پژوهش نفت شماره ۱۳۴، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۳، صفحه ۱۳۹-۱۲۰

امکان‌سنجی مناطق ذخیره‌سازی گاز با استفاده از مدل AHP_fuzzy: مطالعه موردی استان بوشهر

سید شاهرخ نوری [۱]، سید عباس نوری [۲] و حمیده صالحی‌نژاد رنجبر*[۳]

۱- دانشکده نفت و مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی نفت، واحد شهریار، دانشگاه آزاد اسلامی، شهریار، ایران

۳- موسسه آموزش عالی و غیرانتفاعی علامه جعفری رفسنجان، مربی دانشکده معدن، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴

چکیده

ذخیره‌سازی گاز یکی از اجزای حیاتی سیستم انرژی جهانی است و نقش مهمی در تضمین امنیت انرژی ایفا می‌کند، به‌ویژه در کشورهایی که به‌شدت به گاز طبیعی به‌عنوان منبع اولیه انرژی متکی هستند. با افزایش تقاضا برای گاز طبیعی، نیاز به تأسیسات ذخیره‌سازی گاز کارآمد و مؤثر بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد. یکی از راه‌کارهای رفع این نیاز پیدا کردن مدل بهینه برای مکان گزینی است که ترکیب نظرات کارشناسان و سیستم‌های اطلاعات مکانی باشد. بر همین اساس هدف از این تحقیق شناسایی ذخیره‌گاه‌های گاز در استان بوشهر است که با ترکیبی از سیستم اطلاعات جغرافیایی و پنل خبرگان، بهینه‌ترین مکان ذخیره گاز را شناسایی می‌کند. روش تحقیق در این بررسی به‌صورت تحلیلی - توصیفی است و ماهیت کاربردی دارد. جهت شناسایی شاخص‌ها از مطالعات نظری استفاده‌شده که درنهایت چهار بعد طبیعی (۹ متغیر)، کالبدی (۵ متغیر)، زیست‌محیطی (۵ متغیر) و زیرساختی (۹ متغیر) مشخص گردید که لایه مکانی هرکدام از معیارها تهیه شد. لایه GIS متغیرهای مطرح شده از طرح آمایش سرزمین اخذ شده‌است. جهت نرمال‌سازی از روش فازی خطی کاهشی و افزایشی استفاده شده که از ۲۵ معیار مشخص‌شده ۹ معیار دارای اثر منفی و با روش فازی خطی افزایشی نرمال‌سازی شده و ۱۶ شاخص دیگر نیز با روش فازی خطی کاهشی نرمال شده‌اند. با توجه به نظر کارشناسان در بستر مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، گنبدهای نمکی و سفره آب‌های زیرزمینی با وزن ۰/۰۹۷ به‌عنوان مهم‌ترین معیار شناسایی‌شده‌اند. با توجه به اینکه نرخ ناسازگاری در مدل برابر ۰/۰۵ و کمتر از بوده بنابراین صحت مقایسه زوجی بین معیارها توسط کارشناسان نیز تأیید می‌شود. بعد از اعمال وزن معیارها و تلفیق آن‌ها با استفاده از عملگرهای پنج‌گانه فازی روش گاما بهترین مکان را شناسایی کرده و دو مکان ازجمله گنبد نمکی جاشک و گنبد نمکی سربسی به‌عنوان مناسب‌ترین مکان ذخیره گاز شناسایی‌شده‌اند.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی، ذخیره گاه گازی، مدل AHP_fuzzy، سیستم اطلاعات جغرافیایی، استان بوشهر

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی petro_emerald@yahoo.com
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2023.5149.3281)

مقدمه

ذخیره‌سازی گاز یکی از اجزای حیاتی سیستم انرژی جهانی است [۱]. ذخیره‌سازی گاز با ایجاد یک حائل در برابر اختلالات عرضه و نوسانات قیمت، نقش مهمی در تضمین امنیت انرژی ایفا می‌کند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، تأسیسات ذخیره‌سازی گاز انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان را برای سیستم انرژی فراهم می‌کند و به آن اجازه می‌دهند به تغییرات عرضه و تقاضا پاسخ دهد [۱]. انواع مختلفی از تأسیسات ذخیره‌سازی گاز، ازجمله ذخیره‌سازی زیرزمینی، ذخیره‌سازی بالای زمین و ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع (LNG) وجود دارد. تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی رایج‌ترین نوع هستند و می‌توانند در میدان‌های گازی تخلیه‌شده، سفره‌های زیرزمینی، غارهای نمکی یا سازنده‌ای سنگ سخت قرار گیرند [۲]. تأسیسات ذخیره‌سازی روی زمین شامل مخازن تحت‌فشار و نگه‌دارنده‌های گاز است که معمولاً برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت استفاده می‌شوند [۱]. از تأسیسات ذخیره‌سازی LNG برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی در حالت مایع استفاده می‌شود که حجم آن را کاهش می‌دهد و امکان حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی کارآمدتر را فراهم می‌کند [۳]. نمونه‌های موفقی درزمینه ذخیره‌سازی گاز زیرزمینی وجود دارند ازجمله تأسیسات ذخیره‌سازی گاز خشن در بریتانیا که در یک میدان گازی تخلیه‌شده در دریای شمال واقع‌شده است [۴]. نزدیکی این سایت به مراکز عمده تقاضا و زیرساخت‌های حمل‌ونقل و همچنین زمین‌شناسی سایت، آن را به مکانی ایده‌آل برای ذخیره‌سازی گاز تبدیل کرده است. به‌طور مشابه، تأسیسات ذخیره‌سازی گاز Mont Belvieu در تگزاس، ایالات‌متحده، در یک سازند گنبد نمکی تخلیه‌شده قرار دارد که ذخیره‌سازی ایمن و قابل‌اعتماد را فراهم می‌کند [۵]. ذخیره‌سازی گاز نقش مهمی در تضمین امنیت انرژی ایفا می‌کند، به‌ویژه در کشورهایی که به‌شدت به گاز طبیعی به‌عنوان منبع اولیه انرژی متکی هستند. با افزایش تقاضا برای گاز طبیعی، نیاز به تأسیسات ذخیره‌سازی گاز کارآمد و مؤثر بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد. از نظر محققان و مهندسان یکی از راهکارهای رفع این نیاز پیدا کردن مدل بهینه برای مکان گزینی است که از ترکیب نظرات کارشناسان و سیستم‌های اطلاعات مکانی است. نقش سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مکان‌یابی ذخیره‌سازی گاز در سال‌های اخیر اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است. GIS ابزار قدرتمندی است که به شرکت‌های اکتشافی امکان تجسم و تجزیه‌وتحلیل داده‌های مکانی ازجمله داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و محیطی را می‌دهد تا مناطق بالقوه ذخیره‌سازی گاز را شناسایی کنند. یکی از کاربردهای اولیه GIS در ذخیره‌سازی گاز، شناسایی مکان‌های مناسب برای تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی است. تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی معمولاً در سازنده‌ای زمین‌شناسی مانند غارهای نمکی، مخازن تخلیه‌شده گاز یا سفره‌های زیرزمینی قرار دارند. این سازندهای زمین‌شناسی باید معیارهای خاصی مانند عمق، تخلخل، نفوذپذیری و ظرفیت را برای ذخیره‌سازی مناسب داشته باشند. از GIS می‌توان برای شناسایی و تجزیه و تحلیل این معیارها و همچنین برای ارزیابی خطرات محیطی مرتبط با ذخیره‌سازی گاز در یک مکان خاص استفاده‌کرد [۶]. با ادغام این منابع داده‌ای مختلف، GIS می‌تواند درک جامعی از عواملی که بر مناسب بودن یک مکان خاص برای ذخیره‌سازی گاز تأثیر می‌گذارد، ارائه دهد [۷]. همچنین از دیگر کاربردهای GIS در ذخیره‌سازی گاز می‌توان به توانایی آن در یکپارچه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل انواع مختلف داده‌های مکانی اشاره کرد. این مورد شامل داده‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیک و همچنین داده‌های مربوط به محیط‌زیست، زیرساخت‌ها و عوامل اجتماعی-اقتصادی است. تعدادی از مطالعات عوامل مؤثر در انتخاب سایت برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز را

به‌عنوان‌مثال [۸]، سایت‌های بالقوه برای ذخیره گاز طبیعی در هلند را با استفاده از یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری که عوامل زمین‌شناسی، فنی، محیطی، اقتصادی و اجتماعی را یکپارچه کرده است، ارزیابی کردند. آن‌ها سایت‌های مناسب برای ذخیره گاز را شناسایی کردند و براساس اهمیت نسبی عوامل مختلف، رتبه‌بندی مناسب‌ترین سایت‌ها را ارائه دادند. آن‌ها دریافتند که عوامل زمین‌شناسی مهم‌ترین و به‌دنبال آن عوامل محیطی، عوامل فنی و عوامل اقتصادی و اجتماعی هستند. در یک مطالعه دیگر [۹]، یک روش تجزیه‌وتحلیل تصمیم چند معیار (MCDA [۱]) را برای انتخاب سایت بهینه برای ذخیره گاز زیرزمینی در تایوان پیشنهاد داد. آن‌ها شش معیار اصلی برای انتخاب سایت، ازجمله خصوصیات زمین‌شناسی، خصوصیات هیدروژولوژیکی، کاربری اراضی، عوامل اقتصادی و اجتماعی، ایمنی و ملاحظات محیطی را مشخص کردند. آن‌ها سپس از روش MCDA برای ارزیابی سایت‌های بالقوه و شناسایی مناسب‌ترین مکان برای ذخیره گاز استفاده کردند. مطالعات دیگر بر جنبه‌های خاص انتخاب سایت برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز متمرکز شده‌است. به‌عنوان‌مثال [۱۰]، اثرات تنوع زمین‌شناسی را بر مناسب بودن سفره‌های شور برای ذخیره گاز بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که وجود ناهمگونی زمین‌شناسی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در اثربخشی و ایمنی ذخیره گاز در سفره‌های شور داشته‌باشد و این امر باید هنگام انتخاب یک سایت برای ذخیره گاز در نظر گرفته شود. به‌طورکلی، ادبیات نشان‌می‌دهد که انتخاب یک مکان مناسب برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز، نیاز به بررسی دقیق طیف وسیعی از عوامل ازجمله خصوصیات زمین‌شناسی و هیدروژولوژیکی، ملاحظات زیست‌محیطی و ایمنی، عوامل اقتصادی و اجتماعی و زیرساخت‌های محلی دارد. استفاده از سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری و رویکردهای MCDA می‌توانند در ادغام این عوامل و شناسایی مناسب‌ترین مکان برای ذخیره گاز مفید باشد. بر همین اساس هدف از این تحقیق شناسایی ذخیره‌گاه‌های گاز در استان بوشهر است که با ترکیبی از سیستم اطلاعات جغرافیایی و پنل خبرگان بهینه‌ترین مکان ذخیره گاز را شناسایی می‌کند.

مبانی نظری

انواع تأسیسات ذخیره‌سازی گاز

تأسیسات ذخیره‌سازی گاز را می‌توان به‌طورکلی به سه نوع طبقه‌بندی کرد: ذخیره‌سازی زیرزمینی، ذخیره‌سازی بالای زمین و ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع (LNG [۲]). هر نوع تأسیسات بسته به عواملی مانند نوع گاز ذخیره‌شده، الگوی تقاضا و در دسترس بودن مکان‌های ذخیره‌سازی مناسب، مزایا و معایب خود را دارد.

ذخیره‌سازی زیرزمینی

ذخیره‌سازی زیرزمینی رایج‌ترین شکل ذخیره‌سازی گاز است که بیش از ۸۰٪ از ظرفیت ذخیره‌سازی گاز جهانی را به‌خود اختصاص می‌دهد [۱]. انبارهای زیرزمینی معمولاً در میادین گازی تخلیه‌شده، سفره‌های زیرزمینی یا غارهای نمک قرار دارند. میادین گازی تخلیه‌شده به‌ویژه برای ذخیره‌سازی گاز جذاب هستند زیرا در حال حاضر زیرساخت‌های لازم ازجمله چاه‌ها و خطوط لوله را در اختیار دارند. سفره‌های زیرزمینی نیز گزینه‌ای محبوب برای ذخیره‌سازی گاز هستند، زیرا حجم ذخیره‌سازی زیادی را فراهم می‌کنند و می‌توانند در صورت نیاز با گاز شارژ شوند. غارهای نمک نوع دیگری از تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی هستند که می‌توانند برای ذخیره گاز طبیعی یا گاز مایع (LPG [۳]) مورد استفاده قرار گیرند. غارهای نمکی با تزریق آب به تشکیلات نمکی، حل کردن نمک و ایجاد یک حفره بزرگ و پایدار برای ذخیره گاز ایجاد می‌شوند [۱۱].

