JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی
دوره ۶، شماره ۲، ۱۳۹۹، صفحات ۲۸۹–۳۰۵
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/JRAG.2020.9336.1275

بررسی کیفیت مخزن به کمک تلفیق فاکتور کیفیت و نمودار انحراف سرعت

بیژن جعفربابایی[1] و علی نخعی[1,2*]

۱- گروه مهندسی نفت، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، ایران
۲- انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: anakhaee@ut.ac.ir

واژگان کلیدی

فاکتور کیفیت
نمودار انحراف سرعت
تراوایی
چگالی شکستگی
امواج لرزه ای

چکیده

میادین هیدروکربنی ایران عمدتا در سازندهای کربناته قرار دارند. تخمین میزان میرایی موج در سنگ‌های کربناته به دلیل ساختار ناهمگن آنها دارای پیچیدگی زیادی است. به همین دلیل، انجام پژوهش‌های تکمیلی در این خصوص هنوز ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که شناسایی و بررسی کیفیت مخزن نقش اساسی در بهره‌برداری بهینه از منابع هیدوکربنی دارد، تلاش می‌گردد با مدیریت دانش و دسترسی به اطلاعات ابزارهای جدید نظیر VSP، راهکارهای جدیدی در راستای رسیدن به این هدف ارائه شود. امواج لرزه‌ای به هنگام عبور از لایه‌های زمین، از نظر محتوای فرکانسی و دامنه موج، دچار دگرریختی می‌شوند. قسمتی از کاهش دامنه امواج مربوط به ذات انتشار موج و قسمت دیگر مربوط به خصوصیات زمین‌شناسی از جمله تخلخل و شکستگی است. اکثر تحقیقات قبلی در خصوص تاثیر پارامترهای مخزنی و شکستگی‌ها بر تغییرات میزان فاکتور کیفیت، معطوف به بررسی ناهمسان‌گردی و تحلیل مدل سرعتی هستند و کمتر به بررسی ارتباط مسقیم بین پارامترهای مخزنی و میزان ضریب جذب امواج لرزه‌ای پرداخته‌اند. در این پژوهش، میزان همبستگی فاکتور کیفیت با پارامترهایی نظیر انحراف سرعت، چگالی شکستگی و تراوایی بررسی شده و تلاش شده است تا فاکتور کیفیت به عنوان ابزاری برای ارزیابی کیفیت مخزن تعریف گردد. در بررسی آماری به روش رگرسیون خطی چندگانه مشخص شد که مهم‌ترین پارامتری که از روند مقدار فاکتور کیفیت تبعیت می‌کند چگالی شکستگی است. در تحلیل انجام شده، فاکتور کیفیت، همبستگی نسبتاً خوبی با میزان تراوایی حاصل از داده‌های مغزه نشان داد به گونه‌ای که در بازه‌های با تراوایی بیشینه، فاکتور کیفیت، مقادیر کمینه را دارا بود. مطابق آنالیز خوشه‌بندی به روش K-Means Cluster، ۱۸٪ بازه مخزنی مورد مطالعه دارای کیفیت خوب، ۳۳٪ متوسط، ۳۶٪ ضعیف و ۱۲٪ عاری از هیدروکربن ارزیابی گردید.

۱ــ مقدمه

با توجه به اهمیت ذخایر هیدروکربنی و لزوم برداشت بهینه از آنها، آگاهی از کیفیت، گسترش و تغییرات جانبی مخازن برای انجام برنامه‌ریزی دقیق توسعه‌ای، اهمیتی حیاتی دارد. دستیابی به توصیف مناسب از تغییرات جانبی ناهمگنی‌های مخزن، گامی مهم در ساخت مدل مخزن به شمار می‌رود. سنگ‌شناسی، تخلخل، تراوایی و خواص سیالات منفذی از جمله مهمترین پارامترها در توصیف مخازن هستند. این پارامترها به شکل قابل ملاحظه‌ای بر مشخصات لرزه‌ای یک مخزن تاثیرگذار هستند. بنابراین، برای پیش‌بینی خواص مخزنی از روی اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای، یافتن ارتباط[1] بین این دو دسته پارامترها ضروری خواهد بود.

حفر چاه، ساده‌ترین روش دستیابی به خواص مخزنی است؛ اما به دلیل توزیع محدود چاه‌ها در مقایسه با میزان ناهمگنی‌های زمین، اطلاعات حاصل از آن نمی‌تواند توصیف مناسب و پیوسته‌ای از خواص مخزن ارائه نماید. از این رو، داده‌های لرزه‌ای به عنوان تنها منبع حاوی اطلاعات لازم در توصیف مخزن در گستره میدان، مطرح هستند. در سال‌های اخیر ترکیب داده‌های لرزه‌ای با داده‌های نمودارگیری به عنوان ابزاری کارامد برای توصیف میادین، توجه پژوهشگران را به خود جلب نموده است.

به دلیل رشد دقت ابزار نمودارهای لرزه‌ای درون‌چاهی (VSP) و توسعه نرم‌افزارهای پردازشی، در مطالعات اخیر، استناد به میزان فاکتور کیفیت نتایج مطلوب‌تری به همراه داشته است. در پژوهشی توسط Ekanem et al., (2015) همبستگی قابل قبولی بین میزان ناهمسان‌گردی، ضریب جذب در داده‌های لرزه‌ای و میزان گرانروی سیال گزارش شده است. در مطالعه دیگری، میزان جذب امواج لرزه‌ای با محوریت نشانگرهای لرزه‌ای برای سیالات و شکستگی‌ها و همچنین خصوصیات ساختاری در میدان نفتی ابوظبی بررسی شده است (Bouchaaha et al., 2016). در این پژوهش، ضمن مقایسه نتایج آزمایشگاهی مغزه و ارزیابی‌های پتروفیزیکی و مقایسه با ضریب جذب امواج پایین رونده VSP، مدلی جهت بررسی سنگ‌های کربناته با ناهمگنی بالا، ارائه شده است. Soleimani et al. (2018) به بررسی کیفیت مخزن، به کمک تحلیل سرعت امواج طولی و عرضی در کنار مقدار عددی فاکتور کیفیت، پرداختند. آنها با مقایسه نسبت سرعت موج طولی به موج عرضی و مقدار فاکتور کیفیت، به این نتیجه رسیدند که در مقادیر پایین‌تر این نسبت، میزان فاکتور کیفت سیر نزولی دارد.

بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد ایجاد ارتباط مستقیم بین پارامترهای مخزنی و میزان ضریب جذب امواج لرزه‌ای یا فاکتور کیفیت به خصوص در مخازن کربناته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، علاوه بر بررسی میزان فاکتور کیفیت، تاثیرپذیری و همبستگی بین این پارامتر و پارامترهای مستقل پتروفیزیکی و مخزنی، نظیر تراوایی، چگالی شکستگی و میزان گاز آزاد موجود در واحد حجم فضای متخلخل در یک میدان گازی بررسی شده است. نتایج این مطالعه ما را قادر خواهد ساخت حتی در نبود داده‌های مخزنی کافی بدست‌آمده از نمودارهای چاه‌پیمایی و مغزه، شرایط کیفی مخزن را با استفاده از داده‌های فاکتور کیفیت استخراج نماییم. برای این منظور، از تحلیل آماری رگرسیون خطی چندگانه جهت دستیابی به میزان همبستگی بین فاکتور کیفیت و پارامترهای مخزنی استفاده می‌شود. شکل ۱ شماتیکی از روند گام به گام این پژوهش را نشان می‌دهد.

برای انجام این پژوهش، داده‌های دو چاه ارزیابی در یک میدان گازی شامل نمودارهای پتروفیزیکی، نمودار تصویرگر الکتریکی (در یک چاه)، پروفیل لرزه‌ای قائم و اطلاعات مغزه (در یک چاه) گردآوری شدند. در گام بعدی، پس از کنترل کیفی داده‌ها در سازندهای مخزنی، ضمن تعیین شکستگی‌های طبیعی، با استفاده از نمودار تصویرگر الکتریکی، چگالی شکستگی‌ها بصورت کمّی محاسبه شد. سپس به کمک نمودارهای تخلخل، نمودار انحراف سرعت در هر یک از چاه‌ها محاسبه شد. پس از پردازش و احیای دامنه واقعی برای امواج پایین رونده در نمودارVSP، فاکتور کیفیت محاسبه گردید. در گام بعد، فاکتور کیفیت و نمودار انحراف سرعت در نواحی مخزنی، مورد مقایسه قرار گرفتند.

شکل۱: شماتیک گام به گام از طرح کلی پژوهش

سپس با استفاده از داده‌های مغزه، به روش آماری رگرسیون خطی چندگانه، میزان همبستگی پارامترهای مخزنی و فاکتور کیفیت مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت کیفیت مخزن به روش تحلیل خوشه‌ای بررسی شد.

1 Correlation

۲ـ روش کار

در این پژوهش، ابتدا به کمک نمودارهای پتروفیزیکی شامل نمودارهای صوتی، نوترون و چگالی، نمودار انحراف سرعت به دست می‌آید. با استفاده از اطلاعات تفسیر نمودار تصویرگر الکتریکی، میزان کمّی چگالی شگستگی محاسبه می‌شود. در این روش، تعداد شکستگی‌ها در راستای محور چاه در هر متر، تعریف و محاسبه می‌گردد. مقادیر گاز آزاد در واحد حجم متخلخل حاصل از تفسیر پتروفیزیکی و نیز تراوایی حاصل از آنالیز مغزه برای صحت‌سنجی نتایج این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به گازی بودن میدان مورد مطالعه، استفاده از نمودار انحراف سرعت در شناسایی رخنمون‌های مخزنی، کمک شایانی به بررسی کیفیت مخزن خواهد نمود. چرا که انتظار می‌رود در بازه‌های غنی از گاز، این نمودار مقادیر پایینی داشته باشد. در این پژوهش همچنین نشانگر لرزه‌ای فاکتور کیفیت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. زیرا این پارامتر به شناسایی نواحی حاوی هیدروکربن (خصوصاً گاز) کمک زیادی می‌کند.

به کمک امواج پایین‌رونده‌ی داده‌های پردازش‌شده‌ی پروفیل لرزه‌ای قائم به روش نسبت طیفی، میزان فاکتور کیفیت برای کل فواصل چاه محاسبه می‌گردد. در هر سازند، میزان شباهت فراوانی شاخص‌های فاکتور کیفیت و انحراف سرعت مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. سپس در یکی از چاه‌های مورد مطالعه که اطلاعات مغزه در آن موجود است به روش تحلیل آماری رگرسیون خطی چندگانه، میزان همبستگی بین پارامترهای کلیدی مخزنی مانند تراوایی و میزان گاز آزاد با فاکتور کیفیت بررسی می شود. در ادامه، کیفیت بازه مخزنی، به کمک تحلیل خوشه‌ای K-Means Cluster به صورت کمّی بررسی خواهد شد.

