انتخاب بهترین ناحیه پیاده‌سازی پایلوت برای روش‌های تزریق آب‌پایه با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه

حسین خیرالهی، محمد چهاردولی* و محمد سیم‌جو

دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲

چکیده

تعیین بهترین ناحیه کاندیدای پایلوت یکی از چالش‌های مهم و اساسی در ارزیابی اقتصادی پروژه‌های تزریق آب در میادین نفتی می‌باشد. نتایج و ثمرات این انتخاب مهم در گام‌ها و تصمیمات بعدی مرتبط با بررسی ریسک سرمایه‌گذاری در پروژه‌های کلان توسعه میدان نمایان‌گر خواهد بود. برای تصمیم‌گیری در این خصوص می‌توان از معیارهای زمین‌شناسی، عملیاتی و اقتصادی استفاده نمود. به همین منظور، در این مطالعه از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه به‌همراه الگوریتم‌های خوشه‌بندی همانند کا- میانگین جهت تعیین بهترین ناحیه پیاده‌سازی پایلوت استفاده شد. جهت نیل به این هدف مجموعه داده‌های تاریخچه تولید، توزیع اشباع نفت در گستره مخزن و پارامترهای توصیف‌کننده خواص مخزن برای نواحی مختلف میدان استخراج‌شده و سپس پارامتر شاخص شباهت مخزنی برای تمام نواحی در گستره میدان محاسبه شد. در ادامه، معیارهای عملیاتی از قبیل تعداد و متوسط فاصله چاه‌های تداخلی (چاه‌های موجود در ناحیه کاندید)، تعداد و متوسط فاصله چاه‌های موجود در همسایگی (چاه‌های موجود در شعاع مشخصی از ناحیه کاندید)، و فاصله نواحی کاندیدا از تجهیزات سرچاهی تعیین شد. سپس با تشکیل ماتریس تصمیم و اعمال روش‌های تصمیم‌سازی چندشاخصه از قبیل روش شانون آنتروپی، روش تاپسیس و روش سلسله مراتبی، مقدار شاخص فرصت پایلوت برای هر ناحیه از میدان محاسبه شد. در نهایت، رتبه‌بندی نهایی براساس تلفیق نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه با به‌کارگیری استراتژی میانگین رتبه‌ها انجام گرفت. مطابق نتایج حاصله برای سه ناحیه برتر پایلوت، خروجی روش آنالیز سلسله مراتبی به‌ترتیب برابر با ۱۱/۵۰، ۱۰/۴۶ و۶/۹۷٪ و برای روش آنتروپی شانون برابر با ۱۱/۶۷، ۹/۸۰ و ۶/۸۰٪ بود. رتبه‌بندی نهایی براساس تلفیق نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه با به‌کارگیری استراتژی میانگین رتبه‌ها تعیین شد. براین اساس، سه ناحیه مذکور بیشترین امتیاز فرصت پایلوت را در گستره میدان کسب نموده و به‌عنوان اولویت‌های اول کاندیدای پیاده‌سازی پایلوت روش‌های تزریق آب‌پایه برای مطالعات توسعه‌ای پیشنهاد شدند.

کلمات کلیدی: انتخاب محل پایلوت، تزریق آب، تصمیم‌گیری چند شاخصه، الگوریتم‌های خوشه‌بندی، تاپسیس

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی chahardowli@sut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2024.5315.3361)

پژوهش نفت شماره ۱۳۸، آذر و دی ۱۴۰۳، صفحه ۱۹-۳

مقدمه

یکی از عوامل مؤثر در ارزیابی میزان موفقیت و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری پروژه‌های توسعه میدان، طراحی و تعیین مناسب‌ترین مکان و ناحیه نمایندگی پایلوت می‌باشد. این تصمیم، نقش مهم و جایگاه کلیدی در تدوین نقشه راه فرآیند توسعه میادین نفتی را دارد. با اجرای پایلوت در میدان نفتی و کسب بازخورد از آن می‌توان عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر عملکرد عملیات تولید از میدان را کاهش داده و طراحی سناریوی مناسب تولید با ریسک سرمایه‌گذاری کمتر را برای کل میدان انجام داد. بنابراین نتایج حاصل از پیاده‌سازی پروژه‌های پایلوت، نقش مهم و جایگاه کلیدی در مدیریت و تصمیم‌گیری‌های توسعه میادین نفتی را ایفا می‌کند [۱ و ۲]. به‌صورت کلی انجام طراحی پایلوت معمولاً در دو حالت پایلوت غیرتولیدی و تولیدی انجام می‌گیرد. طراحی و اجرای پایلوت برای نیل به اهداف مختلف شامل، ۱) جمع‌آوری اطلاعات برای بروز رسانی مدل مخزنی، ۲) ارزیابی روش تزریق سیال در مخزن و بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی برروی بازده جاروبی، ۳) شناسایی مسائل عملیاتی و مشکلات توسعه میدان، ۴) تعیین تأثیر پارامترهای مختلف همانند فاصله چاه‌ها و بازه مشبک‌کاری بر میزان بازیافت و مدت زمان عملیات میدانی و ۵) بهبود تخمین تولید نفت به منظور کاهش ریسک عملیات فنی و ارزیابی اقتصادی انجام می‌گیرد [۳]. بنابراین برای اتخاذ چنین تصمیم مهمی می‌توان از معیارهای مختلفی از قبیل معیارهای زمین شناسی-مخزنی، عملیاتی-اقتصادی، نزدیکی به تجهیزات و تأسیسات سطح الارضی و چاه‌های موجود در میدان استفاده نمود. با مرور تاریخچه مطالعات انجام‌شده، معیارهای مختلفی برای انتخاب ناحیه کاندیدای پایلوت در نظر گرفته‌شده است. علاوه‌بر این از رویکردهای مختلفی برای تعیین بهترین ناحیه پایلوت استفاده می‌گردد. در رویکرد اول مخزن با توجه به برخی پارامترهای مهم براساس تاریخچه تولید مخزن فیلتر می‌شود. رویکرد دوم، مخزن به نواحی مختلفی تقسیم‌شده و طی آن نواحی پر تکرار به‌عنوان نماینده مخزنی انتخاب می‌گردد [۲ و ۳]. با این حال یکی از مواد مهم در طراحی پایلوت باید به گونه‌ای باشد که زمان و هزینه‌های اجرای پایلوت کمینه شده و از سویی دیگر، دست‌یابی به اهداف از پیش ترسیم‌شده برای پایلوت بیشینه شود. از طرفی دیگر، توجه به شرایط کنونی میدان هم برای انتخاب مکان مناسب پایلوت باید موردتوجه قرار گیرد که این کار را می‌توان در قالب انتخاب بهترین چاه‌ها از میان چاه‌های فعلی موجود در میدان و براساس آنالیز منحنی‌های تولید با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین تعیین نمود [۵]. یکی از نکات مهم در غربال‌گری مکان‌های موردنظر برای محل پایلوت، انتخاب درست پارامترهای مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب مکان مناسب پایلوت می‌باشد. بدین منظور، اهمیت هر یک از این پارامترها براساس وزن آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان نمونه، یکی از معیارهای عملیاتی مهم در روش‌های تزریق آب پایه، میزان نزدیکی و دسترسی مناسب به منابع تأمین آب و نیز تجهیزات سرچاهی مناسب جهت تزریق می‌باشد که طبیعتاً انتظار می‌رود که در فرآیند تصمیم‌گیری محل پایلوت نقش پررنگی داشته باشد [۶].

جدول ۱ نمونه‌ای از پارامترهای مورد استفاده در مطالعات پیشین جهت انتخاب مکان مناسب پایلوت را نشان می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش پیاده‌سازی یک روش سیستماتیک و اعمال استراتژی الویت‌بندی برای رتبه‌بندی و تعیین بهترین ناحیه کاندیدای پایلوت جهت به‌کارگیری در روش‌های تزریق آب پایه در قالب یک مطالعه موردی می‌باشد. به همین منظور در این مطالعه از تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری داده محور و روش‌های مبتنی بر دانش انسانی استفاده شده است.

جدول ۱ معیارهای انتخاب پایلوت در روش‌های تزریق آب پایه

معیار انتخاب ناحیه پایلوت	توضیحات
اشباع نفت باقی‌مانده [۶]	هرچقدر مقدار اشباع نفت بیشتر باشد، ناحیه موردنظر مطلوب‌تر می‌باشد
تراوایی در گستره مخزن [۵ و ۶]	تراوایی بالای سنگ مخزن باعث سهولت تزریق‌پذیری در روش‌های آب پایه خواهد شد
توصیف و سرشت نمایی مناسب مخزن [۵ و ۷،۹]	کاهش عدم قطعیت در توصیف پارامترهای استاتیک و دینامیکی مخزنی و نیز توصیف دقیق‌تر پارامتر «شاخص شباهت مخزنی» در انتخاب محل پایلوت
سهولت دسترسی به منابع تأمین آب [۶]	عدم محدودیت در حجم سیال تزریقی می‌تواند باعث افزایش بازده حجمی ناحیه پایلوت شود
فاصله از تجهیزات سر چاهی [۵ و ۸]	فاصله مناسب منجر به بهینه‌سازی هزینه‌های ناشی از انتقال سیال و خطوط لوله تزریق سیال خواهد شد
فاصله بین چاه تزریقی و تولیدی [۶]	فاصله کوتاه باعث پایش بهتر سیال تزریقی در فواصل بین چاهی و تأثیر آن بر تولید نفت خواهد شد
شرایط زمین‌شناسی مخزن (گسل‌ها، ناهمگنی و...) [۹ و ۱۰]	وجود کمترین تعداد گسل در ناحیه کاندیدا و بین چاه تزریق و تولید منجر به ارتقای جاروب‌زنی سیال تزریقی خواهد شد
ضخامت زیاد ستون نفتی و عدم وجود سطح تماس نفت با سایر سیالات [۶]	ضخامت زیاد باعث کنترل بهتر پدیده مخروطی شدن، تولید ناخواسته آب و گاز و کاهش هزینه‌های جداسازی سیالات و مسائل زیست محیطی می‌گردد

درنهایت از رویکرد استراتژی الویت‌بندی میانگین برای اتخاذ تصمیم نهایی و پیشنهاد مناسب‌ترین گزینه پیاده‌سازی پایلوت استفاده گردید.

