

شناخت انواع تخلخل و ویژگی‌های زمین‌شناسی سازند ایلام بر مبنای نمودار تصویری FMI، انحراف سرعت و پتروگرافی مقاطع نازک در یکی از میادین جنوب باختری ایران

حامد امرایی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

hamedamraei0@gmail.com*

دریافت خرداد ۱۴۰۴، پذیرش آذر ۱۴۰۴

چکیده

شناخت انواع تخلخل و بررسی‌های زمین‌شناسی ساختاری مخازن هیدروکربوری، به عنوان یکی از ویژگی‌های پتروفیزیکی حائز اهمیت فراوان است. به این منظور در مرحله اول پژوهش حاضر، نوع تخلخل در سازند ایلام یکی از چاه‌های نفتی واقع در جنوب غرب ایران از نمودار ساخته شده انحراف سرعت به کمک داده‌های چاه‌پیمایی به عنوان یک جایگزین مقرون به صرفه برای شناسایی انواع تخلخل تعیین و در ادامه به کمک پتروگرافی مقاطع نازک کنترل گردید. از مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک ۵ نمونه در دسترس از چاه مورد مطالعه مشخص شد که ریزرخساره‌های این سازند حاوی انواع تخلخل‌های بین بلوری، بین دانه‌ای و قالبی بوده و اثری از وجود شکستگی در این مخزن وجود ندارد. بر اساس نمودار انحراف سرعت تهیه شده، زون‌های اصلی مخزنی سازند ایلام دارای سرعت‌های نزدیک به صفر هستند که بیانگر وجود تخلخل بین بلوری و بین دانه‌ای است و دارای تراوایی خوبی می‌باشند. انحراف سرعت‌های منفی مشاهده شده در این چاه نشانگر ریزش دیواره چاه بوده و زون‌های با انحراف سرعت مثبت مرتبط با تخلخل‌های درون دانه‌ای و قالبی است که بیشتر در بخش‌های غیر مخزنی وجود دارند. سپس در مرحله دوم به کمک نمودار تصویرگر^۱ FMI به تفسیر زمین‌شناسی ساختاری مخزن پرداخته شد. بر این اساس تعداد ۶۹ لایه بندی در مخزن مورد مطالعه قرائت شد که ۹ عدد از آنها شیب با لایه‌بندی مطمئن و ۶۰ عدد شیب با مرز لایه‌بندی نامطمئن می‌باشد. میانگین شیب لایه‌ها تقریباً برابر با ۴ درجه به سمت S30W و با امتداد N30W-S30E تعیین گردید. استیلولیت‌های شناسایی شده ۵۰ عدد از نوع چینه‌ای بودند که میانگین شیب آن‌ها ۴/۵ درجه و با امتداد N30W-S30W می‌باشد. ریزش‌های دیواره چاه^۲ در جهت کمترین تنش افقی وارد بر حفره چاه ایجاد شده و دارای امتداد N20W-S20E بوده که تقریباً با امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس مطابقت دارد. بر مبنای بررسی نمودارهای معمول، انحراف سرعت و FMI هیچ گونه شکستگی طبیعی و شکستگی القایی در مخزن ایلام چاه مورد مطالعه مشاهده نشد. این مطالعه نشان داد که تخلخل‌های بین بلوری و بین دانه‌ای بیشترین تاثیر را در کیفیت مخزن ایلام داشته‌اند و تخلخل قالبی تاثیر کمتری بر کیفیت مخزن مذکور دارد.

کلمات کلیدی: تعیین انواع تخلخل، نمودار انحراف سرعت، پتروگرافی مقاطع نازک، نمودار FMI، چین خوردگی.

^۱ Formation Micro Imager

^۲ Borehole breakout

۱- مقدمه

توصیف مخزن از حیاتی‌ترین مباحث در مهندسی نفت محسوب می‌شود. برنامه‌های کاربردی برای یک مدیریت کارآمد، پس از شناخت کامل ویژگی‌های سنگ مخزن حاصل می‌شود. محاسبه و شناخت انواع تخلخل در مخازن و بررسی‌های ساختاری سازند از اصلی‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی در مخازن هیدروکربنی بوده که آگاهی از مقدار و چگونگی تغییرات آن‌ها مبنای بسیاری از مطالعات مهندسی نفت در تمام طول عمر مخزن است [۱۸]. در صنعت نفت و گاز اشراف کامل بر مباحث یاد شده جهت مدیریت مخازن و جلوگیری از هدر رفت هزینه‌ها غیر قابل انکار است. شناخت تخلخل بدلیل اینکه پارامتری است که سرعت صوت را کنترل کرده و بر روی پارامترهای مهم دیگری، منجمله؛ تراوایی تاثیرگذار بوده نقش به سزایی در تعیین ذخیره، انتقال و استحصال سیالات هیدروکربنی دارد [۲]. روش‌های مختلفی جهت بررسی نوع تخلخل وجود دارد که روش معمول آن، آنالیز مغزه‌های حفاری در آزمایشگاه بوده که فرآیندی زمان‌بر و هزینه‌بر است [۱]. در مطالعات پتروگرافی، شناسایی و اندازه‌گیری مقدار و نوع تخلخل، شرایط رسوبگذاری، لیتولوژی و شناخت محیط رسوبی از روی مقاطع نازک امکان پذیر می‌باشد. با وجود کاربردهای زیاد آنالیز مغزه در صنعت نفت، محدودیت در وجود مغزه در چاه‌های مختلف یکی از مشکلات اصلی این نوع مطالعات است. با عنایت به مزایایی نظیر؛ در دسترس بودن، جامع بودن و همچنین هزینه‌های پایین عملیات چاه‌پیمایی به نسبت روش‌های دیگر و با توجه به اینکه غالباً در تمامی چاه‌های یک میدان اطلاعات نگاره‌ها در دسترس هستند لذا توسعه، بهینه‌سازی و بکارگیری روش‌هایی مبتنی بر نگاره‌ها جهت تعیین پارامترهای مخزنی و مطالعات زمین‌شناسی گزینه‌ای معقول و اقتصادی‌تر بنظر می‌رسد [۱۸]. در مطالعات پتروفیزیکی می‌توان با استفاده از ساخت نمودارهای انحراف سرعت^۳ و نمودارهای تصویری اطلاعات سودمندی در مورد تخلخل، انواع آن و تراوایی مخازن مورد مطالعه بدست آورد. نمودار انحراف سرعت، نموداری ساختگی بوده که از تلفیق نمودارهای صوتی، نوترون و دانسیته از طریق فرمول وایلی و همکاران ۱۹۵۶ ساخته می‌شود [۱۳] و ابزاری بسیار توانمند جهت بدست آوردن و دانستن نوع تخلخل بویژه در مخازن کربناته محسوب می‌شود [۲۴]. از طرفی شناسایی پدیده‌های دیواره چاه همیشه در صنعت نفت و گاز دارای اهمیت بوده زیرا این پدیده‌ها، ابزارهای سودمندی جهت مطالعات مربوط به زمین‌شناسی ساختاری منطقه داشته که تاثیر و نقش بسزایی بر تولید نفت، گاز و کیفیت مخزن دارد [۲۰]. نمودارهای تصویری نیز از تکنولوژی‌های نوینی است

^۳ Velocity Deviation Log

که تصویری استوانه‌ای شکل از دیواره چاه با قدرت تفکیک بالا در اختیار قرار داده که به کمک آن‌ها می‌توان به بررسی پدیده‌های دیواره چاه، سرشت نمایی شکستگی‌ها، شناسایی و تفسیر ویژگی‌های رسوبی، تعیین شیب منطقه‌ای، لایه‌بندی، شناسایی عناصر زمین ساختی و بررسی شکستگی‌های مخزن و غیره پرداخت [۲۷].