1. Multiple-Criteria Decision Analysis
2. Liquefied Natural Gas
3. Liquefied Petroleum Gas

ذخیره‌سازی در بالای زمین

انبارهای روی زمین معمولاً برای ذخیره گاز مایع (LPG)، پروپان یا بوتان استفاده می‌شود. این گازها در مخازن یا کره‌های تحت‌فشار ذخیره می‌شوند که اغلب در پالایشگاه‌ها، کارخانه‌های شیمیایی یا سایر سایت‌های صنعتی قرار دارند. تأسیسات ذخیره‌سازی روی زمین نسبتاً ساده و ارزان هستند، اما نسبت به انبارهای زیرزمینی رایج نیستند زیرا به فضای زیادی نیاز دارند و در برابر آسیب‌های ناشی از آب و هوا یا خطرات امنیتی آسیب‌پذیرتر هستند [۱۱].

ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع (LNG)

ذخیره‌سازی LNG شکل تخصصی ذخیره‌سازی گاز است که برای ذخیره‌سازی گاز طبیعی به‌شکل مایع آن استفاده می‌شود. LNG از خنک کردن گاز طبیعی تا دمای ۱۶۱ °C- تولید می‌شود و در این مرحله به مایع تبدیل می‌شود و می‌توان آن را در مخازن با طراحی خاص ذخیره کرد. تأسیسات ذخیره‌سازی LNG معمولاً در نزدیکی پایانه‌های واردات LNG قرار دارند و از آن‌ها برای ذخیره گاز برای استفاده در دوره‌های اوج تقاضا یا برای تأمین منابع پشتیبان در صورت اختلال در تأمین گاز استفاده می‌شود [۱۱].

مزایا و معایب هر نوع تسهیلات

انبارهای زیرزمینی مزایای متعددی نسبت به انبارهای روی زمینی دارند. آن‌ها حجم زیادی از ظرفیت ذخیره‌سازی را در یک فضای نسبتاً کوچک فراهم می‌کنند و کمتر در برابر آسیب‌های ناشی از آب و هوا یا خطرات امنیتی آسیب‌پذیر هستند. آن‌ها همچنین تأثیر زیست‌محیطی کمتری نسبت به تأسیسات ذخیره‌سازی بالای زمین دارند، زیرا در زیرزمین قرار دارند و به سطح زیادی نیاز ندارند [۲]. با این حال، تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی ممکن است برای ساخت و بهره‌برداری پرهزینه باشد و برای ذخیره‌سازی ایمن و مؤثر به زمین‌شناسی و هیدرو ژئولوژی مناسب نیاز دارند. ساخت و بهره برداری از انبارهای روزمینی معمولاً هزینه کمتری نسبت به انبارهای زیرزمینی دارد و در صورت لزوم می‌توان آن‌ها را به‌راحتی جابه‌جا کرد. آن‌ها همچنین نسبت به انبارهای زیرزمینی تطبیق پذیرتر هستند، زیرا می‌توانند انواع گازها را ذخیره کنند و محدود به سازنده‌ای زمین‌شناسی خاص نیستند [۱۱]. با این حال، تأسیسات ذخیره‌سازی بالای زمین به سطح زیادی نیاز دارند و می‌توانند در برابر آسیب‌های ناشی از آب و هوا یا خطرات امنیتی آسیب‌پذیر باشند. تأسیسات ذخیره‌سازی LNG مزایای متعددی نسبت به تأسیسات ذخیره‌سازی سنتی گاز دارند. آن‌ها یک راه حل ذخیره‌سازی با چگالی بالا را ارائه می‌دهند که می‌توانند به‌راحتی توسط کشتی یا کامیون حمل شود و اجازه می‌دهد گاز در فواصل طولانی حمل شود [۱۲]. آن‌ها همچنین یک منبع پشتیبان قابل‌اعتماد از گاز را در صورت اختلال در تأمین گاز فراهم می‌کنند. با این حال، تأسیسات ذخیره‌سازی LNG برای ساخت و بهره‌برداری گران است و به تجهیزات و زیرساخت‌های تخصصی نیاز دارند.

تجربیات جهانی ذخیره گاز

امکانات ذخیره‌سازی گاز نقش مهمی در تضمین تأمین مطمئن و پایدار گاز طبیعی برای مصرف کنندگان در سراسر جهان دارد. در این بخش چندین نمونه از تجارب موفق جهانی بررسی خواهد شد. همچنین نمونه‌هایی از امکانات ناموفق ذخیره گاز و دلایل عدم موفقیت آن‌ها را بررسی خواهیم کرد.

نمونه‌های موفق

ذخیره‌سازی گاز Haidach، اتریش: تأسیسات ذخیره‌سازی گاز Haidach در اتریش یکی از بزرگ‌ترین تأسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در اروپا است و ظرفیت ۲/۵ میلیارد متر مکعب دارد. این مرکز در یک گنبد نمکی زیرزمینی قرار دارد و بیش از ۳۰ سال با موفقیت فعالیت می‌کند. موفقیت تأسیسات ذخیره‌سازی گاز حیداک را

می‌توان به زمین‌شناسی مطلوب مکان نسبت داد که یک محیط ذخیره‌سازی ایده آل برای گاز طبیعی را فراهم می‌کند. این تسهیلات همچنین از زیرساخت‌های مناسب حمل‌ونقل گاز توسعه یافته اتریش و یک محیط نظارتی مطلوب بهره می‌برد [۱۳]. ذخیره‌سازی گاز خشن، انگلستان: تأسیسات ذخیره‌سازی گاز خشن در انگلستان یکی از بزرگ‌ترین تأسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در اروپا بوده که ظرفیت آن ۳/۳ میلیارد متر مکعب بود. این مرکز در یک میدان گاز تخلیه‌شده دریایی واقع‌شده و بیش از ۳۰ سال با موفقیت اداره می‌شد. موفقیت تأسیسات ذخیره‌سازی گاز خشن را می‌توان به زمین‌شناسی مطلوب مکان و استفاده از فن‌آوری پیشرفته برای اطمینان از ذخیره ایمن و کارآمد گاز طبیعی نسبت داد. این تسهیلات همچنین از زیرساخت‌های خوب حمل‌ونقل گازی توسعه یافته انگلیس و یک محیط نظارتی مطلوب (Centrica، N.D.) بهره می‌برد [۱۳].

نمونه‌های ناموفق

ذخیره‌سازی گاز Aliso Canyon، ایالات‌متحده: مرکز ذخیره‌سازی گاز Aliso Canyon در کالیفرنیا یکی از بزرگ‌ترین تأسیسات ذخیره‌سازی گاز طبیعی در ایالات‌متحده بوده که ظرفیت آن ۸۶ میلیارد فوت مکعب بود. نشت گسترده‌ای در این مرکز رخ داد که منجر به انتشار بیش از ۱۰۰۰۰۰ میلیون کیلوگرم متان در جو شد. این نشت منجر به تخلیه هزاران نفر از ساکنان مجاور شد و تأثیر قابل‌توجهی در محیط‌زیست داشت. عدم موفقیت مرکز ذخیره‌سازی گاز Aliso Canyon را می‌توان به شیوه‌های نگهداری ضعیف و اقدامات ایمنی ناکافی نسبت داد [۱۴]. ذخیره‌سازی گاز بانقیائو، چین: تأسیسات ذخیره‌سازی گاز بانقیائو در چین یک مرکز بزرگ ذخیره‌سازی زیرزمینی با ظرفیت ۲/۵ میلیارد متر مکعب بود. یک انفجار گسترده در این مرکز رخ داد که منجر به کشته شدن ۲۴۳ نفر شد و باعث آسیب قابل‌توجهی به مناطق اطراف آن شد. این انفجار در اثر ترکیبی از عوامل ازجمله اقدامات ایمنی ناکافی و شیوه‌های نگهداری ضعیف اتفاق افتاد [۱۵].

عوامل مؤثر بر محل ذخیره‌سازی گاز

انتخاب مکان برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز تحت‌تأثیر عوامل متعددی است. زمین‌شناسی و هیدرو ژئولوژی ملاحظات مهمی هستند، زیرا سطح زیرزمینی باید قابلیت ذخیره‌سازی ایمن و مطمئن گاز را داشته‌باشد [۱۶]. تشکل‌های زمین‌شناسی که از هیدروکربن‌ها تهی شده‌اند مانند میدان‌های گازی یا سفره‌های زیرزمینی تخلیه‌شده، اغلب برای ذخیره‌سازی گاز مناسب در نظر گرفته می‌شوند [۱۷]. عوامل دیگر عبارتند از جغرافیای سایت، ازجمله نزدیکی آن به مراکز تقاضا و زیرساخت‌های حمل‌ونقل [۱]. محدودیت‌های نظارتی و محیطی نیز در تعیین مکان تأسیسات ذخیره‌سازی گاز نقش دارند، همان‌طور که در دسترس بودن زیرساخت‌های محلی، مانند خطوط لوله و تأسیسات پردازش نقش دارند [۲].

عوامل زمین‌شناسی

زمین‌شناسی یک عامل مهم در انتخاب مکانی برای امکانات ذخیره‌سازی گاز زیرزمینی است. ساختار زمین‌شناسی باید بتواند محیط ذخیره‌سازی ایمن را برای ذخیره گاز فراهم کند. طبق گفته هولت، سازنده‌ای زمین‌شناسی مناسب برای ذخیره گاز شامل مزارع گاز تخلیه‌شده، سفره‌ها سفره‌ها و غارهای نمکی است. مزارع گاز تخلیه‌شده مناسب‌ترین ساختار زمین‌شناسی برای ذخیره‌سازی گاز در نظر گرفته می‌شوند زیرا آن‌ها یک سیستم مهار طبیعی را فراهم می‌کنند و دارای زیرساخت‌های موجود هستند که می‌توانند برای ذخیره گاز مجدداً مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، همه میدان‌های گاز تخلیه‌شده به‌دلیل عوامل مختلف مانند وجود مناطق گسل، یکپارچگی کاپروک و محدودیت‌های فشار برای ذخیره گاز مناسب نیستند [۱۸].

سفره‌ها همچنین به‌عنوان سازنده‌ای زمین‌شناسی مناسب برای ذخیره‌سازی گاز در نظر گرفته می‌شوند، اما استفاده از آن‌ها به‌دلیل نگرانی در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی و پتانسیل لرزه‌نگاری ناشی از آن محدود است [۱۸]. غارهای نمکی کمترین ساختار زمین‌شناسی متداول است که برای ذخیره گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما آن‌ها نسبت به سایر سازندها مانند تزریق بالا، میزان خروج زیاد و میزان نفوذ گاز پایین مزایایی را ارائه می‌دهند [۱۹]. با این حال، استفاده از غارهای نمکی برای ذخیره گاز به‌دلیل هزینه بالای ساخت و ساز و پتانسیل فروپاشی غار محدود است [۱۸].

عوامل هیدروژولوژیکی

هیدروژولوژی یکی دیگر از عوامل مهم است که باید هنگام انتخاب مکانی برای امکانات ذخیره‌سازی گاز زیرزمینی در نظر گرفته شود. خواص هیدروژولوژیکی ساختار زمین‌شناسی باید بتواند گاز را مهار کند و از نفوذ آن به مناطق دیگر جلوگیری کند. طبق گفته هولت، خصوصیات هیدروژولوژیکی سازند، مانند نفوذپذیری و تخلخل باید با خواص گاز ذخیره‌شده سازگار باشند. وجود گسل‌ها و شکستگی‌ها در شکل‌گیری زمین‌شناسی می‌توانند مسیرهایی را برای نفوذ گاز ایجاد کرده و اثربخشی تأسیسات ذخیره‌سازی را کاهش دهد [۱۸].

