (مانند مخازن هیدروکربوری تخلیه‌شده) میزان ظرفیت ذخیره‌سازی حدود یک درصد از کل مصرف گاز طبیعی در کشور است (حسینی و یونس‌آرا، ۱۳۹۲).

از این‌رو با هدف تنظیم عرضه و تقاضا (تأمین گاز مصرفی در نقاط مختلف کشور در زمان افزایش تقاضا در فصول سرد سال و پایداری صادرات گاز و تأمین خوراک

واحدهای پتروشیمی) و همچنین به‌منظور تضمین امنیت عرضه (تعادل شبکه گازرسانی در بروز حوادث غیرقابل‌پیش‌بینی) و نیز با هدف تداوم تأمین گاز موردنیاز تزریق به مخازن نفتی با هدف ازدیاد برداشت، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز به‌عنوان یکی از موضوعات راهبردی در بخش انرژی کشور مطرح است (صابری و دیگران، ۱۴۰۲). انتقال گاز از مخازن مشترک به مخازن مستقل و همچنین کاهش انتشار آلاینده‌های ناشی از سوخت جایگزین در نیروگاه‌ها نیز می‌تواند به‌عنوان اهداف ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در کشور مطرح شود.

ذخیره‌سازی گاز طبیعی به روش‌های مختلفی مانند ^۱ LNG، CNG، GTL نیز انجام می‌پذیرد (Khomehchi et. al., 2013) لیکن برای ذخیره‌سازی در احجام بزرگ روش‌های زیرزمینی ذخیره‌سازی گاز طبیعی از مزیت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است (دوراندیش و چاکری، ۱۳۹۲) از اولین تجربه جهانی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در سال ۱۹۱۵ میلادی در میدان گازی ولند^۲ در کانادا (Al-Shafi et.al., 2023)، براساس آخرین آمار پایگاه داده اتحادیه بین‌المللی گاز تا سال ۲۰۲۱ تعداد بیش از ۹۳۶ تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی با حجم گاز عملیاتی^۳ بالغ بر bcm ۴۱۶ ساخته شده است. اصولاً فرایند تزریق گاز طبیعی تولید شده به سه دسته از ساختارهای زیرزمینی صورت می‌پذیرد: ۱. مخازن هیدروکربوری تخلیه‌شده ۲. مغارهای نمکی^۴ و ۳. آبخوان‌ها^۵ که در این میان مخازن هیدروکربوری و به‌ویژه مخازن گازی تخلیه‌شده با توجه به مزایای عملیاتی و اقتصادی بیشترین سهم (شکل ۱) را دارا هستند.

بررسی پژوهش‌ها در حوزه طرح‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز نشان می‌دهد که با توجه به گسترش نیاز جهانی به پیک‌سای^۶ گاز طبیعی، توجه فزاینده‌ای به مطالعات مکان‌یابی شده است (Guo et.al., 2022). با عنایت به اینکه انتخاب مکان هدف برای ذخیره‌سازی گاز به‌جز در نظر گرفتن معیارهای زمین‌شناسی مانند مشخصات مخزن و پوش‌سنگ^۷، ریسک‌های ناشی از وجود شکاف و... مستلزم در نظر گرفتن ملاحظات مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی نیز است (Peng et.al., 2024)؛ این برآوردها دارای عدم قطعیت‌های فراوان بوده و نه‌تنها مربوط به پیش از زمان احداث یک

1. Liquefied Natural Gas

2. Welland

3. working gas volume

4. Salt caverns

5. Aquifers

6. Peak shaving

7. Caprock properties

شکل ۱. سهم انواع مختلف مخازن ذخیره‌سازی از ظرفیت ذخیره‌سازی گاز تا سال

۲۰۲۱



منبع: پایگاه داده اتحادیه بین‌المللی گاز

سیستم تزریق و بازیافت گاز بلکه مستلزم برآوردهایی تا پایان اجرای پروژه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز است که مستلزم در نظر گرفتن مشخصات سطح‌الارضی مانند مشخصات هیدرولیکی سیستم تزریق و بازیافت گاز، کمپرسورها، فاصله از مراکز مصرف و مراکز تأمین گاز و... می‌باشد (He et.al., 2024; Guo et. al., 2022)؛ ازاین‌رو یافتن مکان مناسب و بهینه برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به‌عنوان تصمیمی پیچیده و راهبردی، با توجه به عدم احصاء چارچوب‌های جامع ارزیابی همچنان به‌عنوان یک چالش بزرگ در ادبیات جهانی موضوع باقی مانده است (He et.al., 2024). در راستای این شکاف مطالعاتی، هدف اصلی این پژوهش فراهم کردن نگرش سیستماتیک برای ارائه ترکیب تفسیری از یافته‌های پژوهش‌های پیشین با استفاده از روش فراترکیب (Erwin et. al., 2011) است. شایان‌ذکر است که فراترکیب، فرایندی پیچیده و آگاهانه است که با مرور ادبیات متفاوت است زیرا بر تحلیل و تفسیر یافته‌های سایر مطالعات کیفی تمرکز دارد (میقانی‌نژاد و دیگران، ۱۴۰۰).