سلیمانی و همکاران در سال ۱۳۹۲، به مطالعه و بررسی ویژگی شکستگی‌ها و نوع تخلخل مخزن به کمک مقاطع نازک و نمودارهای چاه‌پیمایی در میدان نفتی لالی پرداختند. در این مطالعه ۱۰۶ مقطع میکروسکوپی و داده‌های ۲ حلقه چاه از میدان مذکور مورد بررسی قرار گرفت که بر اساس نتایج، سامانه تخلخل سنگ مخزن در چاه‌های مذکور به طور عمده از انواع تخلخل بین‌ذره‌ای و شکستگی بوده که به عنوان معبری مناسب برای عبور سیال عمل نمودند [۴]. شمشیری و همکاران در سال ۱۳۹۲، به مقایسه نتایج نمودار تصویری و انحراف سرعت در تعیین نوع تخلخل در یکی از میداین شرق حوضه کپه داغ و صحت‌سنجی با داده‌های مقاطع نازک پرداختند [۶]. عقلی و همکاران در سال ۱۳۹۳، به تحلیل ساختمانی و بررسی شکستگی‌های مخزن آسماری به کمک نمودارهای تصویرگر FMI، UBI و OBMI و مقایسه با نمودار انحراف سرعت برای مخزن آسماری یکی از میداین جنوب غرب ایران پرداختند. نتایج بررسی‌ها گواه آن بود که از بین نمودارهای تصویرگر، FMI دارای دقت بالاتری در تشخیص شکستگی‌ها و تعیین نوع تخلخل است [۷]. سنایی و همکاران در سال ۱۳۹۹، به تحلیل ساختاری و اثر سیستم گسلش در مخزن آسماری- جهرم میدان گلخاری پرداختند [۳]. ساعدی و همکاران در سال ۱۴۰۰، به تعیین نوع تخلخل، تغییرات لایه‌بندی، ریزش‌های دیواره چاه و تخمین تراکم شکستگی‌ها در مخزن آسماری میدان آغاجاری به کمک نمودار انحراف سرعت و نمودارهای تصویری پرداختند [۵]. حیدری و همکاران در سال ۱۴۰۳، برای تعیین نوع تخلخل در سازند آسماری یکی از میداین نفتی اهواز از نمودارهای چاه‌پیمایی (انحراف سرعت و NMR) بهره گرفتند، در این پژوهش مشاهدات مقاطع نازک به عنوان ابزاری برای اعتبارسنجی به کار برده شد. مطالعه مذکور دقت و کارایی نمودار انحراف سرعت را در تعیین انواع تخلخل سازند آسماری نشان می‌دهد [۱]. خوشبخت و همکاران در سال ۲۰۱۲، نقاط قوت و محدودیت‌های ابزارهای تصویرگر را در شناسایی پدیده‌های زمین‌شناسی مختلف در مخازن کربناته بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از نگاره تصویرگر FMS توانستند شکستگی‌های باز و لایه‌های انیدریت را به خوبی شناسایی کنند، اما محدودیت‌هایی در تشخیص دقیق لایه‌ها و برخی پدیده‌های زمین‌شناسی دیگر مشاهده شد که نشان‌دهنده نیاز به تکمیل اطلاعات با داده‌های دیگر بود [۱۶]. عقلی و همکاران در سال ۲۰۱۴، به تحلیل زمین ساختی و بررسی شکستگی‌های مخزن آسماری (الیگو-

میوسن) به کمک نمودارهای تصویرگر FMI پرداختند. مشاهده شد که تولید در مخزن آسماری مورد مطالعه تلفیقی از شکستگی‌ها و ماتریکس سنگ بوده که شکستگی‌ها تاثیر فراوانی بر خصوصیات مخزن داشته‌اند [۹]. سلیمانی و همکاران در سال ۲۰۱۶، به کمک نمودارهای تصویری به بررسی زمین ساختاری مخزن بنگستان میدان گچساران با هدف تعیین لایه‌بندی، شکستگی‌ها و تاثیرات آن‌ها بر کیفیت مخزن مورد مطالعه پرداختند. آن‌ها در نهایت از نمودار انحراف سرعت جهت مقایسه پارامترهای شکستگی بهره گرفتند [۲۶]. ساعدی و همکاران در سال ۲۰۱۷، به توصیف شکستگی‌های مخزن به کمک مقاطع نازک، نمودار انحراف سرعت و نمودار FMI در یکی از میداین جنوب غرب ایران با هدف معرفی روشی جدید در زمینه شناسایی و تفسیر شکستگی‌ها پرداختند [۲۵]. نبیئی و همکاران در سال ۲۰۲۱، به تحلیل شکستگی‌ها و بررسی زمین ساختاری مخازن گازی کنگان و دالان واقع در یکی از میداین گازی استان فارس به کمک نمودار تصویرگر FMI پرداختند. از طریق این ارزیابی انواع مختلفی از ساختارهای طبیعی نظیر؛ لایه‌بندی‌ها، انواع شکستگی‌ها و تاثیرات آن‌ها بر تخلخل مخزن مورد بررسی قرار گرفت [۲۱]. رومیانی و همکاران در سال ۲۰۲۲ به تفسیر نمودار تصویری FMI با هدف شناسایی پدیده‌های ریز دیواره چاه در یکی از میداین هیدروکربوری جنوب غرب ایران پرداختند. بر این اساس در چاه مورد مطالعه بترتیب تعداد ۱۸۲۹، ۶۹، ۱۴۰ و ۱۲۸ انواع شکستگی‌های باز، بسته، برشی و کششی تشخیص داده شد [۲۳]. محمود و همکاران در سال ۲۰۲۳، به توصیف شکستگی‌ها، تعیین لایه‌بندی‌ها، تحلیل تنش‌ها و تعیین تخلخل مخزن به کمک ابزار تصویرگر FMI در یکی از میداین نفتی منطقه کردستان عراق پرداختند [۱۷]. مزارانی و همکاران در سال ۲۰۲۳، به شناسایی پدیده‌های ریز دیواره چاه (انواع شکستگی‌ها، صفحات لایه‌بندی و استیلولیت‌ها) در مخزن سروک یکی از میداین جنوب غرب ایران به کمک توصیف مغزه‌های حفاری و نمودار تصویرگر FMI پرداختند [۱۹]. درفشی و همکاران در سال ۲۰۲۳، به تعیین نوع تخلخل از تلفیق نمودار انحراف سرعت، داده‌های پتروگرافی مقاطع نازک و منحنی‌های فشار موئینگی در سازند فهلیان حوزه خلیج فارس پرداختند [۱۰]. جی و همکاران در سال ۲۰۲۴، به شناسایی شکستگی‌های مخازن و بررسی پدیده‌های دیواره چاه به کمک نمودارهای تصویرگر و تلفیق با روش‌های هوشمند در یکی از میداین نفتی حوضه زاگرس پرداختند [۱۲]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۵، با تلفیق روش‌های مختلف نمودارگیری تصویری و صوتی به ارائه روشی جدید در تشخیص پدیده‌های ریز دیواره چاه نظیر، شکستگی‌ها پرداختند [۲۸].

با توجه به اینکه شناخت تخلخل و انواع آن در مخازن و بررسی‌های زمین‌شناسی ساختاری سازند جهت تولید موثر، توسعه، حفاری‌های آبی در میدان و بهره‌برداری بهینه از آن غیرقابل انکار بوده، به تعیین نوع تخلخل به کمک نمودار انحراف سرعت و صحت‌سنجی با پتروگرافی مقاطع نازک و بررسی زمین ساختاری سازند مورد مطالعه از نمودار FMI پرداخته شد.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی مورد مطالعه با روند ساختاری WNW-ESE در سال ۱۳۵۴ در بخش شمالی ناحیه دشت آبادان در جنوب غرب ایران و در استان خوزستان در پی برداشت‌های لرزه نگاری دو بعدی کشف گردید. این میدان دارای ساختمانی با شیب ملایم بوده که از نظر ابعاد دارای ۱۶ کیلومتر طول و حدود ۱۵ کیلومتر عرض است. ساختار میدان مورد مطالعه حاوی چندین مخزن کرتاسه شامل سازندهای ایلام، سروک و فهلان است [۱۱]. سازند ایلام در برش مطالعه شده با ضخامت ۱۳۰ متر از سنگ آهک‌های توده‌ای، ضخیم و متوسط با میان‌لایه‌هایی از شیل و دولومیت تشکیل شده و با ناپوستگی هم شیب روی سازند سروک قرار دارد که مرز بالایی آن با سازند گورپی پیوسته است [۲۲]. بر اساس شواهد ژئوشیمیایی و مطالعه‌های ناحیه‌ای در دشت آبادان، احتمالاً نفت سازند ایلام از سنگ منشاهای سرگلو با سن بازوسین-باتونین و گرو با سن بریازین-سنومانین تغذیه می‌شود [۲۲].