۲ـ۱ـ بررسی نمودار انحراف سرعت

تفکیک و تشخیص انواع منافذ و همچنین جدایش محیط‌های رسوبی و دیاژنتیکی در نمودارهای متداول پتروفیزیکی شامل نمودارهای صوتی (DT)، نوترون (NPHI) و جرم مخصوص (RHOB) قابل انجام است. نمودار انحراف سرعت، یک نمودار مصنوعی است که از ترکیب نمودارهای تخلخل و با استفاده از معادله‌ی وایلی (Wyllie et al., 1956) محاسبه می‌گردد. تا کنون مطالعات متعددی در این خصوص انجام شده است (Anselmetti and Eberli, 1999; Shirmohamadi et al., 2017). نمودار انحراف سرعت، توانایی ارائه اطلاعاتی در مورد وجود انواع تخلخل‌های اصلی کربنات‌ها، توزیع فضاهای خالی دیاژنتیکی و همچنین تراوایی مخزن را داراست. این نمودار در واقع اختلاف بین مقادیر سرعت موج تراکمی واقعی (Vp_{real}) و سرعت موج تراکمی مصنوعی (Vp_{syn}) می‌باشد. سرعت موج تراکمی واقعی طبق رابطه ۱ تعیین می‌شود.

$$Vp_{real} = \frac{304.8}{DT_{log}} \qquad (۱)$$

DT_{log}، میزان قرائت نمودار صوتی بر حسب میکرو ثانیه بر فوت است. سرعت موج تراکمی مصنوعی را نیز می‌توان طبق رابطه ۲ به دست آورد:

$$Vp_{syn} = \frac{304.8}{DT_{syn}} \qquad (۲)$$

برای به دست آوردن نمودار صوتی مصنوعی (DT_{syn}) از روابط مربوط به تخلخل استفاده می‌شود. تخلخل حاصل از نمودار صوتی از طریق رابطه ۳ بدست می‌آید. در این رابطه به جای تخلخل صوتی، تخلخل نوترون-چگالی قرار داده می‌شود و نمودار DT_{syn} از طریق این رابطه محاسبه می‌شود. با توجه به این که نوع سیال، آب شور می‌باشد DT_{fl} برابر با ۱۸۹/۵ میکروثانیه بر فوت است (Serra, 2004).

$$\varphi_s = \frac{DT_{log} - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}} \quad \rightarrow \quad \varphi_{ND} = \frac{DT_{syn} - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}} \qquad (۳)$$

بدین ترتیب می‌توان نمودار انحراف سرعت را از اختلاف سرعت حاصل از رابطه ۱ (سرعت واقعی) و رابطه ۲ (سرعت مصنوعی)، محاسبه نمود.

$$\Delta Vp = Vp_{real} - Vp_{syn} \qquad (۴)$$

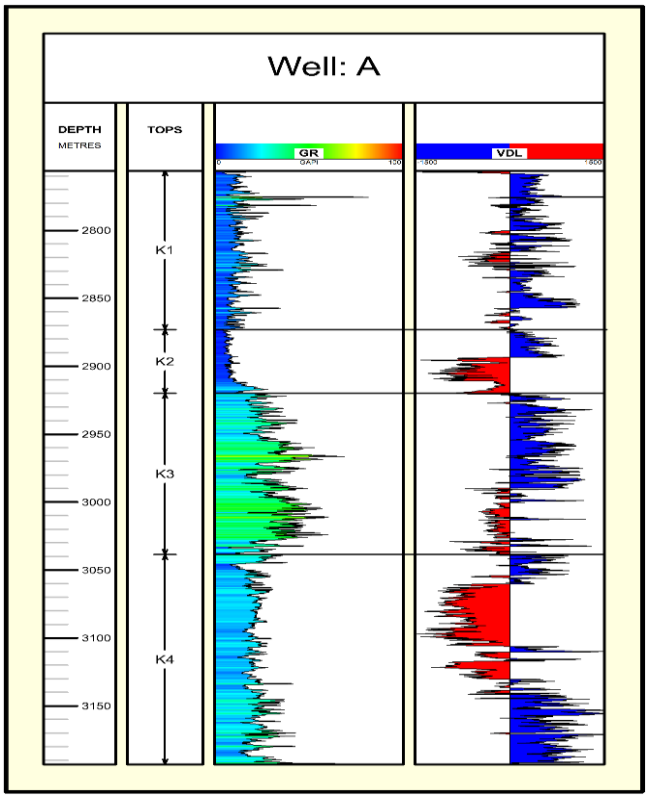
پس از محاسبه نمودار انحراف سرعت، براساس پاسخ‌های حاصل از این نمودار، سه زون از نظر نوع تخلخل، قابل تشخیص خواهد بود (Wang, 1990; Anselmett and Eberli, 1993, 1999):

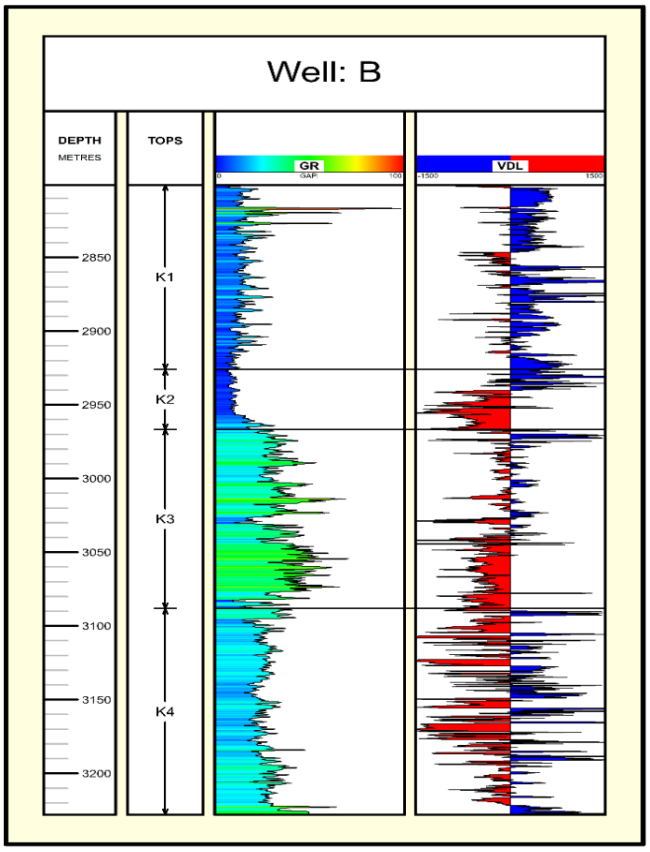
۱ـ زون‌های دارای انحراف مثبت ($Vp > +۵۰۰$). این زون‌ها که مقادیر نسبتا بالای سرعت را نشان می‌دهند نمایانگر تخلخل‌هایی نظیر تخلخل درون‌ذره‌ای (intra particle) یا تخلخل قالبی (moldic) می‌باشند و معمولاً نفوذپذیری آنها پایین است. در تخلخل‌های قالبی، انحراف مثبت، بیانگر فرایندهای دیاژنتیکی شدید، نظیر انحلال، جابجا شدن دانه‌ها و یا رسوب‌گذاری مجدد در سنگ است. در این زون‌ها، معمولاً حفره‌ها در یک زمینه‌ی سیمانی‌شده و متراکم قرار دارند. به دلیل عدم ارتباط بیشتر این حفره‌ها با هم، تراوایی سنگ پایین است.

۲ـ زون‌های دارای انحراف صفر ($-۵۰۰ < Vp < +۵۰۰$). این زون‌ها که دارای انحراف اندک و سرعت‌های نزدیک به صفر هستند بیانگر مناطقی با انواع ریزتخلخل‌ها (Micro prosity)، تخلخل‌های بین‌بلوری (Inter Crystalline) و بین‌دانه‌ای (Inter Particle) هستند. در این مناطق، برخلاف زون‌های با سرعت بالا، فرایندهای دیاژنتیکی خفیف هستند و به دلیل ایجاد تخلخل‌ها پس از ته‌نشست رسوبات، عموماً ارتباط مناسبی بین فضاهای خالی وجود دارد که باعث ایجاد تراوایی بالا می‌شود؛ البته به استثنای ریزتخلخل‌ها که باعث کاهش تراوایی می‌شوند.

۳ـ زون‌های دارای انحراف منفی ($Vp < -۵۰۰$). پایین بودن سرعت در این زون‌ها علی‌رغم تراوایی بالا، بیانگر این موضوع است که عوامل دیگری علاوه بر لیتولوژی قادر به تغییر سرعت در طول نمودار می‌باشند. سه عامل عمده را می‌توان برای این پدیده ذکر کرد: *الف) ریزش‌های دیواره چاه:* وجود حفره‌ها و یا بی‌نظمی‌های روی دیوارهٔ چاه به صورت سرعت‌های منفی بر روی نمودار صوتی بروز می‌کند. *ب) شکستگی‌های طبیعی:* گرچه تخلخل ناشی از شکستگی‌ها بعنوان تخلخل

ثانویه شناخته می‌شود و انتظار می‌رود که سرعت موج صوتی در آن زیاد و در نتیجه انحراف، مثبت باشد، مطالعات متعدد نشان داده است که شکستگی‌ها در هر دو مقیاس کوچک و بزرگ باعث کاهش سرعت امواج می‌شود. *ج) میزان گاز آزاد:* محتوای زیاد گاز آزاد نیز می‌تواند انحراف سرعت منفی ایجاد کند زیرا وجود گاز به طور مؤثر، سرعت ناشی از نمودار صوتی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کاهش محتوای هیدروژن در فاز سیال، از قرائت تخلخل حاصل از نمودار نوترون می‌کاهد.



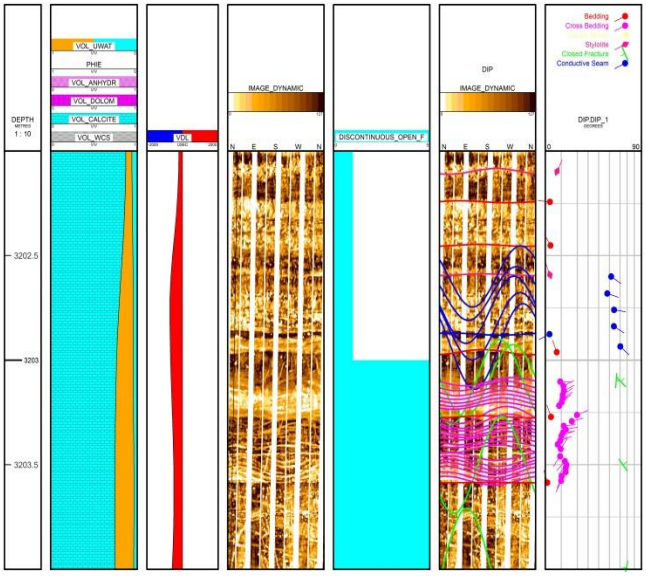


شکل۲: نمودار انحراف سرعت محاسبه شده در چاه‌های A و B (نمودار سمت راست) به همراه نمودار پرتو گاما (نمودار سمت چپ). در نمودار انحراف سرعت، انحراف مثبت از صفر با رنگ آبی و انحراف منفی با رنگ قرمز نمایش داده شده است.

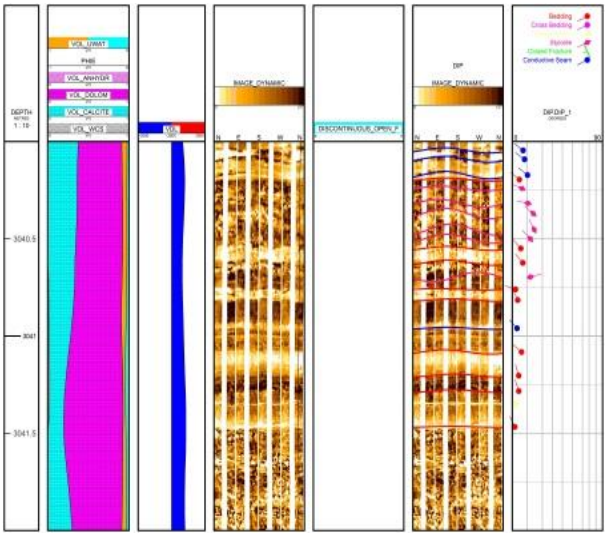
در این مطالعه از نمودارهای تصویرگر جهت تایید وجود شکستگی و نوع آن (انحراف منفی نمودار انحراف سرعت) استفاده شد. نمودار انحراف سرعت محاسبه‌شده در فواصل مخزنی چاه‌های A و B در میدان مورد مطالعه همراه با نمودار پرتو گاما در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۲ـ۲ـ بررسی شکستگی‌ها و انحراف سرعت در نمودار تصویرگر

شکستگی، رفتار الاستیک سنگ را به شدت تغییر می‌دهد. بر اساس مفهوم تجربی معادله وایلی (Wyllie et al., 1956) هیچ سنگی نمی‌تواند سرعتی کمتر از سرعت پیش‌بینی‌شده در این رابطه داشته باشد. در سنگ‌هایی که دچار شکستگی شده‌اند سرعت واقعی به شدت کاهش می‌یابد اما سرعت مصنوعی به دلیل مقدار کم تخلخل در زون‌های شکسته کاهش پیدا نمی‌کند. به همین دلیل، تفاضل سرعت مصنوعی از سرعت واقعی طبق رابطه انحراف سرعت منفی می‌شود.



