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

حسین خیرالهی؛ محمد چهاردولی* ؛ محمد سیم‌جو
دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز ، ایران
chahardowli@sut.ac.ir

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 به همراه 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 استخراج شده 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 تصمیم سازی 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 تصمیم گیری چند شاخصه با به کارگیری استراتژی میانگین رتبه‌ها انجام گرفت. مطابق نتایج حاصله برای سه ناحیه برتر پایلوت، خروجی روش آنالیز سلسله مراتبی به ترتیب برابر با ۱۱/۵۰، ۱۰/۴۶ و۶/۹۷ درصد و برای روش آنتروپی شانون برابر با ۱۱/۶۷، ۹/۸۰ و ۶/۸۰ درصد بود. رتبه‌بندی نهایی براساس تلفیق نتایج روش‌های تصمیم گیری چند شاخصه با به کارگیری استراتژی میانگین رتبه‌ها تعیین شد. براین اساس، سه ناحیه مذکور بیشترین امتیاز فرصت پایلوت را در گستره میدان کسب نموده و به عنوان اولویتهای اول کاندیدای پیاده‌سازی پایلوت روش های تزریق آب‌پایه برای مطالعات توسعه ای پیشنهاد شدند.

کلیدواژه‌ها: انتخاب محل پایلوت، تزریق آب، تصمیم‌گیری چند شاخصه، الگوریتم‌های خوشه‌بندی

Accepted Paper

Selecting the Best Pilot Area for Water-based EOR Using Artificial Intelligence

and Multi Criteria Decision Making Algorithms

Hossein Kheirollahi[1], Mohammad Chahardowli[1, *], Mohammad Simjoo[1]
1. Faculty of Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
* Corresponding author: chahardowli@sut.ac.ir

Selecting the best candidate pilot area is one of the most important and challenges decisions in the oil and gas filed development plan. Pilot-scale projects are conducted to reduce reservoir uncertainties and investment risk and the lesson learned from this study will be extended to the full field implementation. The main objective of this study is to utilize sseveral geological, operational and economic criteria to make decisions optimally among candidate areas.

Firstly, reservoir similarity index (RSI) is calculated using the oil production history, saturation data. For this reason, clustering methods including k-means, k-medoids and c-means are used to identify the center of the dominant cluster. Afterwards, other operational criteria such as the number of interference, adjacent wells, the average distance between these wells and area center and the average distance from facilities are determined for all candidate areas. Finally, the decision matrix is created and then multi-criteria decision making (MCDM) methods are utilized to calculate pilot opportunity index for each area. According to the obtained results, the assigned pilot opportunity index of the hierarchical analysis method was equal to 11.50, 10.46 and 6.97%, and for the Shannon entropy method it was equal to 11.67, 9.80 and 6.80%, respectively for the top three pilot areas. The area with the highest value is selected as the first rank candidate for pilot implementation. Moreover, mean rank method is utilized to aggregate and introduce the best pilot area.

Keywords: Pilot Selection, Water Flooding, Risk Management, Multi Criteria Decision Making, Clustering Algorithms

Accepted Paper

۱- مقدمه

یکی از عوامل مؤثر در ارزیابی میزان موفقیت و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری پروژه‌های توسعه میدان، طراحی و تعیین مناسب‌ترین مکان و ناحیه کاندیدای 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 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] [۲].

به صورت کلی انجام طراحی پایلوت معمولا در دو حالت پایلوت غیرتولیدی و تولیدی انجام می‌گیرد. طراحی و اجرای پایلوت برای نیل به اهداف مختلف شامل، ۱) جمع‌آوری داده برای بروز رسانی مدل مخزنی، ۲) ارزیابی روش تزریق سیال در مخزن و بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر روی 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. علاوه بر این از رویکردهای مختلفی برای تعیین بهترین ناحیه پایلوت استفاده می‌گردد. در رویکرد اول مخزن با توجه به برخی پارامترهای مهم بر اساس تاریخچه تولید مخزن فیلتر می‌شود. رویکرد دوم، مخزن به نواحی مختلفی تقسیم شده و طی آن نواحی پر تکرار به عنوان نماینده مخزنی انتخاب می‌گردد [۳,۲]. 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 ترسیم شده برای پایلوت بیشینه شود. از طرفی دیگر توجه به شرایط کنونی میدان هم برای انتخاب مکان مناسب پایلوت باید مورد توجه قرار گیرد که این کار را می‌توان در قالب انتخاب بهترین چاه (ها) از میان چاه‌های فعلی موجود در میدان و بر اساس 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 فرایند تصمیم‌گیری انتخاب مکان مناسب پایلوت می‌باشد. بدین منظور، اهمیت هر یک از این پارامترها بر اساس وزن آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. به عنوان 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 فرایند 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.

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 [۶,۵]	تراوایی بالای سنگ مخزن باعث سهولت تزریق‌پذیری در روش‌های آب پایه خواهد شد.
توصیف و سرشت نمایی مناسب مخزن [۷,۵]	کاهش عدم قطعیت در توصیف پارامترهای مخزنی و نیز توصیف دقیق تر پارامتر "شاخص شباهت مخزنی" در انتخاب محل پایلوت
سهولت دسترسی به منابع تأمین آب [۶]	عدم محدودیت در حجم سیال تزریقی می تواند باعث افزایش بازده حجمی ناحیه پایلوت شود.
فاصله از تجهیزات سر چاهی [۸,۵]	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.

Accepted Paper

شرایط زمین‌شناسی مخزن (گسل‌ها، ناهمگنی و...)[۱۰,۹]	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.

هدف اصلی این پژوهش پیاده‌سازی یک روش سیستماتیک و اعمال استراتژی الویت‌بندی برای رتبه‌بندی و تعیین بهترین ناحیه کاندیدای پایلوت جهت بکارگیری 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. درنهایت از رویکرد استراتژی الویت بندی میانگین برای اتخاذ تصمیم نهایی و پیشنهاد مناسب‌ترین گزینه پیاده‌سازی پایلوت استفاده گردید.

۲- 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 به سمت چاه، رخداد پدیده انگشتی شدن به دلیل وجود کانال‌های پر تراوا از جمله چالش‌های اصلی این میدان به شمار می‌روند. خواص سنگ و سیال نیز در گستره مخزن دارای ناهمگونی‌های فراوانی است به طوری که نفوذپذیری در جهت عمودی و افقی به دلیل 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 کیلومتر می باشد. لذا با توجه به این مقادیر و نیز با توجه به ناحیه و شعاع تخلیه متوسط چاه ها (برابر با ابعاد ۱×۱ کیلومتر)؛ مخزن مورد مطالعه به تعداد ۱۴بخش در جهت y و ۲۲ بخش در جهت x تقسیم بندی 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.