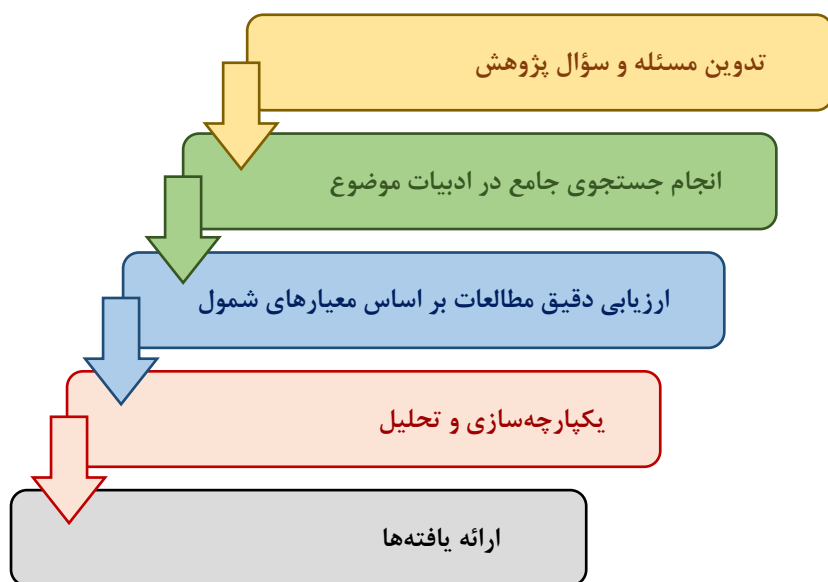
با توجه به موارد اشاره شده ابتدا روش فراترکیب و چگونگی به‌کارگیری آن در بخش روش‌شناسی آمده است. با توجه به مراحل روش فراترکیب، یافته‌های هر مرحله در بخش یافته‌ها ارائه شده است. ارائه ترکیبی تفسیری از یافته‌ها و پیشنهادهایی برای

جهت گیری پژوهش های آتی در این زمینه در بخش بحث و نتیجه گیری آمده است.

روش شناسی

این پژوهش از منظر جهت گیری پژوهش، کاربردی؛ از لحاظ اهداف پژوهش، توصیفی؛ از نظر شیوه گردآوری اطلاعات، تحلیل اسناد؛ و از لحاظ نوع پژوهش کیفی است (دانایی فرد، الوانی و آذر، ۱۳۹۶) و با استفاده از روش فرا ترکیب به انجام رسیده است. در روش فرا ترکیب محقق به صورت سیستماتیک، یافته های حاصل از تحقیقات پیشین را بررسی و به صورت تفسیری ادغام می کند و چیزی بیش از مجموع اجزای تحقیقات یعنی تفسیر جدیدی از یافته ها را ارائه می کند (Sandelowski & Barroso, 2007) و از این حیث با مقالات مروری متفاوت است. از این رو در این پژوهش از روش فرا ترکیب برای ترکیب تحقیقات پیشین استفاده شده است. فرایند پژوهش در قالب مراحل شکل ۲ نمایش داده شده است.

شکل ۲. متدولوژی فرا ترکیب (برگرفته از Erwin et. al., 2011)



فرا ترکیب با وجود یک مسئله یا سؤال پژوهش آغاز می شود. مسئله اصلی در این پژوهش ذخیره زیرزمینی گاز طبیعی است. از میان موضوعات مختلف مطرح در این خصوص، سؤال اصلی پژوهش غربالگری و انتخاب مکان مناسب برای ذخیره سازی است.

در گام بعدی و به منظور جستجوی ادبیات موضوع، پایگاه داده Scopus (مشمول بر پایگاه داده‌های SID، Proquest و SPE، Springer، Web of Science، Sciencedirect) و Magiran به عنوان جامعه آماری موردبررسی قرار گرفت. پارامترهای جستجوی نظام‌مند ادبیات موضوع در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای جستجو

پایگاه داده	Magiran و SID، SCOPUS
فیلدهای جستجو	عنوان چکیده واژگان کلیدی
کلید واژه	ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز
معیارهای شمول	زمان: بدون محدودیت نوع مستند: مقاله مجله و مقاله کنفرانس زبان: انگلیسی و فارسی نوع منبع: مجله و کتابچه کنفرانس