شکل ۳: نمایش حضور شکستگی‌ها و تاثیر آن بر مقدار عددی انحراف سرعت در نواحی دارای شکستگی در لایه مخزنی K4.



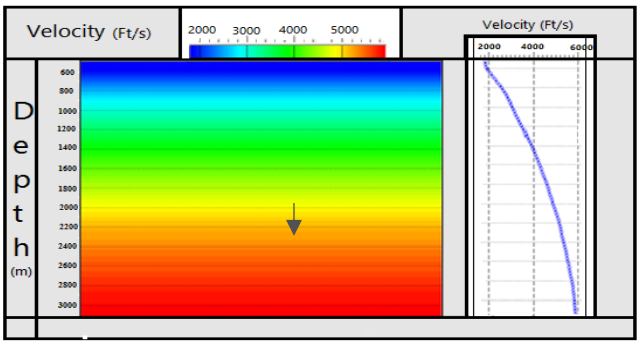
شکل ۴: مقایسه بین نمودار تصویرگر و مقدار عددی انحراف سرعت در نواحی بدون شکستگی در لایه مخزنی K3.

شکل ۳، چگالی شکستگی محاسبه‌شده و تاثیر حضور شکستگی‌ها بر کاهش مقدار عددی انحراف سرعت را در کنار ستون سنگ‌شناسی در بخشی از لایه مخزنی K4 که دارای بیشترین تراکم شکستگی می‌باشد نمایش می‌دهد. جهت مقایسه تاثیر حضور یا عدم حضور شکستگی بر نمودار انحراف سرعت، یک فاصله عمقی عاری از هرگونه شکستگی طبیعی در بخشی از لایه مخزنی K3 در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود عدم حضور شکستگی، تاثیری بر کاهش میزان نمودار انحراف سرعت ندارد.

۲ـ۳ـ بررسی داده‌های VSP

در این بخش، داده‌های لرزه‌ای درون‌چاهی مورد نیاز برای تعیین فاکتور کیفیت به طور خلاصه بررسی می‌شود. در شکل ۵ فلوچارت پردازش و روند محاسبه فاکتور کیفیت نمایش داده شده است. پس از برانبارش و تخصیص هندسی داده‌های لرزه‌ای، برای دستیابی به مدل سرعت، اولین زمان رسیدها، نشانه‌گذاری می‌شود و سپس مدل سرعت محاسبه می‌گردد. این مدل سرعت که سرعت مجذور میانگین مربعات است (شکل۶) برای احیای دامنه که بر اثر گسترش هندسی کاهیده شده است بکار برده می‌شود.

شکل ۵: فلوچارت پردازش و روند محاسبه فاکتور کیفیت.



شکل ۶: سرعت میانگین مربعات موج P از عمق ۴۰۰ تا ۳۵۰۰ متری.

به طورکلی، دو نوع کاهش دامنه موج در داده‌های لرزه‌نگاری وجود دارد: الف) کاهش دامنه ذاتی، که مربوط به گسترش هندسی موج می‌باشد و مستقل از محیط عبور موج است و ب) کاهش دامنه بر اثر عبور از سازندهای متخلخل و دارای شکستگی. انرژی آزاد شده در محل چشمه، به صورت موج، انتشار یافته و به مرور زمان بر سطح کره‌های بزرگتری توزیع می‌گردد. در نتیجه، میزان انرژی در واحد سطح به صورت تابع عکس مجذور فاصله و دامنه امواج به صورت تابعی از عکس مسافت طی‌شده کاهش می‌یابند. علاوه بر این، مقداری از انرژی نیز در لایه‌ها جذب و تلف می‌گردد که خود موجب افت بیشتر دامنه می‌گردد.

در مراحل پردازش، لازم است تا اثر کاهش دامنه‌ی ناشی از گسترش هندسی موج تا حد ممکن بر روی رد لرزه‌ها به حداقل برسد. لذا با احیای دامنه امواج به صورت نمایی به کمک ابزار ریاضیاتی می‌توان با دقت بیشتر، رخدادهای لرزه‌ای مربوط به تاثیر زمین بر داده‌ها را بررسی نمود. برای تصحیح اثر واگرایی کروی[1] باید مسافت طی‌شده (نسبت زمان گذر به سرعت متوسط) را در دامنه‌های دریافت‌شده ضرب کرد. تصحیح اثر جذب نیز با استفاده از رابطه ۵ با انتخاب ضریب جذب هندسی β مناسب انجام می‌شود.

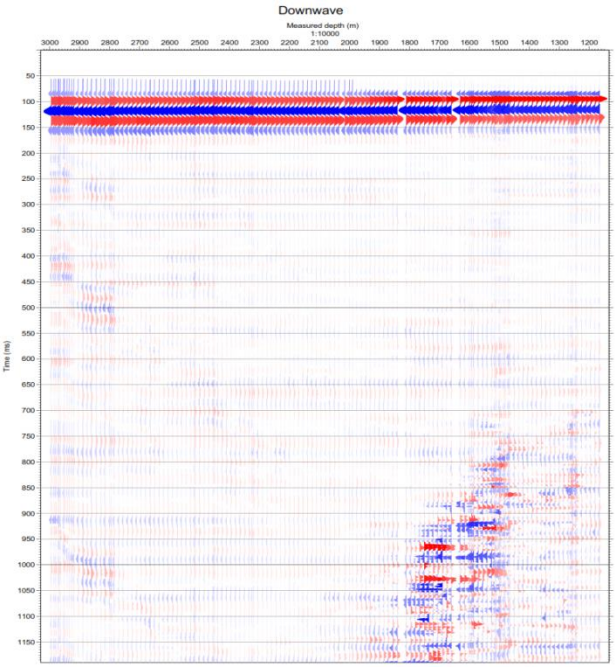
$$A = A_2 e^{-\beta(r-r_0)} \qquad (۵)$$

در این تحقیق با انجام تست‌های مختلف، مقدار عددی ضریب جذب ۱/۷ انتخاب شده است.

کاهش دامنه موج نسبت به مسافت طی شده در اثر توزیع کروی بانضمام جذب از رابطه ۶ قابل محاسبه است :

$$A = A_0 \frac{r_0}{r} e^{-\beta(r-r_0)} \qquad (۶)$$

در پردازش داده‌های لرزه‌ای، امواج بالارونده و امواج پایین‌رونده باید از همدیگر تفکیک شوند. برای این منظور، روش‌های مختلفی وجود دارد که از رایج‌ترین آن‌ها، ابزار تبدیل فیلتر F-K می‌باشد. در این تحقیق نیز از همین روش برای جداسازی امواج بالارونده و امواج پایین‌رونده استفاده شده است. لازم به یادآوری است که امواج بالارونده، به دلیل طولانی‌شدن زمان پیمایش موج، دامنه و انرژی کمتری نسبت به امواج پایین‌رونده دارند. بنابراین، برای بررسی فاکتور کیفیت، استفاده از امواج پایین‌رونده نسبت به امواج بالارونده ترجیح دارد. بعد از حذف امواج بالارونده، امواج پایین‌رونده به کمک دورافت‌های زمانی اولین رسیدها، افقی می‌شوند (شکل ۷). همان طور که مشاهده می‌شود روند توزیع دامنه در عمق‌های مختلف دارای تنوع می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر، یک پنجره زمانی از داده‌های لرزه‌ای افقی شده بین بازه زمانی ۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌ثانیه انتخاب شده است.



شکل ۷: نمایش امواج پایین‌رونده تفکیک‌شده و افقی‌شده به کمک اولین رسیدهای زمانی.

۲ـ۴ـ بررسی فاکتور کیفیت

تضعیف موج، به معنای اتلاف دامنه موج در شرایط محیطی با افزایش میدان انتشار است. تضعیف موج با نسبت دو دامنه موج تعریف می‌شود و معمولا بر حسب نِپِر یا دسی بِل بیان می‌گردد.

$$L\,[\mathrm{Neper}] = \ln(A_0/A)$$
$$L\,[\mathrm{dB}] = 20\log(A_0/A) \qquad (۷)$$

که در این رابطه، L، A_0 و A به ترتیب اتلاف، دامنه‌ی تضعیف‌نشده و دامنه‌ی تضعیف‌یافته می‌باشند.

اتلاف می‌تواند در اثر برخورد موج با مرز ناپیوستگی دو ماده رخ دهد؛ اما وقتی از تضعیف بحث می‌شود، منظور، اتلاف انرژی بر حسب مسافت انتشار است. اتلاف به طور کلی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$L = \alpha d \qquad (۸)$$

که d مسافت انتشار و α ضریب تضعیف است.

امواج لرزه‌ای در زمین تضعیف می‌شوند به طوری که امواج با بسامد بالاتر سریع‌تر از امواج با بسامد پایین‌تر جذب محیط می‌شوند. معمولا برای محاسبه تضعیف محیطی، از کمیت‌هایی مانند ضریب جذب محیطی (α) و فاکتور کیفیت (Q) استفاده می‌شود. براورد میزان تضعیف امواج لرزه‌ای در زمین حائز اهمیت است زیرا اولاً، دامنه و محتوای بسامد امواج با عبور از زمین تغییر می‌کند و ثانیاً، پارامترهای تضعیف می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد نوع سنگ و محتوای اشباع سیال آن را در اختیار ما قرار دهد (Soleimani et al., 2018).

ضریب جذب (α) یکی از پارامترهای مهم در تعیین تضعیف است

1 Spherical Divergence

که رابطه آن با دامنه بصورت زیر بیان می‌شود:

$$A_1 = A_0 e^{-\alpha r} \quad (۹)$$

که در آن A_1 دامنه در فاصله r از چشمه و A_0 مقدار اولیه دامنه می‌باشد. در دو نقطه که به فاصله یک طول موج (λ) از یکدیگر قرار دارند، می‌توان نوشت:

$$A_2 = A_1 e^{-\alpha(r+\lambda)} \quad (۱۰)$$

$$A_1/A_2 = e^{-\alpha r}/e^{-\alpha(r+\lambda)} \quad (۱۱)$$

$$A_1 = A_2 e^{\alpha\lambda} \quad (۱۲)$$

که α به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda}\ln\frac{A_1}{A_2} \quad (۱۳)$$

رابطه بین α و Q به صورت زیر است (Schön, 1996).

$$Q = \left(\frac{\pi}{\alpha\lambda}\right) \quad (۱۴)$$

قابلیت سنگ در تضعیف امواج لرزه‌ای معمولاً به وسیله یک کمیت بدون بُعد به نام فاکتور کیفیت (Q) بیان می‌شود. به طور فیزیکی، Q به عنوان نسبت انرژی به انرژی تلف شده در یک سیکل از نوسان تعریف می‌شود. سنگ‌ها دارای محدوده Q بین ۱۰ تا ۴۰۰ هستند.

برای تعیین فاکتور کیفیت روش‌های متفاوتی وجود دارند که بعضی از آن‌ها عبارتند از: روش نسبت طیفی؛ روش هماهنگ‌سازی؛ روش سیگنال تحلیلی؛ روش معادله پاشیدگی؛ روش تصحیح زمان تأخیر و روش معادله تجربی. در این تحقیق از روش نسبت طیفی استفاده شده است. در این روش، تغییرات طیفی در چند عمق مختلف در نظر گرفته می‌شود و Q محاسبه می‌گردد. رابطه Q با باند بسامد، دامنه سیگنال لرزه‌ای و دامنه چشمه به صورت زیر است (Shaw et al., 2004).