عوامل جغرافیایی

عوامل جغرافیایی هنگام انتخاب مکانی برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز، یک نکته مهم است. مکان باید به‌راحتی در دسترس باشد و پیوندهای حمل‌ونقل خوبی داشته‌باشد تا اطمینان حاصل شود که می‌توان گاز را به‌طور کارآمد به آن داخل و از آن منتقل کرد. طبق گفته‌های [۲۰]، این مکان همچنین باید از بلایای طبیعی مانند سیل، لغزش زمین یا زمین‌لرزه‌ها که می‌توانند به تأسیسات ذخیره‌سازی آسیب برساند یا باعث نشت گاز شود، در امان باشد. انتخاب مکانی که نزدیک به مراکز تقاضا است نیز می‌تواند هزینه حمل‌ونقل گاز به کاربران نهایی را کاهش دهد [۲۱].

ملاحظات ژئوتکنیکی

ملاحظات ژئوتکنیکی مانند نوع خاک و ثبات، هنگام انتخاب مکانی برای امکانات ذخیره‌سازی زیرزمینی مهم است. پایه مخازن ذخیره‌سازی باید پایدار و قادر به مقاومت در برابر وزن مخازن و گاز ذخیره‌شده باشد. نوع خاک همچنین برای ساخت خطوط لوله و سایر زیرساخت‌های مرتبط با این تسهیلات مهم است [۲۰].

محدودیت‌های نظارتی و زیست‌محیطی

محدودیت‌های نظارتی و زیست‌محیطی هنگام انتخاب مکانی برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز، ملاحظات مهمی هستند. این تسهیلات باید کلیه مقررات و استانداردهای مربوطه ازجمله مقررات ایمنی، زیست‌محیطی و استفاده از زمین را رعایت کند. ملاحظات زیست‌محیطی شامل تأثیر بالقوه بر کیفیت هوا و آب، زیستگاه‌های حیات وحش و سایر مناطق حساس است [۱۹]. انتخاب مکانی که تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند و مطابق با کلیه مقررات و استانداردهای مربوطه است، می‌تواند به اطمینان از پایداری طولانی مدت تأسیسات ذخیره‌سازی کمک کند [۱۸].

عوامل زیرساختی

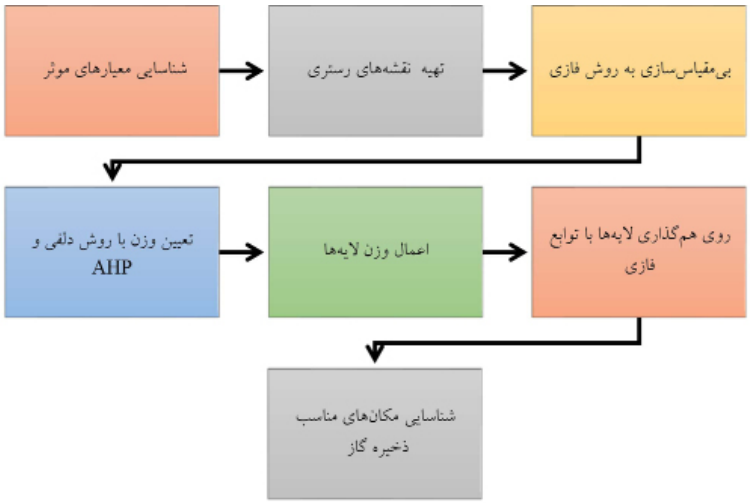
در دسترس بودن زیرساخت‌های محلی مانند منابع برق و آب، جاده‌ها و خطوط لوله، هنگام انتخاب مکانی برای تأسیسات ذخیره‌سازی گاز نکته مهمی است. تسهیلات باید امکان دسترسی به زیرساخت‌های ضروری را برای عملیاتی ایمن و مؤثر داشته‌باشد. علاوه‌براین، این تسهیلات باید بتواند به شبکه توزیع گاز موجود متصل شود تا اطمینان حاصل شود که گاز ذخیره‌شده می‌تواند به کاربران نهایی منتقل شود [۲۰]. در دسترس بودن زیرساخت‌های کافی برای اطمینان از ایمنی، کارآیی و مقرون به صرفه بودن تأسیسات ذخیره گاز مهم است.

روش پژوهش

روش تحقیق در این بررسی به‌صورت تحلیلی-توصیفی است و ماهیت کاربردی دارد. در فرآیند تحقیق، ابتدا به تشریح دقیق مسئله اقدام و پیشینه تحقیق و مبانی نظری بررسی شده و مشخص گردید که شاخص‌های متعددی درزمینه مکان‌یابی ذخیره‌گاه‌های گازی مؤثر هستند بر همین اساس ابتدا براساس ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه شاخص‌ها پالایش شده و سپس در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی شده اند که شامل: بعد طبیعی با ۹ متغیر، بعد کالبدی با ۵ متغیر، بعد زیست‌محیطی با ۵ متغیر، و بعد زیرساختی با ۹ متغیر هستند. هرکدام از معیارهای شناسایی‌شده باید به‌صورت یک لایه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شود. بدین‌منظور نقشه‌های معیار در محیط Arc Gis تهیه گردید و جهت استانداردسازی لایه‌ها از توابع عضویت فازی در محیط بهره گرفته شد و با ترکیب لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار GIS پهنه‌های مناسب ذخیره گاز با استفاده از مدل AHP_Fuzzy در استان بوشهر شناسایی شد؛ فرآیند تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.

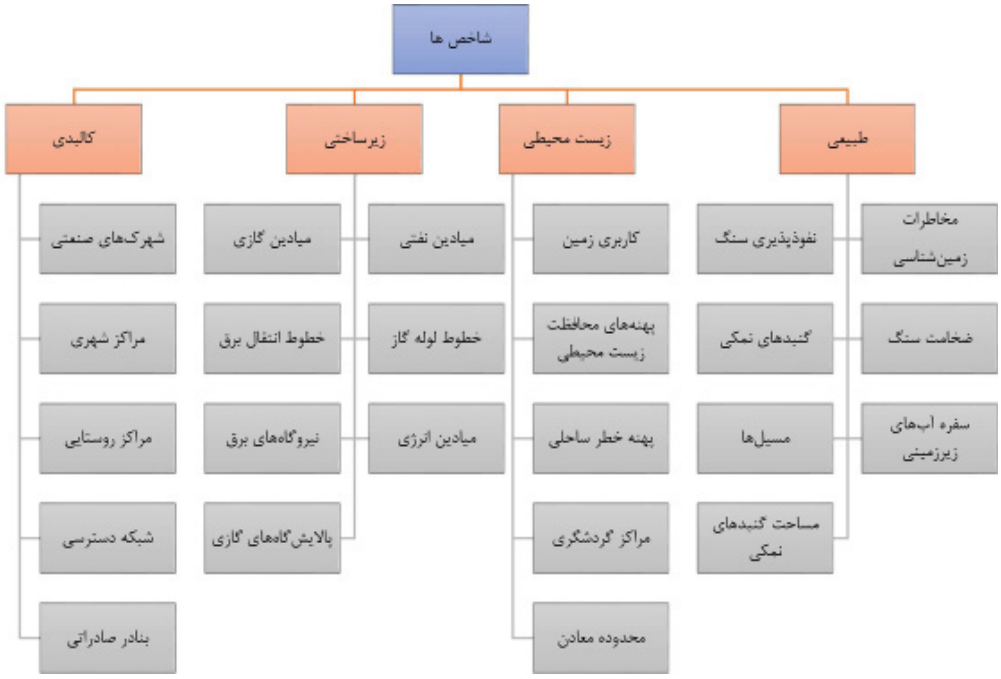
گام اول: شناسایی معیارها و آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی در پایگاه داده

در پژوهش حاضر شاخص‌های به‌کاررفته جهت شناسایی پهنه‌های مناسب ذخیره گاه گاز شامل چهار بعد طبیعی (۹ متغیر)، کالبدی (۵ متغیر)، زیست‌محیطی (۵ متغیر) و زیرساختی (۹ متغیر) است که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. لذا با توجه به شناخت اطلاعات مکانی و توصیفی، اقدام به آماده‌سازی داده‌ها برای ورود به محیط GIS گردید. هدف اصلی در این مرحله، گردآوری لایه‌های اطلاعاتی پایه جهت قرار گرفتن در پایگاه داده می‌باشد. با توجه به اینکه هدف از این پایگاه، بهره‌مندی از آنالیزهای GIS در شناسایی پهنه‌های مناسب ذخیره گاز در استان بوشهر است، لایه‌های اطلاعاتی موجود در این پایگاه نیز باید از استانداردها و خصوصیات تعریف شده برای اقسام لایه‌ها در محیط GIS برخوردار باشند. برای لایه‌های GIS مورد استفاده در این تحقیق از لایه‌های GIS طرح آمایش سرزمین استان بوشهر استفاده شده‌است. بدین ترتیب پس از گردآوری لایه‌های اطلاعاتی مورد نظر، به تصحیح و آماده‌سازی آن‌ها برای ورود به بانک اطلاعات در محیط GIS پرداخته شد. از آنجایی که در این تحقیق از نقشه‌های با مقیاس ۱: ۲۵۰۰۰ استفاده شد. اطلاعات مکانی این مقیاس شامل نقشه‌هایی در سیستم تصویر جهانی ترانسفر مرکاتور (UTM [1])، زون ۳۹ است.



شکل ۱ فرآیند تجزیه و تحلیل داده‌ها

1. Universal Transverse Mercator



شکل ۲ معیارها و زیر معیارهای مورد استفاده

گام دوم: تهیه نقشه‌های رستری

جهت رستری کردن معیارها از تابع فاصله اقلیدسی[1] استفاده‌شده است. با استفاده از "فاصله اقلیدسی، کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه بر طبق رابطه فیثاغورث، محاسبه می‌شود.

گام سوم: بی‌مقیاس‌سازی فازی

در شاخص‌های تصمیم‌گیری، شاخص‌های مثبت و منفی با هم در یک ماتریس می‌باشند و از سوی دیگر هر یک از شاخص‌های کمی دارای مقیاس اندازه‌گیری خاص خود می‌باشند که این کار مقایسه مقادیر آن‌ها با یکدیگر را غیرممکن می‌سازد، لذا می‌بایست به طریقی آن‌ها را مستقل از واحد اندازه‌گیری کرد تا بتوان عمل مقایسه را انجام داد. به بیانی دیگر به‌منظور قابل مقایسه شدن مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری، باید از "بی‌مقیاس‌سازی" استفاده‌کرد که به‌وسیله آن، مقادیر شاخص‌های مختلف، بدون بعد شده و جمع‌پذیر می‌شوند [۲۲]. راه‌های مختلفی برای بی‌مقیاس‌سازی وجود دارد. در این مطالعه برای بی‌مقیاس‌سازی از روش فازی خطی کاهشی و افزایشی استفاده می‌گردد. Hwang و همکاران [۲۳] بیان کرده‌اند که این دو معادله فرآیند نرمال‌سازی را بسیار ساده نموده و زمانی که سود و زیان هر دو با یکدیگر در ماتریس تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند، به کار نمی‌روند. بنابراین یک فرآیند اصلاح‌شده را تعریف نمودند. در این روش مقادیر بی‌مقیاس شده برای شاخص‌های با جنبه مثبت و منفی به‌ترتیب در رابطه‌های ۱ و ۲ عبارت است از:

$$n_{ij} = \frac{\alpha_{ij} - \alpha_j^{\min}}{\alpha_j^{\max} - \alpha_j^{\min}} \quad (۱)$$

$$n_{ij} = \frac{\alpha_j^{\max} - \alpha_{ij}}{\alpha_j^{\max} - \alpha_j^{\min}} \quad (۲)$$

در این‌جا a_j^{Max} بیشترین مقدار اثر قابل قبول خصوصیت j و a_j^{Min} حداقل مقدار اثر قابل قبول خصوصیت j می‌باشد. مزایای تعریف n_{ij} توسط معادلات فوق عبارتند از این‌که مقیاس اندازه‌گیری دقیقاً بین صفر و یک برای هر خصوصیت متغیر خواهد بود، به‌طوری که بدترین نتیجه یک خصوصیت خاص به‌صورت $n_{ij} = 0$ و بهترین نتیجه نیز به‌صورت $n_{ij} = 1$ نمایش داده‌می‌شود [۲۴].