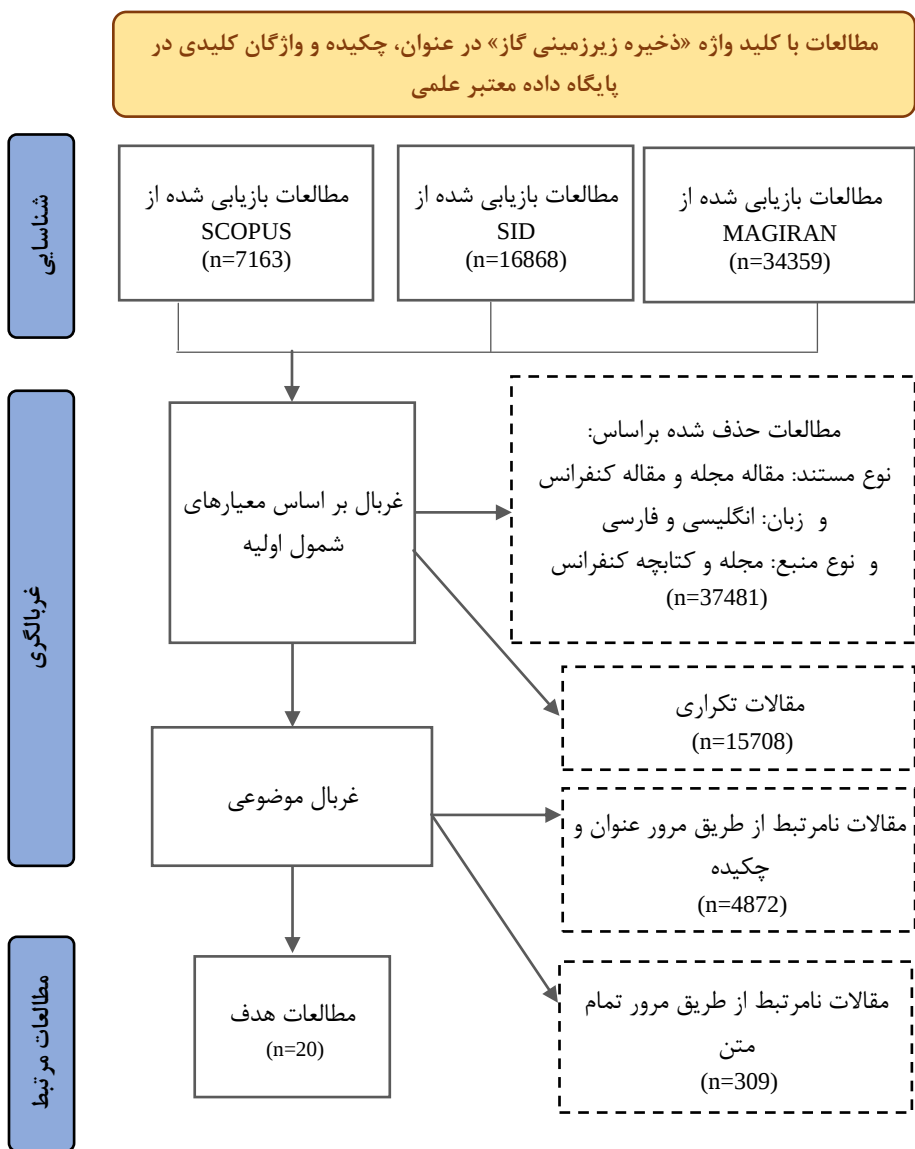
در مرحله بعدی مطالعات جمع‌آوری‌شده براساس معیارهای شمول مندرج در جدول ۱، موردارزیابی قرار گرفت. بدین‌منظور و برای کاهش تعداد مطالعات از روش غربال پریسما^۱ (Page et. al., 2021) مطابق شکل ۳ استفاده شده است. بدین‌ترتیب ابتدا براساس معیارهای شمول اولیه (جدول ۱) تعداد کثیری از مطالعات حذف شد. پس‌از آن با توجه به سؤال اصلی پژوهش غربال موضوعی با هدف مکان‌یابی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز مدنظر قرار گرفت. از این‌رو تمرکز اصلی بر مطالعاتی بوده که به‌نوعی مرتبط با انتخاب ساختارهای زیرزمینی، اولویت‌بندی نقاط هدف، رتبه‌بندی و غربال مکان‌های کاندید بوده است. با توجه به اینکه در برخی مقالات ذخیره‌سازی زیرزمینی سایر گازها از جمله دی‌اکسیدکربن و هیدروژن نیز مدنظر بوده است، از مقالاتی که تمرکز صرف آن‌ها بر گازهایی به‌جز گاز طبیعی بوده است صرف‌نظر شده است.

به لحاظ توصیفی، با بررسی مقالات جستجو شده در طول سال‌های مختلف روند تعداد مقالات در شکل ۴ نمایش داده شده است. از نظر ارتباطات استنادی بررسی مطالعات نشان می‌دهد مهمترین نشریاتی که به این حوزه موضوعی پرداخته‌اند به‌ترتیب International Journal Of Hydrogen Energy، International Journal Of

1. PRISMA

Greenhouse Gas Control و Energy Procedia بوده‌اند. همچنین در شکل ۵ سهم ۱۵ کشور برتر به لحاظ تعداد پژوهش‌ها در این حوزه به نمایش درآمده است.

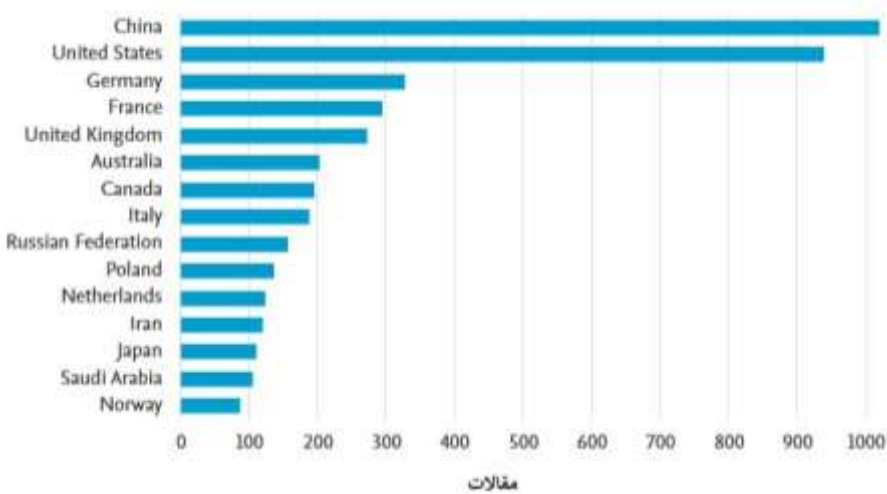
شکل ۳. نمودار غربال مطالعات براساس الگوی پریسما



شکل ۴. روند چاپ مقالات



شکل ۵. سهم کشورها



یافته‌ها

با توجه به مراحل روش فراترکیب و غربال صورت پذیرفته شکل ۳، تعداد ۲۰ مقاله به‌عنوان مطالعات هدف استخراج گردید که در جدول ۲ مشخصات کلی آن‌ها درج شده است. در فاز یکپارچه‌سازی و تحلیل، مقالات مذکور مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و یافته‌های آن در این بخش ارائه می‌شود.

