

تأثیر کانی‌زایی انیدریت بر کیفیت مخزنی دولومیت‌های سازند عرب؛ مطالعه موردی در یکی از میادین هیدروکربنی خلیج فارس

علی اسعدی^{۱*}، علیرضا شاکری^۱، علی کدخدایی^۲، حسین رحیم‌پور بناب^۲ و علی چهارزی^۱

۱- پژوهشکده علوم زمین، پردیس پژوهش و صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

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

۳- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۹

چکیده

سازند عرب، با سن ژوراسیک بالایی، به‌عنوان یک سکانس کربناته- تبخیری کلاسیک، یکی از مهمترین مخازن هیدروکربنی در خلیج فارس و نواحی اطراف آن است. در این مطالعه، با توجه به اهمیت مخازن دولومیتی در جهان و تأثیر کانی‌زایی تبخیری در این مخازن، تأثیر بافت، توزیع و فراوانی انیدریت در توالی دولومیتی سازند عرب مورد مطالعه قرار گرفته است. بر این اساس، از تلفیق نتایج حاصل از توصیف مغزه‌ها، مطالعات پتروگرافی، تخلخل-تراوایی مغزه و داده‌های فشار مؤئینه تزریق جیوه استفاده شده است. مطالعات پتروگرافی نشان داد که یک رابطه مشخص بین درصد، بافت و توزیع انیدریت در مخزن وجود دارد. انیدریت به صورت توزیع یکنواخت و پراکنده و بافت‌های پویکیلوئوپیک، نودولار، پرکننده تخلخل و لایه‌ای مشاهده می‌شود. به‌صورت کلی، توالی‌های مخزنی با توزیع یکنواخت انیدریت منطبق با نمونه‌های با درصد انیدریت بالا و بافت‌های نودولار و پرکننده تخلخل می‌باشند. در مقابل توالی‌های با توزیع پراکنده انیدریت در ارتباط با دولومیت‌های با درصد انیدریت پایین و بافت پویکیلوئوپیک مشاهده می‌شوند. ارزیابی داده‌های تخلخل، تراوایی و پارامترهای استخراج‌شده از منحنی‌های تزریق جیوه نشان داد که دولومیت‌های با درصد انیدریت پایین، بافت پویکیلوئوپیک و توزیع پراکنده، به دلیل منافذ و گلوگاه‌های ارتباطی بزرگتر، کیفیت مخزنی بالاتری دارند.

کلمات کلیدی: سازند عرب، کانی‌زایی انیدریت، داده‌های تزریق جیوه، کیفیت مخزنی
دولومیت‌ها.

مقدمه

کنگان) و عرب، که به‌ترتیب دربرگیرنده بزرگ‌ترین میادین گازی و نفتی دنیا هستند، با تبخیری‌ها همراه می‌باشند [۲]. رخساره رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی و شکستگی‌ها از عوامل مهم کنترل کیفیت مخزنی کربنات‌ها هستند [۳ و ۴].

نهشته‌های تبخیری از اجزای اصلی اکثر سیستم‌های هیدروکربنی در سازندهای نهشته‌شده در سکوه‌های گرم و خشک‌اند [۱]. دو سازند خوف (معادل دالان-

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی

کیفیت مخزنی در این دولومیت‌ها می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی اثر فراوانی، بافت‌های رایج و نحوه توزیع انیدریت بر کیفیت مخزنی و تغییرات خصوصیات مرتبط با منافذ در توالی سازند عرب می‌باشد. برای رسیدن به این هدف از مجموعه‌ای از اطلاعات شامل توصیف مغزه‌ها، پتروگرافی مقاطع نازک، تخلخل-تراوایی مغزه و نمودارهای فشار موئینه استفاده شده است.

چینه‌شناسی سازند عرب

سازند عرب با سن ژوراسیک بالایی در خلیج فارس و اطراف آن حجمی عظیم از نفت دنیا را در خود جای داده است [۶، ۱۱]. سیستم نفتی موجود در این منطقه شامل چندین سنگ منشأ ناحیه‌ای مهم، سنگ مخزن‌های متخلخل و تراوا و پوش‌سنگ‌های مؤثر می‌باشد [۱۲]. توالی ژوراسیک در یک پلاتفرم رمپ کربناته گسترده نهشته شده که گاهی خصوصیات لایه کیک‌ی را نشان می‌دهد [۱۳]. چهار عضو سازند عرب از جدید به قدیم شامل A-B-C-D احتمالاً نهشته‌های سیستم تراکت تراز پیش‌رونده^۱ و ابتدای سیستم تراکت تراز بالا^۱ و انیدریت‌های هیث، گوتیا و انیدریت‌های بین‌لایه‌ای سازند عرب احتمالاً نهشته‌های انتهایی سیستم تراکت تراز بالا^۱ هستند [۱۳]. برخلاف بیش‌تر نواحی خلیج فارس، سازند عرب در میدان مطالعه شده بیش‌تر دولومیتی است و به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌شود. توالی عرب بالایی به‌صورت دولومیتی-انیدریتی به شش لایه و عرب پایینی به یک لایه با لیتولوژی آهکی-دولومیتی تقسیم می‌شود. سیمان‌ها و لایه‌های انیدریتی تنها در لایه‌های دولومیتی دیده می‌شوند.