1. Euclidean Distance

گام چهارم: وزن‌دهی معیارها و قواعد تصمیم‌گیری چند معیاری

هر یک از پارامترهای مکان ذخیره‌سازی گاز مذکور دارای اهمیت و تأثیرگذاری متفاوتی هستند. لذا جهت بیان اهمیت هر معیار نسبت به معیارهای دیگر، باید این معیارها وزن‌دهی شوند. در ادبیات تصمیم چند معیاری، روش‌هایی نظیر رتبه‌بندی، درجه‌بندی، مقایسه دو به دو و تحلیل موازنه-جایگشتی در وزن‌دهی معیار بر پایه قضاوت‌های تصمیم‌گیران ارائه شده‌است. درصورتی‌که زمان و هزینه کم و به‌دست آوردن وزن‌ها به‌طریق آسان مهم‌ترین مسأله باشد، یکی از روش‌های رتبه‌بندی یا نسبتی توصیه می‌شود. اما هنگامی که دقت و اساس تئوری کار مسئله اصلی باشد، روش مقایسه دوتایی و یا تحلیل توازن مناسب می‌باشد [۲۵]. از ویژگی‌های روش تحلیل سلسله‌مراتبی، توانایی مدل‌کردن معیارهای کمّی و کیفی و استفاده از نظرات کارشناسان و مقایسه دوتایی بین معیارها است. مراحل اصلی که در روش AHP به اجرا در می‌آید به‌شرح زیر می‌باشد:

فرآیند سلسله‌مراتبی

اولین مرحله در تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) ترسیم یک نمایش گرافیکی از مسئله است که در آن، معیارهای مناسب برای دست‌یابی به هدف و گزینه‌های موردنظر نشان داده‌می‌شود [۲۶]. مهم‌ترین بخش در این مرحله انتخاب معیارها و عوامل مؤثر بر هدف تصمیم است [۲۷].

مقایسه زوجی و محاسبه وزن

در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عناصر مربوطه خود در سطح بالاتر به‌صورت زوجی مقایسه شده وزن آن‌ها محاسبه می‌گردد. کلیه مقایسه‌ها در فرآیند سلسله‌مراتبی به‌صورت زوجی انجام می‌گیرد. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهند کرد [۲۷]. مقایسه وزن‌دهی به عناصر در یک ماتریس K*K ثبت می‌شود. مقایسه زوجی به‌صورت ارزش‌گذاری عنصر سطر نسبت به عنصر ستون صورت‌می‌گیرد و برای ارزش‌گذاری نیز معمولاً از یک مقیاس فاصله‌ای از یک تا نُه استفاده می‌شود. هر چه مقدار ارزش داده شده، بیشتر باشد نشان‌دهنده اهمیت و ارجحیت بیشتر عنصر سطری به عنصر ستونی است. به‌طوری‌که ارزش نُه بیانگر کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر و ارزش یک بیانگر ارجحیت و اهمیت یکسان است. لازم به ذکر است که ماتریس مقایسه زوجی یک ماتریس معکوس است بدین معنی که اگر ارزش مقایسه‌ای عنصر سطری a نسبت به عنصر ستونی b، معادل نُه باشد ارزش مقایسه‌ای عنصر سطری b نسبت به عنصر ستونی a برابر ۹/۱ خواهد بود [۲۶].

گام پنجم: روی هم گذاری لایه‌ها با توابع فازی

استانداردسازی مورد استفاده در تحقیق حاضر به‌روش فازی بوده است. در منطق فازی عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود. پس از استانداردسازی، هر معیار یا لایه براساس اهمیت نسبی آن در جهت شناسایی محل ذخیره گاز وزن دهی شد و در ادامه فرآیند برای سنجش شاخص‌ها، معیارهایی که در رابطه باهدف پژوهش به‌صورت همزمان تأثیرگذارند، از طریق تحلیل فضایی هم‌پوشانی با هم تلفیق شده و لایه جدید حاصل گردید.

تلفیق شاخص‌ها (لایه‌های اطلاعاتی) با استفاده از مدل گاما

این عملگر حالت کلی از عملگرهای ضرب و جمع فازی است که در آن فاکتورهای مکان‌یابی طبق رابطه زیر تلفیق می‌شوند:

$$\mu_{Combination} = (\text{FuzzyAlgabricSum})^{\gamma} * (\text{FuzzyAlgabricProduct})^{1-\gamma} \quad (۳)$$

در رابطه شماره ۳ رابطه مقدار γ بین عدد صفر تا یک قابل تعیین است. اگر مقدار γ یک انتخاب شود رابطه تبدیل به عملگر جمع فازی و اگر مقدار γ صفر انتخاب شود رابطه به عملگر ضرب

فـازی تبدیـل شده‌اسـت. انتخـاب صحیـح و آگاهانـه γ بیـن صفـر و یـک، مقادیـری را در خروجـی بـه وجـود مـی‌آورد کـه نشـان‌دهنده سـازگاری قابـل انعطـاف میـان گرایشـات کاهشـی و افزایشـی دو عملگـر جمـع و ضـرب فـازی می‌باشـند. ایـن عملگـر زمانـی اسـتفاده می‌شـود کـه اثـر برخـی از شـواهد کاهشـی و اثـر برخـی دیگـر افزایشـی باشـد.

شاخص‌ها

در ابتـدا پیشـینه تحقیـق و مبانـی نظـری بررسـی شـده و مشـخص گردیـد کـه شـاخص‌های متعـددی درزمینـه مکان‌یابـی ذخیره‌گاه‌هـای گازی مؤثـر هسـتند کـه بایـد براسـاس مشـخصه‌های محـدوده مـورد مطالعـه شـاخص پالایـش شـوند. لـذا براسـاس شـرایط جغرافیایـی منطقـه مـورد مطالعـه شـاخص‌ها پالایـش گردیده‌اسـت. درنهایـت چهـار بعـد طبیعـی ۹ متغیـر، کالبـدی (۵ متغیـر)، زیسـت‌محیطی (۵ متغیـر) و زیرسـاختی (۹ متغیـر) مشـخص گردیـد. در شـکل ۲ ابعـاد و متغیرهـای مـورد اسـتفاده در تحقیـق آورده شده‌اسـت.

روش AHP

پـس از شناسـایی معیارهـا، روشـی بـرای ادغـام ارزیابی‌هـای خبـره به‌منظـور یافتـن بهتریـن نتیجـه مـورد نیـاز اسـت تـا وزن معیارهـا بـا همدیگـر مقایسـه گـردد. فرآینـد تحلیـل سلسـله‌مراتبی یکـی از روش‌هـای تصمیم‌گیـری چنـد شـاخصه اسـت کـه به‌منظـور وزن‌دهـی و اولویت‌بنـدی شـاخص‌ها و تصمیم‌گیـری و انتخـاب یـک گزینـه از میـان گزینه‌هـای متعـدد تصمیـم، بـا توجـه بـه شـاخص‌هایی کـه تصمیم‌گیرنـده تعییـن می‌کنـد، بـه کار مـی‌رود [۲۸]. روش AHP روشـی اسـت کـه می‌توانـد معیارهـای کیفـی یـک مسـئله تصمیـم را به‌صـورت کمّـی درآورد [۲۹]. فرآینـد تحلیـل سلسـله‌مراتبی یـا به‌طـور اختصـار AHP، روشـی اسـت بـرای تبدیـل ارزیابی‌هـای ذهنـی اهمیت‌هـای نسـبی بـه مجموعـه‌ای از وزن‌هـا [۳۰]. ایـن روش یکـی از جامع‌تریـن سیسـتم‌های طراحی‌شـده بـرای تصمیم‌گیـری بـا معیارهـای چندگانـه اسـت زیـرا ایـن تکنیـک امـکان فرمولـه کـردن مسـئله را به‌صـورت سلسـله‌مراتبی فراهـم می‌کنـد و همچنیـن امـکان در نظـر گرفتـن معیارهـای مختلـف کمّـی و کیفـی را در مسـئله دارد. ایـن فرآینـد گزینه‌هـای مختلـف را در تصمیم‌گیـری دخالـت داده و امـکان تحلیـل حساسـیت روی معیارهـا و زیـر معیارهـا را دارد. علاوه‌برایـن بـر مبنـای مقایسـه زوجـی بنـا نهـاده شـده کـه قضـاوت و محاسـبه را تسـهیل می‌نمایـد، همچنیـن مقـدار سـازگاری و ناسـازگاری تصمیـم را نشـان‌می‌دهد کـه از مزایـای ممتـاز ایـن تکنیـک در تصمیم‌گیـری چنـد معیـار اسـت [۳۰]. بـر همیـن اسـاس، ۲۰ نفـر کـه در حـوزه موضـوع مـورد مطالعـه تخصـص داشـتند انتخـاب شـده و اقـدام بـه مقایسـه زوجـی معیارهـا بـا نمـره ۱ تـا ۹ کردنـد. جهـت صحـت سـنجی نظـرات کارشناسـان نیـاز بـه محاسـبه نـرخ ناسـازگاری اسـت. بـرای هـر ماتریـس، حاصـل تقسـیم شـاخص ناسـازگاری بـر شـاخص ناسـازگاری ماتریـس تصادفـی هـم بُعـدش معیـار مناسـبی بـرای قضـاوت در مـورد ناسـازگاری می‌باشـد کـه آن را نـرخ ناسـازگاری می‌نامیـم [۳۱].

$$IR= I.I/I.I.R \quad (۴)$$

میـزان قابل‌قبـول ناسـازگاری یـک ماتریـس یـا سیسـتم، بسـتگی بـه تصمیم‌گیرنـده دارد، امـا سـاعتی، عـدد ۰/۱ را به‌عنـوان حـد قابل‌قبـول ارائـه می‌نمایـد و معتقـد اسـت چنانچـه میـزان ناسـازگاری بیشـتر از ۰/۱ باشـد، بهتـر اسـت در قضاوت‌هـا تجدیدنظـر گـردد [۳۱]. در ایـن تحقیـق نـرخ ناسـازگاری بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار Expert Choice11 به‌دسـت آمـد کـه برابـر بـا ۰/۰۵ شـد و ازایـن‌رو سـطح قابل‌قبولـی را در مقایسـه‌های زوجـی معیارهـا نشـان‌می‌دهد.

پهنه‌بندی مکان مناسب ذخیره گاز

بعـد از شناسـایی ابعـاد و معیارهـا و همچنیـن تعیین وزن آن‌هـا بـا اسـتفاده از روش fuzzy اقـدام بـه‌روی هم‌گـذار لایه‌هـا شده‌اسـت. بـرای ایـن منظـور در ابتـدا بایـد بـا اسـتفاده از معیارهـای شناسایی‌شـده ماتریـس ورودی داده‌هـای مـدل آمـاده و سـپس بـا اسـتفاده از روش فـازی خطـی کاهشـی و افزایشـی اقـدام بـه نرمال‌سـازی ماتریـس ورودی نمـود.

بعد از آن وزن‌هایی که از طریق مدل AHP به‌دست آمده روی نقشه‌های نرمال‌سازی شده اعمال شده و با استفاده از توابع پنج گانه فازی (And, Or, Sum, Product, Gama) اقدام به‌روی هم‌گذار شاخص‌ها و تعیین بهینه‌ترین مکان ذخیره گاز شده‌است (شکل ۳).

