بررسی و انتخاب غار طبیعی مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت‌خام با استفاده از ترکیب دو روش FAHP و TOPSIS

امیر سلطان‌علیزاده، احمد رمضان‌زاده، سید محمّد اسماعیل جلالی؛
دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکدهٔ مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

تاریخ: دریافت ۹۱/۹/۲۰ **پذیرش:** ۹۲/۸/۵

چکیده

طی سال‌های اخیر بحران مالی دنیا باعث افزایش قیمت بسیاری از کالاها از جمله مواد هیدروکربوری شده است. این اتفاق بار دیگر اهمیت استراتژیک ذخیره‌سازی نفت‌خام را نشان می‌دهد. با عنایت به جای‌گاه ویژه نفت در اقتصاد ملی کشور، توسعهٔ صنعت ذخیره‌سازی یکی از راهکارهای کنترل این گونه بحران‌ها است. ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت‌خام در سازه‌های مصنوعی (شامل مغارهای سنگی، مغارهای نمکی و معادن متروکه) و ساختارهای طبیعی (شامل میادین تهی شده نفت و گاز، سفره‌های آب‌های زیرزمینی و غارهای طبیعی) امکان‌پذیر است. از بین این روش‌ها، طبیعاً روشی مناسب‌تر است که سازگاری بیش‌تری با شرایط منطقهٔ ذخیره‌سازی داشته باشد. در ایران به‌دلیل وجود غارهای طبیعی بسیار، ذخیره‌سازی نفت‌خام در درون غارهای طبیعی جزء گزینه‌های مناسب به‌نظر می‌رسد. بدیهی است اگر به‌جای حفر مغارها، از غارهای طبیعی برای ذخیره‌سازی استفاده شود، هزینهٔ حفر مغار از هزینه‌های احداث مغار حذف می‌شود. در مقالهٔ حاضر به‌منظور انتخاب غار مناسب برای ذخیره‌سازی نفت‌خام، غارهای طبیعی بر اساس معیارهای مختلف و با استفاده از ترکیبی از دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و شباهت به گزینهٔ ایده‌آل (TOPSIS) بررسی شده و گزینهٔ مستعد انتخاب شده است. بر این اساس غار رودافشان با استفاده از تعدادی معیارهای کیفی و کمی از قبیل قوانین گردش‌گری و زیست‌محیطی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، حجم فضای محتمل برای ذخیره‌سازی، فاصلهٔ غار از خطوط لوله اصلی انتقال

نفت‌خام و فاصلهٔ از پالایشگاه‌های بزرگ کشور به‌عنوان غاری مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت‌خام انتخاب شد. لازم به ذکر است وزن این معیارها بر اساس نظرسنجی از افراد با تجربه در زمینهٔ ذخیره‌سازی تعیین شده است. این غار در شمال شرق استان تهران و در شهرستان فیروزکوه قرار گرفته و ۳ تالار دارد که جزء بزرگ‌ترین تالارها در میان غارهای ایران است. به‌طورکلی می‌توان گفت حجم نفت‌خام قابل انباشت در غار مذکور در حدود ۲۵۰،۰۰۰ مترمکعب تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی نفت‌خام، غارهای طبیعی، غار رودافشان، FAHP، TOPSIS

* **نویسنده مسئول** amirsoltanalizadeh@gmail.com

مقدمه

امروزه تأمین بودن یک کشور از لحاظ انرژی مورد نیاز، یکی از ابزارهای سیاسی و اقتصادی، برای پیشرفت و دسترسی به اهداف آن کشور در دنیا است [۱]. به‌کارگیری ذخیره‌سازی زیرزمینی می‌تواند مزایایی مانند ایمنی بیش‌تر، طول عمر و بازدهی زیادتر، صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری و کیفیت بهتر را به‌همراه داشته باشد [۲]. در روش‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت‌خام، کم‌تر بودن هزینه‌های اولیه و عملیاتی نسبت به ایجاد تأسیسات در سطح زمین، وابسته نبودن به مسائل توپوگرافی، محدودیت نداشتن در استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حوادث طبیعی و حملات هوایی از جمله مزایایی است که باعث روی‌کرد استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی شده است. تفکر ذخیره‌سازی محصولات نفتی در مغارهای سنگی زیرزمینی، در اوایل سال ۱۹۳۰ در سوئد ارائه شد. این تفکر زمانی مطرح شد که ارتش سوئد به‌دنبال روشی مطمئن، برای ذخیره‌سازی سوخت در شرایط جنگی بود [۳]. از دههٔ ۷۰ نیز کشورهای متعددی در اروپا و دیگر بخش‌های دنیا شروع به استفاده از مغار برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری کردند. بحران نفت در سال ۱۹۷۳ باعث افزایش ساخت مغارهای ذخیره‌سازی نفت‌خام شد و از آن به بعد پروژه‌هایی در مقیاس بزرگ، در بسیاری از کشورها آغاز شد که از آن جمله می‌توان به مخازن ذخیره‌سازی نفت‌خام با ظرفیت‌های زیاد در کشورهایی مانند کره، ژاپن و امریکا اشاره کرد [٤]. سابقه ذخیره‌سازی نفت‌خام در نارویک

(در نروژ) به سال ۱۹۵٤ برمی‌گردد. در طی دهۀ ۵۰ تا ٦۰ طیف وسیعی از مخازن زیرزمینی در سوئد برای ذخیره‌سازی نفت‌خام ساخته شدند و سپس به‌تدریج در دهۀ ٦۰ به ذخیره‌سازی نفت‌خام در فنلاند نیز توجه شد [۵]. امروزه در کشور فنلاند (در مجتمع نست ای پورو[۱]) ۳۵ مغار به ظرفیت کلی ۵/۲ میلیون مترمکعب وجود دارد که به‌تدریج طی سال‌های ۱۹٦۵ تا ۱۹۸۲ در ۲۲ واحد مجزا در سنگ‌هایی از جنس گرانیت و گنایس حفر شده و مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون‌پوشش ذخیره شده‌اند [٦]. ایران از نظر اقتصادی وابستگی زیادی به مواد هیدروکربوری مانند نفت‌خام و گاز دارد و تغییر قیمت آن‌ها بر توسعۀ اقتصاد ملی و قدرت نظامی تأثیرگذار است. با ساخت مخازن ذخیره‌سازی می‌توان در مواقع بحران (که به‌هر دلیلی ممکن است استخراج نفت از چاهای نفتی انجام نگیرد)، برای تأمین خوراک اولیه پالایشگاه‌های داخلی و نیز از دست ندادن بازارهای جهانی (تا زمان رفع بحران) از نفت‌خام ذخیره شده در این مخازن استفاده کرد. به‌همین دلیل عربستان (با وجود این‌که خود یکی از تولید کننده‌های عمده مواد هیدروکربوری است) در سال ۱۹۸۷ با شرکت‌های سوئدی قرارداد ساخت مخازن ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری را امضا کرد و در حال حاضر تنها کشوری است که در خاورمیانه دارای مخازن سنگی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری است. روسیه نیز علی‌رغم این‌که بیش‌ترین ذخایر گاز دنیا را دارد، در زمینۀ ذخیره‌سازی گاز نیز یکی از کشورهای پیش‌رو محسوب می‌شود. به هر حال ذخایر نفتی قابل استحصال ایران با توجه به تکنولوژی و قیمت کنونی، حدود ۵۰ سال تخمین زده شده است و در سال‌های آینده احتمالاً با پیشرفت تکنولوژی و نیز افزایش قیمت (به‌دلیل کاهش عرضه نفت) میزان ذخیره قابل استحصال افزایش خواهد یافت [۷].