۳- 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 به عنوان 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 می شود. در ادامه جزئیات مربوط به روش کار و الگوریتم‌های مورداستفاده توضیح داده‌شده است:

۳-۱- 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 بر اساس معیارهای مدنظر می باشد. این کار براساس الگوریتم های خوشه بندی داده و به صورت یک

Accepted Paper

فرآیند غیرنظارت شده قابل پیاده‌سازی است. برای خوشه‌بندی نواحی کاندیدای پایلوت می‌بایست ابتداً متغیرهای ورودی شامل ویژگی‌های مخزنی مدنظر برای خوشه‌بندی تعیین شود. این معیارها بر اساس 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 زمان های بعدی مورد مطالعه استفاده شد. هدف اصلی از خوشه‌بندی، تعیین مراکز خوشه‌ها به‌منظور محاسبه فاصله بقیه اعضا از مرکز خوشه غالب (دارای بیشتری 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 شبیه سازی نواحی کاندیدا انجام شده و به صورت یک بردار مطابق رابطه ۲ بیان می شود:

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

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

در رابطه فوق الذکر، پارامتر S_{oi} و S_o بیانگر درصد اشباع نفت در زمان اولیه و درصد اشباع نفت اقیمانده[1] در زمان‌های بعدی می‌باشد. علاوه براین 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 بر اساس 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 در بردارنده تاثیر چندین پارامتر می‌باشد، در ارزیابی شباهت مخزنی می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به پارامترهای منفرد داشته باشد.

$$V_{o_{ijk}} = A_{ijk} \times h_{ijk} \times \phi_{ijk} \times S_{o_{ijk}} \times \mathrm{NTG_{ijk}} \qquad (۳)$$

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

در رابطه بالا، پارامتر ϕ ، h ، A ، V_o ، $\bar{V}_o$ و NTG به ترتیب بیانگر مقدار تخلخل، ضخامت، مساحت، حجم نفت باقیمانده، مقدار متوسط نفت باقیمانده و نسبت ضخامت مفید به غیر مفید برای هرگرید بلاک می‌باشد. علاوه بر این پارامتر t برای اندیس زمان، پارامتر N و M برای اندیس گریدبلاک‌ها و N_t برای تعداد کل بازه‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[1] Remaining Oil Saturation

Accepted Paper

۳-۲- تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها و آنالیزخوشه‌بندی نواحی کاندیدا

شروع به کار اکثر الگوریتم‌های خوشه بندی نیازمند مشخص کردن تعداد خوشه به صورت مستقیم می‌باشد. بنابراین در اولین مرحله بایستی تعداد بهینه خوشه بندی 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 می‌تواند با مقایسه فاصله بین جفت مقادیر به دسته‌بندی داده‌ها بپردازد. بنابراین نتیجه خوشه‌بندی می‌تواند به‌عنوان معیار خوبی برای تعیین تعداد خوشه و اعتبار سنجی سایر روش‌های مورد استفاده قرار گیرد. علاوه براین برای انتخاب بهینه تعداد خوشه‌ها می‌توان از روش کمی سیلهوت نیز استفاده کرد. برای این کار می‌توان نمودار متوسط مقدار سیلهوت داده‌ها را به ازای تعداد مختلف خوشه رسم کرد. نقطه‌ای که دارای بیشینه مقدار سیلهوت باشد به‌عنوان نقطه بهینه معرفی می‌گردد. کارکرد روش معیار سیلهوت بر اساس کمینه کردن فاصله داخلی هر خوشه و بیشینه کردن فاصله مراکز خوشه‌ها از یکدیگر تعریف می‌باشد. [۱۲]. به همین منظور رابطه ۵ برای محاسبه معیار سیلهوت برای هر ناحیه تعریف می‌گردد:

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

در این رابطه پارامتر a_i بیانگر میانگین فاصله اعضای داخل خوشه شماره i از مرکز آن خوشه هست. علاوه بر این 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 خوشه بندی 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 به کمک 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 اعتبار سنجی 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.

۳-۳- الگوریتم تصمیم سازی چند شاخصه

مسئله اتخاذ تصمیم نهایی در خصوص رتبه‌بندی و انتخاب ناحیه (و یا نواحی) برتر پایلوت را می توان بر مبنای متغیرها و شاخصه‌های مختلف و تاثیرگذار بنا کرد. بنابراین تعریف کلی و ماهیت این تصمیم سازی چند شاخصه را می‌توان در قالب یک ماتریس طراحی و توصیف نمود. در مسائل تصمیم گیری چند معیاره و بخصوص مسائل تصمیم گیری چند شاخصه، ستون‌های ماتریس تصمیم دارای شاخص یا معیارهای مختلفی هستند که داشتن و یا دانستن اوزان نسبی شاخص های موجود، گام مؤثری در فرایند حل مسئله می‌باشد. طبیعتاً در فرایند تصمیم گیری یکسری شاخص‌ها و گزینه ها دخیل هستند که اهمیت این شاخص ها در مسیر تصمیم گیری برابر نیست. لازم به ذکر است که به صورت کلی ممکن است اهمیت تمامی معیارها با هم برابر

Accepted Paper

نباشد، در چنین مواقعی باید اهمیت این شاخص ها تعیین شود و دانستن ضریب اهمیت یا وزن هر یک از این شاخص ها در تصمیم گیری ضروری است. وزن هر شاخص، اهمیت نسبی آن را نسبت به شاخص های دیگر بیان می کند؛ انتخاب صحیح وزنها کمک بزرگی در جهت رسیدن به هدف مورد نظر می نماید. 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[۱۷و۱۳]. در ادامه جزئیات مربوط به روش‌های استفاده شده در این مطالعه جهت تعیین وزن شاخصها در رتبه‌بندی نواحی کاندیدای پایلوت به‌صورت کامل شرح داده می‌شود.

۳-۳-۱ روش آنتروپی شانون

در این روش ابتدا ماتریس تصمیم بر اساس رابطه ۶ به‌صورت ستونی نرمال‌سازی می‌شود. سپس برای هر معیار به‌صورت ستونی، مقدار آنتروپی هر متغیر به کمک 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 تعیین کننده امتیاز هر گزینه کاندیدا خواهد بود.