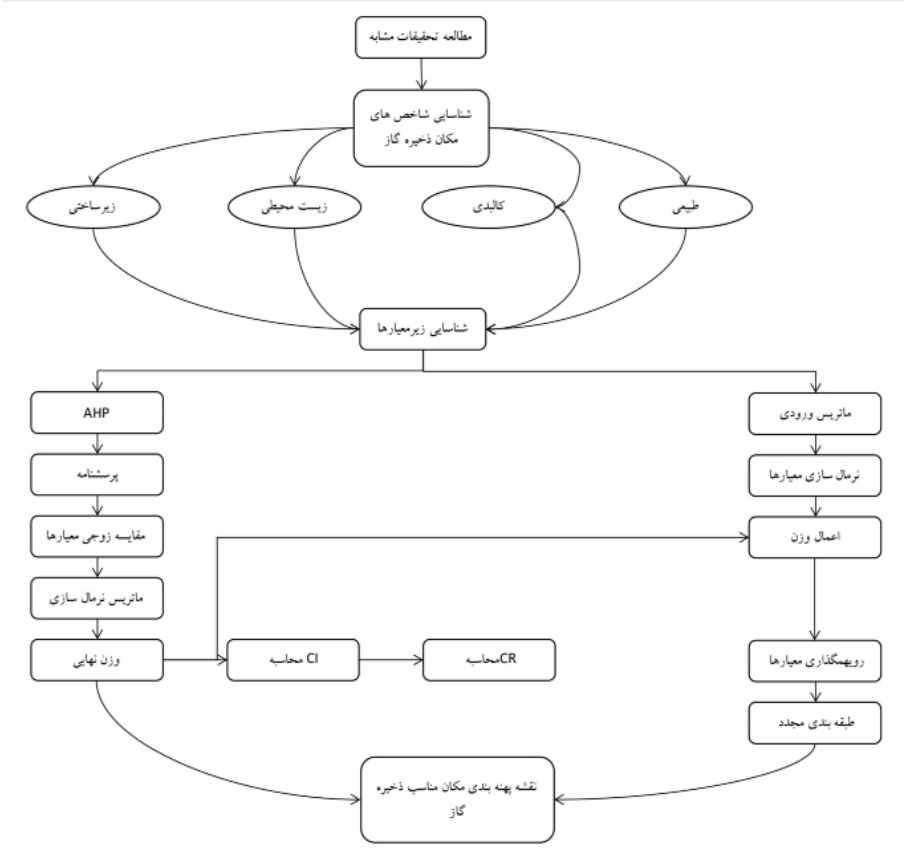
یافته‌ها

تهیه نقشه‌های رس‌تر (تشکیل ماتریس)

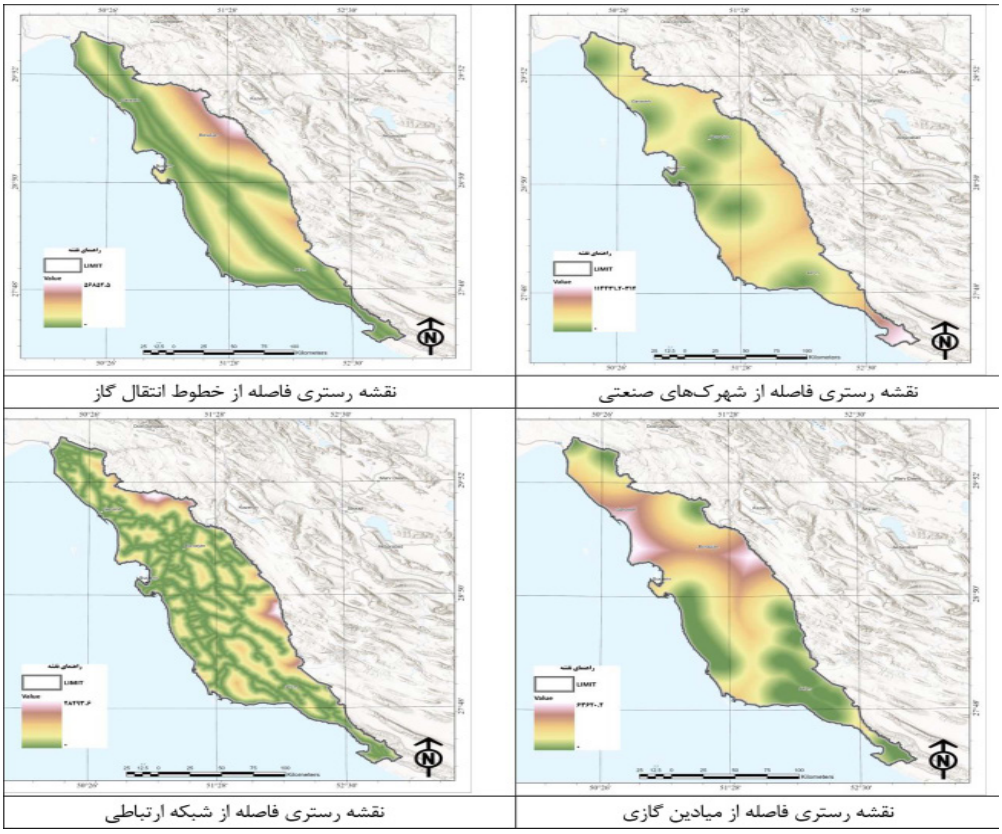
فرض بر این است که m گزینه و n خصوصیت وجود دارد. برای هرکدام از گزینه‌ها تعدادی ویژگی وجود دارد که مقدار آن به‌صورت fij نشان داده‌می‌شود. در اینجا تشکیل ماتریس در GIS به فرآیند تبدیل کردن داده‌های کمی و کیفی به داده‌های رستری گفته‌می‌شود که چند نمونه از نقشه‌های آن در پایین آورده شده‌است (شکل ۴).

محاسبه مقادیر نرمال شده

نقشه‌های فاکتور فازی برای معیارهای مورد بررسی تشکیل گردیدند. نقشه فاکتور فازی هر عارضه به‌گونه‌ای تهیه‌شده است که مقدار هر واحد مکانی برروی آن نشان‌دهنده میزان مناسب بودن مکان مربوطه برای مکان ذخیره گاز، از دیدگاه فاکتور موردنظر باشد. رسیدن به موفقیت در به‌کارگیری ریاضیات فازی در کاربردهای مختلف تا حد زیادی به تعریف توابع عضویت مناسب بستگی دارد. با توجه به تأثیر عوامل مختلف در مکان‌یابی ذخیره گاه‌های گازی و نیز وضعیت داده‌های موجود مربوط به آن‌ها دو نوع تابع عضویت در نظر گرفته شد. جهت نرمال‌سازی داده‌ها در GIS از طریق فازی خطی کاهشی برای معیارهای مثبت (لایه‌هایی که نزدیکی به آن‌ها اثر مثبتی برای مکان ذخیره گاز دارد) که با افزایش فاصله از این معیارها ارزش آن نیز جهت مکان‌یابی کاسته می‌شود.



شکل ۳ فرآیند مکان‌یابی ذخیره گاه گازی

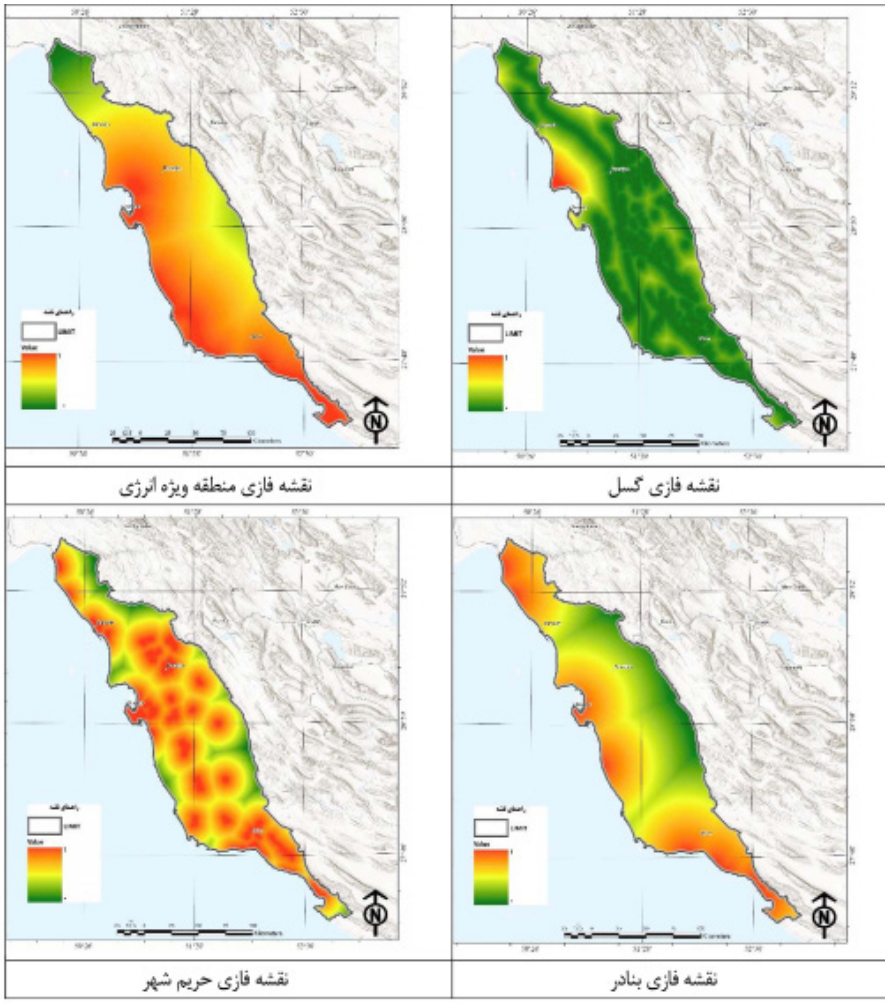


شکل ۴ نقشه رستری معیارهای مورد مطالعه

و فازی افزایشی جهت معیارهای منفی (لایه‌هایی که باید مکان ذخیره گاز از آن‌ها دور باشد) که با افزایش فاصله از این معیارها ارزش آن نیز جهت مکان‌یابی افزایش می‌یابد. از ۲۵ شاخص مطرح شده ۹ شاخص از جمله مخاطرات زمین‌شناسی، گسل‌ها، حریم شهرها، مسیل، پهنه خطر ساحل، پهنه‌های محافظت‌شده زیست‌محیطی، محدوده معادن، مراکز گردشگری، آبادی‌ها با استفاده از روش فازی خطی افزایشی نرمال‌سازی شده و ۱۶ شاخص دیگر از روش فازی خطی کاهشی نرمال شده‌اند، شکل ۵ که در جدول ۱ ذکر شده‌اند:

تعیین وزن معیارها

در تحلیل اخیر با استفاده از مدل فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای تعیین اهمیت شاخص‌های خاص سایت در تصمیم‌گیری مبتنی بر مکان، به مجموعه‌ای از مقادیر وزنی دست یافتیم، همچنین، وزن شاخص‌ها در جدول ۲ ذکر شده‌اند. این مقادیر، که با ضریب ناسازگاری بسیار پایین ۰/۰۵ به‌دست‌آمده‌اند (که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالا است)، شاخص‌هایی مانند "فاصله از گنبدهای نمکی" و "فاصله از سطح آب زیرزمینی" با وزن ۰/۰۹۷ دارای بیشترین تاثیر و شاخص "فاصله از سکونتگاه‌ها" دارای کمترین وزن و برابر ۰/۰۰۵ است و بیانگر اهمیت متفاوت عوامل جغرافیایی و زیرساختی در تصمیم‌گیری‌های مکان‌یابی هستند. این داده‌ها، دیدگاه‌های قابل توجهی را درباره اولویت‌بندی این جنبه‌ها در انتخاب مکان‌های استراتژیک فراهم می‌کنند. و بیشتر به تعیین مکان‌های بهینه برای فعالیت‌ها یا زیرساخت‌های خاص کمک می‌کنند، همچنین، موقعیت مکان‌های شناسایی شده در جدول ۳ ذکر شده‌اند. برای تلفیق معیارها به‌منظور شناسایی کاربری‌های سازگار و ناسازگار در مدل AHP باید یک مقایسه‌ی زوجی بین هر یک از معیارها صورت گیرد تا اهمیت هر یک از معیارها مشخص شود.



