



مقاله پژوهشی

کاربرد نسبت ابعاد منافذ معادل (EPAR) در تشخیص نوع تخلخل و تعیین گونه‌های سنگی، سازندهای کنگان و دالان، خلیج فارس

امین سلیمانی^۱؛ وحید توکلی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت؛ دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

۲- دانشیار زمین‌شناسی نفت؛ دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.404591.1199

واژگان کلیدی	چکیده
<p>رخساره منفذی، دالان-کنگان، نگار صوتی، فرایندهای دیاژنزی، محیط مؤثر تفاضلی (DEM)</p>	<p>مخازن کربناتی بسیار پیچیده و ناهمگن هستند. غلبه بر این ناهمگنی جهت ارزیابی‌های مخزنی مهم و ضروری است. مطالعات مخازن کربناتی اغلب با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است. استفاده از نگار چاه‌پیمایی به جای استفاده از روش‌های آزمایشگاهی در کاهش زمان و هزینه بسیار به صرفه است. سازندهای دالان-کنگان، به عنوان بزرگ‌ترین مخزن گاز غیرهمراه به دلیل تأثیر محیط رسوبی و فرایندهای دیاژنزی ناهمگن و پیچیده هستند. با هدف غلبه بر ناهمگنی با استفاده از نگار صوتی، نمونه‌هایی از سازندهای کربناتی دالان-کنگان تهیه شد. در مجموع ۸۷ مقطع نازک آهکی مورد ارزیابی سنگ‌نگاری، تجزیه و تحلیل معمول مغزه و زمین‌شناسی قرار گرفت. به طور دقیق تخلخل، تراوایی، بافت رسوبی، نوع تخلخل و فرایندهای دیاژنزی مشخص شدند. از چاه مورد مطالعه نگارهای چاه‌پیمایی و صوتی نیز ثبت شد. بعد از کنترل کیفیت داده‌ها، نگار زمان صوتی ثبت شده به سرعت صوتی تبدیل شد. مدل‌سازی تخلخل-سرعت بر اساس رویکرد محیط مؤثر تفاضلی^۱ برای مقادیر مختلف نسبت ابعاد منافذ معادل^۲ انجام شد. تخلخل-سرعت نمونه‌های اندازه‌گیری شده در این مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد تخلخل‌های قالبی بزرگ‌ترین نسبت ابعاد را دارند. تخلخل‌های حفره‌ای، بین‌دانه‌ای و ریز تخلخل به ترتیب بیشترین نسبت ابعاد را بعد از تخلخل‌های قالبی دارند. تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای به سبب کروی بودن و بالای بودن نسبت ابعاد در تخلخل‌های یکسان، سرعت صوتی بیشتری نسبت به تخلخل‌های تخت و باریک دارند. از طریق شکل هندسی و نوع تخلخل و با استفاده از نگار صوتی، گونه‌های سنگی مشخص شدند که روند تغییرات تخلخل، تراوایی و فرایندهای دیاژنزی اتفاق افتاده در مخازن دالان-کنگان را به خوبی نمایان کرد.</p>

۱. پیش‌گفتار

بزرگ‌ترین مخزن گاز غیرهمراه و یکی از بزرگ‌ترین مخازن جهان هستند [۲-۷]. سازندها و مخازن کربناتی به دلیل ترکیبی از محیط رسوبی و رویدادهای دیاژنزی مختلف، ناهمگن و پیچیده هستند [۸، ۹]. در پژوهش‌های گذشته نشان داده شده است که کیفیت مخزنی در مخازن کربناتی تحت تأثیر هندسه منافذ و نوع تخلخل است که خود این عوامل در اثر فرایندهای دیاژنزی تغییر می‌کنند [۱۰-۱۳].

مخازن کربناتی از نظر خواص سنگ‌شناسی، بافتی و پتروفیزیکی ناهمگن و پیچیده هستند [۱]. غلبه بر این ناهمگنی جهت ارزیابی دقیق مخازن، مهم و ضروری است. مخازن کربناتی سازندهای کربناتی دالان-کنگان و معادل آنها در کشورهای عربی که به عنوان سازند خوف شناخته می‌شود سنگ مخزنی مهمی را تشکیل می‌دهند. این سازندها،

¹Differential effective medium (DEM)

²Equivalent pore aspect ratio (EPAR)

سیستم منافذ، اشباع سیال و کیفیت سنگ مخزن را کنترل می‌کند. در نتیجه خصوصیات سیستم منافذ یک جنبه مهم در مطالعات مخزن نفت و گاز است [۱۴]. همچنین بر اثر دیاژنز و با تغییر نوع تخلخل و حفرات، خصوصیات پتروفیزیکی نیز تغییر می‌کنند [۱۰]. رفتار ابهام‌آمیز خصوصیات کشسانی و الاستیک سنگ‌های کربناتی تحت تأثیر سیستم و هندسه منفذی پیچیده سنگ‌های کربناتی است [۱۵، ۱۶] و بر امواج لرزه‌ای و صوتی تأثیر می‌گذارد [۱۷].