معرفی مخزن موردمطالعه

مخزن مورد بررسی در میان مجموعه میادین نفتی جنوب غرب ایران قرار دارد. اختلاف بالای ویسکوزیته آب و نفت، وجود صفحات گسلی طولی برای هدایت آب به‌سمت چاه، رخداد پدیده انگشتی شدن به‌دلیل وجود کانال‌های پر تراوا از جمله چالش‌های اصلی این میدان به‌شمار می‌روند. خواص سنگ و سیال نیز در گستره مخزن دارای ناهمگونی‌های فراوانی است به‌طوری‌که نفوذپذیری در جهت عمودی و افقی به‌دلیل عارضه‌های طبیعی و هندسه مخزن متغیر بوده و از چند میلی دارسی تا چند صد میلی دارسی تغییر می‌یابد. مخزن مورد مطالعه دارای ابعادی در حدود ۱۴×۲۲ km می‌باشد. لذا با توجه به این مقادیر و نیز با توجه به ناحیه و شعاع تخلیه متوسط چاه‌ها (برابر با ابعاد km ۱×۱)؛ مخزن مورد مطالعه به تعداد ۱۴بخش در جهت y و ۲۲ بخش در جهت x تقسیم‌بندی شد. خواص سنگ و سیال مخزن، تاریخچه تولید و اشباع سیالات نیز در طی سالیان متمادی تولید استخراج شد و با استفاده از تاریخچه تغییرات اشباع در حین تولید، میزان بازیافت نفت و ماتریس کوواریانس داده‌ها محاسبه شدند.

روش تحقیق

در این بخش یک روش سیستماتیک برای تعیین مناسب‌ترین ناحیه پیاده‌سازی عملیات پایلوت ارائه می‌شود. برای این کار در ابتدا مخزن مورد مطالعه به نواحی کوچک‌تر تقسیم می‌گردد و مرحله آماده‌سازی داده‌ها و سپس میزان بازیافت متوسط و ماتریس کوواریانس هر ناحیه محاسبه‌شده و به‌عنوان ویژگی‌های ورودی الگوریتم‌های خوشه‌بندی اعمال می‌شود. درنهایت با مشخص کردن شاخص‌های مختلف شامل شاخص‌های زمین‌شناسی مخزنی و شاخص‌های عملیاتی و با به‌کارگیری الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، رتبه‌بندی نواحی مختلف در گستره مخزن انجام می‌شود.

در ادامه جزئیات مربوط به روش کار و الگوریتم‌های مورداستفاده توضیح داده‌شده است:

محاسبه میزان بازیافت نفت و ماتریس کوواریانس

تعیین ناحیه نماینده رفتار مخزن هیدروکربنی تصمیم مهمی است که نیازمند دسته‌بندی نواحی مخزنی و مشخص کردن الگوهای موجود در میان نواحی براساس معیارهای مدنظر می‌باشد. این کار براساس الگوریتم‌های خوشه‌بندی داده و به‌صورت یک فرآیند غیرنظارت شده قابل پیاده‌سازی است. برای خوشه‌بندی نواحی کاندیدای پایلوت می‌بایست در ابتدا متغیرهای ورودی شامل ویژگی‌های مخزنی مدنظر برای خوشه‌بندی تعیین شود. این معیارها براساس شباهت رفتار تولیدی دینامیکی سلول‌های داخل هر ناحیه (معیار کوواریانس برای متغیر نفت باقی‌مانده) و شباهت تولید بین نواحی با معیار بازیافت نهایی در نظر گرفته شدند. برای محاسبه این ویژگی‌ها از داده‌های اشباع فاز نفت در زمان‌های مختلف در قالب میزان تغییرات اشباع نفت در زمان اولیه و زمان‌های بعدی مورد مطالعه استفاده شد. هدف اصلی از خوشه‌بندی، تعیین مراکز خوشه‌ها به‌منظور محاسبه فاصله بقیه اعضا از مرکز خوشه غالب (دارای بیشترین عضو) می‌باشد. برای هر ناحیه یک بردار که مربوط به بازیافت نهایی هر سلول می‌باشد را می‌توان براساس رابطه ۱ محاسبه کرد که در آن RF بیانگر ضریب بازیافت نفت هر سلول است. این محاسبه برای تمام بلوک‌های شبیه‌سازی نواحی کاندیدا انجام‌شده و به‌صورت یک بردار مطابق رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$RF = \frac{N_p}{N} = \frac{S_{oi} - S_o}{S_{oi}} \quad (۱)$$

$$RF_{Area_{\#i}} = \left[RF_{cell_{\#1}} \quad RF_{cell_{\#2}} \quad . \quad . \quad . \quad RF_{cell_{\#n_i}} \right] \quad (۲)$$

در رابطه فوق‌الذکر، پارامتر S_{oi} و S_o بیانگر درصد اشباع نفت در زمان اولیه و درصد اشباع نفت باقی‌مانده[1] در زمان‌های بعدی می‌باشد. علاوه‌براین، پارامترهای N و N_p نشان‌دهنده نفت درجای اولیه و نفت تجمعی تولید می‌باشند.

همان‌طور که اشاره گردید، برای محاسبه شباهت رفتار دینامیکی بین سلول‌ها نیز از معیار کوواریانس استفاده شد. برای این کار با استفاده از متغیرهای اشباع، تخلخل و هندسه بلوک‌های تشکیل‌دهنده می‌توان به محاسبه میزان نفت باقی‌مانده در هر بلوک مخزنی براساس رابطه ۳ پرداخت. این محاسبات برای تمام بلوک‌های مخزنی و در همه بازه‌های زمانی تولیدی انجام می‌شود. در ادامه ماتریس حجم نفت باقی‌مانده برای محاسبه مقادیر کوواریانس بین جفت بلوک‌ها مطابق رابطه ۴ استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که داده‌های هر سلول مربوط به مقادیر اشباع نفت در طی سالیان تولید از سلول‌ها می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، هر سلول دارای یک تاریخچه اشباع می‌باشد که می‌تواند در محاسبه شباهت تولید جفت سلول‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این معیار با توجه به اینکه دربردارنده تأثیر چندین پارامتر می‌باشد، در ارزیابی شباهت مخزنی می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به پارامترهای منفرد داشته باشد.

$$V_{o_{ijk}} = A_{ijk} \times h_{ijk} \times \phi_{ijk} \times S_{o_{ijk}} \times \mathrm{NTG}_{\mathrm{ijk}} \quad (۳)$$

$$cov\left(V_{ocell\#M}, V_{ocell\#N}\right) = \frac{1}{N_t - 1}\sum_{t=1}^{N_t}\left(V_{oM}^{t} - \bar{V}_{oM}\right)\times\left(V_{oN}^{t} - \bar{V}_{oN}\right) \quad (۴)$$

در رابطه بالا، پارامترهای ϕ، h، A، V_o، $\bar{V}_o$ و NTG به‌ترتیب بیانگر مقدار تخلخل، ضخامت، مساحت، حجم نفت باقی‌مانده، مقدار متوسط نفت باقی‌مانده و نسبت ضخامت مفید به غیرمفید برای هر سلول شبیه‌سازی می‌باشد. پارامتر t برای اندیس زمان، پارامترهای N و M برای شماره سلول‌های شبیه‌سازی و N_t برای تعداد کل بازه‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها و آنالیز خوشه‌بندی نواحی کاندیدا

شروع به‌کار اکثر الگوریتم‌های خوشه‌بندی نیازمند مشخص کردن تعداد خوشه به‌صورت مستقیم می‌باشد.

1. Remaining Oil Saturation

بنابراین در اولین مرحله بایستی تعداد بهینه خوشه‌بندی انتخاب گردد و این پارامتر ورودی مقداری بین ۱ الی N (تعداد داده) خواهد داشت. برخی روش‌ها همانند روش سلسله مراتبی بدون نیاز به تعیین تعداد خوشه‌ها می‌توانند با مقایسه فاصله بین جفت مقادیر به دسته‌بندی داده‌ها بپردازد. بنابراین نتیجه خوشه‌بندی می‌تواند به‌عنوان معیار خوبی برای تعیین تعداد خوشه و اعتبارسنجی سایر روش‌های مورد استفاده قرار گیرد. علاوه‌براین برای انتخاب بهینه تعداد خوشه‌ها می‌توان از روش کمی سیلهوت نیز استفاده کرد. برای این کار می‌توان نمودار متوسط مقدار سیلهوت داده‌ها را به‌ازای تعداد مختلف خوشه رسم کرد. نقطه‌ای که دارای بیشینه مقدار سیلهوت باشد به‌عنوان نقطه بهینه معرفی می‌گردد. کارکرد روش معیار سیلهوت براساس کمینه کردن فاصله داخلی هر خوشه و بیشینه کردن فاصله مراکز خوشه‌ها از یکدیگر قابل تعریف می‌باشد [۱۳]. به همین منظور رابطه ۵ برای محاسبه معیار سیلهوت برای هر ناحیه تعریف می‌گردد:

$$S_i = \frac{b_i - a_i}{\max(a_i, b_i)} \quad (۵)$$

در این رابطه، پارامتر a_i بیانگر میانگین فاصله اعضای داخل خوشه شماره i از مرکز آن خوشه هست. از سوی دیگر، b_i نشان‌دهنده کمترین مقدار متوسط فاصله هر داده از اعضا سایر خوشه‌ها می‌باشد. الگوریتم خوشه‌بندی k-means را نیز می‌توان به‌عنوان یکی از روش‌های متداول خوشه‌بندی استفاده کرد. این روش از قابلیت و سرعت بالایی در خوشه‌بندی حجم زیاد داده برخوردار است. اما نکته قابل‌توجه به دام افتادن این الگوریتم در جواب بهینه محلی است که این موضوع به‌کمک چند روش شامل ۱) اجرای چندین مرتبه الگوریتم و تغییر مقداردهی و مقایسه جواب‌های حاصل و ۲) استفاده از روش c-means و k-medoids به‌عنوان روش اعتبارسنجی و جایگزین، قابل‌حل است. مراحل کار الگوریتم k-means به شرح زیر است:

۱) مقداردهی اولیه مقادیر مراکز خوشه به‌صورت تصادفی
۲) محاسبه فاصله داده‌ها از مراکز خوشه و انتصاب به نزدیک‌ترین خوشه
۳) بروز رسانی مراکز خوشه با میانگین‌گیری از اعضا داخل خوشه
۴) محاسبه مقدار تابع هدف با استفاده از مجموع فواصل داخلی خوشه‌ها
۵) مراحل ۲ تا ۴ تکرار می‌گردند تا زمانی که شرایط خاتمه الگوریتم محقق شود.