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

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

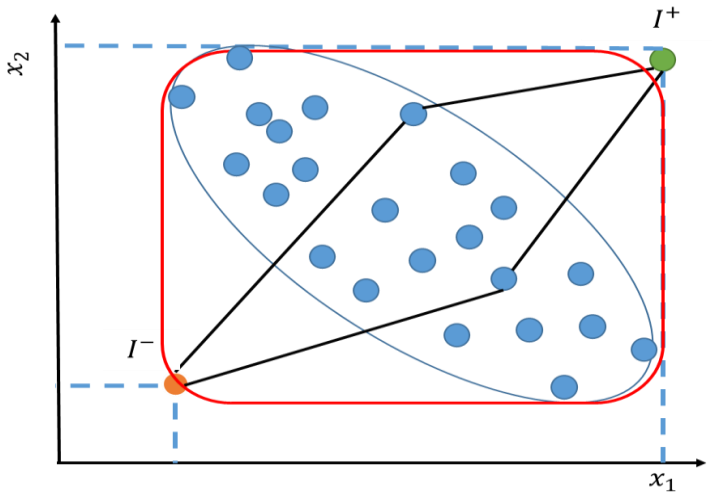
$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^{p} (1 - E_j)} \qquad j = 1, 2, \ldots, p \qquad (۸)$$

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 به ترتیب نشان‌دهنده میزان آنتروپی و وزن محاسبه‌شده برای هر معیار می‌باشد.

۳-۳-۲ روش تاپسیس

روش تاپسیس با توجه به فاصله از مقادیر ایده‌آل پایه‌گذاری شده است. مبنای اصلی این روش، رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس 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 بر اساس مقدار فاصله اقلیدسی از نقطه ایده‌آل منفی و میزان شباهت (نزدیکی) به نقطه ایده‌آل مثبت تعیین می‌گردد [۱۴].

Accepted Paper



شکل ۱: دیاگرام عملکرد روش تاپسیس در امتیازدهی به گزینه‌ها.

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) به کمک یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه همانند آنتروپی یا روش وزن دهی 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 محاسبه‌ی مقادیر بیشینه و کمینه هر ستون، مؤلفه‌های نقطه ایده‌آل مثبت و منفی را برای هر معیار مشخص می‌گردد (رابطه ۱۱).

۵) در ادامه می‌توان بر اساس روابطه ۱۲و۱۳، مقدار فاصله اقلیدسی (دوری یا نزدیکی کلی) هر گزینه از نقطه ایده‌آل مثبت و منفی را مشخص کرد.

۶) درنهایت با توجه به دوری از نقطه ایده‌آل منفی (مقدار فاصله بیشتر)، می‌توان شاخص شباهت را به‌صورت رابطه ۱۴ محاسبه کرد [۱۵].

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

$$y = x.\times w \qquad (۱۰)$$

$$y_j^- = \min(x_{ij}) \,|\max(x_{ij}) \qquad (۱۱)$$

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

Accepted Paper

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

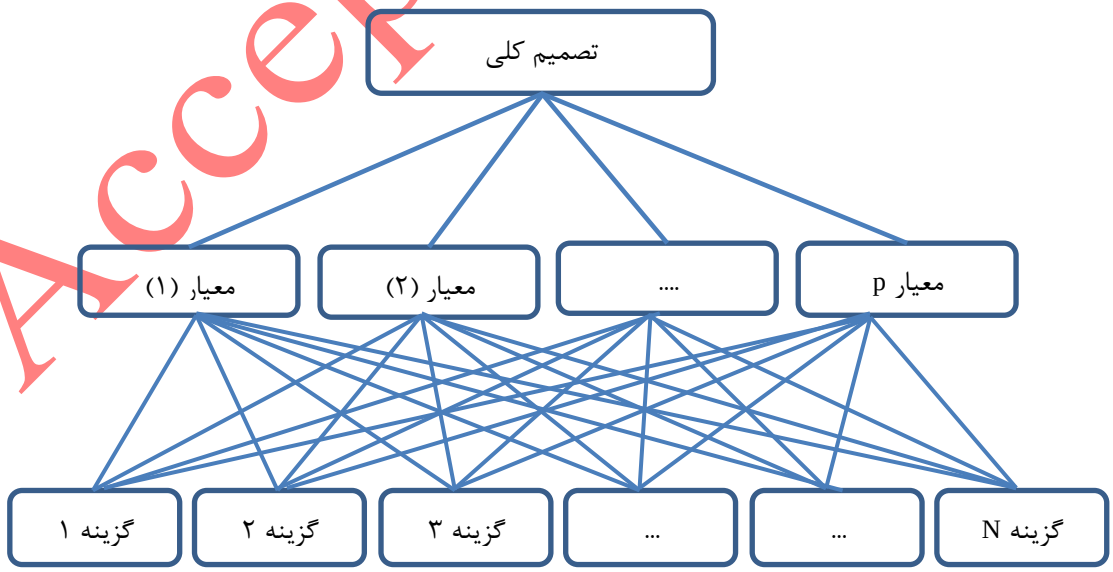
$$I_i^+ = \left[\sum_{j=1}^{p}\left(y_{ij} - y_j^+\right)^2\right]^{1/2} \qquad i = 1, 2, \ldots, N \qquad (۱۳)$$

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

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

۳-۳-۳ روش آنالیز سلسله مراتبی[1] (AHP)

این روش دارای ساختار سلسله مراتبی بوده و بر اساس 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.



شکل ۲: ساختار سلسله مراتبی الگوریتم AHP.

[1] Analytical Hierarchy Process

Accepted Paper

برای این کار مراحل الگوریتم را به‌صورت زیر می‌توان خلاصه کرد [۱۶]:

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 بر اساس جدول ۲ می‌تواند در نظر گرفته شود.

جدول ۲: مبنای کمی‌سازی در مقایسه جفت معیارها.

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

۲) به کمک 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.

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

۴) مقدار شاخص سازگاری و شاخص سازگاری تصادفی به ترتیب بر اساس جدول ۳ یا روابط ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود.