کانی‌زایی تبخیری^۱، به عنوان یک فرآیند دیاژنزی مهم در کربنات‌های همراه با تبخیری‌ها، عاملی مهم و تعیین‌کننده است که به صورت مؤثر می‌تواند در تفکیک رخساره‌های مخزنی از غیرمخزنی به کار رود. دولومیتی شدن و انیدریتی شدن همراه آن، نقش مهمی در کیفیت مخزنی دارند و در مطالعات مختلف به آنها توجه شده است [۲، ۳، ۵]. در مخازن دولومیتی همراه با تبخیری‌ها، بیش‌تر مواقع انیدریت با مسدود کردن گلوگاه منافذ، کیفیت مخزنی را کاهش می‌دهد. لوسیا با مطالعه کربنات‌های غرب تگزاس نشان داد که انیدریتی شدن همیشه اثر منفی ندارد و حتی برخی فابریک‌های انیدریتی می‌توانند کیفیت مخزنی را بهبود دهند [۳]. در برخی موارد انحلال انیدریت سبب ایجاد تخلخل‌های به هم مرتبط می‌شود. چهار نوع بافت انیدریت شامل پوکیکلوپوئیک^۲، نودولار^۲، لایه‌ای^۴ و پرکننده تخلخل^۵ در مخازن دولومیتی رایج‌اند و همراهی انیدریت با دولومیت‌ها نشان‌دهنده تاثیر شورا به‌غنی از سولفات در فرآیند دولومیتی شدن است [۳ و ۵]. انیدریت‌های لایه‌ای به‌صورت سدهای مخزنی عمل می‌کنند و بیش‌تر نقش پوش‌سنگ را دارند. یکی از موضوعات مهم تاثیر انیدریت بر کیفیت مخزنی دولومیت‌ها می‌باشد [۶-۷]. توزیع یک‌نواخت^۶ یا پراکنده^۷ تاثیر متفاوت بر کیفیت مخزنی دارد و مطالعه اثر بافت، توزیع و فراوانی انیدریت می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره کیفیت مخزنی دولومیت‌ها فراهم آورد. نمودارهای فشار موئینه^۸ یکی از بهترین ابزارهای در دسترس به منظور بررسی سیستم منافذ در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی می‌باشند [۸]. استخراج پارامترهای مرتبط با سیستم منافذ و گلوگاه‌های تخلخل می‌تواند به منظور سرشت‌نمایی سیستم منافذ استفاده شود [۸، ۹ و ۱۰]. توالی سازند عرب با سن ژوراسیک بالایی، در میدان مورد مطالعه به شدت تحت تاثیر دولومیتی شدن قرار گرفته است. فرآیند کانی‌زایی تبخیری یک فرآیند مهم کنترل‌کننده

1. Evaporite Mineralization

2. Poikilotopic

3. Nodular

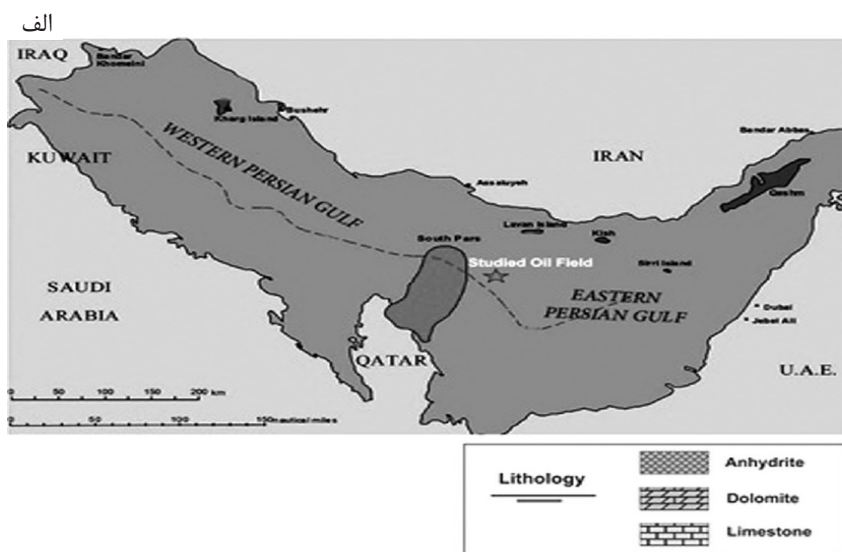
4. Bedded

5. Pore-Filling

6. Even Distribution

7. Patchy Distribution

8. Mercury Injection Capillary Pressure (MICP)



System	Series	Formation	Layering	Reservoir zonation	Lithology	
Jurassic	Upper Jurassic	Arab	Hith			
			Upper Arab		Arab A	
					Arab B	
					Arab C	
	Lower Arab		Arab D			

شکل ۱ الف) موقعیت میدان مطالعه‌شده در بخش مرکزی خلیج فارس با ستاره مشخص شده است [با برخی تغییرات از ۸] (ب) سنگ‌شناسی سازند عرب همراه با لایه‌ها و زون‌بندی سازند.

