پژوهش نفت شماره ۱۱۸، مرداد و شهریور ۱۴۰۰، صفحه ۱۶-۳

انتخاب مکان پیاده‌سازی پایلوت ازدیاد برداشت در توسعه میادین هیدروکربنی بالغ با استفاده از تلفیق روش‌های تاپسیس و خوشه‌بندی هیبریدی

سید مهدیا مطهری[۱]، مهدی رفیع‌زاده*[۲]، سید محمودرضا پیشوایی[۳] و محمد احمدی[۱]

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران ایران

۲- دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران ایران

۳- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۶

چکیده

ریسک سرمایه‌گذاری در پروژه‌های ازدیاد برداشت به‌علت عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی- مخزنی و هزینه زیاد پیاده‌سازی این پروژه‌ها، بالا است. از این‌رو، از رویکرد اجرای ازدیاد برداشت در مقیاس پایلوت در میدان هیدروکربنی استفاده می‌شود. انتخاب مکان پایلوت در میدان هیدروکربنی یکی از عوامل مهم در این راستا است، چرا که نتایج پیاده‌سازی پایلوت به کل میدان هیدروکربنی تسری داده خواهد شد. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی مخزن، نقشه‌های سه‌بعدی ضریب بازیافت به‌دست آمد. سپس، سطح مخزن نفتی به نواحی کاندیدای پایلوت تقسیم‌بندی گردید. آرایه‌های ضریب بازیافت متناظر با این نواحی، با استفاده از روش خوشه‌بندی هیبریدی میانگین کا- سلسله مراتبی به‌صورت بهینه خوشه‌بندی شدند. برای به‌دست آوردن تعداد خوشه‌ها، از شاخص سیلهوتی استفاده گردید. با شناسایی خوشه غالب که شامل بیشترین تعداد نواحی کاندیدای پایلوت است می‌توان مرکز ثقل این خوشه را محاسبه و نزدیکی به آن‌را به‌عنوان یکی از معیارهای انتخاب مکان پایلوت لحاظ کرد. معیارهای عملیاتی و اقتصادی هم در انتخاب مکان پایلوت دخیل هستند. در نهایت با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس، می‌توان شاخص فرصت پایلوت در هر ناحیه کاندیدا را محاسبه کرد. براساس مقدار این شاخص می‌توان نواحی کاندیدای پایلوت را اولویت‌بندی و ناحیه با اولویت اول را جهت اجرای پایلوت انتخاب کرد. در نهایت، نتایج به‌کارگیری روش‌شناسی فوق در یکی از مخازن نفتی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: توسعه میادین هیدروکربنی بالغ، نواحی کاندیدای پایلوت ازدیاد برداشت، روش خوشه‌بندی هیبریدی، روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس، شاخص سیلهوتی

---

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی mehdi@aut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4303.2951)

پژوهش نفت شماره ۱۱۸، مرداد و شهریور ۱۴۰۰، صفحه ۱۶-۳

مقدمه

راهبرد طراحی و اجرای پایلوت های ازدیاد برداشت به‌عنوان یک واکنش در مواجهه با ریسک سرمایه‌گذاری پروژه‌های ازدیاد برداشت، اتخاذ می‌شود. طراحی پایلوت جایگاه ویژه ای در نقشه راه ازدیاد برداشت و کاهش ریسک دارد [۱]. براساس نتایج حاصل از پیاده‌سازی پایلوت ازدیاد برداشت، می‌توان با افزایش آگاهی و فهم از رفتار میدان هیدروکربنی، سناریوی ازدیاد برداشت برای کل میدان نفتی را طراحی کرد که این مهم منجر به افزایش ضریب بازیافت هیدروکربن خواهد شد. یکی از عوامل مهم که باید هنگام طراحی پایلوت‌های تولیدکننده در نظر گرفته شود، انتخاب مکان پایلوت در میدان هیدروکربنی است [۲]. با مرور پژوهش‌های پیشین، دو دسته‌بندی کلی برای روش‌شناسی انتخاب مکان پایلوت وجود دارد. در دسته اول، سطح مخزن جهت انتخاب مکان پایلوت با توجه به مقادیر پارامترهای کلیدی فیلتر شده است [۳-۵]. این دسته از پژوهش‌ها صرفاً مبتنی بر عملکرد گذشته مخزن بوده و صرفاً براساس مقادیر برخی معیارها، مخزن را جهت انتخاب ناحیه مناسب پایلوت فیلتر می‌کنند. در دسته دوم، سطح مخزن به تعدادی نواحی تقسیم‌بندی شده و براساس رویکرد نیمه کمی، ناحیه پایلوت انتخاب می‌شود. در این راستا، در پژوهشی برای انتخاب مکان پایلوت، میدان به مربع‌های ۶ Km^2 تقسیم شده است که نام هر قسمت مکان‌نما است. سپس این مکان‌نماها براساس پارامتر تراوایی و تعداد لایه‌های آب‌زده با استفاده از ابزار دیاگرام عنکبوتی و به‌صورت چشمی دسته‌بندی می‌شوند. مکان پایلوت از طبقه‌ای انتخاب می‌شود که سهم بیشتری دارد [۶]. با مشاهده آرایش و نحوه قرارگیری مقدار تراوایی و تعداد لایه‌های آب‌زده شده در جهت عمودی، چند دسته محدود تعریف می‌شوند. سپس با توجه به آرایش سلول‌های شبیه‌سازی در جهت عمودی، مشخص می‌شود که این سلول متعلق به کدام دسته است. سپس با توجه به اینکه هر مکان‌نما متشکل از تعدادی سلول است، مشخص می‌شود که در هر مکان‌نما از هر دسته چه تعدادی وجود دارد. با استفاده از دیاگرام عنکبوتی که هر محور آن یکی از دسته‌های تراوایی/ تعداد لایه‌های آب‌زده شده است می‌توان مکان‌نماهایی که شبیه هم هستند را شناسایی و یکی از پرتکرارترین آن ها را به‌عنوان نماینده مخزنی انتخاب کرد. در پژوهشی دیگر میدان به شش بخش تقسیم شد. مقادیر معیارها در هر بخش به‌دست آمد. مقادیر این معیارها به سه کلاس زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی شد. سپس، رتبه‌بندی کیفی هر بخش براساس بهتر بودن مقادیر معیارها ارائه شد [۷- ۸]. در این دسته از پژوهش‌ها، نماینده بودن ناحیه پایلوت از لحاظ مخزنی و زمین‌شناسی به معنای بهتر بودن خواص مخزنی در آن ناحیه است. به‌علاوه، طبقه‌بندی مکان‌های کاندیدای پایلوت براساس الگوهای از پیش تعریف شده و عمدتاً مبتنی بر معیارهای استاتیکی است. علاوه‌بر رویکرد روش‌شناسی در انتخاب ناحیه مناسب برای اجرای پایلوت ازدیاد برداشت، در رویکردی دیگر می‌توان معیارهای مورد استفاده جهت انتخاب مکان پایلوت را به دو دسته اساسی زمین‌شناسی- مخزنی و عملیاتی- اقتصادی تقسیم‌بندی کرد.

معیارهای زمین‌شناسی- مخزنی ناظر بر ماهیت یا سرشت مخزن است. از آنجا که قرار است محل پایلوت نماینده هدف ازدیاد برداشت وسیع‌تری باشد از این‌رو، باید دارای شرایط مشابه با مخزن باشد [۱، ۴ و ۶]. اما در تحقیقاتی دیگر مکان ناحیه پایلوت ناحیه‌ای است که خواص متوسط تا خوب مخزنی را دارد. به‌عنوان نمونه، ناحیه پایلوت جایی است که مقدار اشباع نفت باقی‌مانده در زمان شروع پایلوت بین ۰/۲ تا ۰/۵ است [۳]. در نمونه‌هایی دیگر مکان پایلوت جایی است که حجم نفت باقی‌مانده بالا [۹ و ۱۰]، نسبت تراوایی عمودی به افقی کمتر و پیوستگی جانبی بیشتر تراوایی را دارد [۷ و ۸].