الگوریتم تصمیم‌سازی چند شاخصه

مسئله اتخاذ تصمیم نهایی درخصوص رتبه‌بندی و انتخاب ناحیه (و یا نواحی) برتر پایلوت را می‌توان بر مبنای متغیرها و شاخصه‌های مختلف و تأثیرگذار بنا کرد. بنابراین تعریف کلی و ماهیت این تصمیم‌سازی چند شاخصه را می‌توان در قالب یک ماتریس طراحی و توصیف نمود. در مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره و به‌خصوص مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه، ستون‌های ماتریس تصمیم دارای شاخص یا معیارهای مختلفی هستند که داشتن و یا دانستن اوزان نسبی شاخص‌های موجود، گام مؤثری در فرایند حل مسئله می‌باشد. طبیعتاً در فرآیند تصمیم‌گیری یکسری شاخص‌ها و گزینه‌ها دخیل هستند که اهمیت این شاخص‌ها در مسیر تصمیم‌گیری برابر نیست. لازم به ذکر است که به‌صورت کلی ممکن است اهمیت تمامی معیارها با هم برابر نباشد، در چنین مواقعی باید اهمیت این شاخص‌ها تعیین شود و دانستن ضریب اهمیت یا وزن هر یک از این شاخص‌ها در تصمیم‌گیری ضروری است. وزن هر شاخص، اهمیت نسبی آن را نسبت به شاخص‌های دیگر بیان می‌کند و انتخاب صحیح وزن‌ها تأثیر به‌سزایی در جهت رسیدن به هدف مورد نظر دارد. برای تعیین این وزن‌ها از روش‌های مختلفی استفاده می‌گردد که شامل: ۱) استفاده از دانش فرد خبره، ۲) محاسبه از دانش مبتنی بر داده، ۳) استفاده هم‌زمان از دانش

فرد کارشناس و دانش داده هست [۱۷ و ۱۳]. در ادامه جزئیات مربوط به روش‌های استفاده‌شده در این مطالعه جهت تعیین وزن شاخص‌ها در رتبه‌بندی نواحی کاندیدای پایلوت به‌صورت کامل شرح داده می‌شود.

روش آنتروپی شانون

در این روش ابتدا ماتریس تصمیم براساس رابطه ۶ به‌صورت ستونی نرمال‌سازی می‌شود. سپس برای هر معیار به‌صورت ستونی، مقدار آنتروپی هر متغیر به‌کمک رابطه ۷ محاسبه می‌گردد. در ادامه با نرمال‌سازی مقادیر آنتروپی می‌توان وزن هر معیار را مطابق رابطه ۸ محاسبه کرد. در نهایت حاصل‌ضرب مؤلفه به مؤلفه وزن‌ها و مقادیر معیارها برای هر گزینه تعیین‌کننده امتیاز هر گزینه کاندیدا خواهد بود.

$$x_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_i^n S_{ij}} \qquad j = 1,2,\ldots,p \quad (۶)$$

$$E_j = -1/\ln(N) \times \sum_{i=1}^{N} x_{ij} \times \ln(x_{ij}) \qquad j = 1,2,\ldots,p \quad (۷)$$

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{p}(1-E_j)} \qquad j = 1,2,\ldots,p \quad (۸)$$

در رابطه بالا، N و p بیانگر تعداد گزینه‌ها (سطر) و معیارها (ستون) ماتریس تصمیم و x_{ij} نشان‌دهنده مؤلفه‌های ماتریس می‌باشد. پارامتر E_j و w_j نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده میزان آنتروپی و وزن محاسبه‌شده برای هر معیار می‌باشد.

روش تاپسیس

روش تاپسیس با توجه به فاصله از مقادیر ایده‌آل پایه‌گذاری شده است. مبنای اصلی این روش، رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس شباهت یا فاصله نسبی گزینه‌ها از حل ایده‌آل می‌باشد. حل ایده‌آل متناظر با نقطه‌ای است که در عمل وجود نداشته و این نقطه با توجه به مقادیر بیشینه برای معیارهای سود و مقادیر کمینه برای معیارهای هزینه تعیین می‌گردد. مطابق شکل ۱، مطلوبیت گزینه‌ها به‌صورت کمّی و براساس مقدار فاصله اقلیدسی از نقطه ایده‌آل منفی و میزان شباهت (نزدیکی) به نقطه ایده‌آل مثبت تعیین می‌گردد [۱۵].

مراحل کار این الگوریتم به‌صورت زیر است:

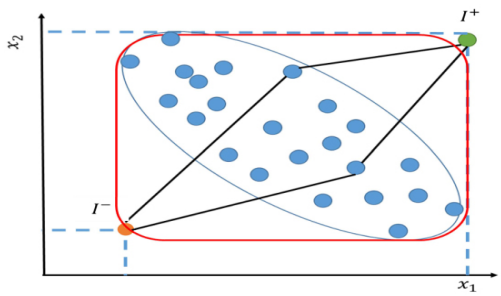
۱- معیارهای ماتریس تصمیم‌گیری و مقادیر متناظر برای هر گزینه تعیین می‌گردد و ماتریس تصمیم نرمال با استفاده از نرمال‌سازی اقلیدسی محاسبه می‌شود (رابطه ۹).

۲- به‌کمک یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه همانند آنتروپی یا روش وزن‌دهی ساده، مقادیر وزن‌های اولیه برای این روش محاسبه یا تعیین می‌گردد.

۳- با انجام عملیات ضرب مؤلفه به مؤلفه وزن‌ها در مقادیر سطرهای ماتریس نرمال‌سازی شده می‌توان ماتریس جدیدی با عنوان ماتریس نرمال وزین را محاسبه نمود (رابطه ۱۰).

۴- با محاسبه مقادیر بیشینه و کمینه هر ستون، مؤلفه‌های نقطه ایده‌آل مثبت و منفی را برای هر معیار مشخص می‌گردد (رابطه ۱۱).

۵- در ادامه می‌توان براساس روابط ۱۲ و ۱۳، مقدار فاصله اقلیدسی (دوری یا نزدیکی کلی) هر گزینه از نقطه ایده‌آل مثبت و منفی را مشخص کرد.



شکل ۱ طرحواره عملکرد روش تاپسیس در امتیازدهی به گزینه‌ها

۶- درنهایت با توجه به دوری از نقطه ایده‌آل منفی (مقدار فاصله بیشتر)، می‌توان شاخص شباهت را به‌صورت رابطه ۱۴ محاسبه کرد [۱۶].

$$x_{ij} = \frac{S_{ij}}{\left[\sum_i^n S_{ij}^2\right]^{1/2}} \quad (۹)$$

$$y=x.\times w \quad (۱۰)$$

$$y_j \quad \min(x_{ij}) \,|\max(x_{ij}) \quad y_j^+ = \max\left(x_{ij}\right)|\ \min(x_{ij}) \quad (۱۱)$$

$$I_i^- = \left[\sum_{j=1}^{p}\left(y_{ij} - y_j^-\right)^2\right]^{1/2} \qquad i = 1,2,\ldots,N \quad (۱۲)$$

$$I_i^+ = \left[\sum_{j=1}^{p}\left(y_{ij} - y_j^+\right)^2\right]^{1/2} \qquad i = 1,2,\ldots,N \quad (۱۳)$$

$$R_i = \frac{I_i^-}{I_i^+ + I_i^-} \quad (۱۴)$$

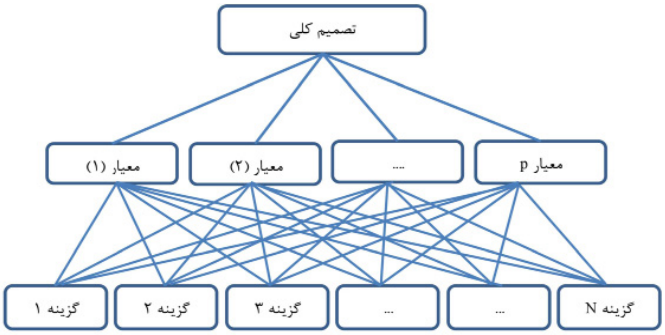
در رابطه‌های بالا، y_{ij} نشان‌دهنده مؤلفه‌های ماتریس تصمیم می‌باشد. پارامترهای y_j^+ و y_j^- بیانگر مقدار بیشینه و کمینه هر ستون (ویژگی) می‌باشد. علاوه‌براین، پارامترهای I_i^- ، I_i^+ و R_i نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده فاصله هر گزینه از مقدار ایده‌آل مثبت یا منفی و امتیاز هر گزینه می‌باشند.

روش آنالیز سلسله مراتبی[1] (AHP)

این روش دارای ساختار سلسله مراتبی بوده و براساس تجربیات و دانش کارشناسی یک فرد خبره به تعیین اهمیت معیارهای مختلف می‌پردازد (شکل ۲). برای این کار در ابتدا ماتریس مربعی مقایسه جفت معیار با استفاده از نظرات فرد خبره با مقادیر عددی ۱ الی ۹ تعیین می‌گردد. پس از تعیین اهمیت بین جفت معیارهای موجود می‌توان با تعیین مقادیر ویژه ماتریس به اهمیت نسبی و وزن بین معیارها پی برد. برای این کار مراحل الگوریتم را به‌صورت زیر می‌توان خلاصه کرد [۱۷]:

۱- ماتریس اهمیت بین جفت معیارهای موجود را می‌توان به‌صورت یک ماتریس مربعی $p*p$ تشکیل داد. برای تشکیل ماتریس وزن برای جفت معیارها، بایستی قوانین خاصی را لحاظ کرد تا در انتها ماتریس سازگاری حاصل گردد. مقادیر مؤلفه‌های ماتریس مقایسات زوجی براساس جدول ۲ می‌توانند در نظر گرفته شود.

۲- به‌کمک روش مقادیر ویژه و بردار ویژه می‌توان وزن‌های مربوط به هر معیار را از روی ماتریس وزن‌ها محاسبه کرد. برای این کار مراحل زیر را می‌توان انجام داد:



شکل ۲ ساختار سلسله مراتبی الگوریتم AHP

جدول ۲ مبنای کمی‌سازی در مقایسه جفت معیارها

میزان اهمیت کمی	۱	۳	۵	۷	۹	۶ و ۴ و ۲
میزان اهمیت کیفی	برابر	نسبتاً قوی	قوی	خیلی قوی	مطلق	اهمیت میانی

1. Analytical Hierarchy Process

۳) با برابر قرار دادن عبارت $|A-\lambda^*I|=0$ می‌توان مقادیر ویژه را محاسبه و با مقایسه آن‌ها، بردار ویژه (مقادیر وزن‌ها) را به‌ازای λ_{max} محاسبه کرد.