۳- مواد و روش‌ها

پژوهش مورد نظر بر روی مخزن ایلام با لیتولوژی غالب آهک و اندکی دولومیت به عنوان اصلی‌ترین تولید کننده هیدروکربور میدان مذکور انجام گردیده است [۱۱]. برای انجام پژوهش حاضر از مجموعه داده‌های کامل نگاره‌های معمول (نمودارهای گاما، قطر چاه و مته، مقاومت ویژه، نوترون، چگالی، صوتی و فوتوالکتریک)، داده‌های تخلخل مغزه، نمودار FMI و تعداد ۵ تصویر موجود از پتروگرافی مقاطع نازک مربوط به عمق ۲۹۰۲ تا ۳۰۳۰ متری یک حلقه چاه واقع در یکی از میادین جنوب غرب ایران در بستر نرم‌افزار پتروفیزیکی ژئولاگ استفاده گردید. به این منظور در مرحله اول پژوهش حاضر، نوع تخلخل در مخزن مورد مطالعه از نمودار ساخته شده انحراف سرعت به کمک داده‌های چاه‌پیمایی به عنوان یک جایگزین مقرون به صرفه برای شناسایی انواع تخلخل تعیین و در ادامه به کمک پتروگرافی مقاطع نازک صحت‌سنجی گردید. سپس تفسیر دقیقی

از نمودار FMI چاه مورد مطالعه با هدف شامل شناسایی لایه‌بندی‌ها، بررسی دیواره چاه، استیلولیت‌ها، شکستگی‌های طبیعی و القایی ارائه گردیده است.

۴- بحث و نتایج

پژوهش حاضر به بررسی و مطالعه‌ای جامع با تکیه و تمرکز بر نمودارهای چاه‌پیمایی معمول و ویژه با هدف تعیین نوع تخلخل و بررسی‌های زمین‌شناسی ساختاری در ۲ بخش ذیل می‌پردازد.

۴-۱ تعیین نوع تخلخل به کمک نمودار انحراف سرعت و صحت سنجی با تخلخل حاصل از پتروگرافی

مقاطع نازک

با عنایت به اینکه نمودار انحراف سرعت ابزاری مهم جهت بدست آوردن و دانستن نوع تخلخل در کربناته‌ها به حساب می‌آید. در ابتدا نگاره VDL از تلفیق نگاره‌های صوتی با نمودار نوترون- دانسیته برای چاه مورد مطالعه ساخته شد [۱۳]. نمودار مذکور در واقع اختلاف بین مقادیر موج تراکمی واقعی (V_{preal}) و موج تراکمی مصنوعی (V_{psyn}) است [۲۴]. برای ساخت این نمودار در ابتدا در بستر نرم افزار ژئولاگ تصحیحات محیطی نگاره‌های نوترون و دانسیته انجام گرفت، سپس حجم شیل به کمک نگاره گاما محاسبه و در ادامه میزان تخلخل حاصل از نمودارهای نوترون و دانسیته نیز از نظر تاثیر شیل تصحیح گردید و سپس موج تراکمی واقعی طبق رابطه ۱ به دست می‌آید. در این رابطه، DT_{log} میزان قرائت نمودار صوتی بر حسب $\mu s/ft$ می‌باشد [۱۳]:

$$V_{P_{real}} = \frac{304.8}{DT_{log}} \quad (1)$$

در ادامه موج تراکمی مصنوعی طبق رابطه ۲ محاسبه شد [۱۳]:

$$V_{P_{syn}} = \frac{304.8}{DT_{syn}} \quad (2)$$

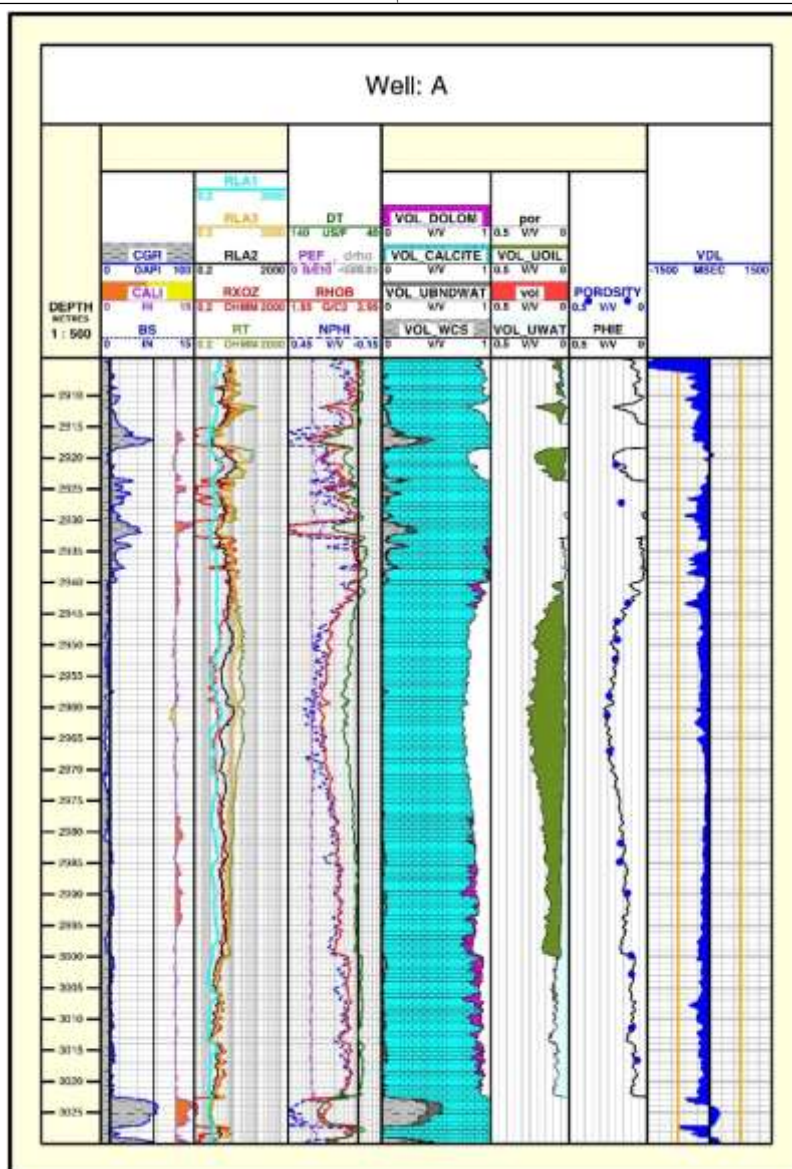
برای محاسبه نمودار صوتی مصنوعی (DTsyn) از روابط تداخل استفاده می‌شود. تداخل حاصل از نمودار صوتی از طریق رابطه ۳ بدست می‌آید. در این رابطه به جای تداخل صوتی، تداخل نوترون یا چگالی قرار داده می‌شود و نمودار DTsyn از طریق این رابطه محاسبه می‌شود. همچنین مقدار زمان گذر موج صوتی در سیال چاه (DTfl) نیز بر اساس نوع سیال حفاری درون چاه می‌بایست در نظر گرفته شود [۱۳]:

$$\phi_s = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \rightarrow \phi_{ND} = \frac{DT_{syn} - DT_{ma}}{DT_{fl} - DT_{ma}} \quad (3)$$

بدین ترتیب نمودار انحراف سرعت طبق رابطه ۴ از اختلاف حاصل از دو نمودار سرعت واقعی و سرعت مصنوعی برای چاه مورد مطالعه محاسبه شد [۲۴]:

$$VDL = V_{P_{real}} - V_{P_{syn}} \quad (4)$$

بر اساس نمودار انحراف سرعت (VDL) سه زون دارای انحراف صفر (که غالباً بیانگر تداخل‌های بین دانه‌ای، بین بلوری و ریز تداخل‌ها بوده و موجب تراوایی بالایی می‌شوند)، انحراف مثبت (که توسط تداخل‌هایی به وجود می‌آیند که قالب چارچوبی دارند نظیر؛ تداخل قالبی یا درون فسیلی و نشان‌دهنده زون‌های دارای تراوایی پایین هستند) و انحراف منفی (که غالباً سرعت‌های پایین را نشان داده و نتیجه یکی از سه پدیده بهم‌ریختگی در دیواره چاه، شکستگی و وجود گاز آزاد) قابل شناسایی می‌باشند [۱، ۴]. بر اساس روابط گفته شده نمودار انحراف سرعت (VDL) برای چاه مورد مطالعه ساخته شد (شکل ۱ ستون اول از سمت راست). در شکل ۱ نمودارهای پتروفیزیکی موجود از چاه مورد مطالعه و نمودار انحراف سرعت محاسبه شده نشان داده شده است. در این شکل، در ستون اول (از سمت راست) زون‌های دارای انحراف سرعت صفر (-) بین دانه‌ای و بین بلوری بیشترین فراوانی را دارند. این مورد گواه این است که در سازند ایلام چاه مورد مطالعه تداخل‌های به نوع سنگ شناسی و مقایسه سایر نمودارها منجمله قطر چاه و متع انحراف سرعت‌های منفی مشاهده شده در این چاه نشانگر ریزش دیواره چاه بوده و اثری از وجود گاز در مخزن مورد مطالعه یافت نشد.



