نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره یازدهم، شماره ۳۱، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۱ تا ۲۷
Vol.11, No. 31, 2016, pp11-27

استفاده از الگوریتم بلوک‌بندی و خوشه‌سازی به‌منظور تعیین مرز لایه‌های زمین‌شناسی در مخازن کربناته

حسن باقری[۱] ؛ فرهاد خوشبخت[۲*]

۱- زمین شناس نفت، اداره زمین شناسی، شرکت ملی حفاری، hb.hasanbagheri@gmail.com
۲- عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت تهران، khoshbakhtf@ripi.ir

(دریافت ۱۸ دی ۱۳۹۳، پذیرش۲۴ آذر ۱۳۹۴)

چکیده

تغییرات دقیق لایه‌بندی و تشخیص مرزبندی بین آن‌ها با استفاده از قرائت نمودارهای پتروفیزیکی، مشکلی اساسی در پردازش داده‌های پتروفیزیکی است. در مطالعه حاضر، مرزهای لایه‌بندی زمین‌شناسی یک مخزن کربناته به دو روش تعیین شدند و پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات با توجه به مرزهای مشخص شده، به‌صورت لایه به لایه در توالی مورد بررسی محاسبه شدند. ابتدا در روش اول، با استفاده از الگوریتم بلوکینگ، اثرات نویزی (محیط چاه) و اثر لایه‌های جانبی از قرائت نمودارهای پتروفیزیکی برداشته شد و تغییرات ناگهانی در روی این نمودارها با استفاده از فیلتر لاپلاسین به‌عنوان مرز لایه‌ها معرفی شد. در روش دوم، با استفاده از خوشه‌سازی نمودارها (روش MRGC)، رخساره‌های الکتریکی در توالی مخزن مورد مطالعه تعیین شدند و مرز این رخساره‌ها به‌عنوان مرز لایه‌بندی زمین‌شناسی تعریف شدند. نمودارهای ورودی در هر دو روش مشترک و شامل GR، RHOB، NPHI، DT و PEF بودند. در مرحله بعد، پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات در هر دو روش با اعمال مرزهای تعیین شده به‌صورت لایه به لایه محاسبه شد سپس با روش متداول ارزیابی پتروفیزیکی مقایسه شد. محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی با استفاده از روش نوین احتمالی انجام شد. محاسبات انجام شده نشان داد که برخلاف روش‌های متداول ارزیابی پتروفیزیکی که پارامترهای مخزنی را به‌صورت میانگین و پیوسته در طول یک مخزن محاسبه می‌کند، با مشخص کردن مرز لایه‌های موجود در توالی یک مخزن، پارامترهای پتروفیزیکی به‌صورت لایه به لایه و با دقت بالاتری محاسبه خواهد شد. درنتیجه با این روش می‌توان بهترین و ضعیف‌ترین لایه‌های موجود در یک مخزن را با اطمینان کامل شناسایی و بررسی کرد و همچنین در بهره‌برداری از لایه‌های مختلف در یک مخزن، با دید بهتری عمل کرد. مطالعه حاضر در مخازن با لایه‌بندی متناوب و نازک لایه اهمیت بیشتری دارد.

کلمات کلیدی

الگوریتم بلوکینگ، خوشه‌سازی، مرز لایه ، پارامترهای پتروفیزیکی

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

دقت محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات یک مخزن، امری بسیار مهم در مطالعات مخازن هیدروکربوری است. چون دسترسی مستقیم و مشاهده مستقیم مخزن در زیر زمین امکان‌پذیر نیست، بنابراین مطالعات مخزن، تنها با تکیه بر اندازه‌گیری‌هایی که با استفاده از ابزارهای متفاوت در یک مخزن صورت می‌گیرد، انجام می‌شود. در این میان، نمودارهای پتروفیزیکی یکی از این اندازه‌گیری‌های زیرسطحی هستند که می‌توان با تفسیر مجموعه‌ای از آن‌ها، اطلاعات بسیار با ارزشی را از خصوصیات مخازن زیرسطحی به‌دست آورد.

تفسیر پتروفیزیکی به‌دست آمده از نمودارهای چاه‌پیمایی، در سازندهای کربناته چالش‌هایی دارد و این چالش‌ها به‌دلیل حضور لایه‌های نازک و ترکیبات دور از ذهن سنگ‌شناسی است که اغلب روش‌های معمول تفسیر، برای ارزیابی دقیق این سازندها کافی نیستند [۱]. قرائت نمودارهای متداول پتروفیزیکی در یک نقطه عمقی از یک چاه، نمی‌تواند اطلاعات دقیقی در ارتباط با آن نقطه ارائه دهد، این مسئله به‌دلیل دخالت لایه‌های بالا و پایین در میزان قرائت نمودار و همچنین اثرات محیطی در عمق مورد نظر است.

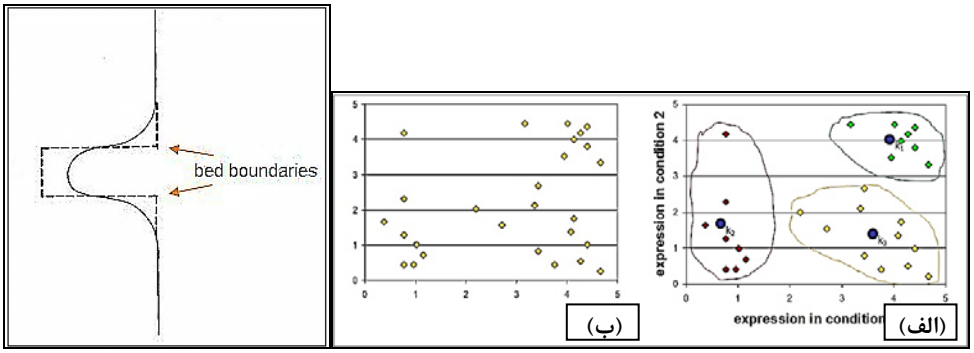
زمین‌شناسان، پتروفیزیست‌ها و مهندسین مخزن برای نشان دادن توصیفی از جزئیات مخزن باید به شناسایی قابل توجهی از نواحی درون مخزن که بیشترین ویژگی‌های مشابه را با هم دارند، دست یابند. تغییرات ناگهانی که از خصوصیات سازندها در روی نمودارهای چاه پیمایی ثبت می‌شوند، می‌تواند اثری از مرزهای بین لایه‌ها و تغییرات رخساره‌ای درون آن‌ها باشد [۲]. نمودارهای چاه در سازندهای دارای سنگ‌شناسی متفاوت و به‌خصوص سازندهای کربناته، ترکیبی از این خصوصیات به‌همراه تأثیر شرایط محیطی چاه و لایه‌های بالا و پایین به‌خصوص در سازندهای نازک لایه را ثبت می‌کنند. تجربه نشان می‌دهد که اثرات لایه‌های حاشیه‌ای می‌توانند سبب خطاهای مهمی در برآورد تخلخل، تمرکزهای کانی/ سیال و تراوایی در لایه‌های نازکتر از ۲ فوت با تفسیر عمق به عمق نمودارهای متداول چاه داشته باشند. این خطا با کاهش ضخامت لایه و افزایش تغییرپذیری سنگ افزایش می‌یابد [۱].

علاوه بر تأثیر لایه‌های مجاور، شرایط محیطی درون چاه و تغییر مقیاس‌های محلی لایه‌ها باعث پایین آمدن دقت تعیین مرز دقیق لایه‌های رسوبی می‌شود. یکی از روش‌های مفید برای برطرف کردن این مشکل، تفکیک نمودار در زون‌هایی مطابق بر لایه‌های زمین‌شناسی با ویژگی‌های تقریبا ثابت و اعمال مقادیر ثابت در این زون‌ها و بلوک کردن نمودار در مرز این زون‌ها است که سبب تفسیر راحت‌تر نمودارهای چاه نیز می‌شود. الگوریتم بلوکینگ، نمودار چاه را در مقابل زونی که ویژگی‌های زمین‌شناسی تقریبا ثابتی دارد، صاف می‌کند و در مرزهای ناگهانی بین زون‌هایی با ویژگی‌های زمین‌شناسی متفاوت هستند، می‌شکند. در واقع با این کار تأثیر نویزهای ثبت شده روی قرائت نمودارها از بین می‌رود. این عمل اغلب به‌وسیله اعمال یک پنجره‌ی فیلتری در توالی سازند روی قرائت نمودار انجام می‌شود. این پنجره با اعمال فیلتر میانگین‌گیری از قرائت نمودار در مقابل سازند به‌صورت کشویی عمل می‌کند و تنها مرزهای مشخص را باقی می‌گذارد. میزان صاف کردن نمودار در مقابل سازند به اندازه پنجره وابسته است.

نخستین بار کرزنر و فراست [۳] استفاده از روش بلوکینگ نمودار را برای بهبود برآورد پارامترهای پتروفیزیکی ارائه دادند. کوپر و کوان [۴] با استفاده از روش‌های تغییر موجک پیوسته (CWT) و بلوک کردن نمودارها با توجه به این تغییرات و مقایسه با روش‌های فیلتر میانی و تغییرات موجک ناپیوسته (DWT)، روش مورد استفاده را بهتر از سایر روش‌ها برای تعیین مرز لایه‌های رسوبی پیشنهاد دادند. حیدری و همکارانش [۱] با استفاده از مقادیر قرائت داده‌های نمودار و استفاده از روش وارونگی و حذف قرائت‌های نویزی در سازندهای کربناته/شیلی، مرزهای مشخصی برای لایه‌ها تعریف و محاسبات پتروفیزیکی را در این لایه‌ها به‌صورت لایه به لایه انجام دادند و با روش‌های متداول مقایسه کردند و بالاتر بودن دقت محاسبات لایه به لایه را عنوان کردند. پاپیلسکی و همکارانش [۵] مطالعه ای دیگر با استفاده از تعیین گونه‌های سنگی از داده‌های مغزه و بلوک کردن نمودارها در مرز گونه

های سنگی مشخص شده، مرز لایه‌های رسوبی را تعیین کردند.