شکل ۵ نقشه نرمال شده معیارها

جدول ۱ روش فازی‌سازی شاخص‌ها

ردیف	شاخص	روش فازی سازی	ردیف	شاخص	روش فازی سازی
۱۴	میادین نفتی	فازی خطی کاهشی	۱	گنبدهای نمکی	فازی خطی کاهشی
۱۵	خطوط انتقال گاز	فازی خطی کاهشی	۲	سفره آب‌های زیرمینی	فازی خطی کاهشی
۱۶	پهنه خطر ساحل	فازی خطی افزایشی	۳	مساحت گنبدهای نمکی	فازی خطی کاهشی
۱۷	کاربری زمین	فازی خطی کاهشی	۴	مخاطرات زمین‌شناسی	فازی خطی افزایشی
۱۸	نیروگاه برق	فازی خطی کاهشی	۵	میادین انرژی	فازی خطی کاهشی
۱۹	شهرک‌های صنعتی	فازی خطی کاهشی	۶	میادین گازی	فازی خطی کاهشی
۲۰	پهنه‌های محافظت‌شده زیست‌محیطی	فازی خطی افزایشی	۷	نفوذپذیری سنگ‌ها	فازی خطی کاهشی
۲۱	محدوده معادن	فازی خطی افزایشی	۸	ضخامت سنگ‌ها	فازی خطی کاهشی
۲۲	خطوط انتقال برق	فازی خطی کاهشی	۹	گسل‌ها	فازی خطی افزایشی
۲۳	مراکز گردشگری	فازی خطی افزایشی	۱۰	حریم شهرها	فازی خطی افزایشی
۲۴	شبکه راه اصلی	فازی خطی کاهشی	۱۱	پالایشگاه گازی	فازی خطی کاهشی
۲۵	آبادی‌ها	فازی خطی افزایشی	۱۲	مسیل	فازی خطی افزایشی
			۱۳	بنادر صادراتی	فازی خطی کاهشی

جدول ۲ وزن شاخص‌ها

ردیف	شاخص	وزن		ردیف	شاخص	وزن
۱۴	میادین نفتی	۰/۰۲۴		۱	گنبدهای نمکی	۰/۰۹۷
۱۵	خطوط انتقال گاز	۰/۰۲۱		۲	سفره آب‌های زیرمینی	۰/۰۹۷
۱۶	پهنه خطر ساحل	۰/۰۲۱		۳	مساحت گنبدهای نمکی	۰/۰۸۷
۱۷	کاربری زمین	۰/۰۲		۴	مخاطرات زمین‌شناسی	۰/۰۸۵
۱۸	نیروگاه برق	۰/۰۱۵		۵	میادین انرژی	۰/۰۷۳
۱۹	شهرک‌های صنعتی	۰/۰۱۴		۶	میادین گازی	۰/۰۶۸
۲۰	پهنه‌های محافظت‌شده زیست‌محیطی	۰/۰۱۳		۷	نفوذپذیری سنگ‌ها	۰/۰۶۳
۲۱	محدوده معادن	۰/۰۱۲		۸	ضخامت سنگ‌ها	۰/۰۶
۲۲	خطوط انتقال برق	۰/۰۰۹		۹	گسل‌ها	۰/۰۴۷
۲۳	مراکز گردش‌گری	۰/۰۰۹		۱۰	حریم شهرها	۰/۰۴۷
۲۴	شبکه راه اصلی	۰/۰۰۹		۱۱	پالایشگاه گازی	۰/۰۴۵
۲۵	آبادی‌ها	۰/۰۰۵		۱۲	مسیل	۰/۰۳۱
				۱۳	بنادر صادراتی	۰/۰۲۸

جدول (وزن دهی معیارها در AHP)

جدول ۳ موقعیت مکان‌های شناسایی‌شده

موقعیت	X	Y
موقعیت شماره ۱	۵۴۸۸۳۵/۲	۳۱۷۰۳۰۵
موقعیت شماره ۲	۵۶۵۷۴۸/۷	۳۱۲۷۴۳۶

که درنهایت این وزن‌دهی در نرم‌افزار Arc-GIS به‌صورت فضایی (بالا و پایین) نشان داده‌شده که به‌صورت شکل ۶ هست:

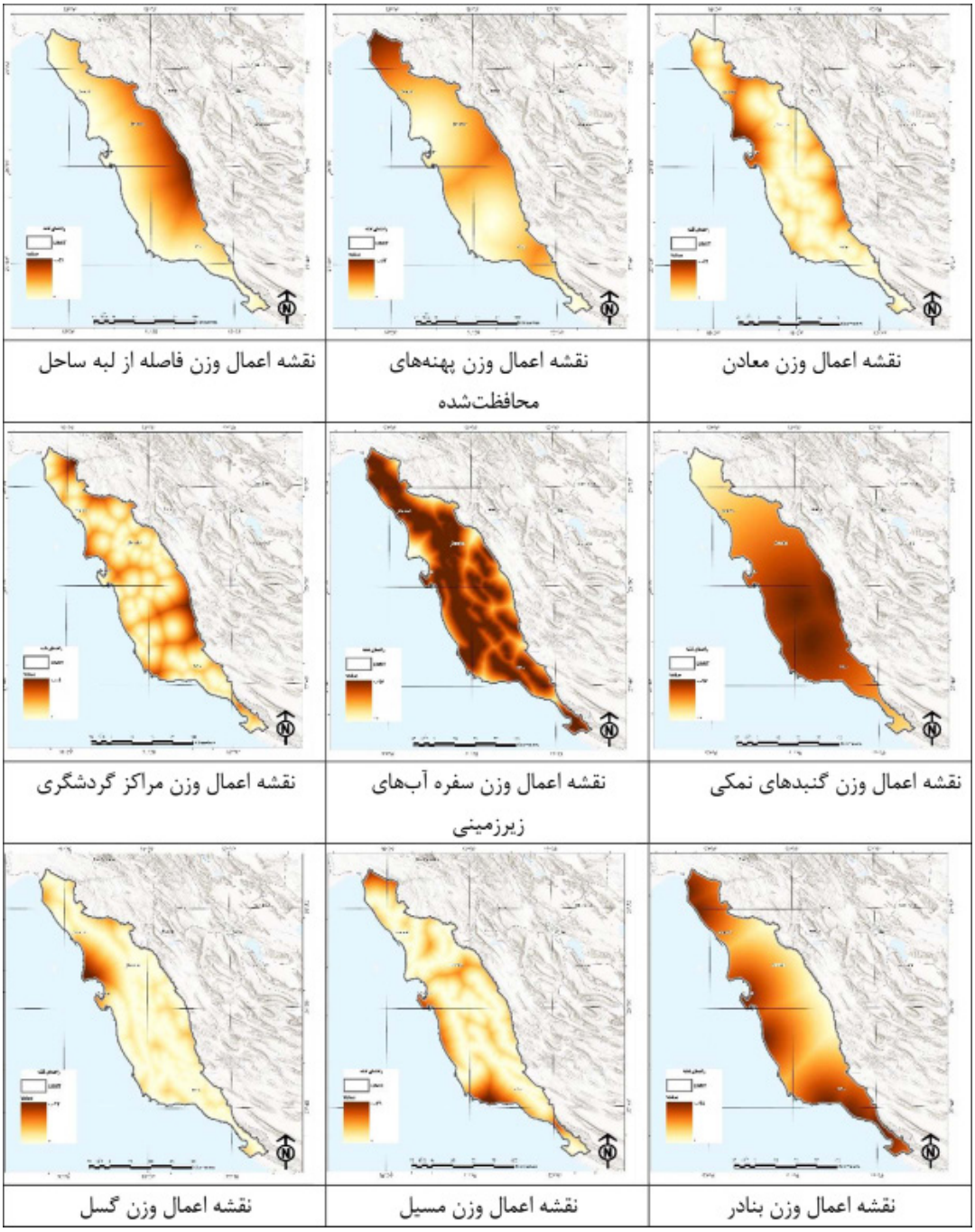
روی هم‌گذار شاخص‌ها

با استفاده از عملگرهای فازی عملیات تلفیقی انجام شده که پنج عملگر فازی به نام اشتراک فازی[1]، اجتماع فازی[2]، ضرب فازی[3]، جمع فازی[4] و فازی گاما[5] برای تلفیق مجموعه فاکتورها مورد استفاده قرار گرفته است. درنهایت خروجی مدل گاما بهترین نتیجه را جهت تعیین محل ذخیره گاز ارئه داده است که دو محل مکان‌یابی شده شماره ۱ مربوط به گنبد نمکی جاشک است و محل شماره دو نیز گنبد نمکی سربسی است (شکل ۷).

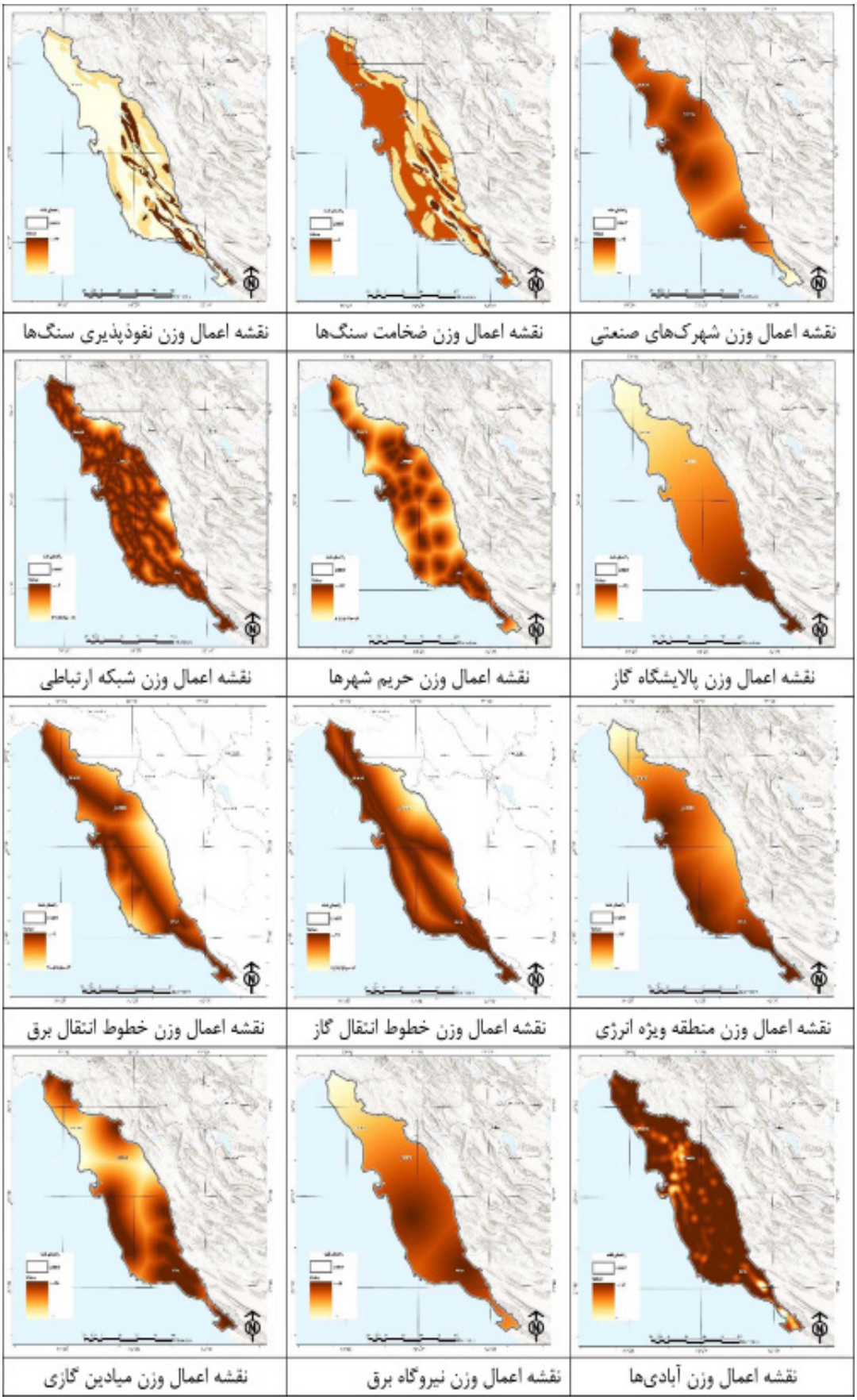
بحث

هم‌زمان با افزایش مداوم تقاضای جهانی برای منابع انرژی، به‌ویژه در اقتصادهای در حال توسعه سریع، ضرورت سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی کارآمد و استراتژیک بیش از پیش آشکار می‌شود. ذخیره‌سازی گاز، نه‌تنها یک ضرورت زیرساختی بلکه محور امنیت انرژی در بسیاری از کشورها است. این پژوهش با تلفیق سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در استان بوشهر، به بررسی پیچیدگی‌های یافتن بهترین مکان‌های ذخیره‌سازی گاز پرداخته‌است.

