

تعیین انواع منافذ مخزن آسماری با استفاده از نگار انحراف سرعت و تشدید مغناطیس هسته‌ای (NMR) در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

سجاد قره‌چلو^{۱*}، علی کدخدائی^۲، عبدالحسین امینی^۱ و سپیده سهرابی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم، دانشگاه تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱/۲۶

چکیده

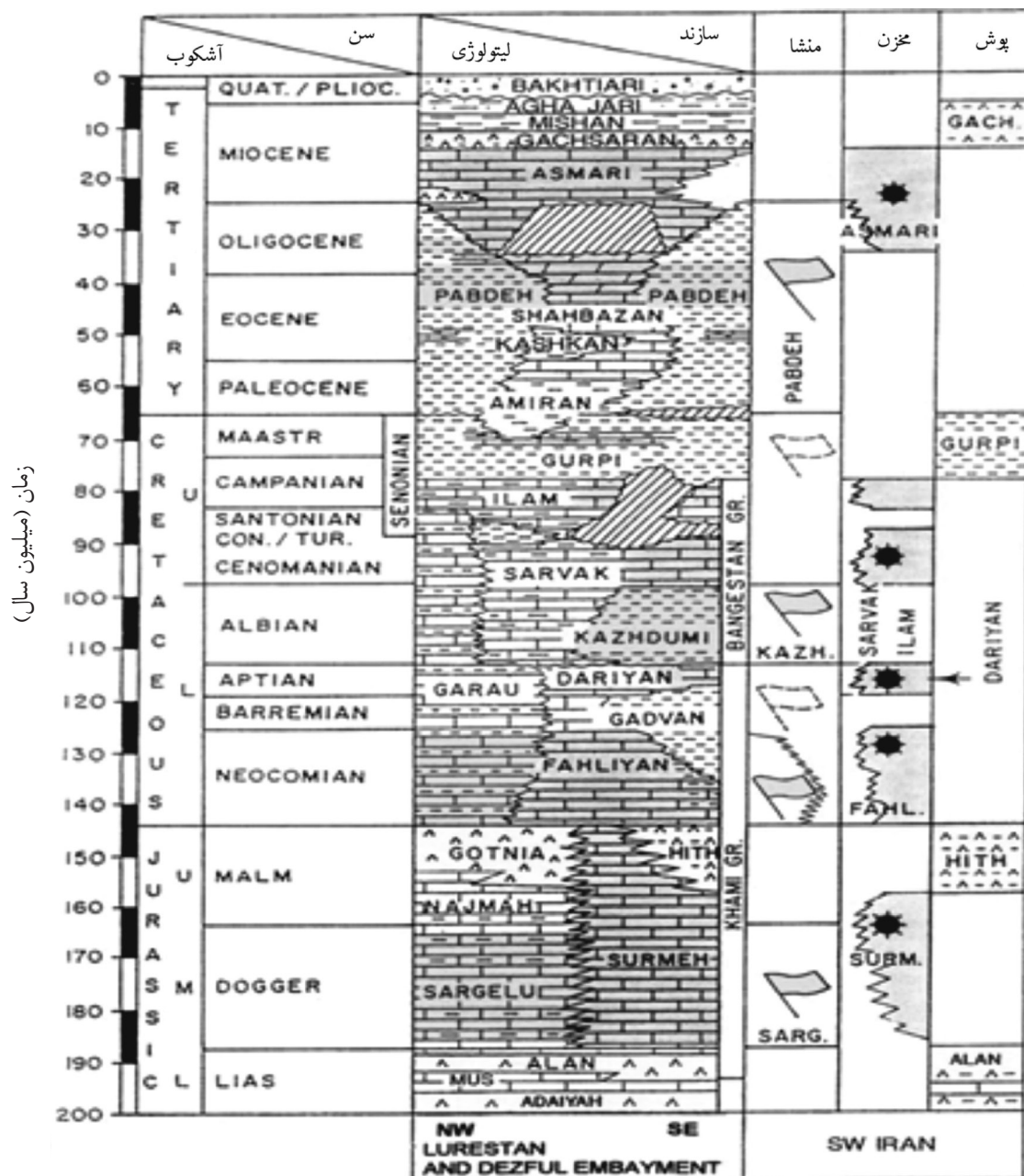
مخازن هیدروکربنی (به‌خصوص انواع کربناته) به دلیل اثر دیاژنز از نظر نوع منافذ و شعاع منفذی بسیار متنوع می‌باشند. از آنجایی که توزیع منافذ و فشار مویینه در سنگ مخزن از کنترل‌کننده‌های اصلی حرکت سیال در فضای متخلخل است، به همین دلیل تعیین نوع و اندازه منافذ و همچنین فشار مویینه نقش اساسی در خواص پتروفیزیکی، بهینه‌سازی تعداد چاه‌ها در یک میدان و پیش‌بینی هیدروکربن قابل بازیافت دارد. در این مقاله انواع منافذ در سازند مختلط کربناته-آواری آسماری با استفاده از نگار انحراف سرعت در ۳ رده (انحراف مثبت، انحراف صفر و انحراف منفی) و ۸ زیررده طبقه‌بندی شدند. ۶ زیررده مربوط به بخش کربناته (درون ذره‌ای یا درون فسیلی، قالبی یا حفره‌ای، ریزتخلخل، بین ذره‌ای، بین بلوری و شکستگی) و ۲ زیررده دیگر مربوط به بخش آواری (بین دانه‌ای و ریزتخلخل شیل) می‌باشند. پس از شناسایی انواع منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت، مقدار تخلخل، تراوایی، شعاع منفذی و فشار شبه مویینه در هر زیررده بطور پیوسته در امتداد چاه و سازند مورد مطالعه با استفاده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای تعیین شدند. به منظور اعتبارسنجی اندازه شعاع منافذ و فشار شبه مویینه از منحنی‌های فشار تزریق جیوه نیز استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، که تولید از مخزن آسماری تحت کنترل منافذ نوع بین دانه‌ای در بخش آواری و منافذ نوع شکستگی، بین ذره‌ای و بین بلوری در بخش کربناته می‌باشد. توزیع هریک از این ۴ نوع منفذ بطور پیوسته با استفاده از نگارها در امتداد چاه مشخص شده است.

کلمات کلیدی: نوع منافذ، نگار انحراف سرعت، نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای، سازند آسماری، فروافتادگی دزفول

مقدمه

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 [۱-۵]. همچنین در سازند مورد مطالعه تنوع لیتولوژیکی، رخساره‌ای و دیاژنزی موجب شده است تا توزیع منافذ و در نتیجه توزیع فشار مویینه که در حرکت سیال (تراوایی) در سنگ مخزن تاثیر گذار است در جهت جانبی و قائم بسیار متنوع باشند.

چند سازند کربناته از سن ژوراسیک تا نئوژن در جنوب غرب ایران و به‌خصوص در فروافتادگی دزفول مهمترین مخازن هیدروکربنی ایران را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). سازند آسماری نیز یکی از همین مخازن می‌باشد که حدود ۸۰٪ نفت ایران از این سازند تولید می‌شود. یکی از نکات اصلی در بررسی کمی مخازن شناسایی زون‌های تولید



شکل ۱- ستون چینه‌شناسی (سازندهای مخزنی، منشأ و سنگ پوش) از سن ژوراسیک تا نئوژن در جنوب غرب ایران و فروافتادگی دزفول پرچم‌ها نشان‌دهنده سنگ منشأهای اصلی می‌باشند [۳۹].

دارد. مخزن آسماری با ضخامت حدود ۳۲۰ m، در این میدان به علت نفوذ بخش ماسه سنگی اهواز به صورت یک مخزن هیبرید یا مخلوط ماسه سنگ و کربنات می‌باشد. بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی و تخلخل، سنگ مخزن آسماری در این میدان به ۶ زون مخزنی تقسیم می‌شود. زون‌های ۲ و ۴ از نظر قابلیت بهره‌دهی دارای بهترین شرایط مخزنی می‌باشند [۱۸] (شکل ۲ سمت چپ). زون ۲ کربناته با ۱۰ متر ماسه سنگ در قاعده و زون ۴ ماسه سنگی است.

بر اساس جدیدترین مطالعات سازند آسماری در بخش کربناته به ۵ مجموعه رخساره‌ای و ۱۲ رخساره تقسیم شده است و همین طور در بخش آواری نیز به ۵ مجموعه رخساره‌ای تقسیم شده است [۱۹]. از نظر محیط رسوبی بخش کربناته سازند آسماری یک رمپ کم شیب و بخش آواری آن به سه محیط: الف) محیط آبرفتی تا دشت ساحلی^۳، ب) دلتایی و زیر جزرومدی^۴ و ج) محیط دور از ساحل تا قسمت‌های عمیق حوضه^۵ تقسیم می‌شود [۲۰]. توصیف ۶ زون مخزنی و محیط رسوبی سازند مختلط کربناته-آواری آسماری نشان می‌دهد که از نظر سنگ‌شناسی این میدان بسیار متنوع می‌باشد. از آنجایی که تنوع در سنگ‌شناسی و دیاژنز باعث تنوع در نوع منافذ می‌شود، در نتیجه اهمیت مطالعه نوع منافذ به منظور درک صحیح‌تری از ناهمگنی مخزن در این میدان ضروری می‌باشد.