معیارهـای عملیاتـی- اقتصـادی بـه جنبه‌هـای عـدم قطعیـت و اقتصـاد در انتخـاب ناحیـه پایلـوت اشـاره دارد. در ایـن چارچـوب ناحیـه‌ای کـه اطمینـان بیشـتری دربـاره طراحـی و تفسـیر نتایـج حاصـل از اجـرای پایلـوت در آن وجـود داشـته و از لحـاظ اقتصـادی پیاده‌سـازی پایلـوت در آن کـم هزینـه باشـد، مطلوبیـت بالاتـری دارد. چهـار معیـار سـطح دانـش، برهم‌کنـش ناحیـه پایلـوت و ناحیـه عملیـات تولیـد، قیـود سـطحی و اسـتفاده از چاه‌هـای تولیـد کنونـی را می‌تـوان به‌عنـوان معیارهـای عملیاتـی- اقتصـادی در تحقیقـات انجـام شـده یافـت. به‌عنـوان نمونـه، ناحیـه پایلـوت جایـی اسـت کـه کیفیـت و کمیـت داده‌هـای موجـود در آن مناسـب بـوده و می‌توانـد بـه خوبـی توصیـف شـود [۱، ۶، ۸]. برهم‌کنـش ناحیـه پایلـوت و ناحیـه عملیـات تولیـد هـم جهـت اطمینـان از تفسـیر داده‌هـای پایلـوت اسـت کـه کمتریـن تداخـل بایـد بیـن ایـن دو وجـود داشـته باشـد [۱، ۵-۳]. قیـود سـطحی بـه معنـای نداشـتن معـارض سـطحی یـا نزدیکـی بـه تاسیسـات سـطح الارضـی از دیگـر معیارهـا اسـت کـه جنبـه اقتصـادی دارد [۶- ۴]. معیـار دیگـر اسـتفاده از چاه‌هـای تولیـد کنونـی به‌عنـوان چـاه پایلـوت و اجتنـاب از حفـر چاه‌هـای جدیـد در جهـت کاهـش هزینه‌هـای پایلـوت اسـت [۵]. بـا مـرور مطالـب بیـان شـده در فوق مشـخص اسـت کـه اولاً معیـار نماینـده بـودن زمین‌شناسـی- مخزنـی در پژوهش‌هـای فـوق به‌خوبـی تبییـن نشـده اسـت. دومـاً، تمامـی معیارهـای عملیاتـی- اقتصـادی در انتخـاب مـکان بهینـه پایلـوت لحـاظ نشـده اسـت. سـوماً، انتخـاب مـکان پایلـوت فاقـد اسـتفاده از روشـی سیسـتماتیک و کمـی بـرای اولویت‌بنـدی و انتخـاب مـکان بهینـه پایلـوت اسـت. از ایـن‌رو، پژوهـش پیـش رو بـه دنبـال آن اسـت کـه بـه شـکل سیسـتماتیک و کمی و اسـتفاده از مجموعـه‌ای شـامل شـبیه سـاز مخزنـی، روش هیبریـدی خوشـه‌بندی و روش تصمیم‌گیـری چنـد معیـاره تاپسـیس، گامـی در جهـت رفـع چالش‌هـای فـوق بـردارد.

روش‌شناسی انتخاب مکان پایلوت

سـه مرحلـه اصلـی در انتخـاب مـکان پایلـوت کـه توسـط نگارنـدگان مقالـه توسـعه داده شـده، عبـارت اسـت از:

- شناسایی نواحی کاندیدای پایلوت
- توسـعه مفهـوم نماینـده بـودن مخزنـی و به‌کارگیـری آن در هـر ناحیـه کاندیـدای پایلـوت
- در نهایـت، محاسـبه شـاخص فرصـت پایلـوت بـرای نواحـی کاندیـدای پایلـوت و انتخـاب مـکان بهینـه پایلـوت

شناسایی نواحی کاندیدای پایلوت

بـا اجـرای الگـوی پنـج نقطـه‌ای نرمـال تولیـدی- تزریقـی می‌تـوان عـدم قطعیت‌هـای مرتبـط بـا ازدیـاد برداشـت از جملـه ضریـب جـاروب عمـودی، اشـباع نفـت باقی‌مانـده، ضریـب جـاروب افقـی، تزریـق پذیـری و بهره‌دهـی را به‌دسـت آورد [۷]. بـر ایـن اسـاس در ابتـدا در مـدل مخـزن براسـاس الگـوی تزریقـی- تولیـدی فـوق، چاه‌هـا مکان‌یابـی می‌شـوند. هـر الگـوی تزریقی-تولیـدی پنـج نقطـه‌ای نرمـال، متناظـر بـا یـک ناحیـه کاندیـدای پایلـوت اسـت. روش ازدیـاد برداشـت شبیه‌سـازی شـده در قالـب الگـوی تزریقـی- تولیـدی پنـج نقطـه‌ای، براسـاس نتایـج غربال‌گـری روش‌هـای ازدیـاد برداشـت مشـخص می‌شـود.

توسـعه مفهـوم نماینـده بـودن مخزنـی و به‌کارگیـری آن در هـر ناحیـه کاندیـدای پایلـوت

یکـی از مهم‌تریـن خصوصیـات ناحیـه پایلـوت ایـن اسـت کـه بایـد نماینـده مخـزن باشـد. در رویکـردی دینامیکـی، ناحیـه ای می‌توانـد نمایندگـی مخـزن را داشـته باشـد کـه از لحـاظ رفتـار تولیـدی بیشـترین شـباهت را بـه کل مخـزن داشـته باشـد. بـا توجـه بـه اینکـه کل مخـزن بـه نواحـی کاندیـدا تقسـیم‌بندی شـده اسـت؛ از ایـن‌رو، ناحیـه‌ای می‌توانـد نماینـده مخـزن باشـد کـه بیشـترین تکـرار از جهـت رفتـار تولیـدی را در بیـن تمامـی نواحـی کاندیـدای پایلـوت داشـته باشـد. از آنجـا کـه هـر ناحیـه کاندیـدای پایلـوت متشـکل از تعـدادی سـلول شبیه‌سـازی سـه‌بعدی اسـت، می‌تـوان

از مقدار ضریب بازیافت هر سلول شبیه‌سازی استفاده کرد. برای ارزیابی رفتار تولیدی هر ناحیه کاندیدای پایلوت، از مقدار ضریب بازیافت نفت در هر سلول شبیه‌سازی آن ناحیه کاندیدای پایلوت استفاده می‌شود. با توجه به داشتن آرایه ضریب بازیافت نفت در هر ناحیه کاندیدای پایلوت، می‌توان از روش خوشه‌بندی برای شناسایی تعداد رفتارهای تولیدی و شناسایی خوشه با تعداد بیشتر ناحیه کاندیدای پایلوت استفاده کرد (رابطه ۱ تا رابطه ۵ بخش ضمایم). خوشه‌بندی جزو الگوریتم‌های یادگیری ماشین بدون ناظر محسوب می‌شود [۱۱]. به‌علاوه، خوشه‌بندی یکی از تکنیک های اصلی در داده‌کاوی است [۱۲] و به معنای گروه‌بندی نمونه‌های مشابه در خوشه‌ها است که در حوزه های دانش بالادستی نفت هم استفاده شده است [۱۳]. روش میانگین کا [۱۴] از روش‌های مرسوم خوشه‌بندی است. یکی از محدودیت‌های اصلی این روش حساس بودن نتایج نهایی خوشه‌بندی به حدس اولیه تصادفی در مورد مرکز خوشه‌ها است. برای رفع این محدودیت می‌توان از ترکیب این روش با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی استفاده کرد [۱۵]. در خوشه‌بندی سلسله مراتبی، از ماتریس فاصله استفاده می‌شود. این ماتریس نشان‌دهنده فاصله بین هر زوج از مشاهدات است. با توجه به مقادیر این ماتریس، مشاهدات یا خوشه‌هایی که دارای کمترین فاصله هستند با هم ادغام می‌شوند و خوشه جدیدی می‌سازند. در مرحله بعد، باز هم فاصله بین مشاهدات و یا خوشه‌های جدید، توسط ماتریس فاصله که بروز رسانی شده، محاسبه و کار ادغام ادامه پیدا می‌کند تا تنها یک خوشه باقی بماند. در روش ترکیبی خوشه‌بندی، ابتدا از روش سلسله مراتبی استفاده شده و مراکز خوشه‌ها محاسبه می‌شوند. سپس، این مراکز به‌عنوان حدس اولیه در روش میانگین کا استفاده می‌شود. برای به‌دست آوردن تعداد بهینه خوشه‌ها، از شاخص صحت‌سنجی سیلهوتی استفاده می‌شود (رابطه ۶ تا رابطه ۱۰ بخش ضمایم) [۱۶]. این شاخص مقداری بین ۱- تا ۱ دارد. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده این است که یک ناحیه کاندیدای پایلوت درون خوشه درستی واقع شده است و مقادیر منفی نشان‌دهنده این است که این ناحیه متعلق به خوشه دیگری است.

برای کمی کردن مفهوم نماینده بودن مخزنی، از شاخص شباهت مخزنی استفاده می‌شود که عبارت از معکوس فاصله ناحیه کاندیدای پایلوت با مرکز خوشه غالب است. مرکز خوشه غالب عبارت از نقطه ثقل خوشه‌ای است که بیشترین تعداد اعضا (نواحی کاندیدای پایلوت) را دارد.