روش دیگری که به‌طور عموم برای تعیین مرز رخساره‌های زمین‌شناسی با استفاده از نمودارها بکار می‌رود، استفاده از روش خوشه‌سازی داده‌های نمودار است. این روش بیشتر مواقع برای تعیین رخساره‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصطلاح رخسارهٔ الکتریکی بوسیلهٔ سرا و ابوت [۶] در سال ۱۹۸۰ معرفی شد. این عنوان به مجموعه ایی از پاسخ-های نمودار گفته می‌شود که سبب متمایز شدن یک لایه یا چینه از دیگر لایه‌ها می‌شود. رخسارهٔ الکتریکی اغلب به یک یا چند رخسارهٔ سنگی که به‌عنوان پاسخ های نمودار از خصوصیات پتروفیزیکی سنگ‌ها اندازه‌گیری می‌شوند، اختصاص داده می‌شود [۷]. در این روش قرائت نمودارهایی که برای مدل رخساره‌ای استفاده می‌شوند در دسته‌های متفاوتی قرار می‌گیرند که هر کدام از این دسته‌ها نماینده یک رخساره خاص است. البته این‌که مقادیر نمودار در یک لایه با ویژگی‌های سنگ‌شناسی یکسان یا همان رخساره رسوبی باید یکسان باشد، ایده جدیدی نیست ولی روش شناسایی دقیق مرز لایه است که به این مطالعه ارزش می‌دهد. رخساره‌های الکتریکی به‌وسیله روش‌های آماری از قبیل خوشه‌سازی تعیین می‌شوند به‌طوری‌که قرائت‌های نمودارها (بدون در نظر گرفتن اثر لایه‌های مجاور روی قرائت نمودار در یک لایه مشخص) در دسته‌های مختلف قرار می‌گیرند. این درحالی است که الگوریتم بلوکینگ با اعمال یک فیلتر روی قرائت نمودارها، اثرات محیطی و اثر لایه‌های مجاور را از قرائت نمودار در یک لایه از بین می‌برد و مقدار ثابتی را برای لایه مورد نظر در نظر می‌گیرد و نمودار را در مرز لایه بعدی می‌شکند. شکل ۱، شماتیکی از بلوک کردن نمودار (الف) و خوشه‌سازی داده‌ها (ب) را نشان می‌دهد. در نتیجه در این مطالعه علاوه بر اینکه سعی شده است تا مرز لایه‌های رسوبی به دو روش بلوکینگ و خوشه بندی در یک مخزن کربناته مشخص شود، تأثیر تعیین مرز لایه‌های رسوبی در تعیین پارامترهای پتروفیزیکی مخزن نیز بررسی شده است و همچنین دو روش مورد استفاده نیز در تعیین این مرزها مقایسه شده است.



شکل ۱: شماتیکی از الف: نحوه بلوک کردن نمودار و ب: نحوه خوشه‌سازی داده‌ها

۲- روش کار

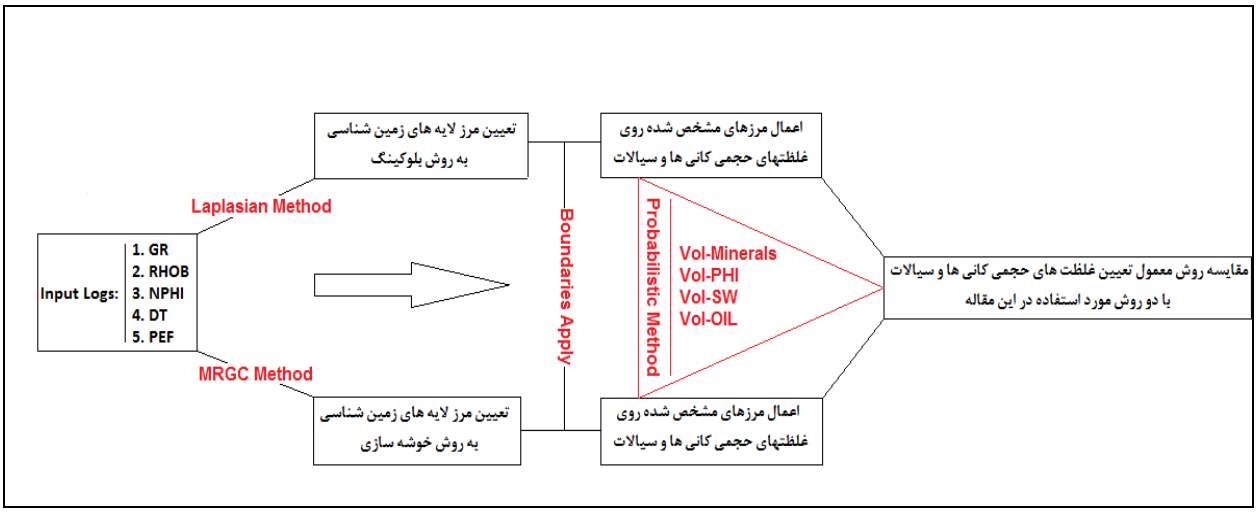
در مطالعه حاضر، برای تعیین مرز لایه‌بندی زمین‌شناسی در یک مخزن کربناته، به دو صورت عمل شد. ابتدا با استفاده از الگوریتم بلوکینگ و استفاده از فیلتر لاپلاسین، نمودارها را در فوصلی که قرائت‌های تقریبا برابری داشتند به شکل صاف و در مکان‌هایی که دارای تغییرات ناگهانی بودند، به‌صورت شکسته یا بلوک شده درآورده شد و همین مکان‌های بلوک شده را به‌عنوان مرز لایه‌ها تعریف شد. در مرحله دوم، با استفاده از خوشه‌سازی نمودارها به روش خوشه‌سازی گراف پایه با توان تفکیک چندگانه (MRGC)، رخساره‌های الکتریکی در توالی مخزن مورد مطالعه تعیین شدند و در نتیجه مرز بین این رخساره‌ها به‌عنوان مرز لایه‌های زمین‌شناسی مخزن در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از مرزهای تفکیک شده در هر دو روش، پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات به‌صورت لایه به لایه محاسبه شدند. درنهایت مرزهای تعیین شده و پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه شده در هر دو

روش با هم مقایسه و با روش متداول ارزیابی پتروفیزیکی مقایسه شدند. محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی در این مطالعه با استفاده از روش نوین احتمالی انجام شد. همچنین تمامی محاسبات با استفاده از نرم‌افزار پتروفیزیکی ژئولاگ انجام شد.. شکل۲، مراحل انجام کار در مطالعه حاضر را نمایش می‌دهد.

۳- بحث

۳-۱ تعیین مرز لایه‌های زمین‌شناسی به روش بلوکینگ

قرائت های نمودارهای پتروفیزیکی برداشت شده از توالی یک مخزن، بازتابی از خصوصیات فیزیکی سنگ در توالی بررسی-شده در چاه است. میزان قرائت هر نمودار در یک نقطه، تحت-تأثیر خصوصیات فیزیکی سنگ از قبیل جنس، میزان تخلخل و همچنین سیال موجود در آن است. تغییر این خصوصیات، سبب تغییرات قرائت نمودار در طول یک چاه می‌شود. قرائت یک نمودار در مرز دو لایه رسوبی که با توجه به تعریف لایه، شرایط زمین‌شناسی متفاوتی دارند، در بیشتر مواقع سبب تغییراتی در میزان قرائت برخی نمودار (البته در برخی نمودارها) در آن نقطه می‌شود. البته در این بین، عواملی از قبیل اثر لایه‌های جانبی، وجود لایه‌های نازک و شرایط محیطی درون چاه (گل حفاری، فیلتره گل، کیک گل و غیره) نیز سبب ایجاد نویز در میزان قرائت نمودار در توالی یک مخزن خواهند شد که باعث ایجاد تغییرات ناچیزی در قرائت نمودارها می‌شوند و میزان این تغییرات نسبت به تغییراتی که ما بین دو لایه به‌وجود می‌آید بسیار ناچیز است. ما در این مطالعه، با استفاده از اعمال یک فیلتر روی قرائت نمودارهای RHOB، NPHI، GR، DTو PEF، نویزها و تغییرات ناچیز قرائت در این نمودارها که در اثر عوامل نویزی اشاره شده به‌وجود آمده‌اند، را از قرائت این نمودارها برداشته و این نمودارها در مقابل لایه‌هایی که شرایط زمین‌شناسی تقریبا برابر داشتند به‌صورت صاف، و در فواصلی که دارای تغییرات زمین‌شناسی بودند و نمودارها نیز در این نقاط دارای تغییرات قرائت بالایی بودند، به‌صورت شکسته ارائه داده شد، که این نقاط دارای تغییرات زمین‌شناسی و ثبت‌شده روی نمودارها، به‌عنوان مرز لایه‌بندی زمین‌شناسی تعریف شدند.



شکل۲: فلوچارت مراحل انجام کار

در مطالعه حاضر، فیلتر اعمال‌شده برای انجام عملیات بلوک کردن نمودارها، فیلتر لاپلاسین است. این فیلتر یک روش ریاضی است که برای انتگرال های مشابه با یک پتانسیل بسیار خوب برای فراگیری دانش و نتیجه‌گیری احتمالی در شبکه-های مطمئن با متغیرهای پیوسته استفاده می‌شود [۸]. این فیلتر اغلب برای لبه‌یابی با مزیت مشخص کردن جهت‌یابی لبه‌ها در تصاویر به‌کار می‌رود و یکی از فیلترهای بسیار قوی در لبه‌یابی تصاویر است. در مجموع روش لاپلاسین و

روش‌های مشابه آن، در اصل با شیوه‌ای ماهرانه به‌وسیله لاپلاسین برای ارزیابی یک انتگرال ویژه استفاده شدند.