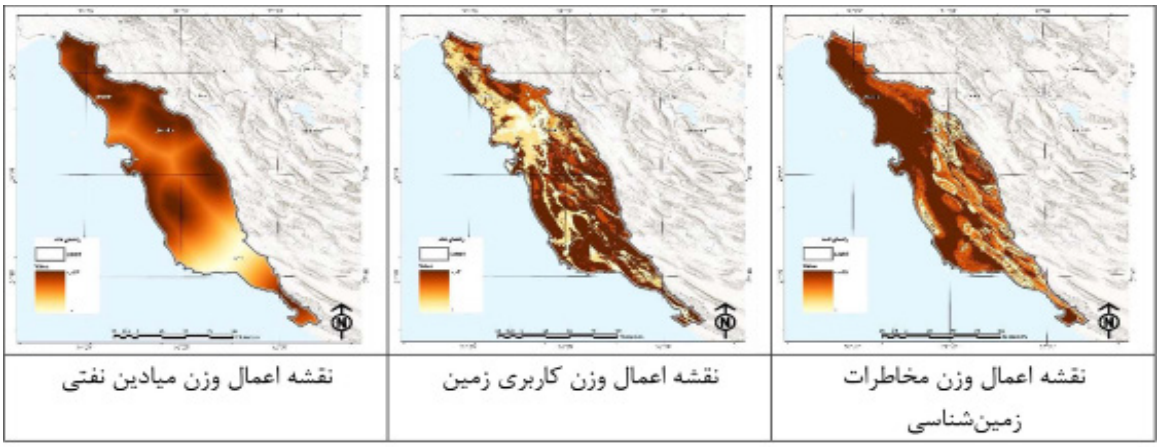
1. Fuzzy AND
2. Fuzzy OR
3. Fuzzy Algabric Product
4. Fuzzy Algabric Sum
5. Fuzzy Operation Gamma



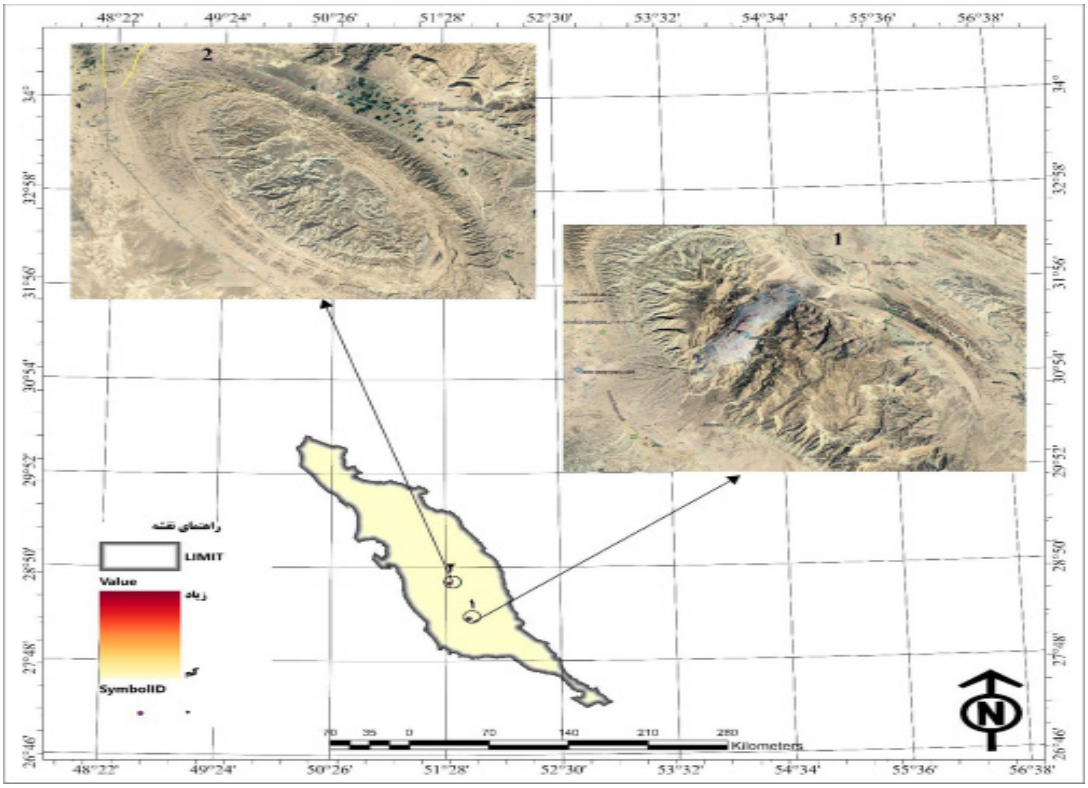
شکل ۶ (نقشه اعمال وزن معیارها)


نقشه اعمال وزن شهرک‌های صنعتی
نقشه اعمال وزن ضخامت سنگ‌ها
نقشه اعمال وزن نفوذپذیری سنگ‌ها
نقشه اعمال وزن پالایشگاه گاز
نقشه اعمال وزن حریم شهرها
نقشه اعمال وزن شبکه ارتباطی
نقشه اعمال وزن منطقه ویژه انرژی
نقشه اعمال وزن خطوط انتقال گاز
نقشه اعمال وزن خطوط انتقال برق
نقشه اعمال وزن آبادی‌ها
نقشه اعمال وزن نیروگاه برق
نقشه اعمال وزن میادین گازی

ادامه شکل ۶



ادامه شکل ۶



شکل ۷ نقشه نهایی سایت‌های شناسایی شده

تصمیم‌گیری مبتنی بر مکان، به‌ویژه در زمینه زیرساخت‌های انرژی، فرآیند پیچیده‌ای از متغیرها از خصوصیات جغرافیایی و زمین‌شناسی گرفته تا ملاحظات اجتماعی-اقتصادی، الزامات زیست‌محیطی است. مطالعه ارائه شده روش‌شناسی سیستماتیک اولویت‌بندی این متغیرها را نشان‌می‌دهد. استفاده از منطق فازی در کنار AHP، بنیان تجربی ایجاد می‌کند و ارزیابی‌های کیفی را به معیارهای قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کند. این گذار برای هر فرآیند تصمیم‌گیری حیاتی است و منطقی و قابل دفاع بودن انتخاب‌ها را فراهم می‌آورد. وزن‌دهی عوامل مختلف با استفاده از AHP، بازتابی از اهمیت نسبی آنها در ماتریس تصمیم‌گیری است. به‌عنوان مثال، اهمیت داده شده به "فاصله از گنبدهای نمکی" و "فاصله از سطح آب زیرزمینی" که هر دو وزن ۰/۰۹۷ دارند، اهمیت آنها را در فرآیند مشخص می‌کند.

این وزن‌ها نه‌تنها معیاری از اهمیت ارائه می‌دهند بلکه به‌عنوان قطب‌نما عمل می‌کنند و تلاش‌ها و منابع را به‌سمت پارامترهای با نفوذتر هدایت می‌کنند. آمیزه‌ای از ارزیابی‌های متخصصان و تحلیل داده‌های فضایی به‌کار رفته در مطالعه، الگوی قوی برای تلاش‌های تصمیم‌گیری مشابه ارائه می‌دهد. دانش متخصصان بینش‌های باارزشی فراهم می‌آورد و تضمین می‌کند که جنبه‌های نظری و فنی پژوهش با ملاحظات عملی متوازن شوند. ضریب ناسازگاری پایین (۰/۰۵) به‌دست آمده از نظرات متخصصان، قابل‌اعتماد بودن بیشتر بینش‌های آنان را تقویت می‌کند و نشان‌می‌دهد نتایج حاصله نه‌تنها از نظر آماری معتبر بلکه مبتنی بر دانش دنیای واقعی هستند.

اما فرآیند تصمیم‌گیری، به‌ویژه در حوزه تحلیل‌های فضایی، فاقد پیچیدگی‌ها نیست. درحالی‌که پژوهش اهمیت عواملی همچون نزدیکی به گنبدهای نمکی یا سطح آب‌های زیرزمینی را روشن کرده است، چندبُعدی بودن این تصمیم‌گیری‌ها را نیز برجسته می‌کند. به‌عنوان مثال، پارامترهایی مانند "فاصله از سکونت‌گاه‌ها" ممکن است وزن کمتری در ماتریس داشته‌باشند، اما تأثیر آن‌ها از نظر جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی می‌تواند عمیق باشد.

علاوه‌براین، استفاده از عملگرهای فازی برای ترکیب شاخص‌ها، ماهیت پویای فرآیند تصمیم‌گیری را نمایش می‌دهد. انعطاف‌پذیری ایجاد شده توسط این عملگرها، به‌ویژه عملگر گاما، پیچیدگی‌ها و ظرایف ترکیب چند معیار را که ذاتاً دارای ویژگی‌های متعارض هستند، دربرمی‌گیرد. با استفاده از این توانایی، در ترکیب با یافته‌های AHP، دو سایت اصلی گنبدهای نمکی جاشک و سربسی به‌عنوان مکان بهینه برای ذخیره‌سازی گاز شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری

جستجو برای مکان‌های بهینه ذخیره‌سازی گاز، همان‌طور که این مطالعه نشان‌می‌دهد، گواهی بر ماهیت چندرشته‌ای چالش‌های مدرن است. همزیستی فن‌آوری‌های GIS، مدل‌سازی ریاضی از طریق منطق فازی و ارزیابی‌های متخصصان، رویکردی شایسته برای توانمندسازی تصمیم‌گیری‌های ظریف و آگاهانه است.

تأثیرات این پژوهش چندجانبه است. در ظاهر، روش‌شناسی روشنی برای یافتن مکان‌های ذخیره‌سازی گاز ارائه می‌دهد، اما در سطحی عمیق‌تر، اهمیت تصمیم‌گیری جامع را مشخص می‌کند. در عصری که با شهرنشینی سریع، چالش‌های زیست‌محیطی و پیچیدگی‌های جغرافیایی تعریف می‌شود، تصمیم‌گیری در مورد زیرساخت‌های انرژی نمی‌تواند در انزوا صورت پذیرد. آنها نیازمند ترکیبی از فن‌آوری، تخصص و آینده‌نگری است.

در استان بوشهر، این پژوهش نه‌تنها مکان‌های بهینه را شناسایی کرده است، بلکه چارچوبی قابل تکرار را پایه‌ریزی کرده که می‌تواند برای چالش‌های مکانی مختلف تطبیق یابد. درحالی‌که استان ویژگی‌های جغرافیایی و اجتماعی-اقتصادی منحصربه‌فردی دارد، جوهره روش‌شناسی، متکی بر تحلیل داده‌های دقیق و بینش متخصصان، دارای اعتبار جهانی است.

به‌اختصار، تلاقی دانش سنتی با ابزارهای تحلیلی مدرن، همان‌طور که این مطالعه نشان‌می‌دهد، آینده‌ای امیدوارکننده برای تصمیم‌گیری فضایی پیش‌بینی می‌کند. با بهره‌گیری از قدرت داده‌ها، ریاضیات و تخصص انسانی، می‌توانیم عصری از تصمیم‌گیری‌های زیرساختی را آغاز کنیم که نه‌تنها کارآمد بلکه پایدار و جامع‌نگر نیز باشند.

مراجع

[1]. U.S. Energy Information Administration. (2021). Underground natural gas storage. Retrieved from https://www.eia.gov/naturalgas/storage/underground/.
[2]. Riemer, P. W., Sathaye, J., Wene, C., and Yeh, S. (2018). Underground natural gas storage, In Encyclopedia of Energy (pp. 351-359). Elsevier.
[3]. FGE. (2020). LNG Storage: A Primer. Retrieved from https://www.fgenergy.com/Insights/Details/lng-storage-a-primer
[4]. National Grid. (2020). Rough Gas Storage. Retrieved from https://www.nationalgrid.com/group/about-us/our-businesses/gas-transmission/rough-gas-storage.
[5]. Enbridge. (2021). Mont Belvieu Storage. Retrieved from https://www.enbridge.com/businesses/gas-transmission-storage/mont-belvieu-storage.
[6]. Abdalla, Rifaat. (2018). The Application of GIS in Petroleum Geology.
[7]. Sabzevari, Roham. (2017). Gis-based site selection for underground natural resources using fuzzy ahp-owa, ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-4/W4. 463-468. 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-463-2017.
[8]. Anderson, A. R., Winterwerp, J. C., and Hendriks, C. (2017). Multi-criteria decision analysis for site selection of underground gas storage in the Netherlands, Environmental Earth Sciences, 76(7): 1-15, doi.org/10.1007/s12665-017-6555-5.
[9]. Chang, T. J., Chung, C. T., & Hsieh, C. T. (2016). A multi-criteria decision analysis approach for site selection of underground gas storage in Taiwan. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 31, 205-214. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.058
[10]. Chen, Y., Huang, Z., Cai, S., Zhang, H., & Cao, J. (2019). Effects of geological heterogeneity on gas storage capacity and safety in saline aquifers: Implications for site selection of gas storage. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 69, 102977. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102977
[11]. US Energy Information Administration. (2021). Aboveground petroleum and chemical storage tanks. Retrieved from https://www.eia.gov/renewable/storage/aboveground/
[12]. International Energy Agency. (2020). Gas storage. Retrieved from https://www.iea.org/reports/gas-storage
[13]. European Gas Storage Association. (2023). Underground gas storage. https://www.gie.eu/publications/maps/gie-storage-map/
[14]. California Public Service Commission. (2016). Final report on the Aliso Canyon gas leak investigation.
[15]. Cao, M., Wang, Y., Xu, X., & Zhang, Y. (2006). Analysis of the Banqiao LPG storage tank explosion accident. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19(6), 692-696.
[16]. National Energy Board. (2020). Canada's underground natural gas storage. Retrieved from https://www.cer-rec.gc.ca/nrg/sttstc/ntrlgs/stt/ndrgrndntrlgsgstrg-eng.html
[17]. International Energy Agency. (2019). Methane emissions from the oil and gas sector. Retrieved from https://www.iea.org/reports/methane-emissions-from-the-oil-and-gas-sector
[18]. Alfi, M., Hosseini, S. A., Alfi, M., and Shakiba, M. (2015). Effectiveness of 4D seismic data to monitor CO_2 plume in Cranfield CO_2-EOR project, In Carbon management technology conference, CMTC-439559). CMTC, doi.org/10.7122/439559-MS.
[19]. Holt, C. (2020). Site selection for underground gas storage, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 92, 102186.
[20]. Mokhatab, S., Mak, J. Y., and Valappil, J. V. (2014). Handbook of natural gas transmission and processing, Gulf Professional Publishing.
[21]. Balkan, N., Tekin, S., and Göksu, M. (2018). Site selection for underground natural gas storage using fuzzy AHP and GIS. International Journal of Petroleum Science and Technology, 1-13 , (1)11.
[۲۲]. مومنی، م. (۱۳۸۷). مباحث نوین تحقیق در عملیات، چاپ اول، تهران: دانشگاه تهران.
[23]. Hwang, C.L., and Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications, Springer, Berlin Heidelberg.
[24]. Kwokyam Chen, A fuzzy decision support system for supplier selection and order quantity allocation in supply chains, European Journal of Operational Research, 129, (1): 42-53, 2000.
[۲۵]. مالچفسکی، ی. (۱۳۹۰). سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری. ترجمه اکبر پرهیزکار و عطا غفاری‌گیلانده. ویرایش محمود ظریف. تهران: سمت.
[۲۶]. محمدی، ا. و محمدی ا. (۱۳۸۸). ارزیابی و پهنه‌بندی تناسب زمین برای توسعه فیزیکی شهر کرج و

