

رتبه‌بندی فنی مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت با دی‌اکسید کربن با رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه

محمدرضا مهرگان^۱، احمد جعفرنژاد^۱ منصور معظمی^۲، سید فرید قادری^۳، عماد رعایایی^۴، امیرمهدی ملک^۵ و آزاده دباغی^{۱*}

۱- گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران

۲- موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی

۳- دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران

۴- پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز، شرکت ملی نفت ایران

۵- گروه مهندسی صنایع دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۲۶

چکیده

ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن در حجم وسیع و به‌کارگیری آن در ازدیاد برداشت از مخازن نفتی به‌عنوان یکی از استراتژی‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای جو زمین مورد توجه قرار دارد. پس از شناسایی و ارزیابی تکنیکی مخازن، موضوع امتیاز دهی و رتبه‌بندی مخازن کاندید مطرح می‌شود که می‌تواند به‌عنوان یک پژوهش بین‌رشته‌ای در نظر گرفته شود. بررسی ادبیات موضوع در حوزه مهندسی نفت نشان می‌دهد روش‌های ابتکاری در شرایط قطعیت برای امتیازدهی و رتبه‌بندی مخازن به‌کار گرفته شده است. هدف اصلی پژوهش، به‌کارگیری تکنیک «تحلیل رابطه‌ای خاکستری» به‌عنوان یکی از روش‌های اثبات شده و پرکاربرد تصمیم‌گیری چند شاخصه، برای حل مسأله رتبه‌بندی فنی مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت با دی‌اکسید کربن می‌باشد. از آن جا که مسأله مذکور از منظر تئوری تصمیم‌گیری، مستلزم در نظر گرفتن شاخص‌های کمی و کیفی از جنس بهینه می‌باشد، تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری برای برآورده کردن ویژگی‌های خاص این مسأله، تا حدودی بهبود داده شده است. علاوه بر آن، برای مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در تعیین مشخصات مخزن و مقایسه پارامترهای آن‌ها از تئوری سیستم‌های خاکستری که توسعه یافته تئوری فازی محسوب می‌شود، استفاده شده است.

به منظور نمایش کارآمدی روش ارائه شده در حل مسأله فوق، بیست مخزن نفتی ایران که به‌عنوان مخازن کاندید جهت تزریق دی‌اکسید کربن مطرح می‌باشند، از نظر فنی رتبه‌بندی شده است.

کلمات کلیدی: ازدیاد برداشت با دی‌اکسید کربن، تزریق امتزاجی، رتبه‌بندی مخازن نفتی، تئوری تصمیم‌گیری چند شاخصه و تئوری سیستم‌های خاکستری

*مسئول مکاتبات

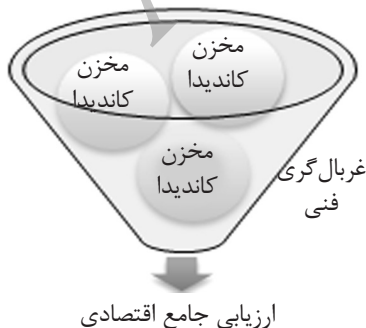
Dabbaghi@ut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

مقدمه

زیادتی به عواملی همچون نحوه تامین دی‌اکسیدکربن و هزینه‌های آن، وجود منابع انتشار دی‌اکسیدکربن در فاصله جغرافیایی مناسب و به‌طور کلی ارزیابی جامع هزینه‌های جمع‌آوری، خالص‌سازی، انتقال و ریسک‌های مربوطه دارد. بنابراین، در این پژوهش صرفاً روشی برای رتبه‌بندی اولیه از نظر مشخصات سنگ و سیال مخزن پیشنهاد شده است. لازم است مخازنی که با استفاده از این روش از نظر فنی حائز بالاترین رتبه می‌گردند (شکل ۱)، در مرحله بعدی از نظر اقتصادی نیز مورد ارزیابی جامع واقع شوند.

شاخص‌های فنی مختلفی از طریق مطالعات شبیه‌سازی و آزمایش‌های میدانی توسعه یافته است، اما مطالعات اندکی به ارائه روش‌های سیستماتیک برای مسأله رتبه‌بندی اولیه (تکنیکی) مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت با دی‌اکسیدکربن پرداخته است. روش‌های غربال‌گری باینری که در آن هر یک از شاخص‌ها به‌عنوان یک پارامتر، مورد ارزیابی مستقل قرار می‌گیرد، کاربرد زیادی دارد [۷]. به این ترتیب مشخصات هر مخزن بر مبنای پارامترهای تعیین شده با رویکرد «بله/خیر» ارزیابی می‌گردد. اگر مشخصات مخزن با حداقل یکی از پارامترها هم‌خوانی نداشته باشد، آن مخزن از فرآیند ارزیابی حذف می‌شود.



شکل ۱- غربال‌گری فنی پیش‌نیاز ارزیابی اقتصادی

سوخت‌های فسیلی که در حال حاضر تأمین‌کننده بیش از ۷۵٪ انرژی دنیاست، تا پایان قرن حاضر، مهم‌ترین منبع تامین انرژی در جهان است. لذا انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوخت فسیلی تا حد زیادی اجتناب‌ناپذیر است. ذخیره‌سازی حجم وسیعی از دی‌اکسیدکربن در فرآیند ازدیاد برداشت نفت، یکی از راه‌های کاهش انتشار این گاز گلخانه‌ای در جو زمین محسوب می‌شود. علاوه بر مقابله با گرمایش جهانی، بهره‌برداری از نفت باقی‌مانده در مخازنی که دوره برداشت اولیه و ثانویه را سپری کرده‌اند، از مزایای ازدیاد برداشت نفت با استفاده از دی‌اکسیدکربن به شمار می‌رود. از طرف دیگر در مقایسه با سایر سیالات قابل تزریق، فشار امتزاج‌پذیری دی‌اکسیدکربن پایین است. به همین دلیل دستیابی به شرایط امتزاج‌پذیری در مخازن نفتی با استفاده از دی‌اکسیدکربن با سهولت بیشتر، می‌تواند موجب افزایش حجم، انبساط نفت خام و کاهش ویسکوزیته آن گردد [۱ و ۲]. تکنولوژی تزریق دی‌اکسیدکربن به صورت تجاری به ثبت رسیده و بیش از چهار دهه است که توسط کشورهای صنعتی و در بیش از ۷۶ سایت عملیاتی دنیا در حال اجراست [۳]. فرآیند انتخاب مخازن مناسب برای تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن را می‌توان در دو گام خلاصه کرد. گام اول، شامل شناسایی و ارزیابی مشخصات هر مخزن است. روش‌های محاسباتی پیچیده‌ای مانند نرم‌افزار «پرافیت»^۱ وجود دارد [۴] که برای هر مخزن ضمن در نظر گرفتن جزئیات مشخصات فنی، عملکرد آن را در تزریق دی‌اکسیدکربن مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این کار به حجم زیادی از داده‌ها و محاسبات نیاز دارد و باید برای هر مخزن به‌صورت جداگانه و به تفصیل انجام پذیرد. لذا استفاده از این روش‌ها برای ارزیابی و مقایسه سریع تعداد زیادی از مخازن توصیه نمی‌شود [۵]. از آن‌جا که به لحاظ فنی و اقتصادی امکان تزریق دی‌اکسیدکربن در همه مخازن نفتی وجود ندارد [۶]، پس از شناسایی و ارزیابی مشخصات مخازن، ضروری است در گام دوم نسبت به امتیاز دهی و رتبه‌بندی مخازن کاندید نسبت به یک‌دیگر از منظر فنی-اقتصادی اقدام شود. مطالعه امکان‌پذیری اقتصادی ازدیاد برداشت به وسیله دی‌اکسیدکربن در یک مخزن بستگی

1. CO₂ Prophet

مسائلی که دارای اطلاعات ضعیف یا ناقص می‌باشند، توسعه یافته است. تحلیل رابطه‌ای خاکستری^۲ به‌عنوان یکی از تکنیک‌های مطرح در تئوری سیستم‌های خاکستری، کاربردهای فراوانی در حل مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه^۳ [۱۶] مانند استخدام و کاریابی [۱۷]، برنامه‌ریزی سیستم‌های انتقال برق [۱۸]، بازرسی مدارهای مجتمع [۱۹]، مدل‌سازی گسترش عملکرد کیفیت [۲۰]، کشف عیوب برش ویفرهای سیلیکونی [۲۱]، ارزیابی زیست محیطی کیفیت آب رودخانه‌ها [۲۲]، رتبه‌بندی ساختمان‌ها از نظر ایمنی در برابر آتش [۲۳] و نظایر آن داشته است. تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری با در نظر گرفتن ماتریسی از مقادیر شاخص‌ها برای هر یک از گزینه‌ها و تبدیل آن به عددی مشخص برای هر گزینه، به حل مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌پردازد. به این ترتیب با استفاده از این تکنیک، مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها با شاخص‌های مختلف به سهولت انجام می‌پذیرد [۱۶].