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

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

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

$$RI = \frac{1.98(p-2)}{p} \quad (۱۶)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۱۷)$$

۴- بحث و نتایج

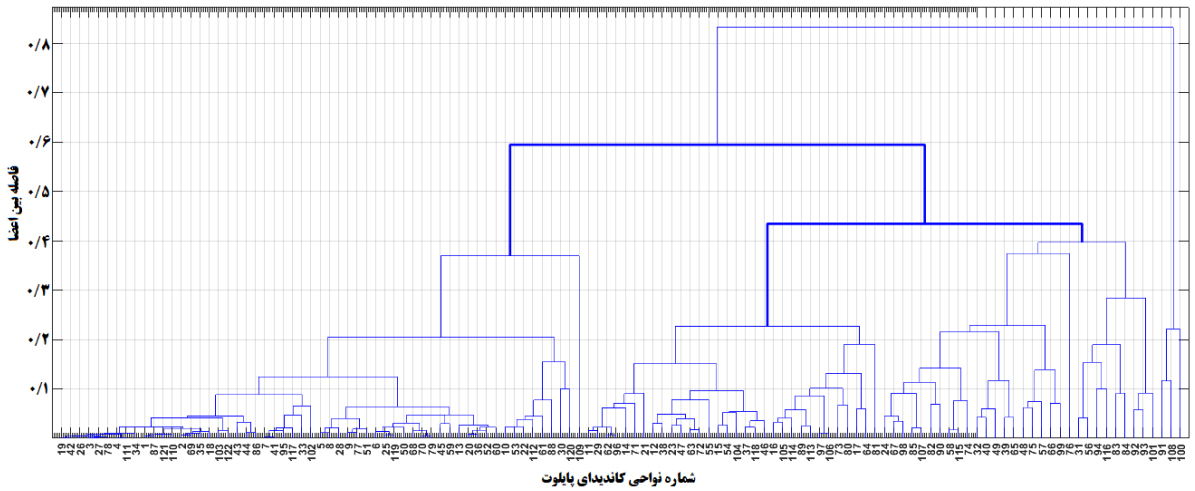
در این پژوهش به‌منظور کاهش ریسک عملیات میدانی و تعمیم نتایج حاصل از پیاده‌سازی پایلوت، از رویکرد نماینده بودن ناحیه کاندیدا در گستره مخزن برای تصمیم‌گیری محل پایلوت استفاده شده است. بدین ترتیب پیاده‌سازی یک روش سیستماتیک برای تعیین بهترین کاندیدای پایلوت مورد نظر قرار گرفت. مراحل مختلف این رویکرد شامل نحوه استخراج داده از مدل، آماده‌سازی داده، استخراج ویژگی از داده‌های تاریخچه تولید، استفاده از الگوریتم‌های مختلف خوشه‌بندی و درنهایت تعیین

Accepted Paper

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 گرفته شده 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 استفاده شده و از روی این مقادیر، پارامتر شاخص شباهت مخزنی محاسبه می شود.

٤-١- تعداد بهینه خوشه و آنالیز خوشه

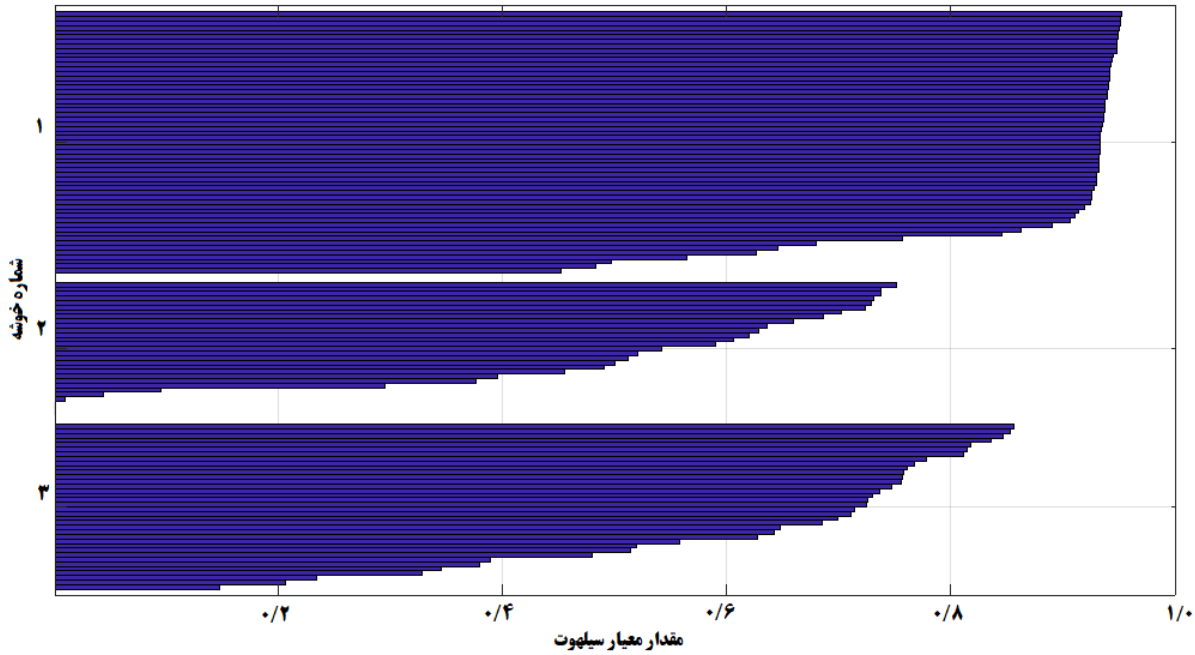
تشخیص و تعیین تعداد بهینه مراکز خوشه‌بندی نواحی پایلوت براساس معیار ضریب بازیافت و ماتریس کوواریانس را میتوان به کمک روش های مختلف آنالیز خوشه، مورد بررسی قرار داد و صحت سنجی نتایج را با اعمال چندین روش تایید کرد. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده هست، روش سلسله مراتبی بر اساس مقایسه فاصله بین جفت مقادیر به ایجاد شاکله درختی از پایین به بالا (واریوگرام) 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 اعتبار سنجی نتایج مورد استفاده قرار گیرد.