با رویکرد اهداف تصمیم گیری، بسیاری از پژوهش ها در حوزه مکان یابی به منظور غربالگری و رتبه بندی انجام شده اند؛ این دسته از پژوهش ها تمرکز بیشتری بر معیارهای فنی دارند و هدف اصلی آن ها غربال اولیه و در نظر گرفتن مکان هایی است که حائز پارامترهای فنی/ ژئولوژیکی لازم هستند. با توجه به اینکه مشخصات گاز مورد نیاز، منابع گازی و فواصل آن و نیز پارامترهایی مانند فشار و جریان نمی تواند (به لحاظ روش شناختی) در این دسته از پژوهش ها تعیین شود، برآورد معیارهای غیرفنی با ابهامات و مفروضات متعددی صورت می پذیرد. در این دسته از مطالعات در صورت نیاز به امکان سنجی های اقتصادی به سناریوهای سطح الارضی مفروض بسنده شده و براساس آن برآورد معیارهای اقتصادی با عدم قطعیت بالا انجام می شود. به عنوان نمونه زنگنه و دیگران (۱۳۹۲) فاصله از مراکز ثقل مصرف را به عنوان معیاری برای اولویت بندی مخازن در نظر گرفته اند لیکن با توجه به اینکه در این مرحله از تصمیم گیری اینکه از کدام منبع تولید می توان گاز را تأمین و به چه بخش هایی از مصرف تخصیص داد مشخص نیست، «حداقل فاصله مخزن تا ۱۹ شهر پرمصرف کشور^۱» به عنوان معیار نزدیکی به مصرف در نظر گرفته شده است که با عدم قطعیت فراوانی مواجه است. خامه چی و دیگران (۲۰۱۳) برای محاسبه هزینه های سرمایه ای^۲ و عملیاتی^۳ و نیز عسکری و دیگران (۲۰۲۰) برای محاسبه ارزش فعلی خالص^۴ سناریوهای مختلفی در شرایط با/ بدون ژنراتور و با ظرفیت های مختلف کمپرسور برای برآورد هزینه تأسیسات سطح الارضی مفروض داشتند. در مقابل، دسته دیگری از پژوهش ها با هدف بهینه سازی تصمیم در این حوزه به انجام رسیده اند. این پژوهش ها، با توجه به قابلیت های تکنیک های مدل سازی ریاضی و تحقیق در عملیات که در آن ها به کار گرفته می شوند، امکان در نظر گرفتن پارامترهای مختلف سطح الارضی مانند فواصل و ظرفیت را دارا بوده و چنین داده هایی در فرایند انتخاب بهترین مکان های ذخیره سازی و تخصیص منابع گازی مازاد به مکان های ذخیره سازی دخیل شده اند.

در روش های غربالگری و رتبه بندی به لحاظ ماهیت روش های تصمیم گیری امکان در نظر گرفتن چند هدف وجود ندارد؛ مثلاً نمی توان پتانسیل های زیرزمینی ذخیره سازی را به گونه ای رتبه بندی کرد که پیک سایی به عنوان هدف در نظر گرفته شود

۱. شهرهای: تهران، مشهد، اصفهان، کرج، تبریز، شیراز، اراک، ارومیه، کرمانشاه، رشت، اردبیل، شهریار، کرمان، خرم آباد، بجنورد، همدان، ساری، سنندج

2. CAPEX
3. OPEX
4. NPV

و درعین حال هدف صادراتی نیز در اولویت قرار گیرد؛ چرا که هرکدام از این دو هدف مبنا قرار گیرد اولویت‌بندی کاندیدها تغییر می‌کند. لیکن امکان در نظر داشتن بیش از یک هدف در روش‌های بهینه‌سازی وجود دارد (مانند Chen et. al., 2021).

برخی از پژوهش‌ها از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ برای رتبه‌بندی مکان‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی استفاده نموده‌اند. مزیت به‌کارگیری این سیستم برای رتبه‌بندی آن است که امکان غربالگری اولیه را نیز با استفاده از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در نقشه‌های جغرافیایی فراهم می‌نماید (مانند زنگنه و دیگران، ۱۳۹۲؛ Sabzevari & Delavar, 2017).

جدول ۲. خلاصه مشخصات مطالعات برگزیده

منبع	هدف مطالعه	کیس پیاده‌سازی
زنگنه و دیگران، ۱۳۹۲	چهار مخزن کاندید با در نظر گرفتن پانزده معیار و یا جمع‌آوری نظرات خبرگان رتبه‌بندی شدند.	چهار ساختار ذخیره‌سازی زیرزمینی (سراج قه، یورتشای ورامین، شورجه خراسان و گنبد نمکی نصرآباد کاشان) - ایران
رسول‌نژاد و غیائی، ۱۳۹۶	با در نظر گرفتن میزان تولید و واردات گازطبیعی، مصارف بخش‌های مختلف اعم از خانگی، صنعت، حمل‌ونقل و... مدلی برای تخصیص گاز با هدف ماکزیمم نمودن مجموع گازطبیعی ذخیره شده ارائه شد.	چهار ساختار ذخیره‌سازی زیرزمینی (سراج قه، یورتشای ورامین، شورجه خراسان و گنبد نمکی نصرآباد کاشان) - ایران
Kravanja & Zlender, 2010	مدلی با هدف مینیم‌سازی هزینه ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز با در نظر گرفتن مشخصات طراحی و ژئومکانیکی توسعه داده شد.	اسلوونی
Khamehchi et. al., 2013	ذخیره‌سازی زیرزمینی گازطبیعی و دیگر روش‌های ذخیره‌سازی سطحی مانند LNG رتبه‌بندی شدند.	-
Sabzevari & Delavar, 2017	مکان مناسب برای ذخیره‌سازی گازطبیعی با استفاده از معیارهای شناسایی شده و نظرات خبرگان انتخاب شد.	ایران
Demirel et. al., 2017	با استفاده از معیارهایی مانند هزینه، زمان،	تعداد چهار کاندید برای