غارهای طبیعی محتمل برای ذخیره‌سازی نفت‌خام

برای بررسی غارها ابتدا فهرستی از غارهای طبیعی موجود در ایران تهیه شده، سپس غارهای موجود در این فهرست به‌طور گسترده از لحاظ معیارهای مختلف بررسی شده و در نهایت غارهای مستعد برای ذخیره‌سازی انتخاب شده‌اند. در جدول ۱ تعدادی از غارها به همراه برخی از مهم‌ترین مشخصات آن‌ها که در دسترس بود درج شده است.

۱. Neste Oy Poorvo

جدول ۱. فهرست غارهای بررسی شده به‌منظور ذخیره‌سازی نفت‌خام [۸]

ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره‌سازی (m^3)	وضعیت آب زیرزمینی	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره‌سازی (m^3)	وضعیت آب زیرزمینی	نوع غار
۱	کبوتر	مراغه	–	خشک	آهکی	۲۵	هفت‌خانه	خلخال	–	خشک	آهکی
۲	اسکندر	اهر	–	خشک	آهکی	۲٦	یخگان	اردبیل	۸،۰۰۰	خشک	آهکی
۳	آغ‌بولاق	بستان‌آباد	–	خشک	آهکی	۲۷	چاه دیو (ارازه)	نطنز	۱٦۰،۰۰۰	خشک	غیرآهکی
٤	دو گیجان	مرند	–	خشک	آهکی	۲۸	قهرمان	اصفهان	۱۳۵	خشک	آهکی
۵	سهولان	بوکان	۱۰۰،۰۰۰	خشک	آهکی	۲۹	پلنگ	شهرضا	–	خشک	آهکی
٦	قلایچی	بوکان	–	خشک	آهکی	۳۰	زنگینه	صالح آباد	–	خشک	آهکی
۷	بورنیک بزرگ	مهاباد	–	خشک	آهکی	۳۱	طلسم	ایوان	–	خشک	آهکی
۸	بورنیک کوچک	مهاباد	–	خشک	آهکی	۳۲	تایه گه	ملک شاهی		آبدار	آهکی
۹	کهریز	تکاب	–	خشک	–	۳۳	خفاش	دهلران	–	خشک	آهکی
۱۰	میرداوود	ارومیه	–	خشک	–	۳٤	یخ مراد	تهران	۱۵،۰۰۰	خشک	آهکی
۱۱	هیزج	هیزج	–	خشک	آهکی	۳۵	چاه دیو (قویوسی)	کرج	٦۰،۰۰۰	خشک	آهکی و نمکی
۱۲	مغان	مشهد	٤۵،۰۰۰	خشک	آهکی	۳٦	رودافشان	فیروزکوه	۲۵۰،۰۰۰	خشک	آهکی
۱۳	گلیجک	زنجان	۳۰۰،۰۰۰	خشک	آهکی	۳۷	بورنیک	فیروزکوه	۵۰،۰۰۰	خشک	آهکی
۱٤	کتله خور	گرماب	۳۰۰،۰۰۰	خشک	آهکی	۳۸	سراب	فارسان	–	آبدار	–
۱۵	دربند	مهدیشهر	۵۰،۰۰۰	خشک	آهکی	۳۹	کارده	مشهد	–	خشک	–
۱٦	کرمانچی	ایرانشهر	–	خشک	–	٤۰	کنه گرم	بجنورد	–	خشک	آهکی
۱۷	بوف	نورآباد	–	خشک	–	٤۱	چنشت	سربیشه	–	خشک	–
۱۸	کان‌گوهر	صفاشهر	۳٤۰،۰۰۰	خشک	آهکی	٤۲	جوجه	قائن	۲۰۰،۰۰۰	خشک	آهکی
۱۹	بلع زار	شیراز	۱۰،۰۰۰	خشک	غیرآهکی	٤۳	سلیمان	شیروان	–	خشک	–
۲۰	تادوان	شیراز	۲۵۰،۰۰۰	آبدار	–	٤٤	مزدوران	سرخس	–	خشک	–
۲۱	شاپور	کازرون	–	خشک	آهکی	٤۵	کرفتو	سقز	–	خشک	آهکی
۲۲	مظفر سهلک	داراب	–	آبدار	آهکی	٤٦	چاه دریا	رفسنجان	–	آبدار	آهکی
۲۳	قلاتاسیان	سردشت	–	خشک	–	٤۷	ترنگ	بافت	–	آبدار	آهکی
۲٤	چاه زندان	تکاب	۳۰۰،۰۰۰	خشک	غیرآهکی	٤۸	ایوب	شهربابک	–	آبدار	غیرآهکی

ادامه جدول۱. فهرست غارهای بررسی شده به‌منظور دخیره‌سازی نفت‌خام [۸]

ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره‌سازی (m^3)	وضعیت آب زیرزمینی	نوع غار	ردیف	نام غار	شهرستان	حجم قابل ذخیره‌سازی (m^3)	وضعیت آب زیرزمینی	نوع غار
٤٩	پراو	کرمانشاه	۳۰۰،۰۰۰	آبدار	آهکی	٥٨	الیاس تنگه	آمل	۷،۰۰۰	خشک	آهکی
٥٠	دواشکفت	کرمانشاه	–	خشک	–	٥٩	هوتو	بهشهر	–	خشک	–
٥١	اسپهبد خورشید	سوادکوه	۷٥،۰۰۰	خشک	–	٦٠	چال نخجیر	نراق	٦۰۰،۰۰۰	خشک	آهکی
٥٢	قوری قلعه	روانسر	–	خشک	–	٦١	کوه گره	خمین	–	آبدار	–
٥٣	شیرآباد	علی آبادکتول	–	آبدار	–	٦٢	کهک	دلیجان	–	خشک	آهکی
٥٤	کیارام	مینودشت	–	خشک	آهکی	٦٣	خان‌آباد	خمین	–	خشک	آهکی
٥٥	کلماکره	پلدختر	–	خشک	آهکی	٦٤	باباگرگر	ساوه	۳٥۰	خشک	آهکی
٥٦	بت‌خانه	کوهدشت	–	خشک	آهکی	٦٥	علیصدر	کبودر آهنگ	–	خشک	آهکی
٥٧	ماهی‌کور	خرم‌آباد	–	خشک	–	٦٦	بگلیجه	همدان	–	خشک	آهکی

۱. تعیین معیارهای انتخاب غار مناسب

چهار پارامتر در مرحلهٔ اول به‌منظور ارزیابی و انتخاب غارهای مناسب برای ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری در نظر گرفته شده است. این معیارها در جدول۲ بیان شده است.