تأثیر درصد انیدریت در نمونه‌ها پنج گروه شامل نمونه‌های با انیدریت کمتر از ۱۰٪، ۱۰-۲۰٪، ۲۰-۳۰٪، ۳۰-۴۰٪ و بیش از ۴۰٪ تعیین گردید. براساس بافت چهار بافت انیدریت شامل لایه‌ای، نودولار، پرکننده تخلخل و پویکیلو توپیک مشخص شد. علاوه بر این از جنبه توزیع انیدریت در نمونه‌ها آنها به دو گروه نمونه‌های با توزیع یکنواخت و توزیع پراکنده تقسیم گردید. در نهایت نمونه‌های مربوط به هر گروه مشخص و براساس نمودار تخلخل-تراوایی و منحنی‌های فشار موئینه و پارامترهای استخراج شده از آنها تفسیر شد.

منحنی‌های فشار موئینه

روش‌های مختلفی شامل آزمایش تزریق جیوه^۱، صفحه‌های متخلخل^۲ و سانتریفیوژ^۳ برای محاسبه منحنی‌های فشار موئینه استفاده می‌شود [۱۴].

میان مورد مطالعه در بخش مرکزی خلیج فارس و جنوب شرقی جزیره لاوان واقع است (شکل ۱-الف). ستون سنگ‌شناسی، زون‌بندی و لایه‌های مخزنی سازند نشان داده شده است (شکل ۱-ب).

داده‌ها و روش مطالعه

در این مطالعه به منظور بررسی ارتباط توزیع، بافت و فراوانی انیدریت و ویژگی مخزنی دولومیت‌ها، از تلفیق اطلاعات پتروگرافی و پتروفیزیکی استفاده شده است. ۱۰۵ نمونه پلاگ مغزه که از هر کدام مقطع نازک، تخلخل-تراوایی مغزه و نیز از برخی از آنها نمودار فشار موئینه در دسترس می‌باشد به این منظور استفاده شده است. این نمونه‌ها از حدود ۱۹۰ متر مغزه موجود از دو چاه تهیه شده‌اند. به دلیل وجود انیدریت‌های ضخیم بین‌لایه‌ای در توالی سازند عرب، نمونه‌برداری با فاصله یکسان صورت نگرفته است و به صورت انتخابی از دولومیت‌ها تهیه گردیده است. تمام ۱۰۵ مقطع نازک با هدف شناسایی بهتر سیستم منافذ و ویژگی‌های مختلف انیدریت‌ها، با چسب اپوکسی آبی^۱ رنگ‌آمیزی شده است. با هدف ارزیابی

1. Blue Dyed Resin
 2. Mercury Injection Capillary Pressure (MICP)
 3. Porous Plate
 4. Centrifuge Test
 5. Characterization

زیر محاسبه می‌شود:

$$P_c = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta \cdot c}{r_c} \quad (1)$$

ت، شعاع گلوگاه منافذ به میکرومتر (μm)؛ σ ، کشش سطحی بین هوا و جیوه (485 dynes/cm)، θ ، زاویه تماس هوا و جیوه (140° درجه)، P_c ، فشار موئینه (Pisa) و C ، ثابت تبدیل (0.145) است. شعاع گلوگاه منافذ معمولاً در سه اشباع ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد جیوه محاسبه می‌شود. گلوگاه‌های بزرگ‌تر مسیر بهتری را برای انتقال سیال فراهم می‌کنند و تراوایی بالاتری نشان می‌دهند.

۴- اندیس میانگین فشار: همان‌طور که نام این پارامتر نشان می‌دهد، عدد آن نشان‌دهنده میانگین فشار سه بخش از نمودار فشار موئینه است [۸].

معادله زیر برای محاسبه این پارامتر به کار می‌رود:

$$API = \frac{P_{16} + P_{50} + P_{84}}{3} \quad (2)$$

نمونه‌های با تراوایی بالاتر، میانگین فشار موئینه کم‌تری دارند و کیفیت مخزنی بالاتری نشان می‌دهند.

۵- پارامتر سوانسون: این پارامتر یکی از پارامترهایی است که انطباقی خوب با تراوایی دارد و به‌صورت نسبت حداکثر درصد اشباع جیوه به فشار تزریق (S_{hg}/P_c) تعریف می‌شود، که در آن S_{hg} اشباع جیوه به‌صورت درصد و P_c فشار تزریق است.

۶- میانگین شعاع هیدرولیکی: برابر میانگین اندازه گلوگاه نمونه است و با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$MHR = \frac{\sum_{i=0}^n (r_i^2 \cdot (S_i - S_{i-1}))}{2 \cdot \sum_{i=0}^n (r_i \cdot (S_i - S_{i-1}))} \quad (3)$$

این پارامتر برابر مجموع شعاع گلوگاه منافذ (r) برای تمام مقادیر اشباع‌شدگی است. در معادله بالا r_i شعاع گلوگاه (میکرون) و S_i اشباع جیوه (حجم منافذ اشغال‌شده به‌صورت اعشاری) در اشباع i است.