۴) مقدار شاخص سازگاری و شاخص سازگاری تصادفی به‌ترتیب براساس جدول ۳ یا روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود.

۵) مطابق رابطه ۱۷، نرخ پایداری (CR) به‌کمک مقادیر شاخص سازگاری (CI) و شاخص سازگاری تصادفی (RI) محاسبه می‌شود و اگر این نسبت کمتر از ۰/۱ باشد قابل‌استفاده خواهد بود.

$$CI=\frac{(\lambda_{max}-p)}{(p-1)} \quad (۱۵)$$

$$RI=\frac{1.98(p-2)}{p} \quad (۱۶)$$

$$CR=\frac{CI}{RI} \quad (۱۷)$$

بحث و نتایج

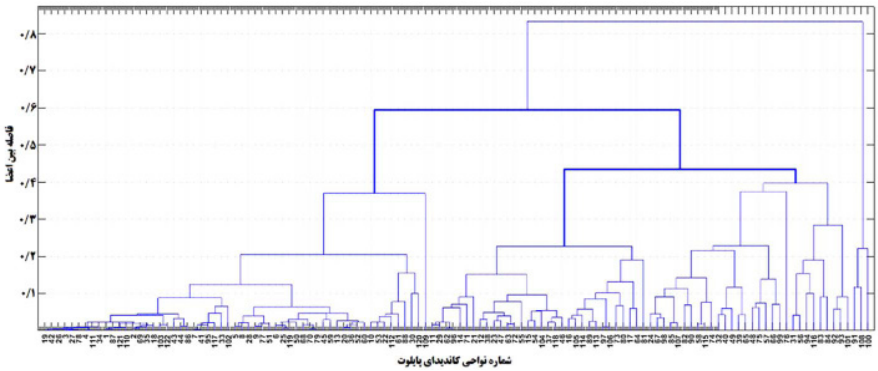
در این پژوهش به‌منظور کاهش ریسک عملیات میدانی و تعمیم نتایج حاصل از پیاده‌سازی پایلوت، از رویکرد نماینده بودن ناحیه کاندیدا در گستره مخزن برای تصمیم‌گیری محل پایلوت استفاده‌شده است. بدین ترتیب پیاده‌سازی یک روش سیستماتیک برای تعیین بهترین کاندیدای پایلوت مورد نظر قرار گرفت. مراحل مختلف این رویکرد شامل نحوه استخراج داده از مدل، آماده‌سازی داده، استخراج ویژگی از داده‌های تاریخچه تولید، استفاده از الگوریتم‌های مختلف خوشه‌بندی و درنهایت تعیین معیارهای مختلف و اعمال الگوریتم‌های تصمیم‌گیری مختلف جهت تعیین نواحی برتر کاندیدای پایلوت است. به همین منظور نواحی مخزنی با توجه به ویژگی‌های مختلف همانند میزان بازیافت، شباهت مخزنی و ناهمگنی نواحی به خوشه‌های مختلف تقسیم‌بندی شدند. در ادامه خوشه با تعداد اعضای بیشینه به‌عنوان خوشه غالب در نظر گرفته‌شده و فاصله بقیه نواحی نسبت به مختصات مرکز خوشه غالب محاسبه گردید. در ادامه از دو ویژگی، میزان بازیافت و ماتریس کوواریانس برای خوشه‌بندی نواحی مخزنی استفاده‌شده و از روی این مقادیر، پارامتر شاخص شباهت مخزنی محاسبه می‌شود.

تعداد بهینه خوشه و آنالیز خوشه

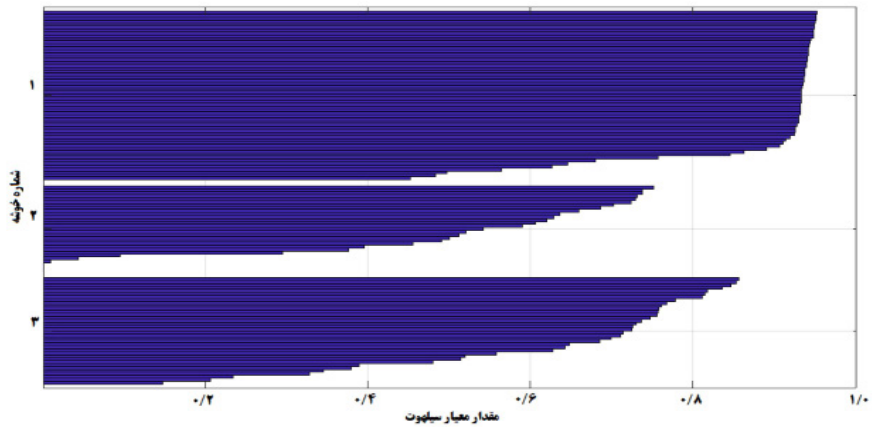
تشخیص و تعیین تعداد بهینه مراکز خوشه‌بندی نواحی پایلوت براساس معیار ضریب بازیافت و ماتریس کوواریانس را می‌توان به‌کمک روش‌های مختلف آنالیز خوشه، مورد بررسی قرار داد و صحت سنجی نتایج را با اعمال چندین روش تائید کرد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، روش سلسله مراتبی براساس مقایسه فاصله بین جفت مقادیر به ایجاد شاکله درختی از پایین به بالا (دندروگرام) و بدون نیاز به تعیین تعداد خوشه‌ها به دسته‌بندی بپردازد. با بررسی جزئیات ساختار گرافیکی درخت حاصله می‌توان به تفکیک ساختارهای خوشه‌ای پرداخت. بنابراین مطابق شکل ۳، تعداد خوشه قابل مشاهده برابر با $K=3$ می‌تواند به‌عنوان مبنای اولیه مقدار دهی برای تعیین تعداد خوشه و اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گیرد. علاوه‌بر روش گرافیکی فوق، برای انتخاب بهینه تعداد خوشه‌ها می‌توان از معیار سیلهوت نیز استفاده کرد. مطابق شکل ۴، این معیار بر مبنای شباهت داخل خوشه‌ای و میان خوشه‌ای برای تمام نقاط محاسبه می‌شود. مقدار این پارامتر به‌ازای هر نقطه از ماتریس خوشه‌بندی در بازه [۱ و ۱-] قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر و به عدد ۱+ نزدیک‌تر باشد بیانگر شباهت زیاد میان داده‌های خوشه‌بندی شده و نشان‌دهنده تعداد مناسب خوشه‌ها است.

جدول ۳ مقدار شاخص سازگاری تصادفی

تعداد معیار	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص سازگاری تصادفی	۰	۰	۰/۵۲	۰/۸۹	۱/۱۱	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۴۰	۱/۴۵

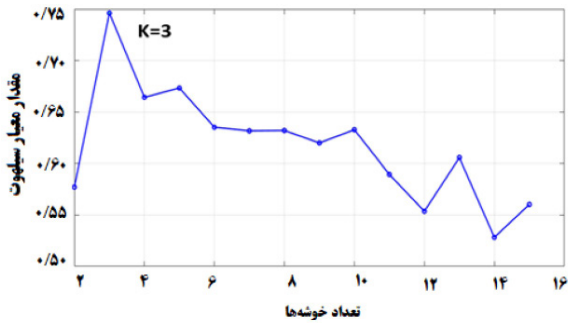


شکل ۳ نمودار درختی نواحی کاندیدای پایلوت با توجه به ویژگی ضریب بازیافت نفت و ماتریس کوواریانس

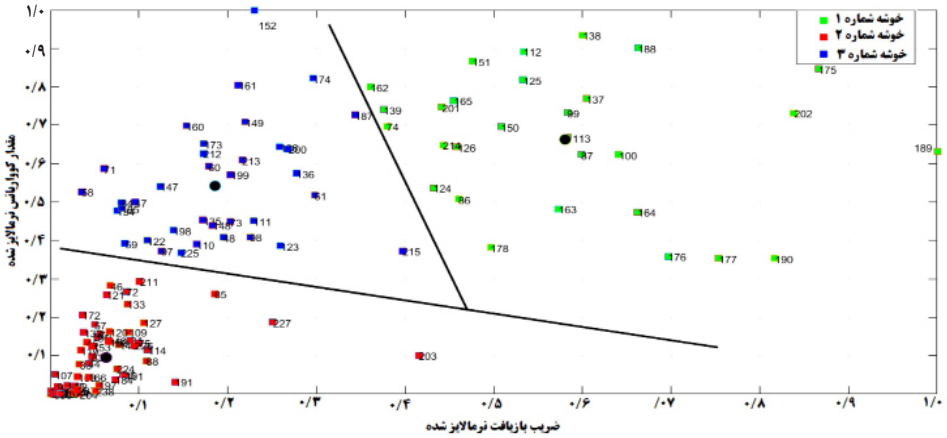


شکل ۴ معیار سیلهوت برای نواحی کاندیدا

مضاف بر این، مقادیر کم و منفی نشان‌دهنده تخصیص تعداد خوشه غیربهینه و نامناسب می‌باشد. بنابراین مقادیر معیار شباهت اعضا داخل خوشه و نتایج حاصل از روش سیلهوت نیز تائیدکننده تعداد مناسب (K=3) مراکز انتخاب‌شده برای فرآیند خوشه‌بندی است. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده‌شده است، محور عمودی نمودار بیانگر مقدار متوسط سیلهوت داده‌ها، و محور افقی بیانگر تعداد خوشه‌ها می‌باشد. تعداد خوشه متناظر با مقدار بیشینه شاخص سیلهوت کل (K=3)، به‌عنوان تعداد بهینه برای تعداد خوشه‌ها معرفی می‌گردد. پس از تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها، می‌توان به انتصاب داده‌ها به هر یک از مراکز خوشه‌ی تصادفی اولیه و سپس به‌روزرسانی مراکز خوشه پرداخت. این عملیات تا زمانی تکرار می‌گردد که هیچ‌کدام از مراکز خوشه تغییر نیابد. شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج حاصل از خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم لوید است. همان‌طور که قابل‌مشاهده است، نواحی کاندیدای پایلوت براساس مقدار ضریب بازیافت و معیار کوواریانس به سه دسته کلی به‌صورت نقاط مربعی با رنگ‌های قرمز، آبی و سبز تقسیم‌بندی شده‌اند و مختصات محل مربوط به مراکز هر خوشه (نقاط دایره مشکی رنگ) مشخص گردیده است. پس از خوشه‌بندی و تعیین مراکز، خوشه‌ی دارای بیشترین تعداد اعضا از نواحی کاندیدای پایلوت به‌عنوان خوشه غالب معرفی می‌شود. در ادامه محاسبه معیار شباهت مخزنی براساس ترکیب خطی وزن‌دار فاصله از مرکز خوشه غالب (نماینده اکثریت) برای پارامتر میزان بازیافت نفت و مقدار کوواریانس هر ناحیه خواهد بود. این معیار به‌عنوان یک پارامتر مهم برای کمی‌سازی میزان پتانسیل و برخورداری از امتیاز نماینده بودن هر ناحیه کاندیدا پایلوت برمبنای فاصله از مرکز خوشه غالب می‌باشد.