شکل ۱ از سمت راست ستون اول (نمودار VDL ساخته شده در چاه مورد مطالعه)، ستون دوم (تخلخل موثر با نمودار مشکی در مقابل تخلخل حاصل از مغزه با نقاط آبی رنگ)، ستون سوم (حجم آب، نفت و گاز)، ستون چهارم (سنگ‌شناسی مخزن)، ستون پنجم (نمودارهای نوترون، صوتی، دانسیته و فوتوالکتریک)، ستون ششم (مجموعه کامل نمودارهای مقاومت ویژه)، ستون هفتم (نمودارهای قطر چاه و مته به همراه نمودار گاما) و ستون هشتم عمق چاه.

برای انجام مطالعات پتروگرافی با میکروسکوپ نوری یا پلاریزان، از سنگ‌ها مقاطع نازکی در حد ۳۰ میکرون تهیه می‌شود که از بررسی، تجزیه و تحلیل مقاطع نازک، اطلاعات مفیدی در خصوص کانی شناسی اجزای اصلی و فرعی، سیمان، ماتریکس، فرایندهای دیاژنزی و همچنین نوع و مقدار تخلخل حاصل می‌شود. هدف از مطالعه پتروگرافی در این بخش، بررسی انواع تخلخل‌های موجود در سازند ایلام در چاه مورد مطالعه است.

در مطالعه پتروگرافی سازند مورد مطالعه تعداد ۵ نمونه وکستون و پکستون در دسترس بود که جهت تعیین نوع تخلخل مورد استفاده قرار گرفت. بررسی مقاطع نازک و عکس‌های پتروگرافی این سازند گواه این است که تخلخل‌های اصلی مخزن ایلام از نوع بین دانه‌ای، بین بلوری و قالبی می‌باشد (شکل‌های ۲، ۳ و ۴).

۱) تخلخل بین دانه‌ای (Inter particle Porosity): این تخلخل شامل خلل و فرج بین ذرات تشکیل دهنده سنگ می‌شود که از مهمترین نوع تخلخل بوده که غالباً در زمان رسوبگذاری و به صورت اولیه در بین ذرات وجود دارد. تخلخل بین دانه‌ای بیشترین فراوانی را در رخساره‌های آواری دارد اما در رخساره‌های کربناته سازند ایلام نیز این نوع تخلخل معمول بوده که در بین آلوم‌های کربناته وجود دارد (شکل ۲ مربوط به اعماق ۲۹۵۰ و ۲۹۷۵ متری).



شکل ۲ تخلخل بین دانه‌ای، درون دانه‌ای و بین بلوری در نمونه‌های پکستون سازند ایلام: الف- عمق ۲۹۵۰، ب- عمق ۲۹۷۵ متری.

۲) تخلخل بین بلوری یا بین کریستالی (Inter Crystalline Porosity): تخلخل مذکور در فضاهای بین بلوری دولومیت-ها موجود بوده و با اندازه و شکل بلورها نسبت مستقیم دارد. عمده فراوانی این نوع تخلخل در رخساره‌های دولومیکرایت و دولومیکرواسپارهای مخزن ایلام است. در این نوع تخلخل، فضاهای خالی غالباً همگن بوده و اندازه آنها بین ۱۰ میکرون تا یک میلی‌متر است. گسترش تخلخل بین بلوری در ارتباط با فرایند دولومیتی شدن و تبلور مجدد بلورهای دولومیت‌های اولیه در مرحله دیاژنزی است (شکل ۳ مربوط به اعماق ۲۹۷۰ و ۲۹۹۰ متری).

شناخت انواع تخلخل و ویژگی‌های زمین‌شناسی سازند ایلام بر مبنای نمودار تصویری FMI ...

۳) تخلخل قالبی (Moldic Porosity): انحلال کامل یک ذره و یا باقی ماندن حاشیه ذره به نحوی که شکل و قالب ذره حل شده قابل تشخیص باشد موجب ایجاد تخلخل قالبی شده که عامل اصلی تشکیل تخلخل مذکور اختلاف کانی‌شناسی و انحلال پذیری متفاوت دانه‌ها، ماتریکس و سیمان است (شکل ۴ مربوط به عمق ۳۰۲۳ متری).



شکل ۳ تخلخل بین بلوری در سازند ایلام: الف- وکستون عمق ۲۹۷۰ ؛ ب-مادستون عمق ۲۹۹۰ متری .



شکل ۴ تخلخل قالبی در سازند ایلام عمق ۳۰۲۳ متری.

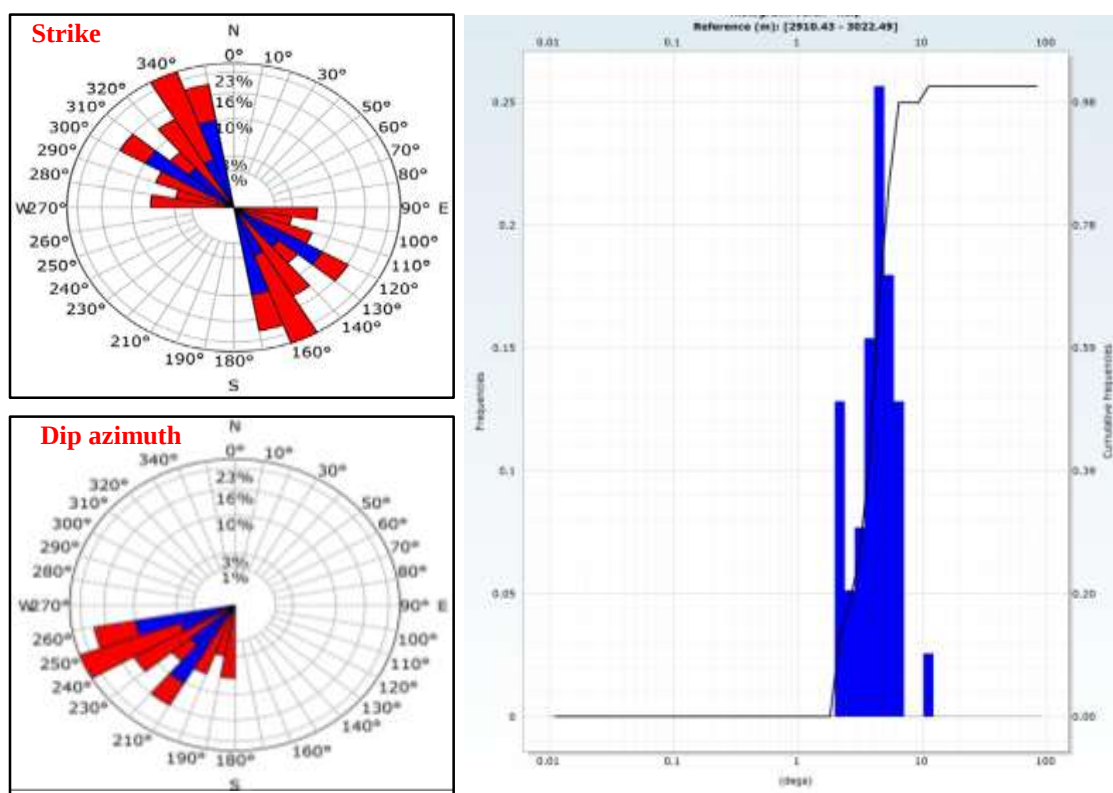
۲-۳ بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختاری مخزن ایلام در چاه مورد مطالعه به کمک نمودار FMI

شناسایی پدیده‌های دیواره چاه بویژه در مخازن کربناته همیشه برای متخصصین صنعت نفت حائز اهمیت بوده زیرا این پدیده‌ها، ابزاری کاربردی و مفید جهت مطالعات مربوط به تکتونیک منطقه‌ای بوده و تاثیرات غیر قابل انکاری بر کیفیت