داده‌های فشار موئینه کاربرد زیادی در محاسبه نفت درجا، سرشت‌نمایی^۱ دقیق مخازن، پیش‌بینی تولید اولیه و ارزیابی روش‌های بازیافت، بررسی ظرفیت پوش‌سنگی، تعیین زون‌های جریان‌ی، محاسبه میانگین آب اشباع‌شدگی و تعیین آب کاهش‌نیافتنی دارد [۸]. روش تزریق جیوه فشار بالا با توجه به زمان اندازه‌گیری سریع و اعمال فشار بالا (تا 6000 psi)، به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های ارزیابی منافذ در نمونه‌های با شعاع گلوگاه‌های کوچک استفاده می‌شود [۸]. این روش می‌تواند درباره پارامترهای هندسه منافذ^۲، مانند اندازه گلوگاه منافذ و توزیع آن، نوع منافذ و مقدار ارتباط آنها، اطلاعات ارزشمندی فراهم آورد [۸، ۱۵]. پس از انجام آنالیزهای تزریق جیوه بر روی نمونه‌های مغزه، برخی پارامترهای مهم در ارتباط با خصوصیات منافذ شامل فشار جابه‌جایی^۳، فشار آستانه^۴، شعاع گلوگاه منافذ^۵ در اشباع‌های متفاوت جیوه (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، اندیس میانگین فشار^۶، پارامتر سوانسون^۷ و میانگین شعاع هیدرولیکی^۸ استخراج شدند. این پارامترها به‌صورت خلاصه در زیر آورده می‌شود.

۱- فشار جابه‌جایی: فشار لازم برای تزریق اولیه یا ورود جیوه به شبکه متخلخل نمونه‌ها و معرف بزرگ‌ترین گلوگاه‌های موجود در شبکه متخلخل است. عموماً نمونه‌های با منافذ مرتبط به هم فشار جابه‌جایی پایینی دارند.

۲- فشار آستانه: فشاری که در آن جیوه شروع به وارد شدن به ساختار منافذ می‌کند و تزریق جیوه به‌سرعت افزایش می‌یابد. در این فشار، جیوه یک شبکه پیوسته در داخل منافذ ایجاد می‌کند. هر چه مقدار این فشار کم‌تر باشد، نشان می‌دهد که منافذ به‌دلیل ارتباط خوب به فشار کم‌تری برای اشباع شدن از جیوه نیاز دارند. بنابراین فشار آستانه نمونه‌های متخلخل و تراوا پایین‌تر است.

۳- شعاع گلوگاه منافذ: در هر فشار جابه‌جایی جیوه، حداقل شعاع گلوگاه منافذ که می‌تواند تحت نفوذ جیوه قرار گیرد با استفاده از معادله

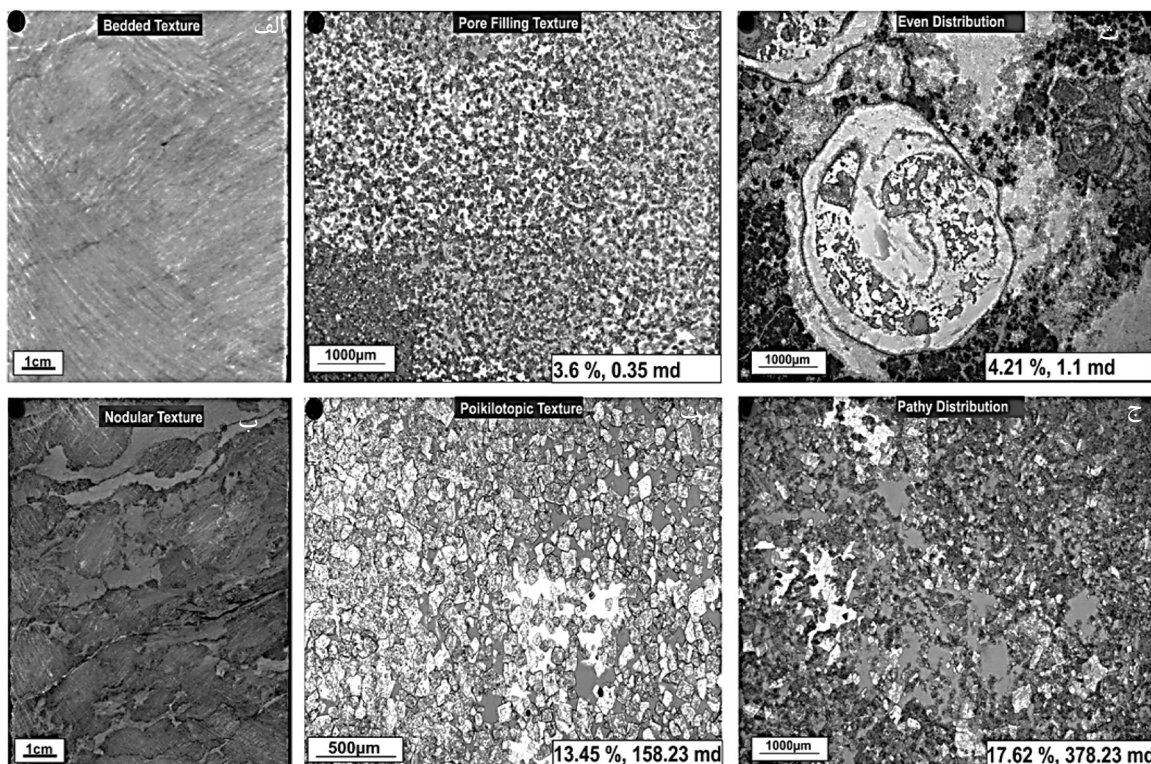
1. Characterization
2. Pore Geometry
3. Displacement Pressure (Pd)
4. Threshold Pressure (Tp)
5. Pore Throat Radius (R)
6. Average Pressure Index (API)
7. Swanson's Parameter (SP)
8. Mean Hydraulic Radius (MHR)

