

تعیین روشی نوین برای شناسایی زون‌های شکسته بر روی نمودارهای پتروفیزیکی و تطابق آن با نمودارهای تصویرگر

قاسم عقلی*، بهمن سلیمانی، عباس چرچی و ایمان زحمتکش

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۲۵

چکیده

در مطالعه مخازن نفتی که تولید در آنها تابع سیستم شکستگی است، آنالیز شکستگی‌ها به‌ویژه در مراحل تولید و توسعه میدان هیدروکربنی بسیار مهم و ضروری است. هدف از این تحقیق، تعیین روشی سریع برای تشخیص زون‌های شکسته با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی به‌عنوان داده‌ای ارزان که در همه چاه‌ها وجود دارند و تعیین میزان تاثیر این شکستگی‌ها بر تخلخل و تراوایی مخزن آسماری میدان نفتی بالا رود می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که گرچه عوامل بسیاری از جمله لیتولوژی و سیالات مخزنی بر روی نمودارهای پتروفیزیکی تأثیر می‌گذارند، اما با کمی تصحیح بر روی نمودارها و استفاده از روش‌های ریاضی از جمله مشتق‌گیری می‌توان زون‌های شکسته را بر روی نمودارهای پتروفیزیکی مشخص نمود، که تطابق خوبی را با نتایج حاصل از نمودارهای تصویرگر و نمودار انحراف سرعت نشان می‌دهند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که زون‌های با تمرکز بالای شکستگی را می‌توان به راحتی بر روی نمودارهای پتروفیزیکی در سطح اول مشتق‌گیری مشخص نمود. مشتق‌گیری از هر نمودار به وسیله تابعی که برای آن نمودار تعریف می‌شود صورت می‌گیرد. باید توجه نمود که داشتن اطلاعات از تکتونیک و زمین‌شناسی میدان کمک زیادی بر تشخیص زون‌های شکسته می‌نماید. تولید در مخزن آسماری این میدان، تلفیقی از شکستگی‌ها و ماتریکس سنگ است. در این مخزن شکستگی‌ها و زون‌های متخلخل تأثیر فراوانی بر خصوصیات سنگ مخزن داشته‌اند. نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که برای شناسایی زون‌های شکسته در میادین قدیمی که نمودارهای تصویرگر وجود ندارند می‌توان از نمودارهای پتروفیزیکی استفاده کرد، همان‌طور که در مطالعات پتروفیزیکی، شش نمودار PEF، DT، GR، NPHI، RHOB و CAL بیشترین کاربرد را دارند. در تشخیص زون‌های شکسته همین شش نمودار بهترین ابزارها می‌باشند، که براساس نحوه واکنشی که در مقابل شکستگی‌ها از خود نشان می‌دهند و انجام تصحیح بر روی این نمودارها می‌توان زون‌های شکسته را شناسایی نمود.

کلمات کلیدی: شکستگی، مشتق‌گیری، نمودارهای پتروفیزیکی، نمودارهای تصویرگر، نمودار

انحراف سرعت

مقدمه

سیستم تخلخل و یا نوع حفره [۹، ۱۳ و ۱۴] نتیجه می‌شود که معادله وابلی و یا هر معادله دیگر نمی‌تواند ارتباط پیچیده تخلخل و سرعت را در کرنات‌ها نشان دهد. زیرا توزیع سرعت صوت الگوی انعکاس لرزه‌ای را کنترل می‌نماید. در این زمینه نمودار انحراف سرعت^۳ پیشنهاد می‌شود. نمودار انحراف سرعت که از ترکیب نمودار صوتی با نمودار تخلخل نوترون و یا نمودار چگالی حاصل می‌شود، ابزاری مناسب برای تشخیص تخلخل‌های اصلی در کرنات‌ها محسوب می‌شود [۹].

از اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی با اختراع نمودارهای تصویرگر و توسعه این ابزار، مشکل شناسایی شکستگی‌ها و ویژگی‌های آنها، همچون شیب، بازشدگی، پرشدگی و غیره، مرتفع گشت [۱۵]. این ابزار ضمن برخورداری از قدرت تفکیک بالا، امکان شناسایی تغییرپذیری‌های کوچک مقیاس را فراهم می‌آورد. بنابراین در نگاه اول به نظر می‌رسد که با وجود نمودارهای تصویرگر، مشکلی در خصوص شناسایی شکستگی‌های مخازن شکسته وجود نداشته باشد. اما واقعیت آن است که به دو دلیل نمودارهای تصویرگر مشکل شناسایی شکستگی‌ها را به‌طور کامل حل نکرده‌اند [۱۶]، اول این‌که بیش از یک دهه از کاربرد صنعتی این نمودارها نمی‌گذرد، بنابراین کلیه چاه‌ها که پیشتر حفر شده‌اند، فاقد اطلاعات نمودارهای تصویرگر هستند. دوم این‌که متأسفانه دانش فنی برداشت و تفسیر این نمودارها همچنان منحصر به تعداد محدودی شرکت بین‌المللی است. بنابراین در عمل مشاهده می‌شود که در کمتر از ۱۰٪ چاه‌ها این نمودارها وجود دارند [۱۵].

آنالیز شکستگی‌ها- کلیدی برای دستیابی به اطلاعات

شکستگی‌ها دارای سه بعد هستند مطالعه شکستگی‌ها زمانی که قسمت اعظم مخزن تخلخلی

شکستگی‌ها نقش مهمی در جریان سیال و تولید مخازن شکافدار دارند. لذا شناسایی شکستگی‌ها و ویژگی‌های آنها، از مسائل مهم مطالعه و مدل‌سازی مخازن شکسته است [۱، ۲]. از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم شناسایی شکستگی‌ها می‌توان به استفاده از مقاطع لرزه‌ای، نمودارهای پتروفیزیکی، آزمایش چاه^۱، هرزروی گل و توصیف مغزه‌ها و نمودارهای تصویرگر اشاره کرد [۳، ۴]. اما هر کدام از این روش‌ها با محدودیت‌های جدی همراه هستند. مقاطع لرزه‌ای^۲ تنها قدرت تفکیک شکستگی‌ها و گسل‌های بزرگ مقیاس را دارند [۵]. مغزه‌ها نیز با محدودیت‌هایی همچون ضریب باز یافت پایین در زون‌های شکسته، جهت‌دار نبودن و اصولاً موجود نبودن به دلیل هزینه بالای مغزه‌گیری مواجه‌اند. استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی از دیگر روش‌های موثر در شناسایی شکستگی‌ها است اما بایستی توجه داشت که هیچ نموداری به‌تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده شکستگی‌ها باشد، به نحوی که شناسایی شکستگی‌ها توسط ابزارهای چاه‌پیمایی متداول، نیاز به استفاده ترکیبی از نمودارها دارد [۶]. نمودارهای چاه‌پیمایی نظیر صوتی و تخلخل نوترون ابزار مفیدی برای پیش‌بینی سنگ‌شناسی از طریق خواص فیزیکی در چاه‌های فاقد مغزه هستند [۷]. در این نمودارها با استفاده از معادله میانگین سرعت وایلی [۸]، میزان تخلخل قابل محاسبه است [۷ و ۹]. معمولاً استفاده از نمودار صوتی نسبت به نمودارهای چگالی و تشعشعی به دلیل هزینه کمتر، سریع‌تر و مسایل ایمنی بیشتر ترجیح داده می‌شود [۱۰]. هر چند اندیس تخلخل ثانویه که در ارتباط با شکستگی و حفرات غاری است توسط نمودار صوتی آشکار نمی‌شود [۱۱]. از آنجا که انحرافات در ارتباط پیش‌بینی تخلخل سرعت وجود دارد به دلیل پیش‌بینی بیش از اندازه معادله متوسط- زمان [۱۰] یا به دلیل تراکم ضعیف، حضور گاز، و وجود کانی‌های غیر کرناته [۱۲] یا ژئومتری

1. Well Testing Seismic cross-sections

2. Velocity-deviation log

امتداد، مورفولوژی، فراوانی نسبی و روابط زاویه‌ای بین دسته‌های شکستگی تعیین نمود [۲۳]. این اطلاعات را می‌توان از طریق داده‌های مغزه جهت‌دار و نمودارهای تصویرگر به دست آورد. شکستگی‌ها بر مبنای فرآیند پیدایش به سه دسته عمده زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- شکستگی‌های طبیعی. این شکستگی‌ها می‌توانند در ارتباط با چین‌خوردگی یا گسلش باشند که برای میدان مورد مطالعه از طریق تفسیر نمودارهای تصویرگر در دو حلقه چاه شماره ۳ (FMI) و ۴ (OBMI-UBI)^۲ مشخص شدند و نتایج حاصل از تفسیر، بر روی نقشه UGC^۳ میدان آورده شده است (شکل ۱).