هدف اصلی این پژوهش، به‌کارگیری تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری به‌عنوان یکی از روش‌های متداول تصمیم‌گیری چند شاخصه، برای حل مسأله رتبه‌بندی مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت با دی‌اکسیدکربن می‌باشد. از آن جا که مسأله مذکور از منظر تئوری تصمیم‌گیری مستلزم در نظر گرفتن شاخص‌های کمی و کیفی از جنس بهینه می‌باشد، تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری برای برآورده کردن ویژگی‌های خاص این مسأله، تا حدودی بهبود داده شده است. علاوه بر آن، برای مواجهه با عدم قطعیت‌های ذکر شده در تعیین مشخصات مخزن از تئوری سیستم‌های خاکستری استفاده شده است.

این در حالی است که ممکن است مخزن حذف شده بر مبنای سایر پارامترها حائز شرایط بسیار مناسبی باشد. با توجه به ضعف‌های روش باینری، یک روش ابتکاری برای رتبه‌بندی تکنیکی مخازن در مقاله [۷] پیشنهاد گردید. ایشان از یک روش پارامتری در شرایط قطعیت برای تعیین تاثیر مشخصات مخزن بر تزریق گاز با استفاده از مطالعات شبیه‌سازی و مدل‌های پیش‌بینی استفاده کردند. روش ابتکاری مقاله اخیر به‌همراه مجموعه شاخص‌های انتخاب شده برای ارزیابی و نیز وزن اهمیت هریک از شاخص‌ها توسط سایر محققین مورد استفاده قرار گرفت [۶ و ۸]. با بهره‌گیری از این روش، مطالعه دیگری نیز به منظور شناسایی مخازن نفتی مناسب ایران جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن به منظور ازدیاد برداشت انجام شده است [۵]. علی‌رغم این‌که به نظر می‌رسد روش‌های مذکور توانسته مسأله امتیازدهی و رتبه‌بندی اولیه مخازن را تا حدود زیادی مرتفع نماید، روش‌های متداولی در تئوری تصمیم‌گیری وجود دارد که کارایی آن‌ها در رتبه‌بندی گزینه‌ها از نظر شاخص‌های متعدد در سطح وسیع مورد قبول می‌باشد. علاوه بر آن هیچ یک از مطالعات ذکر شده به بررسی مسأله در شرایط عدم قطعیت نپرداخته‌اند. عدم قطعیت عمدتاً ناشی از داده‌های غیر دقیق یا مبهم، تعداد کم نمونه، خطاهای اندازه‌گیری یا نمونه‌برداری و اطلاعات ناقص در خصوص پارامترها یا مشخصات مخزن می‌باشد. مشخصات سنگ و سیال مخزن مسلماً به‌طور یکنواخت در تمام مخزن و در طول زمان توزیع نشده است. بنابراین، انجام اندازه‌گیری‌ها در چاه‌های اکتشافی و مطالعات آزمایشگاهی لازمه تخمین مشخصات مخزن می‌باشد. برای برآورد مشخصات کل مخزن از داده‌های محدود ذکر شده، روش‌های عدم قطعیت و مدل‌های تقریبی مختلفی تاکنون ارائه شده است [۹-۱۴].

تئوری سیستم‌های خاکستری^۱ که در سال ۱۹۸۲ توسط دنگ معرفی گردیده [۱۵]، برای مطالعه

1. Grey System Theory

2. Grey Relational Analysis

3. Multiple Attribute Decision Making (MADM)

صنعتی ریشه در دو نوع عدم قطعیت دارد. اولین نوع عدم قطعیت، عدم قطعیت تصادفی^۱ است که ناشی از ماهیت تصادفی^۲ مسأله است و با استفاده از آمار و احتمال و الگوها و توابع توزیع آماری توصیف می‌گردد. مطالعه این جنبه از پدیده‌ها مبتنی بر نمونه‌هایی با حجم زیاد و این مفروضه است که این نمونه‌ها از یک الگوی مشخص تحت عنوان توزیع احتمال پیروی می‌کنند [۲۶]. دومین نوع عدم قطعیت، عدم قطعیت ادراکی^۳ است که ناشی از پیچیدگی ذاتی پدیده و کمبود اطلاعات کامل در مورد آن است [۲۷]. برای توصیف و مطالعه این جنبه از پدیده‌ها تئوری سیستم‌های خاکستری به‌عنوان بسط یافته تئوری فازی در شرایط با داده‌های کم یا اطلاعات کیفی ناکامل^۴ توسعه یافته است. مزیت تئوری خاکستری بر تئوری فازی این است که تئوری خاکستری شرایط فازی بودن را در بر می‌گیرد. به عبارت بهتر تئوری خاکستری می‌تواند به خوبی در شرایط فازی عمل نماید [۲۴]. به‌کارگیری تئوری فازی مستلزم تشخیص تابع عضویت مربوطه بر اساس تجربه خبرگان یا داده‌های وسیع است. اما تئوری خاکستری بدون آن و بر اساس محدوده اطلاعات در دسترس عمل می‌نماید [۲۶]. تعریف اعداد و مجموعه‌های دقیق، بازه‌ای، فازی و خاکستری و تفاوت میان آن‌ها به تفصیل در مراجع [۲۸ و ۲۹] بیان شده است.

عدد خاکستری عددی است که مقدار دقیق آن معلوم نیست، اما محدوده‌ای که در آن قرار می‌گیرد، مشخص است. به عبارتی عدد خاکستری یک بازه یا مجموعه‌ای از اعداد است. فرض کنیم X مجموعه مرجع باشد. آن‌گاه مجموعه خاکستری G از مجموعه مرجع X با دو نماد $\bar{\mu}_G(x)$ و $\underline{\mu}_G(x)$ بر اساس رابطه ۱ تعریف می‌شود [۳۰]:

به نظر می‌رسد به منظور بیان مشخصات مخزن از نظر هر یک از شاخص‌ها می‌توان به جای انجام یک برآورد دقیق و تخصیص یک عدد قطعی، از اعداد خاکستری استفاده نمود که تصویری واقعی‌تر از کل مخزن در شرایط عدم قطعیت به نمایش می‌گذارد.

پس از بیان مقدمه، برخی مفاهیم و روابط اولیه تئوری سیستم‌های خاکستری معرفی می‌گردد. در ادامه تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری و بهبودهایی که در آن داده شده تا مسأله رتبه‌بندی مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت با دی‌اکسیدکربن را با رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه حل نماید، ارائه شده است. سپس به منظور نمایش کارآمدی تکنیک بهبود داده شده در حل مسأله فوق، مطالعه موردی بیست مخزن نفتی ایران که به‌عنوان مخازن کاندید جهت تزریق دی‌اکسیدکربن مطرح می‌باشند، با استفاده از این روش رتبه‌بندی می‌شوند.