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\pi f Z}{QV}\right) \quad (۱۵)$$

که در آن، A دامنه در عمق مورد نظر Z، A_0 دامنه در محل چشمه، f بسامد موج در عمق Z، Q فاکتور کیفیت و V سرعت انتشار موج لرزه‌ای است. برای یک بسامد خاص با مقایسه نگاشت‌های لرزه‌ای در دو عمق مختلف می‌توان نوشت:

$$A_2/A_1 = A_{02}\exp(-\pi f Z_1/QV) \quad (۱۶)$$

که A_1 و A_2 دامنه‌های طیف در دو عمق Z_1 و Z_2 می‌باشند.

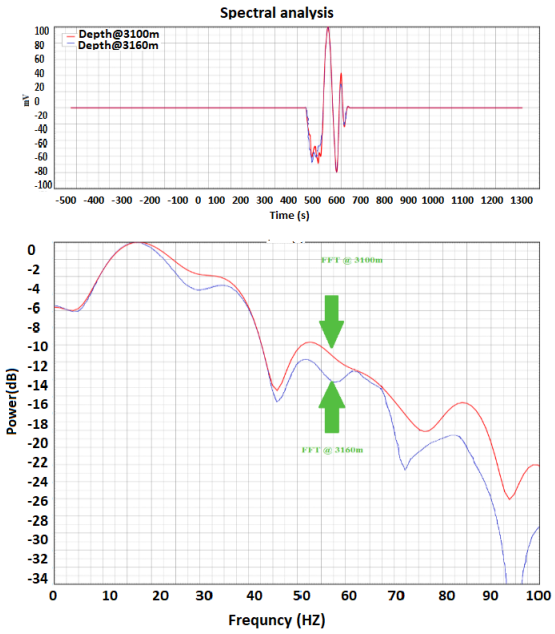
$$\ln(A_2/A_1) - \ln(A_{02}/A_{01}) = -\pi f \delta t_{2-1}/ \quad (۱۷)$$

عبارت $\ln(A_{02}/A_{01})$ ضریب تصحیح چشمه لرزه‌ای نام دارد که لگاریتم طبیعی نسبت دامنه‌های امواج از دو چشمه لرزه‌ای متفاوت در عمق‌های مختلف می‌باشد. اگر امواج از یک چشمه‌ی یکسان رسیده باشند و لرزه‌ای در نظر گرفته نشود؛ رابطه ۱۷ را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$Q = \frac{-\pi f \delta t_{2-1}}{\ln(A_2/A_1)} \quad (۱۸)$$

که در آن فاکتور Q برای موج مشخص با بسامد ثابت محاسبه می‌شود. δt_{2-1} اختلاف زمان گذر در دو عمق مختلف است.

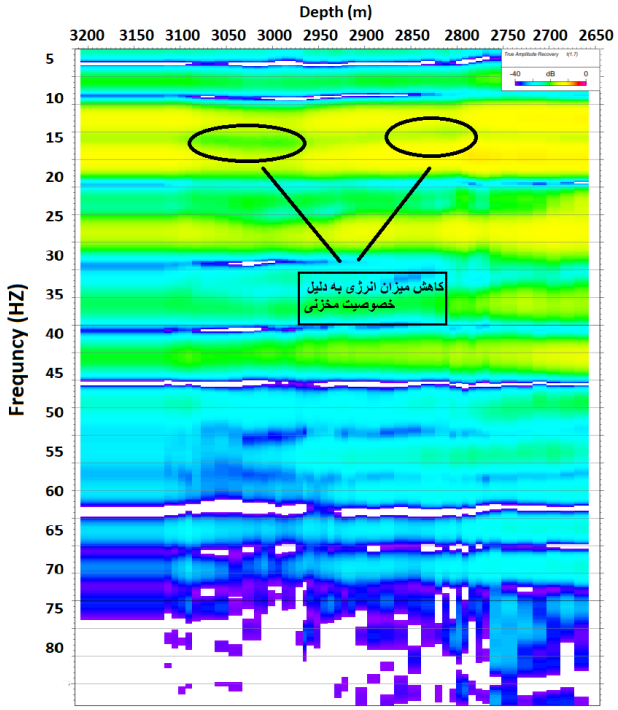
لازم به ذکر است برای نسبت‌های $0.85 < A_2/A_1 < 1.15$ ، مقدار Q از مقادیر بزرگ منفی (بی‌معنی فیزیکی) به مقادیر بزرگ مثبت در تغییر است. بنابراین این روش، تنها می‌تواند زمانی تخمین معنی‌دار و پایداری از Q ارائه دهد که مقدار میرایی بزرگ باشد (بیش از ۱۰٪ کاهش دامنه) و یا به عبارت دیگر Q کوچک باشد (De et al. 1994). علاوه بر این، این روش، دقت بالایی در لایه‌های نازک ندارد.



شکل ۸: مقایسه بین ضریب جذب و محتوای فرکانسی ردلرزه‌ها در دو عمق ۳۱۰۰ و ۳۱۶۰ متری.

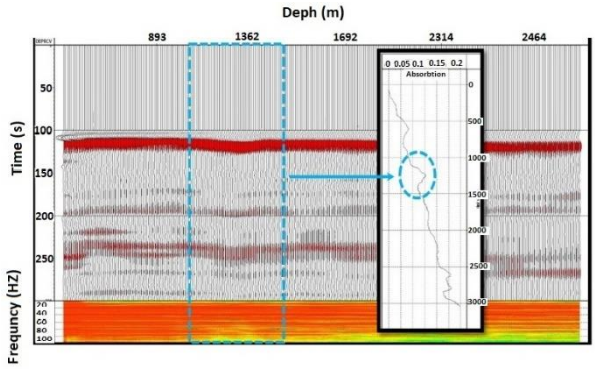
شکل ۸، مقایسه تحلیل فرکانسی دو موج پایین‌رونده را در دو عمق ۳۱۰۰ و ۳۱۶۰ متری و در محدوده‌ی پنجره زمانی انتخاب شده، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، محتوای فرکانسی به طور کلی کاهش یافته است. این کاهش در محتوای فرکانسی می‌تواند به عنوان یک نشانگر لرزه‌ای مورد بررسی قرارگیرد. با جای‌گذاری مقادیر عددی دامنه و فرکانس در رابطه ۱۸، مقدار عددی فاکتور کیفیت بدست می‌آید.

در شکل ۹، نمودار حرارتی دامنه موج بر حسب فرکانس و عمق برای کلیه ردلرزه‌ها نمایش داده شده است. در دو ناحیه مشخص‌شده در شکل، که منطبق بر دو فاصله عمقی مختلف می‌باشند، دامنه انرژی، مقادیر کمتری (طیف رنگی سردتر) را نسبت به اعماق بالا و پایین آن‌ها نشان می‌دهد که بیانگر وقوع پدیده جذب انرژی در این فواصل می‌باشد.



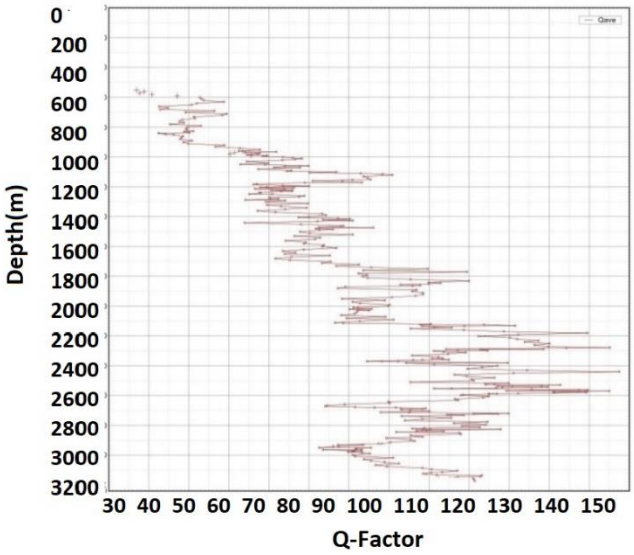
شکل ۹: توزیع فرکانسی ردلرزه‌ها برای عمق‌های مختلف و نواحی کم فرکانس.

همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در محدوده مشخص‌شده در شکل، مقدار عددی ضریب جذب نسبتاً بالا رفته است. لذا انتظار می‌رود میزان میرایی انرژی چه از لحاظ فرکانسی و چه از نظر دامنه در این محدوده دچار کاهش گردد.



شکل ۱۰: مقایسه بین ضریب جذب و محتوای فرکانسی ردلرزه‌ها در عمق‌های دارای میرایی نامتعارف.

در نهایت با استفاده از روابط ریاضی بیان شده، مقدار عددی فاکتور کیفیت محاسبه شد. در شکل ۱۱ مقدار عددی فاکتور کیفیت محاسبه شده t برحسب عمق نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: فاکتور کیفیت محاسبه شده برحسب عمق های مختلف.

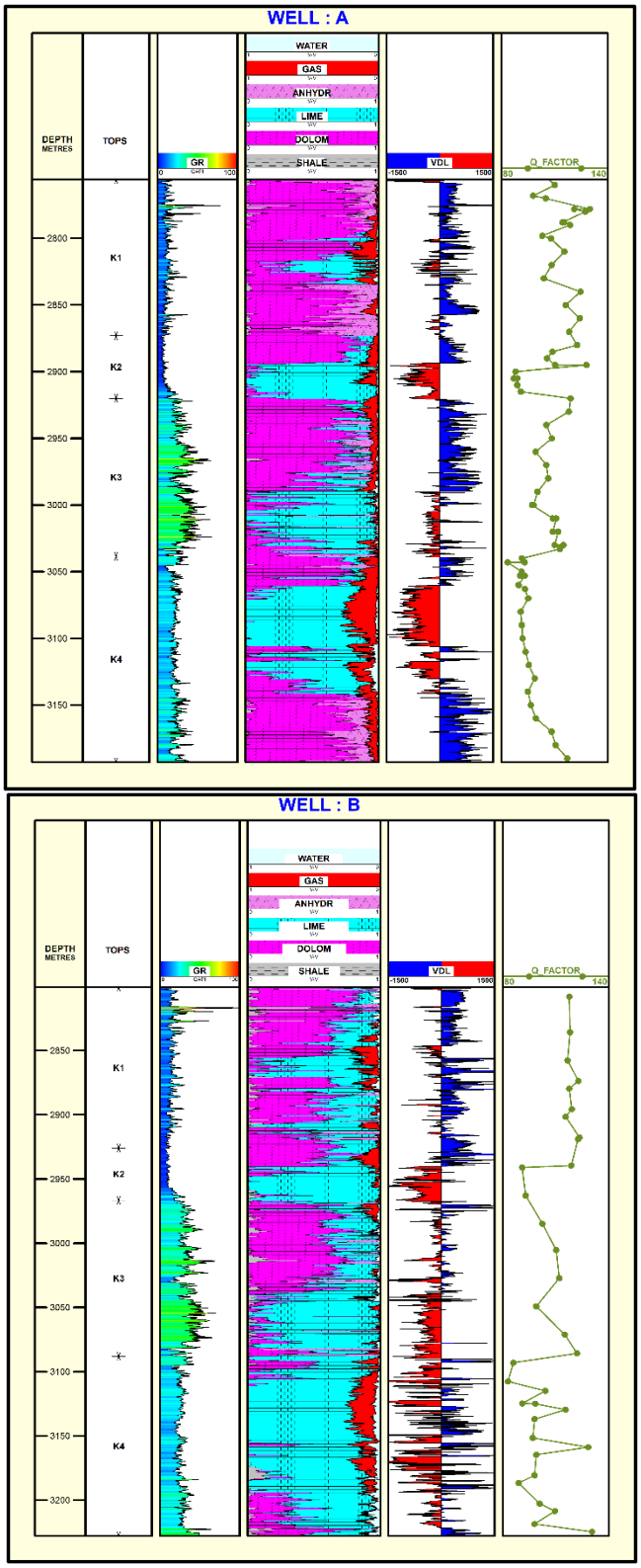
۲ـ۵ـ مقایسه فاکتور کیفیت و نمودار انحراف سرعت

در این قسمت به مقایسه عددی فاکتور کیفیت و انحراف سرعت پرداخته می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر تاثیر این فرآیند، بازه بررسی خود را به لایه‌های مخزنی (K1, K2, K3, K4) محدود می‌کنیم. برای این منظور دو چاه ارزیابی A و B از میدان گازی مورد مطالعه که در آن‌ها نمودار VSP برداشت شده بود بررسی شدند. شکل ۱۲ نمودارهای فاکتور کیفیت و انحراف سرعت محاسبه شده برای این دو چاه را در کنار نتایج ارزیابی پتروفیزیکی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نواحی دارای انحراف سرعت منفی ـ که به احتمال زیاد نشان‌دهنده فواصل غنی از گاز و یا وجود شکستگی است ـ فاکتور کیفیت مقدار کمتری دارد. برای بررسی بهتر توزیع فراوانی، مقدار عددی انحراف سرعت و مقادیر فاکتور کیفیت برای این چهار لایه مخزنی ترسیم و تحلیل شدند.