جدول ۲. فهرست معیارها برای انتخاب غار مناسب

ردیف	معیارهای انتخاب غار مناسب، از نظر ذخیره‌سازی
۱	قوانین گردش‌گری و زیست‌محیطی
۲	وضعیت آب‌های زیرزمینی
۳	حجم فضای محتمل برای ذخیره‌سازی
٤	فاصلهٔ غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت‌خام و پالایشگاه‌های بزرگ کشور

لازم به‌ذکر است بررسی غارها از نظر وضعیت آب بررسی شده به این صورت انجام می‌گیرد که آن دسته از غارهایی که در آن‌ها آب جاری با دبی بالا وجود دارد و یا بر اساس سیلاب‌های فصلی آب در آن جاری می‌شود به‌دلیل زیاد بودن حجم تخلیهٔ آب مخزن و در نتیجهٔ افزایش هزینه، از لیست غارهای بررسی شده حذف می‌شوند.

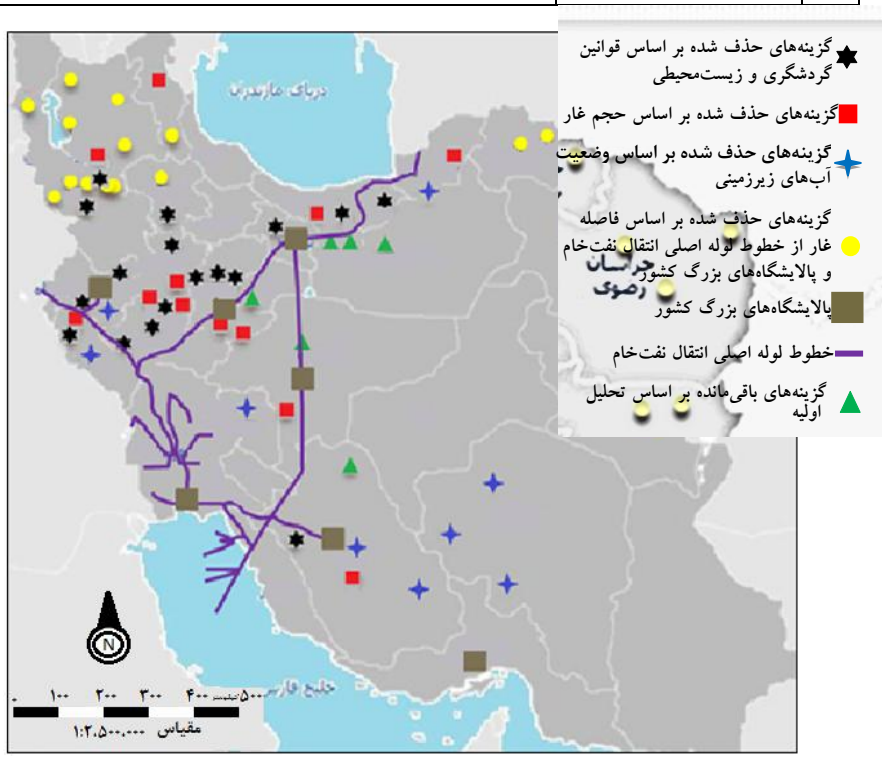
۲. تعیین غار مناسب بر اساس معیارهای ارزیابی

در مرحلهٔ اول انتخاب غارهای مناسب به‌روش حذفی انجام شده است؛ یعنی با توجه به نقش اساسی هر یک از معیارهای ذکر شده در جدول ۲ غربال‌گیری اولیه انجام شده است. برای این کار در گام اول غارهایی که از نظر گردش‌گری و یا زیست‌محیطی اهمیت زیادی دارند، از فهرست غارهای موجود در جدول ۱ حذف شده‌اند. در گام بعدی غارها از نظر وضعیت آب بررسی شده‌اند و آن دسته از غارهایی که در آن‌ها آب جاری با دبی زیاد وجود دارد و یا بر اساس سیلاب‌های فصلی آب در آن جاری می‌شود، به‌دلیل زیاد بودن حجم تخلیهٔ آب مخزن و در نتیجه افزایش هزینه، از فهرست غارهای باقی‌مانده از مرحلهٔ اول حذف شده‌اند. در گام سوم غارها از نظر حجم بررسی شده‌اند. بر این اساس غارهایی که حجم کم‌تر از ده هزار مترمکعب دارند از فهرست غارهای باقی‌مانده از مرحلهٔ دوم حذف شده‌اند. در گام چهارم غارها از نظر فاصله از خطوط لوله اصلی انتقال نفت‌خام و فاصله از پالایشگاه‌های بزرگ کشور ارزیابی شده‌اند. بر این اساس غارهایی که فاصلهٔ بیش از ۲۰۰ کیلومتر از خطوط لوله اصلی انتقال نفت‌خام و پالایشگاه‌های بزرگ کشور دارند، از فهرست غارهای باقی مانده از مرحلهٔ سوم حذف شده‌اند. در جدول ۳ فهرست غارهای حذف شده از بین غارهای بررسی شده، آمده است. هم‌چنین در شکل ۱ غارهای حذف شده در هر مرحله و غارهای باقی‌مانده در مرحلهٔ اولیه به‌صورت شماتیک در نقشهٔ ایران نشان داده شده‌اند.

بنا بر این با توجه به معیارهای ذکر شده در جدول ۲، غارهای دربند در مهدی‌شهر استان سمنان، کهک در استان قم، بورنیک و رودافشان هر دو در شهرستان فیروزکوه استان تهران، کان‌گوهر در صفاشهر استان فارس و چاه‌دیو (ارازه) در شهرستان نطنز استان اصفهان، شرایط اولیه برای ذخیره‌سازی نفت‌خام دارند.

جدول ۳: غارهای حذف شده در هر یک از معیار

ردیف	معیار ارزیابی	غارهای حذف شده بر اساس هر یک از معیارها
۱	قوانین گردش‌گری و زیست‌محیطی	سهولان – زنگینه- یخ مراد- کتله خور- شاپور –کرفتو- دواشکفت –قوری‌قلعه- کلماکره – ماهی کور –اسپهبد خورشید- هوتو- چال نخجیر- علیصدر- چاه دیو (قویوسی)
۲	وضعیت وجود آب	تایه گه – سراب –تادوان – مظفر سهلک – چاه دریا- ترنگ –ایوب –پراو – شیرآباد-کوه‌گره
۳	احجام غارها	یخگان –قهرمان –پلنگ – طلسم – بوف – بلع زار – کیارام – الیاس تنگه – خان آباد- باباگرگر- بگلیجه
٤	فاصله غار از خطوط لوله اصلی انتقال نفت‌خام و پالایشگاه‌های بزرگ کشور	کبوتر- اسکندر- آغ بولاق- دو گیجان- قلایچی- بورنیک بزرگ- بورنیک کوچک- کهریز- میرداوود- هیزج- قلاتاسیان- چاه زندان- هفت‌خانه- کارده- کنه گرم- چنشت- جوجه- سلیمان – مزدوران- مغان – گلیجک – کرمانچی- خفاش- بت خانه