مفاهیم اولیه تئوری سیستم‌های خاکستری

تئوری سیستم‌های خاکستری در اوائل دهه ۱۹۸۰ توسط «دنگ» معرفی گردید [۱۵ و ۲۴]. سیستم‌های خاکستری بر پایه رنگ موضوعات تحت بررسی، نام‌گذاری شده است. به گونه‌ای که میزان روشنی رنگ‌ها نشان دهنده میزان وضوح اطلاعات و داده‌ها است. بر این اساس سیستم‌هایی با اطلاعات کاملاً معلوم را سیستم سفید، سیستم‌های با اطلاعات ناشناخته و یا بدون داده را سیستم سیاه، و سیستم‌هایی که بخشی از اطلاعات آن معلوم و بخش دیگر ناشناخته است، را سیستم خاکستری می‌نامند [۲۵]. همچنین تئوری خاکستری از برخی مفروضه‌ها و اصول کلی شامل اصول اختلاف، غیر یکتایی در جواب، حداقل اطلاعات، شناخت محوری، اولویت اطلاعات جدید و خاکستری بودن اطلاعات تبعیت می‌کند [۲۶].

در حقیقت عدم قطعیت موجود در مسائل مختلف

1. Stochastic Uncertainty
2. Randomness
3. Recognitive Uncertainties
4. Incomplete Information

تکنیک «تحلیل رابطه‌ای خاکستری» و بهبود آن به منظور رتبه‌بندی مخازن نفتی جهت ازدیاد برداشت با دی‌اکسیدکربن

تئوری سیستم‌های خاکستری تاکنون در حوزه‌های مختلفی مانند تصمیم‌گیری خاکستری، کنترل خاکستری و پیش‌بینی خاکستری [۳۵] کاربرد داشته است. تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری در حوزه تصمیم‌گیری خاکستری مطرح بوده و برای حل بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه در شرایط عدم قطعیت نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است [۳۶].

تحلیل رابطه‌ای خاکستری اولین بار توسط دنگ مطرح شد [۲۴ و ۳۷]. مراحل این تکنیک را همان‌طور که در شکل ۲ نمایش داده شده، می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود: در مرحله اول رابطه خاکستری ایجاد می‌شود. بدین معنا که برای هر یک از گزینه‌ها از منظر کل شاخص‌ها دنباله‌ای قابل مقایسه توسعه داده می‌شود. پس از آن یک دنباله مرجع که از نظر کل شاخص‌ها، گزینه‌ای ایده‌آل محسوب می‌شود، به‌عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته می‌شود. سپس ضریب رابطه‌ای خاکستری بین هر یک از عضوهای دنباله مرجع و دنباله متناظر با هر گزینه محاسبه می‌گردد. در انتها با استفاده از ضرایب رابطه‌ای خاکستری محاسبه شده در مرحله قبل، امتیاز رابطه‌ای خاکستری بین دنباله متناظر با هر گزینه و گزینه مرجع محاسبه می‌شود [۳۸].

اولین مرحله در حل مسائل بارویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه، آن است که گزینه‌ها، شاخص‌ها و وزن هر یک از آنها در مسأله تصمیم‌گیری مورد نظر تعریف گردد [۳۹]. ریواس و همکاران [۷] با استفاده از مطالعات شبیه‌سازی گسترده و میدانی، شاخص‌ها، وزن اهمیت و میزان بهینه هر یک از آنها را تعیین نمودند. این شاخص‌ها بعدها در غربال‌گری و انتخاب اولیه مخازن نفتی جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن به کار گرفته شد [۳، ۶ و ۸]. هشت شاخص، وزن اهمیت و میزان بهینه هر یک از آنها که در جدول ۱ نشان داده شده است، برگرفته از مراجع می‌باشد [۳، ۶-۸]، که در مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\begin{cases} \bar{\mu}_G(x), x \rightarrow [0, 1] \\ \underline{\mu}_G(x), x \rightarrow [0, 1] \end{cases} \quad (1)$$

که در آن $\bar{\mu}_G(x) \geq \underline{\mu}_G(x)$ و $x \in X$ می‌باشد. $\bar{\mu}_G(x)$ و $\underline{\mu}_G(x)$ به ترتیب حد بالا و حد پایین از تابع عضویت G می‌باشند. هنگامی که $\bar{\mu}_G(x) = \underline{\mu}_G(x)$ باشد، مجموعه خاکستری G تبدیل به مجموعه فازی می‌شود. این قابلیت نشان‌دهنده شمول تئوری خاکستری نسبت به شرایط فازی و انعطاف آن در مواجهه با مسائل غیر قطعی است [۳۱].

به‌طور کلی روابط تعریف شده میان اعداد حقیقی برای مجموعه‌های بازه‌های خاکستری قابل تعمیم است [۲۶]. عملگرهای بازه‌ای توسط مور [۳۲] گسترش یافته است. عملگرهای میان دو عدد خاکستری $\otimes G_1 \in [\underline{G}_1, \bar{G}_1]$ و $\otimes G_2 \in [\underline{G}_2, \bar{G}_2]$ در قالب روابط ۲ تا ۵ قابل تعریف است [۳۳]:

$$\otimes G_1 + \otimes G_2 \in [\underline{G}_1 + \underline{G}_2, \bar{G}_1 + \bar{G}_2] \quad (2)$$

$$\otimes G_1 - \otimes G_2 \in [\underline{G}_1 - \bar{G}_2, \bar{G}_1 - \underline{G}_2] \quad (3)$$

$$\otimes G_1 \times \otimes G_2 \in [\min(\underline{G}_1 \underline{G}_2, \underline{G}_1 \bar{G}_2, \bar{G}_1 \underline{G}_2, \bar{G}_1 \bar{G}_2), \max(\underline{G}_1 \underline{G}_2, \underline{G}_1 \bar{G}_2, \bar{G}_1 \underline{G}_2, \bar{G}_1 \bar{G}_2)] \quad (4)$$

$$\otimes G_1 \div \otimes G_2 \in [\underline{G}_1, \bar{G}_1] \times \left[\frac{1}{\underline{G}_2}, \frac{1}{\bar{G}_2} \right] \quad (5)$$

اگر k یک عدد حقیقی مثبت باشد، ضرب عددی آن در مجموعه خاکستری G به صورت رابطه ۶ خواهد بود:

$$k \cdot \otimes G \in [k \underline{G}_1, k \bar{G}_2] \quad (6)$$

فاصله مینکفسکی^۱ بین دو عدد $\otimes G_1$ و $\otimes G_2$ به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود [۳۴]:

$$D_{G_1 G_2} = \frac{1}{\sqrt[p]{2}} \left[(\underline{G}_1 - \underline{G}_2)^p + (\bar{G}_1 - \bar{G}_2)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (7)$$

در صورتی که $\otimes G_1$ و $\otimes G_2$ دو عدد قطعی عضو مجموعه اعداد حقیقی باشند، یعنی $\underline{G}_1 = \bar{G}_1$ و $\underline{G}_2 = \bar{G}_2$ ، در این صورت رابطه ۸ برقرار است:

$$D_{G_1 G_2} = \frac{1}{\sqrt[p]{2}} \left[2(\underline{G}_1 - \underline{G}_2)^p \right]^{\frac{1}{p}} = |\underline{G}_1 - \underline{G}_2| \quad (8)$$

1. Minkowski Distance



شکل ۲- مراحل تکنیک «تحلیل رابطه‌ای خاکستری»

جدول ۱- چارچوب مساله با رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه (k=6)

| شماره | عنوان شاخص | ماهیت شاخص | مقدار بهینه شاخص | وزن اهمیت شاخص |
|----------------|-------------------------------|------------|------------------|----------------|
| Q _۱ | اشباع نفت (%) | کیفی | [۶۰, ۶۰] | ۰/۲ |
| Q _۲ | نسبت فشار به MMP ^۱ | کیفی | [۱/۳, ۱/۳] | ۰/۱۹ |
| Q _۳ | دما (°F) | کیفی | [۱۶۰, ۱۵۰] | ۰/۱۴ |
| Q _۴ | ضخامت لایه نفتی (ft) | کیفی | [۵۰, ۴۰] | ۰/۱۱ |
| Q _۵ | تراوایی متوسط (mD) | کیفی | [۳۰۰, ۳۰۰] | ۰/۰۷ |
| Q _۶ | تخلخل (%) | کیفی | [۲۰, ۲۰] | ۰/۰۲ |
| Q _۷ | درجه API (°) | کمی | ۳۷ | ۰/۲۴ |
| Q _۸ | شیب مخزن (°) | کمی | ۲۰ | ۰/۰۳ |

با توجه به اطلاعات در دسترس، دو شاخص به صورت کمی و شش شاخص باقی مانده، کیفی در نظر گرفته شد. از آن جا که تکنیک ارائه شده قابلیت مواجهه با شاخص‌های کمی و کیفی متعدد را داراست، در صورت لزوم، ایجاد تغییر در چارچوب تصمیم‌گیری مسأله اعم از تعداد یا ماهیت کیفی/کمی شاخص‌ها در مطالعات آتی به سادگی امکان پذیر است.