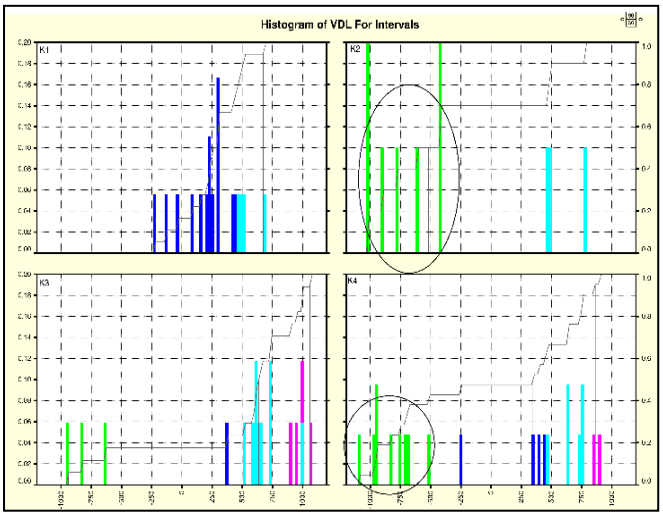
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نشان‌دهنده توزیع فراوانی مقادیر عددی انحراف سرعت در سازندهای مخزنی چاه‌های A و B می‌باشند. به منظور تحلیل و تفکیک بهتر در نمایش رخدادهای مخزنی، چهار دسته بندی عددی برای مقادیر انحراف سرعت تعیین شد: دسته ۱ (رنگ سبز) شامل مقادیر انحراف سرعت کمتر از ۵۰۰-، دسته ۲ (رنگ آبی) شامل مقادیر انحراف سرعت بین ۵۰۰- تا ۵۰۰، دسته ۳ (رنگ سبزآبی) شامل مقادیر انحراف سرعت بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ و دسته ۴ (رنگ صورتی) شامل مقادیر انحراف سرعت بین ۷۰۰ تا ۱۵۰۰. با توجه به ماهیت نمودار انحراف سرعت، دسته ۱ دربرگیرنده ناحیه با کیفیت مخزنی بالا، دسته ۲ دربرگیرنده ناحیه با کیفیت مخزنی پایین و دسته‌های ۳ و ۴ دربرگیرنده مخازن با کیفیت ضعیف تا متوسط هستند.

توزیع فراوانی فاکتور کیفیت با دسته‌بندی مورد نظر برای چهار سازند مخزنی در دو چاه مورد مطالعه در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به نمایش درآمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود مقدار فاکتور کیفیت در نواحی سبز رنگ که بیانگر کیفیت بالای مخزنی می‌باشد تقریبا همگی کمتر از ۱۰۰

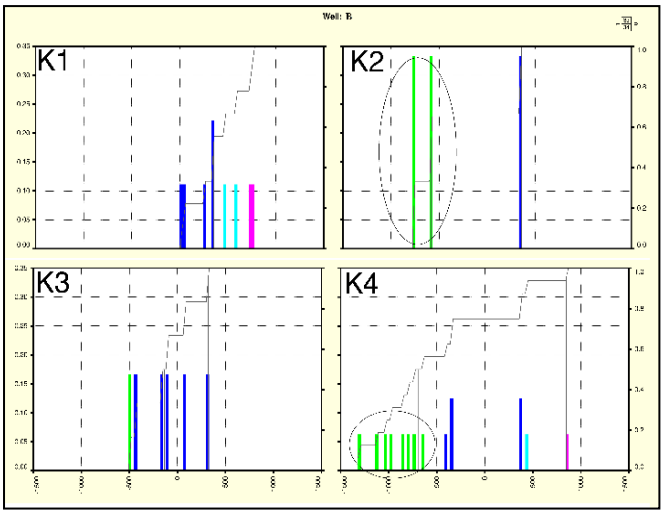
می‌باشد. به عبارت دیگر، به طور کلی در نواحی با کیفیت بالای مخزنی، مقدار عددی فاکتور کیفیت، پایین است.



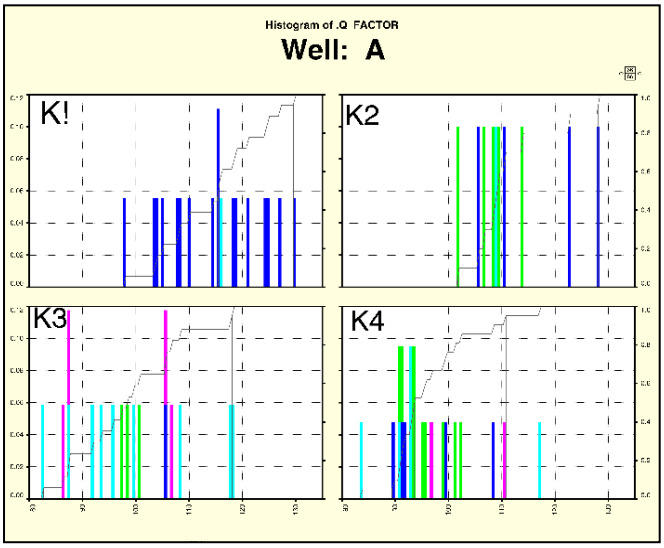
شکل ۱۲: نمودار فاکتور کیفیت و انحراف سرعت در کنار نتایج ارزیابی پتروفیزیکی برای چاه‌های A و B.



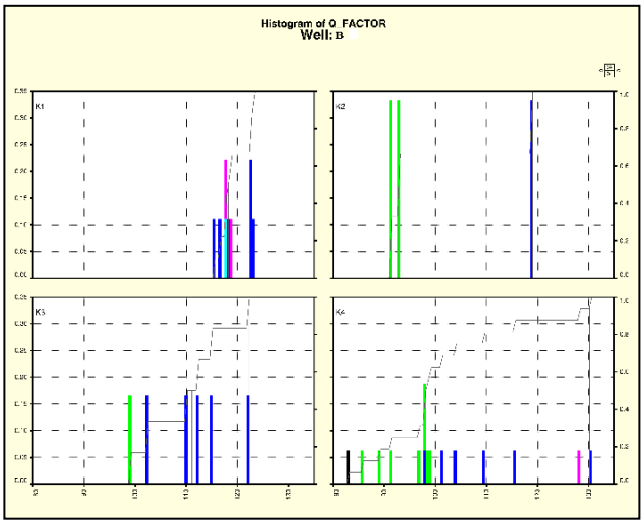
شکل ۱۳: توزیع فراوانی انحراف سرعت در چهار لایه مخزنی چاه A



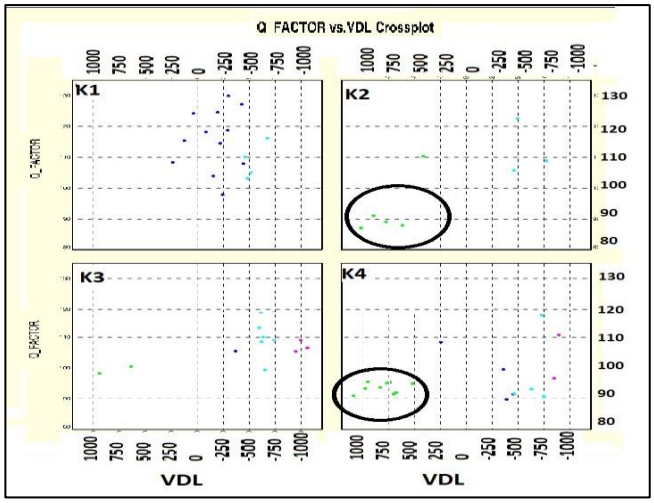
شکل ۱۴: توزیع فراوانی انحراف سرعت در چهار لایه مخزنی چاه B



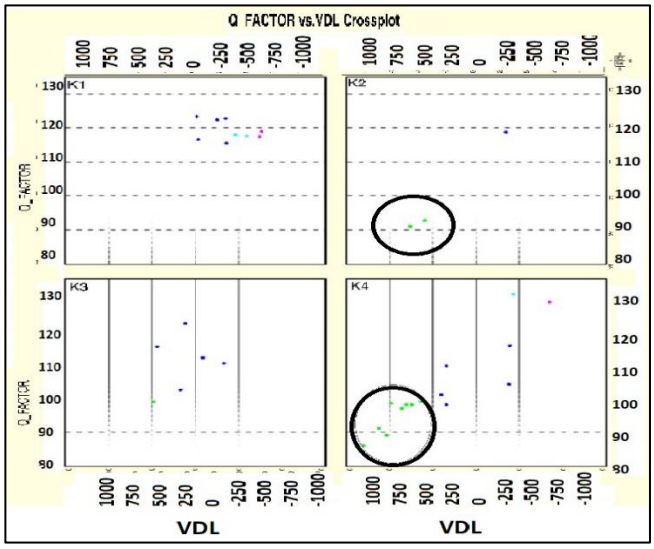
شکل ۱۵: توزیع فراوانی فاکتور کیفیت در چهار لایه مخزنی چاه A



شکل ۱۶: توزیع فراوانی فاکتور کیفیت در چهار لایه مخزنی چاه B



شکل ۱۷: نمودار متقاطع فاکتور کیفیت و انحراف سرعت در چهار لایه مخزنی چاه A

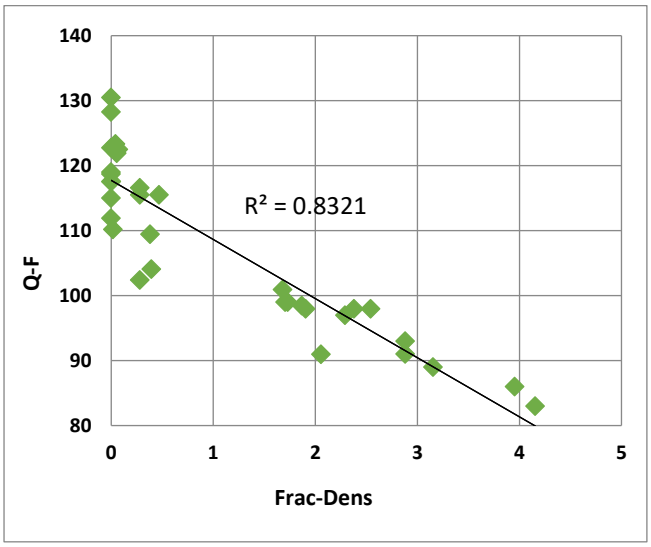


شکل ۱۸: نمودار متقاطع فاکتور کیفیت و انحراف سرعت در چهار لایه مخزنی چاه B

برای افزایش دقت بررسی‌ها، نمودار متقاطع انحراف سرعت و فاکتور کیفیت برحسب هم ترسیم گردید. نمودارهای متقاطع انحراف سرعت و فاکتور کیفیت برای چهار لایه مخزنی در دو چاه A و B در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ترسیم شده است. همان‌گونه که برای لایه‌های K2 و K4 در دو چاه مورد مطالعه مشاهده می‌شود، در روش ارائه‌شده در این پژوهش، نواحی با کیفیت بالای مخزنی و همچنین نواحی دارای شکستگی، یک محدوده از نمودار متقاطع را پوشش می‌دهند. به عبارت دیگر می‌توان از این نمودار متقاطع به عنوان ابزاری جهت بررسی نواحی مخزنی با کیفیت بالا کمک گرفت.