شکل ۵ تعیین تعداد خوشه بهینه با توجه به معیار سیلهوت



شکل ۶ خوشه‌بندی نواحی مخزنی با توجه پارامتر بازیافت و ماتریس کوواریانس

جدول ۴ نشان‌دهنده نتایج حاصل از الگوریتم k-means ، k-medoids و c-means برای تعیین مختصات مراکز خوشه‌ها است. با توجه به این‌که تعداد خوشه بهینه در این پژوهش برابر با سه در نظر گرفته‌شده بود، مختصات مراکز خوشه حاصل از روش‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که اشاره گردید روش k-means از سرعت بالایی برخوردار است و در مواجهه با داده با حجم زیاد از انعطاف بالایی نسبت به k-medoids و c-means دارد. این روش مراکز خوشه را براساس مقدار متوسط اعضا خوشه تعیین می‌کند اما مقدار مراکز در روش k-medoids از میان داده‌های داخل خوشه تعیین می‌گردد. به همین دلیل مراکز حاصل از روش‌های فوق اختلاف ناچیز دارند. همچنین احتمال همگرایی به جواب بهینه محلی در این الگوریتم زیاد است و معمولاً از روش c-mean به‌عنوان روش جایگزین برای کاهش احتمال این رخداد استفاده می‌گردد. در ادامه نتایج مراکز خوشه غالب مربوط به‌روش c-mean در محاسبات شاخص شباهت مخزنی مورد استفاده قرارگرفته است.

محاسبه شاخص شباهت مخزنی

همان‌طور که در مباحث قبل مورد اشاره قرار گرفت، پس از خوشه‌بندی و تعیین مراکز، خوشه‌ای که دارای تعداد زیادی از نواحی کاندیدای پایلوت باشد، به‌عنوان خوشه غالب در نظر گرفته می‌شود. محاسبه مقادیر معیار شباهت مخزنی هر ناحیه پایلوت بر مبنای فاصله از مرکز خوشه غالب (نماینده اکثریت) خواهد بود. برای محاسبه شاخص شباهت مخزنی از ترکیب وزن‌دار دو ویژگی میزان بازیافت نفت و ماتریس کوواریانس استفاده گردید (رابطه ۱۸). برای این کار نیاز به تعیین وزن‌های هر ویژگی هست که برای این نوع شرایط، تکنیک آنتروپی شانون می‌تواند برای اهداف وزن‌دهی به‌کار گرفته شود.

جدول ۴ مراکز خوشه‌های حاصل از روش‌های خوشه‌بندی مختلف

الگوریتم خوشه‌بندی	متغیرهای هر خوشه	مرکز خوشه (۱)	مرکز خوشه (۲)	مرکز خوشه (۳)
k-means	RF-center	۰/۰۶۲۹	۰/۵۸۰۴	۰/۱۸۵۶
	COV-center	۰/۰۹۵۳	۰/۶۶۲۹	۰/۵۴۲۱
k-medoids	RF-center	۰/۰۴۷۰	۰/۵۸۳۴	۰/۲۰۳۰
	COV-center	۰/۰۹۸۰	۰/۶۶۷۴	۰/۵۷۱۳
c-means	RF-center	۰/۰۵۶۱	۰/۵۵۱۷	۰/۱۸۹۲
	COV-center	۰/۰۸۴۶	۰/۷۰۵۱	۰/۵۰۴۲

$$RSI = \frac{w_1}{d(RF - RF_{center})} + \frac{w_2}{d(COV - COV_{center})} \quad (۱۸)$$

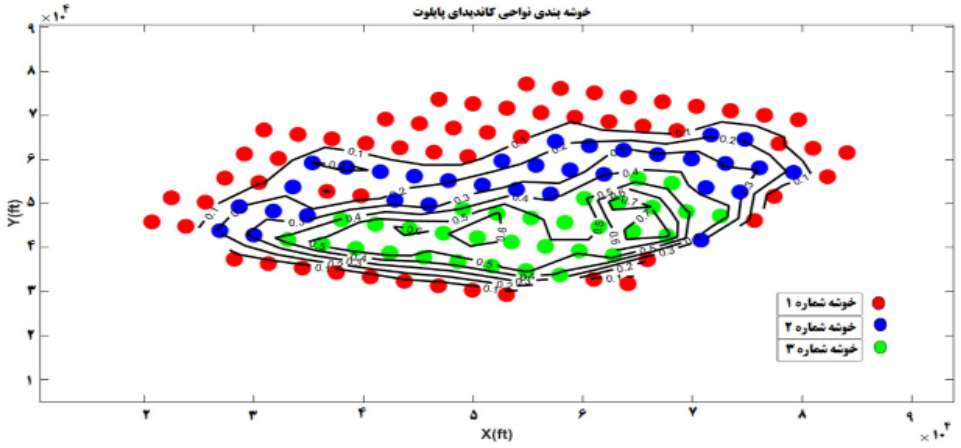
در این رابطه، w_1 و w_2 بیانگر وزن‌های میزان بازیافت (RF) و مقدار کوواریانس (COV) می‌باشد که با اعمال روش آنتروپی شانون برروی داده مربوط به این دو پارامتر، مقادیر محاسبه‌شده وزن این ویژگی‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۰/۴۷ می‌باشد. شکل ۷ نشان‌دهنده منحنی خطوط تراز مقادیر شاخص شباهت مخزنی حاصل از ترکیب خطی پارامتر بازیافت نفت و مقدار کوواریانس هر ناحیه می‌باشد. علاوه‌براین نتایج خوشه‌بندی نواحی کاندیدا بارنگ‌های قرمز، سبز و آبی قابل‌مشاهده است. اما تصمیم‌گیری درخصوص انتخاب بهترین ناحیه کاندیدای پایلوت، یک موضوع چندجانبه با ابعاد زمین‌شناسی، عملیاتی و اقتصادی است. به همین دلیل برای این موضوع معیارهای مختلفی در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه پس از محاسبه شاخص شباهت مخزنی به‌عنوان شاخص زمین شناسی-مخزنی می‌توان از معیار مختلف شامل تعداد و متوسط فاصله چاه‌های تداخلی، فاصله از چاه‌های موجود در همسایگی و فاصله از تجهیزات سر چاهی استفاده کرد.

تعیین معیارهای تصمیم‌گیری برای انتخاب محل پایلوت

برای ایجاد ماتریس تصمیم در راستای انتخاب محل پایلوت، بایستی معیارهای مدنظر در انتخاب محل در ستون‌های ماتریس تصمیم‌گیری ذکرشده و مقادیر معیارها برای گزینه‌های(سطرهای ماتریس) موردنظر یا کاندیداهای تصمیم‌گیری اختصاص داده شوند. جدول ۵ نشان‌دهنده ترانهاده ماتریس تصمیم است که در آن جای سطر و ستون جابه‌جا شده است. ستون‌های جدول برای گزینه‌های کاندیدای پایلوت در نظر گرفته‌شده و سطرهای جدول بیانگر معیارهای مورد نظر در انتخاب محل پایلوت شامل معیار شباهت مخزنی، تعداد چاه‌های تداخلی و مجاور، فاصله متوسط بین ناحیه کاندیدا و چاه‌های تداخلی و مجاور و میزان نزدیکی به تجهیزات سرچاهی است. لازم به ذکر است که در ادامه هر یک از معیارها با نماد C_i مورد اشاره قرار می‌گیرند. اهمیت وزنی متناظر با معیارها برای تعیین نواحی برتر کاندیدای پایلوت در روش تصمیم‌گیری شانون آنتروپی تعیین‌شده است. همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد براساس شرایط این مطالعه، پارامتر فاصله از تجهیزات سطح الارضی و فاصله از چاه‌های فعلی موجود در شرایط مخزن مورد مطالعه دارای بیشترین اهمیت نسبی به‌ترتیب با مقادیر ۳۰/۸۵ و۲۲/۹۳٪ می‌باشند.

تصمیم‌گیری چند شاخصه

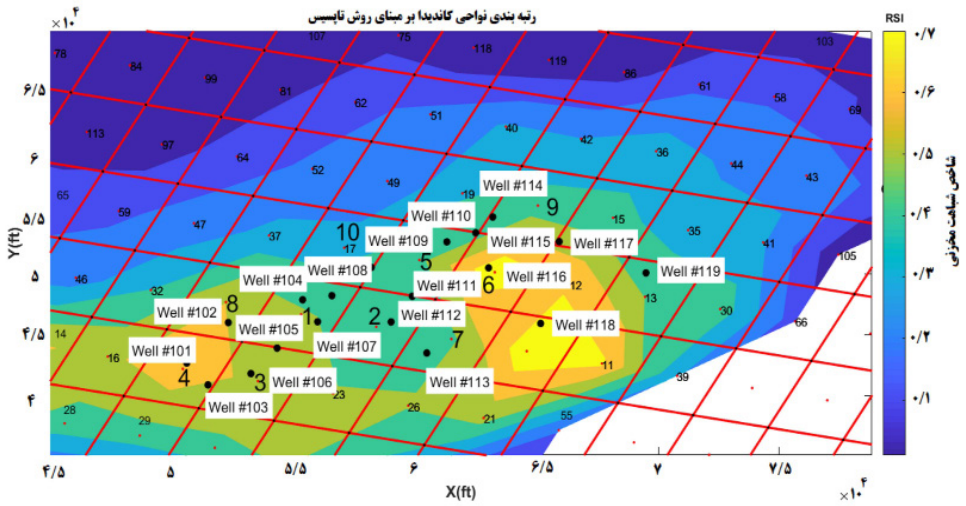
برای تعیین بهترین ناحیه کاندیدای پایلوت از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه آنتروپی و تاپسیس و روش سلسله مراتبی استفاده گردید. شکل ۸ نشان‌دهنده بخش‌های مربعی شماره‌گذاری شده حاصل از تقسیم‌بندی میدان به نواحی کوچک‌تر کاندیدای پیاده‌سازی پایلوت است.