شکل۱. نمایش جانمایی کلی غارهای بررسی شده در ایران

روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

در مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره، هر گزینه با چند شاخص ارزیابی می‌شود و انتخاب گزینه از طریق تعیین سطح مورد نظر برای معیارها و یا از طریق مقایسه معیارها و گزینه‌ها صورت می‌گیرد. در این روش‌ها، شاخص‌های کیفی به اعداد کمی تبدیل می‌شوند و با مقایسهٔ شاخص‌ها با یک‌دیگر براساس اهمیت گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند [۹]. در مقالهٔ حاضر هدف، تعیین غار مناسب به‌منظور ذخیره‌سازی است. برای تعیین غار مستعد معیارها و گزینه‌ها بدین‌صورت تعریف می‌شوند:

جدول ٤. لیست معیارها، برای انتخاب غار مناسب به‌منظور ذخیره‌سازی

تعریف معیار	شاخص	نوع معیار
فاصلهٔ تقریبی از خطوط لوله(km)	C_1	منفی
فاصلهٔ تقریبی از مراکز بزرگ مصرف (km)	C_2	منفی
عدم وجود آب زیرزمینی	C_3	مثبت
حجم تقریبی غار (m^3)	C_4	مثبت
مناسب بودن شکل غار	C_5	مثبت

جدول ۵. لیست گزینه‌ها، برای انتخاب غار مناسب به‌منظور ذخیره‌سازی

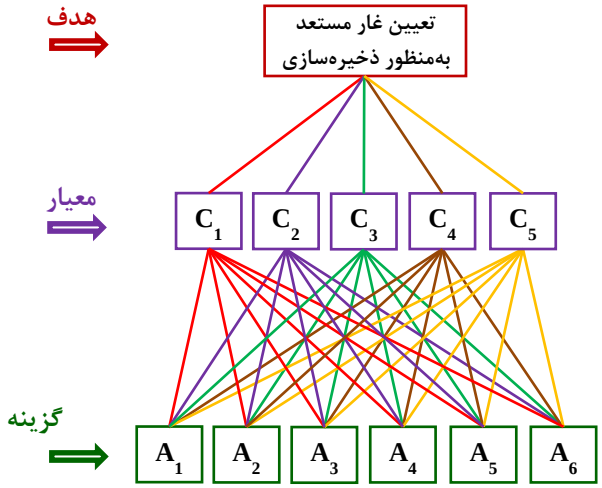
تعریف گزینه	شاخص
غار بورنیک	A_1
غار چاه‌دیو (ارازه)	A_2
غار دربند	A_3
غار رودافشان	A_4
غار کان‌گوهر	A_5
غار کهک	A_6

ماتریس تصمیم‌گیری که بر اساس نتایج حاصل از بررسی هر یک از گزینه‌ها نسبت به تک‌تک معیارها تعیین شده در جدول ٦ آورده شده است.

هم‌چنین نمودار سلسله مراتبی این مسئله در شکل۲ نشان داده شده است.

جدول ٦. ماتریس تصمیم‌گیری

	C_1 (km)	C_2 (km)	C_3	C_4 (m^3)	C_5
A_1	۹۰	۱۳۰	مناسب	۵۰۰۰۰	متوسط
A_2	۲۰	۱۵۰	متوسط	۱۵۰۰۰۰	مناسب
A_3	۱۹۰	۲۳۰	مناسب	۵۰۰۰۰	متوسط
A_4	٦۰	۱۰۰	مناسب	۲۵۰۰۰۰	مناسب
A_5	۲۰۰	۲۰۰	مناسب	۲۵۰۰۰۰	نامناسب
A_6	۵۰	۲۱۰	متوسط	۱۵۰۰۰۰	مناسب



شکل۲. نمودار سلسله مراتبی مسئله

۱. حل مسئله با استفاده از ترکیب دو روش TOPSIS و FAHP

در روش شباهت به حل ایده‌آل[1] هر چه گزینه‌ای شباهت بیش‌تری به حل ایده‌آل داشته باشد دارای رتبهٔ بالاتری است. در این روش داده‌های ورودی باید کمی باشند، از همین رو، برای استفاده از معیارهای کیفی ابتدا باید آن‌ها را به داده‌های کمی تبدیل کرد و سپس به‌عنوان داده ورودی در این روش به‌کار برد. خروجی این روش هم به‌صورت کمی است و علاوه بر تعیین گزینه برتر، سایر گزینه‌ها به‌صورت عددی رتبه‌بندی می‌شوند [۱۰]. لازم به ذکر است به‌منظور تعیین وزن معیارها ابتدا از تعداد ده کارشناس و متخصص علمی و صنعتی در زمینهٔ

۱. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

ذخیره‌سازی در ایران و چند کشور پیش‌رو در این زمینه، نظرسنجی صورت گرفته و سپس وزن معیارها به‌روش تحلیل سلسله مراتبی فازی[۱] تعیین شده است. مراحل حل مسئله با توجه به ۵ معیار و ٦ گزینه بدین‌صورت است:

الف) تبدیل معیارهای کیفی به کمی

معیارهای کیفی بر اساس جدول ۷ به مقادیر کمی تبدیل شده‌اند.

جدول ۷. تبدیل معیار کیفی به کمی

مشخصه کیفی	بسیار نامناسب	نامناسب	متوسط	مناسب	بسیار مناسب
معادل کمی	۱	۳	۵	۷	۹

ب) تشکیل ماتریس تصمیم

در ماتریس تصمیم تعداد سطرها برابر تعداد گزینه‌ها و تعداد ستون‌ها برابر تعداد معیارها است.

$$D=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

ج) بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم

برای بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم باید معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بی‌بعد تبدیل و ماتریس R بدین‌صورت تعریف شود:

$$D=\begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1} x_{ij}^{2}}} \quad (۳)$$

بی بعد کردن با توجه به‌روش نرم[۲] انجام می‌گیرد.

۱. Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) ۲. Norm

د) تعیین بردار وزن معیارها

ضریب اهمیت هر یک از معیارها، با استفاده از تعیین وزن معیار با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، به‌ترتیب زیر انجام می‌گیرد. ابتدا با توجه به نظرسنجی‌های به‌عمل آمده، ماتریس مقایسهٔ زوجی متناظر با هر یک از معیارها از نظر متخصصان مختلف به‌صورت مجزا برای هر متخصص تشکیل می‌شود. سپس ماتریس مقایسه زوجی فازی $(\tilde{A})$ که هر یک از درایه‌های آن بر اساس توابع عضویت فازی مثلثی به‌دست آورده شده‌اند، بدین‌صورت تعریف می‌شود[۱۱]:

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] \quad (٤)$$

$$\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (٥)$$

$$\alpha_{ij} = \min(\beta_{ijk}) \ , \ k=١,٢,\ldots,n \quad (٦)$$

$$\delta_{ij} = \left[\prod_{k=١}^{n} \beta_{ijk}\right]^{\left(\frac{١}{n}\right)}, \quad k=١,٢,...,n \quad (٧)$$

$$\gamma_{ij} = \mathrm{Max}(\beta_{ijk}) \ , \ k=١,٢,\ldots,n \quad (٨)$$

در روابط فوق β_{ijk} نشان‌دهندهٔ اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام، α_{ij} و γ_{ij} به‌ترتیب حد پایین و حد بالای نظرهای پرسش‌شوندگان و δ_{ij} میانگین هندسی نظرهای پرسش‌شوندگان است.