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

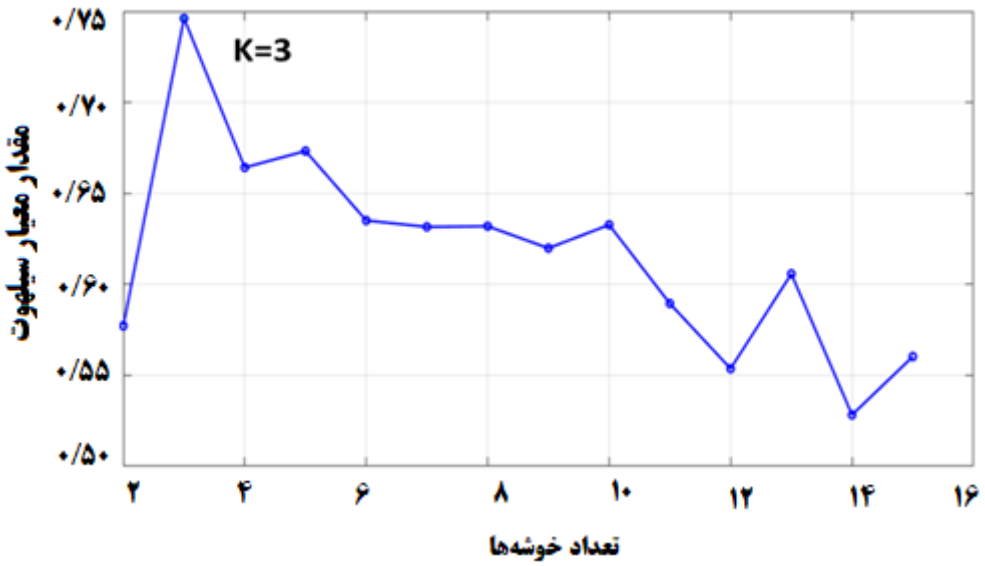
علاوه بر روش گرافیکی فوق، برای انتخاب بهینه تعداد خوشه‌ها می‌توان از معیار سیلهوت نیز استفاده کرد. مطابق شکل ۴، این معیار بر مبنای شباهت داخل خوشه‌ای و میان خوشه‌ای برای تمام نقاط محاسبه می شود. مقدار این پارامتر به ازای هر نقطه از ماتریس خوشه‌بندی در بازه‌ی [۱ و ۱-] قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر و به عدد ۱+ نزدیک‌تر باشد بیانگر شباهت زیاد میان داده‌های خوشه‌بندی شده و نشان‌دهنده تعداد مناسب خوشه‌ها است. علاوه 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 تایید کننده تعداد مناسب ($K=3$) مراکز انتخاب شده برای فرآیند خوشه‌بندی است.

Paper



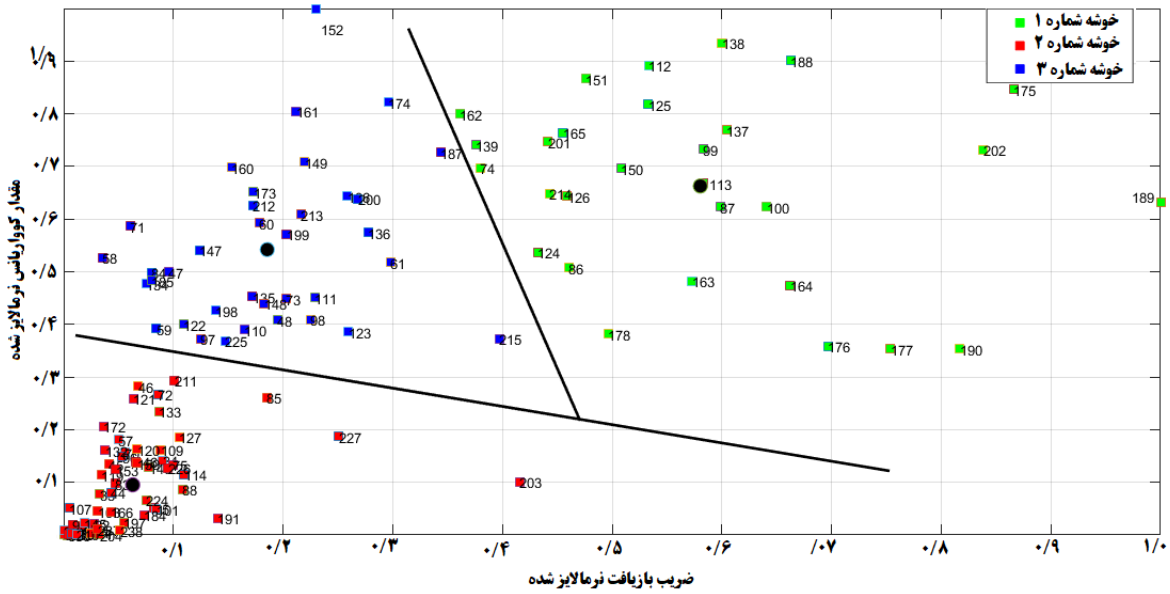
شکل ۴ :معیار سیلهوت برای نواحی کاندیدا.

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، محور عمودی نمودار بیانگر مقدار متوسط سیلهوت داده‌ها، و محور افقی بیانگر تعداد خوشه‌ها می باشد. تعداد خوشه‌ی متناظر با مقدار بیشینه شاخص سیلهوت کل (K=۳)، به‌عنوان تعداد بهینه برای تعداد خوشه‌ها معرفی می‌گردد.



شکل ۵: تعیین تعداد خوشه بهینه با توجه به معیار سیلهوت.

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 تا هیچکدام از مراکز خوشه تغییر نیابد. شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج حاصل از خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم لوید است. همانطور که قابل مشاهده است، نواحی کاندیدای پایلوت بر اساس مقدار ضریب بازیافت و معیار کوواریانس به سه دسته کلی به صورت نقاط مربعی با رنگ های قرمز، آبی وسبز تقسیم بندی شده اند 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 بر اساس ترکیب خطی وزن‌دار فاصله از مرکز خوشه غالب (نماینده اکثریت) برای پارامتر میزان بازیافت نفت و مقدار کوواریانس هر ناحیه خواهد بود. این معیار به عنوان یک پارامتر مهم برای کمی سازی میزان پتانسیل و برخورداری از امتیاز نماینده بودن هر ناحیه کاندیدا پایلوت برمبنای فاصله از مرکز خوشه غالب می باشد.



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 خوشه‌ی 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 بر اساس مقدار متوسط اعضا خوشه تعیین می‌کند اما مقدار مراکز در روشk-medoids از میان داده‌های داخل خوشه تعیین می‌گردد. به همین دلیل مراکز حاصل از روش‌های فوق اختلاف ناچیز دارند. علاوه بر این 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 به روش c-mean در محاسبات شاخص شباهت مخزنی مورد استفاده قرار گرفته است.