این فیلتر از آرایه‌هایی (اغلب ۳*۳) از ضرایب یا وزن‌های گوناگون تشکیل شده است. فیلتر همانند پنجره متحرکی عمل می‌کند که پیکسل به پیکسل روی تصویر حرکت می‌کند. هر پیکسل از تصویر در مقدار متناظر ضریب فیلتر که روی آن واقع شده است ضرب می‌شود (۹ ویا ۲۵ و یا ۴۹ و غیره) مقدار حاصل با یکدیگر جمع و عدد حاصل به پیکسل مرکزی نسبت داده می‌شود. معادله‌ای که این فیلتر در یک تصویر دو بعدی استفاده می‌کند به‌صورت زیر است:

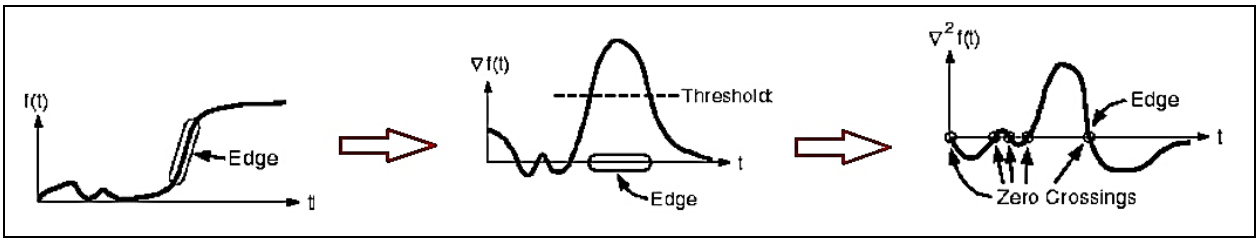
$$\nabla f = [\frac{\partial f}{\partial x} , \frac{\partial f}{\partial y}]$$

هر قدر تغییرات در روی نمودار ناگهانی‌تر و محسوس‌تر باشد، مقدار پنجره متحرک برای فیلتر (رابطه زیر) بزرگتر در نظر گرفته خواهد شد و بالعکس. بزرگی پنجره متحرک فیلتر از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

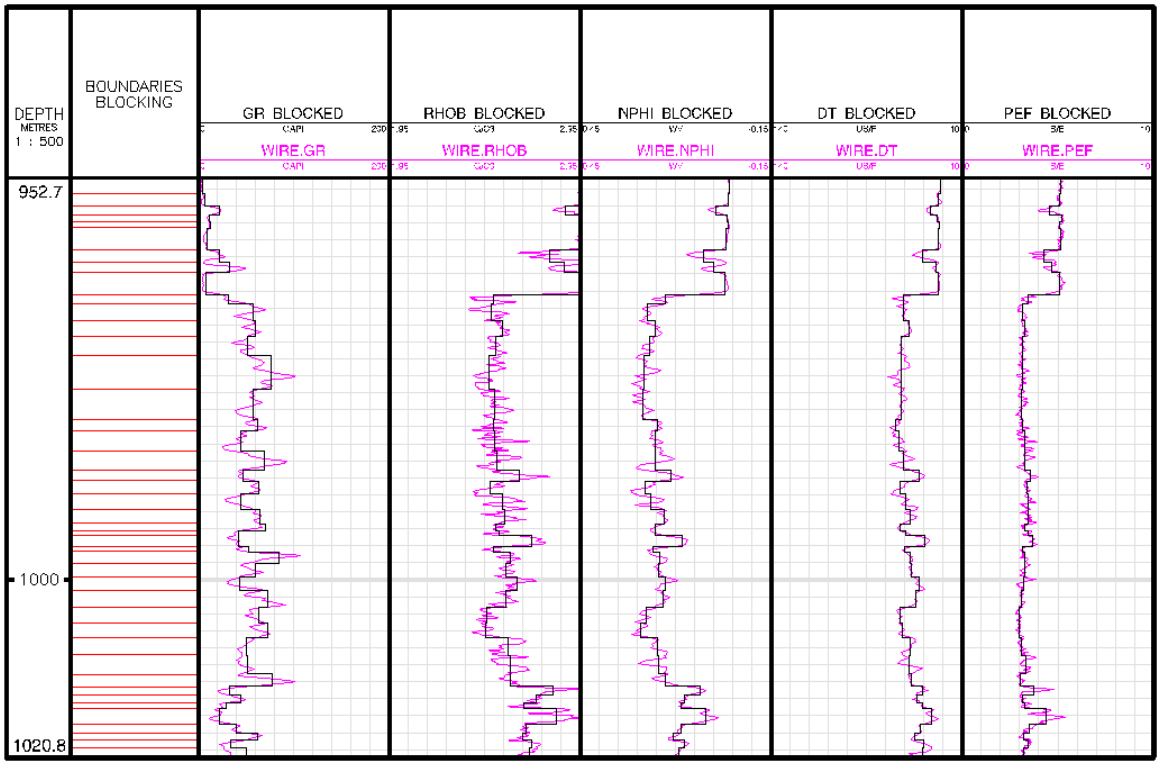
$$||\nabla f|| = \sqrt{(\frac{\partial f}{\partial x})^2 + (\frac{\partial f}{\partial y})^2}$$

مقدار $||\nabla f||$ مقدار حساسیت فیلتر را برای بلوک کردن نمودار با توجه به تغییرات آن را تعیین می‌کند. درنتیجه فیلتر لاپلاسین با گرفتن مشتق دوم از قرائت‌های در دسترس، مقادیر مثبت، منفی و نقاط تلاقی صفر را در پیکسل‌های تصویر (یا در اینجا در قرائت‌های نمودارها) ایجاد می‌کند (شکل۳) . این نقاط تلاقی در تصاویر به‌عنوان لبه در نظر گرفته می‌شوند که همین نقاط در روی نمودار به‌عنوان محل بلوک شدن نمودار یعنی نقطه‌ای که تغییر ناگهانی در مقدار قرائت وجود دارد تعریف می‌شوند. این نقاط برای ما به‌عنوان مرز لایه تعریف می‌شوند.

محاسبه پنجره کشویی لاپلاسین به‌صورت میانگین درنظر گرفته شد که اندازه این پنجره کشویی ($||\nabla f||$) در توالی مخزن مورد مطالعه بر روی قرائت نمودارها ۱ متر با حداقل ضخامت ۰/۵ متر درنظر گرفته شد. اندازه این پنجره با توجه به میزان تغییرات قرائت نمودارها در توالی چاه پس از استفاده از مقادیر متفاوت برای پنجره کشویی انتخاب شد. مقادیر متفاوتی که برای اندازه پنجره کشویی به منظور بلوک بندی نمودارها در نظر گرفته شد پس از هر بار وارد کردن مقادیر جدید، قرائت نمودارها با قرائت اولیه مقایسه شد و همچنین نقاط بلوک بندی شده در روی نمودارها در هر مرحله با هم مقایسه شد تا در نهایت مقادیر مورد نظر زمانی به‌عنوان مقادیر بهینه برای انجام بلوکینگ نمودارها در نظر گرفته شد که نقاط بلوک بندی شده در تمامی نمودارها در اعماق مشترکی قرار گرفت. این پنجره کشویی ۱ متری در طول قرائت نمودارهای ورودی برای انجام آنالیز حرکت کرده و در طول این نمودارها، در فواصل بیش از ۰/۵ متر، تا ۱متر، چنان‌چه قرائت نمودار تغییری نداشته باشد، این فواصل به‌عنوان یک لایه با شرایط زمین‌شناسی برابر در نظر گرفته می‌شود و در این فاصله، نمودار به حالت صاف در می‌آید. این عملیات، ۱ متر به ۱ متر در طول توالی نمودارهای ورودی صورت می‌گیرد. چنانچه در یک فاصله ۱ متری، نمودار دچار تغییر قرائت شود، در آن ناحیه نمودار به حالت شکسته در خواهد آمد. این مکان‌های شکسته به‌عنوان مرز لایه تعریف می‌شوند. همچنین از تغییرات کمتر از ۰/۵ متر در طول قرائت نمودار چشم پوشی می‌شود و این تغییرات ناچیز به‌عنوان نویز درنظر گرفته شده و با صاف کردن نمودار، اثرات نویزی از بین می‌روند. در شکل ۴، نمودارهای ورودی قبل و بعد از اعمال فیلتر به همراه مرزهای جدا شده لایه‌ها را نمایش می‌دهد. مرزهای لایه‌ها با توجه به شکستگی‌های مشترک موجود در نمودارهای ورودی تعیین شده اند. در این شکل، از سمت چپ ستون اول عمق، ستون دوم مرز لایه‌های زمین‌شناسی تفکیک شده از نمودارهای بلوک شده و ستون‌های بعد به ترتیب نمودارهای GR، RHOB، NPHI، DT و PEF در حالت قرائت عادی و بلوک شده را نمایش می‌دهد. مرزها در این روش با توجه به شکستگی‌های مشترکی که در تمام نمودارهای مورد استفاده در یک عمق مشترک صورت گرفته است، تعیین شدند.



شکل ۳: مشتق اول، دوم و تعیین لبه در تصاویر [۹]



شکل ۴: تعیین مرز لایه‌های زمین‌شناسی با استفاده از بلوک کردن نمودارها

۲-۳ تعیین مرز رخساره‌های الکتریکی به روش خوشه‌سازی

خوشه‌بندی داده‌ها پایه و اساس الگوریتم‌های مدل‌سازی و دسته‌بندی محسوب می‌شود. هدف از این فرایند تعریف گروه-های طبیعی و اساسی کوچک از یک گروه بزرگ داده‌ها محسوب می‌شود [۱۰]. امروزه تعیین رخساره‌های الکتریکی در سازندهای مخزنی یکی از مطالعات رایج در زمینه توصیف خصوصیات مخازن است. کاربرد فراوان این رخساره‌ها و قابلیت انعطاف آن‌ها برای تعیین پارامترهای مخزنی خاص، با توجه به نوع داده‌های ورودی، این روش را به یکی از توانمندترین ابزارها در مطالعات مخزنی تبدیل کرده است. از رخساره‌ها در مواردی مانند تفکیک بخش‌های مخزنی از غیر مخزنی، جایگزین گروه‌های سنگی در مدل های مخزنی، تطابق سازندی در سطح میدان و بزرگ مقیاس کردن داده‌های نمودار استفاده می گردد. اهمیت این داده‌ها به گونه ایست که از آن‌ها به‌عنوان مغزه مجازی نام برده می‌شود [۱۱]. تعیین این رخساره‌ها ممکن است به‌صورت استخراج لیتولوژی از برخی نمودارها (مانند محاسبهٔ حجم شیل از نمودار CGR) یا