روش مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل نگارهای نوترون، صوتی، تشدید مغناطیس هسته‌ای و داده مغزه می‌باشند.

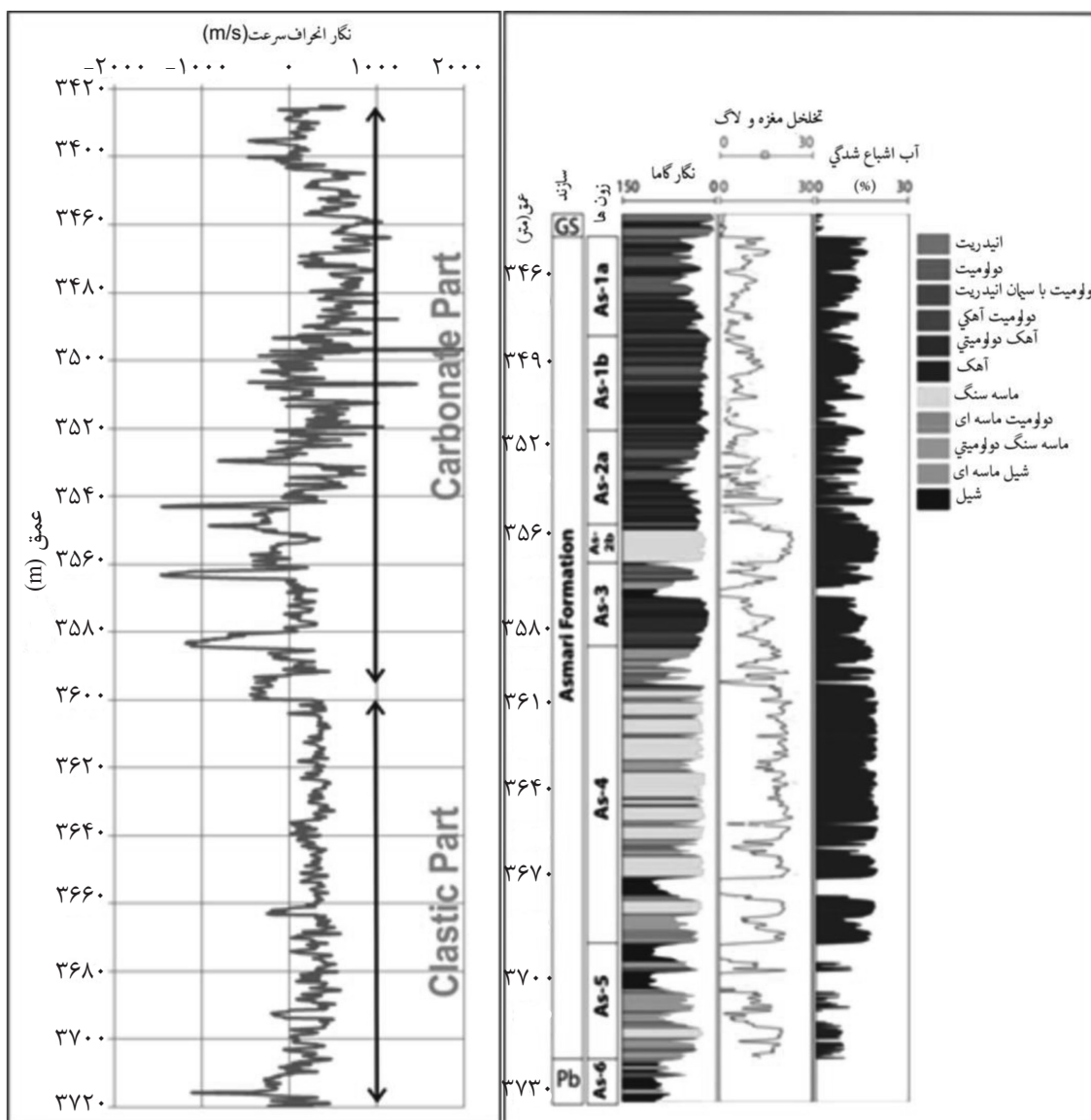
توزیع نوع و اندازه منافذ و همین‌طور فشار موئینه کنترل کننده توزیع سیال قبل از تولید در مخزن و همچنین مقدار هیدروکربن باقی مانده پس از اولین برداشت در مخزن می‌باشند. همین‌طور شناسایی و درک توزیع نوع و اندازه منافذ باعث ارزیابی صحیح در کیفیت مخزنی، پیش‌بینی اشباع شدگی سیال مخزنی، عمق سطح تماس آب و نفت، ضخامت زون تدریجی و ظرفیت ناتراوایی^۱ می‌شوند [۶]. در واقع فشار موئینه نیز تابعی از اندازه و نوع منافذ، هندسه منافذ، اشباع شدگی سیال، تاریخچه اشباع شدگی و ترشوندگی سنگ است [۶]. از طرفی تراوایی نیز در سنگ‌های رسوبی به شدت به آرایش منافذ و به تبع آن فشار موئینه بستگی دارد. هر قدر سیستم منافذ پیچیده‌تر باشد تعیین توزیع تراوایی نیز مشکل‌تر است. به‌طور کلی نوع منافذ سنگ مخزن کنترل کننده بسیاری از ویژگی‌های مخزنی است [۷-۱۳].

با توجه به محدودیت مغزه‌گیری در چاه‌ها، تعیین نوع منافذ و سایر ویژگی‌های آن معمولاً با مشکلاتی مواجه بوده است. در این مطالعه برای شناسایی نوع منافذ از نگار انحراف سرعت و همچنین برای محاسبه اندازه منافذ و فشار موئینه به‌طور پیوسته در امتداد چاه و سازند آسماری از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای^۲ استفاده شده است [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. هدف از این مطالعه تعیین انواع منافذ و سایر مشخصات مخزنی وابسته به آن مانند: مقدار تخلخل و تراوایی، اندازه منافذ و فشار شبه موئینه با استفاده از نگارها و به‌صورت پیوسته در امتداد چاه می‌باشد.

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی میدان مورد مطالعه

میدان چشمه خوش واقع در جنوب غرب ایران، ۱۸۰ کیلومتری شمال غرب شهر اهواز و در بالاترین قسمت فروافتادگی دزفول قرار دارد. سازند آسماری در میدان چشمه خوش ماهیت مختلط کربناته-آواری

1. Seal Capacity
2. Nuclear Magnetic Resonance (NMR)
3. Coastal Plain to Terrestrial/fluviat Environment
4. Distal Deltaic and Subtidal Environment
5. Offshore Marine to Basin



شکل ۲- ستون چینه شناسی و زون‌های مخزنی سازند آسماری در یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه (راست) [۱۹] و نگار انحراف سرعت (چپ) که نشان دهنده تنوع بیشتر (۶ نوع) منافذ در بخش کربناته و تنوع کمتر (۲ نوع) منافذ در بخش آواری است.

است منحنی‌های فشار تزریق جیوه می‌باشند. منحنی‌های فشار تزریق جیوه از آنالیزهای ویژه مغزه^۱ به دست می‌آیند که حاوی دقیقترین اطلاعات از شعاع منافذ سنگ مخزن است. داده‌های مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی استفاده شده مربوط به چاه شماره ۵ میدان می‌باشند. در این مطالعه برای نام‌گذاری سنگ‌های کربناته از طبقه‌بندی دانام^۲ استفاده شده است که اساس طبقه‌بندی بافت رسوبات (گل پش‌تیبان یا دانه پش‌تیبان) می‌باشد [۲۱].