این حالت در دولومیت‌های سازند عرب در میدان مورد مطالعه مشاهده می‌شود. انیدریت‌های نودولی عموماً در رخساره‌هایی مشاهده می‌شوند که به صورت اولیه کیفیت مخزنی بالایی ندارند و بنابراین نمی‌توان پایین بودن کیفیت مخزنی را صرفاً به انیدریت نسبت داد. بافت انیدریتی پرکننده تخلخل به صورت یکنواخت تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، بین کریستالی، قالبی یا حفره‌ای را مسدود کرده و کیفیت مخزنی را به شدت کاهش داده است. انیدریت‌های پوکیلوتوپیک نیز، همانند نوع پرکننده تخلخل، به حالت سیمان در دولومیت‌ها دیده می‌شوند. این نوع سیمان بلورهای نسبتاً درشت دارند با حالت پراکنده عموماً گلوگاه‌های تخلخل و کیفیت مخزنی را کاهش نمی‌دهند. ارتباطی مستقیم بین نوع بافت انیدریت و توزیع آن به صورت یکنواخت و پراکنده وجود دارد. در توالی سازند عرب انیدریت‌های پوکیلوتوپیک با توزیع پراکنده کیفیت مخزنی را کاهش نداده‌اند.

هر چه مقدار این پارامتر بالاتر باشد، میانگین اندازه گلوگاه‌ها بالاتر و کیفیت مخزنی نمونه بهتر خواهد بود.

پetroگرافی انیدریت

بر اساس مطالعات پتروگرافی توالی دولومیتی-انیدریتی سازند عرب و مقایسه آنها با بافت‌های انیدریتی متداول در مخازن دولومیتی [۵]، چهار نوع بافت انیدریت لایه‌ای، نودولار، پرکننده تخلخل و پوکیلوتوپیک شناسایی و تفسیر گردید. (شکل ۲-a-d). علاوه بر این توزیع انیدریت به دو صورت یکنواخت و پراکنده می‌باشد (شکل ۲-e-f). انیدریت‌های لایه‌ای، با حالت پیوستگی جانبی و در ضخامت‌های متفاوت، سدهای بین مخزنی^۱ و پوش‌سنگ را تشکیل می‌دهند [۱۶] و در این مطالعه نمونه‌برداری و مطالعه نشده است. انیدریت‌های نودولار زمانی که پیوستگی نداشته باشند اثر کمی بر خصوصیات پتروفیزیکی دارند، ولی در صورت پیوستگی کیفیت مخزنی را کاهش می‌دهند که



شکل ۲ تصاویر مغزه (الف و ب) و مقاطع نازک میکروسکوپی (پ، ت، ث و ج) بافت و توزیع انیدریت در توالی دولومیتی-انیدریتی سازند عرب، (الف) بافت لایه‌ای، (ب) نودولار، (پ) پرکننده تخلخل، (ت) پوکیلوتوپیک، (ث) توزیع یکنواخت، (ج) توزیع پراکنده. تصاویر پ در PPL و ت، ث و ج در XPL

فشار موئینه و اندازه گلوگاه‌های تخلخل تغییرات مشخصی در گروه‌های با مقادیر انیدریت متفاوت نشان می‌شود (شکل ۳-j-a). در برخی موارد به دلیل تاثیر سایر پارامترهای دیاژنزی از قبیل انحلال ناهمگنی‌هایی در نمونه‌های دولومیت انیدریتی مشاهده می‌شود. علاوه بر این مقادیر تخلخل، تراوایی و شاخص زون جریانی، در نمونه‌های با درصد انیدریت مختلف متفاوت می‌باشد. در مجموع نمونه‌های با درصد انیدریت پایین کیفیت مخزنی بالاتری نشان می‌دهند (شکل ۳-k).

بافت انیدریت

بافت انیدریت یک عامل مهم کنترل کننده کیفیت مخزنی مخازن دولومیتی همراه با انیدریت‌ها می‌باشد. سه بافت پویکیلوتوپیک، نودولار و پرکننده تخلخل بر اساس پارامترهای استخراج شده از منحنی‌های فشار موئینه و نیز داده‌های تخلخل-تراوایی مقایسه و تفسیر شده است (جدول ۲). نمونه‌های با بافت پویکیلوتوپیک با توجه به توزیع پراکنده انیدریت بالاترین مقدار تراوایی و کیفیت مخزنی را دارند. این نمونه‌ها کم‌ترین فشار جابه‌جایی و فشار آستانه، بزرگ‌ترین اندازه شعاع گلوگاه در فشارهای مختلف، پارامتر سوانسون بالا و میانگین شعاع هیدرولیکی بالا دارند.