1. Geographic Information System(GIS)

منبع	هدف مطالعه	کیس پیاده‌سازی
	ریسک و برخی فاکتورهای اجتماعی و زیست‌محیطی (۲۰ معیار در قالب شش دسته معیار اصلی) انتخاب مکان مناسب ذخیره‌سازی صورت پذیرفت.	ذخیره‌سازی زیرزمینی - ترکیه
Matos et. al., 2019	تکنولوژی‌های مختلف ذخیره‌سازی زیرزمینی انرژی در مقیاس وسیع مانند ذخیره‌سازی هوای فشرده، انرژی حرارتی، گاز طبیعی و هیدروژن در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت.	-
Osieczko et. al., 2019	ساختارهای زیرزمینی کاندید براساس معیارهای پنج‌گانه تعیین شده در پژوهش، رتبه‌بندی شدند.	تعداد نه ساختار زیرزمینی کاندید - لهستان
Zheng et. al., 2020	تعدادی معادن نمکی به لحاظ ژئولوژیکی و سطح‌الارضی با هدف ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی ارزیابی شدند.	معادن نمکی در سه ناحیه (به‌عنوان بازار مصرف عمده گاز) - چین
Askari et. al., 2020	شبیه‌سازی دینامیک مخزنی برای ساختارهای زیرزمینی کاندید در طول یک‌سیکل کامل تزریق و استخراج گاز انجام و سپس رتبه‌بندی شدند.	چهار ساختار زیرزمینی کاندید - ایران
Zhou et. al., 2020	با در نظر گرفتن مشخصات فنی، اقتصادی و هیدرولیکی و با هدف کاهش هزینه سرمایه‌گذاری مشخصات و شبکه خط لوله موردنیاز برای تزریق و استحصال گاز ذخیره و جریان و فشار بهینه برآورد شد.	دو کیس واقعی - چین
Chen et. al., 2021	باتوجه به عدم قطعیت تقاضا در شبکه گاز، مدل تصمیم‌گیری ریاضی با توجه به پیک‌سای گاز توسعه داده شده است. معادلات جریان گاز، کمپرسورها و روابط ترمودینامیک مربوط به مشخصات گاز در این مدل در نظر گرفته شد.	کیس واقعی
Resende et.al., 2021	مدلی برای برنامه‌ریزی بلند/ میان‌مدت ذخیره‌سازی گاز و تعیین بهینه سیاست عرضه و ذخیره‌سازی گاز ارائه شد. عدم قطعیت تصادفی در تقاضا و قیمت عرضه در این مدل در نظر گرفته شد.	برزیل
Zhou et. al., 2021	مدلی برای تخصیص در شبکه گاز با در نظر	دو کیس واقعی چین

منبع	هدف مطالعه	کیس پیاده‌سازی
	گرفتن نقاط ذخیره‌سازی زیرزمینی و طراحی سطح‌الارضی با هدف مینیمم‌سازی هزینه ارائه شد.	
Zhou et. al., 2021	با هدف مینیمم‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری خط لوله، نرخ بهینه جریان گاز و مشخصات خطوط لوله موردنیاز تعیین شد.	چین
Guo et. al., 2022	با در نظر گرفتن مشخصات ژئولوژیکی و طرح تزریق و استخراج گاز در طول دوره عملیاتی موردنظر و نیز با لحاظ محدودیت‌های تزریق، نرخ جریان گاز، فشار و... بهترین مکان‌های ذخیره‌سازی به‌گونه‌ای انتخاب شده است که جمع سود حاصله ماکزیمم شود.	چین
He et. al, 2024	۴۴ غیرمعیار در شش دسته معیار اصلی برای ارزیابی و رتبه‌بندی بلوک‌های کاندید مورد استفاده قرار گرفتند.	تعداد پنج بلوک مختلف از چهار حوضه مختلف - چین
Lewandowska-Smierchalska et. al., 2024	مکان‌های بالقوه ذخیره‌سازی گاز طبیعی با در نظر گرفتن امکان ذخیره‌سازی زیرزمینی همزمان دی‌اکسیدکربن به‌عنوان گاز پایه با در نظر گرفتن یازده معیار ژئولوژیکی مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار گرفت.	شش ساختار زیرزمینی - لهستان
Peng et. al., 2024	زنجیره تأمین گاز طبیعی با در نظر گرفتن ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز بهینه‌سازی شده و نرخ بهینه جریان گاز، انتخاب یا عدم‌انتخاب مراکز ذخیره‌سازی و ظرفیت آن‌ها و نیز تعداد و فشار ورودی و خروجی کمپرسورها تعیین می‌شود. هدف کاهش مجموع هزینه‌های انتقال، ذخیره‌سازی، انتشار کربن و کمبود گاز شبکه در نظر گرفته شد.	مثالی از ادبیات موضوع - چین
Li et. al., 2024	تخصیص بهینه حجم تزریق به نقاط ذخیره‌سازی با هدف مینیمم‌سازی اختلاف فشار مخزن و مینیمم‌سازی کل مصرف انرژی کمپرسورها در نظر گرفته شد.	مخزن گازی تخلیه‌شده - چین