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

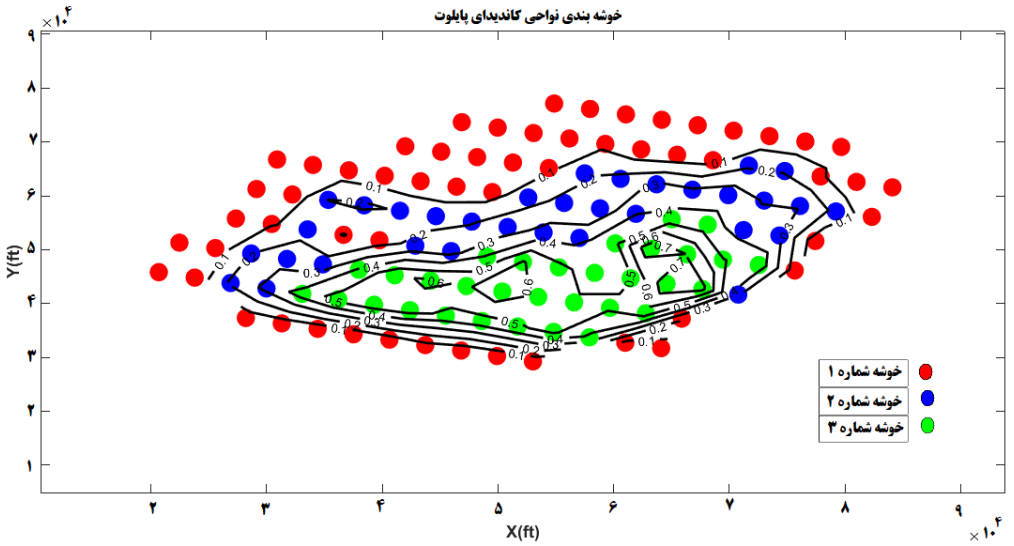
۲-۴- محاسبه شاخص شباهت مخزنی

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 می شود. 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 می تواند برای اهداف وزن دهی بکار گرفته شود.

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

در این رابطه، w_1 و w_2 بیانگر وزن‌های میزان بازیافت (RF) و مقدار کوواریانس (COV) می‌باشد که با اعمال روش آنتروپی شانون بر روی داده مربوط به این دو پارامتر، مقادیر محاسبه‌شده وزن این ویژگی‌ها به ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۰/۴۷ می‌باشد. شکل ۷ نشان دهنده منحنی خطوط تراز مقادیر شاخص شباهت مخزنی حاصل از ترکیب خطی پارامتر بازیافت نفت و مقدار کوواریانس هر ناحیه می باشد. علاوه براین نتایج خوشه بندی نواحی کاندیدا با رنگ های قرمز، سبز و آبی قابل مشاهده است. اما تصمیم‌گیری در خصوص 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.

Accepted Paper



شکل ۷: نقشه توزیع خوشه‌ها و میزان شباهت مخزنی.

٤-۳- 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 ذکر شده 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 جابجا شده است. ستون های جدول برای گزینه‌های کاندیدای پایلوت در نظر گرفته شده 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. علاوه براین مقادیر محاسبه شده، اهمیت وزنی متناظر با معیارها برای تعیین نواحی برتر کاندیدای پایلوت در روش تصمیم‌گیری شانون آنتروپی تعیین شده است. همانطور که در جدول 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 به ترتیب با مقادیر ۳۰/۸۵ و۲۲/۹۳ درصد می باشند.

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

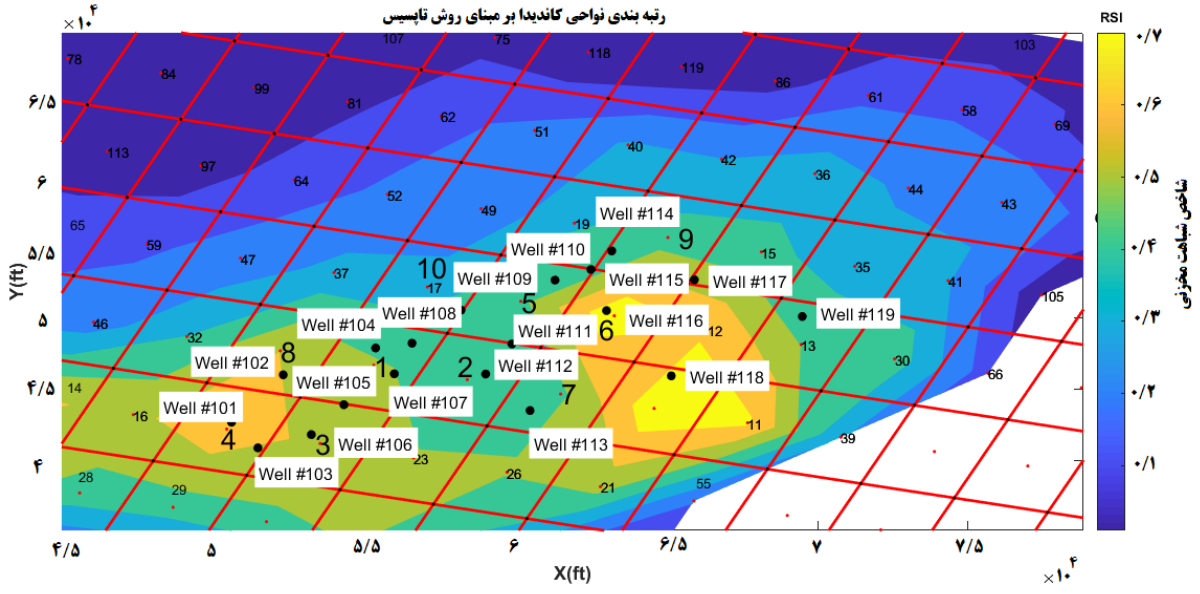
	معیار تصمیم‌گیری	وزن معیار (٪)	شماره ناحیه کاندیدای پایلوت			
			۱۳۸	۱۵۰	۱۵۱	۱۶۳
۱	شاخص شباهت مخزنی	۴/۶۰	۰/۶۷	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۴۶
۲	تعداد چاه‌های مناسب برای استفاده به‌عنوان پایلوت	۱۰/۶۳	۱	۲	۱	۱
۳	متوسط فاصله چاه (های) مناسب برای استفاده با ناحیه کاندیدای پایلوت (m)	۲۲/۹۳	۱۵۴	۳۲۲	۲۰۹	۲۲۱

Accepted Paper

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 چاه (های) 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 چاه (های) 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

۴-۴- 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 پیاده سازی پایلوت است. علاوه بر این نقشه خطوط تراز متناظر با پارامتر شباهت مخزنی (RSI) و همچنین نتایج رتبه‌بندی نواحی کاندیدای پایلوت با استفاده از روش تاپسیس نشان داده شده است. در ادامه، نواحی کاندیدا بر مبنای شاخص فرصت پایلوت محاسبه شده رتبه‌بندی گردید و در نهایت نواحی برتر (ده ناحیه اول) مشخص شد. بر اساس نتایج حاصله، علی‌رغم شباهت مخزنی بیشتر مربوط به ناحیه کاندیدای ۶ نسبت به ناحیه ۱، وجود چاه های حفر شده قبلی و فاصله کم از تاسیسات سطحی نتایج نهایی رتبه بندی را تحت تاثیر قرار داده اند.