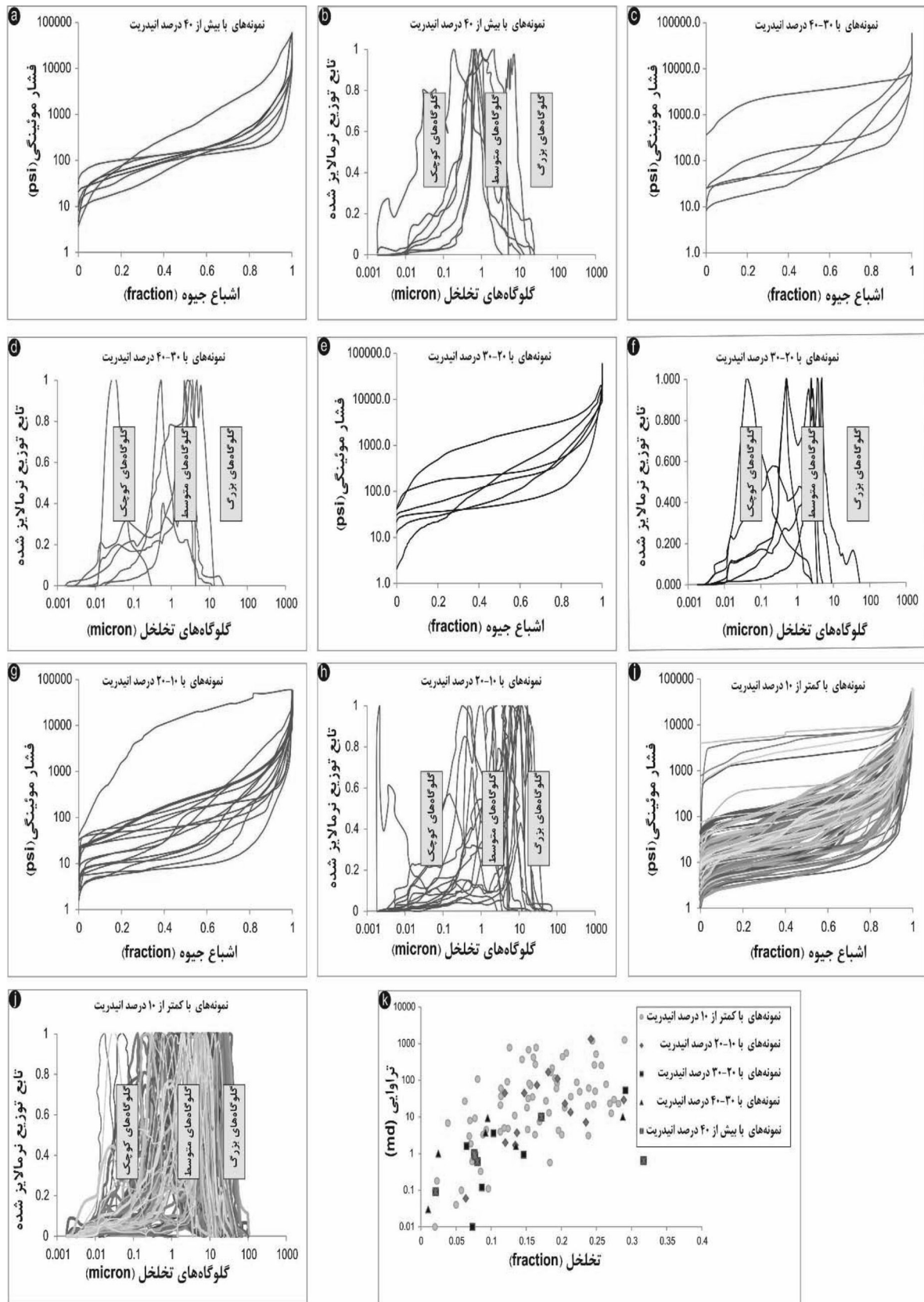
در مقابل انیدریت‌های پرکننده تخلخل و نودولار با مسدود کردن و کاهش اندازه گلوگاه‌های تخلخل تراوایی و کیفیت مخزنی را به شدت کاهش داده‌اند.

فراوانی انیدریت

فراوانی انیدریت یکی از عوامل موثر بر خصوصیات مخزنی دولومیت‌هاست. در این مطالعه برای ارزیابی تاثیر درصد انیدریت بر کیفیت مخزنی، نمونه‌ها براساس فراوانی انیدریت در پنج گروه شامل ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰ و بیش از ۴۰ درصد قرار داده شده‌اند. در مقادیر بالای انیدریت، به دلیل مسدود شدن گلوگاه منافذ، سنگ تقریباً کیفیت مخزنی خود را از دست می‌دهد و به صورت سد عمل می‌کند. براساس میانگین پارامترهای حاصل از نمودارهای فشار موئینه در فراوانی‌های متفاوت انیدریت مشاهده می‌شود که با افزایش درصد انیدریت میانگین شعاع هیدرولیکی، پارامتر سوانسون و شعاع گلوگاه منافذ در اشیاع‌های متفاوت جیوه همراه با مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه کاهش یافته است (جدول ۱). پارامتر جورشدگی گلوگاه منافذ براساس شیب بخش میانی نمودار فشار موئینه تعیین می‌شود و عموماً افزایش درصد انیدریت سبب کاهش جورشدگی می‌شود. بنابراین بهترین جورشدگی منافذ در نمونه‌های با انیدریت پایین مشاهده می‌شود. در مجموع شکل منحنی‌های

جدول ۱ میانگین پارامترهای استخراج شده از منحنی‌های فشار موئینه و خصوصیات پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی و پارامتر شاخص زون جریان) در نمونه‌های با درصد متفاوت انیدریت.