اراضی پیرامونی برپایه ی فاکتورهای طبیعی و روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، فصل نامه جغرافیای طبیعی، شماره چهارم، ۵۹- ۷۴.

[۲۷]. احمدی، س. ح.، حشمت‌پور، ع.، سیدیان، س. م. و کمکی چوقی، ب. (۱۳۹۵). تحلیل سلسله مراتبی AHP برای تعیین اهمیت نسبی معیارهای چندگانه در انتخاب محل احداث آب بندان مطالعه موردی شهرستان گرگان، اولین همایش ملی مدیریت آب با رویکرد مصرف بهینه آب در بخش کشاورزی،همدان،.https://civilica.com/doc/523378.

[۲۸]. مهرگان، م. ر. (۱۳۸۷)، مدل‌های کمی در ارزیابی عملکرد سازمان‌ها- DEA، چاپ دوم، تهران: دانشگاه تهران.

[۲۹]. اولسن، د. (۲۰۰۴)، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، چاپ اول، ترجمه: علی خاتمی فیروزآبادی، (۱۳۸۷)، تهران: مدیران امروز.

[30]. Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology, 15(3), 234-281, doi:10.1016/0022-2496(77)90033-5.

[۳۱]. قدسی‌پور، ح. (۱۳۷۹). فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP). دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Petroleum Research
Petroleum Research, 2024(April-May), Vol. 34, No. 134, 29-31
DOI: 10.22078/pr.2023.5149.3281

A Systematic Approach to Identify Gas Storage Areas Using AHP_fuzzy Model: a Case Study of Bushehr Province

Seyyed Shahrokh Nouri[1], Seyyed Abbas Nouri[2] and Hamideh Salehi Nejad[3]*
1. Department of Petroleum and Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Engineering, Shahryar Branch, Islamic Azad University, Shahriar, Iran
3. Rafsanjan Allameh Jafari Higher Education and non-profit institution
petro_emerald@yahoo.com
DOI: 10.22078/pr.2023.5149.3281

Received: July/14/2023 Accepted: November/05/2023

Introduction

Gas storage is vital in the global energy system, buffering against supply disruptions and price shifts [1]. There are various storage facilities, including underground, above ground, and liquefied natural gas (LNG) storage. Optimal site selection often involves a combination of expert opinions and geographic information systems (GIS), a tool increasingly used in locating gas storage [2]. GIS allows for the visualization and evaluation of spatial data like geological, geophysical, and environmental data, crucial for determining suitable locations for underground facilities. GIS also assesses environmental risks associated with specific storage locations and integrates different types of spatial data for comprehensive understanding. Several studies have used decision support systems and multi-criteria decision analysis methods to identify optimal sites for gas storage. Anderson et al. in 2017 integrated geological, technical, environmental, and socio-economic factors to select optimal sites [3]. Similarly, Chang et al. in 2016 proposed a method to evaluate potential sites based on geological characteristics, hydrogeological characteristics, land use, economic and social factors, safety, and environmental considerations. The current research aims to identify the most suitable gas storage location in Bushehr province using GIS and expert panel inputs [4].

Materials and Methods

The research method in this study is analytical-descriptive and has an applied nature. In the research process, firstly, a detailed description of the action problem and the background of the research and the theoretical foundations were examined and it was determined that several indicators are effective in the field of locating gas reserves, which should be based on the characteristics of the studied area, the refining index, finally four natural dimensions (9 variables), Physical (5 variables), environmental (5 variables) and infrastructure (9 variables) were determined. Each of the identified criteria should be shown as a layer in the GIS-based database. For this purpose, benchmark maps were prepared in the Arc Gis environment, and fuzzy membership functions were used to standardize the layers, and by combining information layers in the GIS software environment, suitable areas for gas storage were identified using the AHP_Fuzzy model in Bushehr province. The flowchart of data analysis process is shown in Fig. 1.

Results and Discussion

The findings of this study include the creation of raster maps using GIS technology and the normalization of values using fuzzy factor maps.

In the “Creating Raster Maps” section, the study assumes a set of m options and n properties, with each option having its own characteristics. The process involves converting quantitative and qualitative data into raster data, a process known as matrix formation.

The “Calculation of Normalized Values” section details the creation of fuzzy factor maps to determine the suitability of different locations for gas storage. These maps use membership functions to help normalize data.

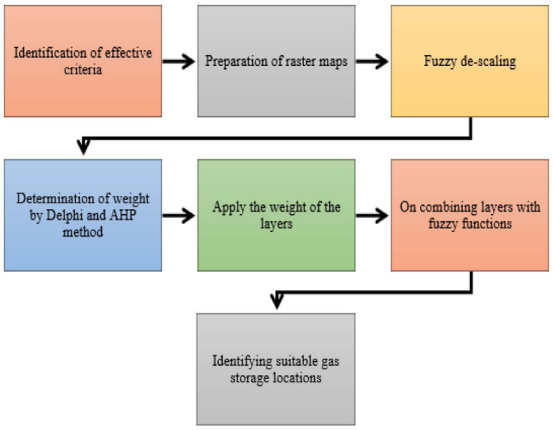


Fig. 1 Diagram number (1): Data analysis process.

Two types of functions were considered based on the influence of different factors on the gas storage location. A linearly decreasing fuzzy method was used for positive criteria, where the proximity to certain layers positively impacts the gas storage location. Conversely, a linearly increasing fuzzy method was used for negative criteria where the gas storage location should be away from certain layers.

The study proposed 25 indices, with 9 indices including geological hazards, faults, city buffers, floodplains, coastal danger zones, environmental conservation zones, mining boundaries, tourism centers, and settlements being normalized using the linearly increasing fuzzy method. The other 16 indices were normalized using the linearly decreasing fuzzy method. These include factors like salt domes, groundwater tables, energy fields, gas fields, rock permeability, and more.

In the "Determining Criteria Weights" section, the Analytic Hierarchy Process (AHP) model and Expert Choice software were used. This involved pairwise comparisons of various criteria, with 20 experts participating in the weighting process. Criteria included factors like Salt Domes, Subterranean Water Tables, Area of Salt Domes, and Geological Hazards among others, with Salt Domes, Subterranean Water Tables, and the Area of Salt Domes receiving the highest weights.

To synthesize the criteria in the AHP model, pairwise comparisons were performed to identify the importance of each criterion, and the weights were represented spatially using Arc-GIS software.

In the "Overlaying Indices" section, fuzzy operators were used to merge the factors set. Five fuzzy operators - Fuzzy AND, Fuzzy OR, Fuzzy Algabric Product, Fuzzy Algabric Sum, and Fuzzy Operation Gamma - were used in this process. The output from the Gamma model was deemed the most effective, identifying two locations for gas storage - the Jashak salt dome (Position Number 1) and the Serbsi salt dome (Position Number 2). The positions of these locations were detailed in Table 1, with their X and Y coordinates, and shown in Fig. 2, the final map of sites.

Table 1 Identified Location Positions

Position	X	Y
Position Number1	548835.2	3170305
Position Number 2	565748.7	3127436

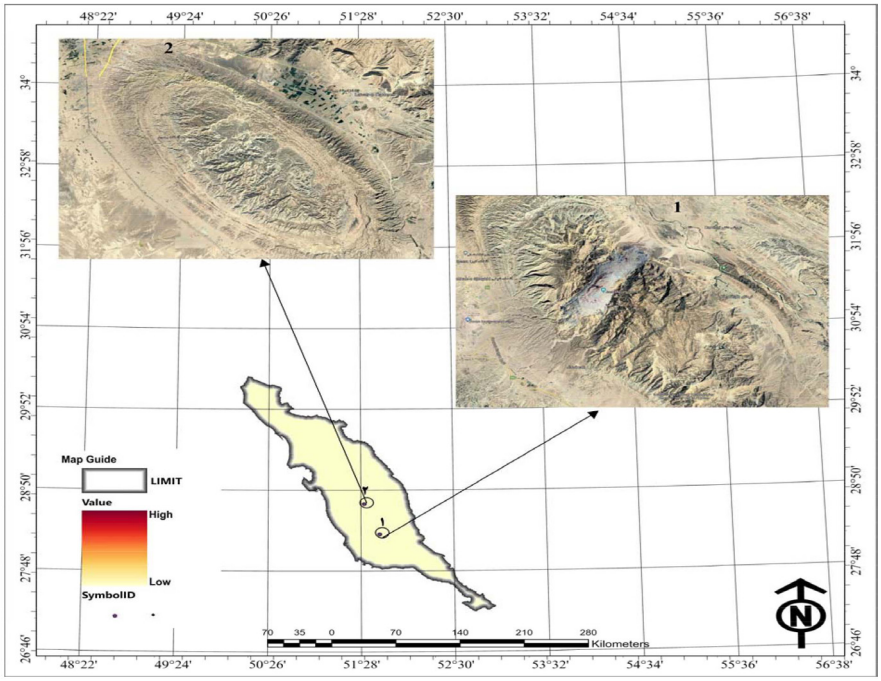


Fig. 1 Final Map of Sites.

Conclusions

Gas storage, a crucial part of energy infrastructure, is essential for meeting the increasing energy demand globally. The selection of the storage location, a complex and dynamic process, significantly influences the operations' efficiency and functionality. This process requires an individualized approach considering local conditions and preferences.

In this study, various factors, including geographical, economic, safety, and environmental aspects, were highlighted. These factors were grouped into four dimensions: natural, physical, environmental, and infrastructural, each with different numbers of variables. However, the impact of these indices on identifying the storage location varied, and this was addressed through normalization.

A combination of the AHP model and the Fuzzy method was used in the ArcGIS platform for location selection. Expert interviews revealed that salt domes and subterranean water tables are key in this process. Consequently, two locations, Jashak and Serbsi salt domes, were deemed most suitable.

Generally, the selection of a gas storage site significantly influences a country's energy security and environmental sustainability. Therefore, a comprehensive, participatory approach that involves government, industry, and academia is needed to ensure the selection of an optimal gas storage location, balancing economic, social, and environmental aspects.

References

1. U.S. Energy Information Administration. (2021). Underground natural gas storage. Retrieved from https://www.eia.gov/naturalgas/storage/underground/.
2. Abdalla, Rifaat. (2018). The Application of GIS in Petroleum Geology
3. Anderson, A. R., Winterwerp, J. C., and Hendriks, C. (2017). Multi-criteria decision analysis for site selection of underground gas storage in the Netherlands. Environmental Earth Sciences, 76(7), 1-15. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6555-5
4. Chang, T. J., Chung, C. T., and Hsieh, C. T. (2016). A multi-criteria decision analysis approach for site selection of underground gas storage in Taiwan. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 31, 205-214. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.058.