بر اساس شکل نمودار ها (مانند استفاده از شکل نمودار گاما در تشخیص سنگ‌شناسی) صورت گیرد [۱۲] اما متداول‌ترین روش، استفادهٔ ترکیبی از مشخصه های فیزیکی اندازه‌گیری شده در روی نمودارهای مختلف است [۱۳]. الگوی دسته‌بندی رخساره‌ها بر اساس نمودارهای چاه پیمایی در تمام روش‌های دسته‌بندی، بر این اساس است که داده‌های موجود در یک گروه بیشترین شباهت را با هم و کمترین شباهت را با داده‌های گروه‌های دیگر داشته باشند. درنتیجه این شباهت-های درون گروهی و تفاوت‌های بین گروهی، سبب دسته‌بندی محدوده‌های قرائت نمودارهای مورد استفاده خواهد شد و این محدوده‌های دسته‌بندی شده در توالی مورد ارزیابی، موجب تفکیک رخساره‌های زمین‌شناسی و مخزنی می‌شود. روش‌های مختلفی برای دسته‌بندی داده‌ها ارائه شده است که آن‌ها را می‌توان به دو گروه کلی مبتنی بر ناظر و بدون ناظر تقسیم-بندی کرد [۱۴]. از گروه اول می‌توان به شبکه‌های عصبی پس انتشار خطا (BPNN) و منطق فازی (Fuzzy Logic) و از گروه دوم نیز به شبکه‌های عصبی خود سامان ده (SOM) ، طبقه‌بندی سلسله مراتبی صعودی (AHC) ، خوشه‌سازی پویا (D-C) و خوشه‌سازی گراف پایه با توان تفکیک چندگانه (MRGC) نام برد.

یکی از تکنیک‌های آزمایش شده، روش MRGC است که مؤثرترین نتایج را در شناسایی رخساره‌های الکتریکی در مخازن کربناته می‌دهد. در این روش، معایب دیگر روش‌های خوشه‌بندی مانند آگاهی قبلی در مورد تعداد خوشه‌ها، پارامترهای اولیه و قابل اعتماد بودن نتایج حذف شده است. روش MRGC برای آنالیز ساختارهای پیچیده و دسته‌بندی طبیعی گروه‌های داده‌ها در اشکال، اندازه و چگالی های متفاوت بسیار مناسب است [۱۵]. با توجه به مزایای روش خوشه‌سازی MRGC نسبت به سایر روش‌های خوشه‌سازی، در مطالعه حاضر از این روش برای تعیین مرز بین هر رخساره استفاده شد. نمودارهای ورودی برای مدل رخساره‌های الکتریکی، همان نمودارهای ورودی در مدل بلوکینگ نمودارها بود و شامل نمودارهای GR، RHOB، NPHI، DT و PEF است. شکل ۵، نمودار فراوانی نمودارهای ورودی مدل را نمایش می‌دهد.

شکل ۵، نمودار فراوانی و محدوده‌ی قرائت نمودارهای مورد استفاده را در توالی مخزن مورد مطالعه نشان می‌دهد. با وارد کردن این نمودارها به مدل رخساره‌ای و استفاده از روش خوشه‌سازی MRGC، تعداد خوشه‌ها یا همان رخساره‌های الکتریکی را می‌توان تعیین کرد. در این روش، داده‌های نمودارها توسط دو شاخص NI (پارامتر شاخص همسایگی) که موقعیت نزدیک بودن هر نقطه در یک مجموعه داده را به قله یا قعر تابع چگالی احتمالی داده‌ها مشخص می‌کند و KRI (پارامتر هستهٔ خوشه) شاخصی است برای تعیین نقاط مستعد برای نمایندگی به‌عنوان هسته یا مرکز خوشه تفکیک می‌شوند. این دو شاخص نشانه‌های رابطهٔ همسایگی میان داده‌ها هستند. رابطهٔ همسایگی از روی فاصلهٔ فضایی داده‌ها (نمودار ها) محاسبه می‌شود. بر اساس این دو شاخص، گروه‌های کوچکی از داده‌ها با نام گروه‌های جذبی شکل می-گیرند که این گروه ها ممکن است از لحاظ شکل، اندازه، چگالی و نسبت جدایش باهم تفاوت داشته باشند. این گروه‌های جذبی با مرزهایی از یکدیگر جدا شده و در نهایت در یک فرآیند رو به رشد با یکدیگر ترکیب و گروه‌های بزرگتر که همان رخساره‌های مختلف الکتریکی می‌باشند را تشکیل می-دهند. این روش مبتنی بر تشخیص الگوی نقطه‌ای چند بعدی بر مبنای نزدیک‌ترین همسایگی و نمایش گرافیکی داده‌ها است. مراحل انجام کار در این روش به‌طور خلاصه عبارتند از:

۱. محاسبه شاخص همسایگی (NI): این شاخص مشخص می‌کند که هر نقطه از یک مجموعه داده، به قله یا قعر تابع چگالی احتمالی داده‌ها نزدیک است. با استفاده از یک تابع نمایی کاهنده و شماره همسایگی هر نقطه نسبت به نقاط دیگر مجموعه داده، مقادیری به‌دست می‌آید. با جمع این مقادیر و نرمال‌سازی آن (بین ۰ تا ۱) مقدار NI برای هر نقطه محاسبه می‌شود. مقدار بزرگتر NI (نزدیک‌تر به ۱) نشانه نزدیک بودن نقطه به قله را دارد.

۲. محاسبه شاخص معرف هسته (KRI): این شاخص برای تعیین نقاط مستعد برای نمایندگی به‌عنوان

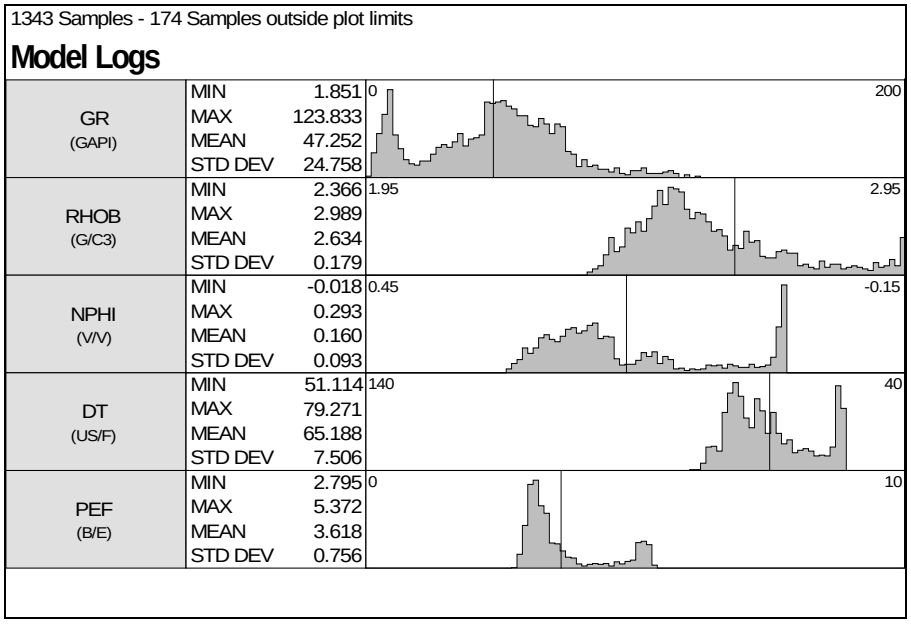
هسته (یا مرکز) خوشه است. با کمک NI، قله‌ها و قعرهای محلی موجود در مجموعه داده را می‌توان مشخص ساخت، اما برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها لازم است میزان معرف بودن هر قله نسبت به تمام مجموعه داده سنجیده شود. برای این مظور از KRI استفاده می‌شود. اگر NI(x) مقدار NI در نقطه x باشد و نقطه y اولین همسایه x با شرط NI(y) > NI(x) باشد، برای محاسبه KRI در نقطه x از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$KRI(x) = NI(x)\, M(x,y)\, D(x,y)$$

که در آن M(x,y) = m ، y همسایه m ام x و D(x,y) فاصله میان x و y است. اگر مقدار KRI به‌طور نزولی مرتب شده و ترسیم شود چندین نقطه شکست مهم را می‌توان در آن مشاهده کرد. این نقاط شکست منطبق بر تعداد خوشه‌های بهینه در تفکیک‌پذیری‌های مختلف است. این شکستگی‌ها را می‌توان از طریق محاسبه بیشینه محلی منحنی شیب آن تعیین کرد.

۳. جذب KNN: با استفاده از روش جذب نزدیک‌ترین K همسایه و مقدار NI، گروه‌های طبیعی اصلی (گروه‌های جذبی) شکل می‌گیرند. برای این کار برای هر نقطه مثل p از بین k همسایه نزدیک، نقطه‌ای مانند q که مقدار NI آن از p و بقیه همسایه‌ها بزرگ‌تر است، به‌عنوان نقطه جذبی انتخاب می‌شود. اگر p همه نقاط اطراف را به خود جذب کند ولی توسط هیچ نقطه‌ای جذب نشود، در این صورت در مرکز خوشه قرار دارد. ولی اگر همزمان هم نقاط اطراف را جذب کند و هم جذب آن‌ها شود، در این صورت از نقاط درونی خوشه است و اگر هیچ نقطه‌ای را جذب نکند ولی جذب نقاط اطراف شود، روی مرز خوشه قرار گرفته است. به این ترتیب گروه‌های طبیعی از داده‌ها به نام گروه‌های جذبی تشکیل می‌شود.

۴. ادغام گروه‌های جذبی در هم و تشکیل خوشه‌های بزرگ تر، در پایان با استفاده از روش KNN و نقاط مرزی تعیین شده برای هر یک از گروه‌های جذبی در مرحله قبل، گروه‌های جذبی دو به دو با هم ادغام می‌شوند. البته هر دو یا حداقل یکی از آن‌ها فاقد هسته‌ای که قبلا در مرحله KRI انتخاب شده باشند. به این ترتیب خوشه‌ها تشکیل می‌شوند [۱۶].