شاخص فرصت پایلوت برای نواحی کاندیدای پایلوت

شاخص فرصت پایلوت عددی است که نشان‌دهنده ارزش هر ناحیه کاندیدای پایلوت برای اجرا کردن پایلوت در آن است. با توجه به تعدد معیارها برای انتخاب مکان بهینه پایلوت، از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس (رابطه ۱۱ تا رابطه ۱۶ بخش ضمایم) [۱۷] برای محاسبه شاخص فرصت پایلوت استفاده می‌شود. از نمونه‌های موردی استفاده از این روش تصمیم‌گیری، می‌توان به اولویت‌بندی روش‌های مهار ماسه اشاره کرد [۱۸]. هر چه مقدار این شاخص در یک ناحیه کاندیدای پایلوت بالاتر باشد، مطلوبیت اجرای پایلوت در آن بیشتر است. براساس مقدار این شاخص می‌توان نواحی کاندیدای پایلوت را اولویت‌بندی و ناحیه با اولویت اول را جهت اجرای پایلوت انتخاب کرد. معیارهای دخیل در محاسبه شاخص فرصت پایلوت عبارتند از:

- شاخص شباهت مخزنی ناحیه پایلوت انتخابی: این شاخص نشان‌دهنده شدت نماینده بودن ناحیه پایلوت انتخابی از لحاظ رفتار دینامیکی با کل میدان است. هر چقدر این شاخص بالاتر باشد، مطلوبیت بیشتری از لحاظ نماینده بودن در آن ناحیه کاندیدای پایلوت وجود دارد.
- برهم‌کنش ناحیه پایلوت و ناحیه عملیات تولید: به جهت اطمینان از تفسیر داده‌های پایلوت، باید

کمترین تداخل بین چاه‌های ناحیه کاندیدای پایلوت و چاه‌های تولیدی اطراف این ناحیه وجود داشته باشد. برای کمی کردن این معیار، شعاع معادل الگو تعریف شد. شعاع معادل الگو برابر با شعاع متناظر با دایره‌ای است که از لحاظ مساحت برابر با مساحت مربع [۱۹] الگوی تزریقی- تولیدی پنج نقطه‌ای است. برای بررسی برهم‌کنش بین چاه‌های ناحیه پایلوت و چاه‌های تولیدی اطراف ناحیه پایلوت، از دو شاخص استفاده شد. شاخص اول، تعداد چاه‌های تولیدی که نزدیک ناحیه پایلوت هستند. نام این چاه‌ها، چاه‌های مداخله‌ای گذاشته شد. چاه‌های مداخله‌ای، چاه‌هایی هستند که فاصله آنها با حداقل یکی از چاه‌های پایلوت، کمتر از دو برابر شعاع معادل الگو باشد. شاخص دوم، متوسط فاصله چاه/ چاه‌های مداخله‌ای با چاه‌های پایلوت است. هر چقدر تعداد چاه‌های مداخله‌ای نسبت به یک ناحیه پایلوت، کمتر و فاصله این چاه‌ها با ناحیه پایلوت بیشتر باشد، مطلوبیت بیشتری از جهت برهم‌کنش بین چاه‌های تولیدی اطراف ناحیه پایلوت و چاه‌های پایلوت وجود دارد.

• سطح دانش: هر چه کیفیت و کمیت داده‌های موجود در ناحیه پایلوت بیشتر باشد، عدم قطعیت طراحی و ارزیابی پایلوت محدود می‌شود. برای کمی کردن این معیار از تعریف دامنه واریوگرام استفاده شد. در آمار فضایی واریوگرام تابعی است که شدت تغییرپذیری خاصیت را با افزایش فاصله نشان می‌دهد [۲۰]. دامنه واریوگرام[1] فاصله‌ای است که در آن می‌توان برای تخمین یک سلول مجهول از مقادیر موجود در مراکز سلول‌های دیگر تا آن فاصله استفاده نمود. از این‌رو برای تعیین سطح دانش در هر ناحیه کاندیدا از دو شاخص تعداد چاه‌های موجود در فاصله کمتر از دامنه واریوگرام تخلخل و متوسط فاصله‌این چاه‌ها با ناحیه کاندیدای پایلوت استفاده شد. هر چقدر نسبت به یک ناحیه کاندیدای پایلوت، تعداد این چاه‌ها بیشتر و فاصله اشاره شده کمتر باشد مطلوبیت بیشتری از لحاظ سطح دانش در آن ناحیه کاندیدای پایلوت وجود دارد.

• فاصله از تأسیسات رو زمینی موجود: فاصله ناحیه کاندیدای پایلوت از تأسیسات رو زمینی موجود به‌عنوان شاخصی است که هر مقدار این فاصله کمتر باشد بواسطه کاهش هزینه‌ها مطلوبیت بیشتری دارد.

• تعداد چاه‌های موجود قابل استفاده برای پیاده‌سازی پایلوت: تعداد چاه‌های موجود در هر ناحیه کاندیدای پایلوت که منطبق بر الگوی تولیدی- تزریقی پنج نقطه‌ای است. هر چقدر تعداد این چاه‌ها بیشتر باشد مطلوبیت بالاتری وجود دارد. علت این مهم کاهش هزینه‌ها برای حفر چاه‌های جدید در ناحیه کاندیدای پایلوت است.

معرفی مخزن

میدان مورد بررسی در جنوب غربی ایران قرار دارد. تولید این میدان از سال ۲۰۰۶ آغاز شده است. ۳۱ چاه در این میدان نفتی حفر شده و تولید از آن‌ها جریان دارد. ابعاد این میدان ۱۹ km در ۴ km است. ضخامت لایه نفتی آن هم حدود ۶۵ m است. حجم نفت درجای آن در حدود ۴ میلیارد بشکه است.

تعداد سلول‌های شبیه‌سازی این میدان ۲۲×۲۷۵×۸۸ است که ابعاد سطحی سلول‌ها ۱۰۰ m×۱۰۰ m و در جهت عمودی حدود ۳ m است. این میدان دارای ۱۵ گونه سنگی (رابطه تراوایی نسبی و منحنی فشار موئینگی) است. براساس طرح توسعه، تولید این میدان از ۲۰ MSTB/D باید به ۱۱۰ MSTB/D با سیلاب‌زنی آب افزایش پیدا کند. براساس مطالعات انجام شده لازم است تا قبل از طراحی و اجرای میدانی ازدیاد برداشت، پایلوت ازدیاد برداشت در این میدان اجرایی شود. از این‌رو، لازم است تا مکان پایلوت جهت کاهش عدم قطعیت‌های مترتب بر ازدیاد برداشت مشخص شود.

1. Variogram Range

خصوصیات مخزنی میدان مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. به‌علاوه، جهت اعمال شرایط و محدویت‌های عملیاتی سناریوهای شبیه‌سازی شده، مقدار نسبت جایگزینی آب به نفت و حداکثر برش آب تولیدی به‌ترتیب برابر ۱ (بدون بعد) و ۵۰٪ لحاظ شد. حداقل فشار درون چاهی برای چاه‌های تولید نفت و حداکثر فشار درون چاهی برای چاه‌های تزریق آب به‌ترتیب ۳۲۹۰ psi و ۵۸۸۰ psi در نظر گرفته شد.

بحث و نتایج

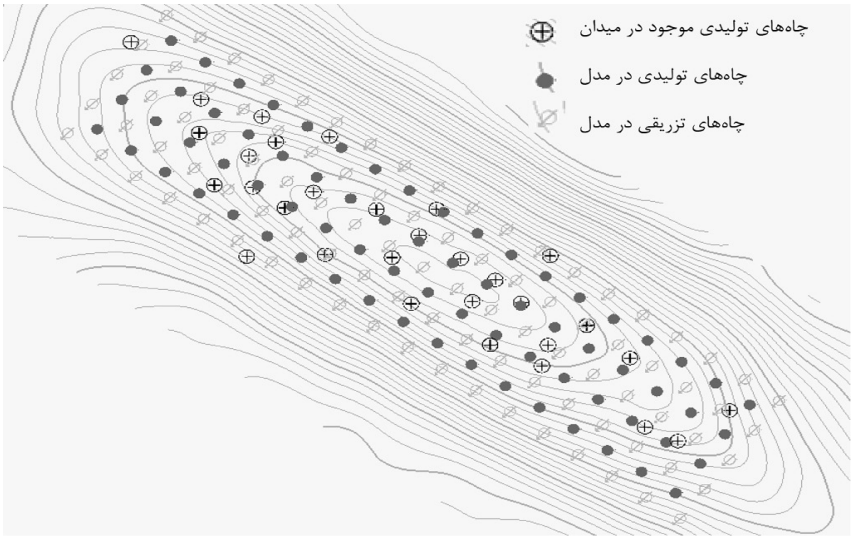
با اجرای الگوی پنج نقطه‌ای نرمال تولیدی-تزریقی می‌توان عدم قطعیت‌های مرتبط با ازدیاد برداشت از جمله ضریب جاروب عمودی، اشباع نفت باقی‌مانده، ضریب جاروب افقی، تزریق پذیری و بهره‌دهی را به‌دست آورد. با توجه به این الگوی پنج نقطه‌ای نرمال، چاه‌های تزریقی و تولیدی در سطح کل میدان مکان‌یابی شدند. مکان این چاه‌ها به‌همراه چاه‌های حفر شده فعلی در مخزن در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه این شکل، می‌توان نواحی کاندیدای پایلوت که متشکل از یک الگوی پنج نقطه‌ای تزریقی تولیدی است را شناسایی کرد. این نواحی در کنار شماره تخصیص یافته به آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. در مجموع ۷۲ ناحیه کاندیدای پایلوت شناسایی شد که از این تعداد نواحی کاندیدای شماره ۱۵ تا ۱۸ و ۵۵ و ۷۲ به‌علت شامل نبودن تمامی ۲۲ لایه مخزنی کنار گذاشته شدند. با توجه به این غربال‌گری، تعداد نواحی کاندیدای پایلوت ۶۶ مورد است. سپس، با استفاده از شبیه‌ساز مخزن، حجم نفت باقی‌مانده در هر سلول شبیه‌سازی محاسبه و نقشه کیفیت سه‌بعدی متناظر با آن برای مخزن مورد نظر ترسیم شد. به‌عنوان نمونه، نقشه حجم نفت باقی‌مانده دینامیکی در لحظه شروع، ده سال، بیست سال و سی سال پس از سیلاب‌زنی با آب در لایه پانزدهم مخزن در شکل ۳ نشان داده شده است.