داده مغزه شامل ۲۰۰ عدد مقطع نازک میکروسکوپی رنگ آمیزی شده (مخلوط رزین و رنگ آبی) می‌باشد که با میکروسکوپ نور عبوری به منظور تعیین نوع منافذ مورد مطالعه قرار گرفتند. در واقع با استفاده از مقاطع نازک میکروسکوپی رنگ آمیزی شده به‌طور دقیق می‌توان نوع منافذ را از نظر زایشی تشخیص داد. از طرفی این مقاطع نازک میکروسکوپی معیاری برای اعتبار سنجی تعیین نوع منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت است. یکی دیگر از داده‌های مغزه که برای به دست آوردن اندازه شعاع منافذ در این مطالعه استفاده شده

ثانویه^۴ نیز با جزئیات کامل توسط برخی از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۴ و ۲۷]. با ترسیم مقدار تخلخل در مقابل سرعت موج فشارشی یک روند معکوس را نشان می‌دهد، یعنی با افزایش مقدار تخلخل مقدار سرعت کاهش می‌یابد به‌طور مثال [۱۰]. رابطه میان سرعت و مقدار تخلخل توسط وایلی

$$\text{و همکاران [۲۲] مشخص شده است:} \\ \frac{1}{v_{rock}} = \frac{1-\emptyset}{v_{matrix}} + \frac{\emptyset}{v_{fluid}} \quad (۱)$$

در این رابطه \emptyset مقدار تخلخل و V مقدار سرعت (m/sec) است. این رابطه نشان می‌دهد که زمان عبور موج صوتی در سنگ حاصل جمع زمان عبور موج صوتی از فضای خالی سنگ (توسط سیال پر شده) و ماتریکس سنگ می‌باشد. با این وجود پراکندگی (انحراف) سرعت در طرفین رابطه ۱ نشان دهنده 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 [۲۳-۲۹]. بنابراین میزان پراکندگی و انحراف سرعت نشان دهنده ناهمگنی الاستیکی در اثر انواع مختلف منافذ می‌باشد که به‌عنوان یک اصل در شناسایی نوع منافذ قرار گرفت (شکل ۳). اندازه‌گیری پراکندگی سرعت در تخلخل‌های یکسان نشان می‌دهد که هر یک از انواع منافذ تاثیر ویژه‌ای بر روی خصوصیات صوتی دارند. انحراف سرعت در واقع انحراف از سرعت تخمین زده شده در رابطه ۱ در تخلخل‌های یکسان است [۲۳].

برای به‌دست آوردن نگار انحراف سرعت، ابتدا سرعت مصنوعی^۵ با استفاده از رابطه وایلی و همکاران و تخلخل نگار نوترون محاسبه شد. در ادامه سرعت مصنوعی از سرعت واقعی^۲ (سرعت موج فشارشی نگار صوتی) کم شده و در نتیجه نگار انحراف سرعت حاصل می‌گردد (رابطه ۲) [۲۳].

در این مطالعه ابتدا برای تعیین نوع منافذ از نگار انحراف سرعت استفاده شده است. نگار انحراف سرعت یک نگار مصنوعی است که از ترکیب نگارهای تخلخل (صوتی، نوترون و چگالی) و رابطه وایلی [۲۲] به‌دست می‌آید و در نهایت از اختلاف مقادیر سرعت محاسبه شده از نگار صوتی واقعی و مصنوعی حاصل می‌شود. در واقع نگار انحراف سرعت بازتابی از انواع مختلف تخلخل است که در نتیجه خصوصیات فیزیکی سنگ ایجاد می‌شود. به منظور تعیین فشار موئینه و اندازه منافذ به‌طور پیوسته در سرتاسر چاه در سازند آسماری نیز از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای استفاده شده است. این نگار نیز با ایجاد میدان مغناطیسی موجب جهت‌دار شدن هیدروژن‌ها در فضای منفذی می‌شود. جهت میدان مغناطیسی توسط سیکل‌های منظمی تغییر می‌کند که هسته هیدروژن‌ها نیز براساس آن تغییر آرایش می‌دهند. بر اساس مدت زمانی که طول می‌کشد تا آرایش هسته هیدروژن‌ها تغییر کند یکسری منحنی بر اساس زمان رسم می‌شود که مشخصات کمی منفذ را نشان می‌دهد. برای اعتبار سنجی اندازه منافذ به‌دست آمده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای، با اندازه منافذ به‌دست آمده از آزمایشات تزریق جیوه نیز مقایسه شدند. در این مطالعه ابتدا نوع، اندازه و توزیع فشار موئینه منافذ با استفاده از نگارها تعیین شدند، سپس با داده مغزه نیز اعتبار سنجی شده است.

بحث و نتایج

رابطه بین سرعت صوتی، تخلخل و نوع منافذ

با توجه به قوانین حرکت موج در درون سنگ، رابطه میان سرعت صوتی، تخلخل و منافذ سنگ اثبات است [۲۳]. سرعت عبور امواج فشارشی در سنگ وابسته به مقدار تخلخل است [۲۴-۲۶]. از طرفی نوع منافذ نیز از پارامترهای مهم کنترل‌کننده خصوصیت صوتی سنگ است [۲]. اخیراً تاثیر هندسه منافذ بر روی سرعت موج اولیه^۳ و

1. Special Core Analysis
2. Dunham Classification
3. Primary
4. Secondary
5. Synthetic Velocity

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 ۲ سمت راست).

شناسایی انواع منافذ در میدان مورد مطالعه

در این مطالعه نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیک سنگ اساس طبقه بندی نوع منافذ می‌باشد. از طرفی این نگار قادر خواهد بود به‌طور پیوسته نوع منافذ را در امتداد چاه و سازند مورد مطالعه شناسایی کند. بر اساس نگار انحراف سرعت انواع منافذ در ۳ رده و ۸ زیررده طبقه بندی شدند. در هر یک از زیررده‌ها مقدار متوسط تخلخل و تروایی از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای نیز محاسبه شده است (شکل ۴).

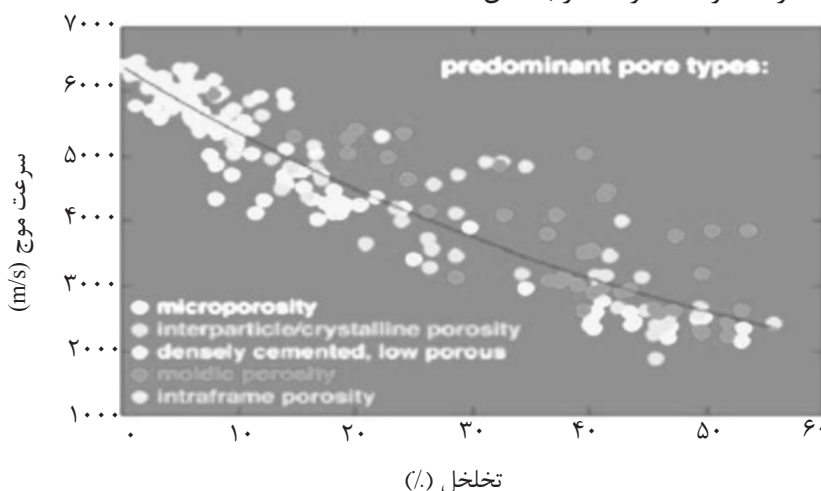
رده ۱: این رده دارای دو زیررده درون ذره‌ای یا درون فسیلی و قالبی یا حفره‌ای است. زیر رده ۱: منافذ درون ذره‌ای عمدتاً به‌صورت اولیه و ثانویه، درون دانه یا درون فسیل (اسکلت کربناته) در اثر انحلال مواد ارگانیکی ایجاد می‌شوند [مقایسه با ۳۰].

(۲) $V_{DL} = \text{Real Velocity} - 1000(\text{Synthetic Velocity})$
نوع منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت در سه رده انحراف مثبت، انحراف صفر و انحراف منفی تقسیم بندی می‌شوند.

منافذی که در رده مثبت‌اند (I) معمولاً ثانویه هستند و تحت تاثیر انحلال و سیمانی شدن قرار گرفته‌اند. این نوع منافذ بر اساس رابطه وایلی و همکاران دارای سرعت بالایی هستند ($V_{DL} > 500 \text{ m/s}$). این رده دارای ۲ زیررده درون ذره‌ای (درون فسیلی) و قالبی (حفره‌ای) است.

انواع منافذ رده صفر (II) سرعتی تقریباً معادل سرعت فرمول وایلی دارند ($500 < V_{DL} < 500 \text{ m/s}$). ۳ زیررده آن در بخش کربناته شامل منافذ نوع میکروتخلخل، بین ذره‌ای و بین بلوری است. همینطور زیررده‌های رده صفر (II) در بخش آواری شامل بین دانه‌ای و میکروتخلخل 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 منافذ نوع شکستگی می‌باشد. نگار انحراف سرعت در بخش



شکل ۳- 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 منافذ است که بر روی رفتار الاستیک سنگ اثر می‌گذارد [۴۰].