شکل ۷ نقشه توزیع خوشه‌ها و میزان شباهت مخزنی.

جدول ۵ ماتریس تصمیم‌گیری چند شاخصه و مقادیر معیارها و اهمیت (وزن) آن‌ها

	معیار تصمیم‌گیری	وزن معیار(٪)	شماره ناحیه کاندیدای پایلوت			
			۱۳۸	۱۵۰	۱۵۱	۱۶۳
۱	شاخص شباهت مخزنی	۴/۶۰	۰/۶۷	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۴۶
۲	تعداد چاه‌های مناسب برای استفاده به‌عنوان پایلوت	۱۰/۶۳	۱	۲	۱	۱
۳	متوسط فاصله چاه‌های مناسب برای استفاده با ناحیه کاندیدای پایلوت (m)	۲۲/۹۳	۱۵۴	۳۲۲	۲۰۹	۲۲۱
۴	تعداد چاه‌های تداخلی: چاه‌های موجود در فاصله کمتر از دو برابر شعاع تخلیه ناحیه کاندیدای پایلوت	۱۶/۷۰	۳	۵	۳	۵
۵	متوسط فاصله چاه‌های تداخلی با ناحیه کاندیدای پایلوت (m)	۱/۹۸	۵۰۹	۶۱۷	۵۶۹	۷۴۶
۶	تعداد چاه‌های مجاور: چاه‌های موجود در فاصله کمتر از شعاع تخلیه ناحیه کاندیدای پایلوت	۹/۶۱	۵	۱۱	۶	۱۰
۷	متوسط فاصله چاه‌های مجاور با ناحیه کاندیدای پایلوت (m)	۲/۷۰	۸۲۳	۱۱۳۹	۹۸۲	۱۱۵۵
۸	فاصله ناحیه کاندیدای پایلوت تا تجهیزات سطح الارضی (m)	۳۰/۸۵	۲۹۶۵	۱۰۲۶	۲۴۶۵	۵۶۶

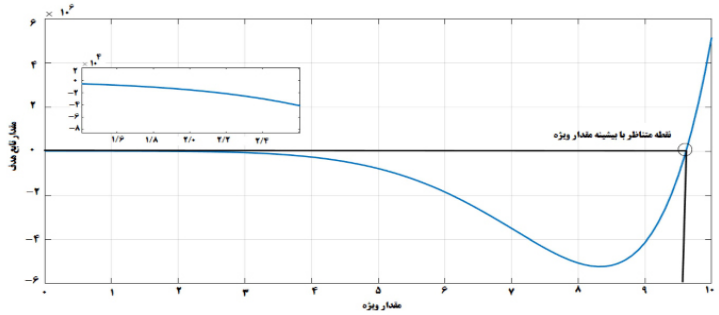


شکل ۸ موقعیت مکانی نواحی برتر کاندیدای پایلوت (با روش TOPSIS) و چاه‌های فعلی میدان

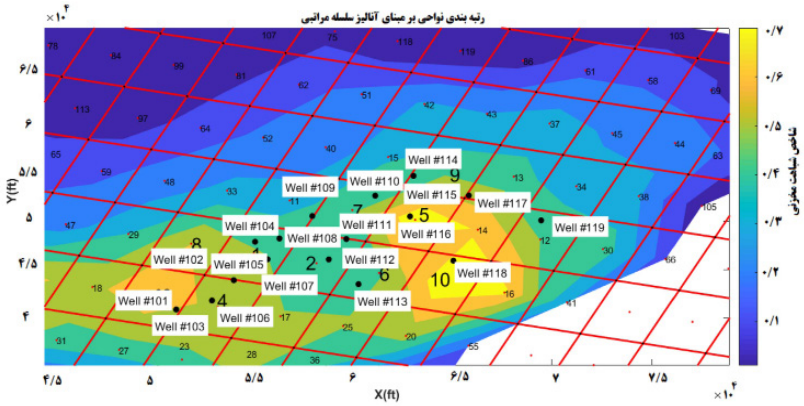
علاوه‌براین نقشه خطوط تراز متناظر با پارامتر شباهت مخزنی (RSI) و همچنین نتایج رتبه‌بندی نواحی کاندیدای پایلوت با استفاده از روش تاپسیس نشان داده‌شده است. در ادامه، نواحی کاندیدا بر مبنای شاخص فرصت پایلوت محاسبه‌شده رتبه‌بندی گردید و در نهایت نواحی برتر (ده ناحیه اول) مشخص شد. براساس نتایج حاصله، علی‌رغم شباهت مخزنی بیشتر مربوط به ناحیه کاندیدای ۶ نسبت به ناحیه ۱، وجود چاه‌های حفرشده قبلی و فاصله کم از تأسیسات سطحی نتایج نهایی رتبه‌بندی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. روش آنالیز سلسله مراتبی براساس دانش زمینه‌ای به تعیین اهمیت معیارهای مختلف می‌پردازد. برای این کار در ابتدا ماتریس مربعی مقایسه جفت معیارها و میزان ارجحیت معیار سطر i نسبت به معیار ستون j بیان گردید که میزان اهمیت هر معیار با مقادیر عددی ۱ الی ۹ تعیین می‌گردد. به‌عنوان نمونه، همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده‌شده است، میزان اهمیت و ارجحیت نسبی مربوط به معیار فراوانی چاه‌های قابل‌استفاده (C_2) نسبت به معیار شاخص شباهت مخزنی (C_1) برابر ۷ می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر ارجحیت روی قطر اصلی برابر یک و مقادیر بالای قطر اصلی معکوس مقدار ارجحیت متناظر با نسبت‌های پایین قطر اصلی می‌باشند. در این مطالعه، ماتریس مقایسات زوجی بین معیارها مطابق جدول ۶ براساس ملاحظات میدانی تنظیم گردید. در ادامه با تعیین مقادیر ویژه ماتریس می‌توان به محاسبه اهمیت و وزن هر یک از معیارها (مقادیر ویژه) پرداخت. برای این کار می‌توان در رابطه $|A-I\lambda_{max}|=0$ با تعیین مقدار پارامتر λ_{max} پرداخت. شکل ۹ نشان‌دهنده مقدار پارامتر تغییرات مقدار دترمینان در مقابل تغییر λ می‌باشد و مقدار این پارامتر(λ=۹/۶۲) در نقطه متناظر با دترمینان برابر صفر نشان داده‌شده است. پس از تعیین مقدار پارامتر λ می‌توان به محاسبه مقدار نسبت شاخص سازگاری به‌کمک رابطه ۱۵ اشاره‌شده در بخش روش تحقیق پرداخت. درصورتی‌که مقدار نسبت شاخص سازگاری از ۰/۱ کمتر باشد، وزن‌های معیارها با حل هم‌زمان دستگاه روابط با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی محاسبه می‌گردد. در ادامه، امتیاز هر ناحیه محاسبه‌شده رتبه‌بندی نهایی براساس این مقدار انجام شد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده بخشی از تقسیم‌بندی مربوط به محل نواحی کاندیدای پایلوت در نظر گرفته‌شده برای مخزن مورد مطالعه به‌همراه آرایش محل چاه‌های موجود در میدان می‌باشد. نحوه چیدمان حاصل از روش آنالیز سلسله مراتبی برای ده ناحیه برتر به‌صورت شماره‌گذاری مجزا مشخص‌شده‌اند. همان‌طور که در شکل قابل‌ملاحظه است، نقشه خطوط تراز پارامتر شباهت مخزنی محاسبه‌شده به‌صورت طیف رنگی نمایش داده‌شده است.

جدول ۶ ماتریس مقایسات زوجی بین معیارهای تصمیم‌گیری پایلوت

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_1	۱	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۸
C_2	۷	۱	۱/۳	۵	۶	۷	۷	۱/۲
C_3	۵	۳	۱	۲	۳	۵	۵	۱/۵
C_4	۵	۱/۵	۱/۲	۱	۱/۳	۳	۴	۱/۸
C_5	۵	۱/۶	۱/۳	۳	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۷
C_6	۳	۱/۷	۱/۵	۱/۳	۲	۱	۳	۱/۸
C_7	۳	۱/۷	۱/۵	۱/۴	۳	۱/۳	۱	۱/۹
C_8	۸	۲	۵	۸	۷	۸	۹	۱



شکل ۹ تعیین مقادیر ویژه براساس مقدار ریشه تابع هدف



شکل ۱۰ موقعیت مکانی نواحی برتر کاندیدای پایلوت (با روش AHP) و چاه‌های فعلی میدان.

نتایج بیانگر نزدیکی ناحیه کاندیدای پایلوت به تأسیسات سطح الارضی، چاه‌های فعلی قابل استفاده در میدان به‌همراه قرار گرفتن در خطوط تراز دارای شباهت مخزنی زیاد می‌باشد. مطابق موارد ارائه‌شده در بخش‌های قبلی، در این مطالعه از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه شامل روش آنتروپی شانون، شباهت به گزینه ایده‌آل و آنالیز سلسله مراتبی برای رتبه‌بندی نواحی کاندیدای تصمیم‌گیری و تعیین محل پیاده‌سازی پایلوت پایه آبی در میدان مورد مطالعه استفاده شد. برای رتبه‌بندی کلی و تعیین نواحی برتر براساس رأی‌گیری جمعی می‌توان از روش میانگین‌گیری مجموع روش‌های مختلف تصمیم‌گیری در انتخاب نواحی منتخب پایلوت استفاده کرد. مطابق جدول ۷، نتایج رتبه‌بندی برای ده ناحیه برتر براساس روش‌های مختلف آورده شده است. برای مثال، ناحیه شماره ۱۵۰ به‌عنوان رتبه اول در رتبه‌بندی هر سه روش انتخاب‌شده است. علاوه‌براین ناحیه شماره ۱۷۶ در رتبه‌بندی روش آنتروپی شانون، تاپسیس و آنالیز سلسله مراتبی به‌ترتیب رتبه ۲، ۷ و ۶ را کسب کرده است. بنابراین میانگین رتبه این ناحیه برابر با ۵ محاسبه می‌گردد و مجدد در رتبه‌بندی نهایی شرکت داده می‌شود.