۲- شکستگی‌های حاصل از عملیات حفاری یا مصنوعی
۳- شکستگی‌های توسعه یافته

تأثیر زون‌های شکسته بر نمودارهای پتروفیزیکی

اولین گام در این تحقیق، تعیین تأثیر شکستگی‌ها بر نمودارهای پتروفیزیکی است. به‌طور کلی اکثر متخصصین پتروفیزیک معتقدند که به دلیل قابلیت تفکیک ضعیف نمودارهای پتروفیزیکی، شکستگی‌ها تأثیر قابل‌ردیابی بر آنها نخواهند گذاشت. بنابراین یک مسیر دو مرحله‌ای برای رفع این مشکل انتخاب شد. اول اینکه به جای استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی در شناسایی خصوصیات شکستگی‌ها از آنها برای تشخیص زون‌های شکسته از شکسته استفاده شد. که در صورت جواب دادن این مرحله می‌بایست از بعضی ویژگی‌های نمودارها برای تعیین میزان تمرکز شکستگی‌ها در رون‌های شکسته استفاده نمود، که مرحله دوم محسوب می‌شود.

حاصل از شکست دارد یا زمانی که نوع عملکرد مخزن قویا مدل‌های در نظر گرفته شده برای مخزن را نقض می‌کند اهمیت به‌سزایی دارد، برای مثال می‌توان به مواردی اشاره نمود که تولید ناگهانی و دور از انتظار آب را داریم [۱۵]. به‌طور عمده شناسایی شکستگی‌ها به دو دلیل مهم است که یکی اثر آنها بر استقامت مخزن است و دیگری به دلیل تأثیر بر توانایی ذخیره نفت. از عوامل کنترل‌کننده چگونگی عملکرد شکست‌های طبیعی باز و نفوذپذیر در مخازن می‌توان به ماهیت و درجه چین‌خوردگی یا گسل خوردگی، استرس‌های تکتونیک ناحیه‌ای، استرس‌های درجا و تغییر در خصوصیات سنگ مانند تخلخل، لایه‌بندی و به‌ویژه شیلی شدن اشاره نمود [۱۷ و ۱۸]. مشکل اساسی در مطالعه شکستگی‌ها در مقیاس وسیع بر مبنای شبیه‌سازی چاه یا مغزه‌های جهت یافته این است که شکست‌ها در دیواره چاه ممکن است جزء شبکه بزرگ شکست‌ها که کنترل‌کننده تولید است نباشد. از این رو پی بردن به رابطه داده‌های ژئومتریک چاه با خصوصیات زمین‌شناسی مخزن (ساختمان، لایه‌بندی، رسوب‌شناسی و دیاژنز) لازم می‌باشد [۱۹]. کاملاً روشن شده است که در مخازن خاورمیانه تعداد زیادی از مناظر ناپیوسته مانند کارست و استرس‌هایی که منجر به شکست می‌شوند وجود دارد [۲۰ و ۲۱]. معمولاً این سیستم شکستگی‌ها، در عمق کم ایجاد می‌شود و ممکن است سطح ارتباط بالاتری نسبت به شکستگی‌های تکتونیک ایجاد کند و تأثیر زیادی بر رفتار و عملکرد مخزن دارند [۱].

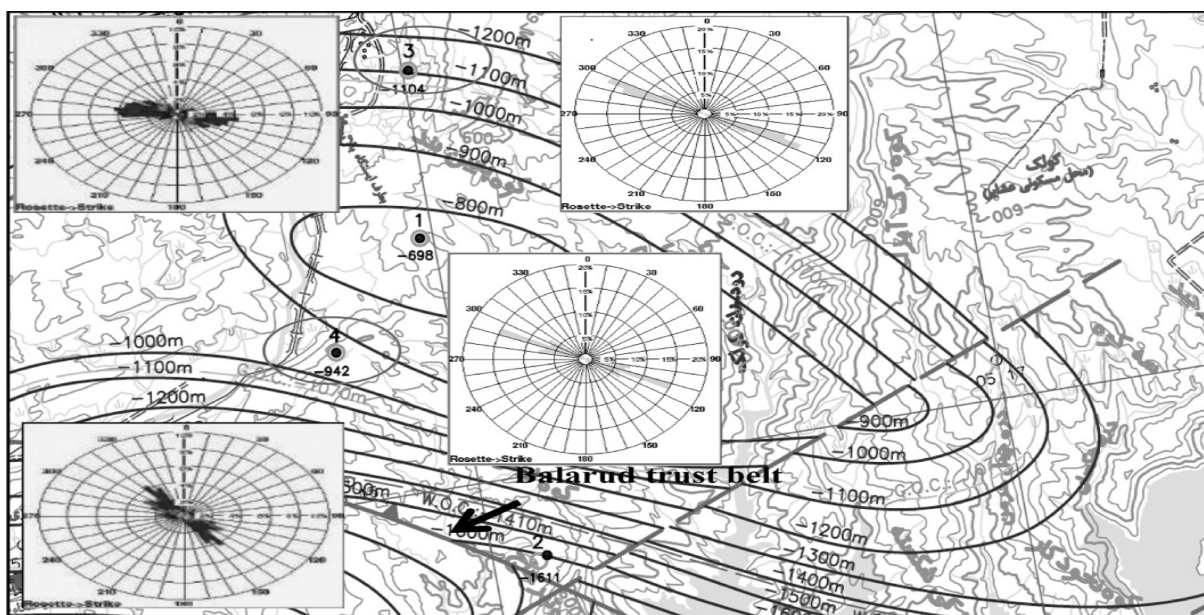
تعریف شکستگی‌ها و مفاهیم مربوط به آن

واژه شکستگی به هرگونه گسیختگی یا ناپیوستگی فیزیکی در سنگ اطلاق می‌شود که از حد آستانه مقاومت سنگ گذشته باشد شکستگی‌ها، درزها و گسل‌ها را شامل می‌شوند [۲۲]. تفاوت این دو دسته، در جابه‌جایی یا سکون صفحات است. منشأ سیستم‌های شکستگی را می‌توان از طریق شییب،

1. Formation Micro Imager

2. Oil Base Mud Imager- Ultrasonic Borehole Imager

3. Under ground Contour Map

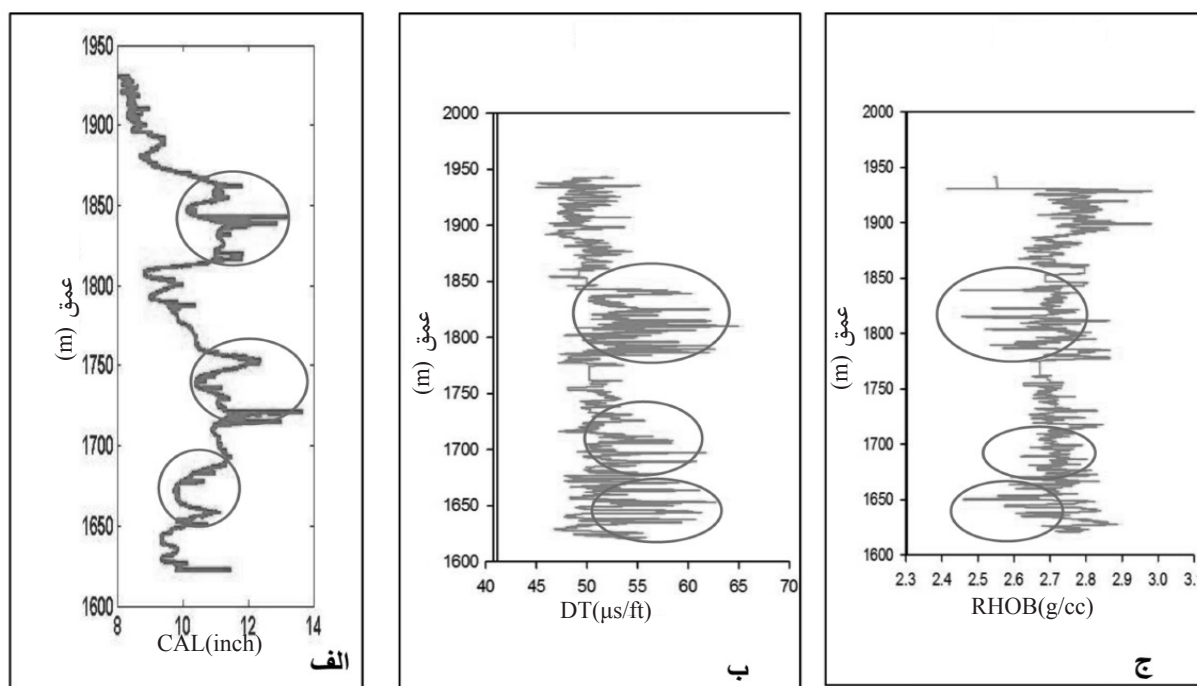


شکل ۱- نقشه UGC میدان بالارود و نمایش امتداد شکستگی‌ها و لایه‌بندی روی آن (گسل معکوس بالارود در یال جنوبی قابل مشاهده است)