در مرحلهٔ بعد مقدار S_i که عددی فازی مثلثی است، برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی طبق این رابطه محاسبه می‌شود:

$$S_i = \sum_{j=١}^{m} M_{gi}^{j} \otimes \left[\sum_{i=١}^{n} \sum_{j=١}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-١} \quad (٩)$$

در رابطهٔ ۹، i بیانگر شمارهٔ سطر و j بیانگر شمارهٔ ستون است. مقادیر $\sum_{j=١}^{m} M_{gi}^{j}$، $\left[\sum_{i=١}^{n} \sum_{j=١}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-١}$ و $\sum_{i=١}^{n} \sum_{j=١}^{m} M_{gi}^{j}$ را می‌توان از این روابط حساب کرد:

$$\sum_{j=١}^{m} M_{gi}^{j} = \left(\sum_{j=١}^{m} l_j \ , \ \sum_{j=١}^{m} m_j \ , \ \sum_{j=١}^{m} u_j\right) \quad (١٠)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = \left(\sum_{i=1}^{n} l_i \ , \sum_{i=1}^{n} m_i \ , \sum_{i=1}^{n} u_i\right) \qquad (11)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} u_i} \ , \ \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \ \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} l_i}\right) \qquad (12)$$

در روابط فوق l_i، m_i و u_i به‌ترتیب مؤلفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

سپس درجهٔ بزرگی S_iها نسبت به‌هم مقایسه می‌شوند. برای این‌کار از رابطهٔ ۱۳ استفاده می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت اگر $S_i=(l_i,m_i,u_i)$ و $S_j=(l_j,m_j,u_j)$ دو عدد فازی باشند، درجهٔ بزرگی S_i نسبت به S_j بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$V(S_j \geq S_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_j \geq m_i \\ 0 & \text{if } l_i \geq u_j \\ \dfrac{l_i - u_j}{(m_j - u_j) - (m_i - u_i)} & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (13)$$

پس از آن، وزن نرمال نشده هر معیار با توجه به درجهٔ بزرگی Sها نسبت به‌هم بر اساس رابطهٔ ۱٤ تعیین می‌شود.

$$d'(C_i) = \min V(S_i \geq S_h) \qquad h = 1,2,...,n \quad h \neq i \qquad (14)$$

در نتیجه بردار وزن نرمالیز نشده (W^o) بدین‌صورت تعیین می‌شود:

$$W' = (d'(C_1), d'(C_2), ..., d'(C_n)) \qquad i = 1,2,...,n \qquad (15)$$

در گام آخر به‌منظور محاسبه بردار وزن نهایی، بردار وزن محاسبه شده در مرحلهٔ قبل باید نرمالیز شوند.

$$W = (d(C_1), d(C_2), ..., d(C_n)) \qquad i = 1,2,...,n \qquad (16)$$

ر) تعیین ماتریس تصمیم بدون بعد وزن‌دار

ماتریس تصمیم بدون بعد وزن‌دار از ضرب ماتریس تصمیم بدون بعد و بردار وزن معیارها

بدین‌صورت به‌دست می‌آید:

$$V = R \times W = \begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

و) یافتن حل ایده‌آل و ضدایده‌آل

حل ایده‌آل A^* و ضدایده‌آل A^- از این روابط محاسبه می‌شود:

$$A^* = \left\{ v_1^*, v_2^*, ..., v_j^*, ..., v_7^* \right\} \quad (۱۸)$$

$$A^- = \left\{ v_1^-, v_2^-, ..., v_j^-, ..., v_7^- \right\} \quad (۱۹)$$

که در آن‌ها، V_j^* بهترین مقدار و V_j^- بدترین مقدار معیار j در بین تمام گزینه‌هاست.

ه) یافتن فاصله از حل ایده‌آل و ضدایده‌آل

برای هر گزینه فاصلهٔ از حل ایده‌آل و ضدایده‌آل به‌ترتیب از این روابط به‌دست می‌آید:

$$s_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^* \right)^2} \quad (۲۰)$$

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(v_{ij} - v_j^- \right)^2} \quad (۲۱)$$

ی) محاسبهٔ شاخص شباهت و اولویت‌بندی بر اساس شاخص شباهت

شاخص شباهت با توجه به رابطه ۲۲ تعیین می‌شود. این شاخص عددی بین صفر و یک است، به‌طوری که هر چه گزینه‌ای به ایده‌آل نزدیک‌تر باشد شاخص شباهت آن گزینه به یک نزدیک‌تر است.

$$C_j^* = \frac{S_j^-}{S_j^* + S_j^-} \quad (۲۲)$$

تعیین غار مستعد برای ذخیره‌سازی نفت‌خام

به‌منظور تعیین غار مستعد برای ذخیره‌سازی ابتدا با توجه به جدول ۷ معیارهای کیفی، تبدیل به معیارهای کمی شدند؛ در نتیجه ماتریس تصمیم مندرج در جدول ٦ به‌صورت جدول ۸ کمی خواهد شد.

جدول ۸. ماتریس تصمیم X جدول

	$C_۱$	$C_۲$	$C_۳$	$C_٤$	$C_٥$
$A_۱$	۹۰	۱۳۰	۷	٥۰۰۰۰	٥
$A_۲$	۲۰	۱٥۰	٥	۱٥۰۰۰۰	۷
$A_۳$	۱۹۰	۲۳۰	۷	٥۰۰۰۰	٥
$A_٤$	٦۰	۱۰۰	۷	۲٥۰۰۰۰	۷
$A_٥$	۲۰۰	۲۰۰	۷	۲٥۰۰۰۰	۳
$A_٦$	٥۰	۲۱۰	٥	۱٥۰۰۰۰	۷

سپس با استفاده از رابطه ۳ ماتریس تصمیم (جدول ۸) به ماتریس بدون مقیاس(جدول ۹) شده است.

جدول ۹. ماتریس تصمیم بدون مقیاس R

	$C_۱$	$C_۲$	$C_۳$	$C_٤$	$C_٥$
$A_۱$	۰/۲۹۸۸	۰/۳۰۱۱	۰/٤٤٦۳	۰/۱۱۹٥	۰/۳٤۸٤
$A_۲$	۰/۰٦٦٤	۰/۳٤۷٤	۰/۳۱۸۸	۰/۳٥۸٦	۰/٤۸۷۷
$A_۳$	۰/٦۳۰۹	۰/٥۳۲۷	۰/٤٤٦۳	۰/۱۱۹٥	۰/۳٤۸٤
$A_٤$	۰/۱۹۹۲	۰/۲۳۱٦	۰/٤٤٦۳	۰/٥۹۷٦	۰/٤۸۷۷
$A_٥$	۰/٦٦٤۱	۰/٤٦۳۲	۰/٤٤٦۳	۰/٥۹۷٦	۰/۲۰۹۰
$A_٦$	۰/۱٦٦۰	۰/٤۸٦٤	۰/۳۱۸۸	۰/۳٥۸٦	۰/٤۸۷۷

به‌منظور تعیین ضریب اهمیت هر یک از معیارها، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، ابتدا ماتریس مقایسه زوجی متناظر با معیارها از نظر هر یک از متخصصان تشکیل شده، سپس ماتریس مقایسه زوجی فازی $(\tilde{A})$ بر اساس روابط ٤ تا ۸ به‌صورت جدول ۱۰ به‌دست آورده شده است.