رده	زیررده درون اثره ای	انحراف سرعت ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ میانگین ۱۲۰۰ متر بر ثانیه	تخلخل و تراوایی TCMR ۷% KSDR ۰/۳ mD	شعاع گلوگاهی ۰/۱, ۱۵ μm مد ۹ μm		
	مولیک یا حفره ای	۶۰۰ تا ۱۴۰۰ میانگین ۷۵۰ متر بر ثانیه	TCMR ۱۵% KSDR ۰/۹ mD	۰/۶, ۳۰ μm مد ۹ μm		
رده	زیررده I ریز تخلخل	۴۰۰ تا ۴۰۰ میانگین ۴۰ متر بر ثانیه	TCMR ۹% KSDR ۰/۰۲۷ mD	۰/۰۵, ۱۰/۳ μm مد ۱ μm		
	زیررده II بین اثره ای	۲۰۰ تا ۴۵۰ میانگین ۲۵۰ متر بر ثانیه	TCMR ۱۸% KSDR ۵۳۲ mD	۱۰, ۱۲۰ μm مد ۳۵ μm		
	زیررده III بین بلوری	۵۰ تا ۵۰۰ میانگین ۴۰۰ متر بر ثانیه	TCMR ۱۲/۷% KSDR ۳۲۰ mD	۵, ۴۰ μm مد ۱۴ μm		
	زیررده IV بین دانه ای	۱۰۰ تا ۴۰۰ میانگین ۲۰۰ متر بر ثانیه	TCMR ۲۲% KSDR ۱۶۸۹ mD	۲۰, ۱۶۰ μm مد ۷۰ μm		
	زیررده V ریز تخلخل شیل	۱۰۰ تا ۴۰۰ میانگین ۱۰۰ متر بر ثانیه	TCMR ۹% KSDR ۰ mD	۰/۰۲, ۴ μm مد ۲ μm		
رده	زیررده شستگی	۱۰۰ تا ۵۰۰ میانگین ۸۰۰ متر بر ثانیه	۴% ۲۸۹ mD	۰/۵, ۴ μm مد ۱ μm		

شکل ۴- طبقه‌بندی انواع منافذ به ۳ رده و ۸ زیررده بر اساس نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیکی سنگ. در هر زیررده مشخصات رفتار الاستیکی، میانگین تخلخل و تراوایی، محدوده شعاع منافذ، مقاطع نازک میکروسکوپی و میانگین توزیع T_2 نشان داده شده است. عمق نمونه‌های مقطع نازک میکروسکوپی به ترتیب از بالا شامل: ۳۴۹۱/۲۱، ۳۴۹۷/۵۱، ۳۴۸۷/۱۰، ۳۵۱۶/۲۷، ۳۵۱۳/۷۸، ۳۶۱۲/۵۴، ۳۶۷۸/۸۹، ۳۴۶۷/۲۵ m می‌باشند.

متفاوتی به‌صورت انحلال در بخشی از دانه، سیمان و ماتریکس ایجاد شده که به‌صورت ثانویه تشکیل می‌شوند. همین‌طور ممکن است این نوع منافذ در اثر بلوری شدن کامل یا بخشی دانه‌ها یا بلورها به‌صورت ثانویه تشکیل شوند که دارای یک مرز مشخص بین منفذ و سیمان یا ماتریکس اطراف می‌باشد [مقایسه با ۷]. مقدار انحراف سرعت در

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 mld و توزیع T_2 به‌صورت دو گانه می‌باشد. زیررده ۲: منافذ قالبی یا حفره‌ای نیز در شکل و اندازه‌های

تراوایی به ترتیب ۰.۲۲٪ و ۱۶۸۹ mld و توزیع T_2 به صورت دو گانه می‌باشد. زیررده ۵: میکروتخلخل شیل در رخساره شیلی با شعاع منفذی حدود ۰.۵ تا ۵ μm دیده می‌شود. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۰۰- تا ۱۰۰ با میانگین ۱۰۰ m/s-، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۰.۹٪ و ۰ mld و توزیع T_2 به صورت یگانه می‌باشد. لازم به ذکر است که گفته شود، یگانه یا دوگانه بودن توزیع T_2 نشان دهنده تک اندازه یا چند اندازه بودن شعاع منافذ می‌باشد و به نوعی جورشدگی اندازه منافذ را نشان می‌دهد.

رده ۳: این رده تنها دارای یک زیررده (شکستگی) می‌باشد. زیررده ۱: شکستگی درون سنگ به شدت 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 m/s- و متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۰.۴٪ و ۲۸۹ mld می‌باشد. در این بخش انواع منافذ و مشخصات مخزنی وابسته به آن (تخلخل و تراوایی) در ۸ زیررده به‌طور پیوسته در امتداد چاه‌شناسایی شدند. پس از طبقه‌بندی منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت، هر یک از انواع منافذ به‌دست آمده جهت اعتبارسنجی با مقاطع نازک رنگ‌آمیزی شده نیز مقایسه شدند. شکل ۴ به‌طور کلی مشخصات هر یک از زیررده‌ها را نشان می‌دهد.

اصول نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای

نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای به یک اصل فیزیکی یعنی پاسخ هسته به میدان مغناطیسی منتسب است [۳۱]. اکثر هسته‌های عناصر دارای میدان مغناطیسی می‌باشند. هسته‌ها مانند یک آهنربا چرخنده عمل می‌کنند. هسته مغناطیسی چرخنده می‌تواند با میدان مغناطیسی خارجی (تولید شده ابزار نمودارگیری) واکنش داده و تولید سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری کند. بسیاری از عناصر سیگنال‌های قابل تشخیص ضعیف تولید می‌کنند. اما عنصر هیدروژن بسیار مغناطیس‌پذیر

این زیررده از ۶۰۰ تا ۱۴۰۰ و میانگین ۷۵۰ m/s، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۵٪ و ۰.۹ mld و توزیع T_2 به صورت دو گانه می‌باشد.

رده ۲: این رده دارای پنج زیررده است که به ترتیب شامل میکروتخلخل، بین ذره‌ای، بین بلوری، بین دانه‌ای و میکرو تخلخل شیل است. میکروتخلخل شامی زیررده ۱: میکرو تخلخل شامل تخلخل‌های زیر ۱۰ μm می‌باشد [مقایسه با ۱۷]. این نوع منافذ به صورت بین دانه‌ای ریز یا بین بلوری ریز دیده می‌شوند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۰۰ تا ۴۰۰- با میانگین ۴۰ m/s، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۰.۹٪ و ۰.۲۷ mld و توزیع T_2 به صورت یگانه می‌باشد. زیررده ۲: منافذ بین ذره‌ای، تخلخلی است که فضای بین ذره‌ها را شامل می‌شود [مقایسه با ۵]. این نوع منافذ معمولاً اولیه‌اند ولی ندرتاً در اثر انحلال ماتریکس یا سیمان به صورت ثانویه هم تشکیل می‌شوند. از نظر اندازه سه نوع منفذ بین ذره‌ای دیده می‌شود که شامل میکرو تخلخل بین ۱۰ تا ۵۰ μm ، مزو تخلخل بین ۵۰ تا ۱۰۰ μm و ماکرو تخلخل که بیش از ۱۰۰ μm است [مقایسه با ۷]. در نمونه‌های مورد مطالعه منافذ بین ذره‌ای بیشتر در اندازه ۵۰ تا ۱۰۰ μm می‌باشند که جز منافذ متوسط اندازه یا مزو تخلخل قرار می‌گیرند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۵۰ تا ۲۰۰- با میانگین ۲۵۰ m/s، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۸٪ و ۵۳۲ mld و توزیع T_2 به صورت یگانه می‌باشد. زیررده ۳: منافذ بین بلوری به صورت اولیه یا ثانویه در بین بلورها تشکیل می‌شوند که نوع ثانویه آن رایج‌تر است [مقایسه با ۵]. از نظر اندازه سه نوع تخلخل بین بلوری مشاهده می‌شود که شامل میکروتخلخل (بین ۱۰ تا ۲۰ μm)، مزوتخلخل (بین ۲۰ تا ۶۰ μm) و ماکرو تخلخل (بیش از ۶۰ μm) است [مقایسه با ۷]. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۵۰ تا ۲۰۰- با میانگین ۲۵۰ m/s، متوسط تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۲/۷٪ و ۳۲۰ mld و توزیع T_2 به صورت یگانه می‌باشد. زیررده ۴: منافذ بین دانه‌ای در بخش آواری سازند آسماری مشاهده می‌شود که در بین دانه‌های ماسه سنگی به صورت اولیه تشکیل شده است. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۱۰۰ تا ۴۰۰ با میانگین ۲۰۰ m/s، متوسط تخلخل و

اکوهای اسپین رو به زوال در سری اکوی CPMG ثبت می‌شود. زمان دامنه اکو به نام زمان آرامش عرضی (T_2) خوانده می‌شود، چون خروج از فاز در صفحه عمود بر میدان مغناطیسی B_0 رخ می‌دهد. T_2 یا زمان آرامش اسپین-اسپین، زمان لازم برای تغییر جهت اسپین‌های جهت یافته به منظم شدگی تصادفی یا اولیه است [۳۳].

اسپین‌ها برای اینکه به حالت اولیه برسند باید از محیط انرژی بگیرند که تعیین کننده مقدار T_2 می‌باشد. آزمایشات نشان داده‌اند که در یک سنگ اشباع از آب مقدار T_1 $1/5$ برابر مقدار T_2 می‌باشد که با توجه به نوع سیال منفذی این نسبت متفاوت است [۳۳]. در فضای متخلخل زمان آرامش T_2 متناسب با اندازه فضاها خالی است. در واقع منحنی توزیع T_2 نشان دهنده مجموع سیگنال‌های برگشتی از تغییر جهت میدان مغناطیسی پروتون‌ها در فضای منفذی است. بنابراین توزیع T_2 بصورت گرافیکی نشانگر حجم سیال منفذی می‌باشد که به نوعی نشان‌دهنده حجم فضای خالی نیز می‌باشد.