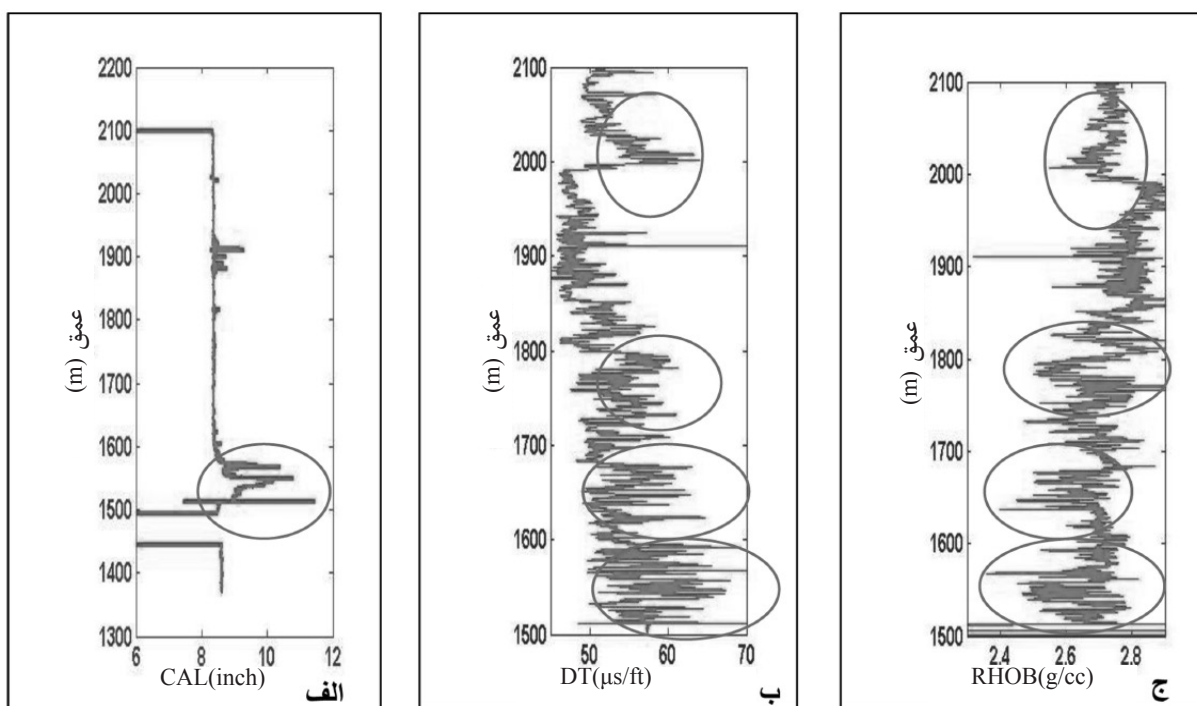
این نکته هم مهم است که تعداد زیادی از مخازن جهان و ایران کربناته هستند و بسیاری از مخازن کربناته شکسته‌اند و نفوذپذیری آنها بیش از مخازن متخلخل شکسته است [۲۵]. بنابراین مشکل کمبود اطلاعات از شکستگی‌ها مشکل متداول بسیاری از مخازن هیدروکربوری است و طبیعتاً از اهمیت اقتصادی فراوانی نیز برخوردار است. در ادامه تاثیر شکستگی‌ها بر روی نمودارهای پتروفیزیکی پرکاربرد به اختصار توضیح داده می‌شود.

برای نمودار قطر سنج^۱ افزایش، کاهش و عدم تغییر قطر چاه در زون شکسته محتمل است. اما با شناسایی زون‌های شیلی می‌توان دقت کار را بالا برد که در صورت تشخیص زون‌های غیر شیلی در صورت ریزش دیواره احتمال حضور زون‌های شکسته بالا خواهد بود (شکل ۲ و ۳، الف). برای نمودارهای توریم، پتاسیم و CGR به‌طور معمول پتاسیم و توریم در زون‌های شکسته افزایش نشان می‌دهند. افزایش نمودار پتاسیم به دلیل افزایش شیل یا کانی‌های رسی رخ می‌دهد. شیل سنگی است که خاصیت شکل‌پذیری داشته و شکستگی کمتر در آن رخ می‌دهد.

سپس در این مرحله نسبت به تخمین فراوانی شکستگی‌ها در آن زون‌ها اقدام شد که از سایر داده‌ها مثل هرزروی گل و نمودار انحراف سرعت به منظور روش‌های کمکی استفاده شد و در نهایت نتایج حاصله با نتایج نمودارهای تصویرگر مقایسه گردید. بدون شک اگر زون‌های شکسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نمودارهای پتروفیزیکی نداشته باشند. امکان شناسایی آنها توسط این نمودارها وجود نخواهد داشت. با توجه به دقت ابزارهای جدید باید مطمئن بود زون‌های شکسته تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی نمودارها می‌گذارند که این تأثیر در ادامه بررسی می‌شوند. در این خصوص توجه به این نکته کلیدی حائز اهمیت است که به‌طور کلی مدل‌سازی شکستگی‌ها، بر پایه تصویر بوده و بنابراین میزان اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی به مراتب بیشتر از اطلاعات مورد نیاز جهت مدل‌سازی بر پایه نقطه خواهد بود. همچنین آن‌جا که بخش عمده‌ای از جریان سیال در مخازن شکسته در شکستگی‌ها است، مدل شکستگی‌ها در واقع پایه استاتیک مدل دینامیک جریان سیال بوده و لذا اعتبار آن معرف اعتبار مدل‌های دینامیک جریان سیال خواهد بود [۵]. توجه به



شکل ۲- نمودارهای پتروفیزیکی چاه شماره ۳ همراه با نمایش زون‌های شکسته (دوایر بزرگ‌تر تمرکز بالاتر شکستگی را نشان می‌دهند).



شکل ۳- نمودارهای پتروفیزیکی چاه شماره ۴ همراه با نمایش زون‌های شکسته (دوایر بزرگ‌تر تمرکز بالاتر شکستگی را نشان می‌دهند).

سنگ باشد. بدیهی است افزایش CGR معرف این خواهد بود که شانس نشکسته بودن سنگ بیشتر است [۲۶].

نمودار اورانیوم و GR، مقادیر بالای اورانیوم در دو حالت قابل انتظار است: ابتدا در شیل‌های داغ

بنابراین بدیهی است که با افزایش نمودار پتاسیم، شانس نشکسته بودن سنگ نیز افزایش می‌یابد. توریم نیز عنصری که به صورت ذاتی در سنگ‌های رسی مشاهده می‌شود. لذا به دلیل مشابه با پتاسیم، افزایش آن می‌تواند معرف نشکسته بودن

فراوانی شکستگی‌های باز در یک زون بالا باشد و فشار گل نیز نسبت به فشار سازند در حدی بالا باشد که امکان رسوب کردن گل در شکستگی‌ها فراهم گردد. در موقعیت زون‌های شکسته انتظار افزایش در مقدار نمودار RHOB دور از انتظار نخواهد بود. بنابراین استفاده از این نمودار به منظور شناسایی زون‌های شکسته نیاز به ظرافت و دقت بالایی خواهد داشت (شکل ۲ و ۳ ج). نمودار PEF از نمودارهای مناسب جهت شناسایی سنگ‌شناسی است. نمودار PEF نیز یک تغییرپذیری دوگانه در زون‌های شکسته دارد. اگر شکستگی‌ها در زون شکسته، نیمه بسته و یا بسته باشند به نحوی که امکان نفوذ گل حفاری به زون شکسته فراهم نگردد، PEF کاهش نسبی نشان خواهد داد. چرا که عدد اتمی ذرات موجود در آب منفذی از سنگ کوچک‌تر است. اما اگر شکستگی‌ها باز باشند و فشار گل حفاری از فشار سازند بالاتر باشد، گل به درون شکستگی‌ها نفوذ خواهد کرد [۲۷]. بنابراین در موقعیت شکستگی‌های باز اتفاقاً PEF افزایش نسبی نشان خواهد داد. هر دو این اتفاقات (کاهش و افزایش PEF) در زون‌های شکسته در چاه‌های مورد مطالعه مشاهده شده است. بنابراین به نظر می‌رسد که مقادیر خارج از رده این نمودار معرف وجود زون‌های شکسته است (شکل ۴ و ۵ الف).