براساس این نقشه‌ها، ضریب بازیافت نفت برای هر کدام از سلول‌های واقع در ناحیه کاندیدای پایلوت محاسبه شد. برای هر ناحیه کاندیدای پایلوت، آرایه ضریب بازیافت دارای ۱۴۰۸ درایه است که متناسب با تعداد سلول‌های هر ناحیه کاندیدای پایلوت است. با توجه به داشتن ۶۶ ناحیه کاندیدای پایلوت برای شناسایی تعداد رفتارهای متمایز با توجه به آرایه ضریب بازیافت از روش خوشه‌بندی (رابطه ۱ تا رابطه ۵ بخش ضمایم) استفاده می‌شود.

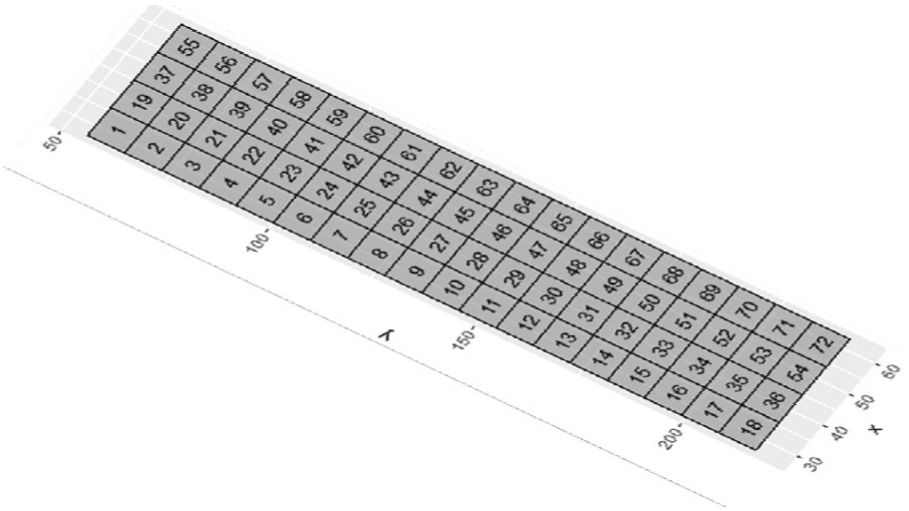
برای تشخیص تعداد بهینه خوشه‌ها، از شاخص صحت‌سنجی سیلهوتی استفاده می‌شود (رابطه ۶ تا رابطه ۱۰بخش ضمایم). این شاخص مقداری بین ۱- تا ۱ دارد. با تغییر تعداد خوشه‌ها، مقدار این شاخص تغییر کرده و بیشترین مقدار این شاخص مبین بهینه بودن تعداد خوشه‌ها است.

جدول ۱ خصوصیات مخزنی میدان مورد مطالعه

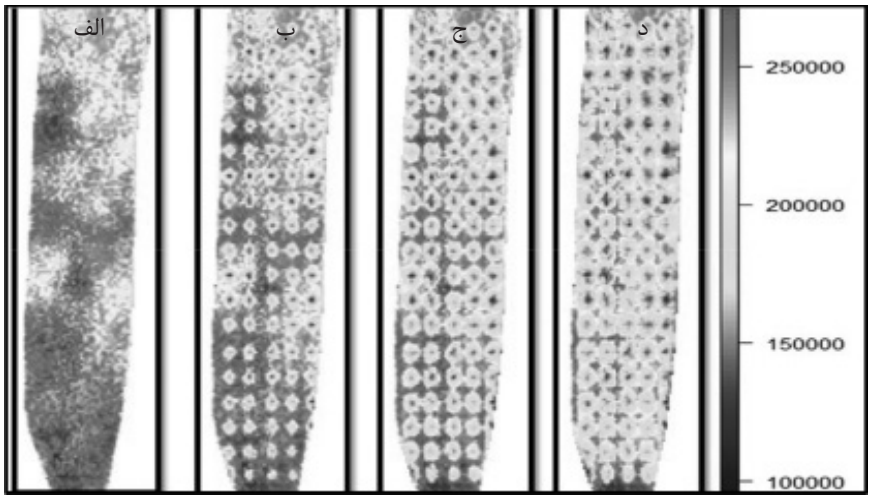
ردیف	خصوصیت مخزنی	مقدار	ردیف	خصوصیت مخزنی	مقدار
۱	فشار اولیه مخزن (psi)	۵۹۰۰	۶	متوسط تراوایی (md)	۵/۷
۲	دمای مخزن (°F)	۲۲۰	۷	متوسط تخلخل (٪)	۱۹
۳	حجم نفت در جای اولیه (MMMSTB)	۴/۶	۸	چگالی نفت در سطح (°API)	۲۵
۴	متوسط فشار کنونی مخزن (psi)	۴۵۵۰	۹	فشار اشباع نفت (psi)	۱۸۸۰
۵	حجم انباشتی نفت تولیدی (MMSTB)	۱۴۸	۱۰	فاکتور حجمی سازند (BBL/STB)	۱/۳



شکل ۱ مکان‌یابی چاه‌ها با الگوی پنج نقطه‌ای تولیدی تزریقی (تصویر از بالا)

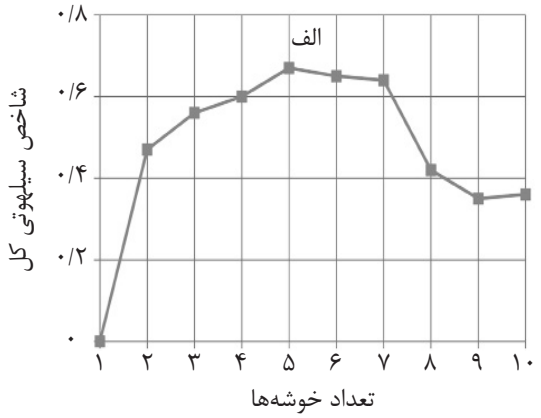


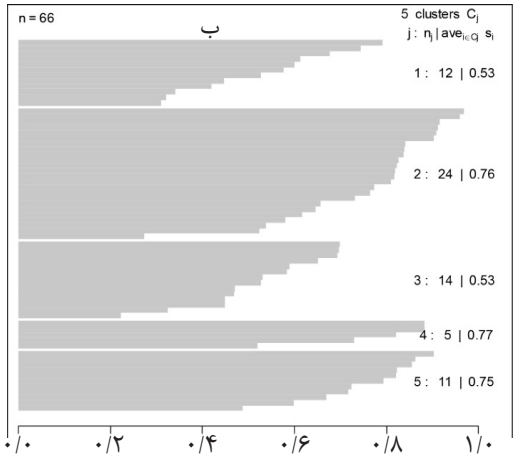
شکل ۲ موقعیت نواحی کاندیدای پایلوت به‌همراه شماره‌گذاری مربوطه



شکل ۳ نقشه حجم نفت باقی‌مانده در لایه پانزدهم مخزن در زمان‌های الف) لحظه شروع سیلاب‌زنی با آب، ب) پس از ده سال سیلاب‌زنی با آب، ج) پس از بیست سال سیلاب‌زنی با آب و د) پس از سی سال سیلاب‌زنی با آب