در پژوهش‌هایی که با هدف رتبه‌بندی به انجام رسیده‌اند ظرفیت مکان‌های ذخیره‌سازی عموماً به‌عنوان شاخص مثبت در نظر گرفته شده است (خامه‌چی و دیگران، ۲۰۱۳؛ Lewandowska-Śmierchalska et. al., 2024) به‌عبارت بهتر هرچقدر یک ساختار زیرزمینی ظرفیت بیشتری برای نگهداری گاز داشته باشد، دارای امتیاز بالاتر قلمداد شده است (Demirel et. al., 2017؛ زنگنه و دیگران، ۱۳۹۲). این در حالی است که به‌صورت عملیاتی ممکن است یک ساختار زیرزمینی با ظرفیت کوچکتر برای ناحیه‌ای با تقاضای پایین‌تر یا دسترسی به منبع گازی کوچکتر یا نیاز به چرخه کوتاه‌مدت‌تری از تزریق - برداشت به مراتب انتخاب مناسب‌تری باشد. لذا در مرحله رتبه‌بندی بهتر است صرفاً رتبه‌بندی اولیه فنی صورت پذیرد و در این مرحله مکان‌های بالقوه به‌دلیل ملاحظات ظرفیت یا اقتصادی حذف نگردند و در مرحله بهینه‌سازی تخصیص بهینه ظرفیت برای مکان‌های بالقوه صورت پذیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به جستجوی جامع انجام شده در ادبیات موضوع، یافته‌های حاصل از مطالعات پیشین موردتحلیل قرار گرفت. به‌منظور ارائه ترکیب تفسیری از یافته‌ها در این بخش پژوهش‌های غربال شده در حوزه مکان‌یابی برای ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی در سه مرحله اصلی تصمیم‌گیری مطابق جدول ۳ دسته‌بندی شدند. شایسته است که برای دستیابی به تصمیم راهبردی در خصوص انتخاب بهینه مکان ذخیره‌سازی مراحل غربال، رتبه‌بندی و بهینه‌سازی طی شود (شکل ۶). برای دستیابی به بلوغ تصمیم، انجام مراحل قبلی و جمع‌آوری داده‌های موردنیاز برای ورود به مرحله بعدی تصمیم‌گیری ضروری است. بدیهی است میزان داده‌های موردنیاز و پیچیدگی تصمیم‌گیری در مراحل بالاتر افزایش می‌یابد؛ گرچه در برخی پژوهش‌ها ممکن است مراحل قبلی تصمیم‌گیری به‌صورت مستقیم در متن پژوهش گزارش نگردد. به‌عنوان نمونه در پژوهشی آبخوان‌های مزوزوئیک واقع در شمال غربی لهستان با عمق کمتر از دو هزار متر به‌عنوان پیش‌فرض غربال شده و در متن پژوهش به‌عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری مورد رتبه‌بندی قرار گرفته‌اند (Lewandowska-Śmierchalska et. al., 2024). به الگوی کلی مراحل سه‌گانه تصمیم‌گیری پیش‌تر نیز برای انتخاب مکان مناسب ذخیره‌سازی زیرزمینی هیدروژن (Safari et. al., 2023) و دی‌اکسیدکربن (Callas et.al., 2022) اشاره شده است.

جدول ۳. دسته‌بندی مراحل تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی

مرحله تصمیم‌گیری	منبع	روش
۱ غربالگری	Matos et. al., 2019	پارامترهای غربالگری (تصمیم‌گیری غیرجبرانی) برای انواع ساختارهای زیرزمینی مورد بحث قرار گرفته است.
۲ رتبه‌بندی	زنگنه و دیگران، ۱۳۹۲	تصمیم‌گیری چندشاخصه جبرانی - تاپسیس ^۱ - پیاده‌سازی شده در سیستم اطلاعات جغرافیایی
	Khamehchi et. al., 2013	تصمیم‌گیری چند شاخصه جبرانی - تاپسیس
	Sabzevari & Delavar, 2017	تصمیم‌گیری چند شاخصه جبرانی AHP ^۲ فازی و OWA ^۳ - پیاده‌سازی شده در سیستم اطلاعات جغرافیایی
	Askari et. al., 2020	محاسبه ارزش فعلی خالص
	Zheng et. al., 2020	-
	He et. al, 2024	تصمیم‌گیری چندشاخصه جبرانی - AHP و FCE ^۴
	Osieczko et. al, 2019	تصمیم‌گیری چندشاخصه جبرانی - SAW ^۵
	Lewandowska-Śmierchalska et. al., 2024	تصمیم‌گیری چندشاخصه جبرانی - AHP
	Demirel et. al., 2017	تصمیم‌گیری چندشاخصه جبرانی - انتگرال چوکوئ ^۶
۳ بهینه‌سازی	رسول‌نژاد و غیاثی، ۱۳۹۶	برنامه‌ریزی خطی - حل با نرم‌افزار لینگو
	Peng et. al., 2024	مدل MINLP ^۷ - حل با نرم‌افزار GAMS
	Zhou et. al., 2021	مدل MINLP - حل با نرم‌افزار GAMS
	Zhou et. al., 2020	مدل MINLP - الگوریتم ژنتیک
	Li et. al., 2024	مدل دولایه‌ای چندهدفه - الگوریتم ژنتیک
	Guo et. al., 2022	مدل MILP ^۸
	Chen et. al., 2021	مدل‌سازی چندهدفه غیرخطی تصادفی
	Resende et.al., 2021	تحقیق در عملیات (برنامه‌ریزی پویا)
	Zhou et. al., 2021	مدل MINLP - حل GAMS/IPOPT
	Kravanja & Zlender, 2010	مدل‌سازی ریاضی غیرخطی