در حالت کلی فرض کنید $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ مجموعه گسسته‌ای از m مخزن نفتی کاندید به عنوان گزینه‌ها و $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_k, Q_{k+1}, \dots, Q_n\}$ مجموعه n شاخص مستقل به منظور ارزیابی مخازن جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن باشد؛ این شاخص‌ها می‌تواند شامل k شاخص کیفی و $(n-k)$ شاخص کمی باشد. به این ترتیب تکنیک تحلیل رابطه‌ای خاکستری گام به گام به صورت زیر ارائه می‌گردد. بنابراین، هر گاه تعداد زیادی از مخازن نفتی برای تزریق دی‌اکسیدکربن کاندید باشند، با استفاده از رویه زیر می‌توان این مخازن را از نظر فنی رتبه‌بندی نمود.

$$D = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \text{non-deterministic attributes} \\ \otimes G_{11} & \otimes G_{12} & \dots & \otimes G_{1k} \\ \otimes G_{21} & \otimes G_{22} & \dots & \otimes G_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \otimes G_{m1} & \otimes G_{m2} & \dots & \otimes G_{mk} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{deterministic attributes} \\ R_{1,k+1} & R_{1,k+2} & \dots & R_{1n} \\ R_{2,k+1} & R_{2,k+2} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m,k+1} & R_{m,k+2} & \dots & R_{mn} \end{matrix} \end{pmatrix} A_i \quad (9)$$

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری برای ارزیابی هر یک از مخازن کاندید از نظر شاخص‌های کمی

یک دنباله مرجع که در حقیقت گزینه ایده‌آل مفروض است، با استفاده از رابطه ۱۳ تعریف می‌شود [۳۸] تا مبنایی برای ارزیابی و مقایسه دنباله متناظر با هریک از گزینه‌ها فراهم گردد.

$$A_0 = \left\{ \left[\max_{1 \leq i \leq m} \underline{G}_{i1}^*, \max_{1 \leq i \leq m} \bar{G}_{i1}^* \right], \dots, \left[\max_{1 \leq i \leq m} \underline{G}_{ik}^*, \max_{1 \leq i \leq m} \bar{G}_{ik}^* \right], \right. \\ \left. \max_{1 \leq i \leq m} R_{i,k+1}^*, \dots, \max_{1 \leq i \leq m} R_{in}^* \right\} \quad (13)$$

گام چهارم: محاسبه ضریب رابطه‌ای خاکستری ضریب نسبی خاکستری^۳ که با $\xi_{0i(j)}$ نمایش داده می‌شود، بین گزینه A_i و گزینه مرجع با در نظر گرفتن معیار Z با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\xi_{0i(j)} = \frac{\min_i \min_j \{d_{0i(j)}\} + \rho \max_i \max_j \{d_{0i(j)}\}}{d_{0i(j)} + \rho \max_i \max_j \{d_{0i(j)}\}} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴ عبارت $d_{i,j}$ فاصله یا اختلاف بین گزینه A_i و گزینه مرجع با در نظر گرفتن معیار Z است که در این مقاله از تعریف فاصله مینکفسکی (روابط ۷ و ۸) محاسبه می‌گردد. $\rho \in [0, 1]$ ضریب تفکیک است که بیان‌گر چگونگی در نظر گرفتن فاصله بین هر گزینه و گزینه مرجع می‌باشد. در کاربردهای مختلف تحلیل رابطه‌ای خاکستری همانند پژوهش حاضر، معمولاً میانه این بازه یعنی ۰/۵ برای ضریب تفکیک در نظر گرفته می‌شود [۴۱ و ۴۲].

گام پنجم: محاسبه امتیاز رابطه‌ای خاکستری امتیاز رابطه‌ای خاکستری^۴ بین گزینه A_i و مرجع از رابطه ۱۵ به‌دست می‌آید:

$$\gamma_{0i} = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \xi_{0i(j)}, \quad i=1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

در این رابطه w_j وزن معیارهاست، به گونه‌ای که رابطه $w_j > 0$ و $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ برقرار می‌باشد. امتیاز رابطه‌ای خاکستری در حقیقت بیان‌گر تشابه میان هریک از گزینه‌ها با گزینه مرجع (ایده‌آل) است [۴۳].

گام دوم: بی‌بعد کردن ماتریس تصمیم‌گیری با توجه به یکسان نبودن جنس و ماهیت شاخص‌ها پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، لازم است نسبت به بی‌بعد کردن آن اقدام نمود تا امکان ارزیابی و مقایسه همه شاخص‌ها فراهم گردد. روش‌های مختلفی برای نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری با اعداد حقیقی [۴۰] و اعداد خاکستری [۳۱] برای شاخص‌های مثبت^۱ و منفی^۲ در مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه وجود دارد. از آن جا که در مسأله ارزیابی مخازن نفتی (همان‌طور که در جدول ۱ آمده است) مقادیر بهینه برای شاخص‌ها در نظر گرفته شده است، لذا در این مقاله برای نرمال‌سازی شاخص‌ها، روابط ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب برای شاخص‌های کمی و کیفی توسعه داده شده است.

$$R_{ij}^* = 1 - \frac{|R_{ij} - R_{Oj}|}{|\mu - R_{Oj}|}, \quad k+1 \leq j \leq n \\ \begin{cases} \mu = R_j^{\max} & \text{if } R_j^{\max} - R_{Oj} \geq R_{Oj} - R_j^{\min} \\ \mu = R_j^{\min} & \text{if } R_j^{\max} - R_{Oj} < R_{Oj} - R_j^{\min} \end{cases} \\ R_j^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{R_{ij}\} \\ R_j^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{R_{ij}\} \quad (10)$$

$$\otimes G_{ij}^* \in \left[1 - \left| \frac{G_{ij} - \underline{G}_{Oj}}{\mu_1 - \underline{G}_{Oj}} \right|, 1 - \left| \frac{\bar{G}_{ij} - \bar{G}_{Oj}}{\mu_2 - \bar{G}_{Oj}} \right| \right], \quad \underline{G}_{ij}^* \leq \bar{G}_{ij}^*, \quad j=1, 2, \dots, k \\ \otimes G_{ij}^* = \left[1 - \left| \frac{G_{ij} - \underline{G}_{Oj}}{\mu_1 - \underline{G}_{Oj}} \right|, 1 - \left| \frac{\bar{G}_{ij} - \bar{G}_{Oj}}{\mu_2 - \bar{G}_{Oj}} \right| \right], \quad \underline{G}_{ij}^* \leq \bar{G}_{ij}^*, \quad j=1, 2, \dots, k \\ \begin{cases} \mu_1 = \underline{G}_j^{\max} & \text{if } \underline{G}_j^{\max} - \underline{G}_{Oj} \geq \underline{G}_{Oj} - \underline{G}_j^{\min} \\ \mu_1 = \underline{G}_j^{\min} & \text{if } \underline{G}_j^{\max} - \underline{G}_{Oj} < \underline{G}_{Oj} - \underline{G}_j^{\min} \\ \mu_2 = \bar{G}_j^{\max} & \text{if } \bar{G}_j^{\max} - \bar{G}_{Oj} \geq \bar{G}_{Oj} - \bar{G}_j^{\min} \\ \mu_2 = \bar{G}_j^{\min} & \text{if } \bar{G}_j^{\max} - \bar{G}_{Oj} < \bar{G}_{Oj} - \bar{G}_j^{\min} \end{cases} \\ \underline{G}_j^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{\underline{G}_{ij}\}, \underline{G}_j^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{\underline{G}_{ij}\} \\ \bar{G}_j^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{\bar{G}_{ij}\}, \bar{G}_j^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{\bar{G}_{ij}\} \quad (11)$$