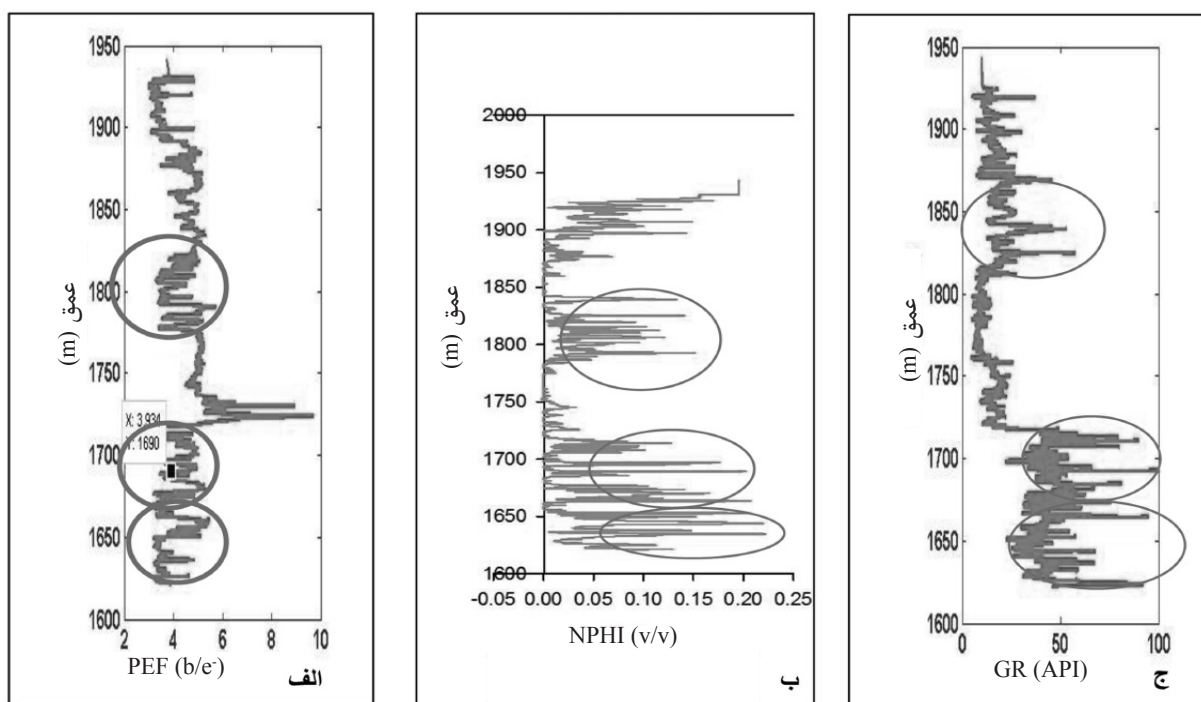
نمودار NPHI ضمن ارسال نوترون پراش به درون مخزن، به طور پیوسته هسته مولکول‌های مخزن را در معرض برخورد با نوترون‌ها قرار می‌دهد. این نمودار کاهش انرژی نوترون ساعت شده را اندازه‌گیری می‌کند. هر چه این کاهش انرژی بیشتر باشد، به معنای بیشتر بودن اتم هیدروژن تلقی می‌شود. بیشتر بودن اتم هیدروژن نیز به مفهوم بیشتر بودن آب یا هیدروکربور است که مفهوم بیشتر بودن تخلخل را نیز به همراه دارد. با توضیح فوق به نظر می‌رسد که در موقعیت زون‌های شکسته، که انتظار افزایش میزان سیال درون سازندی می‌رود، می‌بایست انتظار افزایش در مقدار نمودار NPHI را داشت (شکل ۴ و ۵ ب).

که به دلیل وجود مواد زیستی در این شیل‌ها این اتفاق خواهد افتاد. دوم ناپیوستگی‌های همبری بین لایه‌ای و یا شکستگی‌های محل‌هایی هستند که اورانیم طی زمان می‌تواند از محل‌های دیگر به صورت محلول نمکین شسته شده و در محل‌ها رسوب کند [۲۶]. بنابراین یکی از محل‌های مهم تمرکز اورانیم شکستگی‌ها هستند (شکل ۴ و ۵، الف). رادیواکتیویته بعضی از واحدهای سنگی در جدول ۱ آورده شده است. نمودار DT (صوتی) معرف زمان رسیدن موج صوتی از فرستنده به گیرنده است. بدیهی است زون‌های شکسته به دلیل کاهش چگالی و کاهش فشردگی سازند، سرعت عبور را کاهش خواهند داد. مخصوصاً اگر شکستگی باز باشد [۲۶]. با توضیح فوق روشن است که در موقعیت زون‌های شکسته می‌بایست انتظار افزایش زمان رسیدن موج را داشت (شکل ۲ و ۳ ب).

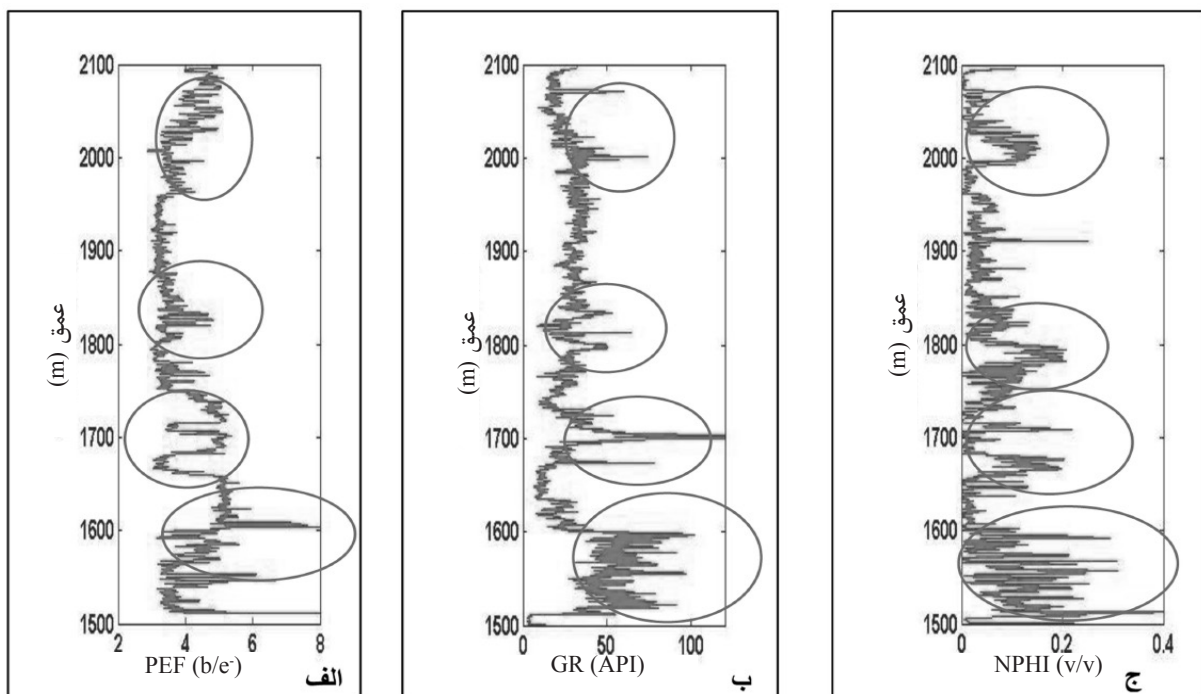
جدول ۱- رادیواکتیویته طبیعی (API) بعضی از واحدهای سنگی

سنگ آهک	۵-۱۰
دولومیت	۱۰-۲۰
ماسه سنگ	۱۰-۳۰
سیلت	۳۰-۸۰
شیل	۸۰-۱۴۰

نمودار RHOB (چگالی)، رفتار این نمودار در موقعیت زون‌های شکسته دو گانه است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که این نمودار غالباً در زون‌های شکسته کاهش پیدا می‌کند چون در زون‌های شکسته از تراکم سنگ کاسته و بر تراکم سیال افزوده می‌شود و چگالی سیال نسبت به سنگ پایین‌تر است. مگر در حالتی که در زمان حفاری چون فشار گل از فشار سازند بالاتر است، لذا در موقعیت زون‌های شکسته امکان نفوذ گل به درون شکستگی‌های باز، پس زدن نسبی سیال درون شکستگی‌ها و رسوب نمودن بخش‌های جامد گل وجود دارد. به‌طور معمول چگالی مواد بخش جامد گل حفاری از چگالی سازند بیشتر است. بنابراین اگر



شکل ۴- نمودارهای پتروفیزیکی چاه شماره ۳ همراه با نمایش زون‌های شکسته (دوایر بزرگ‌تر تمرکز بالاتر شکستگی را نشان می‌دهند).