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

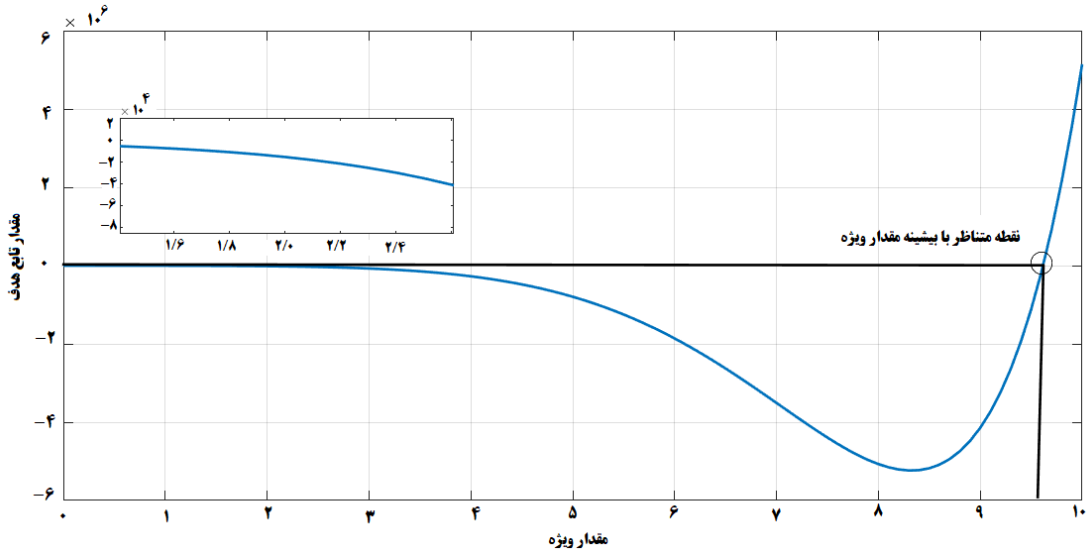
روش آنالیز سلسله مراتبی بر اساس دانش زمینه‌ای به تعیین اهمیت معیارهای مختلف می‌پردازد. برای این کار در ابتدا ماتریس مربعی مقایسه جفت معیارها و میزان ارجحیت معیار سطر i نسبت به معیار ستون j بیان گردید که میزان اهمیت هر معیار با مقادیر عددی ۱ الی ۹ تعیین می‌گردد. به عنوان نمونه، همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، میزان اهمیت و ارجحیت

نسبی مربوط به معیار فراوانی چاه‌های قابل استفاده (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 بر اساس ملاحظات میدانی تنظیم گردید.

جدول ۶: ماتریس مقایسات زوجی بین معیارهای تصمیم‌گیری پایلوت.

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

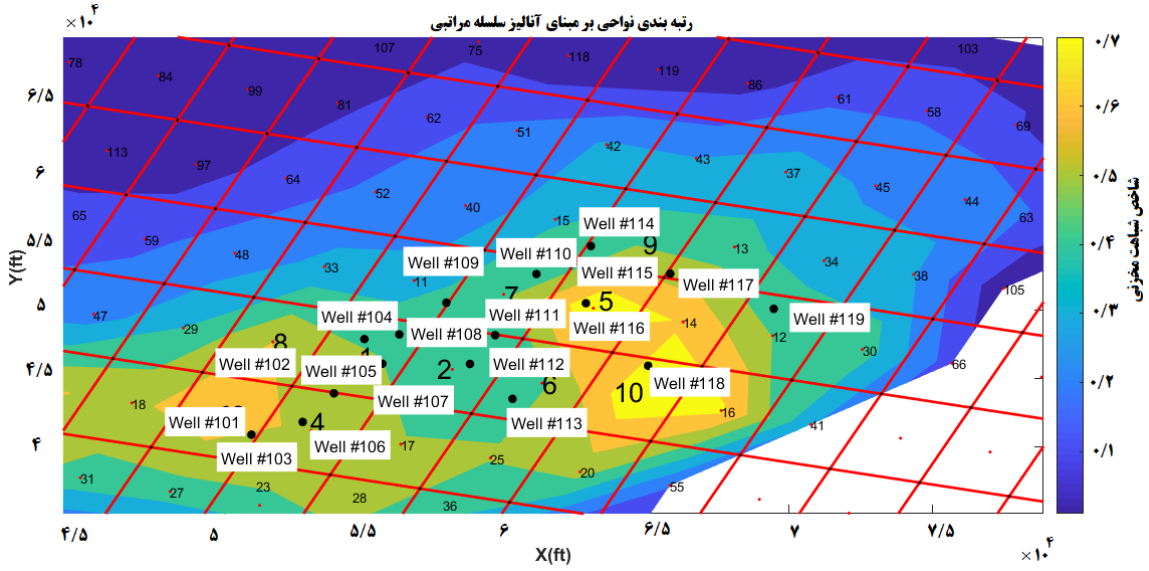
در ادامه با تعیین مقادیر ویژه ماتریس می‌توان به محاسبه اهمیت و وزن هر یک از معیارها (مقادیر ویژه) پرداخت. برای این کار می‌توان در رابطه $|A-I\lambda_{max}|=0$ با تعیین مقدار پارامتر λ_{max} پرداخت. شکل ۹ نشان‌دهنده مقدار پارامتر تغییرات مقدار دترمینان در مقابل تغییر λ می‌باشد و مقدار این پارامتر(λ =۹/۶۲) در نقطه متناظر با دترمینان برابر صفر نشان داده شده است.



شکل ۹: تعیین مقادیر ویژه بر اساس مقدار ریشه تابع هدف.