با استفاده از مقادیر R_{ij}^* محاسبه شده از رابطه ۱۰ و $\otimes G_{ij}^*$ محاسبه شده از رابطه ۱۱، ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد شده مطابق رابطه ۱۲ تشکیل می‌گردد. در این ماتریس کلیه درایه‌ها، اعم از عدد حقیقی یا خاکستری در بازه صفر و یک قرار دارند.

$$D^* = \begin{pmatrix} \otimes G_{11}^* & \otimes G_{12}^* & \dots & \otimes G_{1k}^* & R_{1,k+1}^* & R_{1,k+2}^* & \dots & R_{1n}^* \\ \otimes G_{21}^* & \otimes G_{22}^* & \dots & \otimes G_{2k}^* & R_{2,k+1}^* & R_{2,k+2}^* & \dots & R_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \otimes G_{m1}^* & \otimes G_{m2}^* & \dots & \otimes G_{mk}^* & R_{m,k+1}^* & R_{m,k+2}^* & \dots & R_{mn}^* \end{pmatrix} \quad (12)$$

گام سوم: تعریف گزینه مرجع

۱- از منظر ماهیت شاخص‌ها منظور از شاخص مثبت، شاخصی است که هر چه مقدار آن بیشتر باشد، بهتر است؛ مانند سود.

۲- منظور از شاخص منفی شاخصی است که هر چه مقدار آن کمتر باشد، مطلوب‌تر است؛ مانند هزینه.

3. Grey Relational Coefficient

4. Grey Relational Grade

جمع‌آوری شده از بیست مخزن کاندید از نظر هشت شاخص، ماتریس تصمیم‌گیری مشتمل بر بیست سطر و هشت ستون تشکیل گردید.

با استفاده از روابط ارائه شده در گام دوم، ماتریس تصمیم‌گیری همان‌طور که در جدول ۲ آمده است، نرمال‌سازی گردید.

در گام سوم گزینه مرجع به صورت زیر محاسبه شد.

$$A_0 = \{[1,1],[0.898,0.940],[0.671,0.968],[0.643,1],[0.039,0.051],[0.950,1],0.983,1\} \quad (۱۶)$$

در گام چهارم، ضمن محاسبه فاصله مینکفسکی برای درایه‌های هریک از گزینه‌ها با گزینه مرجع، ضرایب رابطه‌ای خاکستری محاسبه شد که در جدول ۳ مقادیر آن ارائه شده است.

در گام پنجم امتیاز رابطه‌ای خاکستری برای هر یک از مخازن کاندید محاسبه شد (جدول ۴). اعداد نمایش داده شده در جدول ۴ بر اساس رابطه ۱۵ محاسبه شده است. به عبارت بهتر برای هر یک از مخازن کاندید، یک عدد به‌عنوان امتیاز رابطه‌ای خاکستری محاسبه شده است که بیانگر میزان تشابه میان هریک از گزینه‌ها با گزینه مرجع (ایده‌آل) است.

ضمناً نتایج حاصل از به‌کارگیری تکنیک تصمیم‌گیری چند شاخصه مطروحه در مقاله، با روش‌های موجود مقایسه گردید. به این منظور بیست مخزنی که در مقاله به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده، با استفاده از روش ابتکاری [۷] نیز رتبه‌بندی گردید که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. ضریب همبستگی میان رتبه‌بندی‌های ارائه شده توسط این دو روش ۰/۸۱ محاسبه شده است که نشان دهنده نزدیکی نتایج روش‌ها به یکدیگر و اعتبار رتبه‌بندی ارائه شده می‌باشد.

بدیهی است هر چه امتیاز رابطه‌ای خاکستری محاسبه شده برای گزینه i ام (y_{0i}) بیشتر باشد، آن گزینه مطلوب‌تر است.

مطالعه موردی: رتبه‌بندی مخازن نفتی ایران جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن به منظور ازدیاد برداشت

بسیاری از مخازن نفتی ایران پس از سال‌ها بهره‌برداری وارد دوران جدیدی از عمر خود شده‌اند که برداشت بهره‌ور از آن‌ها مستلزم به‌کارگیری فرآیندهای بازیافت دوم و سوم می‌باشد. طی سالیان گذشته حجم قابل توجهی از گاز طبیعی به منظور حفظ و ارتقای میزان برداشت نفت مورد استفاده قرار گرفته است. روند کاهشی تولید در برخی مخازن جنوب و جنوب‌غربی ایران و امکان به‌کارگیری دی‌اکسیدکربن در ازدیاد برداشت در مطالعات مختلف مورد اشاره قرار گرفته است [۴۴]. با توجه به ارزش گاز طبیعی و وجود منابع انتشار دی‌اکسیدکربن، امروزه موضوع ازدیاد برداشت از مخازن نفتی با استفاده از دی‌اکسید کربن مورد توجه واقع شده است.

تعداد بیست مخزن نفتی ($m=20$) که به عنوان مخازن کاندید در منطقه جغرافیایی جنوب و جنوب غربی ایران مطرح بودند، در این پژوهش با هدف امتیازدهی و رتبه‌بندی اولیه به عنوان گزینه در نظر گرفته شدند. اطلاعات هر یک از مخازن از دیدگاه دو شاخص درجه API و شیب مخزن (که در این پژوهش، کمی در نظر گرفته شده‌اند)، در قالب اعداد حقیقی با استفاده از طرح توسعه جامع^۱ مخزن استخراج گردیده است. به منظور جمع‌آوری اطلاعات شش شاخص کیفی مخازن، با توجه به عدم قطعیت شناخت مخزن، نظرات و تجربیات مسئول مهندسی عملیات هر مخزن در قالب اعداد خاکستری بیان شده است. بر اساس گام اول رتبه‌بندی، با استفاده از داده‌های

جدول ۲- ماتریس تصمیم‌گیری نرمال (مقادیر شاخص‌های بی‌بعد شده براساس روابط ۱۰ و ۱۱)