شکل ۵- نمودارهای پتروفیزیکی چاه شماره ۴ همراه با نمایش زون‌های شکسته (دوایر بزرگ‌تر تمرکز بالاتر شکستگی را نشان می‌دهند).

روش‌های تفسیر

که می‌دانیم مشتق، نرخ لحظه‌ای (یا نقطه‌ای) تغییرات تابع را نشان می‌دهد. مشتق یعنی یافتن خط مماس در یک نقطه از منحنی است. برای تابع f که در همسایگی نقطه α تعریف شده‌است، اگر وجود داشته باشد، f در α مشتق پذیر است. این حد یکتا را با $f'(\alpha)$ نمایش داده و آن را مشتق تابع در نقطه α می‌نامند.

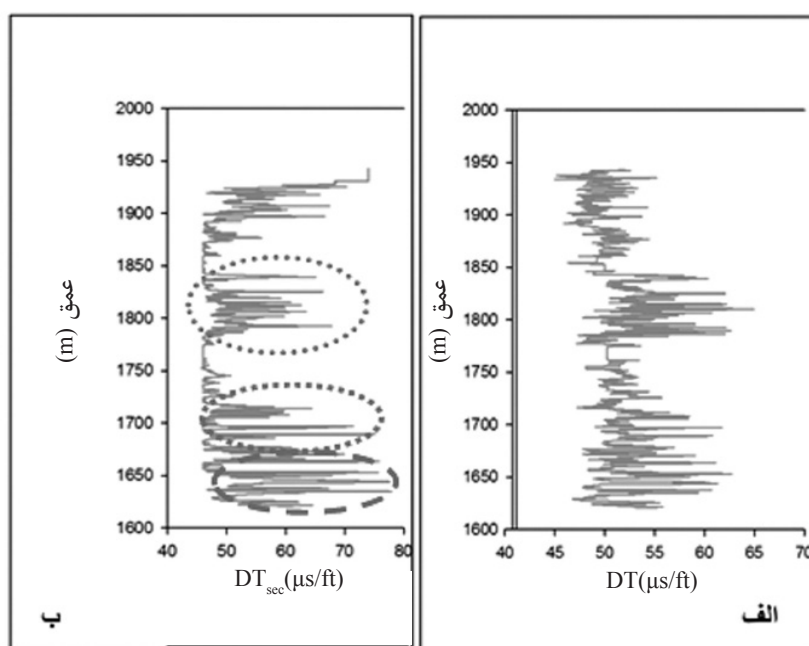
$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad (1)$$

بر طبق این تعریف، مقدار مشتق برابر نرخ تغییرات مقدار تابع است زمانی که تغییرات مربوط به متغیر مستقل به سمت صفر میل می‌کند. با تبدیل h به $\alpha - \chi$ تعریف دوم مشتق به صورت زیر حاصل می‌شود:

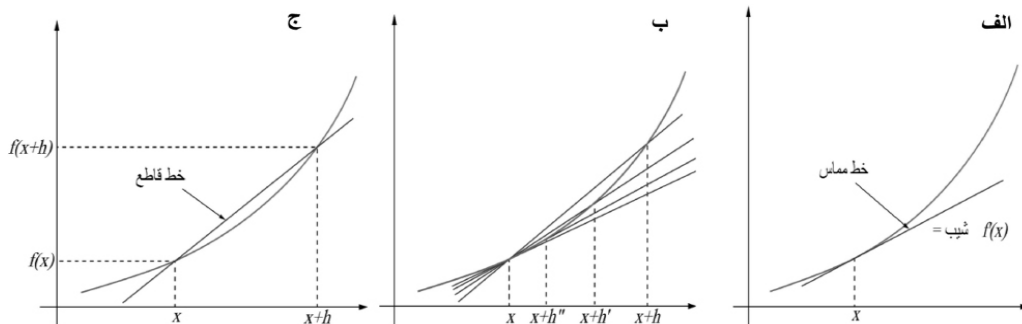
$$f'(a) = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x) - f(a)}{x - a} \quad (2)$$

تابع f در $\alpha - \chi$ مشتق پذیر است هرگاه در این نقطه پیوسته باشد و مشتق چپ و راست تابع با هم برابر و مساوی یک عدد حقیقی معین باشد. مشتق گیری از نمودارها (هر نمودار پتروفیزیکی یک تابع پیوسته است) (شکل ۷) نیز دقیقاً به همین ترتیب است [۲۴].

اکثر متخصصین پتروفیزیک معتقدند که به دلیل قابلیت تفکیک ضعیف نمودارهای پتروفیزیکی، شکستگی‌ها تأثیر قابل ردیابی بر آنها نخواهند گذاشت. همان‌گونه که ذکر گردید برای حل این مشکل یک مسیر دو مرحله‌ای انتخاب گردید. در رویکرد اول بررسی گردید که آیا زون‌های شکسته می‌توانند تأثیر قابل ردیابی بر نمودارهای پتروفیزیکی داشته باشند یا خیر؟ که در عمل مشاهده گردید که پاسخ مثبت است. بعضی از نمودارهای پتروفیزیکی در زون‌های شکسته افزایش نسبی و بعضی دیگر کاهش نسبی می‌یابند که در بالا ذکر شد. برای رسیدن به هدف مورد نظر ابتدا مطالعه کلی بر روی ساختمان و وضع تکتونیکی میدان با استفاده از تفسیر نمودارهای تصویرگر در دو حلقه چاه ۳ (FMI) و ۴ (OBMI-UBI) انجام گرفت (شکل ۱). سپس نمودارهای پتروفیزیکی توسط نرم‌افزار Geoframe تصحیح و توسط نرم‌افزار MATLAB و SIGMO PLOT مشتق گیری و رسم گردید، تا بتوان تغییرات هر نمودار را بهتر بررسی نمود (شکل ۶). به منظور یادآوری همان‌طور



شکل ۶- مقایسه نمودار صوتی: مشتق گرفتن در سطح اول (شکل الف) و مشتق گرفتن در سطح دوم (شکل ب). زون‌های شکسته در حالت دوم بهتر خود را نشان می‌دهند.



شکل ۷- خط قاطع نمودار تابع f که شیب آن برابر مقدار خارج قسمت تفاضلی f در X است (شکل الف). با میل کردن h به سمت صفر، شیب خط قاطع به مقدار شیب خط مماس در نقطه X میل می‌کند (شکل ب). خط مماس نمودار تابع f در X که شیب آن برابر مقدار مشتق تابع در X است (شکل ج).

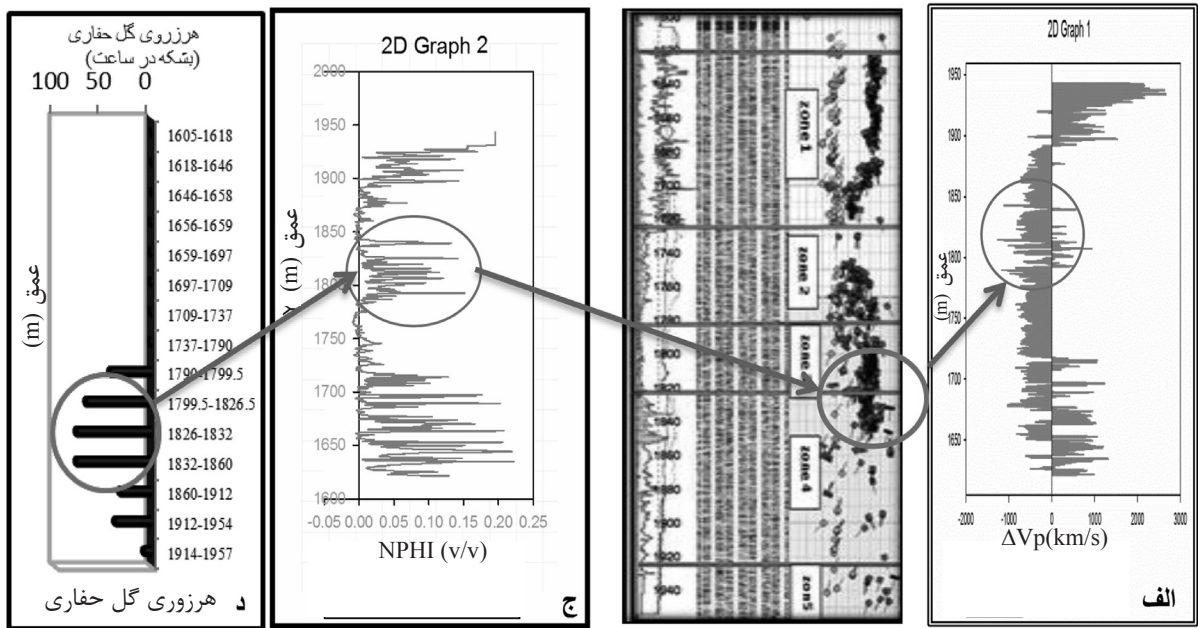
شکستگی‌ها استفاده گردید. بدین صورت که هر چه نمودار انحراف سرعت در مقابل یک زون شکسته تأثیر بیشتری بپذیرد به معنای بیشتر بودن دهانه شکستگی‌های مربوط به آن زون می‌باشد.