شکل ۵: نمودار فراوانی نمودارهای ورودی مدل

FACIES	WEIGHT	GR	RHOB	NPHI	DT	PEF
1	62	9.96	2.96	-0.01	52.53	5.24
2	149	7.61	2.96	-0.01	52.18	5.08
3	84	25.00	2.85	0.04	56.78	4.50
4	100	35.71	2.71	0.12	60.46	3.67
5	78	47.58	2.68	0.13	63.06	3.17
6	142	77.95	2.59	0.19	65.59	3.24
7	194	53.23	2.56	0.20	66.67	3.20
8	74	67.37	2.52	0.22	72.78	3.24
9	460	56.40	2.49	0.24	72.06	3.18

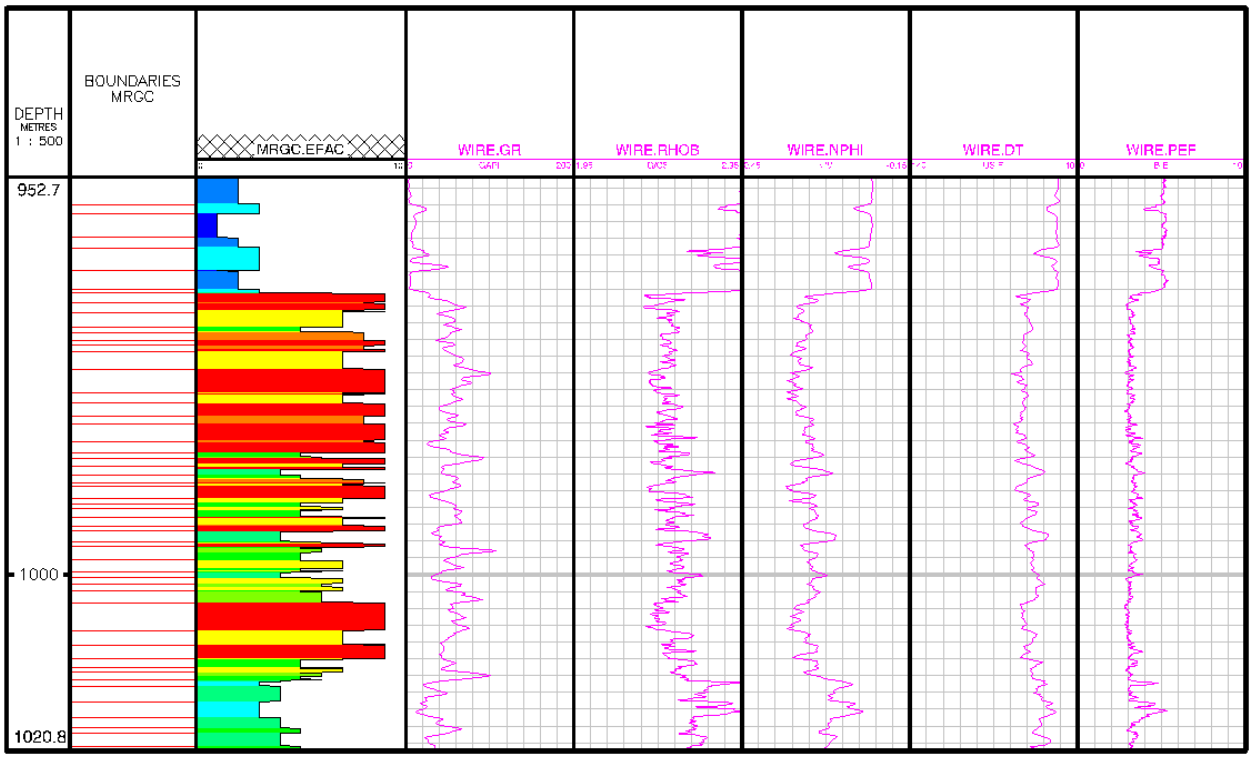
	NAME	COL	PAT	WEIGHT	GR	RHOB	NPHI	DT	PEF
1	FACIES_1			62					
2	FACIES_2			149					
3	FACIES_3			84					
4	FACIES_4			100					
5	FACIES_5			78					
6	FACIES_6			142					
7	FACIES_7			194					
8	FACIES_8			74					
9	FACIES_9			460					

شکل ۶. رخساره‌های دسته‌بندی شده در توالی مورد مطالعه

شکل ۶، تعداد رخساره‌هایی (خوشه‌ها) را که به روش MRGC دسته‌بندی شده‌اند همراه با مشخصات مربوط به هر کدام از خوشه‌ها را نمایش می‌دهد. در شکل ۶، تفاوت بین هر دسته یا رخساره با توجه به خصوصیات هر کدام از رخساره‌ها بخوبی قابل مشاهده است. این تفاوت علاوه بر رنگ‌بندی متفاوت برای هر رخساره، تفاوت وزنی هر نمودار در هر کدام از رخساره‌ها و میانگین قرائت آن‌ها در هر رخساره مشخص شده است. در نتیجه در توالی مورد مطالعه، تعداد ۹ رخساره با خصوصیات متفاوت از هم تفکیک شد که مرز هر کدام از این رخساره‌ها به‌عنوان مرز لایه‌ها در مخزن مورد مطالعه در نظر گرفته شد. شکل ۷، مرزهای تفکیک شده را در ستون جداگانه‌ای نمایش می‌دهد. در این شکل از سمت چپ، ستون اول عمق، ستون دوم مرزهای تفکیک شده، ستون سوم رخساره‌های مشخص شده و ستون‌های بعدی نیز قرائت نمودارهای ورودی مدل را نمایش می‌دهند.

۳-۳ محاسبه مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات با اعمال مرزهای حاصل از دو روش

امروزه پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات یک مخزن را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلفی مانند انجام آنالیز و آزمایشات متفاوت روی مغزه‌ها و یا انجام آنالیز و محاسبات مختلف (ریاضی و آماری) و یا مدل‌سازی داده‌های حاصل از نمودارها یا نمودارهای چاه‌پیمایی معمول به دست آورد. به‌کارگیری روش‌های مختلف در محاسبه و تخمین یک پارامتر پتروفیزیکی خاص اغلب نتایج متفاوتی دارد که نشان‌دهنده‌ی وجود خطای کم و بیش زیاد در تخمین پارامتر پتروفیزیکی مورد نظر است.