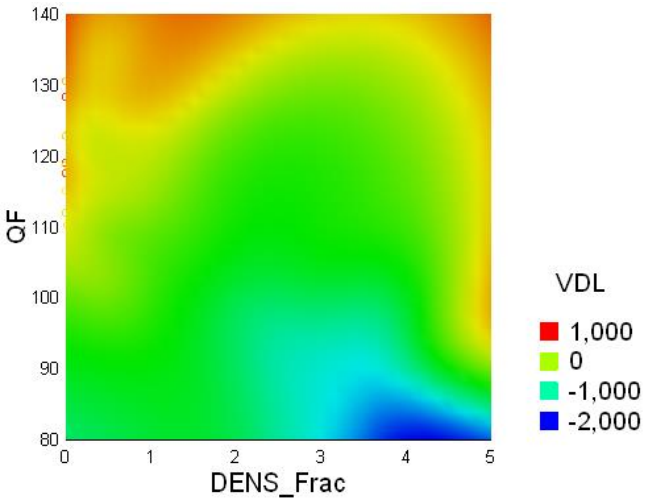
۲ـ۶ـ مقایسه فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی

با توجه به فیزیک سنگ، ارتباط مستقیمی بین میزان شکستگی و تراوایی وجود دارد (Ekanem et al., 2015). به دلیل شرایط هندسی و دانه‌بندی ساختار لایه‌های زمین‌شناسی و همچنین تفرق و پاشیدگی موج در نواحی حاوی شکستگی که منجر به کاهش مقدار عددی فاکتور کیفیت می‌گردد، انتظار می‌رود که رابطه‌ای منطقی بین داده‌های فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی‌ها وجود داشته باشد. در بررسی انجام شده با استفاده از نرم افزار آماری R، میزان ضریب تشخیص (R^2) بین فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی‌ها برابر ۰/۸۳ محاسبه شده است (شکل ۱۹). در این شکل مشاهده می‌شود که به ازای کاهش هر واحد چگالی شکستگی، فاکتور کیفیت حدوداً ۱۰ واحد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹: همبستگی بین فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی.

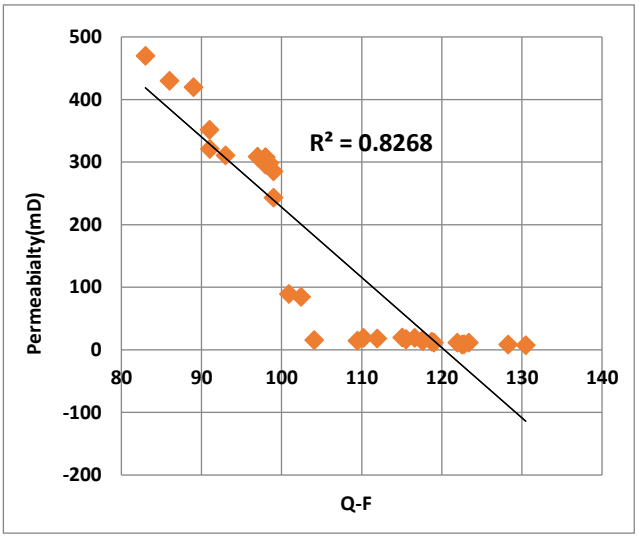
برای درک بهتر، تغییرات مقدار انحراف سرعت به ازای مقادیر مختلف فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی، به صورت نمودار حرارتی در شکل ۲۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در نواحی آبی رنگ (مقادیر کم انحراف سرعت)، مقدار فاکتور کیفیت کم و مقدار چگالی شکستگی زیاد است.



شکل ۲۰: نمایش حرارتی مقادیر عددی انحراف سرعت بر حسب فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی

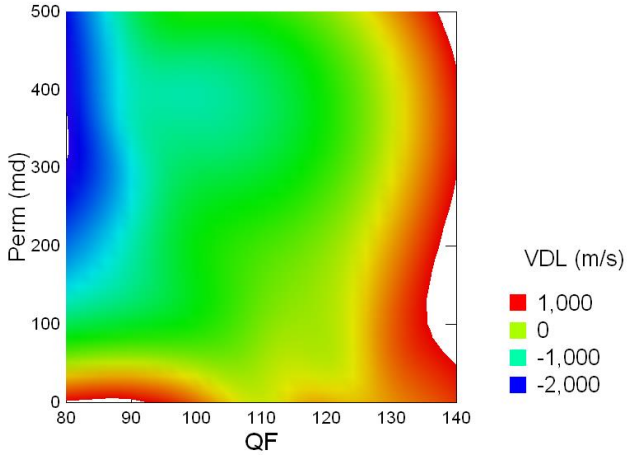
۲ـ۷ـ مقایسه فاکتور کیفیت با پارامترهای پتروفیزیکی مخزن

یکی از مهمترین اهداف این تحقیق، بررسی ارتباط بین پارامترهای مخزنی نظیر میزان گاز آزاد در واحد حجم متخلخل و تراوایی است. در این پژوهش، میزان حجم گاز با استفاده از ارزیابی نمودارهای متداول چاه‌پیمایی به کمک روش ریاضی حل معادلات احتمالی همزمان (Multimin Method) محاسبه شده است. داده‌های تراوایی نیز از آنالیز مغزه اخذ گردیده است. مشاهده شد که ضریب تشخیص نسبتاً مناسبی (۰/۸۲) بین داده‌های تراوایی و فاکتور کیفیت وجود دارد (شکل ۲۱).



شکل ۲۱: همبستگی بین فاکتور کیفیت و تراوایی مغزه.

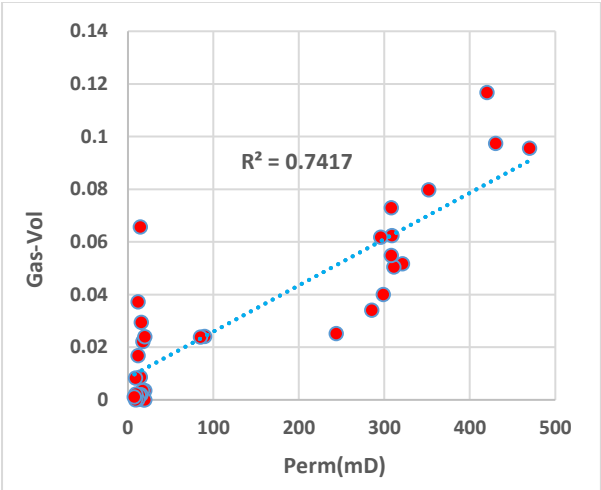
در شکل ۲۲، نمودار حرارتی تغییرات انحراف سرعت بر حسب فاکتور کیفیت ترسیم شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که مقادیر کم انحراف سرعت ـ که با طیف رنگ سرد نشان داده شده است ـ در محدوده‌ای رویت می‌گردد که مقدار فاکتور کیفیت پایین و مقدار تراوایی نسبتاً زیاد است.



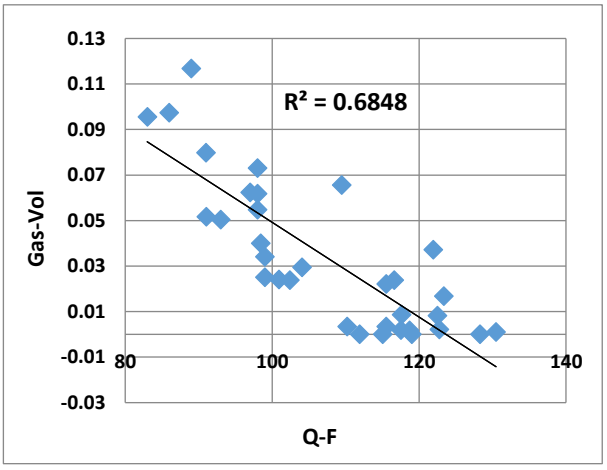
شکل ۲۲: نمایش حرارتی مقادیر عددی انحراف سرعت بر حسب فاکتور کیفیت و تراوایی مغزه.

از آنجا که میزان حجم گاز از روابط تئوری مشتق گردیده است، برای صحت‌سنجی، ضریب تشخیص (R^2) بین حجم گاز و تراوایی ـ که از آنالیز مستقیم مغزه بدست آمدهـ محاسبه می‌شود. همان گونه که در شکل ۲۳ نشان داده شده است مقدار ضریب تشخیص برابر ۰/۷۴ است که معرف همبستگی قابل قبول مابین تراوایی مغزه و میزان گاز در واحد حجم متخلخل می‌باشد. بنابراین می‌توان به میزان گاز محاسبه‌شده اعتماد نموده و آن را به عنوان یکی از شاخص‌های تاثیرگذار بر روند تغییرات فاکتور کیفیت لحاظ نمود. علاوه بر این، محاسبه نشان می‌دهد مقدار ضریب تشخیص بین فاکتور کیفیت و میزان گاز محاسبه شده در واحد حجم متخلخل برابر با ۰/۶۸ است (شکل ۲۴).

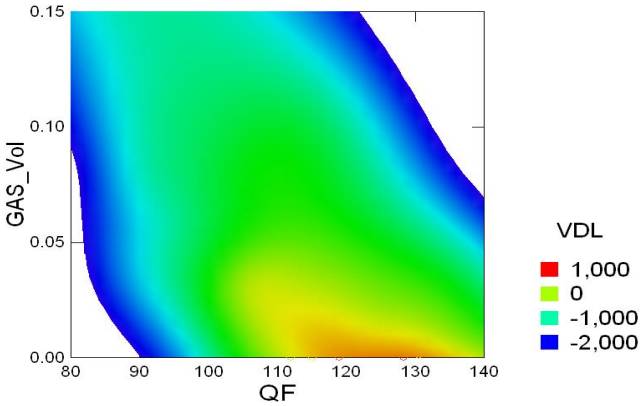
در شکل ۲۵، نمودار حرارتی تغییرات انحراف سرعت بر حسب فاکتور کیفیت و میزان گاز در واحد حجم متخلخل ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر بالای فاکتور کیفیت (محدوده ۱۱۰ تا ۱۴۰) و مقادیر انحراف سرعت مثبت، متناظر با حجم ناچیزی از میزان گاز (محدوده ۰ تا ۰/۰۵ از واحد حجم متخلخل) می‌باشند.



شکل ۲۳: همبستگی بین تراوایی و میزان گاز.



شکل ۲۴: همبستگی بین فاکتور کیفیت و میزان گاز

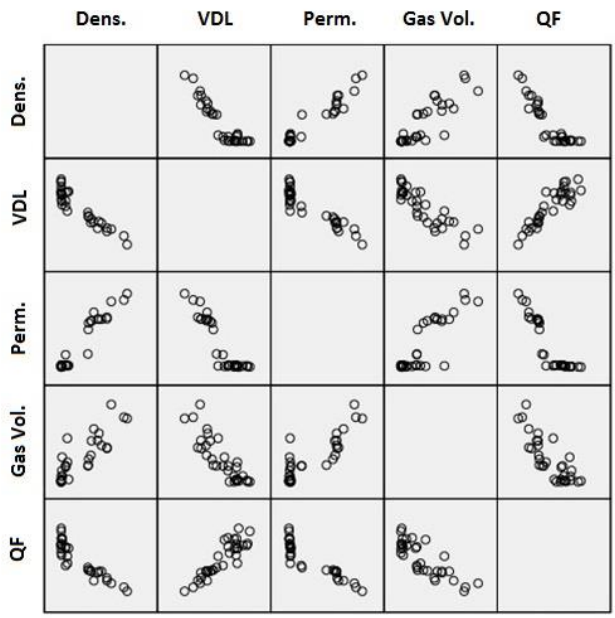


شکل ۲۵: نمایش حرارتی مقادیر عددی انحراف سرعت بر حسب فاکتور کیفیت و میزان گاز در حجم متخلخل.