نمودار انحراف سرعت

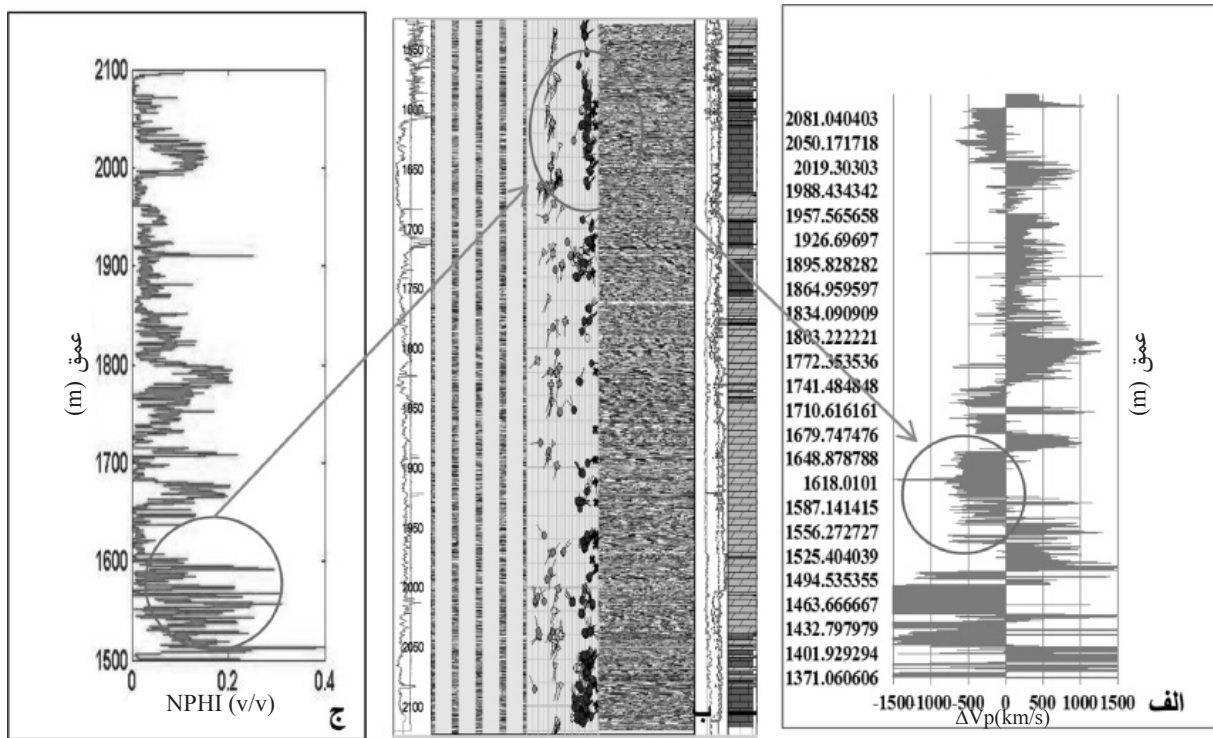
نمودار انحراف سرعت از ترکیب نمودارهای صوتی با تخلخل نوترون و تخلخل جرم مخصوص محاسبه می‌شود، هدف اصلی از محاسبه نمودار انحراف سرعت، ایجاد یک نمودار مصنوعی سرعت با استفاده از اطلاعات سایر نمودارهای پتروفیزیکی در داخل چاه می‌باشد، که به وسیله آن می‌توان انواع خلل و فرج را در یک توالی حفاری شده تشخیص داده و محیط‌های رسوبی و دیاژنتیکی که تنها به واسطه نمودارهای صوتی، نوترون و جرم مخصوص دریافت نمی‌شوند را مشخص نمود. نمودار انحراف سرعت با استفاده از اطلاعات تخلخل و سرعت حاصل از نمودارهای پتروفیزیکی محاسبه می‌گردد. این نمودار در واقع اختلاف بین مقادیر موج تراکمی واقعی (V_{preal}) و موج تراکمی مصنوعی (V_{psyn}) می‌باشد. نمودار انحراف سرعت ابزار مناسبی جهت به دست آوردن اطلاعاتی در مورد تخلخل غالب در طول یک حلقه چاه می‌باشد. همچنین از این نمودار می‌توان روند تغییرات تراوایی را به طور نسبی به دست آورد.

برای دستیابی به دقت بیشتر نمودارهای مورد مطالعه توسط نرم‌افزار فوق‌الذکر مشتق‌گیری شدند. بدین صورت که برای هر نمودار با توجه به محدوده عددی آن یک تابع نوشته شد و سپس بر اساس این تابع نمودار مورد نظر توسط نرم‌افزار مشتق‌گیری گردید. سپس زون‌های شکسته بر روی آنها بررسی شد. در ابتدا باید توسط روش آزمون و خطا تعیین می‌شد که نمودارهای مورد تحقیق در کدام سطح مشتق‌گیری بهترین نتیجه را می‌دهند، که بعد از بررسی تا سطح چهارم مشتق‌گیری مشخص شد که زون‌های شکسته در سطح اول و دوم بهترین اثر را دارند و دلیل آن این است که هر چند با مشتق‌گیری بیشتر دقت نسبی بالاتر می‌رود اما میزان پارامترهایی که می‌توان به عنوان شاهد برای شناسایی شکستگی‌ها استفاده نمود کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که در این مطالعه از دیگر داده‌های پتروفیزیکی مانند داده‌های هرزروی گل به عنوان داده‌های کمکی استفاده شد که دقت کار را تا حد زیادی افزایش می‌دهند [۲۸]. در نهایت نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تفسیر نمودارهای تصویرگر مقایسه شد که تطابق بالایی را نشان می‌دهد (شکل ۹، ۱۰ و ۱۰).

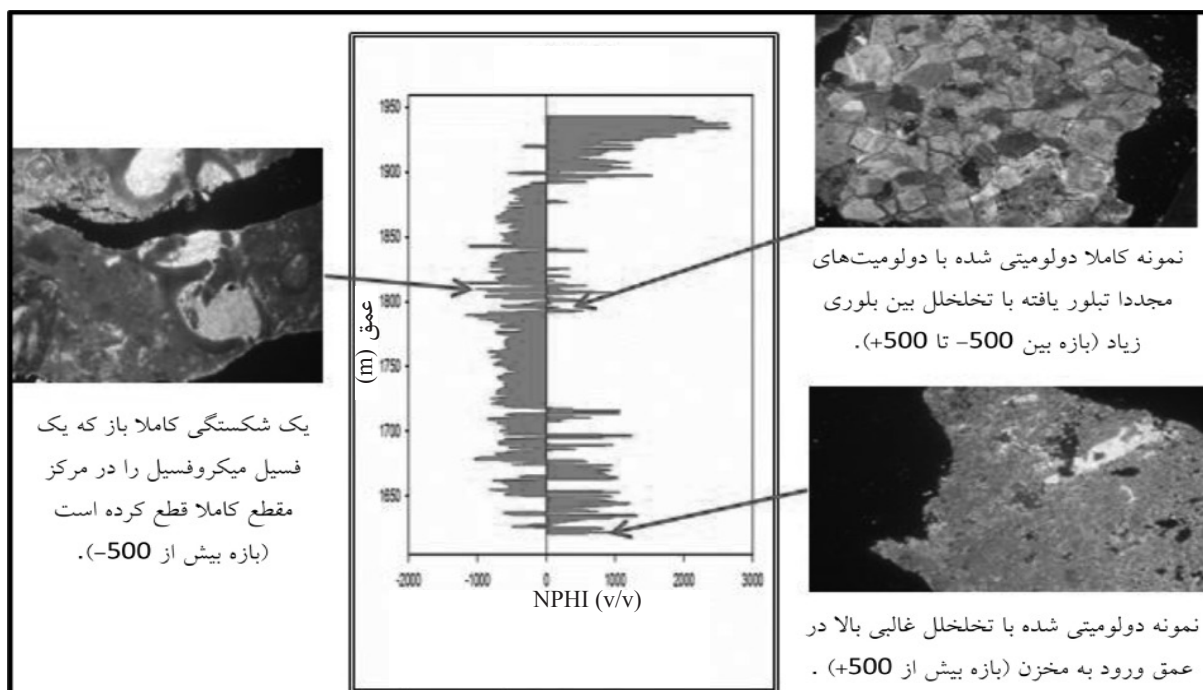
در مرحله دوم میزان تحت تأثیر گرفتن نمودارها به عنوان عامل اصلی برای دست‌یافتن به میزان تجمع شکستگی‌ها استفاده شد و از نمودار انحراف سرعت نیز برای بررسی میزان بازشدگی این



شکل ۸- نمودار انحراف سرعت چاه شماره ۳ (شکل الف) و مقایسه آن با نمودار تصویری چاه (شکل ب) و نمودار تخلخل حاصل از نوترون (شکل ج) و اطلاعات هرزروی گل (شکل د) که تطابق کاملی را نشان می‌دهند.