| گزینه‌ها | شاخص‌های کیفی | | | | | | | کمی |
|----------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|----------------|----------------|----------|-----|
| | ضخامت لایه نفتی | اشباع نفت | MMP به نسبت فشار به | دما | تراوایی متوسط | تخلخل | درجه API | |
| AIZ | [۰/۰۰۰, ۰/۰۰۰] | [۰/۶۵۱, ۰/۷۷۸] | [۰/۲۶۷, ۰/۹۶۱] | [۰/۵۰۷, ۰/۹۸۶] | [۰/۰۲۶, ۰/۰۳۸] | [۰/۸۴۹, ۰/۸۵۰] | ۰/۹۰۴ | |
| MIN | [۰/۱۰۰, ۰/۱۰۹] | [۰/۶۵۱, ۰/۷۷۸] | [۰/۱۵۵۳, ۰/۹۶۸] | [۰/۳۳۱, ۰/۶۴۳] | [۰/۰۳۳, ۰/۰۴۴] | [۰/۴۹۹, ۰/۷۹۹] | ۰/۷۹۲ | |
| M2N | [۰/۳۵۳, ۰/۳۸۳] | [۰/۷۸۷, ۰/۹۴۰] | [۰/۱۵۸۹, ۰/۹۱۵] | [۰/۳۳۱, ۰/۶۴۳] | [۰/۰۲۶, ۰/۰۳۸] | [۰/۳۹۸, ۰/۵۹۸] | ۰/۵۴۲ | |
| BIK | [۰/۰۹۴, ۰/۱۰۲] | [۰/۷۸۷, ۰/۹۴۰] | [۰/۰۰۰, ۰/۷۷۶] | [۰/۵۷۱, ۰/۷۱۴] | [۰/۰۲۶, ۰/۰۳۸] | [۰/۸۴۹, ۰/۸۵۰] | ۰/۷۰۸ | |
| CIK | [۱/۰۰۰, ۱/۰۰۰] | [۰/۸۹۸, ۰/۹۲۲] | [۰/۱۸۷, ۰/۵۰۴] | [۰/۳۳۱, ۰/۶۴۳] | [۰/۰۳۱, ۰/۰۰۹] | [۰/۶۹۹, ۱/۰۰۰] | ۰/۶۶۷ | |
| DIN | [۰/۸۴۱, ۰/۸۵۳] | [۰/۷۸۷, ۰/۹۴۰] | [۰/۶۵۶, ۰/۷۶۹] | [۰/۵۰۰, ۱/۰۰۰] | [۰/۰۰۰, ۰/۰۰۰] | [۰/۳۹۸, ۰/۶۹۸] | ۰/۷۱۷ | |
| D2N | [۰/۵۴۵, ۰/۵۸۰] | [۰/۶۷۱, ۰/۶۷۱] | [۰/۱۶۳, ۰/۴۷۰] | [۰/۱۵۷, ۰/۳۱۴] | [۰/۰۰۰, ۰/۰۰۰] | [۰/۲۴۸, ۰/۵۴۸] | ۰/۵۴۶ | |
| KIT | [۰/۶۸۴, ۰/۷۰۸] | [۰/۲۹۸, ۰/۳۷۵] | [۰/۳۸۱, ۰/۷۸۵] | [۰/۳۴۳, ۰/۶۸۶] | [۰/۰۰۹, ۰/۰۲۱] | [۰/۴۹۷, ۰/۱۹۸] | ۰/۹۵۸ | |
| PIR | [۰/۰۸۲, ۰/۱۵۴] | [۰/۴۶۱, ۰/۵۵۱] | [۰/۱۶۴, ۰/۴۷۱] | [۰/۰۰۰, ۰/۸۰۰] | [۰/۰۱۹, ۰/۰۳۱] | [۰/۹۵۰, ۰/۷۴۹] | ۰/۰۰۰ | |
| PIW | [۰/۹۷۷, ۰/۹۷۹] | [۰/۴۸۸, ۰/۵۸۴] | [۰/۱۰۵, ۰/۳۸۷] | [۰/۰۴۵۴, ۰/۹۰۷] | [۰/۰۳۱, ۰/۰۰۹] | [۰/۵۴۹, ۰/۸۴۹] | ۰/۳۶۳ | |
| P2W | [۰/۳۳۹, ۰/۳۹۱] | [۰/۴۳۴, ۰/۵۱۹] | [۰/۱۱۲, ۰/۳۶۶] | [۰/۱۵۷, ۰/۳۴۱] | [۰/۰۳۹, ۰/۰۵۱] | [۰/۵۴۹, ۰/۸۴۹] | ۰/۲۵۰ | |
| S3D | [۰/۸۱۲, ۰/۷۹۶] | [۰/۷۸۷, ۰/۹۴۰] | [۰/۰۰۰, ۰/۳۳۵] | [۰/۵۵۰, ۰/۹۰۰] | [۰/۰۰۹, ۰/۰۲۱] | [۰/۱۹۸, ۰/۴۹۷] | ۰/۸۱۳ | |
| S2N | [۰/۸۴۵, ۰/۸۵۷] | [۴۳۴/۰, ۰/۵۱۹] | [۰/۱۷۸, ۰/۹۰۰] | [۰/۶۱۴, ۰/۷۷۱] | [۰/۰۰۴, ۰/۰۰۴] | [۰/۱۹۸, ۰/۴۹۷] | ۰/۷۰۸ | |
| S4N | [۰/۷۹۸, ۰/۸۱۳] | [۰/۳۸۰, ۰/۴۵۴] | [۰/۱۳۴, ۰/۸۹۶] | [۰/۴۹۷, ۰/۹۵۷] | [۰/۰۱۳, ۰/۰۵۱] | [۰/۳۹۸, ۰/۶۹۸] | ۰/۹۵۸ | |
| S5N | [۰/۹۶۱, ۰/۹۶۴] | [۰/۰۰۰, ۰/۰۰۰] | [۰/۶۴۰, ۰/۷۸۰] | [۰/۵۷۱, ۰/۸۵۷] | [۰/۰۰۳, ۰/۰۳۱] | [۰/۳۹۷, ۰/۶۹۹] | ۰/۲۸۳ | |
| BIR | [۰/۳۹۸, ۴۴۵/۰] | [۰/۸۹۸, ۰/۹۲۲] | [۰/۲۰۲, ۰/۵۲۶] | [۰/۰۰۰, ۰/۰۰۰] | [۰/۰۲۹, ۰/۰۴۰] | [۰/۴۳۴, ۰/۷۳۴] | ۰/۹۸۳ | |
| BIN | [۰/۸۰۵, ۰/۸۲۰] | [۰/۵۰۹, ۰/۷۵۲] | [۰/۲۰۵, ۰/۹۱۸] | [۰/۱۴۳, ۰/۹۲۹] | [۰/۰۲۶, ۰/۰۳۸] | [۰/۱۶۳, ۰/۴۶۳] | ۰/۸۹۲ | |
| DII | [۰/۶۹۵, ۰/۷۱۹] | [۰/۷۶۰, ۰/۹۰۸] | [۰/۵۴۳, ۰/۸۴۷] | [۰/۶۴۳, ۰/۷۱۴] | [۰/۰۱۶, ۰/۰۲۸] | [۰/۰۰۰, ۰/۰۰۰] | ۰/۶۷۹ | |
| MIH | [۰/۷۵۱, ۷۷۰/۰] | [۰/۶۳۸, ۰/۸۶۰] | [۰/۳۹۱, ۰/۹۵۳] | [۰/۳۵۷, ۰/۸۲۱] | [۰/۰۰۶, ۰/۰۱۸] | [۰/۱۰۳, ۰/۴۰۲] | ۰/۸۳۳ | |
| SIN | [۰/۹۴۴, ۰/۹۴۹] | [۰/۷۰۳, ۰/۹۱۵] | [۰/۶۷۱, ۰/۷۹۷] | [۰/۱۷۱, ۰/۹۱۴] | [۰/۰۰۳, ۰/۰۰۴] | [۰/۲۵۳, ۰/۵۵۳] | ۰/۶۶۷ | |