درصد انیدریت	تراوایی (md)	تخلخل (%)	شاخص زون جریان	فشار جلبجایی	فشار آستانه	شعاع گلوگاه در ۲۵٪ جیوه	شعاع گلوگاه در ۵۰٪ جیوه	شعاع گلوگاه در ۷۵٪ جیوه	اندیس میلگین فشار	پارامتر سوانسون	میلگین شعاع هیدرولیکی
۱-۰	۱۳۷/۸۸	۱۶/۳۴	۳/۴۷	۴۱/۰۸	۱۲۲/۸۵	۷/۱۴	۳/۷۶	۱/۴۲	۱۲۲/۸۵	۰/۱۱۶۴	۵/۴۴
۲۰-۱۰	۱۲۴/۱۷	۱۸/۴۲	۲/۲۸	۱۴/۹۳	۵۴/۵۴	۶/۱۷	۳/۲۴	۱/۰۶	۱۵۷۲/۹۷	۰/۰۹۹۲	۴/۲۳
۳۰-۲۰	۱۱/۸۲	۱۳/۵۸	۱/۰۹	۲۸/۹۹	۱۰۲/۸۲	۲/۴۰	۰/۸۷۷	۰/۳۶۰۵	۶۶۵/۴۴۳	۰/۰۱۵۴	۲/۴۷
۴۰-۳۰	۴/۲۷۸	۱۲/۷۵	۲/۸۲	۹۶/۴۰	۲۳۳/۴۷	۲/۱۵	۱/۰۰	۰/۳۷۹۸	۶۶۲/۲۸	۰/۰۱۸۰	۱/۶۰
<۴۰	۲/۶	۱۵/۶۲	۱/۱۴	۱۴/۸۳	۴۱/۷۵	۱/۸۰	۰/۷۳	۰/۳۰۲۶	۴۱۴/۲۴	۰/۰۲۰۴	۱/۳۰



شکل ۳ منحنی‌های فشار موئینه (a-c-e-g-i)، توزیع گلوگاه‌های تخلخل (b-d-f-h-j) و نیز توزیع تخلخل-تراوایی (k) براساس گروه‌بندی نمونه‌ها بر مبنای درصد انیدریت. (a-b) نمونه‌هایی با بیش از ۴۰ درصد انیدریت، (c-d) نمونه‌هایی با ۳۰-۴۰ درصد انیدریت، (e-f) نمونه‌هایی با ۲۰-۳۰ درصد انیدریت، (g-h) نمونه‌هایی با ۱۰-۲۰ درصد انیدریت، (i-j) نمونه‌هایی با کمتر از ۱۰ درصد انیدریت، (k) توزیع تخلخل-تراوایی در نمونه‌هایی با درصد متفاوت انیدریت.

جدول ۲ میانگین پارامترهای استخراج شده از منحنی های فشار مویینه و خصوصیات پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی و پارامتر شاخص زون جریان) در نمونه های با بافت متفاوت انیدریت.

میانگین شعاع هیدرولیکی	پارامتر سوانسون	اندیس میانگین فشار	شعاع گلوگاه در ۷۵٪ جیوه	شعاع گلوگاه در ۵۰٪ جیوه	شعاع آستانه	فشار جابه جایی	شاخص زون جریان	تخلخل (%)	تراوایی (md)	بافت انیدریت
۵/۷۱	۰/۰۷۸۸	۱۳۵/۸۲	۱/۳۳	۳/۹۵	۸/۰۷	۱۴/۲۵	۳/۳۴	۱۸/۶۸	۱۸۹/۵۴	پوکیلو توپیک
۱/۷۸	۰/۰۴۱۴	۴۶۸۲/۳	۰/۲۴۲	۰/۶۷۷	۱/۵۷	۱۸۷/۰۱	۰/۹۵۴	۱۰/۹۶	۲/۶۳۸	نودولار
۱/۸۶	۰/۰۱۳۰	۴۵۷/۲۶	۰/۳۲۰	۰/۷۹۸	۲/۲۰	۴۴/۴۳	۱/۴۶	۲۰/۰۲	۳/۴۹	پرکننده تخلخل

شعاع هیدرولیکی بالایی می باشند. نمودارهای فشار مویینه و نیز توزیع گلوگاه های تخلخل در توزیع یکنواخت و پرکننده انیدریت نشان داده شده است (شکل ۵-d-a). انیدریت یکی از عوامل مهم کاهش جورشدهگی و افزایش ناهمگنی گلوگاه های تخلخل می باشد که در نمودارهای فشار مویینه قابل مشاهده است. نمونه های دارای توزیع یکنواخت انیدریت فشار جابه جایی و فشار آستانه بالا و شعاع گلوگاه، پارامتر سوانسون و میانگین شعاع هیدرولیکی کوچکی دارند. نمودار تخلخل در برابر تراوایی در توزیع یکنواخت و پراکنده انیدریت نشان می دهد که نمونه هایی با توزیع پراکنده کیفیت مخزنی بالایی نشان می دهند (شکل ۵-e).