شکل ۹- نمودار انحراف سرعت چاه شماره ۴ (شکل الف) و مقایسه آن با نمودار تصویری چاه (شکل ب) و نمودار تخلخل حاصل از نوترون (شکل ج) که تطابق کاملی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰- مقایسه نمودار انحراف سرعت چاه شماره ۳ با نتایج حاصل از مقاطع نازک

می‌شود نمودار صوتی نتواند به خوبی به دیواره چاه بچسبد و به دلیل سرعت بسیار پایین، انحراف منفی ایجاد شود.

۲- محتوای بالای گاز آزاد: که تأثیر منفی شدیدی روی نمودار انحراف سرعت دارد زیرا به نحو مؤثری سرعت را کاهش می‌دهد.

۳- شکستگی‌ها: لذا مشاهده می‌شود که شکستگی‌ها، انحراف منفی ایجاد می‌کنند. علی‌رغم این حقیقت که تخلخل شکستگی همیشه به‌عنوان یک تخلخل ثانویه در نظر گرفته شده و معادل با سرعت بسیار بالا یا انحراف مثبت تلقی می‌گردد [۱۳]. اما مطالعات متعدد نشان داده است که شکستگی چه در مقیاس کوچک و چه بزرگ، سرعت را کاهش می‌دهد. شکستگی‌های بزرگ مقیاس، که منجر به سرعت‌های پایین می‌شوند را می‌توان توسط ابزارهای چاه‌پیمایی تشخیص داد. به علاوه، شکستگی‌های مدفون عموماً بسته یا نامشخص‌اند به گونه‌ای که نمودار نوترون، کاهش چندانی را نشان نمی‌دهد لذا شکستگی‌ها انحراف منفی ایجاد می‌کنند [۹].

جهت بررسی نوع خلل و فرج غالب در چاه و تشخیص شکستگی‌ها در مخزن آسماری و تطابق با تخلخل ثانویه با استفاده از داده‌های قرائت شده نمودارهای صوتی و نوترون نمودار انحراف سرعت برای مخزن آسماری چاه‌های ۳ (شکل ۸) و ۴ (شکل ۹-الف) میدان رسم شد. به‌طور کلی رابطه معکوسی بین تخلخل و سرعت وجود دارد، یعنی سرعت با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. در یک نمودار انحراف سرعت سه زون قابل تشخیص است که عبارتند از (شکل ۱۰):

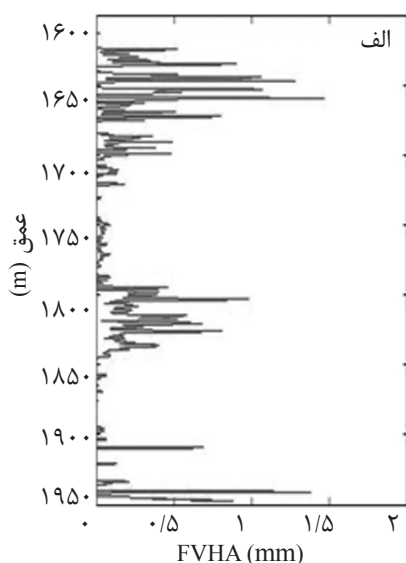
الف- زون‌های با انحراف مثبت: که نشان‌دهنده تخلخل بالا بوده و عمدتاً شامل تخلخل‌های قالبی و درون فسیلی هستند.

ب- زون‌های با انحراف صفر: که شامل انحراف‌های کوچک می‌باشند و اغلب نشان‌دهنده تخلخل‌های بین ذره‌ای، بین بلوری و ریز تخلخل هستند.

ج- زون‌های با انحراف منفی: که در آنها سرعت نمودار صوتی به‌طور غیر عادی پایین بوده و می‌توانند در اثر سه عامل ایجاد شوند که عبارتند از:

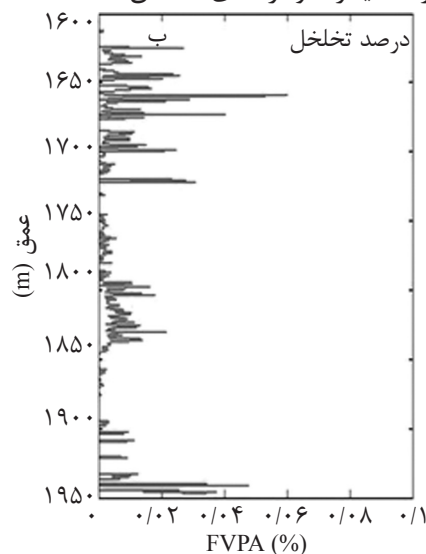
۱- بی‌نظمی یا ریختگی در دیواره چاه: که سبب

۲۰۵۰-۲۱۰۰ را به عنوان زون‌های شدیداً شکسته و اعماق ۱۷۰۰ و ۱۹۰۰ را اعماق با تمرکز پایین‌تر تراکم شکستگی نشان می‌دهد که هم با نمودار انحراف سرعت و هم با نمودارهای تصویرگر تطابق خوبی نشان می‌دهد. همچنین مطالعات نشان داد که قرار گرفتن این چاه در منطقه کم شیب تاقدیس در نزدیک قله باعث کمتر تأثیرپذیری این چاه از گسل بالارود شده است. اما سوالی که در تشخیص زون‌های شکسته بر روی نمودارهای پتروفیزیکی در چاه‌های مورد مطالعه پیش آمد این بود که چرا بعضی از زون‌های شکسته بر روی نمودارهای پتروفیزیکی تأثیر بیشتری گذاشته‌اند. برای مثال در چاه شماره ۳ گرچه تمرکز بالای شکستگی در اعماق ۱۸۰۰ تا ۱۸۶۰ m وجود دارد اما بعضی از نمودارهای پتروفیزیکی در اعماق ۱۶۳۰ تا ۱۷۳۰ m تأثیرپذیری بیشتری نشان می‌دهند؟ برای جواب به این سوال دهانه شکستگی‌ها و درصد تخلخل نسبی آنها در چاه مورد نظر با استفاده از نمودار تصویرگر FMI اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود گرچه شکستگی در اعماق ۱۸۰۰ تا ۱۸۶۰ m تمرکز بالاتری دارند اما میزان بازشدگی دهانه شکستگی‌ها در عمق ۱۶۳۰ تا ۱۷۳۰ m بیشتر است. در این شکل نمودار میزان بازشدگی دهانه شکستگی‌ها (FVHA) و تخلخل حاصل از شکستگی‌ها (FVPA) آورده شده‌اند.



تحلیل داده‌های هندسی نمودارهای پتروفیزیکی و نتایج حاصله

همان‌طور که در ابتدا ذکر گردید این تحقیق در دو مرحله انجام گردیده است که در مرحله اول زون‌های شکسته براساس داده‌های موجود بر روی نمودارها تعیین و در مرحله بعد میزان تجمع شکستگی‌ها در این زون‌ها تعیین گردید. نمودارهای مربوط به چاه شماره ۳ اعماق ۱۶۰۰ تا ۱۶۵۰ m و ۱۷۰۰ تا ۱۷۳۰ m و ۱۸۰۰ تا ۱۸۵۰ m را به‌عنوان زون‌های شدیداً شکسته معرفی کردند که به راحتی بر روی نمودارهای تخلخل حاصل از نوترون، چگالی و نمودار کالیپر مشخص هستند. همچنین میزان تأثیرپذیری بالای نمودارها هم در سطح اول و هم در سطح دوم تراکم بالای شکستگی‌ها را نشان می‌دهند، که نمودار انحراف سرعت نیز مؤید این مطلب می‌باشد. این نمودار باز بودن شکستگی‌ها را نیز نشان می‌دهد که نتایج آن با نتایج نمودارهای تصویرگر تطابق بالایی را نشان می‌دهد (شکل‌های ۸ و ۹). مطالعات در این میدان نشان داد که تراکم بالای شکستگی در این چاه منطبق بر چرخیدن مجدد محور تاقدیس میدان (شکل ۱) تحت تأثیر فعالیت گسل معکوس بالارود است. بنابراین این شکستگی‌ها مرتبط با چین‌خوردگی حاصل از گسلش می‌باشند. در چاه شماره ۴ نیز نمودارهای اعماق ۱۵۵۰-۱۶۲۵ و



شکل ۱۱- نمودار بازشدگی دهانه شکستگی‌ها FVHA (میلی‌متر) و میزان تخلخل آنها FVPA (درصد) برای چاه شماره ۳

نتیجه گیری

۱. به طور کلی روش‌های زیادی برای تعیین شکستگی‌ها در مخزن موجود است مانند مغزه‌ها و نمودارهای تصویرگر، اما هر کدام از این روش‌ها دارای نقطه ضعف‌هایی می‌باشند که کاربرد آنها را دشوار کرده است. بدین منظور استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی به دلیل ارزان و در دسترس بودن برای شناسایی زون‌های شکسته مناسب می‌باشند، که اگر در کنار اطلاعات دیگر قرار گیرند ارزیابی خوبی را از شکستگی‌های مخزن می‌توانند ارائه دهند.