۲ـ۸ـ بررسی خوشه بندی و نواحی با کیفیت مخزنی

در این مرحله، جهت دست‌یابی به بهترین ارتباط بین فاکتور کیفیت و پارامترهای مورد مطالعه، از روش رگرسیون خطی چندگانه گام‌به‌گام[1] استفاده شد. در این تحلیل، مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ به عنوان سطح معناداری آماری در نظر گرفته شد. آنالیز رگرسیون نشان داد که چگالی شکستگی بیشترین همبستگی را با فاکتور کیفیت دارد. به عبارت دیگر، تبعیت تغییرات چگالی شکستگی از روند تغییرات فاکتور کیفیت از سایر پارامترها مشهودتر است.

به کمک روش K-Means Clustering، خوشه‌بندی داده‌های تراوایی، نمودار انحراف سرعت، چگالی شکستگی، حجم گاز و فاکتور کیفیت، انجام شد. در شکل ۲۶، توزیع پراکندگی داده‌های مربوط به این پارامترها بر حسب یکدیگر نمایش داده شده است. پس از بررسی، چهار خوشه، به عنوان بهینه‌ترین خوشه‌ها انتخاب شدند که معرف کیفیت‌های مخزنی خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف هستند. در جدول ۱، مقادیر نما (Mode) هر کدام از پارامترهای مورد مطالعه در خوشه‌های چهارگانه آورده شده است.



شکل ۲۶: توزیع پراکندگی پارامترهای فاکتور کیفیت، حجم گاز، تراوایی، چگالی شکستگی و انحراف سرعت بر حسب یکدیگر.

جدول ۱: مقدار نما[2] پارامترها در خوشه‌های تعریف شده.

پارامتر	خوشه‌ها			
	۱	۲	۳	۴
چگالی شکستگی	۳/۲۲	۱/۸۱	۰/۱۳	۰/۰۰
انحراف سرعت	-۱۱۷۴/۹۰	-۶۲۴/۸۲	۲۰۹/۴۳	۷۳۴/۱۹
تراوایی	۳۷۶/۸۳	۲۰۸/۳۹	۱۴/۸۱	۱۲/۵۲
حجم گاز	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰
فاکتور کیفیت	۸۹/۸۸	۱۰۱/۴۷	۱۱۷/۲۳	۱۲۰/۶۱

در جدول ۲، تعداد داده‌های هر خوشه آورده شده است. بر این اساس، ۱۸٪ کل بازه مخزنی مورد مطالعه دارای کیفیت خوب، ۳۳٪ متوسط، ۳۶٪ ضعیف، و ۱۲٪ عاری از هیدروکربن ارزیابی می‌شود.

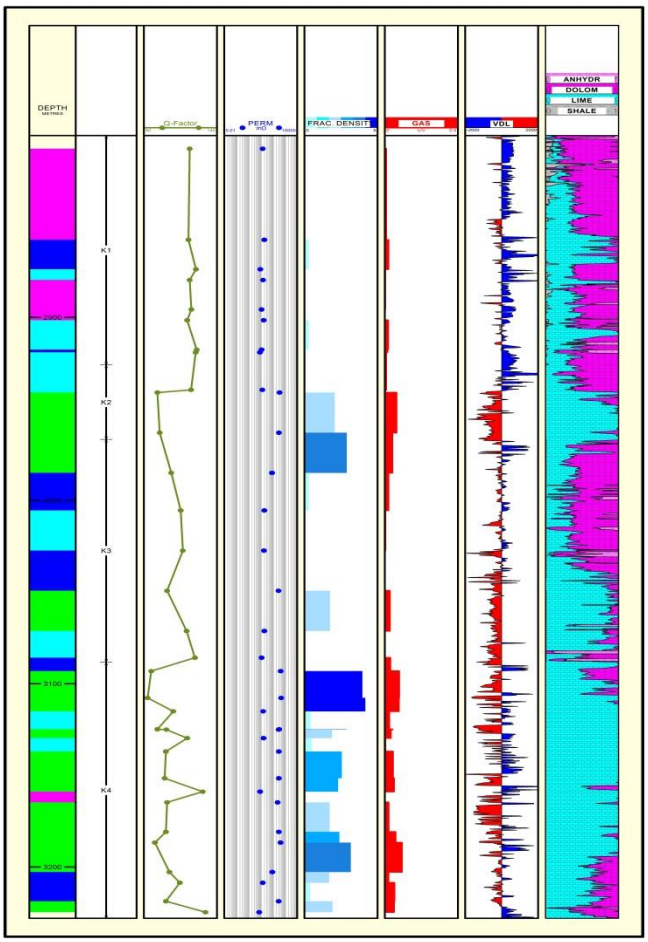
جدول ۲: فراوانی داده‌ها در هر خوشه.

خوشه	فراوانی
۱ (خوب)	۶
۲ (متوسط)	۱۱
۳ (ضعیف)	۱۲
۴ (پوچ)	۴
گمشده	۰
معتبر	**۳۳**

1 Stepwise Multiple Linear Regression

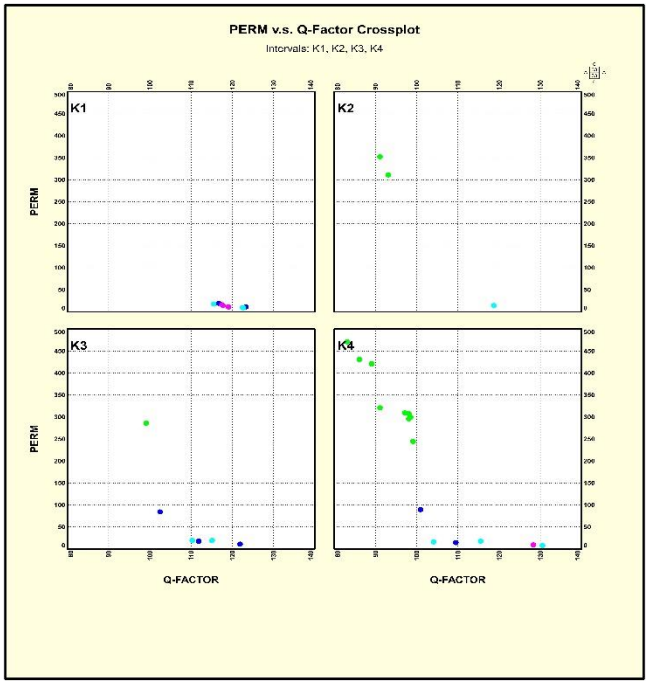
2 mode

در شکل ۲۷، در کل بازه مخزنی چاه مورد مطالعه، نمودارهای سنگ‌شناسی، انحراف سرعت، میزان گاز آزاد، چگالی شکستگی، تراوایی و فاکتور کیفیت ترسیم شده‌اند. در ستون سمت چپ این شکل (عمق)، خوشه‌های مختلف با رنگ‌بندی متمایز شده‌اند. خوشه ۱ (خوب) با رنگ سبز، خوشه ۲ (متوسط) با رنگ آبی فیروزه‌ای، خوشه ۳ (ضعیف) با رنگ آبی تیره و خوشه ۴ (بسیار ضعیف) با رنگ صورتی نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در خوشه ۱ (سبز) که معرف وجود مخزن با کیفیت بالاست، چگالی شکستگی، تراوایی و میزان گاز، بیشترین مقادیر را دارا بوده و مقدار فاکتور کیفیت و انحراف سرعت پایین است. در مقابل، در خوشه ۴ (صورتی) که معرف فواصل عاری از هیدروکربن است، کمترین میزان چگالی شکستگی، تراوایی و گاز آزاد و بیشترین مقدار فاکتور کیفیت و انحراف سرعت مشاهده می شود. در خوشه‌های ۲ و ۳ نیز مقادیر حد واسط این پارامترها دیده می‌شوند.

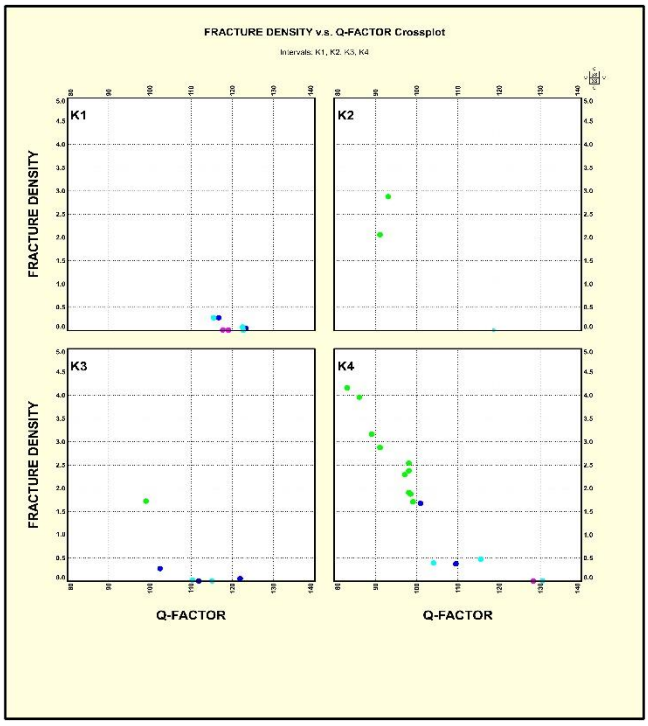


شکل ۲۷: نمودار مقایسه‌ای سنگ‌شناسی، میزان انحراف سرعت، حجم گاز آزاد، چگالی شکستگی، تراوایی به‌دست‌آمده از آنالیز مغزه و فاکتور کیفیت به ازای عمق و خوشه‌بندی (سبز: خوشه ۱ ؛ آبی فیروزه‌ای: خوشه ۲ ؛ آبی تیره: خوشه ۳ ؛ صورتی: خوشه ۴).

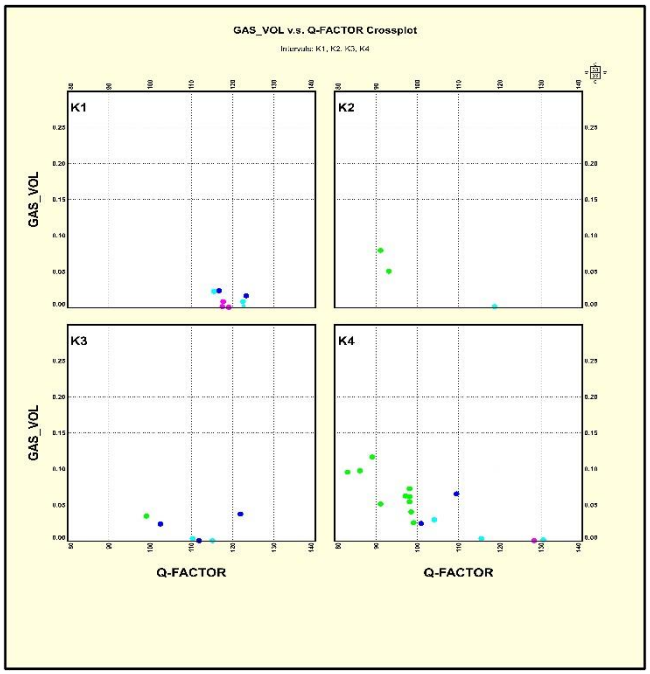
پس از ارزیابی کیفیت مخزنی در کل بازه مورد مطالعه، جهت شناسایی زون‌های بهره‌ده در هر یک از لایه‌های مخزنی (K1 تا K4)، به صورت جداگانه نمودار متقاطع تراوایی (شکل ۲۸)، چگالی شکستگی (شکل ۲۹) و میزان گاز آزاد (شکل ۳۰) بر حسب فاکتور کیفیت رسم گردید. به طور کلی از شکل‌های ۲۸ تا ۳۰ چنین می‌توان استنباط نمود که لایه مخزنی K4 بیشترین نقاط سبز رنگ (معرف خوشه یک) را به خود اختصاص داده است که بیانگر کیفیت مخزنی خوب این لایه و متعاقباً پتانسیل بهره‌برداری بیشتر می‌باشد. پس از این لایه، لایه‌های K2 و K3 و در نهایت لایه K1 در رتبه‌بندی کیفیت مخزن قرار می‌گیرند.