Accepted Paper

پس از تعیین مقدار پارامتر λ می‌توان به محاسبه مقدار نسبت شاخص سازگاری به کمک رابطه ۱۵ اشاره شده در بخش روش تحقیق پرداخت. درصورتی‌که مقدار نسبت شاخص سازگاری از ۰/۱ کمتر باشد، وزن‌های معیارها با حل هم‌زمان دستگاه معادلات $(A-I\lambda_{max})\times w=0$ با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی محاسبه می‌گردد. در ادامه، امتیاز هر ناحیه محاسبه شده و رتبه‌بندی نهایی بر اساس این مقدار انجام شد. شکل ۱۰ نشان دهنده بخشی از تقسیم‌بندی مربوط به محل نواحی کاندیدای پایلوت در نظر گرفته شده برای مخزن مورد مطالعه به همراه آرایش محل چاه‌های موجود در میدان می باشد. نحوه چیدمان حاصل از روش آنالیز سلسله مراتبی برای ده ناحیه برتر به صورت شماره‌گذاری مجزا مشخص شده اند. علاوه براین نقشه خطوط تراز پارامتر شباهت مخزنی محاسبه شده به صورت طیف رنگی نمایش داده شده است. نتایج بیانگر نزدیکی ناحیه کاندیدای پایلوت به تاسیسات سطح الارضی، چاه های فعلی قابل استفاده در میدان به همراه قرار گرفتن در خطوط تراز دارای شباهت مخزنی زیاد می باشد.



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

مطابق موارد ارایه شده 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 رتبه بندی نواحی کاندیدای تصمیم گیری و تعیین محل پیاده‌سازی پایلوت پایه آبی در میدان مورد مطالعه استفاده شد. برای رتبه‌بندی کلی و تعیین نواحی برتر بر اساس رأی‌گیری جمعی می‌توان از روش میانگین‌گیری مجموع روش های مختلف تصمیم گیری در انتخاب نواحی منتخب پایلوت استفاده کرد. مطابق جدول ۷، نتایج رتبه بندی برای ده ناحیه برتر بر اساس روش های مختلف آورده شده است. برای مثال، ناحیه شماره ۱۵۰ به عنوان رتبه اول در رتبه بندی هر سه روش انتخاب شده است. علاوه براین ناحیه شماره ۱۷۶ در رتبه بندی روش آنتروپی شانون، تاپسیس و آنالیز سلسله مراتبی به ترتیب رتبه ۲، ۷ و ۶ را کسب کرده است. بنابراین میانگین رتبه این ناحیه برابر با ۵ محاسبه می گردد و مجدد در رتبه‌بندی نهایی شرکت داده می‌شود.

جدول ۷: تصمیم گیری نهایی در خصوص ناحیه پیاده‌سازی پایلوت با استفاده از استراتژی اولویت‌بندی میانگین.

رتبه ناحیه بر اساس رتبه‌بندی به روش

	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

مطابق موارد فوق الذکر، 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 در خصوص انتخاب ناحیه پایلوت تزریق آب تصمیم گرفت. ماحصل این رویکرد داده- معیارمحور و نواحی برتر پیشنهاد شده می‌تواند با انجام مطالعات آنالیز عدم قطعیت بر اساس شبیه‌سازی و الزامات اقتصادی به انتخاب محل نهایی پایلوت منجر شود.

۵- 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) بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر دانش زمینه‌ای و مبتنی بر داده، اعم روش شانوون 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 پیاده سازی پایلوت برای روشهای تزریق آب پایه از داده‌های مربوط به یکی از میادین نفتی استفاده شد. براساس داده های 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 به ترتیب 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

Accepted Paper

در رتبه بندی نواحی پایلوت استفاده شد.

۴) جهت دسته‌بندی نواحی مخزنی از الگوریتم های ارزیابی و تعیین تعداد مناسب مراکز خوشه بندی از قبیل روشهای سلسله مراتبی و سیلهوت استفاده شد. مطابق نتایج حاصله تعداد خوشه‌های بهینه حاصله برابر با سه بود که این نتیجه بر اساس مقدار تابع هدف فاصله و مقدار متوسط سیلهوت بین داده ها حاصل شد.

۵) نواحی کاندیدای برتر پایلوت تزریق برای روشهای آب‌پایه در میدان مورد مطالعه با استفاده از استراتژی الویت‌بندی 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 بر اساس 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 پیاده سازی پایلوت تزریق آب پایه ارائه نموده است. این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید و کارا در کاهش ریسک تصمیم‌گیری های میدانی برای روشهای ازدیاد برداشت آب‌پایه مورد استفاده قرار گیرد.

۶- مراجع

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

[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, 76, 82. doi:10.2516/ogst/2021061

[3] Teletzke, G. F., Wattenbarger, R. C., & Wilkinson, J. R. (2008). Enhanced oil recovery pilot testing best practices. All Days. Presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE. doi:10.2118/118055-ms

[4] مطهری, س. م.، رفیع زاده, م., پیشوائی, س. م.، & 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, ۳۱(۱۴۰۰–۳), ۳–۱۶. 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 & Engineering, 214(110479), 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). 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

[7] Ning, S., Barnes, J., Edwards, R., Schulpen, W., Dandekar, A., Zhang, Y., … 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. Day 3 Wed, October 28, 2020. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Virtual. doi:10.2118/201279-ms

[8] 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

[9] 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

[10] Al-Dhuwaihi, A. S., Abdullah, M. B., Tiwari, S., Al-Murayri, M. T., Al-Mayyan, H., Shahin, G. T., & Shukla, S. (2017). Fit-for-purpose chemical EOR ASP modeling strategy to guide pilot development decisions for a giant reservoir in North Kuwait. Day 2 Wed, October 18, 2017. Presented at the SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia. doi:10.2118/186351-ms

[11] Koning, E. J. L., Mentzer, E., & Heemskerk, J. (1988). Evaluation of a pilot polymer flood in the Marmul

Accepted Paper

field, Oman. All Days. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas. doi:10.2118/18092-ms

[12] 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

[13] R. B. Bratvold and S. Begg. (2010). Making good decisions. Emerald Group Publishing

[14] 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. J. Pet. Res, 30(99–4), 105–117. doi:10.22078/pr.2020.4174.2891

[15] 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:10.1016/j.egyr.2019.04.011

[16] نعمتیان. ج, باحجب. م.ص, & طباطبایی. س.ر. (۱۴۰۰). مقدمه‌ای بر نظریه تصمیم‌گیری. انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز.

[17] Kheirollahi, H., Zayedi, M., Sobhani, S., Chahardowli, M., & Simjoo, M. (2023). Using an Ensembled Artificial Intelligence Approach for EOR Methods Screening in Oil Fields. *Journal of Petroleum Research*, *33*(1402-5), 51-62. doi: 10.22078/pr.2023.5151.3284

Accepted Paper