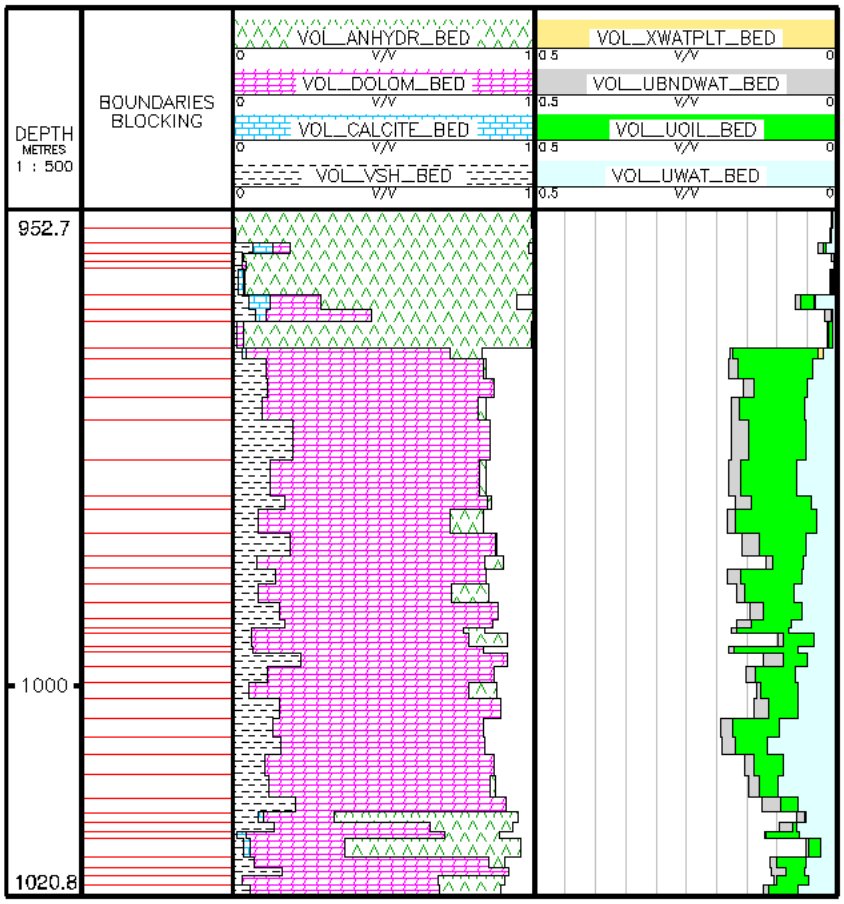


شکل ۷: مرزهای تفکیک شده از تفکیک رخساره‌های الکتریکی در توالی مخزن مورد مطالعه

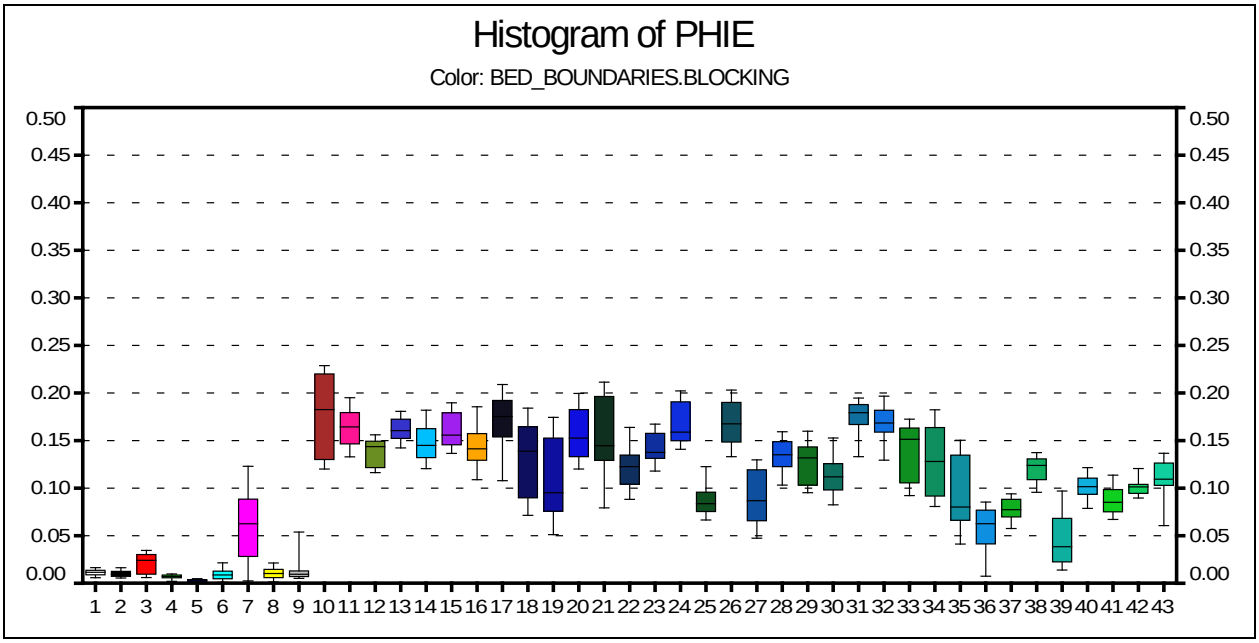
ارزیابی به روش احتمالی یک روش جدید برای محاسبه‌ی پارامترهای پتروفیزیکی به‌وسیله‌ی آمار و احتمالات است. مایر و سیبت [۱۷] یک رویکرد جدید رادیکالی را برای آنالیزهای پتروفیزیکی به‌دست آوردند. در این رویکرد که بر اساس حل معادلات هم‌زمان است، به جای این که تنها به پاسخ به‌دست آمده از یک نمودار برای اندازه‌گیری پارامتر پتروفیزیکی مورد نظر بسنده شود، از تمام نمودارهای در دسترس برای پیش-بینی و محاسبه‌ی ناشناخته‌ها که شامل حجم سیالات، کانی‌ها و غیره است، استفاده می‌شود. سپس این مقادیر برای به‌دست آوردن نتیجه‌ی مطلوب (احتمال بیشتر) تنظیم می‌شوند. ایجاد بهترین هماهنگی میان داده‌ها، نتایج و شیوه‌ی عملکرد، مبنای پتروفیزیک احتمالی است. روش پتروفیزیک احتمالی بر پایه‌ی آمار و احتمالات بوده و نتایج آن نیز بر پایه‌ی آمار و احتمالات است. درنهایت بهترین احتمال از راه حل‌های آماری پذیرفته خواهد شد. این روش، ارزیابی‌های آماری و احتمالی از کیفیت پاسخ نهایی را فراهم می‌کند. بر خلاف روش پتروفیزیک قطعی، پتروفیزیک احتمالی شامل یک نظارت وسیع بر نتایج پیش‌بینی شده در مدل است [۱۸].

محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی و سیال در توالی چاه در روش‌های متداول ارزیابی به‌صورت پیوسته در کل توالی مورد ارزیابی محاسبه و ارائه داده می‌شود. حال آن-که در مخازن زیرسطحی و به‌خصوص مخازن دارای لایه‌بندی متناوب و نازک لایه به این شکل نیست. تعیین مرز لایه‌های زمین و استفاده از این مرزها در محاسبات حجمی کانی‌ها و سیالات، این امکان را می‌دهد که دقت ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی و محاسبات حجمی کانی‌ها و سیالات بالاتر رفته و این عملیات لایه به لایه در مخزن صورت گیرد. شکل ۸، مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات محاسبه شده به روش لایه به لایه با اعمال مرزهای تفکیک شده از روش بلوکینگ را نشان می‌دهد. در اینجا مشاهده می‌شود که هر لایه دارای پارامترهای پتروفیزیکی متفاوتی هم از لحاظ حجم سیالات و هم از لحاظ حجم کانی‌ها نسبت به لایه‌های بالا و پایین خود دارد. همچنین شکل ۹، نمودار فراوانی تخلخل مؤثر را در هر لایه از توالی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ستون عمودی در این شکل درصد تخلخل و ستون افقی نیز تعداد لایه‌های تفکیک شده را نمایش می‌دهد. در اینجا می‌توان لایه‌هایی که شرایط

مخزنی مناسب تری نسبت به لایه‌های دیگر دارند را از لحاظ سنگ‌شناسی و دیگر مشخصات پتروفیزیکی بررسی کرد.

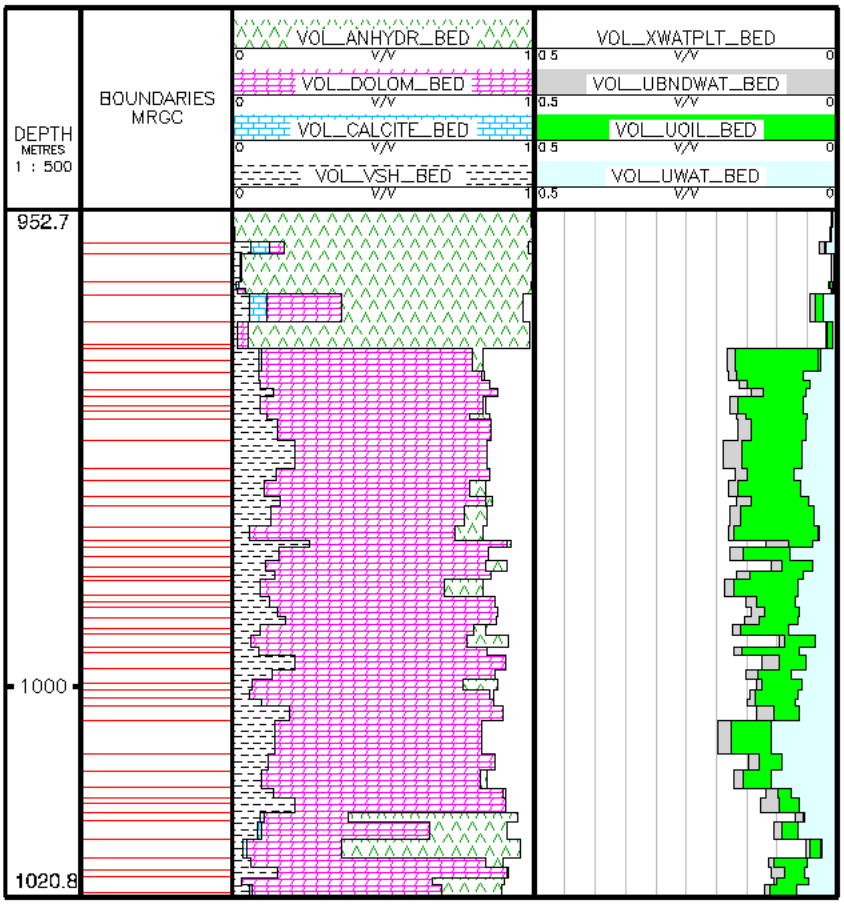


شکل ۸: محاسبه مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات با اعمال مرز لایه‌ها از روش بلوک کردن نمودارها