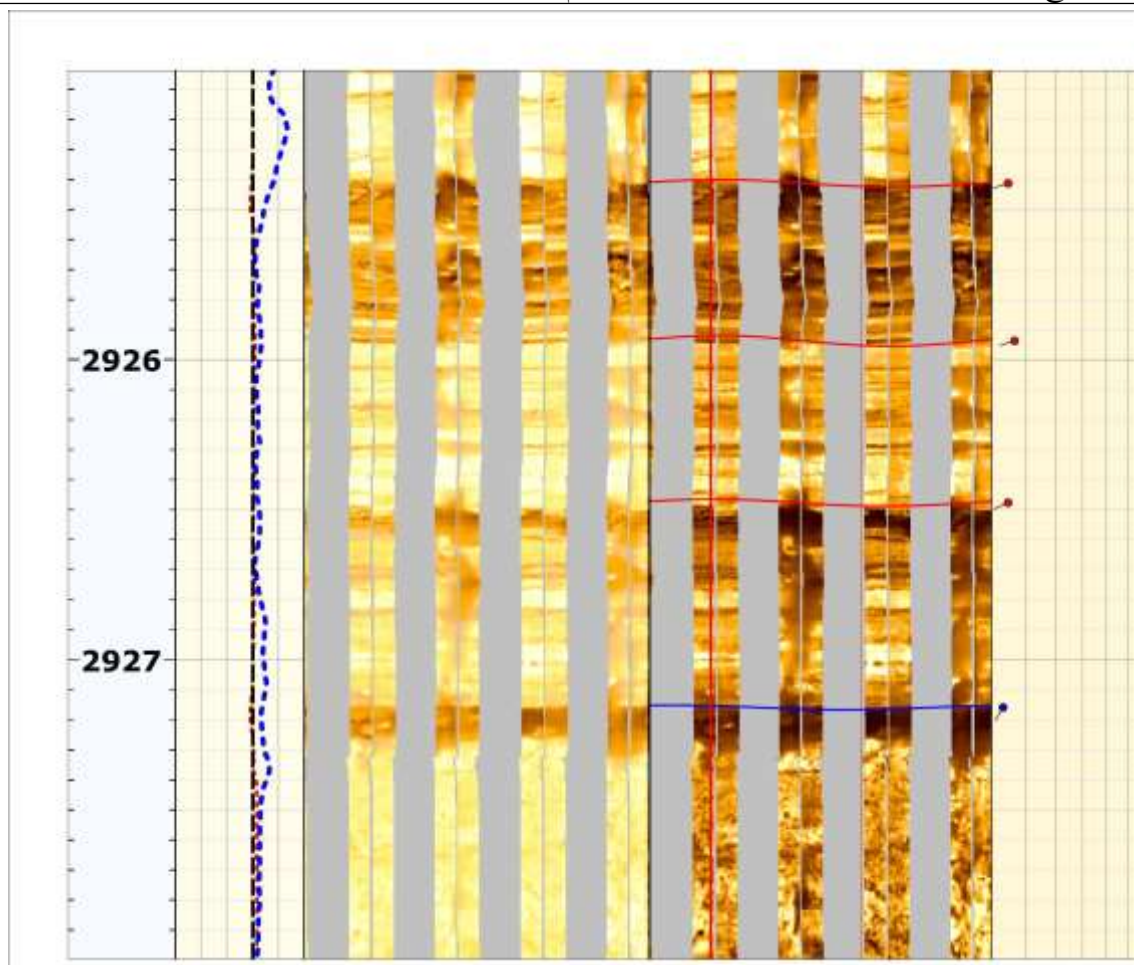
مخازن دارند [۱۶]. بدین منظور در این قسمت به بررسی عوارض ساختمانی و ریز دیواره چاه به کمک نمودار FMI در سازند ایلام چاه مورد مطالعه پرداخته شد.

۳-۲-۱ لایه‌بندی

اختلاف مقاومت الکتریکی ناشی از تغییر بافت لایه‌ها، باعث می‌شود که دو طرف لایه‌ها به واسطه یک نوار خطی به نام لایه‌بندی در نمودارهای تصویرگر بهنجار شده با تغییر رنگ از یکدیگر متمایز شوند که غالباً سطوح لایه‌بندی فاقد ضخامت بوده و گسترش آن‌ها به اندازه وسعت لایه است [۱۶]. در چاه مورد مطالعه ۹ عدد لایه‌بندی مطمئن و ۶۰ عدد لایه‌بندی نامطمئن تفسیر گردید. میانگین شیب لایه‌های تفسیر شده تقریباً برابر با ۴ درجه به سمت S30W و با امتداد N30W می‌باشد (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵ نمایش شیب و امتداد و هیستوگرام فراوانی شیب لایه بندی در سازند ایلام چاه مورد مطالعه.

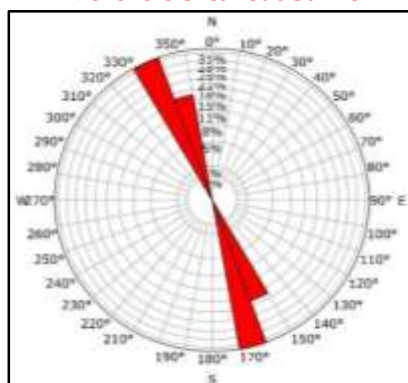


شکل ۶ نمونه ای از لایه بندی مطمئن و نامطمئن تفسیر شده در نمودار تصویرگر FMI (تک پل قرمز نشانه مرز لایه بندی نامطمئن و تک پل آبی نشانه مرز لایه بندی مطمئن می باشد).

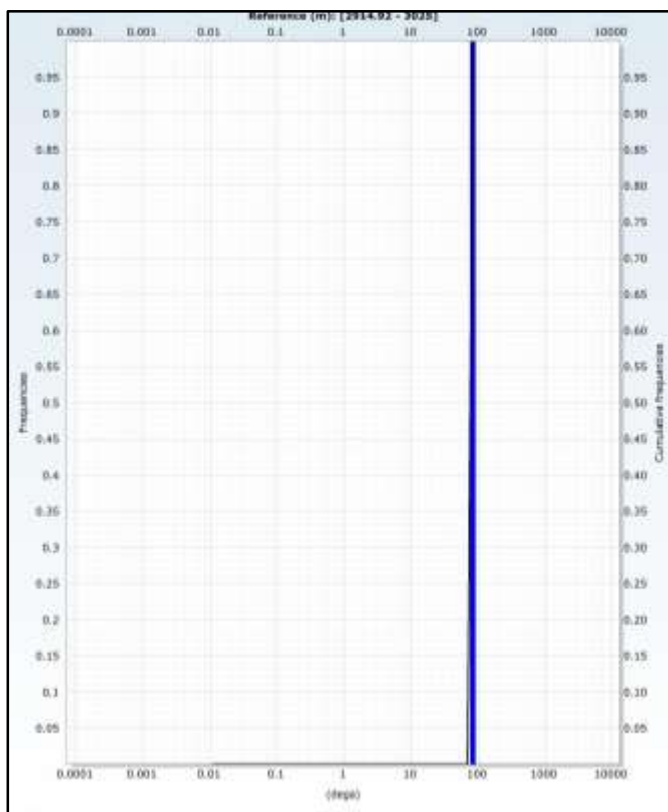
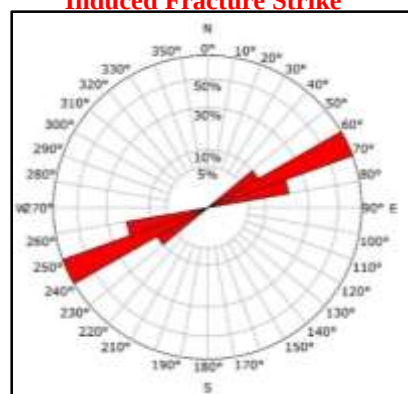
۲-۲-۳ ریزش‌های مقارن

نحوه توزیع تنش‌ها در اعماق مختلف زمین می‌تواند باعث ریختگی و ریزش‌های مقارن در سنگ‌های سخت و متراکم شود [۲۳]. به همین دلیل در این قسمت به بررسی شکستگی‌های برشی پرداخته شده است. با بررسی نمودارهای چاه مذکور مشاهده شد که ریزش‌های دیواره چاه در جهت کمترین تنش افقی وارد بر حفره چاه ایجاد شده و دارای امتداد N20W می‌باشند که تقریباً با امتداد کلی چین‌خوردگی‌های زاگرس مطابقت دارد (شکل ۷).