جدول ۱۰. ماتریس مقایسهٔ زوجی فازی بین پنج معیار نظرسنجی شده

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	(۱،۱،۱)	(۰/۱،۷۱/۳،۵۷)	(۰/۱،۴۳/۳،۱۱)	(۰/۰،۳۳/۱،۷۹/۲۹)	(۰/۱،۷۱/۲،۲۶/۳۳)
C_2	(۰/۰،۳۳/۱،۶۴/۴)	(۱،۱،۱)	(۰/۰،۱۴/۱،۷۱/۸)	(۰/۰،۱۱/۱،۵۰/۸)	(۰/۰،۳۳/۱،۸۱)
C_3	(۰/۰،۳۳/۲،۹۰/۳۳)	(۰/۱،۵۶/۷،۴۱)	(۱،۱،۱)	(۰/۰،۳۳/۱،۷۱)	(۰/۱،۴۳/۲،۱۴/۳۳)
C_4	(۰/۱،۷۸/۳،۲۶)	(۰/۱،۵۶/۹،۹۸)	(۱،۱/۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۰/۱،۵۶/۳،۶)
C_5	(۰/۰،۴۳/۱،۷۹/۴)	(۱،۱/۳،۲۴)	(۰/۰،۴۳/۲،۸۸/۳۳)	(۰/۰،۳۳/۱،۶۳/۸)	(۱،۱،۱)

سپس مقدار S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی طبق روابط ۹ الی ۱۲ به‌دست آورده شده است.

$$\left[\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5} M_{gi}^{j}\right]^{-1} = (۰/۰۱۶۷ \text{ ، } ۰/۰۳۸۰ \text{ ، } ۰/۰۶۷۴)$$

S_1=(۳/۱۹۰۵ , ۵/۷۳۳۶ , ۱۰/۶۱۹۰) ⊗ (۰/۰۱۶۷, ۰/۰۳۸۰ , ۰/۰۶۷۴) =(۰/۰۵۳۳ , ۰/۲۱۷۷, ۰/۷۱۵۵)

S_2=(۱/۹۲۰۶ , ۳/۶۵۴۳ , ۷/۰۰۰۰)⊗ (۰/۰۱۶۷ , ۰/۰۳۸۰ , ۰/۰۶۷۴)=(۰/۰۳۲۱ , ۰/۱۳۸۸ , ۰/۴۷۱۷)

S_3=(۲/۶۵۰۸ , ۵/۱۶۹۳, ۱۳/۶۶۶۷)⊗ (۰/۰۱۶۷, ۰/۰۳۸۰, ۰/۰۶۷۴) =(۰/۰۴۴۳ , ۰/۱۹۶۳ , ۰/۹۲۰۹)

S_4=(۳/۸۸۸۹ , ۷/۲۴۳۶, ۱۹/۰۰۰۰)⊗ (۰/۰۱۶۷, ۰/۰۳۸۰, ۰/۰۶۷۴) =(۰/۰۶۵۰ , ۰/۲۷۵۰ , ۱/۲۸۰۲)

S_5 =(۳/۱۹۰۵ , ۴/۵۳۶۴ , ۹/۵۳۳۳)⊗ (۰/۰۱۶۷, ۰/۰۳۸۰, ۰/۰۶۷۴) =(۰/۰۵۳۳ , ۰/۱۷۲۲ , ۰/۶۴۲۴)

در مرحلهٔ بعد درجه بزرگی S_i ها بر اساس رابطه ۱۳ نسبت به هم مقایسه می‌شوند.

V(S۱≥S۲)=۱ , V(S۱≥S۳)=۱ , V(S۱≥S۴)=۰/۹۱۹۰۰۵ , V(S۱≥S5)=۱

V(S۲≥S۱)=۰/۸۴۱۲۳۵ , V(S۲≥S۳)=۰/۸۸۱۳۶۳ , V(S۲≥S۴)=۰/۷۴۸۹۹ , V(S۲≥S۵)=۰/۹۲۵۸۷۷

V(S۳≥S۱)=۰/۹۷۵۸۹۷ , V(S۳≥S۲)=۱ , V(S۳≥S۴)=۰/۹۱۵۷۳۲ , V(S۳≥S۵)=۱

V(S۴≥S۱)=۱ , V(S۴≥S۲)=۱ , V(S۴≥S۳)=۱ , V(S۴≥S۵)=۱

V(S۵≥S۱)=۰/۹۲۸۳۵۱ , V(S۵≥S۲)=۱ , V(S۵≥S۳)=۰/۹۶۱۳۶۵ , V(S۵≥S۴)=۰/۸۴۸۸۶۷

وزن هر معیار با توجه به بر اساس رابطه ۱۴ و درجه بزرگی S_iها نسبت به‌هم، عبارت است از:

جدول ۱۱. ماتریس بردار وزن معیارها W

وزن معیار نرمالیز شده	معیار	نوع معیار
۰/۲۱۰	$C_۱$	فاصله غار از خطوط لوله انتقال نفت‌خام
۰/۱٦۹	$C_۲$	فاصله غار از مراکز بزرگ مصرف
۰/۲۰۷	$C_۳$	مناسب بودن وضعیت آب زیرزمینی در غار
۰/۲۲٦	$C_٤$	حجم تقریبی غار
۰/۱۹۲	$C_٥$	سادگی شکل غار

در مرحلهٔ بعد ماتریس بدون بعد وزن‌دار (جدول ۱۲) بر اساس رابطهٔ (۱۷) تعیین شده است.

جدول ۱۲. ماتریس بدون بعد وزن‌دار V

	C۱	C۲	C۳	C٤	C٥
A۱	۰/۰٦۲۸	۰/۰٥۰۹	۰/۰۹۲۲	۰/۰۲۷۰	۰/۰٦٦۷
A۲	۰/۰۱۳۹	۰/۰٥۸۷	۰/۰٦٥۹	۰/۰۸۰۹	۰/۰۹۳٤
A۳	۰/۱۳۲٥	۰/۰۹۰۰	۰/۰۹۲۲	۰/۰۲۷۰	۰/۰٦٦۷
A٤	۰/۰٤۱۸	۰/۰۳۹۱	۰/۰۹۲۲	۰/۱۳٤۸	۰/۰۹۳٤
A٥	۰/۱۳۹٥	۰/۰۷۸۳	۰/۰۹۲۲	۰/۱۳٤۸	۰/۰٤۰۰
A٦	۰/۰۳٤۹	۰/۰۸۲۲	۰/۰٦٥۹	۰/۰۸۰۹	۰/۰۹۳٤

بر طبق ماتریس تصمیم‌گیری بدون مقیاس (جدول ۱۲) و روابط ۱۸ و ۱۹ حل ایده‌آل و ضدایده‌آل به‌ترتیب بدین‌صورت است:

$$A^{*}= \{۰/۰۱۳۹, ۰/۰۳۹۱, ۰/۰۹۲۲, ۰/۱۳٤۸, ۰/۰۹۳٤ \}$$

$$A^{-}= \{۰/۱۳۹٥, ۰/۰۹۰۰, ۰/۰٦٥۹, ۰/۰۲۷۰, ۰/۰٤۰۰ \}$$

در نهایت فاصله از حل ایده‌آل و ضدایده‌آل و شاخص شباهت برای گزینه‌های مختلف بر اساس روابط ۲۰، ۲۱ و ۲۲ محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۱۳ درج شده است.