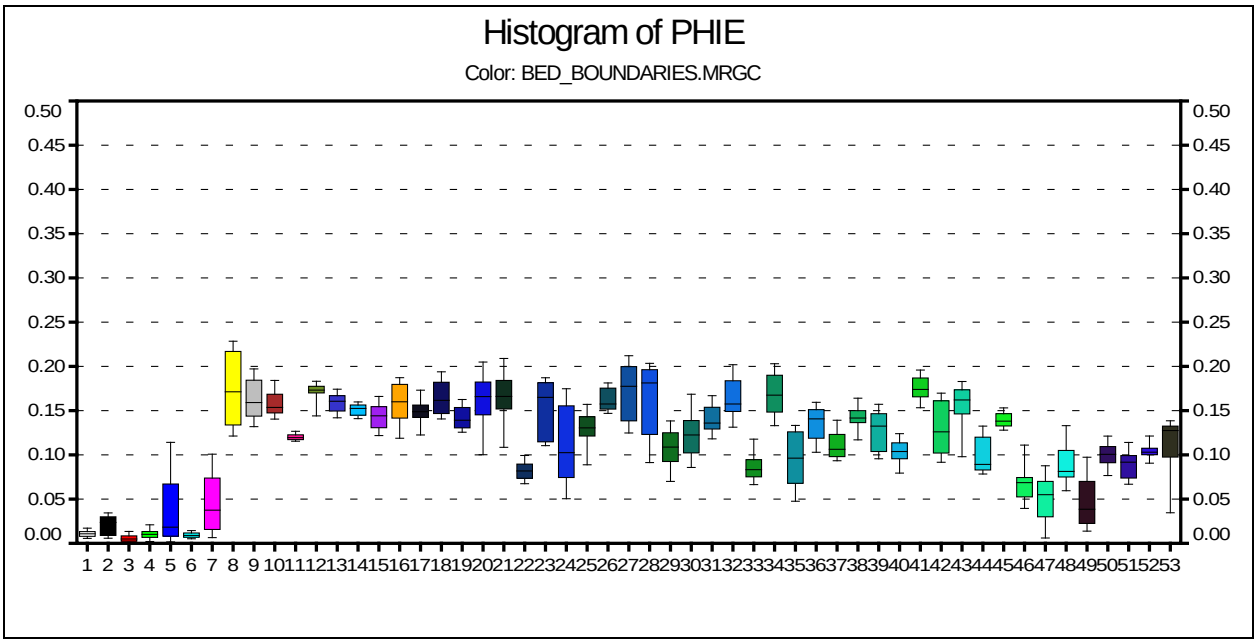


شکل ۹: میانگین فراوانی پارامتر تخلخل مؤثر در هر لایه

هر کدام از رخساره‌های الکتریکی تفکیک شده به روش MRGC در قسمت قبل، شرایط متفاوتی نسبت به رخساره‌های بالا و پایین خود دارند. در نتیجه با استفاده از این اختلافات بین هر رخساره، مرزهای بین آن‌ها برای ما مشخص شد. این مرزها در رخساره‌های تعیین شده کاملا به‌صورت ناگهانی و با تغییرات رنگی مشخص‌اند. درنتیجه از این مرزها در محاسبات پتروفیزیکی استفاده شد و محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات به‌صورت لایه به لایه انجام شد. درنهایت پارامترهای محاسبه شده نیز در هر لایه با لایه‌های بالا و پایین اختلاف دارند. شکل ۱۰، رخساره‌ها و مرزهای مشخص شده از آن‌ها را به همراه حجم کانی‌ها و سیالات محاسبه شده پس از اعمال مرزهای تفکیک شده از رخساره‌های الکتریکی را در توالی چاه نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۱، میانگین فراوانی پارامتر تخلخل مؤثر را در هر کدام از لایه‌هایی که به‌وسیله مرز رخساره‌های الکتریکی تفکیک شده‌اند نشان می‌دهد. تعداد رخساره‌ها یا لایه‌های تفکیک شده در این روش اندکی بیشتر از روش بلوک کردن نمودارها است. دلیل آن نیز، حذف نویزها و اثر لایه‌های جانبی روی قرائت نمودارها در روش بلوکینگ است که درنتیجه میزان تغییرات قرائت نمودارها تا حدودی کمتر خواهد شد نسبت به زمانی که از این نمودارها در روش خوشه‌سازی استفاده شده است و مرز لایه‌ها در روش بلوکینگ، تنها در قرائت‌های ناگهانی نمودارها تعیین می‌شوند. اما دسته‌بندی قرائت نمودارها در روش خوشه‌سازی، بدون حذف نویزها و اثرات محیطی انجام می‌شود. این مسئله می‌تواند اعتبار روش بلوکینگ را برای تشخیص مرز لایه نسبت به روش خوشه‌سازی، بالاتر ببرد.

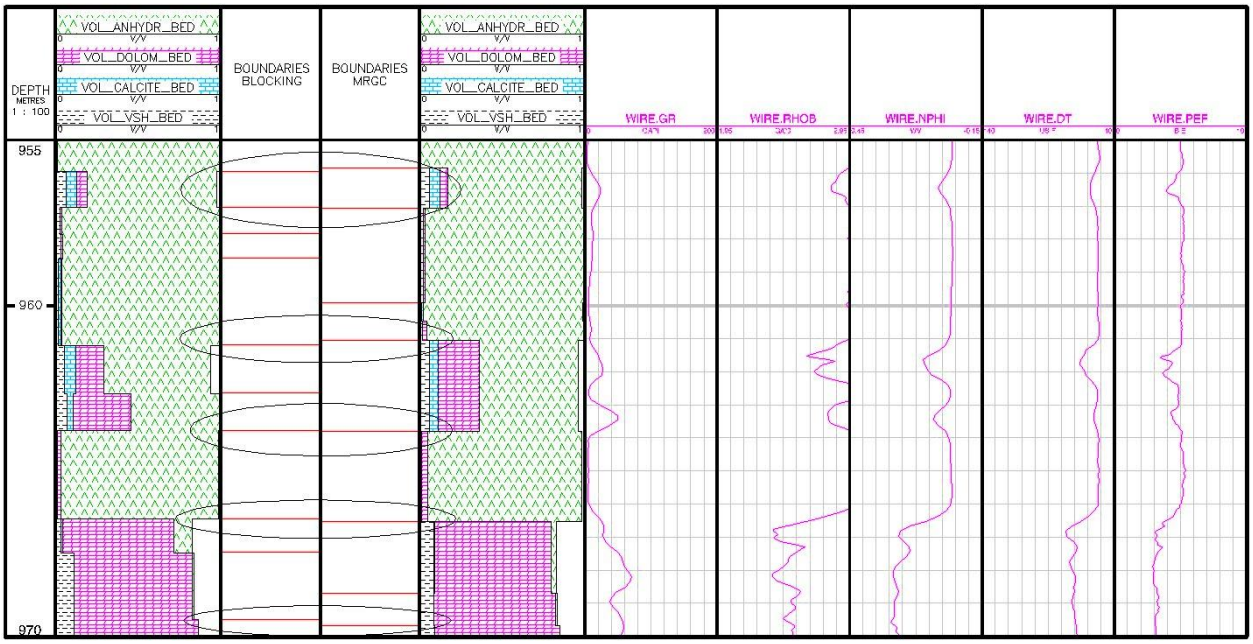


شکل۱۰: محاسبه حجم کانی‌ها و سیالات با اعمال مرزهای حاصل از خوشه‌سازی



شکل ۱۱: میانگین فراوانی تخلخل مؤثر در هر رخساره

شکل ۱۲ مقایسه ای بین مرزهای تفکیک شده در دو روش مورد استفاده را در قسمتی از توالی مخزن مورد مطالعه (۱۵ متر ابتدایی) نشان می‌دهد. در اینجا برخی مرزهای مشخص شده که با دایره نشان داده شده اند در هر دو روش به‌صورت مشترک شناسایی شده اند. این موضوع نشان می‌دهد که این مکان‌ها درجه اطمینان بالاتری در تشخیص مرز لایه‌های رسوبی مخزن نسبت به سایر مرزهایی دارند که از لحاظ عمقی دارای میزان اختلافی در دو روش مورد استفاده می باشند. همچنین این مرزهای مشترک در قرائت نمودارهای ورودی دارای بالاترین تغییرات قرائت در توالی خود هستند. درنتیجه می‌توان این مرزها را با درصد اطمینان بسیار بالایی، مرز بین لایه‌های زمین‌شناسی مخزن دانست.



شکل۱۲: تطابق مرزهای لایه‌ها در دو روش بلوکینگ و خوشه‌سازی

۴-۳ مقایسه مرزهای مشخص شده و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات در دو روش با روش متداول ارزیابی

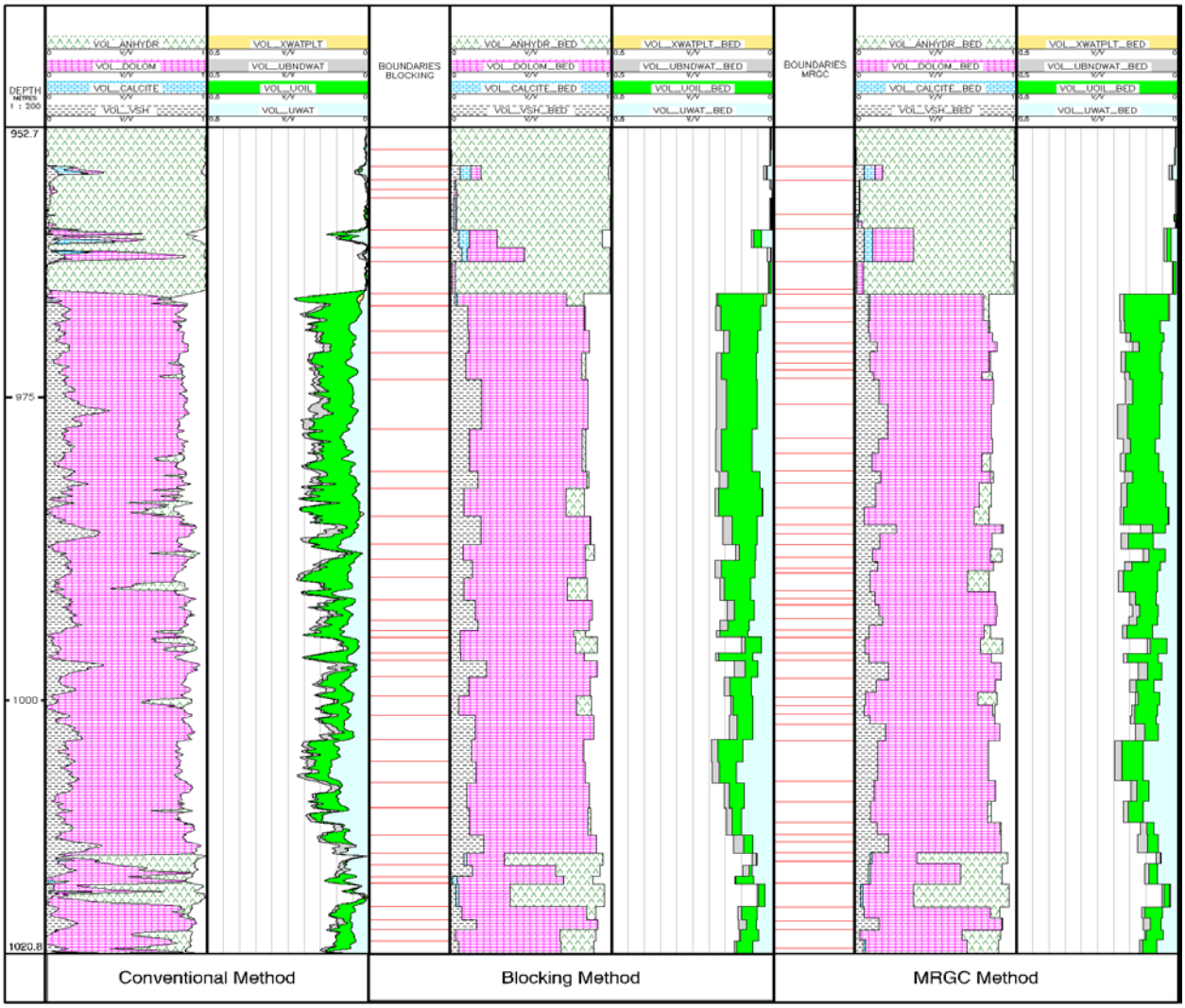
روش‌های متداول ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی، اغلب محاسبات یک توالی مخزنی را به‌صورت پیوسته ارائه می‌دهند. این درحالی است که در بیشتر موارد و به‌خصوص در مخازن با لایه‌بندی متناوب و نازک لایه، مرزهای ناگهانی بین این لایه‌ها وجود دارد و پارامترهای پتروفیزیکی در لایه‌های بالا و پایین این مرزها تفاوت بسیار فاحشی با هم دارند. به‌عنوان مثال در توالی یک مخزن که لایه‌بندی انیدریت، آهک و دولومیت با میان لایه‌های نازک شیلی دارد، ارزیابی‌های متداول پارامترهای پتروفیزیکی در این توالی، میانگینی از خصوصیات پتروفیزیکی و مقدار حجمی این کانی‌ها و سیالات درون آن‌ها را نشان خواهد داد، این درحالی است که با شرایط واقعی مخزن بسیار اختلاف دارد. درنتیجه تفسیر لایه به لایه پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات، دقت محاسبات را بالاتر می‌برد. شکل ۱۳، مرزها و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات را در دو روش بلوکینگ و خوشه‌سازی نمودارها را با هم و با روش متداول ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی مقایسه می‌کند. در اینجا مشخص است که هر لایه نسبت به لایه‌های بالا و پایین خود شرایط متفاوتی از لحاظ پارامترها و مقدار حجمی دارد. اعمال مرزهای مشخص شده در هر دو روش، سبب تفکیک شرایط مخزنی لایه‌ها نسبت به یکدیگر شده است چیزی که با شرایط واقعی درون زمین ارتباط نزدیکتری خواهد داشت. همجواری دو لایه انیدریتی و آهکی یا دولومیتی به‌صورت بالا و پایین نسبت به هم، نمی‌تواند خصوصیات پتروفیزیکی همدیگر را تحت تأثیر قرار دهند و در هنگام محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی نمی‌تواند حجم تخلخل، اشباع آب و یا هیدروکربور را به‌صورت میانگین در توالی آن‌ها به‌وجود آید. چیزی که قرائت نمودارهای پتروفیزیکی با توجه به نرخ قرائتشان برای ما ثبت خواهند کرد. در نتیجه با تفکیک مرز بین این لایه‌ها، ویژگی‌های مخزنی آن‌ها از هم تفکیک خواهد شد.