Borehole breakout Strike



Induced Fracture Strike

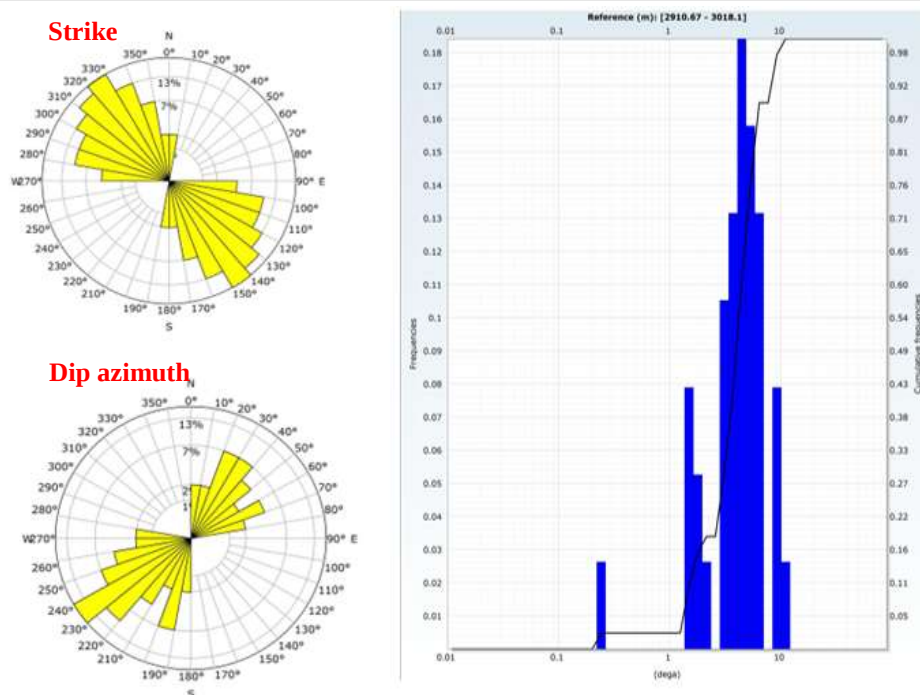


شکل ۷ نمودار گل سرخی، استریونت و هیستوگرام مربوط به شکستگی‌های ریزی و القایی چاه مورد مطالعه.

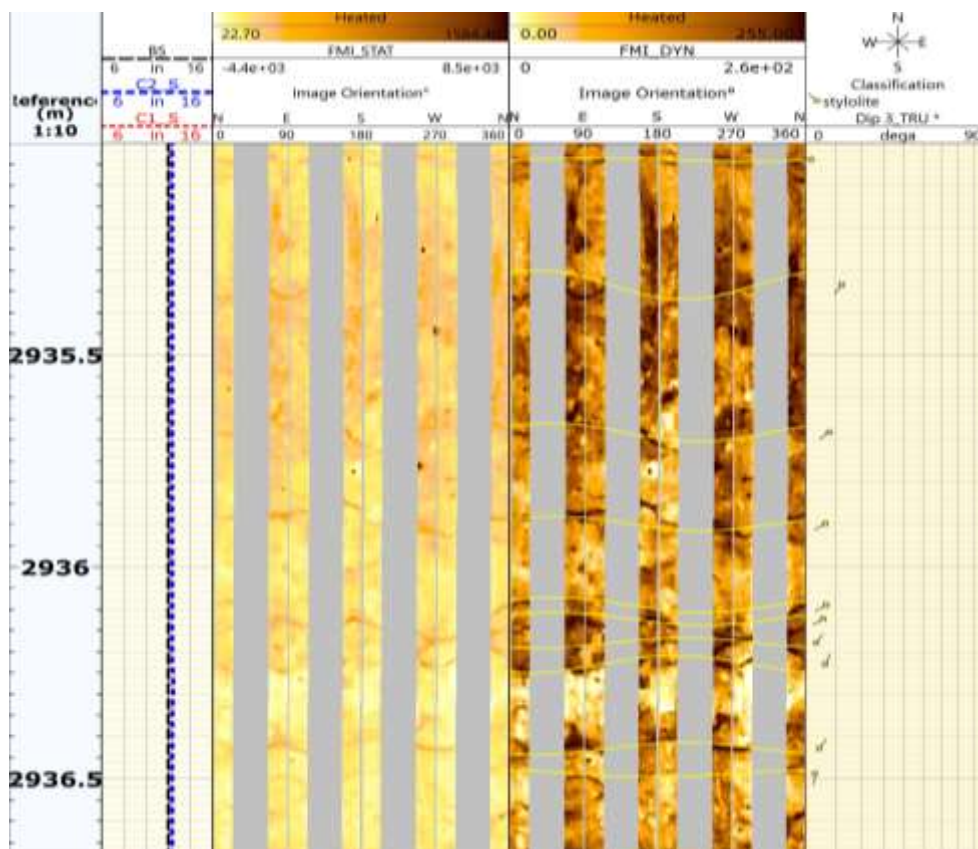
۳-۲-۳ استیلولیت‌ها

استیلولیت‌ها محصول فشار انحلالی در محل تماس دانه‌ها هستند که در سنگ‌های کربناته به شکل دانه‌ای و با گسترش جانبی مشاهده می‌شوند. استیلولیت‌ها بیانگر تنش موضعی در سنگ‌های کربناته‌اند که بر روی جریان سیال اهمیت فراوانی دارند. کانی‌های رسی اصلی‌ترین مواد پرکننده آن‌ها بوده و در نمودارهای تصویرگر به رنگ تیره قابل مشاهده می‌باشند [۲۹]. استیلولیت‌های شناسایی شده در پژوهش حاضر ۵۰ عدد از نوع چینه‌ای بودند که میانگین شیب آن‌ها ۴/۵ درجه و با امتداد N30W می‌باشد (شکل ۸ و ۹). استیلولیت‌های شناسایی شده در سازند ایلام چاه مورد مطالعه حالت مضرسی دارند و موازی لایه‌بندی‌اند به همین دلیل از نوع استیلولیت‌های چینه‌ای تلقی می‌شوند.

شناخت انواع تخلخل و ویژگی‌های زمین‌شناسی سازند ایلام بر مبنای نمودار تصویری FMI ...



شکل ۸ نمودار گل سرخی، استریونت و هیستوگرام مربوط به استیلولیت‌های شناسایی شده سازند ایلام در چاه مورد مطالعه.



شکل ۹ نمونه‌ای از استیلولیت‌های شناسایی شده در نمودار FMI چاه مورد مطالعه.