تعیین توزیع فشار مویینه و اندازه منافذ با استفاده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای

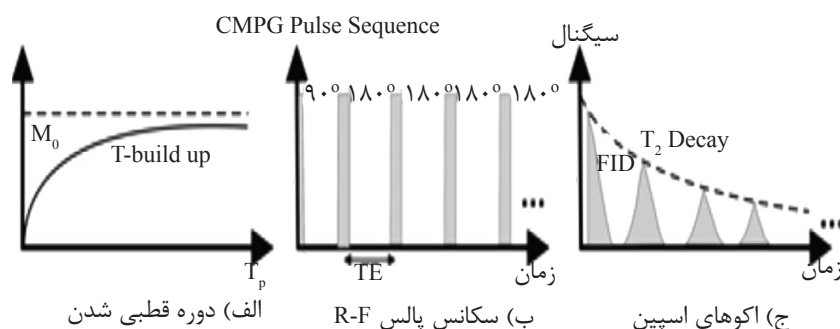
در این مطالعه به منظور تعیین اندازه منافذ و فشار شبه مویینه به‌طور پیوسته در امتداد چاه از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای استفاده شده است.

فشار مویینه در واقع اثر متقابل نیروهای بین سیالات موجود در سنگ و سطح جامد می‌باشد. دو روش برای محاسبه فشار مویینه در مخزن وجود دارد: ۱- آنالیزهای ویژه مغزه که در آزمایشگاه انجام می‌شود؛ ۲- از طریق نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای که با روابط خاص و معکوس کردن T_2 به دست می‌آید. بر خلاف داده مغزه و روش‌های آزمایشگاهی نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای ابزار مناسب برای اندازه‌گیری فشار مویینه به‌طور پیوسته در امتداد چاه می‌باشد.

است و در آب و هیدروکربن موجود در فضای خالی سنگ به فراوانی یافت می‌شود.

اصول کار نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای به دو مرحله تقسیم می‌شود [۳۲]. در مرحله اول مغناطیسی شدن سیال منفذی است. وقتی که ابزار نمودارگیری در امتداد چاه حرکت می‌کند با ایجاد یک میدان مغناطیسی، B_0 ، باعث مغناطیسی شدن هسته‌های هیدروژن در سیال منفذی می‌شود. قبل از اینکه فضای منفذی، سنگ تحت تاثیر میدان B_0 قرار بگیرد هسته‌های هیدروژن در سیال منفذی به‌صورت تصادفی قرار داشتند و فاقد مغناطیس شدگی جهت‌گیری شده بودند. در طی زمان قطبی شدن^۱ مغناطیسی شدن افزایش می‌یابد تا به مقدار M_0 می‌رسد. اگر زمان قطبی شدن کوتاه باشد مقدار تخلخل کمتر از مقدار واقعی آن محاسبه می‌شود. به مدت زمانی که طول می‌کشد تا هیدروژن‌ها در جهت میدان مغناطیسی القایی قرار گیرند زمان آرامش طولی یا همان T_1 می‌گویند [۳۲] (شکل ۵ الف). در سنگ مخزن، توزیع T_1 نشان‌دهنده ترکیبات پیچیده هیدروکربن و اندازه منافذ سنگ‌های رسوبی می‌باشد. در ادامه پس از زمان قطبی شدن به سرعت یک توالی از پالس‌های فرکانس رادیویی 90° و 180° در سازند اعمال می‌شوند. پالس‌های فرکانس رادیویی و اسپین اکو به‌طور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است. یک سکانس کامل پالس شامل یک پالس 90° است که با سری طولانی از پالس‌های 180° ادامه پیدا می‌کند. این سکانس به نام CPMG خوانده می‌شود و از نام مخترعان آن یعنی کار^۲، پرسل^۳، می بوم^۴ و جیل^۵ گرفته شده است [۳۲]. سکانس CPMG، از فاز خارج شدن ناشی از نقصان در میدان B_0 را جبران می‌کند. اما خروج از فاز توسط تغییر محور چرخش مولکولی بازگشت‌پذیر نیست. در واقع تغییر محور چرخش مولکولی به خواص پتروفیزیکی وابسته می‌باشد. از این رو خروج از فاز به صورت برگشت‌ناپذیر، به وسیله اندازه‌گیری دامنه

1. Polarization Time
2. Carr
3. Purcell
4. Meiboom
5. Gill



شکل ۵- هر اندازه گیری نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای شامل سکansı از پالس‌های مغناطیس عرضی است که به وسیله یک آنتن تولید می‌شوند که CPMG نام دارد. الف) مدت زمان قطبی شدن هسته هیدروژن‌های سیال مخزنی تحت تاثیر میدان، B_0 (ب) سکانس CPMG با یک پالس آغاز می‌شود که پروتون را 90° منحرف می‌کند و این سکانس با چند صد پالس دیگر که پروتون‌ها را دوباره متمرکز می‌کنند دنبال می‌شود. تمرکز مجدد پروتون‌ها با منحرف کردن آنها به اندازه 180° امکان پذیر است و (ج) پس از هر پالس، آنتن دامنه سیگنال را ثبت می‌کند [۳۲].

آب) تعیین کننده شدت سیگنال اندازه گیری شده توسط نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای است. رابطه‌ای بین فشار موئینه و زمان آرامش عرضی T_2 وجود دارد که عبارت است از:

$$P_c T_2 = \varepsilon \quad (4)$$

در این رابطه، ε یک پارامتر وابسته به نوع گونه سنگی و اندازه منافذ یا T_2 معادل آن است که از طریق روش‌های مختلفی می‌توان تخمین زد [۱۷].

رابطه ۵ نشان می‌دهد که P_c را می‌توان به‌طور مستقیم از T_2 و ضریب ε به‌دست آورد. در ادامه اندازه منافذ نیز با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\text{Pore size}(\mu\text{m}) = 6\rho \frac{T_2}{1000} \quad (5)$$

در اینجا T_2 میانگین لگاریتمی می‌باشد. بر اساس رابطه فوق می‌توان بطور پیوسته اندازه منافذ را در امتداد چاه و سازند مورد نظر اندازه گرفت (شکل ۶). البته توزیع T_2 ممکن است تحت تاثیر نوع هیدروکربن قرار گیرد و سیگنال‌هایی ایجاد کند که فضای تخلخل را به اشتباه بزرگتر نشان دهد که به هنگام استفاده از توزیع T_2 باید تصحیحات و کنترل‌های لازم انجام شود. نتایج حاصل از این بخش یعنی توزیع فشار شبه موئینه و اندازه منافذ به‌دست آمده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است.