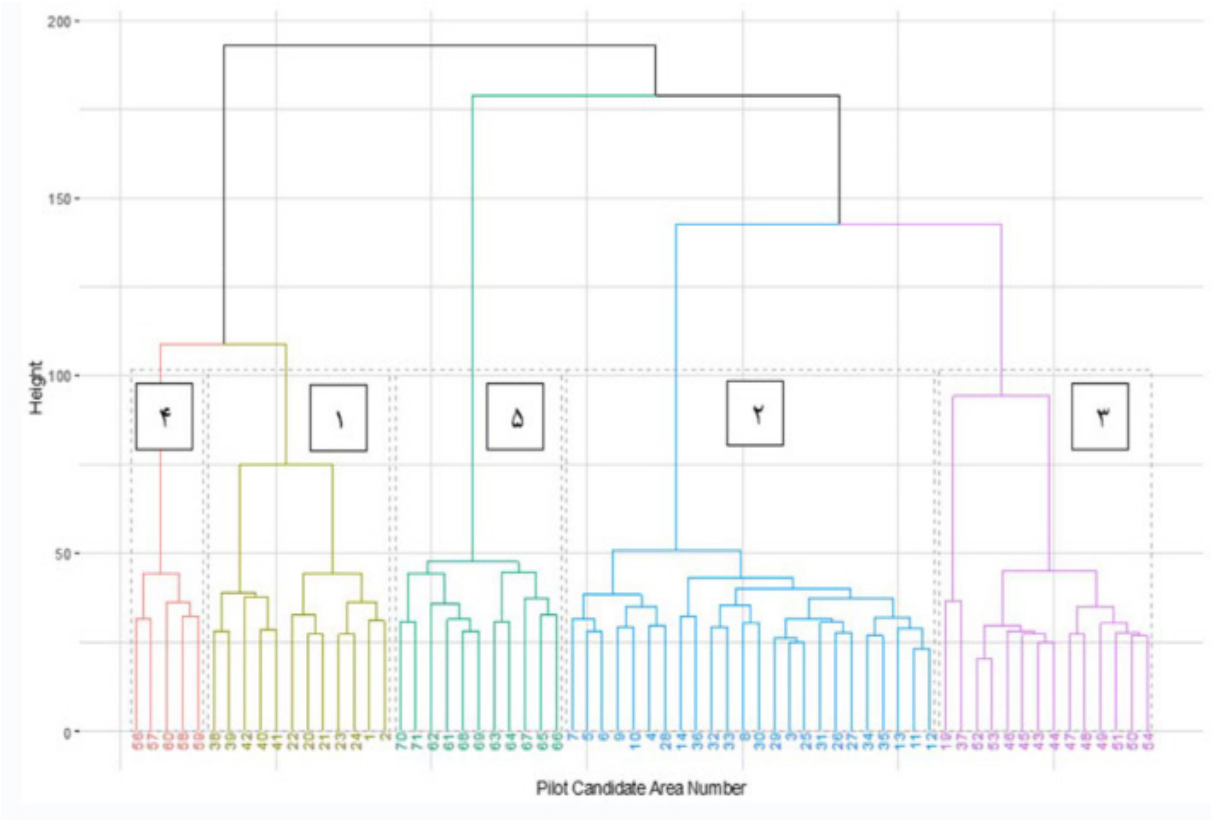
هر چه شباهت درون خوشه‌ای بیشتر باشد (فاصله فشردگی[1] کمتر باشد) و شباهت بین خوشه‌ای کمتر باشد (فاصله جدایش[2] بیشتر باشد) نشان‌دهنده این است که خوشه‌بندی بهتر انجام شده است. در شکل ۴- الف تغییرات شاخص سیلهوتی کل با تغییر تعداد خوشه‌ها نشان داده شده است. بر این اساس، تعداد بهینه خوشه‌ها برابر پنج است. در شکل ۴- ب محور عمودی آن ۶۶ ناحیه کاندیدای پایلوت و محور افقی آن شاخص سیلهوتی برای هر ناحیه کاندیدای پایلوت است. مقادیر نزدیک به یک این شاخص نشان‌دهنده این است که یک ناحیه کاندیدای پایلوت درون خوشه درستی واقع شده است و مقادیر منفی نشان‌دهنده این است که این ناحیه متعلق به خوشه دیگری است. مقادیر شاخص سیلهوتی هر یک از ۶۶ ناحیه کاندیدا در این شکل بین ۰/۵۳ تا ۰/۷۷ است که نشان‌دهنده صحت‌سنجی خوشه‌بندی انجام شده است (هیچ ناحیه کاندیدای پایلوتی به اشتباه در خوشه‌ای قرار نگرفته است). تعداد نواحی کاندیدای پایلوت در خوشه‌های شماره یک تا پنج به‌ترتیب برابر ۱۲، ۲۴، ۱۴، ۵ و ۱۱ است که مشخص می‌شود خوشه شماره دو بیشترین تعداد نواحی کاندیدای پایلوت را داشته و از این‌رو، خوشه غالب است. در شکل ۵ خوشه‌بندی سلسله مراتبی نواحی کاندیدای پایلوت با توجه به ماتریس ضرایب بازیافت نشان داده شده است که نشان می‌دهد خوشه شماره سه از لحاظ فاصله نزدیک‌ترین خوشه به خوشه غالب شماره ۲ است. در شکل ۵، اعداد رنگی شماره ناحیه کاندیدای پایلوت و اعداد داخل مربع‌ها شماره خوشه است. برای محاسبه شاخص شباهت مخزنی هر ناحیه کاندیدای پایلوت، معکوس فاصله آن ناحیه با مرکز خوشه غالب (خوشه شماره ۲) محاسبه شده است. هر چه این فاصله کمتر باشد مبین این است که آن ناحیه کاندیدای پایلوت مطلوبیت بیشتری از جهت مخزنی دارد و به عبارتی می‌تواند نماینده مخزنی باشد. برای محاسبه شاخص فرصت پایلوت هر ناحیه کاندیدا، برای معیارهای شاخص شباهت مخزنی، برهم‌کنش ناحیه پایلوت و ناحیه عملیات تولید شامل تعداد چاه‌های موجود در فاصله کمتر از دو برابر شعاع تخلیه ناحیه کاندیدای پایلوت و متوسط فاصله‌این چاه‌ها با ناحیه کاندیدای پایلوت، سطح دانش شامل تعداد چاه‌های موجود در فاصله کمتر از دامنه واریوگرام و متوسط فاصله این چاه‌ها با ناحیه کاندیدای پایلوت، فاصله از تأسیسات رو زمینی موجود و تعداد چاه‌های موجود قابل استفاده برای پیاده‌سازی پایلوت به‌ترتیب وزن‌های ۰/۳۳، ۰/۱۴۵، ۰/۱۴۵، ۰/۰۵۵، ۰/۰۵۵، ۰/۰۹ و ۰/۱۸ براساس نظر متخصصان استفاده شد.





شکل ۴ شاخص صحت‌سنجی خوشه‌بندی برای آرایه ضریب بازیافت الف) تغییرات مقدار شاخص سیلهوتی کل با تغییر تعداد خوشه‌ها ب) مقدار شاخص سیلهوتی هر ناحیه کاندیدای پایلوت

1. Compactness Distance
2. Separation Distance



شکل ۵ خوشه‌بندی سلسله مراتبی نواحی کاندیدای پایلوت با توجه به آرایه ضرایب بازیافت

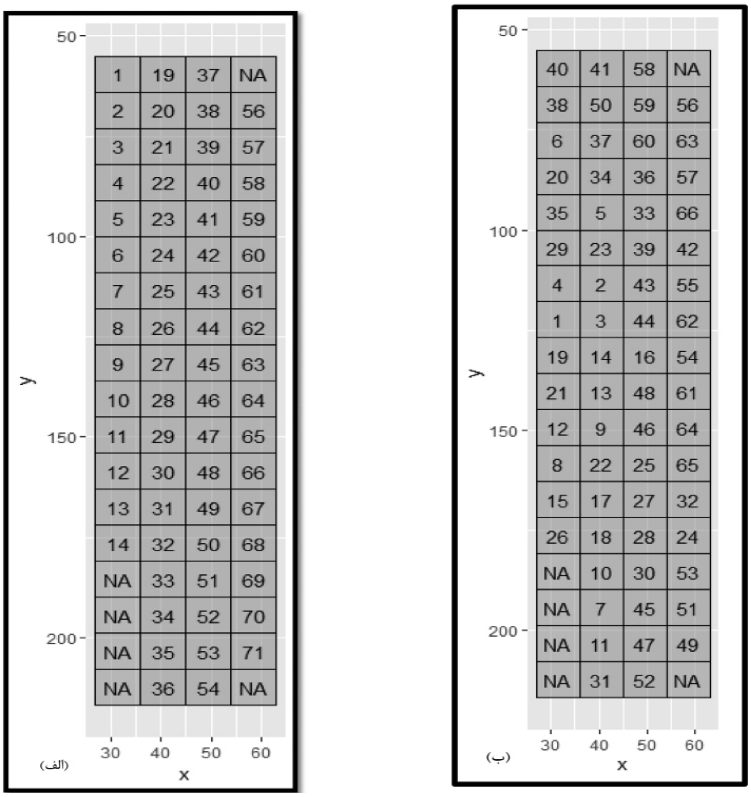
با توجه به مقادیر معیارهای فوق برای هر کدام از نواحی کاندیدای پایلوت و استفاده از رابطه ۱۱ تا رابطه ۱۶بخش ضمایم، شاخص فرصت پایلوت برای هر ناحیه کاندیدا محاسبه شد. به‌عنوان نمونه، مقادیر معیارها در نواحی کاندیدای پایلوت شماره ۸، ۲۵، ۲۶ و ۷ در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌علاوه، مقدار شاخص فرصت پایلوت در این چهار ناحیه کاندیدای برتر در جدول ۳ نشان داده شده است که نشان می دهد ناحیه کاندیدای شماره ۸ با داشتن مقدار شاخص فرصت پایلوت برابر ۰/۶۵ ناحیه انتخابی برای پیاده‌سازی پایلوت است. براساس این دو جدول، علی‌رغم بیشتر بودن شاخص شباهت مخزنی در ناحیه کاندیدای شماره ۲۵ نسبت به شماره ۸، اما وجود یک چاه تداخلی که صحت نتایج اجرای پایلوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد باعث شد که ناحیه ۲۵ رتبه اول برای اجرای پایلوت را نداشته باشد. در شکل ۶- الف نواحی کاندیدای پایلوت نشان داده شده است. شماره هر ناحیه در این قسمت مبین شناسه آن ناحیه کاندیدای پایلوت است. در شکل ۶- ب هم رتبه هر ناحیه کاندیدای پایلوت با توجه به مقدار شاخص فرصت پایلوت نشان داده شده است که بر این اساس ناحیه کاندیدای پایلوت شماره ۸ با داشتن رتبه اول به‌عنوان ناحیه پایلوت انتخاب می‌شود.