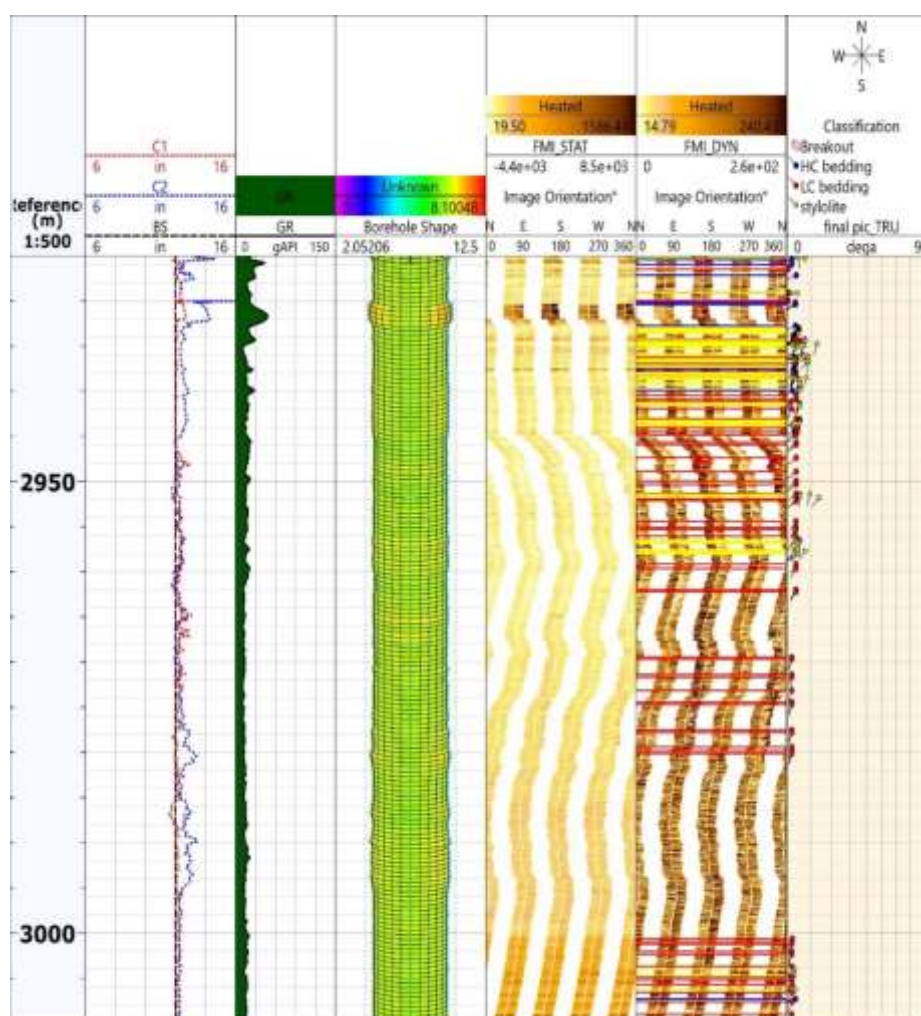
شکستگی‌ها پدیده‌هایی صفحه‌ای شکل می‌باشند که هیچ جا به جایی ظاهری در امتداد آن‌ها مشاهده نمی‌شود و در نواحی کششی شیب بالاتری دارند. شکستگی‌های باز به وسیله گل حفاری پر می‌شوند و اگر گل حفاری رسانا باشد نمودار تصویرگر مقاومت کمتری را نسبت به زمینه ثبت می‌کند به همین علت شکستگی‌های باز که گل به درون آن‌ها نفوذ کرده است به صورت یک موج سینوسی کامل یا ناپیوسته تیره رنگ در نمودارهای تصویرگر مشاهده می‌شوند [۲۳]. شکستگی‌های پر شده به وسیله کانی‌های بلورین پر می‌شوند که فاقد تخلخل و دارای مقاومت الکتریکی بالایی می‌باشند و در نمودارهای تصویرگر به صورت موج سینوسی به رنگ سفید رویت می‌شوند. بر مبنای بررسی انجام شده هیچ گونه شکستگی طبیعی و شکستگی القایی (Induced Fracture) در مخزن مورد مطالعه مشاهده نشد. تفسیر نمودار تصویرگر FMI چاه مورد مطالعه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ستون اول از سمت راست شکل مذکور، جهت و شیب پدیده‌های صفحه‌ای سازند را نشان می‌دهد. در ستون دوم تصویر دینامیکی پردازش شده با آثار سینوسی نشان داده شده که گواه شیب ویژگی‌های زمین‌شناسی تفسیر شده است این ستون امکان تشخیص و شناسایی پدیده‌های ظریف دیواره چاه را فراهم می‌نماید. ستون سوم گواه تصویر استاتیک چاه مورد مطالعه و ستون‌های چهارم، پنجم، ششم و هفتم بترتیب نشان دهنده؛ تصویر ۳ بعدی گمانه، نمودارگاما، قطر چاه و مته و عمق چاه مذکور است.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف شناخت انواع تخلخل از نمودار انحراف سرعت و صحت‌سنجی آن با تخلخل حاصل از پتروگرافی مقاطع نازک و سپس بررسی‌های پدیده‌های زمین‌شناسی ساختاری با تکیه بر نمودار تصویرگر FMI در سازند ایلام واقع در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران انجام گردیده است. از مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک مشخص شد که ریزرخساره‌های این سازند حاوی انواع تخلخل‌های بین بلوری، بین دانه‌ای و قالبی بوده و اثری از وجود شکستگی در این مخزن وجود ندارد. بر اساس نمودار انحراف سرعت تهیه شده، زون‌های اصلی مخزنی سازند ایلام دارای سرعت‌های نزدیک به صفر هستند که بیانگر وجود تخلخل بین بلوری و بین دانه‌ای است و دارای تراوایی خوبی می‌باشند. انحراف سرعت‌های منفی مشاهده شده در این چاه نشانگر ریزش دیواره چاه است. این مطالعه نشان داد که تخلخل‌های بین بلوری و بین دانه‌ای بیشترین تاثیر را در کیفیت مخزن ایلام داشته‌اند و تخلخل قالبی تاثیر کمتری بر کیفیت مخزن مذکور دارد. بر مبنای بررسی، آنالیز و تفسیر نمودار FMI در چاه مورد مطالعه ۹ عدد لایه‌بندی مطمئن و ۶۰ عدد لایه‌بندی نامطمئن تفسیر گردید. میانگین شیب لایه‌های تفسیر

شناخت انواع تخلخل و ویژگی های زمین شناسی سازند ایلام بر مبنای نمودار تصویری FMI ...

شده تقریباً برابر با ۴ درجه به سمت S30W و با امتداد N30W می باشد. استیلولیت های شناسایی شده در پژوهش حاضر ۵۰ عدد و از نوع چینه ای هستند که میانگین شیب آن ها ۴/۵ درجه و با امتداد N30W می باشند. این استیلولیت ها حالت مضرسی دارند و موازی لایه بندی اند به همین دلیل از نوع استیلولیت های چینه ای تلقی می شوند. ریزش های دیواره چاه (Borehole breakout) در جهت کمترین تنش افقی وارد بر حفره چاه ایجاد شده و دارای امتداد N20W می باشد که تقریباً با امتداد کلی چین خوردگی های زاگرس مطابقت دارد. بر مبنای بررسی های پتروگرافی مقاطع نازک، نمودارهای معمول، انحراف سرعت و FMI هیچ گونه شکستگی طبیعی و شکستگی القایی (Induced Fracture) در مخزن ایلام چاه مورد مطالعه مشاهده نشد.



شکل ۱۰ تفسیر زمین شناسی ساختاری چاه مورد مطالعه به کمک نمودار FMI (بترتیب از سمت راست به چپ): ستون اول شیب پدیده های صفحه ای سازند، ستون دوم تصویر دینامیکی پردازش شده، ستون سوم تصویر استاتیک چاه، ستون چهارم تصویر سه بعدی گمانه، ستون پنجم نمودار گاما، ستون ششم نمودارهای قطر چاه و مته و ستون هفتم عمق چاه.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم مقاله آقایان دکتر بهمن سلیمانی (سر دبیر مجله زمین شناسی نفت ایران) و دکتر افشین زهدی (هیات علمی دانشگاه زنجان) و دکتر پیمان رضایی (هیات علمی دانشگاه بندرعباس) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- [۱] حیدری، ا. بشیری، ر.، سلیمانی، ب.، و کدخدایی، ع.، ۱۴۰۳. نمودار انحراف سرعت مبتنی بر نمودار چاه پیمایی و NMR جهت تعیین دقیق انواع تخلخل در سازند آسماری در چاهی در یکی از میدان نفتی اهواز، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۴.
- [۲] رضایی، م. ر.، و چهارزی، ع.، ۱۳۸۹. اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه پیمایی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، ۶۹۹.
- [۳] سنائی، س.، یساقی، ع.، صدر، ا.، همایی، م.، و دریگوند، س.، ۱۳۹۹. تحلیل ساختاری و اثر سیستم گسلش در مخزن آسماری-جهرم میدان گلخاری، مجله زمین ساخت، ۲۹ تا ۴۷.
- [۴] سلیمانی، ب.، ساعدی، ق.، چرچی، ع.، سالاروند، ا.، ۱۳۹۲. بررسی ویژگی شکستگی‌ها و نوع تخلخل در مخزن با استفاده از مقاطع نازک، توصیف مغزه، نمودارهای FMI و انحراف سرعت، فصلنامه علمی علوم زمین.
- [۵] ساعدی، ق.، سلیمانی، ب.، و سامانی، ب.، ۱۴۰۰. تخمین تراکم شکستگی در مخازن کربناته با استفاده از آنالیز داده XMAC، STAR و VDL: مطالعه موردی مخزن آسماری میدان آغاچاری، جنوب غرب ایران، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱۱، شماره ۱.
- [۶] شمشیری، ز.، سحابی، ف.، نوروزی، غ.، معماریان، ح.، ۱۳۹۲. مقایسه نتایج حاصل از نمودار تصویری FMS با داده‌های مقاطع نازک در یکی از میدادین شرق حوضه کپه داغ، مجله زمین شناسی نفت ایران، دوره ۳، شماره ۵.
- [۷] عقلی، ق.، چرچی، ع.، سلیمانی، ب.، و فردین، ه.، ۱۳۹۳. استفاده از نمودارهای تصویرگر OBMI و UBI در تحلیل ساختار و شکستگی های مخزن آسماری و مقایسه آن با نمودار انحراف سرعت در یکی از میدادین جنوب غرب ایران. زمین شناسی کاربردی پیشرفته، (۱۱)، ۹-۱.
- [8] 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)**: 450-466.
- [9] AGHLI, G., FARDIN, H., MOHAMADIAN, R., SAEDI, G., 2014. 'Structural and fracture analysis using EMI and FMI image Log in the carbonate Asmari reservoir (Oligo-Miocene), SW Iran', *Geopersia*, **4(2)**: 169-184. doi: 10.22059/jgeope.2014.52717.
- [10] DERAFFSHI, M., KADKHODAIE, A., RAHIMPOUR-BONAB, H., KADKHODAIE-ILKHCHI, R., MOSLMAN-NEJAD, H. and AHMADI, A., 2023. Investigation and prediction of pore type system by integrating velocity deviation log, petrographic data and mercury injection capillary pressure curves in the Fahliyan Formation, the Persian Gulf Basin. *Carbonates and Evaporites*, **38(1)**: 22.
- [11] JAMES, G.A. and WYND, J.G., 1965. Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG bulletin*, **49(12)**: 2182-2245.
- [12] JI, C., DONG, S., ZENG, L., LIU, Y., HAO, J. and YANG, Z., 2024. Fracture identification of carbonate reservoirs by deep forest model: An example from the D oilfield in Zagros Basin. *Energy Geoscience*, **5(3)**: 100-300.
- [13] KADKHODAIE, R., KADKHODAIE, A. and REZAEE, R., 2021. Study of pore system properties of tight gas sandstones based on analysis of the seismically derived velocity deviation

- log: a case study from the Perth Basin of western Australia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **196**: p.108077.
- [14] KHOSHBAKHT, F., RASAIE, M.R., SHEKARIFARD, A., 2016. Investigating Induction Log Response in the Presence of Natural Fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **145**: 357-69.
- [15] KADKHODAEI, A., 2018. Evaluation of Oil-bearing Formation, First Edition, Dayareh Danesh Press, 572 pages.
- [16] KHOSHBAKHT, F., AZIZZADEH, M., MEMARIAN, H., NOUROZI, G.H. and MOALLEMI, S.A., 2012, Comparison of electrical image log with core in a fractured carbonate reservoir, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **86-87**: 289-296.
- [17] MAHMOOD, B.S., KHOSHNAW, F.A., ABDALQADIR, M.O. and GOMARI, S.R., 2023. Natural fracture characterization and in situ stress orientation analysis using fullbore formation micro imager (FMI): a case study on the X oil field, Kurdistan Region, Iraq. *Arabian Journal of Geosciences*, **16(2)**: p.113.
- [18] MOHSENIPOUR, A., SOLEIMANI, B., ZAHMATKESH, I. and VEISI, I., 2022. Determination of reservoir rock typing using integrating geological and petrophysical methods in one of the oil field in south-west of Iran. *Carbonates and Evaporites*, **37(2)**: p.31.
- [19] MAZDARANI, A., KADKHODAEI, A., WOOD, D.A. and SOLUKI, Z., 2023. Natural fractures characterization by integration of FMI logs, well logs and core data: a case study from the Sarvak Formation (Iran). *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **13(5)**: 1247-1263.
- [20] NELSON, E.J., MEYER, J.J., HILLIS, R.R. and MILDREN, S.D., 2005. Transverse drilling-induced tensile fractures in the West Tuna area, Gippsland Basin, Australia: implications for the in situ stress regime. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **42(3)**: 361-371.
- [21] NABIEI, M., YAZDJERDI, K., SOLEIMANY, B. and ASADI, A., 2021. Analysis of fractures in the Dalan and Kangan carbonate reservoirs using FMI logs: Sefid-Zakhr gas field in the Fars Province, Iran. *Carbonates and Evaporites*, **36(2)**: p.28.
- [22] RAHIMPOUR-BONAB, H., MEHRABI, H., ENAYATI-BIDGOLI, A.H. and OMIDVAR, M., 2012. Coupled imprints of tropical climate and recurring emergence on reservoir evolution of a mid Cretaceous carbonate ramp, Zagros Basin, southwest Iran. *Cretaceous Research*, **37**: 15-34.
- [23] ROMIANI, F., SABERI, M. H., RIAHI, M. A. 2022. 'Investigation of fractures and in situ stresses using Formation Micro Imaging (FMI) in south-western Iranian hydrocarbon field', *Advanced Applied Geology*, **12(2)**: 276-290. doi: 10.22055/aag.2021.36382.2194
- [24] SHAZLY, T., 2012, June. Application of the Velocity-deviation Log in Determining Pore Types and Permeability Trends of Nubia SS Formation. In 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012 . *European Association of Geoscientists & Engineers*.
- [25] SAEDI, G., SOLEIMANI, B. AND ESMAEILZADEH, S., 2017. Fracture characterization utilizing FMI, velocity deviation logs, core description and thin sections data. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 15-28.
- [26] SOLEIMANI, B., MOUSAVI, R. and SHAABAN, L., 2016. Natural fracture analysis and determination of fracture parameter using image log, Bangestan Reservoir, Gachsaran oil field, SW Iran', *Quarterly Journal of Tethys*, **4(2)**: 124-133.
- [27] TINGAY, M., REINECKER, J. and MÜLLER, B., 2008. Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs. World Stress Map Project, 1(8).
- [28] WANG, S., WANG, G., ZENG, L., LIU, P., HUANG, Y., LI, S., WANG, Z. and ZHOU, Y., 2025. New method for logging identification of natural fractures in shale reservoirs: The Fengcheng formation of the Mahu Sag, China. *Marine and Petroleum Geology*, **176**: p.107346.
- [29] YOSEFI, B., EMAMI MEYBODI, S.M.R., SHARAH, S.Y., SEDAGHATNIA, M., 2019. The pattern and effect of Stylolites and Stylomotels in permeability and micro porosity of carbonate rocks. *Applied Sedimentology*, **7**: 97-108.

Identification of Porosity Types and Geological Features of the Ilam Formation Based on FMI Image Logs, velocity deviation log and Petrographic Thin Section Data and in a Southwestern Iranian Field

Hamed Amraei

MSc in Petroleum Engineering, Sahand University of Technology

*hamedamraei0@gmail.com

Received: June 2025, Accepted: December 2025

Abstract

The identification of porosity types and structural geological studies of hydrocarbon reservoirs is one of the key petrophysical characteristics. To this end, in the first phase of the present study, the porosity types in the Ilam Formation, an oil well located in southwestern Iran, were determined from the constructed velocity deviation log using well logging data as a cost-effective alternative to identify porosity types; subsequently, thin sections were examined through petrographic analysis for verification. Petrographic examination of five available thin section samples from the studied well revealed that the microfacies of this formation contain intercrystalline, intergranular, and moldic porosities, with no evidence of fracturing in the reservoir. According to the velocity deviation log, the main reservoir zones of the Ilam Formation exhibit velocities close to zero, indicating the presence of intercrystalline and intergranular porosities with good permeability. Negative velocity deviations observed in this well indicate borehole breakouts, while zones with positive velocity deviations are associated with intragranular and moldic porosities, mostly present in non-reservoir intervals. Subsequently, in the second phase, structural geological interpretation of the reservoir was performed using the FMI imaging log. Accordingly, 69 bedding planes were interpreted in the studied reservoir, 9 of which with reliable dips with confident bedding contacts and 60 having dips with unreliable bedding boundaries. The average dip of the layers was determined approximately 4 degrees toward S30W, with a strike of N30W. Of the identified stylolites, 50 were of the bedding-parallel type, with an average dip of 4.5 degrees and a strike of N30W–S30W. Borehole breakouts occurred in the direction of the minimum horizontal stress acting on the borehole, with a strike of N20W–S20E, approximately corresponding to the general trend of the Zagros fold belt. Based on the analysis of conventional logs, velocity deviation, and FMI data, no natural or induced fractures were observed in the Ilam reservoir of the studied well. This study demonstrated that intercrystalline and intergranular porosities had the greatest influence on the reservoir quality of the Ilam Formation, whereas moldic porosity had a relatively minor effect.

Keywords: Determination of Porosity Types, Velocity Deviation Log, Petrography of Thin Sections, FMI Log, Folding.