مطابق موارد فوق‌الذکر، انتخاب ناحیه پیاده‌سازی پایلوت از تصمیمات مهم و حیاتی در ترسیم نقشه راه توسعه میدان می‌باشد. به همین دلیل در این مطالعه یک ابزار کاربردی و کارآمد مبتنی بر داده و با استفاده از روش‌های آماری و هوش مصنوعی توسعه داده شد که با پیاده‌سازی این روش سیستماتیک می‌توان با اطمینان و قطعیت بیشتری درخصوص انتخاب ناحیه پایلوت تزریق آب تصمیم گرفت. ماحصل این رویکرد داده- معیارمحور و نواحی برتر پیشنهادشده می‌تواند با انجام مطالعات آنالیز عدم قطعیت براساس شبیه‌سازی و الزامات اقتصادی به انتخاب محل نهایی پایلوت منجر شود.

جدول ۷ تصمیم‌گیری نهایی درخصوص ناحیه پیاده‌سازی پایلوت با استفاده از استراتژی اولویت‌بندی میانگین

		رتبه ناحیه براساس رتبه‌بندی به‌روش				
	ناحیه کاندیدای پایلوت	آنتروپی شانون	شباهت به گزینه ایده‌آل	آنالیز سلسله مراتبی	میانگین رتبه	رتبه‌بندی مجدد
۱	۱۵۰	۱	۱	۱	۱/۰	۱
۲	۱۷۶	۲	۷	۶	۵/۰	۵
۳	۱۶۳	۳	۲	۲	۲/۳	۲
۴	۱۵۱	۴	۳	۴	۳/۷	۳
۵	۱۳۸	۵	۴	۳	۴/۰	۴
۶	۱۷۵	۶	۶	۵	۵/۷	۶
۷	۱۶۲	۷	۵	۷	۶/۳	۷
۸	۱۳۷	۸	۸	۸	۸/۰	۸
۹	۱۷۴	۹	۹	۹	۹/۰	۹
۱۰	۱۴۹	۱۰	۱۰	۱۱	۱۰/۳	۱۰

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های مربوط به هندسه مخزن، خواص سنگ و سیالات مخزنی، تاریخچه تولید چاه‌های مختلف در گستره مخزن شامل پارامترهای دبی تولید آب، نفت و گاز و داده‌های مربوط به مشبک‌کاری و مکان چاه‌ها به خوشه‌بندی و انتخاب نواحی منتخب کاندیدای پایلوت برای روش‌های تزریق آب‌پایه پرداخته شد. ماحصل نهایی این رویکرد سیستماتیک، تعیین پارامتر فرصت پایلوت برای اتخاذ تصمیم (انتخاب بهترین ناحیه پیاده‌سازی پایلوت) براساس روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر دانش زمینه‌ای و مبتنی بر داده، اعم از روش شانون آنتروپی، تاپسیس و روش سلسله مراتبی است. نتایج حاصله از این مطالعه به شرح زیر قابل ارائه است:

۱) در این مطالعه جهت تعیین نواحی منتخب پیاده‌سازی پایلوت برای روش‌های تزریق آب پایه از داده‌های مربوط به یکی از میادین نفتی استفاده شد. براساس داده‌های موجود به‌منظور تعیین ناحیه کاندیدای پایلوت، نواحی انتخابی از نقطه نظر حائز شرایط نماینده بودن مخزن در قالب پارامتر شباهت مخزنی بررسی شدند..

۲) پارامتر شاخص شباهت مخزنی براساس یک ترکیب وزن‌دار خطی از متغیرهای میزان بازیافت نفت و مقدار کوواریانس در گستره مخزن مورد مطالعه محاسبه شد. برای این کار از روش آنتروپی شانون استفاده شد که مقادیر وزن متغیرهای میزان بازیافت نفت و مقدار کوواریانس به‌ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۵۳ حاصل شد.

۳) در راستای انتخاب محل پایلوت از شاخص‌های تعداد چاه‌های تداخلی و متوسط فاصله ناحیه کاندیدا از این چاه‌ها، تعداد چاه‌های موجود در همسایگی و متوسط فاصله از این چاه‌ها و نیز فاصله از تجهیزات سر چاهی به‌عنوان معیارهای فنی و عملیاتی در رتبه‌بندی نواحی پایلوت استفاده شد.

۴) جهت دسته‌بندی نواحی مخزنی از الگوریتم‌های ارزیابی و تعیین تعداد مناسب مراکز خوشه‌بندی از قبیل روش‌های سلسله مراتبی و سیلهوت استفاده شد. مطابق نتایج حاصله تعداد خوشه‌های بهینه حاصله برابر با سه بود که این نتیجه براساس مقدار تابع هدف فاصله و مقدار متوسط سیلهوت بین داده‌ها حاصل شد.

۵) نواحی کاندیدای برتر پایلوت تزریق برای روش‌های آب‌پایه در میدان مورد مطالعه با استفاده.

از استراتژی اولویت‌بندی و تلفیق نتایج رتبه‌بندی روش‌های مختلف همانند روش آنتروپی شانون، تاپسیس و سلسله مراتبی در گستره مخزن مشخص شدند. نتایج حاصله از این رویکرد داده- معیارمحور و نواحی برتر پیشنهاد شده می‌تواند با انجام مطالعات آنالیز عدم قطعیت براساس شبیه‌سازی و الزامات اقتصادی به انتخاب محل نهایی پایلوت منجر شوند.

۶) روش ارائه شده در این مطالعه یک رویکرد سیستماتیک و مبتنی بر داده را برای تصمیم‌گیری چند شاخصه در انتخاب بهترین ناحیه یا نواحی عملیاتی از میان گزینه‌های پیاده‌سازی پایلوت تزریق آب پایه ارائه نموده است. این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید و کارا در کاهش ریسک تصمیم‌گیری‌های میدانی برای روش‌های ازدیاد برداشت آب‌پایه مورد استفاده قرار گیرد

مراجع

[۱]. پروازدوانی، م.، مطهری س. م. و گلقندشتی ح. (۱۳۹۶). طراحی پایلوت ازدیاد برداشت- چالش‌ها و راه‌کارها. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز. (۱۴۷): ۲۹-۲۱.

[2]. Motahhari, S. M., Rafizadeh, M., Pishvaie, S. M. R., & Ahmadi, M. (2021). An integrated Shannon Entropy and reference ideal method for the selection of enhanced oil recovery pilot areas based on an unsupervised machine learning algorithm. Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 76, 82, doi: 10.2516/ogst/2021061.

[3]. Teletzke, G. F., Wattenbarger, R. C., & Wilkinson, J. R. (2010). Enhanced oil recovery pilot testing best practices. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 13(01), 143-154, doi: 10.2118/118055-ms.

[۴]. مطهری، س. م.، رفیع‌زاده، م.، پیشوائی، س. م. و احمدی, م. (۲۰۲۱). انتخاب مکان پیاده‌سازی پایلوت ازدیاد برداشت در توسعه میادین هیدروکربنی بالغ با استفاده از تلفیق روش‌های تاپسیس و خوشه‌بندی هیبریدی. پژوهش نفت, 31(1400–3), 3–16. doi:10.22078/pr.2020.4303.2951

[5]. Kheirollahi, H., Chahardowli, M., & Simjoo, M. (2022). A new method of well clustering and association rule mining. Journal of Petroleum Science and Engineering, 214, 110479, doi: 10.1016/j.petrol.2022.110479.

[6]. Delamaide, E., Soe Let, K. M., Bhoendie, K., Jong-A-Pin, S., & Paidin, W. R. (2016, June). Results of a polymer flooding pilot in the Tambaredjo heavy oil field, Suriname. In SPE Canada Heavy Oil Conference (p. D011S001R005). SPE, doi: 10.2118/180739-ms.

[7]. Ning, S., Barnes, J., Edwards, R., Schulpen, W., Dandekar, A., Zhang, Y., Cercone, D. & Ciferno, J. (2020). First ever polymer flood field pilot to enhance the recovery of heavy oils on Alaska North Slope–producer responses and operational lessons learned. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (p. D031S029R004). SPE, doi: 10.2118/201279-ms.

[8]. Irvine, R., Davidson, J., Edwards, S., Kingsbury, J., Hui-June, P., & Tardiff, C. (2012, April). Case study of polymer flood pilot in a low permeability Mannville sand of the Western Canadian sedimentary basin using produced water for blending. In SPE Improved Oil Recovery Conference? (pp. SPE-154050). SPE., doi: 10.2118/154050-ms.

[9]. Sheshbolouky, M., Kheirollahi, H., & Khodapanah, E. (2024). Using multi-objective optimization genetics algorithm for Co-estimation of saturation functions by piecewise model. Journal of Petroleum Research, 34(1403-2), 72-90, doi: 10.22078/pr.2024.5266.3337.

[10]. Gao, C. H. (2011). Scientific research and field applications of polymer flooding in heavy oil recovery. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 1, 65-70, doi: 10.1007/s13202-011-0014-6.

[11]. Al-Dhuwaihi, A. S., Abdullah, M. B., Tiwari, S., Al-Murayri, M. T., Al-Mayyan, H., Shahin, G. T., & Shukla, S. (2017, October). Fit-for-purpose chemical EOR ASP modeling strategy to guide pilot development decisions for a giant reservoir in North Kuwait. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (p. D021S009R003). SPE., doi: 10.2118/186351-ms.

[12]. Koning, E. J. L., Mentzer, E., & Heemskerk, J. (1988, October). Evaluation of a pilot polymer flood in the Marmul field, Oman. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-18092). SPE., doi: 10.2118/18092-ms.

[13]. Subbalakshmi, C., Krishna, G. R., Rao, S. K. M., & Rao, P. V. (2015). A method to find optimum number of clusters based on fuzzy silhouette on dynamic data set. Procedia Computer Science, 46, 346-353, doi: 10.1016/j.

procs.2015.02.030.
[14]. Wicaksana A. & Rachman T. (2010). MAKING GOOD DECISIONS, 3, 1.
[15]. Rajabi, M., Kord, S., Hashemi, A. N., & Salehi, R. (2020). Screening of Sand Control Methods for One Well in South Western of Iran Using TOPSIS Algorithm. Journal of Petroleum Research, 30(99-4), 105-117, doi: 10.22078/pr.2020.4174.2891.
[16]. Khojastehmehr, M., Madani, M., & Daryasafar, A. (2019). Screening of enhanced oil recovery techniques for Iranian oil reservoirs using TOPSIS algorithm. Energy Reports, 5, 529-544.doi.org/10.1016/j.egyr.2019.04.011.
[۱۷]. نعمتیان ج.، باحجب م. و طباطبایی س. (۱۴۰۰). مقدمه‌ای بر نظریه تصمیم‌گیری. تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز.