1. TOPSIS

2. Analytic hierarchy process (فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی)

3. Ordered Weighted Average

4. Fuzzy Comprehensive Evaluation

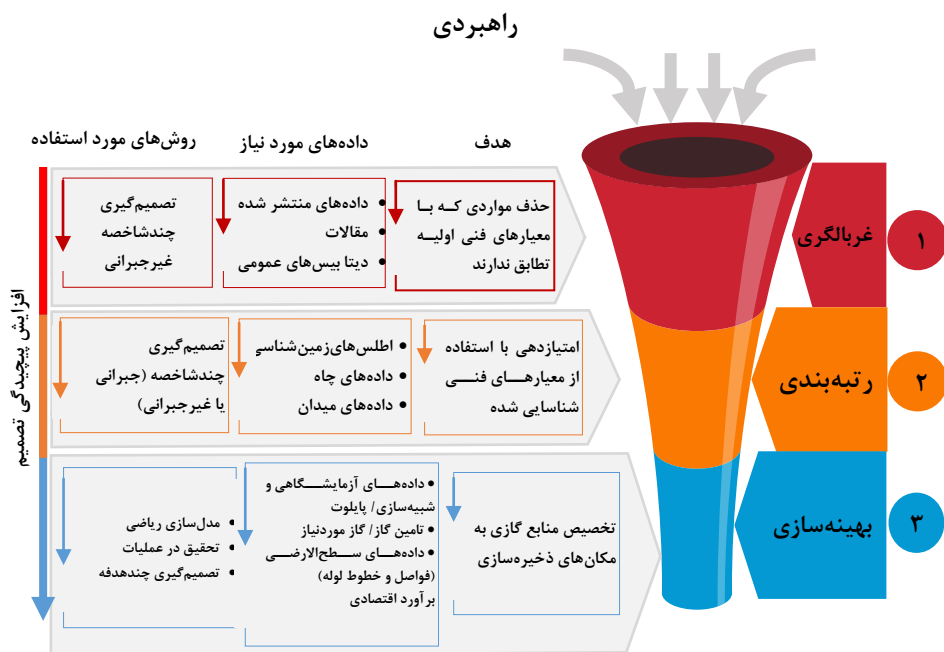
5. Simple Additive Weighting (مجموع ساده وزنی)

6. Choquet Integral (CI)

7. Mixed Integer NonLinear Programming (مدل‌سازی غیر خطی مختلط عدد صحیح)

8. Mixed Integer Linear Programming

شکل ۶. مراحل انتخاب بهینه مکان ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز طبیعی به‌عنوان تصمیم



با عنایت به ضرورت و اهمیت ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز در کشور مطالعات مختلفی با هدف غربالگری و رتبه‌بندی (مرحله اول و دوم) برای انتخاب ساختارهای زیرزمینی مناسب صورت پذیرفته است. لیکن استفاده از روش‌های تحقیق در عملیات، مدل‌سازی ریاضی و بهینه‌سازی چندهدفه در مطالعات داخلی به‌جز پژوهش انجام شده توسط رسول‌نژاد و غیاثی (۱۳۹۶) موردتوجه قرار نگرفته است. با توجه به شکاف مطالعاتی موجود به‌عنوان جهت‌گیری مطالعات آتی در این زمینه پیشنهاد می‌شود آنچه در این پژوهش به‌عنوان مرحله سوم تصمیم‌گیری با هدف بهینه‌سازی و تخصیص منابع گازی به مکان‌های ذخیره‌سازی تبیین شده است موضوع پژوهش‌های آتی در صنعت نفت و گاز کشور قرار گیرد.

منابع

اتحادیه بین‌المللی گاز، پایگاه داده (http://ugs.igu.org/index.php/ugs_list)
 حسینی، میراحمد؛ یونس‌آرا، عبدالله (۱۳۹۲) چالش‌ها و راهکارهای پیشبرد پروژه‌های ذخیره‌سازی گاز طبیعی در کشور، *اکتشاف و تولید نفت و گاز*، شماره ۱۰۸.
 دانایی‌فرد، حسن؛ الوانی، سیدمهدی؛ آذر، عادل (۱۳۹۶) روش‌شناسی پژوهش کمی در

- مدیریت: رویکردی جامع، نشر اشراقی صفار چاپ ۱۲.
- دوراندیش، محسن؛ چاکری، محمدحسین (۱۳۹۲) استراتژی توسعه ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ایران، *اکتشاف و تولید نفت و گاز*، شماره ۱۰۸.
- رسول‌نژاد، علیرضا و غیاثی مجتبی (۱۳۹۶). بهینه‌سازی حجم ذخیره‌سازی گاز طبیعی ایران با رویکرد برنامه‌ریزی خطی، *پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۳، شماره ۷، صص ۷۹-۱۰۴.
- زنگنه، مهدی؛ دلاور، محمودرضا؛ مشیری، بهزاد؛ قوام‌پور، سعید و عفتی، میثم (۱۳۹۲). اولویت‌بندی مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی گازطبیعی با استفاده از سیستم‌های اطلاعات مکانی و فن رتبه‌بندی براساس تشابه با حالت آرمانی، *مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، سال ۱، شماره ۲.
- صابری، علی؛ ظفریان، حبیب‌اله؛ رحیمی‌نژاد، صادق (۱۴۰۲) مسائل راهبردی بخش انرژی در برنامه هفتم توسعه - ذخیره‌سازی گازطبیعی، *دفتر مطالعات انرژی صنعت و معدن مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی*.
- مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی (۱۳۹۸) *ترازنامه هیدروکربوری کشور*.
- میقانی‌نژاد، علیرضا؛ تسلیمی محمدسعید؛ محمدی، مهدی؛ الیاسی، مهدی (۱۴۰۰) مرزگستری در پروژه‌های کلان پژوهشی شرکت ملی نفت: فراترکیب ادبیات موضوعی و ارائه جهت‌گیری تحقیقات آتی، *مطالعات راهبردی در صنعت نفت و انرژی*، سال ۱۳، شماره ۵۰، ۲۳-۴۲.
- Al-Shafi, M., Massarweh, O., Abushaikha, A. S., & Bicer, Y. (2023). A review on underground gas storage systems: Natural gas, hydrogen and carbon sequestration. *Energy Reports*, 9, 6251-6266.
- Askari, A. A., Behrouz, T., & Motahhari, S. M. (2020). Ranking of Candidates for Underground Gas Storage Structures under Uncertainties Using Flow Simulation: West of Iran as a Case study. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 10(1), 37-45.
- Bujok, P., Klempa, M., Kunz, A., Porzer, M., Rado, R., Roček, E., & Ryba, J. (2019). Ways of increasing natural gas storage capacity in underground gas storages in the Czech Republic. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 36(1), 113-123.
- Callas, C., Saltzer, S. D., Davis, J. S., Hashemi, S. S., Kovscek, A. R., Okoroafor, E. R., ... & Benson, S. M. (2022). Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. *Applied Energy*, 324, 119668.
- Chen, Q., Wu, C., Zuo, L., Mehrtash, M., Wang, Y., Bu, Y., ... & Cao, Y. (2021). Multi-objective transient peak shaving optimization of a gas