جدول ۲ ضرایب وزنی و مقادیر معیارها جهت محاسبه شاخص فرصت پایلوت در چهار ناحیه کاندیدای برتر

نام معیار	وزن معیار (٪)	شماره ناحیه کاندیدای پایلوت			
		۸	۲۵	۲۶	۷
شاخص شباهت مخزنی	۳۳	۰/۷۴	۰/۸۷	۰/۷۳	۰/۶۸
تعداد چاه‌های موجود در فاصله کمتر از دو برابر شعاع تخلیه ناحیه کاندیدای پایلوت (چاه‌های تداخلی)	۱۴/۵	۰	۱	۱	۱
متوسط فاصله چاه/ چاه‌های تداخلی با ناحیه کاندیدای پایلوت (m)	۱۴/۵	–	۳۱۶	۳۶۱	۵۳۹
تعداد چاه‌های موجود در فاصله کمتر از دامنه واریوگرام تخلخل (چاه‌های مجاور)	۵/۵	۲	۴	۴	۳
متوسط فاصله چاه/ چاه‌های مجاور با ناحیه کاندیدای پایلوت (m)	۵/۵	۱۰۰۵	۹۳۸	۹۶۳	۱۰۲۱
فاصله ناحیه کاندیدای پایلوت تا تاسیسات رو زمینی (km)	۹	۱۲/۸	۱۳/۱	۱۲/۲	۱۳/۵
تعداد چاه‌های مناسب برای استفاده به‌عنوان چاه پایلوت	۱۸	۱	۱	۱	۱

جدول ۳ شماره خوشه و مقدار شاخص فرصت پایلوت در چهار ناحیه کاندیدای برتر

شماره ناحیه کاندیدای پایلوت	شماره خوشه	مقدار شاخص فرصت پایلوت
۸	۲	۰/۶۵
۲۵	۲	۰/۶۳
۲۶	۲	۰/۵۹
۷	۲	۰/۵۸



شکل ۶ الف) شماره نواحی کاندیدای پایلوت و ب) رتبه هر ناحیه کاندیدای پایلوت با توجه به شاخص فرصت پایلوت

نتیجه‌گیری

انتخاب ناحیه مناسب پایلوت در مخزن هیدروکربنی مسأله مهمی است چرا که براساس تفسیر داده‌های حاصل از اجرای پایلوت ازدیاد برداشت در آن منطقه، طراحی ازدیاد برداشت برای کل مخزن انجام خواهد شد. این مسأله معیار محور، دارای دو دسته اصلی معیارهای زمین‌شناسی- مخزنی و عملیاتی- اقتصادی است. معیار زمین‌شناسی- مخزنی ناظر بر مفهوم نماینده بودن مخزن از لحاظ رفتار تولیدی است. از آنجا که قرار است محل پایلوت، نماینده هدف ازدیاد برداشت وسیع‌تری باشد؛ از این‌رو، باید دارای شرایط مشابه با مخزن باشد. بدین منظور در ابتدا، مدل خصوصیات مخزنی از جمله تخلخل، تراوایی، اشباع نفت، اشباع آب و توابع تراوایی نسبی به شبیه‌ساز مخزنی به‌عنوان ورودی داده شد. سپس با اجرای شبیه‌سازی مخزنی سناریوی ازدیاد برداشت، نقشه‌های سه‌بعدی مقدار نفت باقی‌مانده و ضریب بازیافت به‌عنوان خروجی شبیه‌ساز محاسبه شد. در ادامه، تحلیل خوشه‌بندی ترکیبی برروی ماتریس ضریب بازیافت نواحی کاندیدای پایلوت انجام شد. ستون‌های این ماتریس مقادیر ضریب بازیافت تمامی سلول‌های تشکیل‌دهنده ناحیه پایلوت در جهت سطحی و عمودی و سطرهای این ماتریس، مربوط به هر کدام از نواحی کاندیدای پایلوت است. بر این اساس، نواحی کاندیدای پایلوت به شکل بهینه دسته‌بندی شده و نواحی کاندید مشابه در یک دسته قرار گرفتند. سپس، با توجه به فاصله هر ناحیه کاندید با مرکز خوشه غالب (دسته‌ای که بیشترین تعداد نواحی کاندیدا را دارد)، شدت معیار نماینده بودن مخزنی به شکل کمی مشخصه‌سازی شد. به‌علاوه، معیارهای عملیاتی- اقتصادی به جنبه‌های عدم قطعیت و اقتصاد در انتخاب ناحیه پایلوت اشاره دارد. این معیارها عبارت از سطح دانش، برهم‌کنش ناحیه پایلوت و ناحیه عملیات تولید، فاصله تا تأسیسات رو زمینی و امکان استفاده از چاه‌های تولید کنونی است. با توجه به مقادیر معیارهای فوق و استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس، شاخص جدیدی با عنوان شاخص فرصت پایلوت برای هر ناحیه کاندیدا محاسبه و براساس آن نواحی کاندیدای پایلوت اولویت‌بندی شدند. در نمونه موردی که روش‌شناسی فوق برروی آن اجرا شد، روش سیلاب‌زنی با آب با توجه به نتایج غربال‌گری و طرح توسعه میدان شبیه‌سازی شد. با توجه به بیشترین مقدار شاخص فرصت پایلوت در ناحیه کاندیدای شماره ۸، این ناحیه به‌عنوان ناحیه پایلوت انتخاب شد. این ناحیه کمترین فاصله را با نقطه‌ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را با نقطه ایده‌آل منفی دارد. نقاط ایده‌آل مثبت و منفی، به‌ترتیب متشکل از بهترین و بدترین مقادیر معیارهای زمین‌شناسی- مخزنی و عملیاتی- اقتصادی است. روش‌شناسی ارائه شده در انتخاب مکان پایلوت به‌عنوان نوآوری پژوهش انجام شده، قابلیت اجرا برروی مخازن مختلف نفتی با روش ازدیاد برداشت انتخاب شده برای آن مخزن را دارد. از این‌رو، این روش قابلیت توسعه برای اجرا برروی سایر مخازن با دیگر روش‌های ازدیاد برداشت از جمله سیلاب‌زنی با گاز و سیلاب‌زنی با مواد شیمیایی را دارد. پیشنهاد می‌شود جهت ارتقا و توسعه روش‌شناسی ارائه شده در این مقاله، علاوه‌بر الگوی تولیدی- تزریقی پنج نقطه‌ای نرمال، سایر الگوها مورد بررسی قرار گیرند. به‌علاوه، معیارهای دیگر (در صورت وجود) در کنار معیارهای ارائه شده در انتخاب مکان پایلوت لحاظ شوند.