جدول ۱۳. فاصله از حل ایده‌آل و ضدایده‌آل

	فاصله از حل ایده‌آل	فاصله از حل ضدایده‌آل	شاخص شباهت
$A_۱$	۰/۱۲۱۹	۰/۰۹۳۹	۰/٤۳٥۲
$A_۲$	۰/۰٦۳۱	۰/۱٥۰۰	۰/۷۰۳۸
$A_۳$	۰/۱۷۰۳	۰/۰۳۸۱	۰/۱۸۳۰
$A_٤$	۰/۰۲۷۹	۰/۱٦٥۲	۰/۸٥٥٤
$A_٥$	۰/۱٤۱۹	۰/۱۱۱٦	۰/٤٤۰۲
$A_٦$	۰/۰۷٦۸	۰/۱۲۹٥	۰/٦۲۷۷

بر این اساس اولویت گزینه‌ها بدین‌صورت است.

$$A_{۴} > A_{۲} > A_{۶} > A_{۵} > A_{۱} > A_{۳}$$

غار دربند< غار بورنیک< غار کان‌گوهر < غار کهک < غار چاه دیو(ارازه) < غار رودافشان

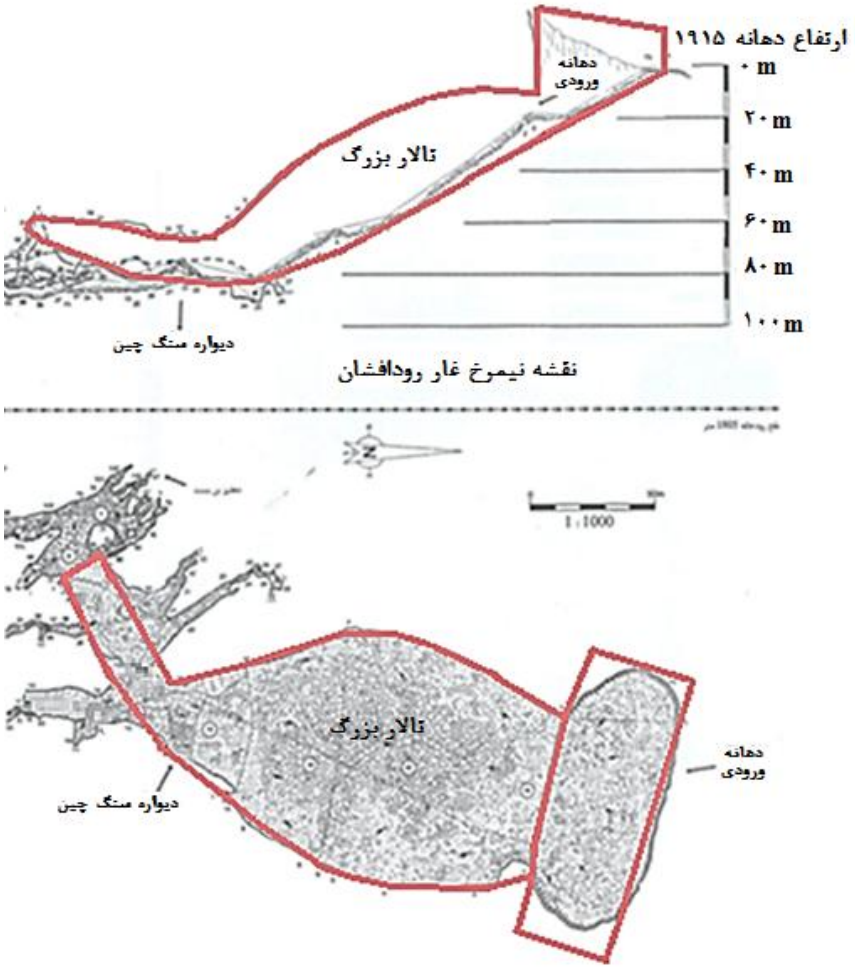
معرفی غار رودافشان

غار رودافشان در ۱۰۳ کیلومتری شمال شرق استان تهران و ۶۲ کیلومتری شهرستان فیروزکوه قرار دارد. فاصلهٔ تقریبی این غار از خط لوله انتقال نفت‌خام و مرکز بزرگ مصرف داخلی (پالایشگاه تهران) به‌ترتیب ۶۰ و ۱۰۰ کیلومتر است. دهانهٔ غار رودافشان در ۳۵ درجهٔ عرضی و ۵۲ درجهٔ شمالی و در ارتفاع ۱۸۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. عرض دهانه این غار ۴۰ متر و ارتفاع آن ۱۲ متر است. شکل ۳ راه دسترسی غار رودافشان را بر روی نقشه نشان می‌دهد.

شکل ۳. راه دسترسی **غار بر روی نقشهٔ استان تهران**

با انجام برخی اصلاحات هندسی جزئی و هم‌چنین کف‌برداری واریزه‌های کف غار می‌توان شرایط عمومی غار را برای ذخیره‌سازی بهبود بخشید. ساختار اصلی در این ناحیه گسل فیروزکوه است که دارای امتداد N۶۰ و جهت شیبی به سمت جنوب شرق است[۱۲]، [۱۳]. این غار، از نظر وضعیت آب‌های زیرزمینی، جزء غارهای خشک است و تالارهای بزرگ