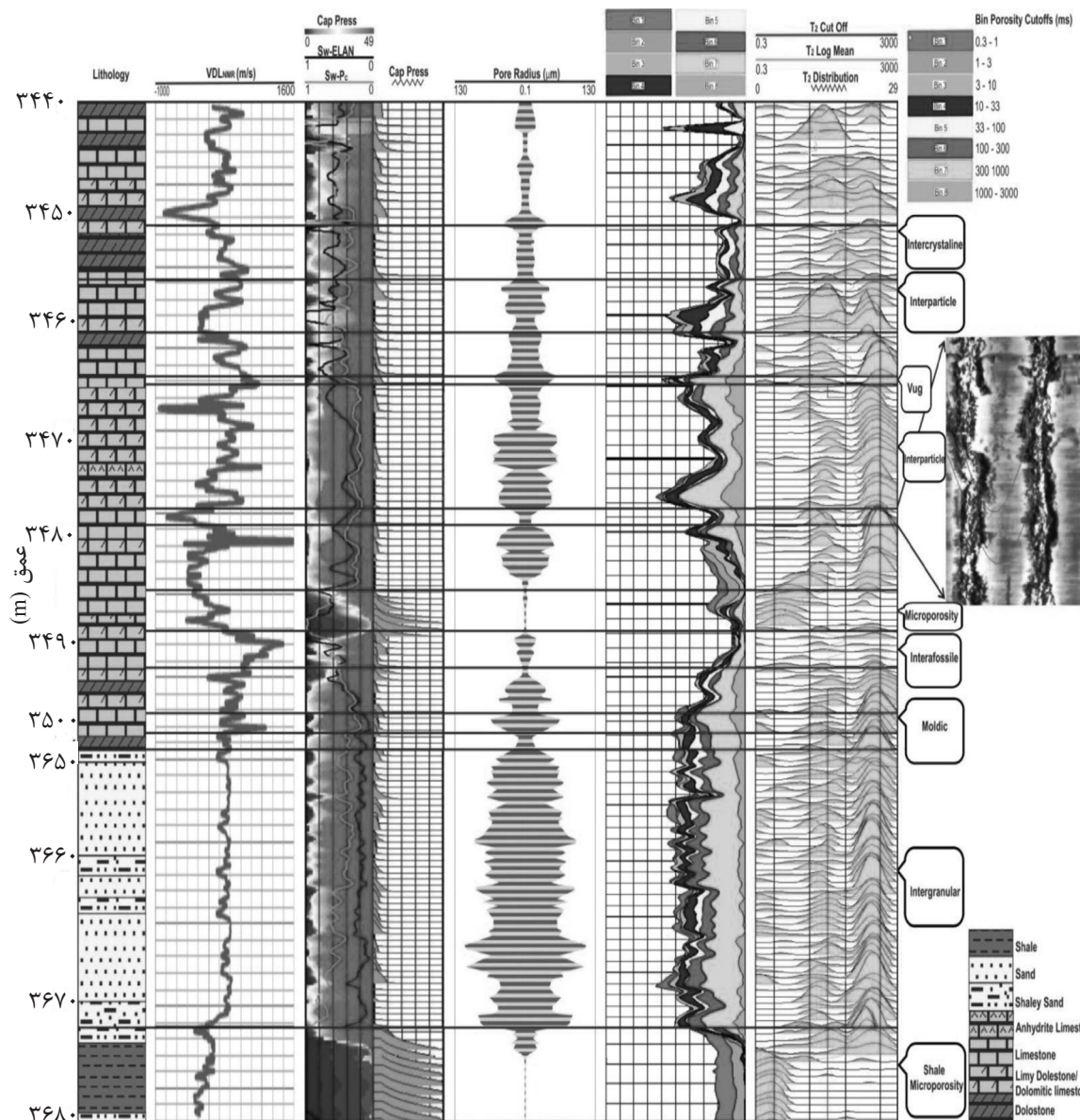
پس از محاسبه فشار موئینه می‌توان شعاع منافذ را نیز با استفاده از روابط به‌دست آورد. در این مطالعه ابتدا فشار موئینه توسط نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای اندازه گیری شد که به آن فشار شبه موئینه^۱ نیز می‌گویند.

مقاومت فشار موئینه ایجاد شده توسط سیال غیر ترکنده برای ورود به منافذ بستگی به ترشوندگی، کشش سطحی بین سیالات و شعاع منفذی دارد که توسط رابطه ۳ تعریف می‌شود:

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

در رابطه ۳: σ کشش سطحی، θ زاویه سطح تماس سیال با دیواره منفذ و r شعاع منفذی است. نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای قادر خواهد بود که به‌طور پیوسته در امتداد چاه فشار موئینه را محاسبه کند که در گام بعدی از طریق رابطه ۳ شعاع منافذ را نیز می‌توان به‌طور پیوسته اندازه گیری کرد [۱۶ و ۳۳]. همچنین از طریق گرافیکی و با استفاده از منحنی‌های توزیع T_2 می‌توان به‌طور کیفی در مورد خصوصیات منافذ، مثلاً بزرگ یا کوچک بودن یا مقدار تخلخل‌شان، نتایجی به‌دست آورد. اگر منحنی‌های توزیع T_2 به سمت مدت زمان بیشتر منحرف شوند نشان‌دهنده بزرگ بودن منافذ است و برعکس (شکل ۶). همچنین مساحت زیر منحنی نشان‌دهنده مقدار تخلخل است.

در واقع نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای، افزایش و کاهش سیگنال القایی که بوسیله مغناطیسی شدن اسپین هیدروژن ایجاد شده است را اندازه گیری می‌کند. مقدار هیدروژن موجود در سیال (نفت یا



شکل ۶- توزیع انواع منافذ بر اساس نگار انحراف سرعت و تشدید مغناطیس هسته‌ای در سازند مختلط کربناته آواری آسماری. ستون ۱- لیتولوژی. ستون ۲- نگار انحراف سرعت که بخش کربناته آن در مقایسه با بخش آواری دارای بازه نوسانات بزرگتری است. ستون ۳ و ۴- مقدار آب اشباع شدگی و فشار مویینه دروغین. ستون ۵- اندازه منافذ به دست آمده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای. ستون ۶- توزیع مقدار تخلخل. ستون ۷- توزیع T_2 که نشان دهنده اندازه منافذ و مقدار تخلخل است.

این نوع منافذ به دلیل ارتباط با یکدیگر دارای فشار شبه مویینه پایینی هستند. در رخساره‌های آواری (بخش پایینی سازند) منافذ بین دانه‌ای در رخساره ماسه سنگی فشار شبه مویینه بسیار پایین و ندرتا متوسط را نشان می‌دهند. اما متقابلا در ریز تخلخل‌های شیلی بیشترین مقدار فشار شبه مویینه وجود دارد. پس از تعیین فشار مویینه محدوده اندازه منافذ نیز با استفاده از روابط بالا برای هر یک از انواع زیررده‌ها مشخص شده

در رخساره‌های کربناته (بخش بالایی سازند آسماری) منافذ نوع درون ذره‌ای و قالبی یا انحلالی دارای فشار مویینه بالا و ندرتا متوسط هستند اما ریز تخلخل‌ها دارای فشار مویینه بسیار بالا می‌باشند. این فشار مویینه بالا بخاطر عدم ارتباط منافذ با یکدیگر در نوع درون ذره‌ای و قالبی است همین‌طور شعاع گلوگاهی کوچک در منافذ نوع میکروتخلخل می‌باشد. اما منافذ نوع بین ذره‌ای و بین بلوری دارای فشار شبه مویینه پایین می‌باشند.

آواری و کرناته می‌تواند فشار مویینه را به‌طور پیوسته در امتداد چاه تخمین بزند. همین‌طور با مقایسه شعاع منافذ به‌دست آمده از آنالیز مغزه در ۶ زیررده با شعاع منافذ به‌دست آمده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای، نشان می‌دهد که نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای در محاسبه شعاع منافذ نیز در سرتاسر چاه در سازند آسماری تا حد قابل قبولی مورد اطمینان است. آروگان و همکاران [۳۷] نیز با مطالعه رسوبات توریدایتی آب اشباع شدگی و فشار مویینه به‌دست آمده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای را با داده‌های آنالیز ویژه مغزه مقایسه نموده‌اند که تطابق قابل قبولی را نیز نشان داده است. در جدول ۱ مقایسه اندازه منافذ به‌دست آمده از روش منحنی‌های فشار تزریق جیوه و نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای در عمق‌های معادل نشان داده شده است. در این مطالعه سعی شده است انواع منافذ با نگرشی جامع^۲ از دیدگاه کوچک مقیاس^۳ (مقاطع نازک میکروسکوپی و داده‌های فشار تزریق جیوه) و متوسط مقیاس^۴ (نگار انحراف سرعت و تشدید مغناطیس هسته‌ای) طبقه‌بندی شوند. در واقع ابتدا منافذ بر اساس رفتار الاستیک سنگ به ۸ زیر رده تقسیم شدند و در ادامه برای هر زیررده مشخصات منفذی و مخزنی آن مانند: تخلخل، تراوایی، شعاع منفذی، بافت رسوبی، فشار شبه مویینه و توزیع T_2 تعیین شده است.

در این مطالعه توزیع ۸ زیررده منفذی با سایر مشخصات وابسته به آن به‌طور پیوسته در امتداد چاه تعیین شدند که در بهینه‌کردن پروژهای برداشت ثانویه اهمیت دارد. در واقع ارائه این طبقه‌بندی با توجه به ابزارهای موجود در صنعت نفت، در حال حاضر تنها راه مطالعه انواع منافذ به‌طور پیوسته در امتداد چاه می‌باشد. البته در جدیدترین مطالعات محققان دیگری مانند ژاوو و همکاران [۳۸] منافذ را بر اساس مدل فیزیک سنگ^۵ تنها به سه دسته تقسیم نموده‌اند ولی مطالعه حاضر انواع منافذ را در ۸ زیر رده تقسیم‌بندی نموده است.

است (شکل ۴). برای محاسبه اندازه منافذ در رده III (منافذ نوع شکستگی) با استفاده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای امکان پذیر نمی‌باشد چون این نگار منافذ ماتریکس سنگ را علاوه بر شکستگی نیز اندازه می‌گیرد. برای مطالعه و شناسایی منافذ نوع شکستگی از نگارهای انحراف سرعت و تصویری^۱ استفاده شده است. نگار تصویری اندازه منافذ نوع شکستگی را در حدود ۰/۵ تا ۴ μm نشان می‌دهد.