جدول ۳- ضرایب رابطه‌ای خاکستری

| گزینه‌ها | شاخص‌ها | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|-----------|---------------------|----------------|---------------|-------|----------|------|
| | ضخامت لایه نفتی (بدون بعد) | اشباع نفت | نسبت فشار به MMP | دما (بدون بعد) | تراوایی متوسط | تخلخل | درجه API | شیب |
| A1Z | ۰/۳۳ | ۰/۷۱ | ۰/۶۴ | ۰/۸۴ | ۰/۹۷ | ۰/۸۰ | ۰/۸۶ | ۰/۷۱ |
| M1N | ۰/۳۶ | ۰/۷۱ | ۰/۸۶ | ۰/۶۰ | ۰/۹۹ | ۰/۵۹ | ۰/۷۲ | ۰/۳۳ |
| M2N | ۰/۴۴ | ۰/۸۶ | ۰/۸۸ | ۰/۶۰ | ۰/۹۷ | ۰/۴۸ | ۰/۵۳ | ۰/۳۳ |
| B1K | ۰/۳۶ | ۰/۸۶ | ۰/۵۰ | ۰/۷۱ | ۰/۹۷ | ۰/۸۰ | ۰/۶۵ | ۰/۳۳ |
| C1K | ۱/۰۰ | ۰/۹۸ | ۰/۵۱ | ۰/۶۰ | ۰/۹۴ | ۰/۷۴ | ۰/۶۱ | ۱/۰۰ |
| D1N | ۰/۷۷ | ۰/۸۶ | ۰/۷۸ | ۰/۸۳ | ۰/۹۲ | ۰/۵۲ | ۰/۶۵ | ۱/۰۰ |
| D2N | ۰/۵۳ | ۰/۶۷ | ۰/۵۰ | ۰/۴۶ | ۰/۹۲ | ۰/۴۶ | ۰/۵۳ | ۱/۰۰ |
| K1T | ۰/۶۲ | ۰/۴۶ | ۰/۶۷ | ۰/۶۲ | ۰/۹۴ | ۰/۴۴ | ۰/۹۵ | ۱/۰۰ |
| P1R | ۰/۳۶ | ۰/۵۵ | ۰/۵۰ | ۰/۶۹ | ۰/۹۶ | ۰/۷۴ | ۰/۳۴ | ۱/۰۰ |
| P1W | ۰/۹۶ | ۰/۵۷ | ۰/۴۷ | ۰/۷۷ | ۰/۹۴ | ۰/۶۲ | ۰/۴۵ | ۱/۰۰ |
| P2W | ۰/۴۴ | ۰/۵۳ | ۰/۴۷ | ۰/۴۶ | ۱/۰۰ | ۰/۶۲ | ۰/۴۱ | ۱/۰۰ |
| S3D | ۰/۷۲ | ۰/۸۶ | ۰/۴۲ | ۰/۸۴ | ۰/۹۴ | ۰/۴۴ | ۰/۷۵ | ۱/۰۰ |
| S2N | ۰/۷۷ | ۰/۵۳ | ۰/۵۹ | ۰/۷۵ | ۰/۹۲ | ۰/۴۴ | ۰/۶۵ | ۱/۰۰ |
| S4N | ۰/۷۲ | ۰/۵۰ | ۰/۵۶ | ۰/۸۱ | ۰/۹۶ | ۰/۵۳ | ۰/۹۵ | ۱/۰۰ |
| S5N | ۰/۹۳ | ۰/۳۵ | ۰/۷۹ | ۰/۸۲ | ۰/۹۴ | ۰/۵۳ | ۰/۴۲ | ۱/۰۰ |
| B1R | ۰/۴۶ | ۰/۹۸ | ۰/۵۲ | ۰/۳۷ | ۰/۹۸ | ۰/۵۴ | ۱/۰۰ | ۰/۶۳ |
| B1N | ۰/۷۳ | ۰/۶۲ | ۰/۶۰ | ۰/۵۸ | ۰/۹۷ | ۰/۴۳ | ۰/۸۵ | ۰/۸۳ |
| D1I | ۰/۶۳ | ۰/۸۳ | ۰/۸۰ | ۰/۷۱ | ۰/۹۶ | ۰/۳۴ | ۰/۶۲ | ۱/۰۰ |
| M1H | ۰/۶۸ | ۰/۷۲ | ۰/۷۲ | ۰/۶۸ | ۰/۹۴ | ۰/۴۱ | ۰/۷۷ | ۱/۰۰ |
| S1N | ۰/۹۰ | ۰/۷۸ | ۰/۸۱ | ۰/۶۰ | ۰/۹۲ | ۰/۴۶ | ۰/۶۱ | ۰/۷۱ |

جدول ۵- مقایسه نتایج روش ارائه شده در این مقاله با روش‌های پیشین

| گزینه‌ها | رتبه‌بندی با رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه | رتبه‌بندی با روش ابتکاری [۷] |
|----------|--|------------------------------|
| D1N | ۱ | ۱ |
| C1K | ۲ | ۹ |
| D1I | ۳ | ۳ |
| B1R | ۴ | ۱۳ |
| M1H | ۵ | ۲ |
| S1N | ۶ | ۴ |
| S4N | ۷ | ۸ |
| S3D | ۸ | ۶ |
| A1Z | ۹ | ۷ |
| K1T | ۱۰ | ۱۶ |
| B1N | ۱۱ | ۵ |
| M1N | ۱۲ | ۱۲ |
| M2N | ۱۳ | ۱۴ |
| S2N | ۱۴ | ۱۰ |
| B1K | ۱۵ | ۱۱ |
| S5N | ۱۶ | ۱۵ |
| P1W | ۱۷ | ۱۷ |
| D2N | ۱۸ | ۱۸ |
| P1R | ۱۹ | ۱۹ |
| P2W | ۲۰ | ۲۰ |

جدول ۴- امتیاز رابطه‌ای خاکستری

| گزینه‌ها | امتیاز رابطه‌ای خاکستری |
|----------|-------------------------|
| A1Z | ۰/۷۳۱ |
| M1N | ۰/۶۸۱ |
| M2N | ۰/۶۷۷ |
| B1K | ۰/۶۴۶ |
| C1K | ۰/۷۴۴ |
| D1N | ۰/۷۸۳ |
| D2N | ۰/۵۸۲ |
| K1T | ۰/۷۰۸ |
| P1R | ۰/۵۳۴ |
| P1W | ۰/۶۳۰ |
| P2W | ۰/۵۱۷ |
| S3D | ۰/۷۳۲ |
| S2N | ۰/۶۶۶ |
| S4N | ۰/۷۳۶ |
| S5N | ۰/۶۴۳ |
| B1R | ۰/۷۳۸ |
| B1N | ۰/۷۰۷ |
| D1I | ۰/۷۴۱ |
| M1H | ۰/۷۳۸ |
| S1N | ۰/۷۳۷ |

می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که این مخازن در یک ارزیابی اولیه از نظر شاخص‌های فنی به ترتیب به‌عنوان مناسب‌ترین مخازن برای ازدیاد برداشت با استفاده از دی‌اکسیدکربن شناسایی و معرفی می‌گردند. در این پژوهش، تکنیک «تحلیل رابطه‌ای خاکستری» به‌عنوان یکی از روش‌های متداول تصمیم‌گیری چند شاخصه، برای امتیازدهی و رتبه‌بندی مخازن جهت تزریق دی‌اکسیدکربن به منظور ازدیاد برداشت نفت به کار رفته است. بدین‌منظور ضمن ارائه بهبودهایی در روش مذکور، تکنیک توسعه داده شده گام به گام تشریح شده است.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، هر گزینه‌ای که امتیاز رابطه‌ای خاکستری بیشتری داشته باشد، از مطلوبیت بیشتری برخوردار است. اگر امتیاز رابطه‌ای خاکستری محاسبه شده برای هر یک از مخازن کاندید را که در جدول ۴ نمایش داده شده به ترتیب نزولی مرتب کنیم، رتبه‌بندی مخازن مشخص می‌گردد. به عبارت بهتر با رویکرد تصمیم‌گیری چند شاخصه و با روش گام به گام ارائه شده در این مقاله، پنج مخزن برتر به ترتیب عبارتند از: M_1H ، B_1R ، D_1I ، C_1K ، D_1N . در حقیقت

بتواند هزینه‌های اقتصادی و ریسک‌های مترتب بر آن را نیز مورد ارزیابی قرار دهد، موضوعی برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه کارشناسان محترم پژوهشکده ازدیاد برداشت شرکت ملی نفت قدردانی می‌شود.