Petroleum Research
Petroleum Research, 2024(December-January), Vol. 34, No. 138, 1-3
DOI: 10.22078/pr.2024.5315.3361

Selecting the Best Pilot Area for Water-based EOR Using Artificial Intelligence and Multi Criteria Decision Making Algorithms

Hossein Kheirollahi, Mohammad Chahardowli *, and Mohammad Simjoo
Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
chahardowli@sut.ac.ir
DOI: 10.22078/pr.2024.5315.3361

Received: November/18/2024 Accepted: July/23/2024

Introduction

Pilot designing decisions have a key role in the development road map of the hydrocarbon fields. Pilot implementation in the oil field reduces the uncertainty of the Field Development Plan (FDP) and production scenarios can be designed with less risk for the full field [1].

In the literature efforts, several criteria were reported to select the best pilot area, including proximity to water sources, wellhead facility, high remaining oil saturation, high net pay thickness, injectivity and distance between injection and production wells [2–5]. However, there is not a clear systematic procedure to address this problem.

The main objective of the current study is to present a road map for selecting the best pilot area using multi-criteria decision making algorithms. To do so, reservoir representativeness index is employed as geological criterion and number of existing applicable wells, interfered wells and adjacent wells distance between these wells and pilot area is considered. Finally, MCDM methods (e.g. TOPSIS, AHP) are utilized to rank the alternatives and introduce the best one.

Data Preparing

The case study includes a field located in the southwest of Iran. At first, this field was divided into small regions, i.e., pilot candidate area. Afterward, in this research, new variable has been described as the reservoir similarity index (RSI). In other words, it is a linear combination of the distance from the dominant cluster center for RF and COV variables. Moreover, several features are considered (e.g. number of existing applicable wells, interfered and adjacent wells) as pilot area selection criteria.

Material and Methodology

Clustering Analysis

Dividing sample data into some subsets without using any labels is called unsupervised clustering. In fact, each group is created using similarity/dissimilarity, i.e., distance measures for grouping the objects (samples) in clusters. Several methods can be applied for clustering the objects including k-means, k-medoids, c-means, etc. However, most of these techniques need to provide and determine the optimum number of clusters [6]. In the following sections, several clustering techniques will be presented and their advantage and limitations will be discussed.

Determining the optimal number of clusters

The hierarchical method can classify data by comparing the distance between pair values without determining the number of clusters. Therefore, the clustering result can be applied to determine the number of clusters and initializing the used clustering algorithms. In addition, silhouette method can also be used to choose the optimal number of clusters [7].

Multi-Criteria Decision Making

Decision-making processes involve a series of steps: identifying the problems, constructing the preferences, evaluating the alternatives, and determining the best alternatives. Several algorithms were developed to calculate the score of each alternative. The columns of the decision matrix have various attribute, i.e., criteria

that are necessary to determine their importance and weight in decision making problems. Different methods are used to determine these weights, which include: 1) using the knowledge of a domain expert, 2) calculating from the knowledge of data and relying on the data, 3) using the knowledge of an expert and the knowledge of data at the same time. In the following, the details of the methods will be fully explained [8].

Results and Discussion

In this research, in order to reduce the risk of field operations, the representative approach of the candidate area was used for decision making. The reservoir areas were assigned into different clusters according to different features such as ultimate Recovery Factor (RF), similarity in dynamic behavior, i.e., Covariance matrix (COV) of the areas. Then, the cluster with the maximum number of objects was considered as the dominant cluster. Afterwards, distance of the rest of the regions was calculated relative to the coordinates of the center of the dominant cluster. Hence, this criterion can be used as a pilot geological criterion. In the following, both features (RF and COV) will be used to cluster the reservoir areas, and we will calculate the RSI as a function of these variables.

Multi-criteria decision making techniques can be used to select the best pilot candidate area. These methods are divided into two categories: 1) data-driven, e.g., Shannon entropy and TOPSIS and 2) based on domain expert knowledge, e.g., analytical hierarchy process. Fig. 1 shows the ranking results of pilot candidate areas based on TOPSIS method.

In this study, various MCDM methods, including Shannon entropy method, TOPSIS, analytical hierarchy process were employed and integrated to propose the best alternative. Next, as can be illustrated in Table 1, the ensemble method (e.g. rank averaging) can be used for total ranking and determining the best areas based on voting.

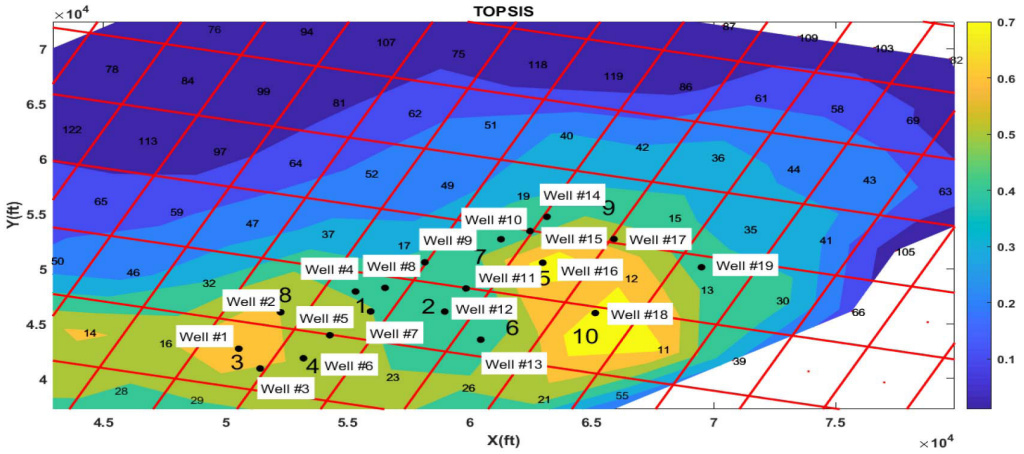


Fig. 1 The location of the best pilot candidate areas (using the TOPSIS method) and the current wells in the field.

Table 1 Comparison of MCDM results and using prioritization strategy.

	Pilot area	Shannon Entropy	TOPSIS	AHP	Rank Average	Ranking
1	150	1	1	1	1.0	1
2	176	2	7	6	5.0	5
3	163	3	2	2	2.3	2
4	151	4	3	4	3.7	3
5	138	5	4	3	4.0	4
6	175	6	6	5	5.7	6
7	162	7	5	7	6.3	7
8	137	8	8	8	8.0	8
9	174	9	9	9	9.0	9
10	149	10	10	11	10.3	10

Conclusion

In this research, we concentrated on developing a systematic method for indicating the best hydrocarbon pilot area. Therefore, an oil field is divided into small regions, i.e., candidate area and the main input variables including: reservoir geometry, reservoir rock and fluids properties, the production history of each well, e.g., water, oil and gas flowrate, and location of wells are prepared. Afterwards, several clustering analysis, optimization and decision making algorithm

were performed. The main results related to the efficiency of each of the methods can be expressed as follows:

1) The selected area must have the representative conditions of the reservoir in terms of geology and also be appropriate in terms of technical-economic operational evaluation. Therefore, it was considered different such as proximity to wellhead facilities and existing applicable wells in the field.

2) Optimum number of clusters was indicated equal to three using different algorithms including hierarchical, Elbow and silhouette methods. Then, various clustering techniques (e.g. k-means, k-medoids and c-means) were employed to determine the cluster centers.

3) Different economic-operational criteria, including the number of interference wells and the average distance of the candidate area from these wells, the number of wells in the neighborhood and the average distance from these wells, the distance from the wellhead equipment were determined and considered as decision criteria.

4) The top candidate areas were determined by using the prioritization strategy and combining the ranking results of different methods such as Shannon entropy, TOPSIS, and AHP methods.

References

1. Motahhari, S. M., Rafizadeh, M., Pishvaie, S. M. R., & Ahmadi, M. (2021). An integrated Shannon Entropy and reference ideal method for the selection of enhanced oil recovery pilot areas based on an unsupervised machine learning algorithm. Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 76, 82, doi: 10.2516/ogst/2021061. doi:10.2516/ogst/2021061.
2. Ning, S., Barnes, J., Edwards, R., Schulpen, W., Dandekar, A., Zhang, Y., Cercone, D. & Ciferno, J. (2020). First ever polymer flood field pilot to enhance the recovery of heavy oils on Alaska North Slope–producer responses and operational lessons learned. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (p. D031S029R004). SPE, doi: 10.2118/201279-ms.
3. Irvine, R., Davidson, J., Edwards, S., Kingsbury, J., Hui-June, P., & Tardiff, C. (2012). Case study of polymer flood pilot in a low permeability Mannville sand of the western Canadian sedimentary basin using produced water for blending. All Days. Presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA. doi:10.2118/154050-ms.
4. Delamaide, E., Soe Let, K. M., Bhoendie, K., Jong-A-Pin, S., & Paidin, W. R. (2016). Results of a polymer flooding pilot in the Tambaredjo heavy oil field, Suriname. Day 1 Tue, June 07, 2016. Presented at the SPE Canada Heavy Oil Technical Conference, Calgary, Alberta, Canada. doi:10.2118/180739-ms.
5. Gao, C. H. (2011). Scientific research and field applications of polymer flooding in heavy oil recovery. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 1(2–4), 65–70. doi:10.1007/s13202-011-0014-6.
6. Kheirollahi, H., Chahardowli, M., & Simjoo, M. (2022). A new method of well clustering and association rule mining. Journal of Petroleum Science & Engineering, 214(110479), 110479. doi:10.1016/j.petrol.2022.110479.
7. Subbalakshmi, C., Krishna, G. R., Rao, S. K. M., & Rao, P. V. (2015). A method to find optimum number of clusters based on fuzzy silhouette on dynamic data set. Procedia Computer Science, 46, 346–353. doi:10.1016/j.procs.2015.02.030.
8. R. B. Bratvold and S. Begg. (2010). Making good decisions. Emerald Group Publishing.