تعیین اندازه منافذ با استفاده از فشار تزریق جیوه

در هر یک از زیررده‌ها برای اعتبارسنجی شعاع منافذ به‌دست آمده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای، با شعاع منافذ به‌دست آمده از آنالیز ویژه مغزه نیز مقایسه نموده‌ایم. برای این منظور از منحنی‌های فشار تزریق جیوه استفاده شده است. به دلیل وابستگی فشار مویینه به مشخصات مخزنی، اکثر محققان تاکید دارند که شکل منحنی فشار تزریق جیوه وابسته به هندسه منافذ می‌باشد [۳۵ و ۳۶]. بطوری که منحنی‌های فشار تزریق جیوه دقیق‌ترین اطلاعات از فضای منفذی را ارائه می‌دهند.

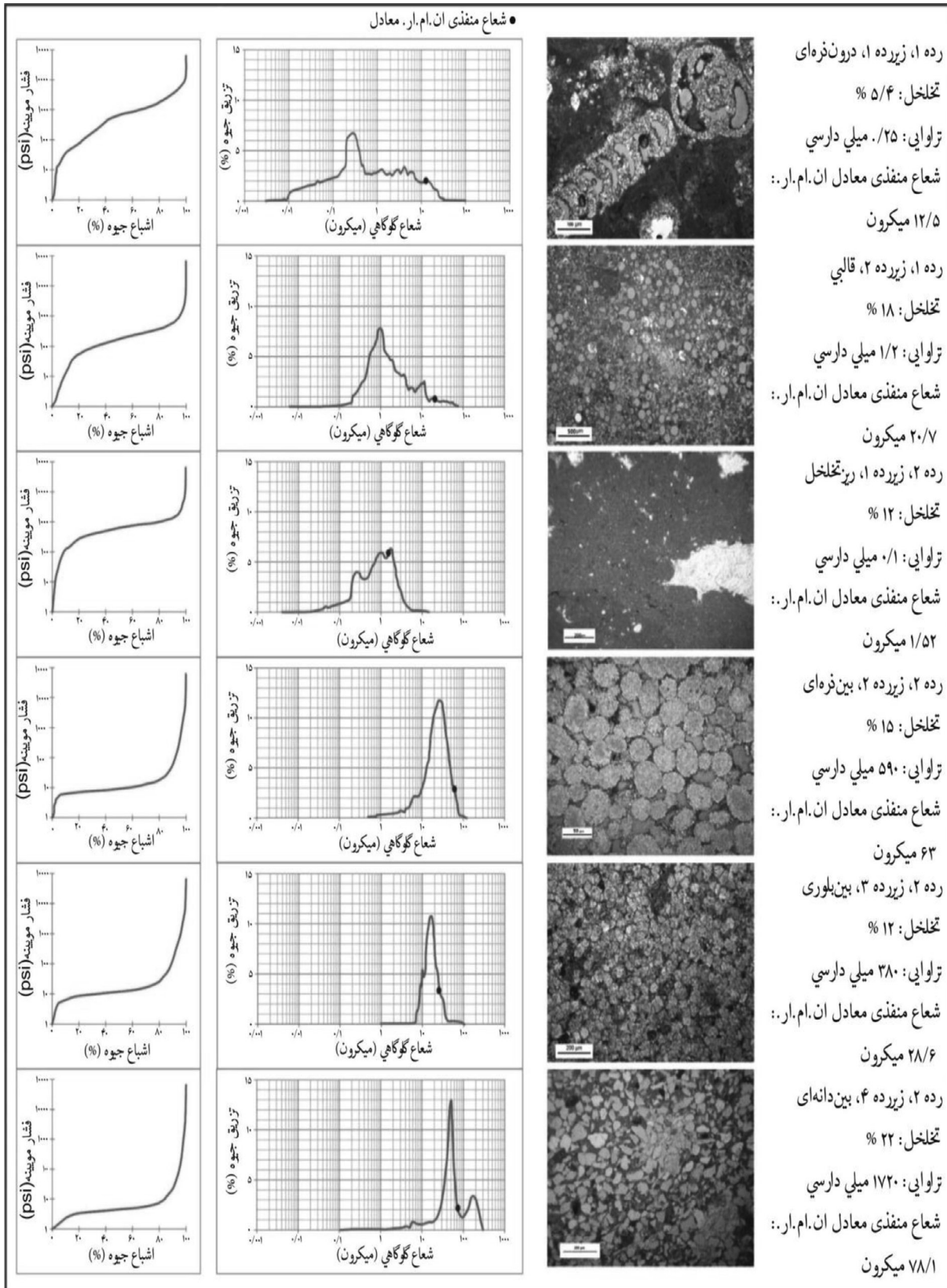
در هر فشار جابجایی جیوه در فضای متخلخل، حداقل شعاع گلوگاه منفذی که جیوه می‌تواند در آن نفوذ کند توسط رابطه لاپلاس قابل محاسبه است:

$$r = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta \cdot C}{P_c} \quad (6)$$

در این رابطه r شعاع منفذی بر حسب میکرومتر، σ کشش بین سطحی هوا و جیوه، θ زاویه برخورد بین جیوه و هوا، P_c فشار مویینه، C ضریب ثابت می‌باشد. در سیستم هوا-جیوه که مقدار σ برابر ۴۸۰ دین بر سانتی‌متر و θ معادل ۱۴۰ درجه می‌باشند، شعاع گلوگاه از رابطه $r = \frac{107}{P_c}$ زیر به‌دست می‌آید. شکل ۷ منحنی فشار مویینه و توزیع شعاع منفذی و مقاطع میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده از رخساره‌های مخزنی یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

با توجه به داده‌های موجود در ۶ زیررده توزیع اندازه منافذ تعیین شدند (شکل ۷). با مقایسه فشار شبه مویینه از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای و منحنی‌های فشار مویینه حاصل از تزریق جیوه در عمق‌های معادل نشان می‌دهد که این نگار تا حد قابل قبولی در بخش

1. Ultra sonic Borehole Imager Log
2. Integrated Approach
3. Micro-scale
4. Meso-scale
5. Rock Physics Modeling



شکل ۷- فشار مویینه و شعاع منفذی بدست آمده از داده تزریق جیوه در ۶ زیررده از منافذ واحدهای مخزنی سازند آسماری نشان داده شده است. شعاع منفذی در عمق معادل که توسط نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای و رابطه ۹ محاسبه شده است نیز در هر زیر رده مشخص شده است.

جدول ۱- مقایسه اندازه شعاع منافذ به دست آمده با استفاده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای و منحنی‌های فشار تزریق جیوه در هر یک از زیررده‌های انواع منافذ سازند مختلط کربناته-آواری آسماری.

شعاع منفذی محاسبه شده از تحلیل تزریق جیوه (μm)	شعاع منفذی محاسبه شده از ان.ام.ار. (μm)	رده منفذی
۰/۰۱-۳۰	۰/۱-۱۷/۵	درون ذره‌ای
۰/۰۲-۶۰	۰/۶-۳۰	انحلالی/قالبی
۰/۰۳۵-۹/۴	۰/۰۵-۱۰/۳	ریز تخلخل
۱-۱۰۰	۱۰-۱۲۰	بین ذره‌ای
۸-۴۰	۵-۴۰	بین بلوری
۵-۲۹۰	۲۰-۲۱۵	بین دانه‌ای
-	۰/۰۲-۴	ریز تخلخل شیل

نتیجه‌گیری

شیل ۰/۰۲ تا $4 \mu\text{m}$ و در منافذ نوع شکستگی ۰/۵ تا μm ۴ می‌باشد. نتایج حاصل از شناسایی و توزیع اندازه منافذ نشان می‌دهد کیفیت مخزنی و تولید در میدان مورد مطالعه تحت کنترل ۴ نوع منفذ است: ۱- منافذ نوع بین دانه‌ای در رخساره ماسه سنگی با تخلخل ۲۲٪ و تراوایی mld ۱۶۸۹؛ ۲- منافذ بین ذره‌ای در رخساره گرین-استونی/پکستونی با تخلخل ۱۸٪ و تراوایی mld ۵۳۲؛ ۳- منافذ نوع بین بلوری با تخلخل ۱۲/۷٪ و تراوایی mld ۳۲۰ در رخساره دولومیتی؛ ۴- منافذ نوع شکستگی با تخلخل ۴٪ و تراوایی mld ۲۸۹ در رخساره‌های مادستونی/وکستونی. توزیع هرکدام از این ۴ نوع منفذ به همراه فشار شبه مویینه، شعاع منفذی و مقدار تخلخل و تراوایی‌شان توسط نگار انحراف سرعت و تشدید مغناطیس هسته‌ای بطور پیوسته در امتداد چاه شناسایی شدند.