به‌شکل بیضی‌گون با سطح دیواره‌های تقریبا مسطح دارد. بر این اساس غار رودافشان از نظر وضعیت آب زیرزمینی و شکل هندسی به‌منظور تغییر کاربری و تبدیل به مخزن ذخیره‌سازی غاری مناسب است. این غار ۳ تالار دارد که جزء بزرگ‌ترین تالارها در میان غارهای ایران است. در ابتدای ورود به غار، اولین تالار غار قرار دارد. این تالار تاقدیس بزرگی است که به‌دلیل استحکام لایه‌های آن، هیچ نشانی از شکستگی در آن دیده نمی‌شود. ابعاد این تالار حدوداً ۸۰ در ۱۰۰ متر و ارتفاع تقریبی آن ۲۵ متر در بلندترین بخش سقف است. پس از تالار اول، تالار دوم که دارای تاقدیسی با ابعاد ۵۰ در٦۰ متر و ارتفاع تقریبی ۲۰ متر است، قرار دارد. تالار سوم نیز دارای ابعاد ۵۰ در ٤۰ متر و ارتفاعی در حدود ۱۵ متر است [١٤]. براساس مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، در غار رودافشان دو دسته دررزهٔ اصلی عمود بر هم با فاصله‌داری تقریبی دو متر و در امتدادهای شمالی–جنوبی و شرقی–غربی وجود دارند؛ بنا بر این قبل از بررسی تغییر کاربری غار رودافشان به یک مخزن ذخیره‌سازی این نکته قابل توجه است که فضاهای زیرزمینی ذخیره‌سازی به‌شدت تحت تأثیر درزه‌ها و سیستم بلوک‌های موجود در سنگ هستند که بر این اساس با توجه به نوع موادی که در این فضاها ذخیره می‌شود، موضوع پایداری و نگه‌داری این نوع سازه‌ها اهمیت به‌سزایی دارد [۱۵]. غار رودافشان شرایط خود ایستایی بسیار خوبی دارد و برای ذخیره‌سازی نفت‌خام در این غار لازم است یک سری تصحیحات هندسی و نیز آب‌بندی بر روی دیواره‌های آن صورت گیرد. لازم به ذکر است حجم قابل استفاده برای ذخیره‌سازی در این غار تقریباً برابر ۲۵۰۰۰۰ مترمکعب (معادل ۱/۵ میلیون بشکه نفت‌خام) است. در شکل٤ مقطع و پلان غار رودافشان نشان داده شده است.



شکل ٤. مقطع و پلان غار رودافشان [١٦]

نتایج

در این تحقیق ابتدا غارهای طبیعی با توجه به معیارهای مختلف برای ذخیره‌سازی نفت‌خام، ارزیابی شدند. در این مرحله انتخاب غارهای مناسب به‌روش حذفی انجام شد؛ یعنی با توجه به نقش اساسی هر یک از این معیارهای قوانین گردش‌گری و زیست‌محیطی، وضعیت

آب‌های زیرزمینی، حجم فضای محتمل برای ذخیره‌سازی و فاصلهٔ غار از خطوط لولهٔ اصلی انتقال نفت‌خام و پالایشگاه‌های بزرگ کشور، اگر غاری فاقد تنها یک معیار بود و یا آن را به قدر کافی ارضا نمی‌کرد، از لیست غارهای مناسب اولیه برای ذخیره‌سازی نفت‌خام حذف شد. پس از این‌که، این کار برای هر چهار معیار مذکور انجام گرفت، تنها غارهای دربند، کهک، بورنیک، رودافشان، کان‌گوهر و چاه دیو (ارازه) در لیست غارهای قابل بررسی قرار گرفتند که حداقل‌های لازم برای همهٔ معیارهای مذکور را دارند. سپس در مرحلهٔ بعدی، برای تعیین غار مستعد به‌منظور ذخیره‌سازی نفت‌خام، این شش غار بر اساس نظرخواهی از افراد با تجربه در زمینه ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری و با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که ترکیبی از دو روش تحلیل سلسله مراتبی فازی و شباهت به گزینه ایده‌ال بود، با هم مقایسه شدند. پس از این کار از بین غارهای حاضر، غار رودافشان به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت‌خام انتخاب شد. لازم به یادآوری است غار رودافشان دارای شرایط خود ایستایی بسیار خوبی است و برای ذخیره‌سازی نفت‌خام در این غار لازم است یک سری تصحیحات هندسی و نیز آب‌بندی بر روی دیواره‌های آن صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

از اساتید محترم آقایان دکتر اویند گرو[۱]، آینر براک[۲]، چانگ[۳]، یانگ‌لی[۴]، حسین جلالی‌فر، حجت‌الله رنجبر، سیدرحمان ترابی، محمد عطایی و دیگر اساتید و هم‌چنین خانم شیدا اصلانی که با راهنمایی‌های سازنده‌شان در تهیهٔ مقالهٔ حاضر، این‌جانب را راهنمایی کرده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

---

۱. Eivind Grøv ۲. Einer Broch ۳. I.M.Chung ۴. Jin-Yong Lee

منابع

۱. هاشمی سیدمحمدادهم ، نجفی عبدالعزیز، کوچکی احسان، *لزوم ذخیره‌سازی استراتژیک نفت و گاز در ایران*، اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری (۱۳۹۰).

۲. داودآبادی ملیحه، رمضان‌زاده احمد، جلالی سیدمحمد اسماعیل، جلالی‌فر حسین، *مبانی ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع‌شده در مغارهای سنگی دارای پوشش*، اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری (۱۳۹۰).

۳. کریمی‌نسب سعید، جلالی‌فر حسین و رنجبر حجت‌اله، *مبانی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری و ضرورت احداث مخازن زیرزمینی نفت‌خام در ایران*، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، انجمن مهندسی معدن ایران، دانشگاه یزد و شرکت سنگ آهن مرکزی ایران (۱۳۸۸).

4. Haug, S. M., Broch E., "Storage of Oil and Gas in Rock Caverns-History and Development", Norwegian Tunneling Society, Publication No. 16 (2007).

5. Liu Cheng, Yang Zhao, Pan Xiaoming, Wang Laigui, "Design of Water Curtain Control System of Underground Water Seal Oil Cavern", Department of Geotechnical Engineering Tongji University Shanghai, China and Department of mechanics engineering Liaoning Technical University Fuxin, Chin (2009).

6. A. Føsker, "Ekeberg Petroleum Storage Facility Experience from the Ekeberg Oil Storage and Ekeberg Tank", Publication No. 16: Underground Constructions for the Norwegian Oil and Gas Industry, Norwegian tunneling Society, Oslo, Norway, ISBN-NR. 978-82-92641-08-8 (2007).

۷. سلطان‌علیزاده امیر، *تحلیل پایداری و نشت غار طبیعی به‌منظور امکان‌سنجی مقدماتی ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت‌خام*، پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۰).

۸. سلطان‌علیزاده امیر، رمضان‌زاده احمد، جلالی سید محمد اسماعیل، نوروزی مهدی، *بررسی مقدماتی پتانسیل ذخیره‌سازی نفت خام در غارهای طبیعی ایران*، اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، (۱۳۹۰).

9. L. A. Zadeh, "the concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", I. INF Sci 8 (1975) 199-249.

10. C. L. Hwang, k. Yoon, "Multiple attributes decision making methods and application", Springer, Berlin (1981).

11. C. T. Chen, C. T. Lin, S. F. Huang, "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management", Int J Prod Econ 102: (2006) 289-301

12. www.gsi.ir

13. www.irancaves.com

14. www.mebook.ir

۱۵. نجفی مهدی، جلالی سیدمحمداسماعیل، *بررسی روش‌های قابلیت اعتماد پایداری فضاهای زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری*، اولین کنفرانس مجازی ذخیره‌سازی زیرزمینی مواد هیدروکربوری، (۱۳۹۰).

۱٦. صلاحی مصطفی ، *غارهای ایران*، نشر نی، (۱۳۸۷).