به منظور نمایش کارآمدی، تکنیک توسعه داده شده برای رتبه‌بندی مخازن نفتی ایران جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن به منظور ازدیاد برداشت به‌عنوان مطالعه موردی پیاده‌سازی شد و نتایج آن ارائه گردید. با توجه به این‌که این مقاله تنها به ارزیابی فنی مخازن می‌پردازد، ارائه روش جامعی که ضمن شناسایی منابع انتشار دی‌اکسیدکربن، با در نظر گرفتن زنجیره جمع‌آوری، انتقال و تزریق

مراجع

- [۱]. محمدنیا، م.، «ازدیاد برداشت با دی‌اکسیدکربن و ذخیره آن در مخازن نفتی»، نامه مکانیک شریف، سال یازدهم، شماره ۳۳.
- [۲]. تقیان، م.، «بررسی و ارزیابی انواع تزریق دی‌اکسیدکربن در ازدیاد برداشت از مخازن»، مجله اکتشاف و تولید، شماره ۶۷ اردیبهشت ۸۹.
- [3]. Kamali F., Khosravi M., Talebian M., Vahidi A., and Roayaei E. *Recovery Based Ranking Oil Reservoirs for CO₂ Miscible Injection*, In: Proceedings of the EAGE 1st International Petroleum Conference & Exhibition. Shiraz, Iran. 4–6, May 2009.
- [4]. Paul G. W., "Development and Verification of Simplified Prediction Models for Enhanced Oil Recovery Application: CO₂ (Miscible Flood) Predictive Model", US DOE Report DE-AC19-80BC10327, Intercomp, Denver, CO, pp. 127, 1983
- [۵]. وحیدی، ا.، خسروی، م.، کمالی، ف.، رعایایی، ع. و عمادی، م.، «غربالگری مخازن نفتی ایران جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن»، مجله مهندسی شیمی ایران، سال هشتم، شماره ۴۳، ۱۳۸۸.
- [6]. Shaw J., and Bachu S., "Screening, evaluation, and ranking of oil reservoirs suitable for CO₂-flood EOR and carbon dioxide sequestration", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 41, No. 9, pp. 51-61, 2002.
- [7]. Rivas O., Embid S., and Bolivar F., "Ranking reservoirs for carbon dioxide flooding processes", paper SPE 23641, SPE Advanced Technology Series 2, pp. 95-103, 1994.
- [8]. Diaz D., Bassiuni Z., Kimbrell W., and Wolcott J., "Screening criteria for application of carbon dioxide miscible displacement in water flood reservoirs containing light oil", paper SPE 35431, SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, OK, pp. 7, pp. 21 – 24 April 1996.
- [9]. Dadashpour M., Landro M., and Kleppe J., "Nonlinear inversion for estimating reservoir parameters from time-lapse seismic data", Journal of Geophysics and Engineering, pp. 554, 2008
- [10]. Kadkhodaie A., Rezaee M., and Moallemi S. A., "A fuzzy logic approach for estimation of permeability and rock type from conventional well log data: an example from the Kangan reservoir in the Iran Offshore Gas Field", Journal of Geophysics and Engineering, 3356, 2006.
- [11]. Nikravesh M., Lofti Zadeh A., and Korotkikh V., *Fuzzy partial differential equations and relational equations: reservoir characterization and modeling*, Springer, 2004.

- [12]. Yang C., Nghiem L., and Card C., and Bremer M., "Wintershall, reservoir model uncertainty quantification through computer-assisted history matching", SPE Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A., pp. 11-14 Nov. 2007.
- [13]. Tamhane D., Wong P. M., Aminzadeh F., and Nikravesh M., "Soft computing for intelligent reservoir characterization", SPE Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, Yokohama, Japan, pp. 25-26 Apr. 2000.
- [14]. Taghavi A. A., "Improved permeability estimation through use of fuzzy logic in a carbonate reservoir from southwest Iran", SPE Society of Petroleum Engineers Middle East Oil and Gas Show and Conference, Bahrain, Mar 12-15, 2005
- [15]. Deng J. L., "Control problems of grey systems. *Systems and Control Letters* 1", pp. 288-294, 1982.
- [16]. Kuo Y., Yang, T., and Huang G. W. *The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems*, Computers and Industrial Engineering 55, pp. 80-93, 2008.
- [17]. Olson D. L., and Wu D., "Simulation of fuzzy multiattribute models for grey relationships", *European Journal of Operational Research*, 175, pp. 111-120, 2006.
- [18]. Chen W. H., "Distribution system restoration using the hybrid fuzzy-grey method", *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, pp. 199-205, 2005.
- [19]. Jiang B. C., Tasi S. L., and Wang C. C., "Machine vision-based grey relational theory applied to IC marking inspection", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 15, pp. 531-539, 2002.
- [20]. Wu H. H., "A comparative study of using grey relational analysis in multiple attribute decision making problems", *Quality Engineering*, 15, pp. 209-217, 2002.
- [21]. Lin C. T., Chang C. W., and Chen C. B., "The worst ill-conditioned silicon wafer machine detected by using grey relational analysis", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31, pp. 388-395, 2006.
- [22]. Ip W. C., Hu B. Q., Wong H., and Xia J., *Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China*, *Journal of Hydrology* 379, pp. 284-290, 2009.
- [23]. Lo S. M., Hu B. Q., Liu M., Yuen K. K., "On the use of reliability interval method and grey relational model for fire safety ranking of existing buildings", *Fire Technology*, 41, pp. 255-270, 2005.
- [24]. Deng J. L., "Introduction to grey system theory", *Journal of Grey System* 1, pp. 1-24, 1989.
- [25]. Li Q. X. and Liu S. F., "The foundation of the grey matrix and the grey input-output analysis", *Applied Mathematical Modelling* 32, pp. 267-291, 2008.
- [26]. Liu S. F. and Lin Y., *Grey information theory and practical applications*, Springer-Verlag London Limited, 2006.
- [27]. Deng J. L., "Special issue of grey system approach", *Fuzzy Math.*, 5(2) 1985.
- [28]. JUN X., "A grey system approach applied to prediction of extreme hydrological events: floods and droughts, *Extreme Hydrological Events: Precipitation*", *Floods and Droughts (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993)*. IAHS Publ., No. 213, 1993.

[۲۹]. ملک، ا. م.، دباغی، ا.، آریانزاد، م. ق.؛ مبانی تئوری سیستم‌های خاکستری با مروری بر روش‌های عدم قطعیت، ترمه،

- [30]. Sadeghieh A., Dehghanbaghi M., dabbaghi A., and barak S., "A Genetic algorithm based grey goal programming (G3) approach for part supplier evaluation and selection", International journal of production research, 50, pp. 4612-4630, 2012.
- [31]. Li G. D., Yamaguchi D., and Nagai M., "A grey-based decision-making approach to the supplier selection problem", Mathematical and Computer Modeling, 46, pp. 573–581, 2007.
- [32]. Moore R. E., *Interval analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1966.
- [33]. Wu Q., Zhou W., Li S., and Wu X., "Application of grey numerical model to groundwater resource evaluation", Environmental Geology 47, pp. 991–999, 2005.
- [34]. Dang Y., Liu S., and Mi C. Multi-attribute grey incidence decision model for interval number. Kybernetes 35, pp. 1265-1272, 2006.
- [35]. Li G. D., Yamaguchi D., and Nagai M., "New Methods and Accuracy Improvement of GM According to Laplace Transform", Journal of Grey System 8, pp. 13–26, 2005.
- [36]. Tseng M. L., "A causal and effect decision making model of service quality expectation using grey-fuzzy DEMATEL approach", Expert Systems with Applications 36, pp. 7738–7748, 2009.
- [37]. Deng J. L. "Grey sSystem theory", Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002.
- [38]. Golmohammadi D., and Mellat-Parast M. "Developing a grey-based decision-making model for supplier selection", International Journal of Production Economics 137, pp. 191–200, 2012.
- [39]. Tzeng G. H., and Huang J. J., "Multiple attribute decision making methods and applications", Taylor & Francis, pp. 55-57, 2011.
- [40]. Huang J. T. and Lia, Y. S., "Optimization of machining parameters of Wire-EDM bases on grey relation and statistical analysis", International Journal of Production Research, No. 41, pp. 1707–1720, 2003.
- [41]. Chang T. C. and Lin S. J. "Grey relation analysis of carbon dioxide emissions from industrial production and energy uses in taiwan", Journal of Environmental Management, No. 56, pp. 247–257, 1999.
- [42]. Lin S. J., Lu I. J. and Lewis C., "Grey relation performance correlations among economics, energy use and carbon dioxide emission in Taiwan", Energy Policy, No. 35, pp. 1948–1955, 2007.
- [43]. Fung C. P., "Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced polybutylene terephthalate composites with grey relational analysis", Wear 254 pp. 298-306, 2003.
- [44]. Soltanieh M. slami A. M., and Moradian A., "Feasibility study of carbon dioxide capture from power plants and other major stationary sources and storage in iranian oil fields for enhanced oil recovery (EOR)", Energy Procedia 1, pp. 3663–3668, 2009.