در دو روش مورد استفاده نیز مشاهده می‌شود که در برخی فواصل بین دو مرز تعیین شده به‌عنوان مرز بالا و پایین یک لایه در روش بلوکینگ ، مرز یا مرزهایی در روش خوشه‌سازی برای آن لایه در نظر گرفته شده است. از آنجایی که روش خوشه‌سازی از تمامی قرائت های نمودار بدون فیلتر شدن استفاده می‌کند، درنتیجه ممکن است قرائت های نویزی که در روش بلوکینگ حذف شده اند در این روش به‌عنوان مرز یک لایه یا رخساره در نظر گرفته شود که در این صورت دقت این روش را برای تعیین مرز واقعی لایه نسبت به روش بلوکینگ تا حدودی پایین می‌آورد. درنتیجه مرزهای مشترکی که در هر دو روش شناسایی شده اند با اطمینان بالایی به‌عنوان مرز لایه‌ها معرفی می‌شود.

۴- نتیجه گیری

یکی از مهمترین اطلاعاتی که از مخازن زیرسطحی در اختیار قرار می‌گیرد، اطلاعات نمودارهای چاه‌پیمایی است. با استفاده از تلفیق اندازه‌گیری های این نمودارها، می‌توان اطلاعات با ارزشی از مخزن به‌دست آورد. در مطالعه حاضر، با استفاده از تلفیق اطلاعات به‌دست آمده از نمودارهای GR، RHOB، NPHI، DTو PEF به‌عنوان ورودی، ابتدا با استفاده از دو روش بلوکینگ (با استفاده از فیلتر لاپلاسین) و خوشه‌سازی (با استفاده از روش MRGC)، مرزهای لایه‌بندی زمین‌شناسی در توالی یک مخزن کربناته مشخص شدند، سپس با استفاده از این مرزهای به‌دست آمده، پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات به‌صورت لایه به لایه محاسبه شد. درنتیجه مرزهای به‌دست آمده در هر دو روش با هم مقایسه شد که ملاحظه شد مرزهای تفکیک شده‌ای که در هر دو روش کاملا از لحاظ عمقی یکسان بودند، در اعماقی بودند که نمودارها دارای تغییرات قرائت بیشتری نسبت به کل قرائت-های موجود در آن‌ها بودند. درنتیجه با اطمینان بسیار بالایی این مرزها را می‌توان به‌عنوان مرز لایه‌های زمین‌شناسی مخزن عنوان کرد. البته تعداد مرزهای مشخص شده در روش خوشه‌سازی اندکی بیشتر از روش بلوک کردن نمودارها بودند

که این نیز به دلیل حذف نویزها (شرایط محیطی درون چاه) و اثرات لایه‌های جانبی در روش بلوکینگ روی نمودارها است و سبب کاهش میزان تغییرات نمودار نسبت به روش خوشه‌سازی شده است. همین امر دقت روش بلوکینگ را در تعیین دقیق‌تر مرز لایه‌های زمین‌شناسی بالا می برد. درنهایت با استفاده از مرزهای به‌دست آمده در هر دو روش و پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات که به‌صورت لایه به لایه در هر دو روش محاسبه شده بودند، با روش ارزیابی متداول پارامترهای پتروفیزیکی مقایسه شد. لازم به ذکر است که محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی نیز به روش احتمالی در این مطالعه انجام شد. در اینجا مشاهده شد که برخلاف روش ارزیابی متداول پارامترهای پتروفیزیکی که محاسبات ارائه شده در تمام توالی مورد بررسی را به‌صورت میانگین و پیوسته ارائه می‌دهد، دقت محاسبات پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی در دو روش ارائه شده به‌صورت لایه به لایه بالاتر خواهد بود و هر لایه دارای پارامترهای پتروفیزیکی و مقدار حجمی کانی‌ها و سیالات ثابتی خواهد بود که با لایه‌های بالا و پایین خود متفاوت است. این مطالعه در مخازن دارای لایه‌بندی متناوب و نازک لایه بسیار با اهمیت است.



شکل ۱۳: مقایسه پارامترهای پتروفیزیکی به روش ارزیابی متداول با روش بلوکینگ و خوشه‌سازی

مراجع

[1] Heidari, Z. and Torres-Verdin, C., 2012, Improved Detection of Bed Boundaries for Petrophysical Evaluation with Well Logs: Applications to Carbonate and Organic-Shale Formations, Society of Petroleum Engineers (SPE), 159197-PP, Texas, USA, 8-10 October, 0-12 P.

[2] Maiti, S. and Tiwari, R.K., 2010, Automatic detection of Litho-Facies via the Hybrid Monte Carlo Based Bayesian Neural Networks Approach, Biennial international conference & Exposition on petroleum geophysics, p-188.

[3] Kerzner, M.G. and Frost, E., 1984, Blocking-A New Technique for Well Log Interpretation, Society of Petroleum Engineers of AIME, 267-275 p.

[4] Cooper, G. and Cowan, D., 2009, Blocking geophysical borehole log data using the continuous wavelet transform, CSIRO publishing, Exploration Geophysics, Vol 40, 233-236 p.

[5] Popielski, A.C., Heydari, Z. and Torres-Verdin, C., 2012, Rock Classification from Conventional Well Logs in Hydrocarbon-Bearing Shale, Society of Petroleum Engineers (SPE), 159255-PP, Texas, USA, 8-10 October, 1-18 p.

[6] Serra, O. and H. T. Abbott, 1980, the contribution of logging data to sedimentology and stratigraphic, SPE 9270, 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, pp. 19.

[7] Kumar, B., Kishore M., 2006, Electrofacies Classification–A Critical Approach, 6th International Conference on Petroleum Geophysics, New Delhi, India, pp 822-825.

[8] Filho, A.A. and Shachter, R.D., 1994, Laplace's Method Approximations for Probabilistic Inference in Belief Networks with Continuous Variables, In: Lopes de Mantaras, R.; Poole, D. (eds) 1994. Uncertainty in Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann, p. 28-36.

[9] Shrivakshan, G.T. and Chandrasekar, C., 2012, A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing, International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), Vol. 9, Issue 5, No 1, 269-276 p.

[۱۰]کدخدائی ایلخچی، ع.، رضائی، م.ر.، معلمی، س.ع. و شیخ زاده، الف.، ۱۳۸۴، تخمین گونه های سنگی و تراوایی در میدان گازی پارس جنوبی با استفاده از تکنیک خوشه‌سازی میان مرکز فازی و مدلسازی فازی، نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران، ص. ۶۹۰- ۶۷۸.

[11] Rabiller, P., 2005, Facies prediction and data modeling for reservoir characterization, 1th Ed., Rabiller Geoconsulting.

[12] Serra, O., 1986, Fundamentals of Well-Log Interpretation, Vol2. The Interpretation of Logging Data, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 15B: pp. 684.

[13] Tavakoli, V., Amini, A., 2006, Application of multivariate cluster analysis in log facies determination and reservoir zonation, case study of Marun Field, South of Iran. JUST Vol. 32(2), 173-180.

[۱۴] رحیمی بهار، ع. الف. و پرهام، س.، ۱۳۹۱، تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی بر اساس رخساره‌های رسوبی، نشریهٔ علمی پژوهشی رخساره‌های رسوبی، دانشگاه فردوسی مشهد، ش. ۵ (۱)، ص. ۶۱-۷۴.

[15] Khoshbakht, F., and Mohammadnia, M., 2012, Assessment of Clustering Methods for Predicting Permeability in a Heterogeneous Carbonate Reservoir, Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 2, No. 2, 50-57.

[16] رحیمی بهار، ع.الف و حسین پورصیامی، ح.، ۱۳۹۱، تفکیک زو نهاي مختلف مخزن هیدروکربني با

کمک رخساره‌هاي الکتريکي، پژوهش نفت، شماره ۷۲، ۱٤٤ ــ ۱٥۳.
[17] Mayer, C. and Sibbit, A., 1980: "Global, a New Approach to Computer-Processed Log Interpretation", paper SPE 9341 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, September 21-24.
[۱۸] فضلی. ل، باقری. ح.، ۱۳۹۳، ارزیابی پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری به دو روش قطعی و احتمالی با استفاده از نرم افزار ژئولاگ، انتشارات ستایش، ۱۹۸ ص .