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 زمین شناسی دانشگاه تهران استفاده شده است.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد انواع منافذ سازند مختلط کربناته آواری آسماری بر اساس نگار انحراف سرعت به ۸ زیررده تقسیم می‌شوند که ۶ نوع (درون ذره‌ای یا درون فسیلی، قالبی یا حفره‌ای، ریزتخلخل، بین ذره‌ای، بین بلوری) آن مربوط به بخش کربناته و ۲ نوع (بین دانه‌ای و ریزتخلخل شیل) آن مربوط به بخش آواری می‌باشند. پس از شناسایی ۸ نوع منفذ، توزیع فشار شبه مویینه به‌طور پیوسته در امتداد چاه و سازند هدف در هر زیررده بجز شکستگی بترتیب تعیین شدند: در تخلخل‌های بین دانه‌ای، بین ذره‌ای و بین بلوری پایین، در تخلخل‌های درون ذره‌ای و قالبی متوسط تا بالا و در ریز تخلخل‌ها بالا می‌باشد. شعاع منفذی نیز بطور پیوسته و در هر زیر رده با استفاده از نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای تخمین زده شده است. در هر دو بخش کربناته و آواری نگار تشدید مغناطیس هسته‌ای با دقت قابل قبولی اندازه منافذ را اندازه‌گیری کرده است. توزیع اندازه منافذ در هر یک از زیررده‌های منافذ بترتیب: منافذ نوع درون ذره‌ای از ۰/۱ تا $17/5 \mu\text{m}$ ، منافذ قالبی از ۰/۶ تا $30 \mu\text{m}$ و ندرتا در انحلال‌های بزرگ $130 \mu\text{m}$ ، منافذ ریزتخلخل‌ها ۰/۰۵ تا $10/3 \mu\text{m}$ ، تخلخل بین ذره‌ای ۱۰ تا $120 \mu\text{m}$ ، تخلخل بین بلوری ۵ تا μm ، منافذ بین دانه‌ای ۲۰ تا $160 \mu\text{m}$ ، منافذ ریزتخلخل

مراجع

- [1]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "Controls on sonic velocity in carbonates, *Pure and Applied Geophysics*", Vol. 141, pp. 287-323, 1993.
- [2]. Lucia F. J., "Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization", AAPG Bulletin, Vol. 79, pp. 1275-300, 1995.
- [3]. Lucia F. J., *Carbonate Reservoir Characterization*, Berlin: Springer, 1999.
- [4]. Tiab D. and Donaldson E. C., *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*, Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [5]. Choquette P. W. and Pray L. C., "Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates", AAPG Bulletin, Vol. 54, pp. 207-50, 1970.
- [6]. Vera C. L., Kaldi J. G. and Sneider R. M., "Geological applications of capillary pressure: A review", AAPG Bulletin, Vol. 76, No. 6, PP. 840-850, 1992.
- [7]. Lønøy A., "Making sense of carbonate pore systems", AAPG Bulletin, Vol. 90, pp. 1381-405, 2006.
- [8]. Morgan J. T. and Gordon D. T., "Influence of pore geometry on water-oil relative permeability", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 22, pp. 1199-208, 1970.
- [9]. Jackson P. D., Talor S. D., and Stanford P. N., "Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands", *Geophysics*, Vol. 43, pp. 1250-68, 1978.
- [10]. Weger R. J., Eberli G. P., Bachle G. T., Massaferro J. L., and Sun Y. F., "Quantitative of pore structure and its effect on sonic velocity and permeability in carbonates", AAPG Bulletin, Vol. 93, pp. 1297-1317, 2009.
- [11]. Tao G. and King M. S., "Porosity and pore structure from acoustic well logging data", *Geophysical Prospecting*, Vol. 41, pp. 435-451, 1993.
- [12]. Xu S. and White R. E., "A new velocity model for clay-sand mixtures", *Geophysical Prospecting*, Vol. 43, pp. 91-118, 1995.
- [13]. Lucia F. J., *Carbonate reservoir characterization: an integrated approach*, New York, New York: Springer-Verlag, 2007.
- [14]. Marschall D., Gardener J. S., Mardon D., and Coates G. R., *Method for correlating NMR relaxometry and mercury injection data*, Presented at the international symposium of society of core analysis held in San Francisco, California, USA, 1995.
- [15]. Lowden B. D., Porter M. J., and Powrie L. S., " T_2 relaxation time versus mercury injection capillary pressure: Implication for NMR logging and reservoir characterization", SPE european petroleum conference held in the Hague, the Netherland, paper No. 50607, 1998.
- [16]. Altunbay M., Martain R., Robinson M., "Capillary pressure data from NMR logs and its implications on field economics", SPE Annual Technical Conference and Exhibition Meeting held in New Orleans, Luisiana, USA, SPE paper No. 71703, 2001.
- [17]. Volokitin Y., Looyestijn W. J., Siljkerman W. F. j., and Hohman J. P., "A practical approach to obtain primary drainage capillary pressure curves from NMR core and log data", *Petrophysics*, Vol. 42, No. 4, 2001.
- [۱۸]. حسینی نیا ط.، گزارش تکمیل چاه توسعه‌ای انحرافی-افقی-چاه شماره ۸ میدان چشمه‌خوش، اداره

- زمین‌شناسی شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، ۳۶ صفحه، ۱۳۸۴.
- [۱۹]. هنرمند ج.، بررسی عوامل رسوب‌شناسی و دیانرژی کنترل‌کننده خواص مخزنی در سازند آسماری میدان چشمه‌خوش، رساله دکتری، دانشگاه تهران، ایران، ۳۰۸ صفحه، ۱۳۹۱.
- [20]. Vanbuchem 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., *Sequence stratigraphy and Sr isotope 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, 2010.
- [21]. Dunham R. J., *Classification of carbonate rocks according to depositional texture*, AAPG Mem. 1, pp. 108-121, 1962.
- [22]. Wyllie M. R. J., Gregory A. R., and Gardner L. W., "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media", *Geophysics*, Vol. 21, pp. 41-70, 1956.
- [23]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "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*, Vol. 83, pp. 450-466, 1999.
- [24]. Wang Z., Hirsche K. W., and Sedgwick G., "Seismic velocities in carbonate rocks", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 30, pp. 112-122, 1991.
- [25]. Rafavich F., Kendall C. H. St. C., and Todd T. P., "The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks", *Geophysics*, Vol. 49, pp. 1622-1636, 1984.
- [26]. Sun Y. F., Berteussen K., Vega S., Eberli G. P., Baechle G. T., and Weger R. J., "Effects of pore structure on 4D seismic signals in carbonate reservoirs", *SEG 76th Annual International Meeting*, expanded Abstracts, pp. 3260-3264, 2006.
- [27]. Wang H., Sun S. Z., Hajun Y., Hongliang G., Youjun X., and Hongru, H., "The influence of pore structure on P- & S-wave velocities in complex carbonate reservoirs with secondary storage space", *Petroleum Science*, Vol. 8, pp. 394-405, 2011.
- [28]. Baechle G. T., Colpaert A., Eberli G. P., and Weger R. J., *Modeling velocity in carbonates using a dual porosity DEM model*, *SEG 77th Annual International Meeting*, expanded Abstracts, 2007.
- [29]. Assefa S., Mccann C., and Sothcott J., "Velocities of compressional and shear waves in limestones", *Geophysical Prospecting*, Vol. 51, pp. 1-13, 2003.
- [30]. Mousavi M., Prodanovic M., Jacobi D., and Hughs B., "New classification of carbonate rocks for process-based pore-scale modeling", *SPE*, paper no. 163073, pp. 1-22, 2013.
- [۳۱]. رضایی م.، چهارازی ع.، اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه پیمایی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- [32]. Freedman R., "Advances in NMR logging", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 58, No. 1, p. 60-66, 2006.
- [33]. Altunbay M., Georgi D., and Zhang G. Q., "Pseudo capillary pressure from NMR data", Presented at the 12th international petroleum congress of Turkey, 1998.
- [34]. Jin G., Manakov A., Chen J., Zhang J., and Hughes B., "Capillary pressure prediction from rock models reconstructed using well log data", *SPE Annual technical conference and exhibition held in San Antonio, Texas, USA*, 2012.

- [35]. Leverett M. C., "*Capillary behavior in porous solids*", Trans. of AIME., Vol. 142, pp. 52–69, 1941.
- [36]. Rose W. and Bruce W. A., "*Evaluation of capillary character in petroleum reservoir rock*", Trans. AIME, Vol. 186, pp. 127–42, 1949.
- [37]. Arogun O. and Nwosu C., "*Capillary pressure curve from nuclear magnetic resonance log data in a deepwater turbidite Nigeria field- a comparison to saturation models from SCAL drainage capillary pressure curves*", SPE annual international conference and exhibition held in Abuja, Nigeria, 2011.
- [38]. Zhao L., Nasser M., and Han D., "*Quantitate geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs*", Geophysical prospecting, Vol. 61, Issue 4, pp. 827-841, 2013.
- [39]. Bordenave M. L. and Hegre J. A., "*The influence of tectonics on the entrapment of oil in the Dezful Embayment, Zagros Foldbelt, Iran*", Journal of Petroleum Geology, Vol. 28, pp. 339-368, 2005.
- [40]. Eberli G. P., Baechle G. T., Anselmetti F. S., and Incze M. L., "*Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks*", The Leading Edge, Vol. 22, pp. 654-660, 2003.