ضمیمه

J تابع هدف خوشه‌بندی است که باید بهینه شود (رابطه ۱). X فضای چند بعدی است که تعداد n ناحیه کاندیدای پایلوت در آن وجود دارد و قرار است این نواحی در تعداد c خوشه قرار بگیرند. شرایط حاکم بر این مسأله بهینه‌سازی در رابطه ۲ تا رابطه ۵ نشان داده شده است. d_{ij} فاصله اقلیدسی ناحیه کاندیدای پایلوت jام از مرکز خوشه iام است

پژوهش نفت شماره ۱۱۸، مرداد و شهریور ۱۴۰۰، صفحه ۱۶-۳

(رابطه ۳). به‌علاوه، u_{ij} میزان تعلق ناحیه کاندیدای پایلوت jام به خوشه iام را نشان می‌دهد که مقدار آن یکی از اعداد صفر یا یک است (رابطه ۴). مراکز خوشه‌ها هم از طریق رابطه ۵ به‌دست می‌آیند. بهینه‌سازی تابع هدف J مبتنی بر حدس اولیه‌ای برای مراکز خوشه‌ها است. سپس، فاصله هر ناحیه کاندیدا با مرکز هر خوشه از طریق رابطه ۳ محاسبه شده و آن ناحیه کاندیدا به خوشه‌ای تخصیص پیدا می کند که فاصله کمتری با مرکز آن داشته باشد. بعد از این اختصاص، u_{ij} از طریق رابطه ۴ بروزرسانی شده و بالتبع، مراکز خوشه‌ها هم از طریق رابطه ۵ بروز رسانی می‌شوند. بروزرسانی متداوم رابطه ۳ تا رابطه ۵ که منجر به بهینه‌سازی رابطه ۱ می‌شود تا زمانی ادامه خواهد داشت که تغییرات در مراکز خوشه‌ها به حداقل برسد. در روش ترکیبی خوشه‌بندی کا و سلسله مراتبی، حدس اولیه برای مراکز خوشه‌ها، از طریق روش سلسله مراتبی به‌دست می‌آید.

$$J(X,C,U)=\sum_{i=1}^{c}\sum_{j=1}^{n}u_{ij}{d_{ij}}^{2} \quad (۱)$$

$$(\forall i;1\le i\le c)\ \&\ (\forall j;1\le j\le n)\ \&\ (u_{ij}\in\{1,0\})\ \&\ (\forall j;1\le j\le n:\sum_{i=1}^{c}u_{ij}=1) \quad (۲)$$

$${d_{ij}}^{2}=d^{2}(c_i,x_j)=(x_j-c_i)^{T}(x_j-c_i)=\sum_{k=1}^{m}(x_{jk}-c_{ik})^{2} \quad (۳)$$

$$u_{ij}=\begin{Bmatrix}1,if\ (i=\arg\min_{i=1}^{c}d_{ij}^{2})\\0,otherwise\end{Bmatrix} \quad (۴)$$

$$c_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}u_{ij}x_j^{2}}{\sum_{j=1}^{n}u_{ij}} \quad (۵)$$

برای صحت‌سنجی خوشه‌بندی، از شاخص سیلهوتی استفاده می‌شود. محاسبه این شاخص، مبتنی بر محاسبه فاصله فشردگی (شباهت درون خوشه‌ای) و فاصله جدایش (شباهت بین خوشه‌ای) است. هر چه شباهت درون خوشه‌ای بیشتر باشد (فاصله فشردگی کمتر باشد) و شباهت بین خوشه‌ای کمتر باشد (فاصله جدایش بیشتر باشد) نشان‌دهنده این است که خوشه‌بندی بهتر انجام شده است. فرض می‌شود که برای هر نقطه (ناحیه کاندیدای پایلوت) M_i میانگین فاصله درون خوشه‌ای که با $a(i)$ نشان داده شده است، عبارت از فاصله متوسط نقطه M_i با دیگر نقاط خوشه‌ای است که نقطه M_i به آن تعلق دارد. با فرض تعلق این نقطه به خوشه شماره k، از طریق رابطه ۶ می‌توان فاصله متوسط درون خوشه‌ای را برای این نقطه محاسبه کرد. میانگین فاصله بین خوشه‌ای هم که با $\delta(M_i,C_{k'})$ نشان داده شده است، عبارت از فاصله متوسط نقطه M_i با تمامی نقاط درون خوشه k' (خوشه‌ای که نقطه مورد نظر به آن تعلق ندارد) است که از رابطه ۷ به‌دست می‌آید. کمترین فاصله متوسط بین خوشه‌ای را با $b(i)$ نشان می‌دهند. برای هر نقطه M_i شاخص سیلهوتی با رابطه ۸ تعریف می‌شود. این شاخص مقداری بین ۱- تا ۱ دارد. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده این است که نقطه M_i درون خوشه درستی واقع شده است و مقادیر منفی نشان‌دهنده این است که نقطه M_i متعلق به خوشه دیگری است. سیلهوتی متوسط خوشه‌ای برای خوشه k با رابطه ۹ محاسبه می‌شود. شاخص سیلهوتی کل هم از رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید. با تغییر تعداد خوشه‌ها، مقدار این شاخص تغییر کرده و بیشترین مقدار این شاخص مبین بهینه بودن تعداد خوشه‌ها است.

$$a(i)=\frac{1}{n_k-1}\sum_{i\in I_k,i'\neq i}d(M_i,M_{i'}) \quad (۶)$$

$$\delta(M_i,C_{k'})=\frac{1}{n_{k'}}\sum_{i'\in I_{k'}}d(M_i,M_{i'}) \quad (۷)$$

$$s(i)=\frac{b(i)-a(i)}{\max(a(i),b(i))} \quad (۸)$$

$$s_k=\frac{1}{n_k}\sum_{i\in I_k}s(i) \quad (۹)$$

$$C=\frac{1}{K}\sum_{K=1}^{K}s_k \quad (۱۰)$$

روش تاپسیس یکی از تکنیک‌های مورد استفاده در تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی گزینه‌ها است. با توجه به رابطه ۱۱ ماتریس تصمیم s دارای m گزینه و n معیار است. در ابتدا ماتریس تصمیم نرمال Y (رابطه ۱۳) با استفاده از تابع نشان داده شده در رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود. سپس ماتریس نرمال شده وزن دار با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه

می‌شود. در این روش دو گزینه فرضی ایده‌آل مثبت و ایده آل منفی تعریف می‌شوند که به‌ترتیب مجموعه‌ای از بهترین و بدترین مقادیر مشاهده شده در ماتریس تصمیم‌گیری است. فاصله هر گزینه با نقاط ایده‌آل مثبت و منفی با استفاده از رابطه ۱۵ به‌دست می‌آید. امتیاز هر گزینه در این روش با استفاده از رابطه ۱۶محاسبه می‌شود و گزینه‌ها مطابق این نمرات رتبه‌بندی می‌شوند. براساس این روش، امتیاز بالاتر متعلق به گزینه‌هایی خواهد بود که تا حد امکان به گزینه ایده‌آل مثبت نزدیک و از گزینه ایده‌آل منفی دور باشند. با استفاده از این روش می‌توان شاخص فرصت پایلوت برای نواحی کاندیدای پایلوت را به‌دست آورد. هر ناحیه‌ای که نمره بالاتری داشته باشد دارای اولویت بالاتری برای پیاده‌سازی پایلوت در آن ناحیه است.

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & \cdots & s_{mn} \end{pmatrix} \quad (۱۱)$$

$$y_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} s_{ij}^{\,2}}} \quad (۱۲)$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (۱۳)$$

$$Y' = Y \otimes W = \begin{pmatrix} y_{11}w_1 & \cdots & y_{1n}w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1}w_1 & \cdots & y_{mn}w_n \end{pmatrix} \quad (۱۴)$$

(۱۵)

$$I_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (y'_{ij} - y_j'^{+})^2}, I_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (y'_{ij} - y_j'^{-})^2} (i = 1,...,m; j = 1,...,n)$$

$$R_i = \frac{I_i^-}{I_i^+ + I_i^-} (0 < R_i < 1; i = 1,...,m) \quad (۱۶)$$

مراجع

[1]. Teletzke G F, Wattenbarger R C, Wilkinson J R (2010) Enhanced oil recovery pilot testing best practices, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 13: 143–154.

[2]. Zhao X L, Yan L, Qiang W, Yong J G, Ming G, Zheng B W, Wan L L (2020) Status and progress of worldwide EOR field applications, Journal of Petroleum Science and Engineering, 1, 193: 107449.

[3]. Chai C F, Adamson G R, Lo S W, Agarwal B, Ritom S, Du K, Azizan N (2011) St Joseph Chemical EOR Pilot-A key de-risking step prior to offshore ASP full field implementation, In SPE enhanced oil recovery conference, Society of Petroleum Engineers.

[4]. Ozen O, Wahlheim T A, Attia T, Barrios L, Ab Majid M B, Wilkinson J (2014) Dukhan field CO_2 injection EOR pilot: reservoir modeling and planning, In IPTC: International Petroleum Technology Conference.

[5]. Ali H A, Musa T A and Doroudi A (2015) Chemical enhanced oil recovery pilot design for heglig main field-sudan, In SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.

[6]. Saniez J A M, VandeBeuque S, Ekpenyong D E, Bastos N, Wantong P, Salley B, Al-yafei A (2012) State of the art of geoscience and reservoir integrated study for EOR CO_2 pilot Implementation: example of a giant carbonate reservoir of Arabian Gulf (UAE), In Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.