- pipeline system under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 147, 107260.
- Demirel, N. Ç., Demirel, T., Deveci, M., & Vardar, G. (2017). Location selection for underground natural gas storage using Choquet integral. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 368-379.
- Erwin, E. J., Brotherson, M. J., & Summers, J. A. (2011). Understanding qualitative metasynthesis: Issues and opportunities in early childhood intervention research. *Journal of Early Intervention*, 33(3), 186-200.
- Flanigan, O. (1995). *Underground gas storage facilities: Design and implementation*. Elsevier.
- Guo, W., Zhang, B., Liang, Y., Qiu, R., Wei, X., Niu, P., ... & Li, Z. (2022). Improved method and practice for site selection of underground gas storage under complex geological conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 108, 104813.
- He, Y., Zhao, G., Tang, Y., Song, J., & Chen, Y. (2024). Available target evaluation of underground gas storage based on AHP-FCE methods. *Geoenergy Science and Engineering*, 242, 213255.
- Khamehchi, E., Yousefi, S. H., & Sanaei, A. (2013). Selection of the best efficient method for natural gas storage at high capacities using TOPSIS method. *Gas Processing Journal*, 1(1), 9-18.
- Kravanja, S., & Žlender, B. (2010). Optimal design of underground gas storage. *WIT Transactions on The Built Environment*, 112, 389-399.
- Lewandowska-Śmierczalska, J., Nagy, S., & Uliasz-Misiak, B. (2024). Screening of sites for advanced natural gas and carbon dioxide storage in deep aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 132, 104078.
- Li, Z., Li, C., Jia, W., Chen, Y., Zhang, C., Xiao, H., & Pu, Z. (2024). Co-optimization method for injection strategy of underground natural gas storage integrating aboveground and underground parts. *Gas Science and Engineering*, 205376.
- Matos, C. R., Carneiro, J. F., & Silva, P. P. (2019). Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258.
- Osieczko, K., Gazda, A., & Malindžák, D. (2019). Factors determining the construction and location of underground gas storage facilities. *Acta Montanistica Slovaca*, 24(3).
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *bmj*, 372. doi: 10.1136/bmj. n71
- Peng, J., Zhou, J., Liang, G., Li, C., & Qin, C. (2024). Multi-period integrated scheduling optimization of complex natural gas pipeline network system with underground gas storage to ensure economic and

- environmental benefits. *Energy*, 131837.
- Resende, L. D. O., Valladão, D., Bezerra, B. V., & Cyrillo, Y. M. (2021). Assessing the value of natural gas underground storage in the Brazilian system via stochastic dual dynamic programming. *Top*, 29(1), 106-124.
- Sabzevari, A. R., & Delavar, M. R. (2017). Gis-based site selection for underground natural resources using fuzzy ahp-owa. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 463-468.
- Safari, A., Sugai, Y., Sarmadivaleh, M., & Imai, M. (2023). Screening and ranking Japanese gas fields for underground H2 storage potential: Impact of the reservoir drive mechanism. *Journal of Energy Storage*, 70, 107679.
- Sandelowski M, Barroso J. (2007) Handbook for Synthesizing Qualitative Research. New York: Springer Publishing Company.
- Zheng, Y., Wanyan, Q., Qiu, X., Kou, Y., Ran, L., Lai, X., & Wu, S. (2020). New technologies for site selection and evaluation of salt-cavern underground gas storages. *Natural Gas Industry B*, 7(1), 40-48.
- Zhou, J., Zhou, X., Liang, G., & Peng, J. (2020). An MINLP model for network layout of underground natural gas storage. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(4), 4619-4642.
- Zhou, J., Zhou, L., Liang, G., Wang, S., Fu, T., Zhou, X., & Peng, J. (2021). Optimal design of the gas storage surface pipeline system with injection and withdrawal conditions. *Petroleum*, 7(1), 102-116.
- Zhou, J., Fu, T., Chen, Y., Xiao, Y., Peng, J., & Liang, G. (2021). A mixed integer nonlinear programming model for optimal design of natural gas storage surface double-pipe network. *Journal of Energy Storage*, 44, 103379.

A Meta-Synthesis Approach for the Strategic Decision: Site Selection for Underground Natural Gas Storage

Azadeh Dabbaghi¹

The underground gas storage, with more than a hundred years of experience, is considered as a global solution to regulate supply and demand in the natural gas transmission system. Due to the importance of selecting suitable underground structures for natural gas storage, as well as the necessity of considering various geological, economic and environmental criteria with uncertainties, site selection has gained increasing attention as a strategic decision in the literature. This research was conducted using the meta-synthesis method with reference to 58390 articles published in trusted scientific databases in English and Persian, which were screened using PRISMA method. The findings show that in order to achieve decision maturity, site selection as a strategic decision can be adopted in three stages of screening, ranking and optimization respectively. The purpose of decision-making, the required data and the methods used in each step are categorized. Finally, focusing on optimization studies is suggested as the direction of future studies in this field.

Keywords: Meta-Synthesis, Underground gas storage, Site Selection, Strategic decision.

1. Assistant professor, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.
Email: Dabbaghi@ut.ac.ir, Corresponding Author