۲. نمودار انحراف سرعت که راهی برای بررسی نوع تخلخل غالب در میدان است نیز به خوبی زون‌های شکسته را نشان می‌دهد. که به وضوح بیانگر تحت تاثیر قرار گرفتن تراوایی مخزن از سیستم شکستگی‌ها می‌باشد. به طوری که در چاه شماره ۳ اغلب تخلخل موثر مخزن حاصل از شکستگی‌ها می‌باشد. اما در چاه شماره ۴ تخلخل غالب تخلخل بین بلوری می‌باشد. که این موضوع تفاوت بین نوع شکستگی‌ها را در دو چاه نشان می‌دهد. که در چاه شماره ۳ حاصل از چین خوردگی و در چاه شماره ۴ حاصل از گسلش است.

۳. همان‌طور که در مطالعات پتروفیزیکی، شش نمودار CAL، PEF، DT، GR، NPHI و RHOB بیشترین کاربرد را دارند. در تشخیص زون‌های شکسته همین شش نمودار بهترین ابزارها می‌باشند. که براساس نحوه واکنشی که در مقابل شکستگی‌ها از خود نشان می‌دهند و انجام تصحیح بر روی این نمودارها می‌توان زون‌های شکسته را شناسایی نمود.

۴. در این روش همان‌قدر که مسلط بودن بر روابط ریاضی و نرم‌افزاری در میزان دقت کار تاثیر می‌گذارند. مسلط بودن بر روابط تکتونیک، ساختاری و گسل‌های موجود در میدان نیز مهم است. به طور کلی داشتن دیدی بر زمین‌شناسی میدان برای تمام تحلیل‌های پتروفیزیکی امری لازم است.

تشکر و قدردانی

مؤلفین بر خود فرض می‌دانند که صمیمانه از همکاری اداره زمین‌شناسی و بخش پژوهشی شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب به واسطه همکاری‌های بی‌شائبه در انجام این تحقیق و معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز کمال تشکر را ابراز نمایند.

مراجع

- [1]. Nelson R. A., "Geologic analysis of naturally fracture reservoir integration is the key of optimization," Distinquished Author Series, pp. 52-54, SPE 56010, 2001.
- [2]. Schlumberger, "FMI fullbore formation microlmager," Houston: Schlumberger Educational Services, 1994.
- [3]. Thompson L. B., "Fractured reservoirs: integration is the key to optimization," Journal of Petroleum Technology, Vol. 52, No. 2, pp. 52-54, 2000.
- [4]. Tingay M., Reinecker J., and Müller B., "Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs," World Stress Map Project, Retrieved from www.world-stress-map.org, 2008.
- [۵] تخم‌چی ب.، "شناسایی و طبقه‌بندی درزه‌ها به روش ترکیب اطلاعات با نگرشی ویژه به سازند آسماری"، پایان‌نامه دکتری، رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- [6]. Martinez L. P, Hughs G. R and Wiggins M. L., "Identification and Characterization of Naturally Fractured Reservoirs Using Conventional Well Logs," The University of Oklahoma, p. 23, 2002.

- [7]. Raymer L. L., Hunt E. R., and Gardner J. S., "An improved sonic transit time-to-porosity transform," Trans., SPWLA Annual Logging Symposium Conference Paper, Lafayette Louisiana, 8-11 July, 1980.
- [8]. Wyllie M. R., Gregory A. R., and Gardner G. H. F., "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media," Geophysics, Vol. 21, No. 1, p. 41-70, 1956.
- [9]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "The velocity deviation log; a tool to predict pore Type permeability trends in carbonate drill holes from sonics and porosity or density logs," AAPG Bulletin, Vol. 83, No. 3, pp. 450-466, 1999.
- [10]. Paillet F. L., and Cheng H. C., "Acoustic waves in boreholes," Boca Raton, Florida, CRC Press, p. 264 1991.
- [11]. Asquith G. B., "Handbook of log evaluation techniques for carbonate reservoirs," AAPG Methods in Exploration Series, 5, p. 47, 1985.
- [12]. Nelson R. A., "Geologic analysis of naturally fractured reservoir," Gulf publishing Company, Houston, Texas, USA, 1985.
- [13]. Brie A., Johnson D. L., and Nurmi R. D., "Effect of spherical pores on sonic and resistivity measurements," Society of Professional Well Log Analysts, 26th annual Logging Symposium Abstracts, p. 17, 1985.
- [14]. Nurmi R. D., and Frisinger M. R., "Synergy of core petrophysical measurements, log data, and rock examination in carbonate reservoir studies," 58th Annual Technical Conference and Exhibition of Society of Petroleum Engineers of AIME Proceedings, SPE Paper 11969, p. 15, 1983.
- [15]. Serra O., "Formation MicroScanner image interpretation," Schlumberger Educational Services. Retrieved from http://books.google.com/books?id=G_U9twAACAAJ, p. 117. 1989.
- [۱۶]. عقلی ق., "تحلیل شکستگی‌های مخزن آسماری میدان نفتی بالارود با استفاده از نمودارهای تصویرگر (FMI-EMI-OBMI-UBI)", پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته زمین‌شناسی گرایش نفت، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین، ۱۶۲ صفحه، ۱۳۹۲.
- [17]. Nie X., Zou C., Pan L., Huang Z., and Liu D., "Fracture analysis and determination of in-situ stress direction from resistivity and acoustic image logs and core data in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Borehole-2 (50-1370m)," Tectonophysics, 593, pp. 161-171. doi:10.1016/j.tecto.2013.03.005, 2013.
- [18]. Rajabi M., Sherhati S., Bohloli B., and Tingay M., "Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonates (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran," Tectonophysics, Vol. 492(1-4), 192-200. doi:10.1016/j.tecto.2010.06.014, 2010.
- [19]. Schlumberger, "Using borehole imagery to reveal key reservoir features," In Reservoir Optimization Conference. Tehran, Iran, 2003.
- [20]. Alavi M., "Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution," Am. J. Sci., Vol. 304, No. 1, pp. 1-20. doi:10.2475/ajs.304.1.1, 2004.
- [21]. Alavi M., "Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran," Am. J. Sci., Vol. 307, No. 9, pp. 1064-1095. doi:10.2475/09.2007.02, 2007.
- [22]. Fossen H., "Structural Geology," Cambridge University Press, p. 463, 2010.
- [23]. Stearns D. W., "Fracture as a Mechanism of Flow in Naturally Deformed Layered Rock," In A. J. Baer & D. K. Norris (Eds.), Kink Bands and Brittle Deformation. Geological Survey of Canada, 1968.

[۲۴]. شهریاری پ.، "تاریخ ریاضیات". انتشارات مدرسه، ۱۳۸۳.

[۲۵]. رضائی م. ر.، و چهارزی ع.، "اصول برداشت و تفسیر نگاره‌های چاه‌پیمایی"، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۹۹ صفحه، ۱۳۸۵.

[26]. Darling T., "Well Logging and Formation Evaluation," Elsevier Science, Retrieved from <http://books.google.com/books?id=vKdIGNAE8JYC>, p. 336 , 2005.

[27]. Serra O., and Serra L., "Well Logging: Data Acquisition and Applications," Editions Technip. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=iAacQAAACAAJ>, p. 674 , 2004.

[28]. Mohebbi A., Haghghi M., and Sahimi M., "Conventional logs for fracture detection and characterization in one of the Iranian field," In International Petroleum Technology Conference, Dubai, U.A.E. Dubai: International Petroleum Technology Conference. doi:10.2523/11186-MS, Dec. 4-6 2007.