[7]. Sharma S, Kamal D, Al-Maraghi E, AlMahrooqi S, Winkler M (2016) Miscible gas EOR pilot design decisions driven by linking EOR performance parameters to uncertainties-A Kuwait field example, In SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia, Society of Petroleum Engineers.

[8]. 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, In SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.

[9]. Sandoval J R, Manrique E J, Perez H H, Maya G A, Romero J L, Castro Garcia R H, Hinestrosa J M L (2010) Dina cretaceo field chemical eor: from screening to pilot design, In SPE Latin American and Caribbean.

Petroleum Engineering Conference, Society of Petroleum Engineers.
[10]. Chen X, Feng Q, Wu X, Zhao G (2016) A pilot numerical simulation case study for chemical EOR feasibility evaluation, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 6: 297–307.
[11]. James G, Witten D, Hastie T, Tibshirani R (2017) An introduction to statistical learning, 112: 18, New York: springer.
[12]. Gorunescu F (2011) Data mining: concepts, models and techniques, 1st edition, Springer Science and Business Media, 12: 1-397.
[۱۳]. زهره‌وند م.، شکاری فرد ع. و توکلی و. (۱۳۹۸) کاربرد تحلیل خوشه‌ای داده‌های ژئوشیمی نفت برای تعیین پیوستگی مخزن سروک در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران، پژوهش نفت، دوره ۲۹، بهمن و اسفند، صفحات ۷۹-۹۵.
[14]. Borgelt C (2013) Objective functions for fuzzy clustering, In Computational Intelligence in Intelligent Data Analysis, Springer, Berlin, Heidelberg, 3–16.
[15]. Chen B, Tai P C, Harrison R (2005) Novel hybrid hierarchical-K-means clustering method (H-K-means) for microarray analysis, IEEE Computational Systems Bioinformatics Conference, USA.
[16]. Rousseeuw P J (1987) A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, Journal of Computational and Applied Mathematics, 1, 20: 53–65.
[17]. Yoon K P, Hwang C (1995) Multiple attribute decision making: An Introduction, 1st edition, California, SAGE publications, 1-73.
[۱۸]. کرد ش.، هاشمی ع.، رجبی م. و صالحی ر. (۱۳۹۹) غربال‌گری روش‌های مهار ماسه برای یکی از چاه‌های جنوب غرب ایران با استفاده از الگوریتم تاپسیس، پژوهش نفت، ، دوره ۳۰، مهر و آبان، صفحات ۱۰۵-۱۱۷.
[19]. Craig F F (1971) The Reservoir engineering aspects of waterflooding, 1st edition, H L Doherty Memorial Fund of AIME, 1-134.
[20]. Pyrcz M J, Deutsch C V (2002) Geostatistical reservoir modeling, 2nd edition, Oxford University Press, New York, 1-448.

Petroleum Research
Petroleum Research, 2021(August-September), Vol. 31, No. 118, 1-2
DOI: 10.22078/pr.2020.4303.2951

Enhanced Oil Recovery Pilot Area Selection in Mature Fields Development Using Coupled the TOPSIS and Hybrid Clustering Methods

Seyed Mahdia Motahhari[1], Mehdi Rafizadeh*[2], Seyed Mahmoud Reza Pishvaie[3] and Mohammad Ahmadi[1]
1. Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Iran
2. Department of Polymer Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Iran
3. Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
mehdi@aut.ac.ir
DOI: 10.22078/pr.2020.4303.2951

Received: September/27/2020 Accepted: December/16/2020

Introduction

Maximizing the recovery factor and economic profit are the main goals of enhanced oil recovery (EOR) methods. Pilot design plays a vital role in the road map of EOR planning and risk reduction. Therefore, EOR pilots are conducted to reduce uncertainty in EOR performance [1]. In the last 50 years, a significant number of EOR field pilots has been studied and the gained experience has been used the oil and gas industry [2]. The results of the implementation of EOR pilots may increase consciousness regarding hydrocarbon field behavior and EOR scenarios designed for entire hydrocarbon field. Pilot area selection is one of the imperative factors in designing an EOR. The objective of the pilot location studies is determining how to narrow down the pilot candidate areas from the field extent to only an optimum area of interest. In the literature review, the reservoir area is filtered to select the pilot area according to some merit parameters [3-5]. In addition, the reservoir is divided into a number of areas, and the pilot area is selected on the basis of a semi-quantitative approach [6-8].

Materials and Methods

In this paper, a methodology is presented to select the location of the pilot for an EOR project. To do so, a pilot opportunity index is introduced. The proposed index is defined based on integration of reservoir quality maps (from reservoir simulations), hybrid hierarchical k-means clustering and the TOPSIS as a multi-criteria decision-making method. Ultimately, the presented method is applied to a real reservoir case, and the optimum pilot area is thereby determined.

Results and Discussion

The arrays of RF are applied to quantitatively characterize the reservoir behavior in an area. The hybrid hierarchical k-means clustering is then employed to group areas so that areas within each cluster are similar to each other, while areas from different clusters are dissimilar. In other words, they determine the optimal number of the reservoir behaviors among 66 candidate areas with respect to arrays of RF. The candidate areas were grouped into five clusters with respect to the RF arrays. To calculate the POI of each candidate area, the criteria of Reservoir Similarity Index (RSI), the number of interfered wells, the average distance between these wells and a candidate area, the number of adjacent wells, the average distance of these wells to candidate area, the distance between a candidate area and surface facilities, and finally, the number of existing applicable wells for running a pilot have been considered with the weight factors of 0.33, 0.145, 0.145, 0.055, 0.055, 0.09 and 0.18, respectively. The candidate area number 8 has the first priority to be selected as the pilot area.

Conclusions

In this study, a novel systematic and quantitative approach consisting of reservoir-geology and operational-economic criteria has been presented. A cluster analysis as an unsupervised machine learning

method could be applied to quantify reservoir representative intensity values. MCDMs as decision-making methods have been utilized to integrate the factors, i.e. the number of interfered wells, the average distance between these wells and a candidate area, number of adjacent wells, the average distance of these wells to candidate area, the distance between a candidate area and surface facilities, and number of existing applicable wells for running a pilot, in addition to RSI criteria with each other, and thereby, a new index called the POI has been presented. A field of study is segmented into 66 pilot candidate areas. Afterwards, corresponding RF array of the areas are optimally clustered in 5 clusters based on simulated annual 3-D reservoir quality maps of remaining oil volume. A hybrid integration of the hierarchical k-means clustering and TOPSIS resulted in the highest value of POI in area number 8. Ultimately, the methodology presented in this paper has the capability to be extended to all EOR methods. Various EOR methods such as miscible gas and chemical flooding can be simulated to compute RF array. Furthermore, it is suggested that for enhancing and developing the presented methodology, other well patterns will be examined, and another criterion in addition to the mentioned criteria will be respected.

References

1. Teletzke G F, Wattenbarger R C and Wilkinson J R (2010) Enhanced oil recovery pilot testing best practices, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 13: 143–154.
2. Zhao X L, Yan L, Qiang W, Yong J G, Ming G, Zheng B W and Wan L L (2020) Status and progress of worldwide EOR field applications, Journal of Petroleum Science and Engineering, 193: 107449.
3. Chai C F, Adamson G R, Lo S W, Agarwal B, Ritom S and Du K, Azizan N (2011) St Joseph Chemical EOR Pilot-A key de-risking step prior to offshore ASP full field implementation, In SPE enhanced oil recovery conference, Society of Petroleum Engineers.
4. Ozen O, Wahlheim T A, Attia T, Barrios L, Ab Majid M B and Wilkinson J (2014) Dukhan Field CO_2 Injection EOR Pilot: Reservoir Modeling and Planning, In IPTC: International Petroleum Technology Conference.
5. Ali H A, Musa T A and Doroudi A (2015) Chemical Enhanced Oil Recovery Pilot Design for Heglig Main Field-Sudan, In SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
6. Saniez J A M, VandeBeuque S, Ekpenyong D E, Bastos N, Wantong P, Salley B and Al-yafei A (2012) State of the art of geoscience and reservoir integrated study for EOR CO2 pilot Implementation: example of a giant carbonate reservoir of Arabian Gulf (UAE), In Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.
7. Sharma S, Kamal D, Al-Maraghi E, AlMahrooqi S and Winkler M (2016) Miscible Gas EOR Pilot Design Decisions Driven by Linking EOR Performance Parameters to Uncertainties-A Kuwait Field Example, In SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia, Society of Petroleum Engineers.
8. Al-Dhuwaihi A S, Abdullah M B, Tiwari S, Al-Murayri M T, Al-Mayyan H, Shahin G T and Shukla S (2017) Fit-for-Purpose Chemical EOR ASP Modeling Strategy to Guide Pilot Development Decisions for a Giant Reservoir in North Kuwait, In SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers.