

## شناسایی انواع منافذ و خواص مخزنی مرتبط با آن‌ها در سازند آسماری، یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

سجاد قره‌چلو<sup>۱\*</sup>، عبدالحسین امینی<sup>۱</sup>، علی کدخدایی<sup>۲</sup> و وحید فرچپور<sup>۳</sup>

۱- دانشگاه تهران، پردیس علوم، گروه زمین‌شناسی

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز

۳- کارشناس شرکت نفت مناطق مرکزی ایران

نویسنده مسئول: Gharechelloo.Sajjad@gmail.com\*

دریافت: ۹۲/۷/۱ پذیرش: ۹۳/۱/۲۳

### چکیده

توزیع انواع منافذ در سنگ مخزن از کنترل‌کننده‌های اصلی حرکت سیال در مخزن می‌باشد. از این رو تعیین نوع و اندازه منافذ نقش اساسی در ارزیابی‌های مخزنی، بهینه‌سازی تعداد چاه‌ها در یک میدان و پیش‌بینی هیدروکربن قابل بازیافت دارد. مخازن هیدروکربنی، به ویژه انواع کربناته، از نظر نوع منافذ و شعاع منفذی بسیار متنوع هستند. در این مطالعه انواع منافذ در سازند مختلط کربناته-آواری آسماری ابتدا با استفاده از داده نگارها شناسایی شده، سپس جهت اعتبار سنجی با منافذ تعیین شده از داده مغزه نیز انطباق داده شده است. برای تعیین نوع و اندازه منافذ با استفاده از داده نگارها، تکیه اصلی بر روی نگار انحراف سرعت بوده است. با استفاده از نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیک سنگ‌ها انواع منافذ در سازند مورد مطالعه به سه رده (انحراف مثبت، انحراف صفر و انحراف منفی) و هشت زیررده شامل درون دانه‌ای یا درون فسیلی، قالبی یا انحلالی، تخلخل میکروسکوپی، بین‌ذره‌ای، بین‌بلوری، بین‌دانه‌ای، تخلخل میکروسکوپی شیل و شکستگی رده‌بندی شده‌اند. در این میدان هر دو بخش آواری و کربناته سازند مورد مطالعه دارای توانایی تولید بالایی می‌باشند که برای تعیین کیفیت مخزنی آن‌ها از واحدهای جریان با توجه به پراکنش نوع منافذ استفاده شده است. در این مطالعه واحدهای جریان با استفاده از روش شاخص زون جریان تعیین شده‌اند. نتایج بدست آمده از این بررسی امکان تفکیک ۳ واحد جریان در بخش کربناته و ۲ واحد جریان در بخش آواری سازند آسماری را میسر ساخته است. هم‌چنین در تعیین هر یک از واحدهای جریان نوع منافذ نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این مطالعه تولید از این میدان را تحت کنترل ۴ نوع منفذ نشان می‌دهد که توسط نگار انحراف سرعت در امتدادچاه قابل شناسایی است.

**واژه‌های کلیدی:** انواع منافذ، نگار انحراف سرعت، واحد جریانی، کیفیت مخزنی، سازند آسماری

### مقدمه

تراوایی بسیار موثر است و توزیع سیستم منافذ کنترل‌کننده‌ی اولیه توزیع هیدروکربن به هنگام تغذیه مخزن می‌باشد [۱۹]. به عبارت دیگر نوع منافذ سنگ مخزن کنترل‌کننده بسیاری از شاخص‌های اصلی مرتبط با ویژگی‌های مخزنی آن است [۲۷، ۳۲، ۲۵، ۴۸، ۳۹، ۴۰]. سنگ‌های کربناته، به عنوان تشکیل‌دهنده اکثر مخازن هیدروکربنی خاورمیانه، به دلیل واکنش‌پذیر بودن بیش‌تر تحت تاثیر سیمانی شدن، انحلال و دولومیتی شدن قرار می‌گیرند [۳۷، ۳۵، ۵ و ۳۰]. این نوع سنگ‌ها به دلیل ماهیت‌شان و هم‌چنین اثر دایانز از نظر پراکنش منافذ بسیار پیچیده و متنوع هستند. یکی از نکات

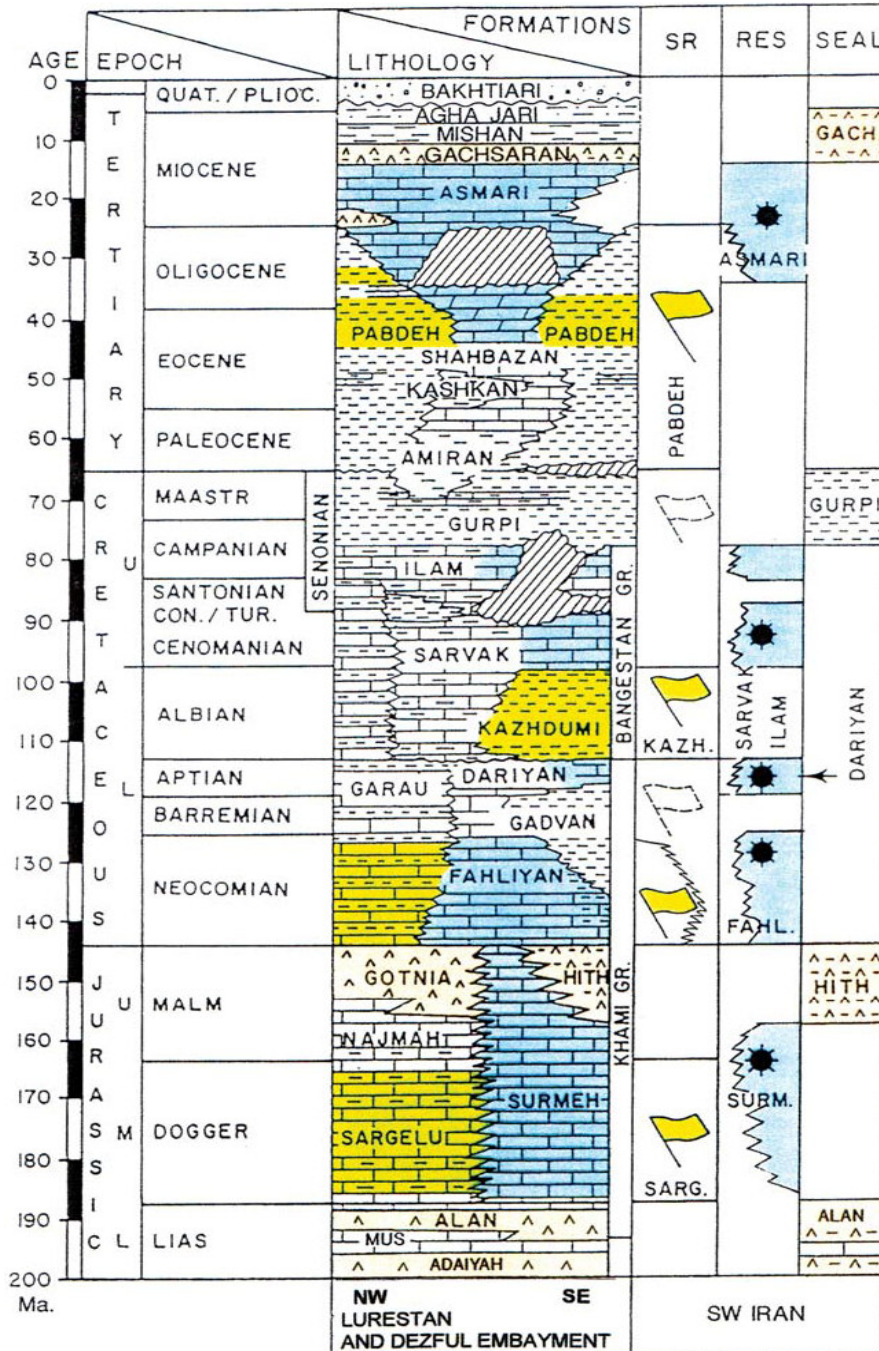
چند سازند کربناته از سن ژوراسیک تا نئوژن در جنوب غرب ایران و به ویژه در فروافتادگی دزفول مهم‌ترین مخازن هیدروکربنی ایران را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). سازند آسماری با سن الیگو-میوسن یکی از مهم‌ترین سازندهای مخزنی در جنوب غرب ایران است. این سازند در حوضه زاگرس بیش‌ترین سهم در تولید هیدروکربن کشور را دارد [۲۴]. سازند آسماری در میدان مورد مطالعه دارای ماهیت کربناته-آواری و از نظر توزیع نوع منافذ<sup>۱</sup> بسیار متنوع می‌باشد. درک توزیع و نوع منافذ سنگ مخزن در شناسایی واحدهای جریانی و توزیع

<sup>۱</sup> Pore types

واحد جریان برای پیش‌بینی دقیق‌تر تراوایی در سنگ مخزن می‌باشد. از طرفی تراوایی در سنگ‌های رسوبی به شدت به آرایش منافذ موجود در سنگ بستگی دارد. هر قدر سیستم منافذ پیچیده‌تر باشد تعیین توزیع تراوایی نیز مشکل‌تر است. و در نهایت در مطالعات مخزنی با شناسایی دقیق‌تر توزیع منافذ در سنگ مخزن درک مدل ساکن و پویا مخزن نیز آسان‌تر خواهد بود [۱۸].

اصلی در بررسی کمی مخازن کربناته شناسایی و تفکیک زون‌های تولید کننده و غیر تولید کننده است. شناسایی زون‌های تولید کننده بستگی به پیش‌بینی توزیع تراوایی دارد که به شدت وابسته به توزیع پیچیده نوع منافذ است [۲۹، ۳۰، ۳۱، ۸، ۱۳، ۳۵].

تعیین گونه‌های سنگی و واحدهای جریان یکی از مراحل اصلی در مطالعات توصیفی و مدل‌سازی مخزن است. هدف تمام تقسیم‌بندی‌های واحدهای مخزنی همانند



شکل ۱. ستون چینه‌شناسی (سازندهای مخزنی، منشأ و سنگ پوش) از سن ژوراسیک تا نئوژن در جنوب غرب ایران و فروافتادگی دزفول [۱۶]. پرچم‌ها نشان‌دهنده سنگ منشأهای اصلی می‌باشند.

میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده موجود بود، منافذ به‌دست آمده از نگار با داده مغزه مورد مقایسه و مطابقت قرار گرفتند. هم‌چنین برای تعیین واحدهای جریان از روش شاخص زون جریان<sup>۷</sup> استفاده شده است. تعداد واحدهای جریانی در این مطالعه بر اساس نوع منافذ تعیین شده‌اند. به عبارت دیگر سعی شده است واحدهای جریانی در چارچوب نوع منافذ شناسایی شده قرار گیرند.

### زمین‌شناسی میدان CK

میدان CK در منتهی‌الیه شمالی فرواتادگی دزفول در نزدیکی مرز جنوبی ناحیه لرستان قرار دارد (شکل ۲). اولین چاه این میدان، در سال ۱۳۴۵ حفر شد که به دلیل بروز مشکلات فنی متروکه اعلام گردید. در سال ۱۳۴۶ وجود نفت در چاه ۲ میدان و در مخزن آسماری به اثبات رسید و تا کنون ۱۵ حلقه چاه در این میدان حفاری شده که از این تعداد ۲ حلقه چاه متروکه می‌باشد. در سطح زمین ساختمان میدان به‌صورت تک شیب است که به‌سوی شمال-شرقی شیب دارد و بخش جنوب-غربی آن توسط یک گسل رانندگی محدود شده است. مخزن آسماری، با ضخامت حدود ۳۲۰ متر، در این میدان به علت وجود بخش ماسه‌سنگی اهواز به صورت یک مخزن هیبرید یا مخلوط کربناته-آواری می‌باشد (شکل ۳). نهشته‌های مختلط کربناته-آواری با عمق رسوب‌گذاری کم تا متوسط در این سازند، مخازن هیدروکربنی مهمی را تشکیل داده‌اند که بیش از صد سال است در جنوب و جنوب‌غرب کشور نفت و گاز تولید می‌کنند. با توجه به تولید صد ساله از سازند آسماری و قرار گرفتن بسیاری از میادین هیدروکربنی منطقه در نیمه دوم تولید یا تولید غیراقتصادی، انگیزه زیادی در به کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت از این سازند، به‌ویژه در دهه اخیر، ایجاد شده است. اولین گام در رسیدن به این هدف مهم، به‌دست آوردن شناخت کاملی از ناهمگنی‌های مخزنی وابسته به نوع منافذ است.

تعیین نوع منافذ یکی از مهم‌ترین مطالعات مقدماتی در برداشت سیال باقی‌مانده در مخزن است. زیرا نوع منافذ و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر از کنترل‌کننده‌های حرکت سیال در محیط متخلخل<sup>۸</sup> است. از آنجایی که دیاژنز نیز

مدل لوله موئینه<sup>۱</sup> که اولین بار توسط کازنی [۲۶] و بعداً توسط کارمن [۱۷] بحث شد در واقع رابطه تراوایی را با دیگر ویژگی‌های سنگ مانند تخلخل، مقدار پیچاپیچی منافذ، مقدار سطح ویژه و فاکتور شکل مقایسه می‌نماید. معادله کازنی-کارمن بعداً توسط پژوهشگران دیگری گسترش پیدا کرد و مفهوم واحد جریانی تعریف شد [۴] و [۷]. تعیین واحد جریانی یکی از اصول مدل‌سازی مخزن می‌باشد که به منظور تولید و مدل‌سازی دینامیک انجام می‌شود. سازند آسماری در میدان مورد مطالعه حاوی مقدار زیادی نفت درجا است که تعیین واحد جریانی<sup>۲</sup> در بهره‌برداری این منابع بسیار اهمیت دارد. لذا در این مقاله ابتدا توزیع انواع منافذ در این سازند شناسایی و در ادامه واحدهای جریانی در چارچوب انواع منافذ تعیین می‌گردند.

### روش مطالعه

در این پژوهش از نگارهای نوترون و صوتی<sup>۳</sup>، فشار تزریق جیوه<sup>۴</sup>، برش نازک میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده و داده تخلخل و تراوایی مغزه برای شناسایی انواع منافذ و واحدهای جریانی وابسته به آن استفاده شده است. داده‌های مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی استفاده شده در این مطالعه مربوط به چاه شماره ۵ از میدان CK می‌باشند. داده مغزه شامل ۱۵۰ عدد برش نازک میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده (مخلوط رزین و رنگ آبی) است که با میکروسکوپ نور عبوری به منظور تعیین نوع منافذ مورد مطالعه قرار گرفتند. هم‌چنین در این مطالعه برای نامگذاری سنگ‌های کربناته از طبقه‌بندی دانام<sup>۵</sup> (۱۹۶۲) استفاده شده است که اساس طبقه‌بندی بافت رسوبات (گل پش‌تیبان یا دانه پش‌تیبان) می‌باشد [۲۱].

نگار انحراف سرعت<sup>۶</sup> یک نگار مصنوعی است که از ترکیب نگارهای تخلخل (صوتی، نوترون و چگالی) و رابطه وایلی [۸] به‌دست می‌آید و در نهایت از اختلاف مقادیر سرعت محاسبه شده از نگار صوتی واقعی و مصنوعی حاصل می‌شود. پس از محاسبه نگار انحراف سرعت از روی این نگار، در محدوده‌هایی از چاه که داده مغزه و برش نازک

<sup>۱</sup> Capillary tube model

<sup>۲</sup> Flow unit

<sup>۳</sup> Neutron and sonic

<sup>۴</sup> Mercury injection capillary pressure

<sup>۵</sup> Dunham classification

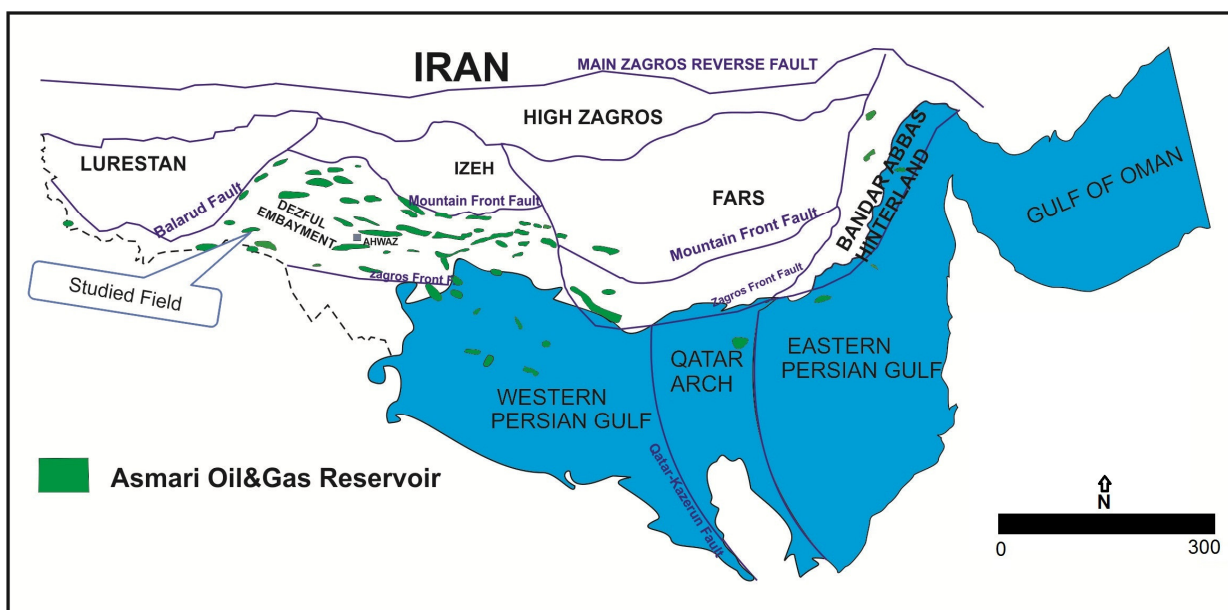
<sup>۶</sup> Velocity deviation log (VDL)

<sup>۷</sup> Flow zone index (FZI)

<sup>۸</sup> Porous media

کلی از سازند ارائه شده است. بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی و تخلخل مفید، سنگ مخزن آسماری در این میدان به ۶ زون مخزنی تقسیم می‌شود که زون‌های ۲ و ۴ از نظر قابلیت بهره‌دهی دارای بهترین شرایط مخزنی می‌باشند. زون ۲ کربناته با ۱۰ متر ماسه‌سنگ در قاعده و زون ۴ ماسه‌سنگی است [۱]. در ادامه شرح کوتاهی از هر زون مخزنی از بالا به پایین به منظور نشان دادن تنوع و ناهمگنی در این سازند ارائه شده است:

از کنترل کننده‌های اصلی کیفیت مخزنی و نوع منافذ می‌باشد [۲] در نتیجه سنگ‌شناسی و تنوع آن نیز در یک سازند در تنوع منافذ تاثیر گذار است. سازند آسماری در میدان CK از نظر سنگ‌شناسی بسیار متنوع است (سنگ‌آهک، دولومیت، مارل، انهدریت، ماسه‌سنگ و شیل) (شکل ۳). لذا این تنوع در سنگ‌شناسی نیز موجب ناهمگنی‌های مخزنی نیز شده است. در این مطالعه به دلیل مختلط بودن سازند و تنوع سنگ‌شناسی ابتدا مختصری از ۶ زون مخزنی برای به‌دست آوردن یک تصور



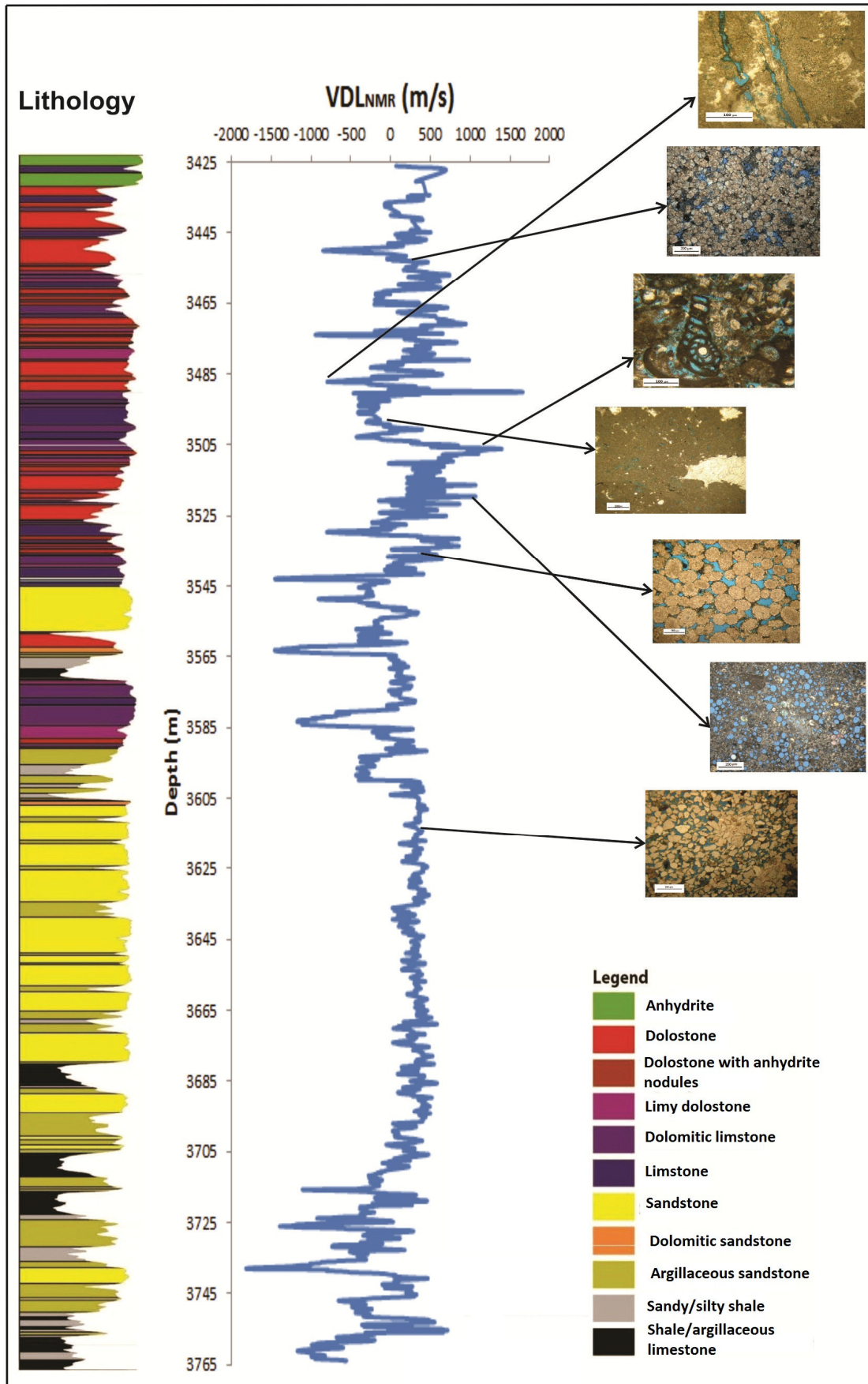
شکل ۲. موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه و توزیع میادینی که سازند آسماری در آن‌ها نقش مخزن گازی و یا نفتی را دارد [۲۵].

خاکستری تا قهوه‌ای روشن و سنگ‌آهک دولومیتی و ماسه‌های همراه با ندول‌های انیدریتی است. میانگین ضخامت مفید این زون ۲۷ متر است و میانگین تخلخل مفید و تراوایی در آن ۱۵ درصد و ۳۶ میلی‌داری، میانگین اشباع آب در زون مفید ۲۳ درصد و میانگین ستون نفت در آن تقریباً ۳/۷ متر است [۱].

**زون ۳:** از نظر سنگ‌شناسی این زون از تغییرات زیادی برخوردار بوده و تناوبی از دولومیت، سنگ‌آهک، سنگ‌آهک ماسه‌ای و دولومیتی را شامل می‌شود. در قسمت‌های بالایی چند لایه شیلی نیز در آن وجود دارد. این زون نیز دارای توانایی تولید پایینی می‌باشد. میانگین ضخامت این زون ۳۳ متر، متوسط تخلخل در آن ۱۴/۲۳ درصد، میانگین اشباع آب ۲۹/۹۹ درصد و میانگین تراوایی ۱/۹۸ میلی‌داری است [۱].

**زون ۱:** این زون، که عمدتاً شامل دولومیت، سنگ‌آهک و سنگ‌آهک دولومیتی به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای روشن است، با ضخامت حدود ۶۵ متر در بالاترین بخش سازند آسماری قرار گرفته است. میانگین ضخامت مفید این زون در کل میدان حدود ۲۱ متر، متوسط تخلخل مفید ۱۰ درصد، میانگین اشباع آب مفید ۳۵ درصد، متوسط تراوایی ۷/۵ میلی‌داری و متوسط ستون هیدروکربن تقریباً ۱ متر است [۱].

**زون ۲:** این زون یک زون کربناته-غالب با ۱۰ متر ماسه‌سنگ در پایین است. این ماسه‌سنگ‌ها دانه‌ریز تا متوسط دانه بوده و بر اساس رده‌بندی پتی‌جان و همکاران [۳۴] از نوع کوارتز آرنایت تا کوارتز وک می‌باشند که آثار زیست‌آشفته‌گی نیز در آن دیده می‌شود. میانگین ضخامت آن ۴۵ متر است و شامل سنگ‌آهک



شکل ۳. ستون سنگ‌شناسی و نگار انحراف سرعت در یکی از چاه‌های میدان CK. با توجه به محدوده‌های انحراف سرعت تعریف شده برای هر زیربرده (مراجعه به متن)، در بخش کربناته توزیع ۶ نوع منفذ در بازه ۲۰۰۰- تا ۲۰۰۰+ متر بر ثانیه دیده می‌شود. ولی در بخش آواری توزیع ۲ نوع منفذ در بازه ۴۰۰- تا ۴۰۰+ متر بر ثانیه دیده می‌شود که نشان‌دهنده تنوع منفذی کم‌تر در بخش آواری است.

سکانس و در بخش آواری (الیگوسن) از دو سکانس تشکیل شده است [۳].

#### رابطه بین سرعت صوت، تخلخل و نوع منافذ

نتایج مطالعات پیشینیان رابطه میان سرعت صوت، تخلخل و منافذ سنگ را اثبات نموده است. سرعت عبور امواج فشارشی در سنگ به شدت وابسته به مقدار تخلخل است [۴۴ و ۳۶]. از طرفی نوع منافذ نیز از پارامترهای مهم کنترل‌کننده خصوصیت صوتی سنگ است [۸]. اخیراً امکان بررسی تاثیر کمی ویژگی‌های فیزیکی سنگ بر روی سرعت صوت و تراوایی با استفاده از آنالیز تصاویر دیجیتالی<sup>۴</sup> مشخص شده است [۴۷]. هم‌چنین تاثیر هندسه منافذ بر روی سرعت موج پی<sup>۵</sup> و اس<sup>۶</sup> نیز با جزئیات کامل مورد مطالعه قرار گرفته است [۴۵]. بر اساس مطالعات متعدد ترسیم مقدار تخلخل در مقابل سرعت موج فشارشی یک روند معکوس را نشان داده که با افزایش مقدار تخلخل مقدار سرعت کاهش می‌یابد [به طور مثال ۲۳]. رابطه میان سرعت و مقدار تخلخل توسط وایلی و همکاران [۴۹] مشخص شده است:

$$\frac{1}{V_{rock}} = \frac{1 - \emptyset}{V_{matrix}} + \frac{\emptyset}{V_{fluid}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه  $\emptyset$  مقدار تخلخل (درصد) و  $V$  مقدار سرعت بر حسب متر بر ثانیه است. این رابطه نشان می‌دهد که زمان عبور موج صوتی در سنگ حاصل جمع زمان عبور موج صوتی از فضای خالی سنگ که توسط سیال پر شده، و زمینه سنگ می‌باشد. با این وجود پراکندگی (انحراف) سرعت در اطراف رابطه (۱) نشان‌دهنده عدم قطعیت تخمین تخلخل با استفاده از رابطه وایلی است. این مقدار پراکندگی و انحراف در اطراف رابطه وایلی در اثر وجود نوع منافذ متفاوت می‌باشد [۳۶، ۴۴، ۹ و ۱۲]. بنابراین میزان پراکندگی و انحراف سرعت نشان‌دهنده ناهمگنی الاستیکی در اثر نوع منافذ سنگ می‌باشد که به‌عنوان یک اصل در شناسایی نوع منافذ قرار گرفت (شکل ۴). اندازه‌گیری پراکندگی سرعت در تخلخل‌های یکسان نشان می‌دهد که هر یک از انواع منافذ تاثیر ویژه‌ای بر روی خصوصیات صوتی دارد. انحراف سرعت در واقع انحراف از سرعت تخمین‌زده شده در رابطه (۱) در تخلخل‌های یکسان است [۹].

**زون ۴:** تمام این زون ماسه‌سنگی می‌باشد که ضخامت میانگین آن در حدود ۱۰۰ متر است. زون ۴ به علت تخلخل و تراوایی بالا از پتانسیل تولیدی بسیار خوبی نسبت به سایر زون‌های مخزن برخوردار است و از ماسه سنگ‌های کرم رنگ با دانه‌بندی متوسط و جورشدگی متوسط و متوسط تا خوب تشکیل شده است. مقدار تخلخل مفید در آن ۱۶/۳ درصد، میانگین اشباع آب در زون مفید ۲۰/۱ درصد و تراوایی ۴۷ میلی‌داری می‌باشد [۱].

**زون ۵:** این زون شامل تناوبی از شیل خاکستری، سنگ آهک ماسه‌ای و ماسه‌سنگ‌های آهکی است. مقدار ستون هیدروکربن در این زون بسیار کم بوده و تنها محدود به ۲ متر در چاه شماره ۳ است. در چاه شماره ۳ مقدار ضخامت مفید، تخلخل، تراوایی و اشباع آب به ترتیب، ۲ متر، ۱۸ درصد، ۱۱/۲ میلی‌داری و ۴۴ درصد می‌باشد [۱].

**زون ۶:** این زون به عنوان زون تدریجی سازند پابده به آسماری معرفی شده است. از نظر سنگ‌شناسی متشکل از سنگ‌آهک ماسه‌ای ریز دانه همراه با تناوب لایه‌های ماسه‌سنگی و ماری می‌باشد. مشخصات پتروفیزیکی آن شامل: میانگین تخلخل ۵ درصد، تراوایی ۰/۰۱ میلی‌داری و مقدار آب اشباع شدگی ۳۵ درصد است [۱]. برای مثال جدول ۱ به‌طور خلاصه مشخصات مخزنی زون‌های سازند آسماری در یکی از چاه‌های میدان را نشان می‌دهد. مقدار کمینه تخلخل، حجم شیل و آب اشباع‌شدگی که در یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه محاسبه شده است به ترتیب برابر: ۴ درصد، ۲ درصد و ۱۷ درصد می‌باشد.

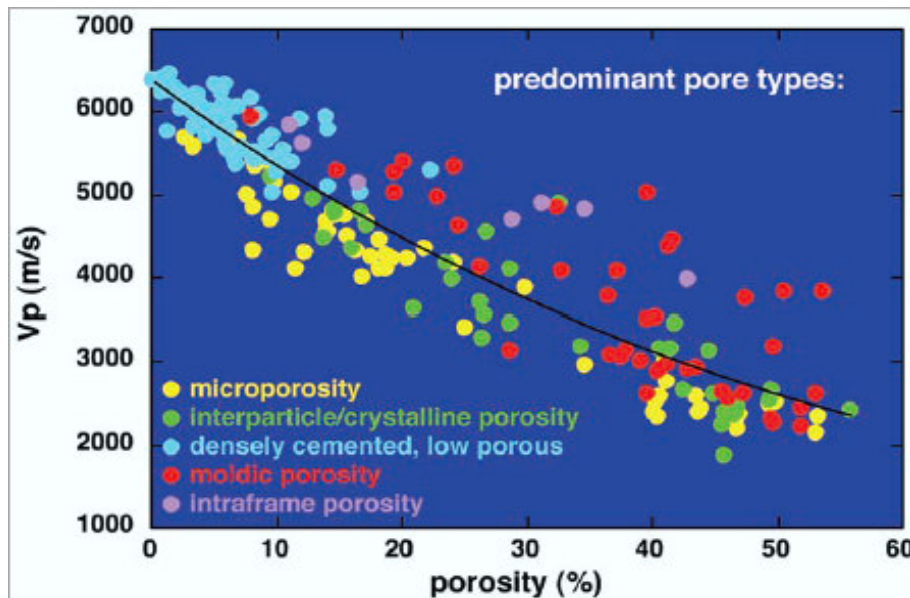
بر اساس مطالعات فراگیر سنگ‌شناسی و تحلیل رخساره‌ای، در بخش کربناته این سازند ۱۲ رخساره در قالب ۵ مجموعه رخساره‌ای و در بخش آواری آن ۵ مجموعه رخساره‌ای تشخیص داده شده است [۳]. از نظر محیط رسوبی بخش کربناته سازند آسماری به یک رمپ کم‌شیب و بخش آواری آن به زیر محیط‌های دشت ساحلی<sup>۱</sup>، دلتایی و زیر جزرومدی<sup>۲</sup> تا محیط دور از ساحل<sup>۳</sup> نسبت داده شده‌اند [۴۳]. از نگاه چینه‌نگاری سکانسی این سازند در بخش کربناته (میوسن) از سه

<sup>۴</sup> Digital image analysis  
<sup>۵</sup> P-Wave velocity  
<sup>۶</sup> S-Wave velocity

<sup>۱</sup> Coastal plain  
<sup>۲</sup> Distal deltaic to subtidal  
<sup>۳</sup> Offshore

جدول ۱. ویژگی‌های مخزنی (پتروفیزیکی) زون‌های سازند آسماری در یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه

Formation Zone	Zone Top (MD) (m)	Net Pay (MD)					
		Gross (MD)	Thickness (m)	Thickness (m)	Net Pay/Gross	Phi (%)	SW (%)
Asmari-1a	3444	43.80	26.67	0.61	9.96	37.76	0.06
Asmari-1b	3487.8	19.50	8.84	0.45	7.68	42.45	0.03
Asmari-2a	3507.3	34.76	13.72	0.39	12.81	41.56	0.13
Asmari-2b	3542	8.00	7.01	0.88	19.77	21.05	192.46
Asmari-3	3550	28.80	16.76	0.58	14.23	29.99	1.98
Asmari-4	3578.8	84.26	38.56	0.46	16.75	20.96	47.77
Asmari-5	3663	92.00	0.61	0.01	4.96	38.51	0.01



شکل ۴. رابطه معکوس تخلخل با سرعت موج فشارشی با استفاده از رابطه وایلی؛ که اختلاف در مقدار سرعت و قرار نگرفتن بر روی منحنی در تخلخل‌های یکسان نشان‌دهنده انواع مختلف منافذ است که بر روی رفتار الاستیک سنگ اثر می‌گذارد [۲۴].

نوع منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت در سه رده انحراف مثبت، انحراف صفر و انحراف منفی تقسیم‌بندی می‌شوند. منافذی که در رده مثبت‌اند (I) معمولاً ثانویه‌اند و تحت تاثیر انحلال و سیمانی شدن قرار گرفته‌اند و بر اساس رابطه وایلی دارای سرعت بالایی هستند ( $V_{DL} > 500$  m/s). این منافذ دارای ۲ زیررده درون ذره‌ای (درون فسیلی) و قالبی (حفره‌ای) می‌باشند. انواع منافذ رده صفر (II) سرعتی تقریباً معادل سرعت فرمول وایلی دارند ( $500 < V_{DL} < 500$  m/s) که ۳ زیررده آن در

برای محاسبه نگار انحراف سرعت در سازند مورد مطالعه ابتدا سرعت مصنوعی<sup>۱</sup> از رابطه وایلی و تخلخل نگار نوترون به‌دست آمد. در ادامه سرعت مصنوعی از سرعت واقعی<sup>۲</sup> (سرعت موج فشارشی نگار صوتی) کم شده و در نتیجه نگار انحراف سرعت حاصل گردید (رابطه ۲) [۹].

$$V_{DL} = \text{Real Velocity} - \text{Synthetic Velocity} * 1000$$

رابطه ۲

<sup>۱</sup> Synthetic velocity

<sup>۲</sup> Real velocity

۲۸]. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۶۰۰ تا ۱۴۰۰ و میانگین ۷۵۰ متر بر ثانیه، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۵ درصد و ۰/۹ میلی‌داری می‌باشد.

**رده II:** این رده دارای پنج زیررده است که به ترتیب شامل تخلخل میکروسکوپی، بین‌ذره‌ای، بین‌بلوری، بین‌دانه‌ای و تخلخل میکروسکوپی شیل است. زیررده *I* تخلخل میکروسکوپی شامل تخلخل‌های زیر ۱۰ میکرومتر می‌باشد [مقایسه با ۲۸]. این نوع منافذ به صورت بین‌دانه‌ای ریز یا بین‌بلوری ریز دیده می‌شوند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۰۰ تا ۴۰۰- با میانگین ۴۰ متر بر ثانیه، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۹ درصد و ۰/۰۲۷ میلی‌داری می‌باشد. زیررده *II* منافذ بین‌ذره‌ای، تخلخلی است که فضای بین ذره‌ها یا دانه‌ها را شامل می‌شود [مقایسه با ۱۹]. این نوع منافذ معمولاً اولیه‌اند ولی به ندرت در اثر انحلال زمینه یا سیمان به صورت ثانویه هم تشکیل می‌شوند. از نظر اندازه سه نوع منفذ بین‌ذره‌ای دیده می‌شود که شامل تخلخل میکروسکوپی بین ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر، مزو تخلخل بین ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر و ماکرو تخلخل که بیش از ۱۰۰ میکرومتر است [مقایسه با ۲۸]. در نمونه‌های مورد مطالعه منافذ بین‌ذره‌ای بیش‌تر در اندازه ۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر می‌باشند که جز منافذ متوسط اندازه یا مزو تخلخل قرار می‌گیرند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۵۰ تا ۲۰۰- با میانگین ۲۵۰ متر بر ثانیه، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۸ درصد و ۵۳۲ میلی‌داری می‌باشد. زیررده *III* منافذ بین‌بلوری به صورت اولیه یا ثانویه در بین بلورها تشکیل می‌شوند که نوع ثانویه آن رایج‌تر است [مقایسه با ۱۹]. از نظر اندازه سه نوع تخلخل بین‌بلوری مشاهده می‌شود که شامل تخلخل میکروسکوپی (بین ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر)، مزو تخلخل (بین ۲۰ تا ۶۰ میکرومتر) و ماکرو تخلخل (بیش از ۶۰ میکرومتر) است [مقایسه با ۲۸]. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۵۰ تا ۲۰۰- با میانگین ۲۵۰ متر بر ثانیه، میانگین تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۲/۷ درصد و ۳۲۰ میلی‌داری می‌باشد. زیررده *IV* منافذ بین‌دانه‌ای در بخش آواری سازند آسماری مشاهده می‌شود که در بین دانه‌های ماسه‌سنگی به صورت اولیه تشکیل شده است. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۱۰۰ تا ۴۰۰ با میانگین ۲۰۰ متر بر ثانیه، میانگین

بخش کربناته شامل منافذ نوع تخلخل میکروسکوپی، بین‌ذره‌ای و بین‌بلوری می‌باشد. زیررده‌های رده صفر (II) در بخش آواری شامل، بین دانه‌ای و تخلخل میکروسکوپی شیل است. در رده منفی (III) سرعت مصنوعی به دلیل تخلخل کم، بسیار زیاد است و در نتیجه تفاضل آن با سرعت واقعی انحراف منفی ( $V_{DL} < -500$ ) نتیجه می‌دهد. رده منفی (III) دارای تنها یک زیررده تخلخل نوع شکستگی می‌باشد. نگار انحراف سرعت در بخش کربناته به دلیل تنوع زیاد منافذ دارای نوسانات زیادی است (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰- متر بر ثانیه) ولی در بخش آواری از نوسانات آن به دلیل کاهش تنوع منافذ کاسته می‌شود (۴۰۰ تا ۴۰۰- متر بر ثانیه، شکل ۳).

### شناسایی انواع منافذ در میدان CK

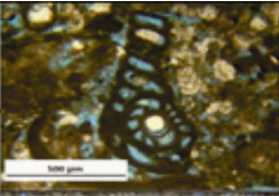
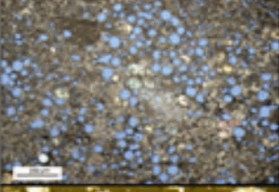
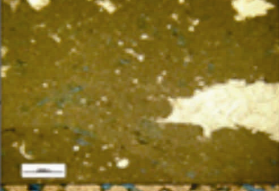
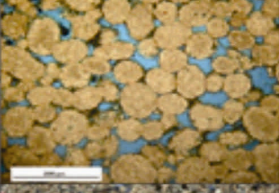



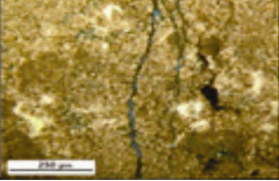
با توجه به مختلط بودن سازند آسماری در میدان مورد مطالعه و تنوع در نوع منافذ، نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیک سنگ اساس رده‌بندی نوع منافذ در این پژوهش قرار گرفته است. هم‌چنین این نگار قادر خواهد بود به طور پیوسته نوع منافذ را در امتداد چاه و سازند هدف شناسایی کند. بر اساس نگار انحراف سرعت انواع منافذ در ۳ رده و ۸ زیررده رده‌بندی شدند. در هر یک از زیررده‌ها مقدار میانگین تخلخل و تراوایی از داده مغزه و نگار نیز محاسبه شده است (شکل ۵).

**رده I:** این رده دارای دو زیررده درون ذره‌ای یا درون فسیلی و قالبی یا حفره‌ای است. زیررده *I* منافذ درون ذره‌ای عمدتاً به صورت اولیه و ثانویه، درون‌دانه یا درون فسیل (اسکلت کربناته) در اثر انحلال مواد ارگانیکی ایجاد می‌شوند [مقایسه با ۳۳]. اکثر منافذ درون فسیلی در اثر انحلال درون فسیل ایجاد می‌شوند که توسط دیواره اولیه خود محدود شده‌اند. در این زیررده مقدار انحراف سرعت از ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ و میانگین ۱۲۰۰ متر بر ثانیه، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۷ درصد و ۰/۳ میلی‌داری می‌باشد. زیررده *II* منافذ قالبی یا حفره‌ای نیز در شکل و اندازه‌های متفاوتی به صورت انحلال در بخشی از دانه، سیمان و زمینه ایجاد شده که به صورت ثانویه تشکیل می‌شوند. هم‌چنین ممکن است این نوع منافذ در اثر بلوری شدن کامل یا بخشی دانه‌ها یا بلورها به صورت ثانویه تشکیل شوند که دارای یک مرز مشخص بین منفذ و سیمان یا خمیره اطراف می‌باشد [مقایسه با



۴۰۰- تا ۱۰۰ با میانگین ۱۰۰- متر بر ثانیه، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۹ درصد و ۰ میلی‌داری می‌باشد.

تخلخل و تراوایی به ترتیب ۲۲ درصد و ۱۶۸۹ میلی‌داری می‌باشد. زیررده V: تخلخل میکروسکوپی شیل در رخساره شیلی با شعاع منفذی حدود ۰/۵ تا ۵ میکرومتر دیده می‌شود. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از

Class I	Subclass I Intraparticle	Velocity Deviation 750 , 1500 m/s Avg. 1200 m/s	Avg. Porosity 7% Avg. Permeability 0.3 mD	
	Subclass II Moldic or Vug	Velocity Deviation 600 , 1400 m/s Avg. 750 m/s	Avg. Porosity 15% Avg. Permeability 0.9 mD	
Class II	Subclass I Microporosity	Velocity Deviation -400 , 400 m/s Avg. 40 m/s	Avg. Porosity 9% Avg. Permeability 0.027 mD	
	Subclass II Interparticle	Velocity Deviation -200 , 450 m/s Avg. 250 m/s	Avg. Porosity 18% Avg. Permeability 532 mD	
	Subclass III Intercrystalline	Velocity Deviation -50 , 500 m/s Avg. 400 m/s	Avg. Porosity 12.7% Avg. Permeability 320 mD	
	Subclass IV Intergranular	Velocity Deviation 100 , 400 m/s Avg. 200 m/s	Avg. Porosity 22% Avg. Permeability 1689 mD	
	Subclass V Shale Microporosity	Velocity Deviation -400 , 100 m/s Avg. -100 m/s	Avg. Porosity 9% Avg. Permeability 0 mD	
Class III	Subclass I Fracture	Velocity Deviation -500 , -1000 m/s Avg. -800 m/s	Avg. Porosity 4% Avg. Permeability 289 mD	

شکل ۵. رده‌بندی انواع منافذ در سازند مختلط کربناته-آواری آسماری به ۳ رده و ۸ زیررده؛ ۶ زیررده مربوط به بخش کربناته و ۲ زیررده مربوط به بخش آواری می‌باشد. اساس این رده‌بندی نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیک سنگ است که مقدار میانگین تخلخل و تراوایی نیز در هریک از زیررده‌ها مشخص شده است.

مشاهده شد. از نظر اندازه منافذی که در رخساره گرین‌استون آبییدی قرار داشتند جزء مزو تخلخل (۵۰ تا ۱۰۰ میکرومتر) محسوب می‌شوند و منافذی که در رخساره گرین‌استون بایوکلاستی قرار داشتند اندازه آن‌ها در حد تخلخل میکروسکوپی (۱۰ تا ۵۰ میکرومتر) بودند؛ زیررده III در اثر فرایند دولومیتی شدن غالباً در مادستون‌های لاگون و محیط جزر و مدی دیده می‌شوند. از نظر اندازه بیش‌تر منافذ این زیررده در حد تخلخل میکروسکوپی (۱۰ تا ۲۰ میکرومتر) می‌باشند و در مواردی هم جزء اندازه مزو تخلخل (۲۰ تا ۶۰ میکرومتر) قرار می‌گرفتند؛ زیررده IV در بخش آواری سازند آسماری و در رخساره‌های ماسه‌سنگی گسترش دارند که از نظر اندازه غالباً در محدوده ۶۰ تا ۹۰ میکرومتر می‌باشند؛ زیررده V منافذ ریز رخساره‌های شیلی بخش آواری سازند آسماری است که با توجه به محدودیت داده در این رخساره فقط موقعیت آن درون ستون چینه‌شناسی مشخص شده است؛ مطالعه منافذ نوع شکستگی در رده III نیز برای مطالعه با استفاده از برش نازک با محدودیت مواجه بوده است که برای حل این مشکل در شناسایی شکستگی‌ها از نگار تصویری UBI<sup>۱</sup> استفاده شد. بر خلاف تصور فراوانی منافذ نوع شکستگی در این مطالعه پایین بوده است و در حدود ۱/۳ درصد از کل منافذ را شامل می‌شود.

نتایج بخش پتروگرافی منجر به تعیین دقیق انواع منافذ در رخساره‌های مختلف شد. از آنجایی که تنها در واحدهای محدودی از سازند مغزه‌گیری انجام می‌شود و در یک میدان نیز تعداد اندکی چاه دارای داده مغزه است. از این رو در این مطالعه برای تعیین انواع منافذ به‌صورت پیوسته در امتداد چاه از نگار VDL استفاده شده است. نگار VDL برای هر نوع منافذ دارای یک محدوده انحراف سرعت است (شکل ۵). مقادیر این محدوده‌ها (انحراف‌ها) نیز توسط برش نازک میکروسکوپی تنظیم شده است، یعنی واحدهایی که مثلاً دارای منافذ نوع بین‌بلوری بوده‌اند ابتدا از روی برش نازک شناسایی شدند و در همان واحدها از روی نگار VDL، مقدار محدوده انحراف را برای آن زیررده تعیین شدند. برای مثال مشاهده شد که در منافذ نوع بین‌بلوری نگار VDL بین ۵۰ تا ۵۰۰ متر بر ثانیه نوسان می‌کند، بنابراین در سایر قسمت‌های

**رده III:** این رده تنها دارای یک زیررده (شکستگی) می‌باشد. زیررده I شکستگی درون سنگ به‌شدت رفتار الاستیک سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد و یک انحراف شدید (منفی) در نگار انحراف سرعت ایجاد می‌کند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۵۰۰- تا ۱۰۰۰- با میانگین ۸۰۰- متر بر ثانیه و متوسط تخلخل و تراوایی به‌ترتیب ۴ درصد و ۲۸۹ میلی‌داری می‌باشد.

در این بخش انواع منافذ و مشخصات مخزنی وابسته به آن (تخلخل و تراوایی) در ۸ زیررده به صورت پیوسته در امتداد چاه شناسایی شدند. پس از رده‌بندی منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت، هر یک از انواع منافذ به دست آمده جهت اعتبار سنجی و تطابق با برش نازک رنگ‌آمیزی شده نیز مقایسه شدند.

برش‌های نازک به‌طور کیفی و بر اساس رده‌بندی دانام [۲۱]، چوکت و پری [۱۹] و لوسیا [۲۹] مورد مطالعه قرار گرفتند. در هر نمونه انواع منافذ موجود را بر اساس همان ۸ زیررده که در بالا توصیف شد تقسیم‌بندی شدند. البته در هر برش نازک امکان داشت چند زیررده وجود داشته باشد ولی در نهایت فراوانی منفذی که بیش‌تر بود انتخاب شدند. در پایان فواصلی از چاه که داده مغزه موجود بود بر اساس آنالیز دو بعدی برش نازک میکروسکوپی برای هر عمقی یک زیررده از انواع منافذ انتخاب شد (برای هر عمق یک کد منفذی اختصاص داده شد). نتایج حاصل از پتروگرافی نشان داد که بیش‌ترین فراوانی منافذ رده I که غالباً از نظر زایشی دیاژنزی هستند در رخساره پکستون بایوکلاستی لاگون قرار دارد. این نوع منافذ در اثر نفوذ سیالات جوی و انحلال و سیمانی شدن در قطعات و اجزا فسیلی ناپایدار (معمولاً آراگونیتی) تشکیل شده‌اند که غالباً در زیر مرز سکانشی قرار دارند و عامل اصلی آن‌ها نیز رخنمون تحت هوای آزاد کوتاه مدت می‌باشد. در مجموع فرایند انحلال و سیمانی شدن موجب می‌شود تا نگار VDL انحراف مثبت نشان دهد که خود شاخصی در تشخیص مرز سکانشی می‌باشد. در رده II توزیع انواع منافذ بر اساس مطالعه برش‌های نازک به این ترتیب می‌باشد: بیش‌ترین فراوانی منافذ زیررده I در رخساره مادستونی و وکستونی همراه با فرامینی‌فر پلاژیک در محیط عمیق دریای باز است؛ زیررده II در رخساره آبیید گرین‌استون و بایوکلاستیک-فاورینا / آبیید گرین‌استون مربوط به زیر محیط سدی

<sup>1</sup>Ultra sonic Borehole Imager Log

پس از آنکه انواع منافذ شناسایی شدند، فشار مویینه که یکی از مهم‌ترین فاکتورهای منفذی و کنترل‌کننده کیفیت مخزنی است مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی فشار مویینه نیز کاملاً وابسته به شعاع منفذی می‌باشد. هدف از آزمایش‌های فشار مویینه تعیین پارامترهای کنترل‌کننده‌ی جریان سیال در شبکه‌ی متخلخل است. این پارامترها، اندازه گلوگاه و نحوه ارتباط آن‌ها را نشان می‌دهند. نیروی فشار مویینه به شدت کنترل‌کننده توزیع سیال در مخزن به هنگام برداشت اولیه و یا ثانویه است. توزیع چندگانه سیالات در سیستم منفذی سنگ مخزن تابعی از فشارهای مویینه هستند، که مرتبط با ترشوندگی سیستم، چگالی سیال و هندسه منافذ می‌باشد. در ابتدا داده‌های فشار مویینه به منظور تعیین رابطه بین تخلخل، تراوایی و پراکندگی اندازه گلوگاه‌ها مورد توجه زمین‌شناسان و مهندسان مخزن بود. البته از داده‌های فشار مویینه در تعیین پوش‌سنگ نیز استفاده می‌کردند [۱۴ و ۳۸]. اما امروزه برای محاسبه نفت درجا، سرشت نمایی دقیق مخازن ناهمگن، تخمین تولید اولیه، ارزیابی روش‌های برداشت ثانویه، تعریف زون گذر توزیع سیال، تعیین آب اشباع‌شدگی و آب اشباع‌شدگی کاهش نیافتنی و در نهایت به‌دست آوردن شعاع گلوگاهی منافذ کاربرد دارد.

در این مطالعه فشار مویینه و اندازه منافذ از آنالیز تزریق جیوه به‌دست آمده است. شکل منحنی‌های تزریق جیوه اطلاعات ارزشمندی در مورد تفسیر هندسه و اندازه منافذ سنگ ارایه می‌دهد. اگر منحنی به‌صورت یک خط افقی یا شیب کم در فشارهای پایین باشد نشان‌دهنده جورشدگی خوب و کیفیت مخزنی بالا در شبکه منفذی می‌باشد. هم‌چنین اگر منحنی‌هایی که خط افقی میانی در آن‌ها وجود ندارد و شیب بیش‌تر از ۴۵ درجه دارند، نشان دهنده‌ی جورشدگی ضعیف یک شبکه منفذی و گلوگاه‌ها هستند. به دلیل پیچیده بودن و ارتباط ضعیف منافذ برای ورود جیوه فشار بیش‌تری در این نمونه‌ها نیاز است که این شرایط موجب افزایش گرادیان منحنی‌های تزریق جیوه می‌شود. با استفاده از نمودارهای فشار تزریق جیوه هم‌چنین می‌توان اندازه منافذ را به‌دست آورد.

فشار مویینه در واقع اثر متقابل نیروهای عمل‌کننده در درون و بین مایع و سطح فاز جامد می‌باشد. هم‌چنین مقاومت فشار مویینه در واقع تلاش سیال فاز غیر

توالی اگر نگار VDL این مقدار انحراف را نشان داد پس بیان‌کننده منافذ نوع بین‌بلوری بوده است. پژوهشگران دیگری تعیین انواع منافذ با استفاده از نگار VDL را به صورت مطالعه موردی انجام داده‌اند [برای مثال ۹] اما مطالعه آن‌ها صرفاً در سنگ‌های کربناته بوده است. اضافه بر این، بازه‌ای که برای مقدار انحراف هر نوع منفذ ارایه داده‌اند گسترده است که دارای هم‌پوشانی زیادی است. اما در این پژوهش مقادیر انحراف نگار VDL هم در بخش کربناته و هم در بخش آواری برای انواع منافذ ارایه شده است. از طرفی در این مطالعه محدوده مقادیر انحراف برای هر زیررده کوچک‌تر شده و نیز از نگارهای دیگری مانند نوترون و PEF برای برطرف کردن مشکل هم‌پوشانی استفاده شده است. شکل ۵ نیز مقادیر انحراف برای هر زیررده منفذی را نشان می‌دهد. البته در سه زیررده تخلخل میکروسکوپی، بین‌ذره‌ای و بین‌بلوری در مقادیر انحراف نگار VDL هم‌پوشانی وجود دارد. برای برطرف کردن این مشکل از دیگر نگارها کمک گرفته شده است. در گام اول باید نوع لیتولوژی را توسط نگار مشخص شود تا منافذ بین‌بلوری را از ریز تخلخل و بین‌ذره‌ای تفکیک شوند. نگاری که می‌تواند نوع لیتولوژی آهک را از دولومیت تفکیک کند را نگار فاکتور جذب فتوالکتریک یا  $PEF^2$  گویند. با قراردادن این نگار در کنار نگار VDL منافذ بین‌بلوری را از منافذ بین‌ذره‌ای و ریز تخلخل جدا کردیم. در گام دوم برای تفکیک کردن منافذ بین‌ذره‌ای از منافذ ریز تخلخل از نگار تخلخل نوترون و اشعه گاما استفاده شده است. با قرار دادن نگار تخلخل نوترون و اشعه گاما در کنار VDL در هر عمقی که تخلخل به‌شدت کم می‌شد و اشعه گاما افزایش پیدا می‌کرد نشان‌دهنده ریز تخلخل مادستون بود و قابل تفکیک از تخلخل بین‌دانه‌ای تفکیک بود. در واقع در این مطالعه ابتدا نگار VDL را در فواصلی از چاه که برش نازک میکروسکوپی موجود بود در ۸ زیررده تطابق داده و محدوده مقدار انحراف مربوط به هر زیررده را مشخص شدند (شکل ۵). در ادامه با استفاده از نگار VDL و محدوده‌هایی که برای هر زیررده تعیین شد، به‌صورت پیوسته در امتداد چاه انواع منافذ شناسایی شدند (شکل ۳).

<sup>2</sup> Photoelectric factor

نوع منافذ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در محیط‌های متخلخل، تراوایی سنگ به شدت تحت کنترل آرایش و نوع منافذ سنگ است، بنابراین توزیع منافذ کنترل‌کننده رفتار هیدرولیکی سنگ است. واحد جریانی شامل حجمی از مخزن است که دارای منافذی با هندسه یا گلوگاه‌های مشابه است [۴ و ۷]. در این مطالعه واحدهای جریانی بر اساس روش شاخص زون جریان تعیین شده‌اند [مقایسه با ۴، ۲۲، ۴۱ و ۴۲]. هم‌چنین در این مطالعه پس از محاسبه واحدهای جریانی تعداد و تقسیم‌بندی آن‌ها بر اساس توزیع نوع منافذ می‌باشد.

مجزا کردن واحدهای مخزنی مانند لایه‌ها یا بلوک‌ها و تعیین یک سری از پارامترهای فیزیکی ثابت در این واحدها موجب درک صحیح‌تری از ناهمگونی مخزن می‌شود. مفهوم واحد جریانی [۷] در واقع بر اساس ویژگی‌های پتروفیزیکی، مخزن به واحدهایی تقسیم می‌شود که هرکدام دارای یک مقدار معین از شاخص زون جریان است [۶]. واحد جریانی در تعریف بیان‌کننده حجم قابل نقشه‌برداری از مخزن است که دارای مشخصات منفذی مشابه و دارای ویژگی پتروفیزیکی و زمین‌شناسی مختص به خود است. کازنی [۲۶] و کارمن [۱۷] یک فضای متخلخل با مجموعه‌ای از مجراهای مویین که از قانون دارسی<sup>۳</sup> برای فضای متخلخل و قانون پویسلز<sup>۴</sup> برای مجراهای مویین استفاده می‌شد، را برای تعیین رابطه تخلخل، تراوایی و فاکتور پیچاپیچی نیز در نظر گرفته‌اند چون در واقعیت ارتباط منافذ به صورت یک لوله مویین مستقیم نیست. بنابراین:

$$K = \frac{\phi_e \tau}{8\tau^2} = \frac{\phi_e}{2\tau^2} * \left(\frac{\tau}{2}\right) = \left(\frac{\phi_e \tau m h^2}{2\tau^2}\right) \quad (4)$$

در این رابطه  $K$  تراوایی،  $\phi_e$  تخلخل موثر،  $\tau^2$  فاکتور پیچاپیچی و  $\tau m h$  شعاع هیدرولیکی میانگین. میانگین شعاع هیدرولیکی در رابطه با مساحت سطح در واحد حجم دانه و تخلخل موثر طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$S_{gv} = \frac{1}{\tau m h} \left( \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \right) \quad (5)$$

در رابطه ۵  $S_{gv}$  مساحت سطح در واحد حجم دانه است. با ترکیب رابطه ۴ و ۵ رابطه کازنی-کارمن به دست

$$K = \left( \frac{\phi_e^3}{(1 - \phi_e)^2} \right) \frac{1}{F_s \tau^2 S_{gv}} \quad \text{می‌آید: (۶)}$$

ترکننده برای ورود به منافذ می‌باشد که بستگی به فاز ترکننده، کشش سطحی بین سیال و شعاع منفذی دارد که توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma$  کشش سطحی،  $\theta$  زاویه ثابت بین سیال و دیواره منفذ،  $P_c$  فشار مویینه و  $r$  شعاع منفذی می‌باشد.  $\theta = 140^\circ$  درجه،  $\sigma = 480$  دین بر سانتی‌متر می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است منافذ نوع ریز تخلخل دارای بالاترین فشار مویینه و کم‌ترین کیفیت مخزنی است؛ منافذ نوع درون‌ذره‌ای و قالبی دارای فشار مویینه متوسط تا بالاست و کیفیت مخزنی پایین، جز در بعضی موارد در اثر ایجاد شکستگی در میان منافذ انحلالی کیفیت مخزنی کمی افزایش می‌یابد؛ منافذ نوع بین‌ذره‌ای و بین‌بلوری که اکثراً از نوع مزو تخلخل‌اند دارای کیفیت مخزنی بالایی هستند. در بخش آواری نیز بیش‌تر ماسه‌سنگ‌ها جور شده و دارای فشار مویینه پایین و کیفیت مخزنی بالایی هستند.

با استفاده از رابطه ۳ شعاع منفذی برابر:  $r = \frac{107}{P_c}$  خواهد بود. بر طبق این روابط شعاع منافذ در هر یک از زیررده‌ها تعیین شدند (شکل ۶). منافذ نوع درون‌ذره‌ای (درون فسیلی) بین ۰/۱ تا ۳۰ میکرومتر، منافذ نوع قالبی بین ۰/۲ تا ۶۰ میکرومتر، منافذ نوع تخلخل میکروسکوپی بین ۰/۳۵ تا ۴/۹ میکرومتر، منافذ نوع بین‌ذره‌ای در حدود ۱ تا ۸۰ میکرومتر، منافذ بین‌بلوری در حدود ۷ تا ۴۰ میکرومتر و منافذ بین‌دانه‌ای در حدود ۱۰ تا ۲۸۰ میکرومتر است. برای به دست آوردن اندازه شعاع منافذ در زیررده شکستگی از نگار تصویری استفاده شده است که مقدار ۵ تا ۵/۵ میکرومتر را نشان می‌دهد.

### تاثیر نوع منافذ بر کیفیت مخزنی

بسیاری از زمین‌شناسان و مهندسان نفت مطالعات بسیاری بر روی نوع منافذ انجام داده‌اند [۴۶ و ۱۶]. تعیین نوع منافذ به شدت بر روی کیفیت مخزنی و نیز خواص پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی تاثیر گذار است [۱۰، ۲۷، ۱۱، ۱۵، ۳۲، ۴۶، ۴۰، ۵۰ و ۴۱]. بنابراین درک توزیع منافذ یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در توصیف مخزن و استخراج است. به منظور تعیین تاثیر نوع منافذ بر روی کیفیت مخزنی، توزیع واحدهای جریانی بر اساس

<sup>۱</sup> Darcy's law  
<sup>۲</sup> Poiseuille's law

این اساس سه واحد جریانی در بخش کربناته و دو واحد جریانی در بخش آواری قابل شناسایی است (شکل ۷). هم‌چنین با رسم تراوایی در مقابل تخلخل با استفاده از روش شاخص زون جریان سه واحد جریانی در بخش کربناته و دو واحد جریانی در بخش آواری قابل شناسایی است (شکل ۸). نتایج حاصل از این بخش نشان می‌دهد واحد جریانی ۱ (HFU1) با مقادیر شاخص زون جریان بین ۷/۵ تا ۱۲/۵ و واحد جریانی ۲ (HFU2) با مقادیر شاخص زون جریان بین ۴/۵ تا ۷/۵ در رخساره‌های آواری تحت کنترل منافذ نوع بین دانه‌ای بوده و هر دو واحد جریانی دارای کیفیت مخزنی و تولید بالایی هستند. این دو واحد جریانی در بخش آواری در رخساره‌های ماسه‌سنگی گسترش دارند. در رخساره‌های کربناته واحد جریانی ۱ (HFU1) با مقادیر شاخص زون جریان بین ۲۵ تا ۲۷/۵ که تحت کنترل منافذ نوع شکستگی است، واحد جریانی ۲ (HFU2) با مقادیر شاخص زون جریان بین ۲/۲ تا ۱۲ که غالباً تحت کنترل منافذ نوع بین‌ذره‌ای و بین‌بلوری است و واحد جریانی ۳ (HFU3) با مقادیر بین ۰/۰۵ تا ۸ که معمولاً تحت کنترل منافذ نوع درون ذره‌ای، قالبی و تخلخل میکروسکوپی می‌باشند. در رخساره‌های کربناته کیفیت مخزنی در واحد جریانی ۱ بالا و در واحد جریانی ۲ متوسط تا بالا بوده ولی واحد جریانی ۳ فاقد کیفیت مخزنی است. همانطور که گفته شد نوع منافذ، نحوه ارتباط آن‌ها و شعاع گلوگاهی کنترل‌کننده حرکت یا به دام افتادن سیال در مخزن است. در این مطالعه انواع منافذ (۸ زیررده) ابتدا توسط برش نازک میکروسکوپی در واحدهای مغزه‌گیری شده تعیین شدند. این منافذ در عمق‌های معادل با مقادیر انحرافات نگار VDL مقایسه شد تا محدوده‌ها و مقادیر انحراف در نگار VDL به صورت دقیق‌تری در هر زیررده تعیین شوند. از آنجایی که فشار مویینه و شعاع منفذی از مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده حرکت سیال در منافذ است در هر زیررده نیز مقادیر آن‌ها مشخص شده است. اما داده مغزه در سرتاسر توالی موجود نمی‌باشد در نتیجه نمی‌توان فشار مویینه و شعاع منافذ را به صورت پیوسته به دست آورد. از این رو در این مطالعه فشار مویینه و اندازه منافذ در هر زیررده منفذی نگار VDL تعیین شده است. به عبارتی فشار مویینه و مقادیر شعاع منفذی را با استفاده از رده‌بندی

در این رابطه واحد K میکرومتر مربع،  $\emptyset_e$  کسر تخلخل مفید، F مقاومت سازند.  $F_s \tau^2$  ثابت کازنی نامیده می‌شود و معمولاً در سنگ مخزن بین ۵ تا ۱۰۰ می‌باشد. مولفه  $F_s \tau^2 S_{gv}^2$  یک شاخص از مشخصات زمین‌شناسی در فضای متخلخل است که در انواع منافذ متفاوت می‌باشد. آمی فیل [۷] با تقسیم کردن رابطه ۶ بر تخلخل موثر آنرا تصحیح کرد:

$$0.0314 \sqrt{K/\emptyset_e} = \left( \frac{\emptyset_e}{(1 - \emptyset_e)} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{F_s \tau} S_{gv}} \right) \quad (7)$$

در اینجا ثابت ۰/۳۱۴ شاخص تبدیل‌کننده واحد تراوایی از میکرومتر مربع به میلی‌داری می‌باشد. شاخص زون جریان طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$FZI = \left( \frac{1}{\sqrt{F_s \tau} S_{gv}} \right) \quad (8)$$

شاخص کیفیت مخزنی<sup>۱</sup> طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$RQI = 0.0314 \sqrt{K/\emptyset_e} \quad (9)$$

تخلخل نرمال شده برابر است با:

$$\emptyset_z = \left( \frac{\emptyset_e}{(1 - \emptyset_e)} \right) \quad (10)$$

در این رابطه  $\emptyset_z$  تخلخل نرمال شده، در نتیجه شاخص کیفیت مخزنی برابر است با:

$$RQI = \emptyset_z * FZI \quad (11)$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین رابطه ۱۱:

$$\text{LogRQI} = \text{Log} \emptyset_z + \text{Log FZI} \quad (12)$$

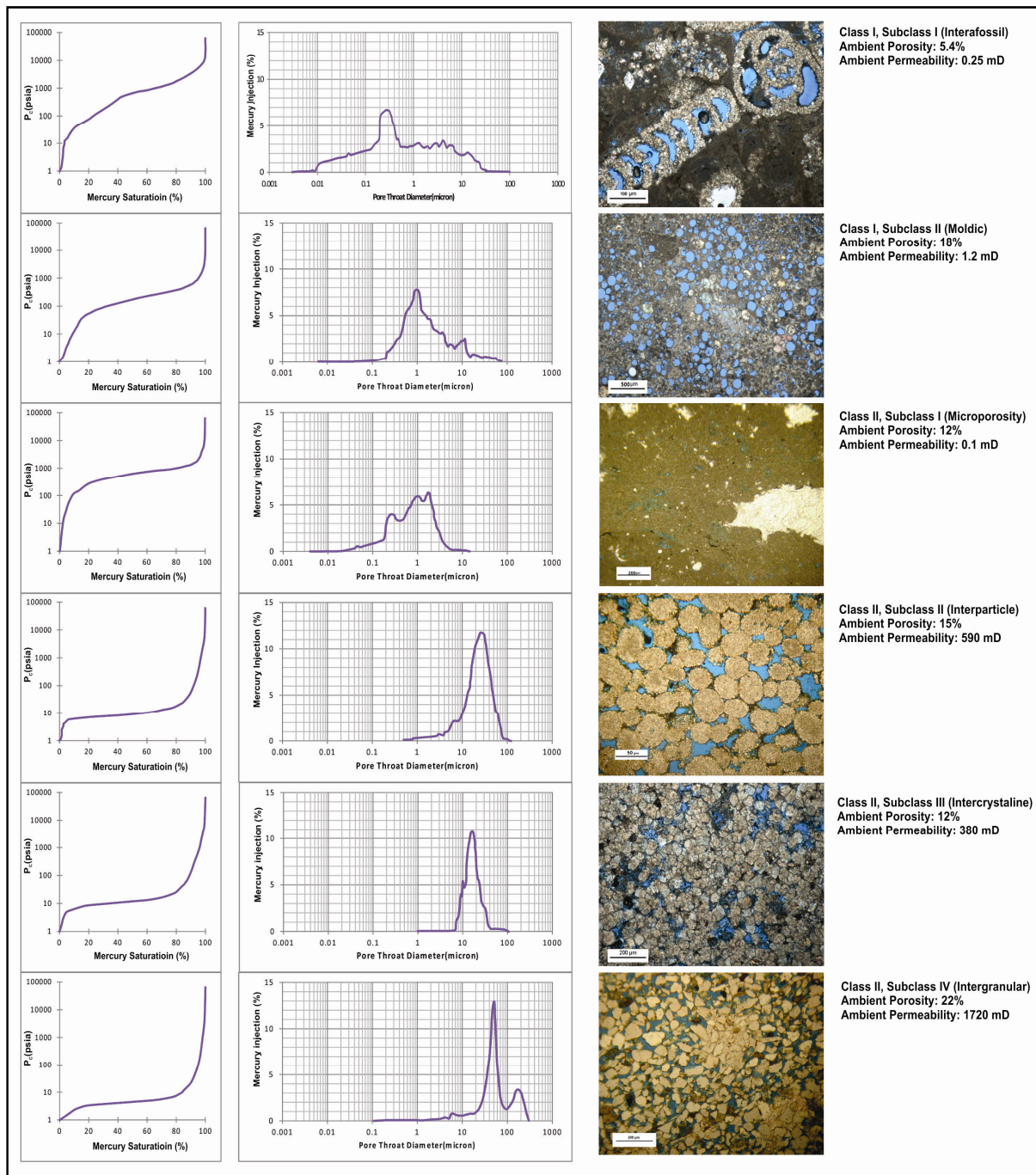
با استفاده از رابطه ۱۲ می‌توان مقادیر شاخص زون جریان را در واحدهای مخزنی محاسبه کرد.

جدول ۲ نمونه‌ای از داده‌های استفاده شده در تعیین واحد جریانی را نشان می‌دهد. در این مطالعه به دلیل وجود بخش‌های آواری و کربناته در سازند آسماری هر کدام از توالی‌های کربناته و آواری واحدهای جریانی به صورت جداگانه محاسبه شده است. پس از محاسبه شاخص زون جریان توسط روابط ذکر شده ابتدا با رسم شاخص کیفیت مخزنی در مقابل تخلخل نرمال شده داده‌ها بر اساس مقادیر یکسان شاخص زون جریان، دارای شیب یکسان بوده و داده‌هایی که از نظر مقدار شاخص زون جریان متفاوت‌اند در خطوط مشابه دیگری با شیب یکسان قرار می‌گیرند. داده‌هایی که در اطراف یک خط قرار می‌گیرند دارای ویژگی‌های منفذی مشابهی هستند که در نتیجه آن یک واحد جریانی را تشکیل می‌دهد. بر

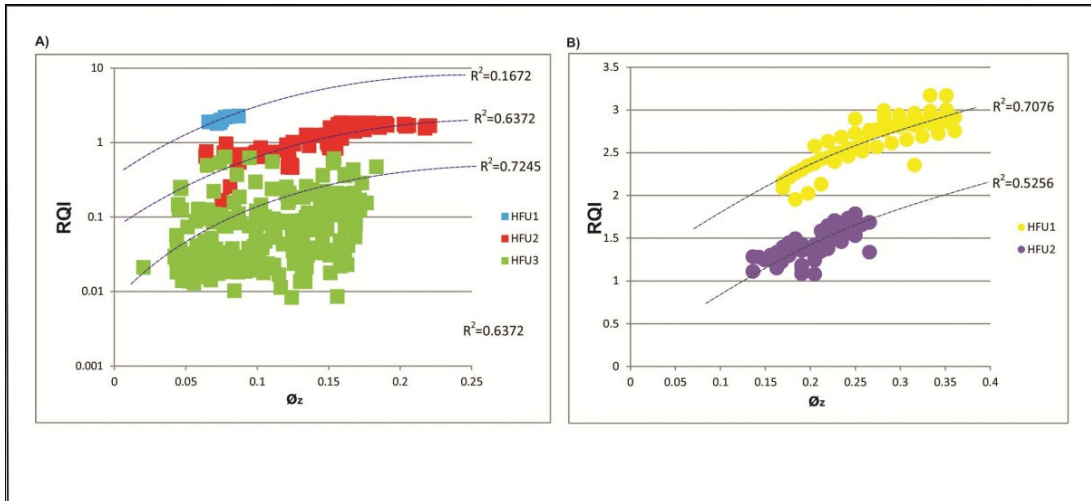
<sup>۱</sup> Reservoir quality index (RQI)

عمق توسط نگار VDL یک زیررده منفذی اختصاص داده می‌شود که در آن زیررده مقدار تخلخل، تراوایی، فشار موینه، شعاع گلوگاهی و FZI مشخص شده است (جدول ۳). بدین ترتیب به صورت پیوسته در امتداد چاه می‌توان انواع منافذ و سایر شاخص‌های کنترل کننده کیفیت مخزنی که وابسته به منافذ است را تعیین نمود.

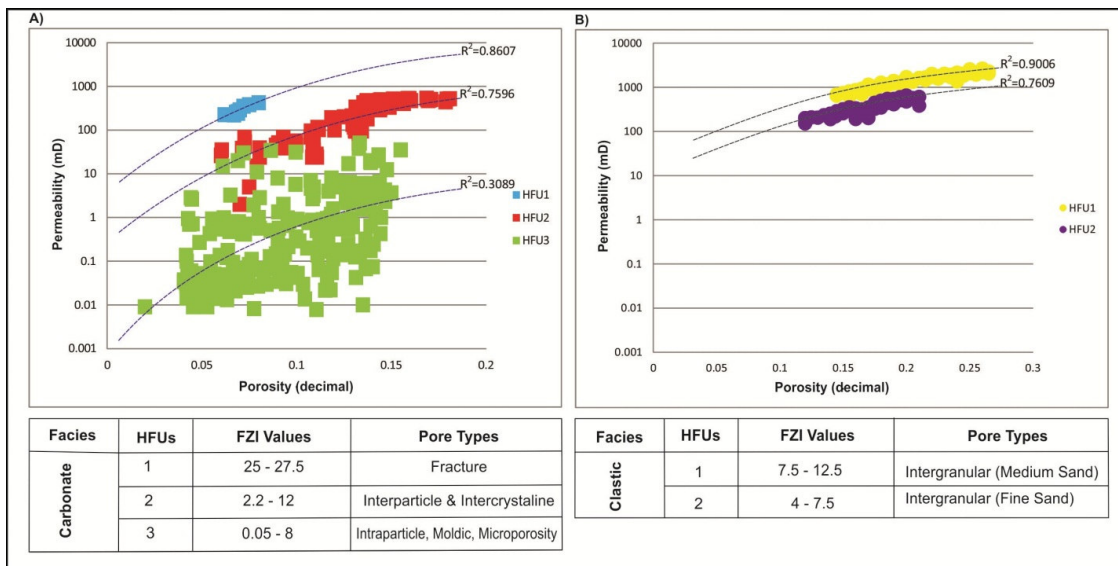
نگار VDL می‌توان در سرتاسر توالی سازند آسماری به- دست آورد. از طرفی در محیط‌های متخلخل تراوایی سنگ به شدت تحت کنترل آرایش و نوع منافذ سنگ است، بنابراین توزیع منافذ کنترل کننده رفتار هیدرولیکی سنگ است. به همین منظور پراکنش انواع منافذ درون واحدهای جریان با استفاده از روش FZI تعیین شدند. و مقادیر FZI که به نوعی بیان کننده کیفیت مخزنی است در هر زیررده نیز مشخص شده است. در پایان برای هر



شکل ۶. تعیین شعاع منفذی در ۶ زیررده با استفاده از داده‌های فشار تزریق جیوه؛ در سایر زیررده‌ها داده آنالیز مغزه موجود نبوده است. بزرگ‌ترین شعاع منفذی مربوط به زیررده بین‌دانه‌ای در رخساره ماسه‌سنگی و کوچک‌ترین شعاع منفذی مربوط به زیررده تخلخل میکروسکوپی در رخساره مادستونی می‌باشد.



شکل ۷. توزیع داده‌های شاخص کیفیت مخزنی در مقابل تخلخل نرمال شده نشان‌دهنده سه واحد جریان در بخش کربناته (A) و دو واحد جریان در بخش آواری (B) سازند آسماری می‌باشد. تعداد واحد جریان بر اساس نوع منافذ کنترل‌کننده آن‌ها می‌باشد.



شکل ۸. A) در بخش کربناته سازند آسماری سه واحد جریان (بر اساس توزیع نوع منافذ غالب در هر واحد جریان) شناسایی شدند: HFU1 با کیفیت مخزنی بالا و HFU2 دارای کیفیت مخزنی متوسط تا بالا و HFU3 دارای کیفیت مخزنی پایینی است. B) در بخش آواری دو واحد جریان با در نظر گرفتن توزیع نوع منافذ کنترل‌کننده آن‌ها شناسایی شدند؛ که هر دو واحد جریان دارای کیفیت مخزنی بالایی می‌باشند.

جدول ۲. نمونه‌ای از داده‌های استفاده شده در تعیین مقدار شاخص جریان برای هر یک از انواع منافذ با استفاده از روش شاخص زون جریان (برای جزئیات به متن مراجعه کنید).

Depth (m)	Phi (%)	K air (mD)	RQI	Ø <sub>z</sub>	Log FZI	FZI
3485.23	0.110	0.007	0.008	0.124	-1.173	0.067
3485.96	0.077	0.0082	0.010	0.084	-0.915	0.121
3486.55	0.055	0.013	0.015	0.058	-0.572	0.267
3455.46	0.134	95	0.834	0.155	0.730	5.377
3456.08	0.13	94	0.841	0.150	0.746	5.581
3456.64	0.107	69	0.795	0.120	0.820	6.609
3457.23	0.225	1556.75	2.611	0.290	0.954	8.996
3608.22	0.205	1405.255	2.599	0.257	1.003	10.081
3608.95	0.17	1145.1	2.577	0.204	1.099	12.582
3609.46	0.18	1265.4	2.632	0.219	1.078	11.993

جدول ۳. توزیع انواع منافذ و ویژگی‌های پتروفیزیکی و رخساره‌ای مربوط به آن در سازند مختلط کربناته-آواری آسماری در میدان CK

Subclass	Phi (%) Avg.	K (mD) Avg.	Pore Radius ( $\mu\text{m}$ )	FZI	Texture
Intraparticle	7	0.3	0.01-30	0.05-8	Bioclastic Packstone/Wackestone
Moldic/Vug	15	0.9	0.02-60	0.05-8	Bioclastic Packstone/Wackestone
Microporosity	9	0.027	0.035-4.9	0.05-8	Mudstone/Wackestone
Interparticle	532	18	1-100	2.2-12	Bioclastic, Faverina, Ooid Grainstone
Intercrystalline	12.7	320	4-80	2.2-12	Dolostone
Fracture	4	289	0.5-5	25-27.5	Mudstone/Wackestone
Intergranular	22	1689	5-290	4-12.5	Sandstone
Shale microporosity	9	0	<4	-	Shale

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده است انواع منافذ در بخش‌های کربناته و آواری آسماری به صورت پیوسته در امتداد چاه و سازند هدف شناسایی گردد. بر اساس نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیکی سنگ انواع منافذ در ۳ رده (انحراف مثبت، انحراف صفر و انحراف منفی) و ۸ زیررده قابل رده‌بندی شدند که شامل درون‌ذره‌ای (درون فسیلی)، قالبی یا حفره‌ای، تخلخل میکروسکوپی، بین‌ذره‌ای (در بخش کربناته)، بین‌بلوری، بین‌دانه‌ای (در بخش آواری)، تخلخل میکروسکوپی شیل و شکستگی است. در هر یک از زیررده‌های منفذی مقدار تخلخل، تراوایی، فشار موینه، شعاع گلوگاهی و واحدهای جریانی تعیین شدند. در بخش آواری سازند ۲ واحد جریانی با کیفیت مخزنی میانگین تا بالا تفکیک شد که تحت کنترل منافذ بین‌دانه‌ای قرار داشتند. همین‌طور نیز در بخش کربناته ۳ واحد جریانی بر اساس نوع منافذشان تفکیک شده است که منافذ نوع شکستگی دارای بالاترین مقادیر شاخص زون جریان است؛ منافذ بین بلوری و بین ذره‌ای دارای مقادیر متوسط شاخص زون جریان می‌باشند و منافذ نوع میکرو تخلخل، درون‌ذره‌ای و قالبی دارای کم‌ترین مقادیر شاخص زون جریان می‌باشند. بر اساس شاخص‌های منفذی بررسی شده در هر یک از زیررده‌های منافذ، نتایج نشان می‌دهد که تولید و کیفیت

بالا مخزنی در میدان CK وابسته به توزیع ۴ نوع منفذ است. این ۴ نوع منفذ شامل: منافذ بین‌ذره‌ای در رخساره گرین‌استونی، منافذ بین‌بلوری در رخساره دولستونی، منافذ شکستگی در رخساره مادستونی- وکستونی و منافذ بین‌دانه‌ای در رخساره ماسه‌سنگی است. نگار VDL قادر خواهد بود به صورت پیوسته در امتداد چاه توزیع هر یک از این ۴ زیررده منافذ را تعیین نماید.

### تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم اداره پژوهش و توسعه شرکت نفت مناطق مرکزی ایران جهت در اختیار قرار دادن داده‌ها و همکاری‌های لازم در انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی را داریم. در انجام این پروژه از امکانات آزمایشگاهی دانشکده زمین‌شناسی دانشگاه تهران استفاده شده است.

### منابع

- [۱] حسینی‌نیا، ط (۱۳۸۴) گزارش تکمیل چاه توسعه‌ای انحرافی- افقی- چاه شماره ۸ یکی از میادین جنوب غرب کشور، اداره زمین‌شناسی شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، ۳۶ صفحه.
- [۲] رحیم‌پور بناب، ح (۱۳۸۴) سنگ‌شناسی کربناته: ارتباط دیاژنز و تکامل تخلخل، انتشارات دانشگاه تهران، ۴۸۷ صفحه.



- [17] Bos, M.R.E (1982) Prolific dry oil production from sands with water saturation in excess of 50%: a study of a dual porosity system. Log Annual Symposium, v. 23, pp. 17-23.
- [18] Carmen, P.C (1937) Fluid flow through granular beds. Transactions of AICHE, v. 15, pp. 150-166.
- [19] Chehrazi, A., Rezaee, M. and Rahimpour, H (2011) Pore-facies as a tool for incorporation of small-scale dynamic information in integrated reservoir studies. Journal Of Geophysics and Engineering, v. 8, pp. 202-224.
- [20] Choquette, P. W. and Pray, L.C (1970) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. AAPG Bull., v. 54, pp. 207-250.
- [21] Clerke, A.E., Mueller III, H.W., Phillips, E.C., Eyvazzadeh, R.Y., Jones, D.H., Ramamoorthy, R. and Srivastava, A (2008) Application of thomeer hyperbolas to decode the pore systems, facies and reservoir properties of the Upper Jurassic Arab D Limestone, Ghaaware field, Saudi Arabia: A "Roseta Stone" approach. GeoArabia, v. 13, pp. 113-160.
- [22] Ebanks, W.J (1987) Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects. AAPG Meeting Abstracts, v. 1, pp. 521-522.
- [23] Eberli, G.P., Baechle, G.T., Anselmetti, F.S. and Incze, M.L (2003) Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks. The Leading Edge, v. 22, pp. 654-660.
- [24] Esrafil-Dizaji, B. and Kiani Harchegani, F (2011) The Asmari Giant Reservoirs More than one century of exploration and production. AAPG-Middle East Newsletter, Issue 4, pp. 4-6.
- [25] Jackson, P.D., Talor, S.D. and Stanford, P.N., 1978. Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands. Geophysics, v. 43, pp. 1250-68.
- [26] Kozeny, J (1927) "Uber Kapillare Letung des Wassersim Boden, Sitzungsberichte," Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I, v. 136, pp. 271-306.
- [27] Leverett, M. C (1941) Capillary behavior in porous solids. Transection of AIME., v. 142, pp. 52-69.
- [28] Lønøy, A (2006) Making sense of carbonate pore systems, AAPG Bull., v. 90, pp. 1381-405.
- [29] Lucia, F.J (1995) Rock-fabric/physical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. AAPG Bull., v. 79, pp. 1275-300.
- [30] Lucia, F.J (1999) Carbonate Reservoir Characterization. Springer Berlin, 226 pp.
- [۳] هنرمند، ج (۱۳۹۱) بررسی عوامل رسوب‌شناسی و دیاژنزی کنترل کننده خواص مخزنی در سازند آسماری میدان CK. رساله دکتری، دانشگاه تهران، ایران، ۳۰۸ صفحه.
- [4] Abbaszadeh, M., Fujii, H. and Fujimoto, F (1996) Permeability prediction by hydraulic flow unit's theory and applications. SPE Formation Evaluation, v. 11, pp. 263-271.
- [5] Ahr, W.M (2008) Geology of carbonate reservoirs. John Wiley and Sons, 296 pp.
- [6] Al-ajmi, F.A. and Holditch, S.A (2000) Permeability estimation using hydraulic flow units in a central Arabia reservoir. SPE paper no. 63254.
- [7] Amaefule, J.O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G. and Keelan, D. K (1993) Enhanced reservoir description; using core and log data to identify hydraulic flow units and predict permeability in uncored intervals/wells. SPE paper no. 26436.
- [8] Anselmetti, F.S. and Eberli, G.P (1993) Controls on sonic velocity in carbonates. Pure and Applied Geophysics, v. 141, pp. 287-323.
- [9] Anselmetti, F.S. and Eberli, G.P (1999) Velocity deviation log: a tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs. AAPG Bull., v. 83, pp. 450-466.
- [10] Archie, G.E (1942) The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Petroleum Transactions of AIME, v. 146, pp. 54-62.
- [11] Archie, G.E (1952) Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations. AAPG Bull., v. 36, pp. 278-98.
- [12] Assefa, S., Mccann, C. and Sothcott, J (2003) Velocities of compressional and shear waves in limestones. Geophysical Prospecting, v. 51, pp. 1-13.
- [13] Baechle, G.T., Colpaert, A., Eberli, G.P. and Weger, R.J (2007) Modeling velocity in carbonates using a dual porosity DEM model. 77<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- [14] Berg, R.R (1975) Capillary pressure in stratigraphic traps. AAPG Bull., v. 59, pp. 939-956.
- [15] Biot, M.A (1953) General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. Journal Of Applied Mechanics, v. 23, pp. 91-6.
- [16] Bordenave M.L. and Hegre J.A (2005) The influence of tectonics on the entrapment of oil in the Dezful Embayment, Zagros Foldbelt, Iran, Journal of Petroleum Geology, v. 28, pp. 339-368.

- Stratigraphy of the Oligo-Miocene deposits in the Dezful Embayment (Asmari and Pabdeh Formations, SW Iran)-implications for reservoir characterization, 1st International Petroleum Conference, European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 4-6 May, Shiraz, Iran.
- [44] Wang, Z., Hirsche, K.W. and Sedgwick, G (1991) Seismic velocities in carbonate rocks. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, v. 30, pp. 112-122.
- [45] Wang, H., Sun, S.Z., Hajun, Y., Hongliang, G., Youjun, X. and Hongru, H (2011) The influence of pore structure on P- & S-wave velocities in complex carbonate reservoirs with secondary storage space. *Petroleum Science*, v. 8, pp. 394-405.
- [46] Wardlaw, N.C. and Talor, R.P (1976) Mercury capillary pressure curves and the interpretation of pore structure and capillary behavior in reservoir rocks. *Canadian Petroleum Geologist, Bull.*, v. 24, pp. 225-62.
- [47] Weger, R.J., Eberli, G.P., Bachle, G.T., Massafiero, J.L. and Sun, Y.F (2009) Quantitative of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates. *AAPG Bull.*, v. 93, pp. 1297-1317.
- [48] Willkens, R., Simmons, G. and Caruso, L (1984) The ratio  $V_p/V_s$  as a discriminant of composition for siliceous limestones. *Geophysics*, v. 49, pp. 1850-60.
- [49] Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, L.W (1956) Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, v. 21, pp. 41-70.
- [50] Xu, S. and White, R.E (1995) A new velocity model for clay-sand mixtures. *Geophysical Prospecting*, v. 43, pp. 91-118.
- [31] Lucia, F.J (2007) *Carbonate Reservoir Characterization: An Integrated Approach*. New York, New York: Springer-Verlag, 336 pp.
- [32] Morgan, J.T. and Gordon, D.T (1970) Influence of pore geometry on water-oil relative permeability. *Journal of Petroleum Technology*, v. 22, pp. 1199-208.
- [33] Mousavi, M., Prodanovic, M., Jacobi, D. and Hughes, B (2013) New classification of carbonate rocks for process-based pore-scale modelling. *SPE paper no. 163073*, pp. 1-22.
- [34] Pettijohn F. J., Potter P. E. and Siever R (1987) *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, 553 pp.
- [35] Porras, J.C. and Campos, O (2001) Rock typing: A key approach for petrophysical characterization and definition of flow units, Santa Barbara field eastern Venezuela basin. *SPE*, paper no. 69458.
- [36] Rafavich, F., Kendall, C.H.St.C. and Todd, T.P (1984) The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks. *Geophysics*, v. 49, pp. 1622-1636.
- [37] Schlager, W (2005) Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy. *SEPM, Concepts in Sedimentology and Paleontology, Series v. 8*, 200 pp.
- [38] Smith. D.A (1966) Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults. *AAPG Bull.*, v. 50, pp. 363-374.
- [39] Sun, Y.F., Berteussen, K., Vega, S., Eberli, G.P., Baechle, G.T. and Weger, R.J (2006) Effects of pore structure on 4D seismic signals in carbonate reservoirs. 76<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, pp. 3260-3264.
- [40] Tao, G. and King, M.S (1993) Porosity and pore structure from acoustic well logging data. *Geophysical Prospecting*, v. 41, pp. 435-51.
- [41] Tiab, D. and Donaldson, E.C (2004) *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Amsterdam: Elsevier, 889 pp.
- [42] Uguru, C.I., Onyeagoro, U.O., Lin, J., Okkerman, J. and Sikiru, I.O (2005) Permeability prediction using genetic unit averages of Flow Zone Indicators (FZIs) and neural networks. Shell petroleum development company of Nigeria limited. *SPE*, paper no. 98828.
- [43] Vanbucchem, F.S.P., Allen, T., Lausen, G.V., Lotfpour, M., Moallemi, A., Monibi, S., Motiei, H., Pickard, N., Tahmasbi, A.R., Vedrenne, V. and Vincent, B (2010) *Sequence Stratigraphy and Sr isotope*