شکل ۲۸: نمودار متقاطع فاکتور کیفیت و تراوایی در چهار لایه مخزنی.



شکل ۲۹: نمودار متقاطع فاکتور کیفیت و چگالی شکستگی در چهار لایه مخزنی.



شکل ۳۰: نمودار متقاطع فاکتور کیفیت و میزان گاز آزاد در چهار لایه مخزنی.

۳ـ نتیجه‌گیری

- در بررسی آماری به روش رگرسیون خطی چندگانه مشخص شد که مهم‌ترین پارامتری که از روند تغییرات فاکتور کیفیت تبعیت می‌کند چگالی شکستگی است. بنابراین انتظار می‌رود که فاکتور کیفیت در نواحی دارای شکستگی نسبت به نواحی عاری از شکستگی، کاهش چشم‌گیرتری داشته باشد.
- در تحلیل انجام شده، فاکتور کیفیت، همبستگی نسبتاً خوبی با میزان تراوایی حاصل از داده‌های مغزه نشان داد به گونه‌ای که در بازه‌های با تراوایی بیشینه، فاکتور کیفیت، مقادیر کمینه را دارا بود.
- مطابق نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای، در لایه‌های مخزنی K4 و K2 که حجم گاز بیشتری نسبت به سایر لایه‌ها مشاهده می‌شود، علاوه بر تراوایی بالا، فاکتور کیفیت نیز مقدار پایینی را داراست.
- با توجه به صحت‌سنجی فرضیات این پژوهش به کمک اطلاعات مغزه و نمودار تصویرگر موجود در چاه B، می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی قابل قبولی بین فاکتور کیفیت و پارامترهای مخزنی وجود دارد. بنابراین، به عنوان دستاورد اصلی این پژوهش، می‌توان فاکتور کیفیت را برای تخمین کیفیت مخزن در سایر چاه‌های این میدان گازی که فاقد نمودارهای چاه‌پیمایی و داده‌های VSP هستند به کار برد. همچنین می‌توان انتظار داشت تنها با در اختیار داشتن داده‌های VSP در یک یا چند چاه از هر میدان گازی کربناته و بدون اخذ نمودارهای پتروفیزیکی، مغزه و سایر آزمایشات مخزنی، بتوان با دقت قابل قبولی به بررسی کیفیت مخزن پرداخت.
- تحلیل آماری داده‌های چاه B (چاه شاهد) نشان می‌دهد همخوانی بالایی بین مقادیر انحراف سرعت و فاکتور کیفیت در نواحی با کیفیت مخزنی بالا وجود دارد.
- بر اساس تحلیل انجام شده، مقدار فاکتور کیفیت در فواصل مخزنی با کیفیت خوب، در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ می‌باشد.
- مطابق آنالیز خوشه‌بندی به روش K-Means Cluster، ۱۸٪ بازه مخزنی مورد مطالعه در چاه B دارای کیفیت خوب، ۳۳٪ متوسط، ۳۶٪ ضعیف و ۱۲٪ عاری از هیدروکربن ارزیابی گردید.
- تحلیل مقایسه‌ای بین نمودارهای انحراف سرعت و فاکتور کیفیت نشان می‌دهد مقدار فاکتور کیفیت در نواحی غنی از گاز و دارای شکستگی، کمتر از ۱۰۰ و نمودار انحراف سرعت کمتر از ۵۰۰- می‌باشد. همچنین در نواحی با کیفیت پایین مخزنی، مقدار فاکتور کیفیت بالاتر از ۱۱۵ و محدوده نمودار انحراف سرعت بین ۵۰۰- الی ۵۰۰ می‌باشد.
- بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود کاربرد این روش در مدلسازی ناهمگنی مخازن و همچنین تحلیل داده‌های لرزه‌ای دوبعدی و سه عدی، جهت پیش‌بینی کیفیت مخزنی میادین گازی قبل از حفر چاه‌ها، مورد مطالعه قرار گیرد.

۴ـ فهرست نمادها

فهرست نمادهای مورد استفاده در این مقاله در زیر آورده شده است.

نماد	واحد	شرح
γ	-	ضریب جذب
ω	*rad/s*	بسامد زاویه‌ای
φ_s	-	تخلخل حاصل از نمودار صوتی
λ	-	طول موج
α	-	ضریب تضعیف
β	-	ضریب‌کاهش‌گسترش‌هندسی
VSP	-	پروفیل لرزه‌ای قائم
VDL	-	نمودار انحراف سرعت
DT_{fl}	*μsec/ft*	زمان گذر موج صوتی از سیال
DT_{mu}	*μsec/ft*	زمان گذر موج صوتی از ماتریکس
d	*m*	مسافت انتشار
Q	-	فاکتور کیفیت
A	*dB*	بزرگی دامنه
V_p	*m/s*	سرعت موج طولی
φ_{ND}	-	تخلخل نمودارهای نوترون و چگالی

۵ـ منابع

Anselmetti, F.S. and Eberli, G.P., 1993. Controls on sonic velocity in carbonates. Pure and Applied geophysics, 141(2-4), pp.287-323.

Anselmetti, F.S. and Eberli, G.P., 1999. The velocity-deviation log: A tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs. *AAPG bulletin*, *83*(3), pp.450-466.

Bouchaala, F., Ali, M.Y. and Matsushima, J., 2016, November. Seismic Wave Attenuation: Promising Attribute for Fluids, Fractures and Tar Mats Characterization in Abu Dhabi Oilfields. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Society of Petroleum Engineers.

De, G.S., Winterstein, D.F. and Meadows, M.A., 1994. Comparison of P-and S-wave velocities and Q's from VSP and sonic log data. *Geophysics*, *59*(10), pp.1512-1529.

Ekanem, A.M., Li, X.Y., Chapman, M. and Main, I.G., 2015. Seismic attenuation in fractured porous media: insights from a hybrid numerical and analytical model. *Journal of Geophysics and Engineering*, *12*(2), pp.210-219.

Guadagno, F.M. and Nunziata, C., 1993. Seismic velocities of fractured carbonate rocks (southern Apennines, Italy). *Geophysical Journal International*, *113*(3), pp.739-746.

Shaw, F., Worthington, M.H., Andersen, M.S. and Petersen, U.K., 2004, June. A study of seismic attenuation in basalt using VSP data from a Faroe Islands borehole. In *66th EAGE Conference & Exhibition*.

Serra, O. and Serra, L., 2004. *Well logging: data acquisition and applications* (p. 688). Méry Corbon, France: Serralog.

Soleimani, B., Rangzan, K., Larki, E., Shirali, K. and Soleimani, M., 2018. Gaseous reservoir horizons determination via Vp/Vs and Q-Factor data, Kangan-Dalan Formations, in one of SW Iranian hydrocarbon fields. *Geopersia*, *8*(1), pp.61-76.

Shirmohamadi, M., Kadkhodaie, A., Rahimpour-Bonab, H. and Faraji, M.A., 2017. Seismic velocity deviation log: An effective method for evaluating spatial distribution of reservoir pore types. *Journal of Applied Geophysics*, *139*, pp.223-238.

Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, *21*(1), pp.41-70.

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)
2020, VOL 6, NO 2
(DOI): 10.22044/JRAG.2020.9336.1275

Investigation of reservoir quality by integration of quality factor and velocity deviation log

Bijan Jaffarbabaei[1] and Ali Nakhaee[1,2*]

1- Department of Petroleum Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran
2- Institute of Petroleum Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 3 February 2020; Accepted: 4 June 2020

Corresponding author: anakhaee@ut.ac.ir

Keywords

Quality factor
Velocity deviation log
Permeability
Fracture density
Seismic waves

Extended Abstract

Summary

Due to the development in the software processing and accuracy of borehole tools (such as vertical seismic profile (VSP) measurement tool), the quality factor has been more favorable in recent studies. In this case study, the main objective was to investigate the correlation between quality factor and reservoir parameters such as velocity deviation log (VDL), fracture density, and gas content in porous volume unit. In this study, two appraisal wells of a gas field were selected. After checking data quality, natural fractures were calculated numerically using the electrical image log as well as the fracture density. In the next step, using the porosity logs, the velocity deviation log of each well was calculated and then, the quality factor was calculated using spectral ratio method after processing and true amplitude recovery (TAR) for the downgoing waves in the VSP log. These two calculated logs were compared at the reservoir intervals. Then, in one well using statistical analysis of multiple linear regression, the correlation between the reservoir parameters and the quality factor were analyzed, and then, the reservoir quality was evaluated by cluster analysis. Finally, the statistical analysis of the reservoir quality was performed using K-means cluster analysis. This methodology was tested on two appraisal wells in a gas field in which for both wells, reasonable results were obtained.

Introduction

Hydrocarbon fields of Iran are mainly composed of carbonate rocks. These rocks have very heterogeneous structure. Moreover, limited studies have been performed to estimate the attenuation rate in carbonate rocks. Since identifying and assessing the quality of the reservoir is the most important factor for optimal utilization of hydrocarbon resources, new strategies are needed to achieve this goal by knowledge management and access to information using new tools such as VSP measurement tool. Seismic waves will be deformed as they pass through layers of earth, in terms of frequency content and wave amplitude, in which a part of the reduction in amplitude is related to the nature of the waves, and also, to the geological structure including porosity, permeability and fracture. Thus, the question is: what are the effects of reservoir parameters and fractures on the reservoir quality?

Recent researches by researchers have focused more on the anisotropy and velocity model analysis of the reservoirs. Therefore, it can be concluded that the direct relationship between the reservoir parameters and their importance and impact on the coefficient of absorption of seismic waves or quality factor is missing from their perspective. In this research, based on the reservoir quality factor, the correlation between this parameter and other parameters such as velocity deviation, fracture density and permeability is investigated. In this study, it has been attempted to define and make meaningful the reservoir quality factor as a tool for relatively acceptable evaluation of the reservoir quality. Furthermore, in statistical analysis by multiple linear regression method, the most important parameter that affects the amount or trend of the quality factor is fracture density.

Methodology and Approaches

In the first step in this study, two appraisal wells of a gas field with a complete set of petrophysical logs (in both wells), electrical image log (in one of the wells), vertical seismic profiles as well as core data (in one of the wells) were selected. After the data quality control in the reservoir formations, natural fractures were calculated numerically using the electric imager log as well as the fracture density.

In the next step, using the porosity logs, the velocity deviation log of each well was calculated, and then, the quality

factor was calculated using spectral ratio method after processing and true amplitude recovery (TAR) for the downgoing waves in the VSP log. These two calculated logs were compared at the reservoir intervals. Then, after obtaining the core data in the wells, the correlation between the reservoir parameters and the quality factor using statistical analysis of multiple linear regression were analyzed, and finally, the reservoir quality was evaluated using cluster analysis. As a result, the statistical analysis of the reservoir quality, which is one of the main objectives of this study, was performed using K-means cluster analysis.

Results and Conclusions

The proposed method in this study is a rather fast novel approach for investigation of reservoir quality by integrating quality factor and velocity deviation log in high quality reservoir intervals, and also, in fractured intervals of the reservoir layers in two appraisal wells. Cross plots of petrophysical logs can be used as a unique tool to investigate high quality reservoir intervals. In gaseous and fractured zones, the quality factor mainly had values less than 100, and the velocity deviation logs mainly had values less than -500 m/s. In this analysis, the quality factor showed a relatively good correlation with the permeability of the core data, and at high permeability intervals, the quality factor also had minimum values. According to the results of cluster analysis by K-means cluster method, 18% of the entire study intervals had good quality, 33% moderate, 36% poor and 12% of them were free of hydrocarbon. Using the proposed method, high reservoir quality intervals or highly fractured zones can be easily distinguishable from other intervals. Due to the independence of seismic elastic waves from physical well conditions, using this innovative approach can minimize operational risk. By extending this method to 2D and 3D seismic data, the reservoir quality can be predicted with reasonable accuracy. Since the validity of this method has been confirmed, thus in gas fields with VSP data, the reservoir quality can be obtained without the need to run petrophysical logs, coring and other reservoir tests.