محققان گذشته با استفاده از سرعت صوتی و مدول‌های بالک و برشی به نوع تخلخل و هندسه منافذ سازندهای مورد مطالعه دست یافته‌اند [۱، ۱۸-۲۱]. این تحقیقات اغلب با استفاده از داده‌های صوتی و سرعتی انجام شده که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است. بیشتر بررسی و تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته در مورد مخازن کربناتی به وسیله مغزه و مقاطع نازک انجام شده است. بررسی مخازن کربناتی به روش معمول هزینه و وقت زیادی را طلب می‌کند. برعکس استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی در مخازن کربناتی هزینه کمتری داشته و در تمام فواصل چاه در دسترس هستند [۲۲]. استفاده از نگار صوتی به عنوان یک ابزار غیرمخرب، ارزان و مؤثر برای بررسی مخازن در صنعت نفت و گاز در نظر گرفته می‌شود [۲۳].

این پژوهش بر روی سازندهای ناهمگن و پیچیده دالان-کنگان انجام شده و هدف این است با استفاده از نگار صوتی فشاری، نوع تخلخل و سیستم منافذ شناسایی شود. در ادامه با استفاده از نتایج به دست آمده گونه سنگی تعیین می‌گردد. هدف از تعیین گونه‌های سنگی غلبه بر ناهمگنی و پیچیدگی مخازن است [۲۴].

۲. زمین‌شناسی منطقه

بخش مرکزی خلیج فارس که محور این پژوهش است در حاشیه شمال شرقی صفحه عربستان واقع شده است (شکل ۱). چینه‌نگاری و تکامل حوضه زاگرس سال‌ها است که موضوع مورد توجه زمین‌شناسان بوده است [۲۵]. این توجه به دلیل تاریخ زمین‌شناسی متمایز و پیچیده آن است که با تشکیل سیستم‌های نفتی غول‌پیکر مشخص می‌شود. این

حوضه دستخوش رویدادهای زمین‌ساختی و چینه‌نگاری مختلفی شده که منجر به تجمع منابع هیدروکربنی قابل توجهی شده است. فرایندهای پیچیده زمین‌شناسی و وجود سیستم‌های نفتی به خوبی توسعه یافته، حوضه زاگرس را به حوزه مطالعاتی جذابی برای زمین‌شناسان و محققان در زمینه اکتشاف و تولید نفت تبدیل کرده است. این ناحیه از دوره پیش از کامبرین تا به امروز دچار تحولات پیچیده زمین‌شناسی و ساختاری شده است [۲۶، ۲۷]. دو فاز زمین‌ساختاری عمده ساختارهای این ناحیه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است. مرحله نخست زمین ساختاری برخورد آمار^۱ است که در ۶۲۰ تا ۶۴۰ میلیون سال پیش در امتداد شمال-جنوبی در صفحه عربی رخ داده است. فاز دوم زمین ساختاری مربوط به سیستم ریفی نجد^۲ است که ۵۳۰ تا ۵۷۰ میلیون سال پیش با روند کلی شمال غربی- جنوب شرقی، به موازات رشته کوه‌های زاگرس رخ داده است [۲۸]. این رویدادهای زمین ساختی بزرگ، مسؤل شکل‌گیری ارتفاعات قطر-فارس و دیگر ساختارهای مشابه مانند بلندای غوار هستند. ساختارهای این ناحیه به طور قابل توجهی تحت تأثیر کمان قطر-فارس قرار گرفته است [۳]. در دوره اینفراکامبرین، حرکات زمین ساختی منجر به فعال شدن مجدد گسل‌های از پیش موجود، به ویژه سیستم گسلی نجد شد، در نتیجه منطقه ارتفاع یافت [۲۸، ۲۹]. وجود کمان قطری با روند شمال شرقی-جنوب غربی نقش بسزایی در تقسیم خلیج فارس به دو فرورفتگی موسوم به زیرحوضه نمک هرمز شرقی و غربی داشت. در طول دوره فانزوتیک، فرورفتگی‌های درون منطقه الگوهای متنوعی از نرخ فرونشست و تاریخچه رسوب‌گذاری را به نمایش گذاشتند. با دور شدن از کمان قطر، ضخامت رسوب در هر دو جهت شرقی و غربی افزایش می‌یابد. الگوهای فرونشست رسوبات، پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه را بیشتر می‌کند. در طول بیشتر دوران فانزوتیک، کمان قطر به عنوان یک بلندی دیرینه^۳ حضور داشته است. فرسایش قابل توجهی در طاق مرکزی عربستان در دوره اواسط کربنیفر و پرمین اولیه رخ داده است [۳۰]. در طی این مدت، رسوبات آواری سازند فراقان (پرمین اولیه) در ایران نهشته شد [۳۱]، و سازند اونیزه^۴ در عربستان سعودی رسوب کرد [۳۲]. در طول دوره

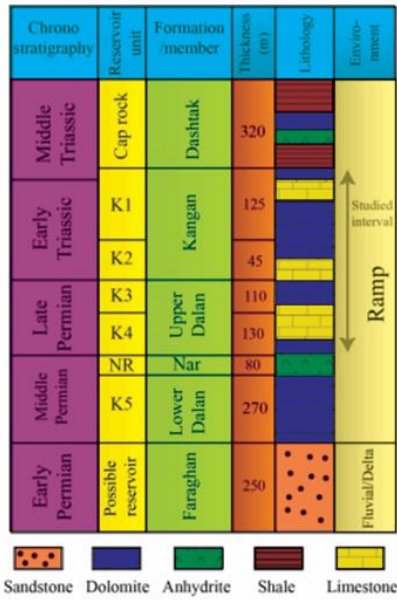
^۱ *Paleo High*

^۲ *Unayzah*

^۳ *Amar Collision*

^۴ *Najd Rift System*

شناخته شده و بر روی کنگان نهشته شده است [۴۴].



شکل ۲. چینه نگاری ناحیه مورد مطالعه

۳. مواد و روش‌ها

مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده شامل نگارهای چاه‌پیمایی، مغزه و مقاطع نازک در فاصله مورد مطالعه سازندهای دالان و کنگان در خلیج فارس است. در این پژوهش، ۴۰۰ متر مغزه از چاهی در بخش مرکزی خلیج فارس استخراج شد. از بین نمونه‌ها، نمونه‌هایی دارای بیش از ۹۰٪ کلسیت انتخاب شد. بعد از بررسی صحت و کیفیت داده‌ها، در مجموع ۸۷ مقطع نازک آهکی (دارای بیش از ۹۰٪ کلسیت) طوری انتخاب شد که همه انواع بافت‌ها و تخلخل‌ها قابل مشاهده باشند. موارد بررسی شده شامل تخلخل، تراوایی، بافت رسوبی، نوع تخلخل و فرایندهای دیاژنزی است. همچنین از چاه مورد مطالعه نگار زمان صوتی در دسترس بود.

۱.۳. داده مغزه

ابتدا اشعه گاما گسیل شده از مغزه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس از هر متر از مغزه، چهار نمونه پلاگ^۱ تهیه شد. بعد از شست‌وشو

پرمین، اقیانوس نئوتتیس در حاشیه آفریقایی-عربی گندوانا گشوده شد [۳۳-۳۶]. در طول پرمین پسین، زمانی که اقیانوس نئوتتیس در حال باز شدن بود، شکاف قاره‌ای فعالی نیز در امتداد درز زاگرس رخ داد [۳۰]. در اواخر پرمین، پیشروی دریایی قابل توجهی رخ داد. این پیشروی منجر به تشکیل سکوه‌های کم زاویه و رمپ مانند در حاشیه غیرفعال شمال شرقی صفحه عربستان شد [۲۶، ۳۷]. این سکوها در نتیجه فرایندهای زمین‌شناسی مرتبط با پیشروی و باز شدن اقیانوس در منطقه توسعه یافته‌اند. توالی‌های کربناتی-تبخیر ضخیم بر روی این سکوها و کمان قطر در خلیج فارس، در اواخر پرمین تا اوایل تریاس، نهشته شدند [۳۸-۴۰].



شکل ۱. نقشه ناحیه مورد مطالعه، برگرفته از پژوهش الحسینی (۲۰۰۷) [۴۵]

لایه‌های چینه نگاری مورد مطالعه (شکل ۲) مربوط به دوره‌های پرمین پسین و تریاس اولیه است که در امتداد مرز شمالی صفحه عربستان نهشته شده است [۴۱، ۴۲]. فواصل پرمین-تریاس خلیج فارس به سازندهای دالان-کنگان معروف هستند. سازند دالان بر روی سازند فراقان قرار دارد و به ترتیب از پایین به بالا دالان پایینی، انیدریت نار و دالان بالایی را شامل می‌شود. دالان بالایی به دو زیر واحد K_3 و K_4 تقسیم می‌شود [۴۱]. انیدریت نار بین بخش‌های بالایی و پایینی سازند دالان نهشته شده است [۴۳]. در بالای سازند دالان، سازند کنگان قرار دارد که آن را به دو زیر واحد K_1 و K_2 تقسیم کرده است [۴۱]. سازند شیل-انیدریتی دشتک به عنوان پوش سنگ

^۱ Plug

$$(1 - \phi) \frac{d}{d\phi} [\mu^*(\phi)] = (\mu_i - \mu^*) Q^{*i}(\phi) \quad (3)$$

در شرایط اولیه $\mu^*(0) = \mu_l$ و $K^*(0) = K_l$ (برای کلسیت جامد $K_l = 75 \text{ GPa}$ و $\mu_l = 32 \text{ GPa}$) است. مدول‌های بالک و برشی انکلوژن (منافذ) به ترتیب با K_i و μ_i نشان داده می‌شوند. اصطلاحات P^{*i} و Q^{*i} فاکتورهای هندسی هستند که به نسبت ابعاد منافذ بستگی دارند، برای اطلاعات بیشتر به کتاب ماوکو و همکاران (۲۰۲۰) [۵۲] مراجعه شود. پس از محاسبه مدول بالک و برشی مؤثر، بر اساس معادله (۴) و به سرعت فشاری تبدیل شدند.

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \left(\frac{4}{3}\right) * \mu}{\rho}} \quad (4)$$

در این معادله، V_p (km/s) سرعت است، K مدول بالک (GPa)، μ مدول برشی (GPa) و ρ چگالی بالک (g/cc) است.

$$\rho = (1 - \phi)\rho_g + \phi\rho_f \quad (5)$$

ρ چگالی ظاهری (g/cc)، ρ_f و ρ_g به ترتیب چگالی سیال و قسمت جامد سنگ (g/cc) هستند. چگالی ظاهری را می‌توان از طریق معادله (۵) محاسبه کرد. در این پژوهش از نگار چگالی استفاده شد.

یکی از عامل‌های مهم در تخمین فاکتورهای هندسی، نسبت ابعاد منافذ (α) است. نسبت ابعاد به‌عنوان نسبت بین کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین طول یک انکلوژن بیضی‌شکل^۴ تعریف می‌شود. انواع منافذ می‌توانند شکل‌های منافذ متفاوتی داشته باشند که منجر به نسبت ابعاد متغیر می‌شود، به‌عنوان مثال $\alpha = 1$ برای منافذ کروی است، درحالی‌که ترک‌ها یا شکستگی‌ها نسبت ابعاد بسیار کوچکی دارند ($\alpha \ll 1$).

رویکرد DEM برای ساخت منحنی‌های سرعت-تخلخل برای مقادیر مختلف نسبت ابعاد منافذ معادل^۵ (EPAR) استفاده شد و سپس چنین منحنی‌هایی با داده‌های سرعت-تخلخل به‌دست‌آمده از این مطالعه مقایسه شدند. بر همین اساس بین هر منحنی رسم شده به‌عنوان گونه‌سنگی^۶ در نظر گرفته شد. پنج گونه‌سنگی به دست آمد.

و خشک‌کردن نمونه‌ها با استفاده از قوانین بویل و داریس [۴۶]، مقدار تخلخل و تراوایی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

بعد از تهیه مقاطع نازک، درصد وجود هرکانی در زیر میکروسکوپ پلاریزان با استفاده از نمودارهای مقایسه استاندارد تخمین زده شد [۴۷]. از آلزارین قرمز^۱ جهت تشخیص کلسیت از دولومیت استفاده شد [۴۸]. از مقاطع نازک تهیه شده به بررسی بافت و محیط رسوبی پرداخته شد و بر اساس سیستم طبقه‌بندی دانام [۴۹] نمونه‌ها تقسیم‌بندی شدند. با استفاده سیستم طبقه‌بندی چوکت و پری [۵۰] منافذ تقسیم‌بندی شدند. برای بررسی دقیق‌تر نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی نیز استفاده شد.

۲.۲. داده چاه‌پیمایی

از فاصله مورد مطالعه نگارهای چاه‌پیمایی ثبت گردید. بعد از تطابق عمقی، کنترل کیفیت داده‌ها و تصحیحات محیطی، داده‌های نگار زمان صوت بر طبق معادله (۱) به سرعت تبدیل شدند.

$$V = 304.8/DT \text{ (km/s)} \quad (1)$$

۳.۳. مدل‌سازی خصوصیات الاستیک و نسبت ابعاد منافذ معادل (EPAR)

این پژوهش از تئوری محیط مؤثر تفاضلی^۲ (DEM) برای ایجاد مدلی برای ارتباط بین سرعت و تخلخل استفاده کرد. تئوری DEM خصوصیات الاستیک مؤثر یک ماده مرکب متشکل از دو فاز را با وارد کردن کسر حجمی کوچکی از اجزاء در فاز میزبان محاسبه می‌کند. در مورد سنگ‌های خشک، انکلوژن^۳ به منافذ اشاره دارند و به تدریج به ماتریکس جامد (ماده میزبان) اضافه می‌شوند. مدول‌های بالک (K^*) و برشی (μ^*) مؤثر بر اساس سیستم معادلات زیر به‌عنوان تابعی از انکلوژن (تخلخل، ϕ) بر طبق معادله‌های (۲) و (۳) است [۵۱، ۵۲].

$$(1 - \phi) \frac{d}{d\phi} [K^*(\phi)] = (K_i - K^*) P^{*i}(\phi) \quad (2)$$

⁴ Oblate ellipsoidal inclusion

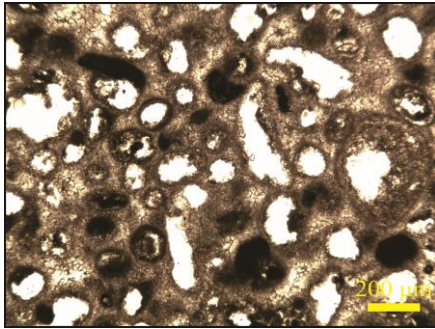
⁵ Equivalent pore aspect ratio

⁶ Rock type

¹ Alizarin Red-S

² Differential effective medium

³ Inclusion



شکل ۳. تخلخل‌های قالبی حاصل انحلال و سیمانی شدن

۴. نتایج

تجزیه و تحلیل‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها اطلاعات مفیدی درباره بافت رسوبی، نوع تخلخل و فرایندهای دیاژنزی در سازندهای دالان-کنگان فراهم ساخت.

۱.۴. بافت‌های رسوبی

سازندهای دالان-کنگان بر روی یک رمپ هموکلینال^۱ کربناتی-تبخیری نهشته شده‌اند [۳۸]. در سازندهای مورد مطالعه، پنج نوع بافت شامل مادستون، وکستون، پکستون، گرین‌استون و باندستون مشخص شدند که در پنج کمربند رخساره‌ای شامل ناحیه فوق جزرومدی، بین جزرومدی، مرداب، تپه زیرآبی و دریای آزاد نهشته شده‌اند. نمونه‌های گل‌غالب به سمت لاگون و ناحیه بالا و بین جزرومدی ته‌نشین شده است [۳۹]. انواع آلوکم‌های اسکلتی و غیراسکلتی در نمونه‌ها مشاهده شد. نمونه‌های دارای اووید و بایوکلاست در قسمت‌های پراثرژی ته‌نشین شده است، به سمت قسمت‌های کم‌انرژی پلوئید رسوب کرده است [۷]. در مرز پرمین-تریاس انقراض دسته‌جمعی را می‌توان در واحدهای مخزن تشخیص داد [۴]. باندستون ترومبولیتی به‌عنوان یک لایه کلیدی برای تشخیص مرز پرمین-تریاس در دنیا شناخته می‌شود [۵۳].

۲.۴. نوع تخلخل و دیاژنز

تخلخل‌های شناسایی شده شامل تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای، بین‌دانه‌ای و ریزتخلخل است. تخلخل غیرقابل مشاهده در مطالعات مقاطع نازک به‌عنوان تخلخل ریز در نظر گرفته شد. به ترتیب فراوانی، تخلخل‌های قالبی، ریزتخلخل، حفره‌ای و بین‌دانه‌ای قرار دارند. فراوانی تخلخل بین‌دانه‌ای کم است. مهم‌ترین فرایندهای دیاژنزی مشاهده شده شامل انحلال، سیمانی‌شدن و میکریتی‌شدن است. سیمان هم‌ضخامت^۲ و به‌ویژه بلوکی^۳ در بین‌دانه‌های مشاهده شد. در اطراف دانه‌ها پوشش میکرایتی^۴ تشخیص داده شد. فرایندهای دیاژنزی از جمله سیمان بلوکی و انحلال سبب گسترش تخلخل قالبی در سازندهای دالان-کنگان شده‌اند (شکل ۳).

۳.۴. مقدار تخلخل و تراوایی

مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده در محدوده ۰/۱۶ تا ۳۳/۵۳ درصد و به طور میانگین ۱۴/۵۷ درصد اندازه‌گیری شد. تراوایی در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۱۲۵/۱۲۴ میلی داری و با میانگین ۱۰/۳۳ اندازه‌گیری شد. به‌طور کلی تخلخل و تراوایی از ریزرخساره‌های دانه‌غالب به گل‌غالب کاهش می‌یابد. نمونه‌های دارای تخلخل قالبی تخلخل زیادی دارند، اما تراوایی در آنها کم است. بهترین کیفیت مخزنی مربوط به نمونه‌های دارای تخلخل حفره‌ای است.

۴.۴. سرعت صوتی

میزان سرعت صوتی از ۳/۹۰ تا ۶/۲۵ کیلومتر بر ثانیه ثبت شده است. میانگین سرعت ثبت شده ۴/۹۵ کیلومتر بر ثانیه است.

۵.۴. میزان نسبت ابعاد منافذ معادل (EPAR) هر

نوع تخلخل و گونه‌های سنگی

شکل ۴ نتایج مدل‌سازی DEM را برای مقادیر مختلف EPAR نشان می‌دهد. در ادامه ۸۷ نمونه آهکی براساس نوع تخلخل غالب برچسب‌گذاری شدند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود تخلخل‌های قالبی به‌طور میانگین بیشترین V_p -EPAR دارند. در رده‌های بعدی به ترتیب تخلخل‌های حفره‌ای، بین‌دانه‌ای و ریزتخلخل قرار دارند. به طور میانگین تخلخل‌های حاصل از انحلال دارای V_p -EPAR بیشتر ۰/۱۵ است. درصد فراوانی هر نوع تخلخل (۸۷ نمونه) براساس گونه‌های سنگی معین شده تعیین شد (شکل ۵). تخلخل‌های قالبی اغلب در گونه‌سنگی ۴ و ۵ قرار دارند. تخلخل‌های

^۱ Blocky

^۲ Micrite envelope

^۱ Homoclinal

^۲ Isopachous

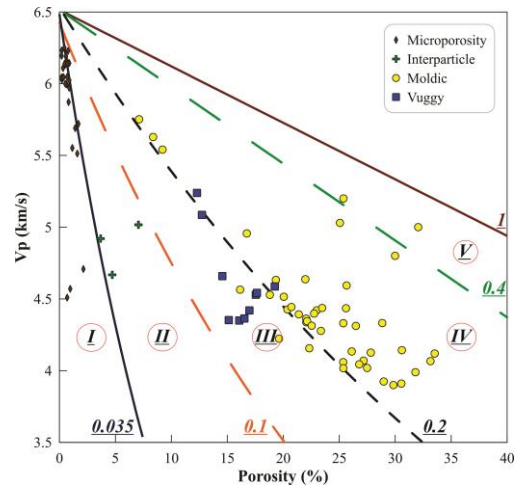
۵. بحث

تعیین نوع تخلخل و گونه‌های سنگی از جمله کارهای مهم و ضروری در جهت کنترل ناهمگنی و پیچیدگی مخازن کربناتی است. تعیین این عوامل مهم با استفاده از نگاره‌های چاه‌پیمایی و صوتی می‌تواند در کاهش زمان و هزینه کمک زیادی کند. از عوامل مهمی که بر روی نگار صوتی و سرعت صوتی تأثیر می‌گذارد، شکل هندسی منافذ است. منافذ کروی سفت‌تر از منافذ مسطح و ترک مانند هستند [۱۸، ۵۴]. تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای به دلیل شکل هندسی که دارند در تخلخل یکسان سرعت صوتی بالاتری نسبت به سایر تخلخل‌هایی که شکل هندسی تخت و باریک دارند.

اساساً کیفیت مخزنی توسط نوع تخلخل و منافذ تعیین می‌شود [۱۰]. با استفاده از تأثیر شکل هندسی منافذ بر سرعت صوتی می‌توان گونه‌سنگی و رخساره منفذی^۱ تعیین کرد. جدول ۲ و شکل ۶ تخلخل و تراوایی ۸۷ نمونه آهکی براساس گونه‌های سنگی تعیین شده نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود گونه‌سنگی ۳ بهترین کیفیت مخزنی را دارد، زیرا که اغلب تخلخل‌های حفره‌ای در این دسته قرار دارد. گونه‌سنگی ۴ و ۵ تخلخل زیادی دارد؛ اما تراوایی در آن کم است، چون که اغلب تخلخل‌های قالبی در آنها قرار دارد. گونه‌سنگی ۱ و ۲ کمترین تخلخل و تراوایی را دارد و بدترین کیفیت مخزنی را دارد، زیرا که اغلب تخلخل‌های ریز در این گونه‌های سنگی قرار دارد.

نسبت ابعاد منافذ در جهت شناسایی فرایندهای دیاژنزی نیز کاربرد دارند. فرایندهای دیاژنزی سبب تغییر نوع تخلخل و ساختار منافذ می‌شوند [۱۵]. به همین دلیل می‌توان از این روش در جهت تشخیص فرایندهای دیاژنزی استفاده کرد. به عنوان مثال فرایند دیاژنزی انحلال در نسبت ابعاد بیشتر از ۰٫۱۵ قابل تشخیص است. نمونه‌های دارای سیمان بلوکی (تخلخل قالبی) اغلب در نسبت ابعاد بیشتر از ۰٫۲ قابل مشاهده هستند.

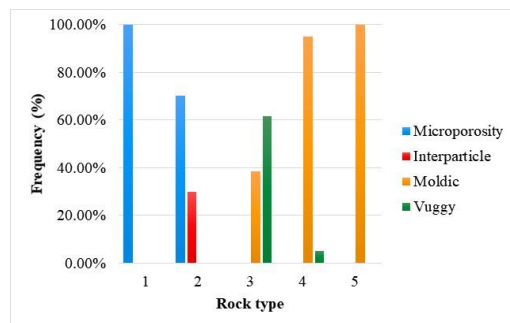
حفره‌ای در گونه‌سنگی ۳ فراوان‌تر هستند. تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و ریزتخلخل در گونه‌های سنگی ۱ و ۲ جای دارند. فراوانی تخلخل‌های ریز در گونه‌سنگی ۱ بیشتر است.



شکل ۴. منحنی‌ها رسم شده نتایج مدل‌سازی DEM را برای مقادیر مختلف EPAR است که با اعداد در انتهای منحنی نشان داده شده است. نمونه‌های آهکی (>۹۰٪ کلسیت) بر اساس نوع تخلخل برچسب‌گذاری شده‌اند. گونه‌های سنگی (۱-۵) نیز تعیین شده‌اند.

جدول ۱. مقدار میانگین Vp-EPAR هر نوع تخلخل

Pore type	Vp-EPAR	Sample
Microporosity	0.03	29
Interparticle	0.07	3
Moldic	0.30	45
Vuggy	0.18	10



شکل ۵. فراوانی هر نوع تخلخل براساس گونه‌های سنگی

^۱ Pore Facies

۷. فهرست نمادها

جدول ۳. فهرست نمادها

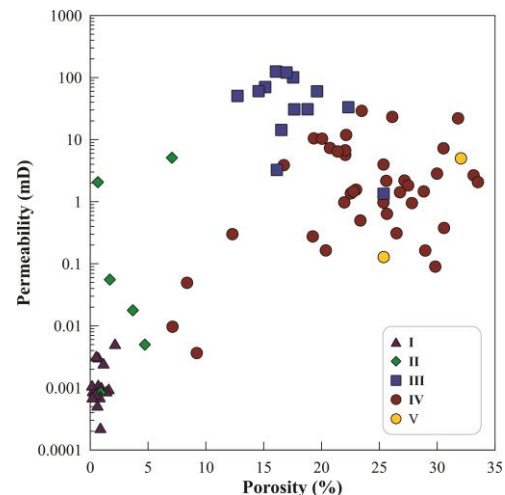
نماد	واحد	شرح
α	-	نسبت ابعاد منافذ
K	GPa	مدول بالک
μ	GPa	مدول برشی

۸. مراجع

- [1] Salih, M., J.J. Reijmer, and A. El-Husseiny, *Diagenetic controls on the elastic velocity of the early Triassic Upper Khartam Member (Khuff Formation, central Saudi Arabia)*. Marine and Petroleum Geology, 2021. **124**: p. 104823.
- [2] Geert, K., et al., *Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate*. GeoArabia, 2001. **6**(3): p. 407-442.
- [3] Aali, J., H. Rahimpour-Bonab, and M.R. Kamali, *Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006. **50**(3-4): p. 161-175.
- [4] Tavakoli, V., M. Naderi-Khujin and Z. Seyedmehdi, *The end-Permian regression in the western Tethys: sedimentological and geochemical evidence from offshore the Persian Gulf, Iran*. Geo-Marine Letters, 2018. **38** (2), p. 179 - 192
- [5] Kadkhodaie-Ilkhchi, A., H. Rahimpour-Bonab, and M. Rezaee, *A committee machine with intelligent systems for estimation of total organic carbon content from petrophysical data: An example from Kangan and Dalan reservoirs in South Pars Gas Field, Iran*. Computers & Geosciences, 2009. **35**(3): p. 459-474.
- [6] Naderi-Khujin, M., V. Tavakoli, *Composition, environment, and economic value of the Permian to Cretaceous coated grains from Zagros and the Persian Gulf* International Journal of Sediment Research, 2023. **38** (3), p. 316 - 334
- [7] Tavakoli, V., *Permeability's response to dolomitization, clues from Permian-Triassic reservoirs of the central Persian Gulf*. Marine and Petroleum Geology, 2021. **123**: p. 104723.
- [8] Iraj, P.T., et al., *Quantitative analysis of geological attributes for reservoir heterogeneity assessment in carbonate sequences; a case from Permian-Triassic reservoirs of the Persian Gulf*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021.

جدول ۲. مقدار میانگین تخلخل و تراوایی گونه‌های سنگی

Rock type	Porosity (%)	Permeability (mD)	Sample
1	0.71	0.01	22
2	2.12	0.72	10
3	17.65	53.94	13
4	23.61	4.49	40
5	28.72	2.56	2



شکل ۶. نمودار تخلخل-تراوایی براساس گونه‌های سنگی

۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه برای مشخص کردن میزان کارایی نگار صوتی در تعیین نوع تخلخل و گونه‌های سنگی در سازندهای دالان-کنگان در مرکز خلیج فارس انجام شد. بعد از انجام تجزیه و تحلیل‌های مختلف بر روی مقاطع نازک و تبدیل نگار صوتی به سرعت صوتی، مدل تخلخل-سرعت بر اساس رویکرد DEM و منحنی‌های مختلف EPAR رسم شد. نتایج نشان داد که تخلخل‌های کروی یا نزدیک به کروی در تخلخل‌های معین سرعت صوتی بیشتر نسبت به تخلخل‌های تخت و باریک دارند. با استفاده از منحنی‌های رسم شده گونه‌سنگی تعیین شد که به خوبی مخزن را به واحدهای مجزا تقسیم می‌کرد که بر اساس آن کیفیت مخزنی و فرایندهای دیاژنزی قابل پیش‌بینی است.

- Petroleum Geology, 2014. **37**(3): p. 231-249.
- [21] Fournier, F., et al., *The equivalent pore aspect ratio as a tool for pore type prediction in carbonate reservoirs*. AAPG Bulletin, 2018. **102**(7): p. 1343-1377.
- [22] Lai, J., et al., *Review of diagenetic facies in tight sandstones: Diagenesis, diagenetic minerals, and prediction via well logs*. Earth-Science Reviews, 2018. **185**: p. 234-258.
- [23] Onalo, D., et al., *Data-driven model for shear wave transit time prediction for formation evaluation*. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2020. **10**: p. 1429-1447.
- [24] Tavakoli, V., *Carbonate Reservoir Heterogeneity: Overcoming the Challenges*. Springer Nature, 2019.
- [25] Sadooni, F. and A. Alsharhan, *Stratigraphy, lithofacies distribution, and petroleum potential of the Triassic strata of the northern Arabian plate*. AAPG bulletin, 2004. **88**(4): p. 515-538.
- [26] Edgell, H., *Salt tectonism in the Persian Gulf basin*. Geological Society, London, Special Publications, 1996. **100**(1): p. 129-151.
- [27] Tavani, S., et al., *Early Jurassic rifting of the Arabian passive continental margin of the Neo-Tethys. Field evidence from the Lurestan region of the Zagros fold-and-thrust belt, Iran*. Tectonics, 2018. **37**(8): p. 2586-2607.
- [28] Al-Husseini, M.L., *Origin of the Arabian Plate structures: Amar collision and Najd rift*. GeoArabia, 2000. **5**(4): p. 527-542.
- [29] Murriss, R., *Middle East: stratigraphic evolution and oil habitat*. AAPG Bulletin, 1980. **64**(5): p. 597-618.
- [30] Martin, A.Z., *Late Permian to Holocene paleofacies evolution of the Arabian Plate and its hydrocarbon occurrences*. GeoArabia, 2001. **6**(3): p. 445-504.
- [31] Zamanzadeh, S.M., et al., *Diagenetic factors controlling reservoir quality in the Faraghan Formation (Lower Permian), Darang Field, Southern Iran*. Energy exploration & exploitation, 2011. **29**(2): p. 109-128.
- [32] Craigie, N.W., P. Breuer, and A. Khidir, *Chemostratigraphy and biostratigraphy of Devonian, Carboniferous and Permian sediments encountered in eastern Saudi Arabia: An integrated approach to reservoir correlation*. Marine and Petroleum Geology, 2016. **72**: p. 156-178.
- [33] Ghosh, N., et al., *Catastrophic environmental transition at the Permian-Triassic Neo-Tethyan margin of Gondwanaland: Geochemical, isotopic and sedimentological evidence in the Spiti Valley, India*. Gondwana Research, 2016. **34**: p. 324-345.
- [9] Cantrell, D., et al., *Depositional and diagenetic controls on reservoir quality: Example from the upper Cretaceous Mishrif Formation of Iraq*. Marine and Petroleum Geology, 2020. **118**: p. 104415.
- [10] Tavakoli, V., H. Rahimpour-Bonab, and B. Esrafil-Dizaji, *Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach*. Comptes Rendus Geoscience, 2011. **343**(1): p. 55-71.
- [11] Baron, M., et al., *Evolution of hydrocarbon migration style in a fractured reservoir deduced from fluid inclusion data, Clair Field, west of Shetland, UK*. Marine and Petroleum Geology, 2008. **25**(2): p. 153-172.
- [12] Cerepi, A., J.-P. Barde, and N. Labat, *High-resolution characterization and integrated study of a reservoir formation: the danian carbonate platform in the Aquitaine Basin (France)*. Marine and Petroleum Geology, 2003. **20**(10): p. 1161-1183.
- [13] Stenftoft, N., P. Lapinskas, and P. Musteikis, *Diagenesis of Silurian reefal carbonates, Kudirka oilfield, Lithuania*. Journal of Petroleum Geology, 2003. **26**(4): p. 381-402.
- [14] Rahimpour-Bonab, H. and E. Aliakbaroust, *Pore facies analysis: incorporation of rock properties into pore geometry based classes in a Permo-Triassic carbonate reservoir in the Persian Gulf*. Journal of Geophysics and Engineering, 2014. **11**(3): p. 035008.
- [15] Eberli, G.P., et al., *Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks*. The Leading Edge, 2003. **22**(7): p. 654-660.
- [16] Anselmetti, F.S. and G.P. Eberli, *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, 1999. **83**(3): p. 450-466.
- [17] Karimpouli, S., et al., *Application of probabilistic facies prediction and estimation of rock physics parameters in a carbonate reservoir from Iran*. Journal of Geophysics and Engineering, 2013. **10**(1): p. 015008.
- [18] Jaballah, J., et al., *Physical properties of Cretaceous to Eocene platform-to-basin carbonates from Albania*. Marine and Petroleum Geology, 2021. **128**: p. 105022.
- [19] Matonti, C., et al., *Distinct petroacoustic signature in heterozoan and photozoan carbonates resulting from combined depositional and diagenetic processes*. Marine and Petroleum Geology, 2021. **128**: p. 104974.
- [20] Hairabian, A., et al., *Depositional facies, pore types and elastic properties of deep-water gravity flow carbonates*. Journal of

- 69-94.
- [46] Darcy, H., *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau: Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume*. Vol. 2. 1856: V. Dalmont.
- [47] Flügel, E. and A. Munnecke, *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Vol. 976. 2010: Springer.
- [48] Dickson, J., *Carbonate identification and genesis as revealed by staining*. Journal of Sedimentary Research, 1966. **36**(2): p. 491-505.
- [49] Dunham, R.J., *Classification of carbonate rocks according to depositional textures*. 1962.
- [50] Choquette, P.W. and L.C. Pray, *Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates*. AAPG bulletin, 1970. **54**(2): p. 207-250.
- [51] Berryman, J.G., *Single-scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poroelasticity*. The Journal of the Acoustical Society of America, 1992. **91**(2): p. 551-571.
- [52] Mavko, G., T. Mukerji, and J. Dvorkin, *The rock physics handbook*. 2020: Cambridge university press.
- [53] Haghghat, N., et al., *Permian–Triassic extinction pattern revealed by foraminifers and geochemical records in the central Persian Gulf, southern Iran*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020. **543**: p. 109588.
- [54] Xu, S. and M.A. Payne, *Modeling elastic properties in carbonate rocks*. The Leading Edge, 2009. **28**(1): p. 66-74.
- [34] Kroner, U., M. Roscher, and R.L. Romer, *Ancient plate kinematics derived from the deformation pattern of continental crust: Paleo-and Neo-Tethys opening coeval with prolonged Gondwana–Laurussia convergence*. Tectonophysics, 2016. **681**: p. 220-233.
- [35] Spencer, C.J., R.A. Harris, and J.R. Major, *Provenance of Permian–Triassic Gondwana Sequence units accreted to the Banda Arc in the Timor region: Constraints from zircon U–Pb and Hf isotopes*. Gondwana Research, 2016. **38**: p. 28-39.
- [36] Huang, Y., et al., *Two-stage marine anoxia and biotic response during the Permian–Triassic transition in Kashmir, northern India: pyrite framboid evidence*. Global and Planetary Change, 2019. **172**: p. 124-139.
- [37] Sharland, P., et al., *Arabian plate sequence stratigraphy*. GeoArabia, spec Publ 2, gulf PetroLink. 2001, Oriental Press, Manama, Bahrain.
- [38] Insalaco, E., et al., *Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture*. GeoArabia, 2006. **11**(2): p. 75-176.
- [39] Abdolmaleki, J., V. Tavakoli, and A. Asadi-Eskandar, *Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian–Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016. **141**: p. 90-113.
- [40] Tavakoli, V. and A. Jamalain, *Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan formations, the central Persian Gulf*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018. **52**: p. 155-165.
- [41] Kashfi, M., *Geology of the Permian “Super-Giant” gas reservoirs in the greater Persian Gulf area*. Journal of Petroleum Geology, 1992. **15**(3): p. 465-480.
- [42] Kashfi, M.S., *Greater Persian Gulf permian–triassic stratigraphic nomenclature requires study*. Oil and Gas Journal, 2000. **6**: p. 36-44.
- [43] Esrafil-Dizaji, B. and H. Rahimpour-Bonab, *A review of permo-triassic reservoir rocks in the zagros area, sw iran: influence of the qatar-fars arch*. Journal of Petroleum Geology, 2013. **36**(3): p. 257-279.
- [44] Liu, X., et al., *Structural characteristics and main controlling factors on petroleum accumulation in Zagros Basin, Middle East*. Journal of Natural Gas Geoscience, 2018. **3**(5): p. 273-281.
- [45] Al-Husseini, M.I., *Iran's crude oil reserves and production*. GeoArabia, 2007. **12**(2): p.