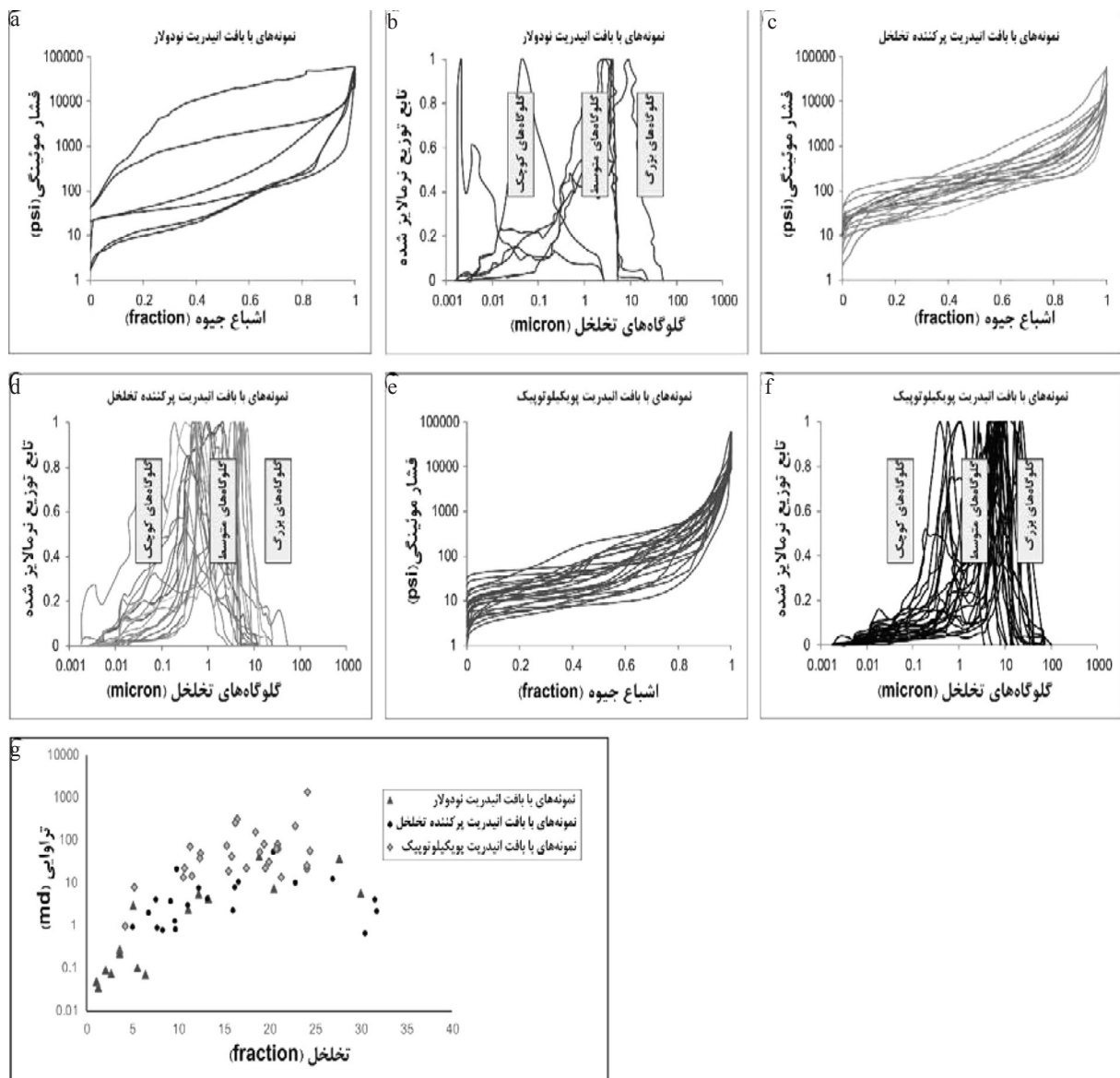
بحث

کافی زایی تبخیری یکی از پارامترهای مهم کنترل کننده کیفیت مخزنی مخازن دولومیتی همراه با تبخیری ها می باشد و بررسی تاثیر فراوانی، بافت و توزیع انیدریت می تواند اطلاعات ارزشمندی در این زمینه فراهم آورد. در بررسی فراوانی انیدریت، مشاهده می شود که در نمونه های با بیش از ۳۰ درصد انیدریت کیفیت مخزنی به دلیل مسدود شدن گلوگاه های تخلخل به شدت کاهش می یابد. علاوه بر درصد انیدریت، بافت نیز یک پارامتر مهم کنترل کننده می باشد. بافت های لایه ای، پرکننده تخلخل و نودولار عموماً کیفیت مخزنی پایین به دلیل کاهش تخلخل و مسدود شدن گلوگاه تخلخل نشان می دهند.

نمونه های با بافت انیدریتی نودولار و پرکننده تخلخل فشار جابه جایی و فشار آستانه بالا، شعاع گلوگاه کوچک، پارامتر سوانسون و میانگین شعاع هیدرولیکی کوچک دارند. جورشدهگی گلوگاه منافذ در نمونه های با بافت انیدریت نودولار و پرکننده تخلخل پایین است. شکل منحنی های فشار مویینه و نیز توزیع گلوگاه های تخلخل در انواع مختلف بافت های انیدریت نشان داده شده است (شکل ۴-f-a). جورشدهگی نمونه های با بافت انیدریت پرکننده تخلخل و نودولار عموماً کمتر از نمونه های با انیدریت پوکیلو توپیک می باشد. مقایسه بافت های مختلف انیدریت نشان می دهد که بالاترین مقادیر تخلخل-تراوایی در نمونه های با بافت پوکیلو توپیک مشاهده می شود (شکل ۴-g).

توزیع انیدریت

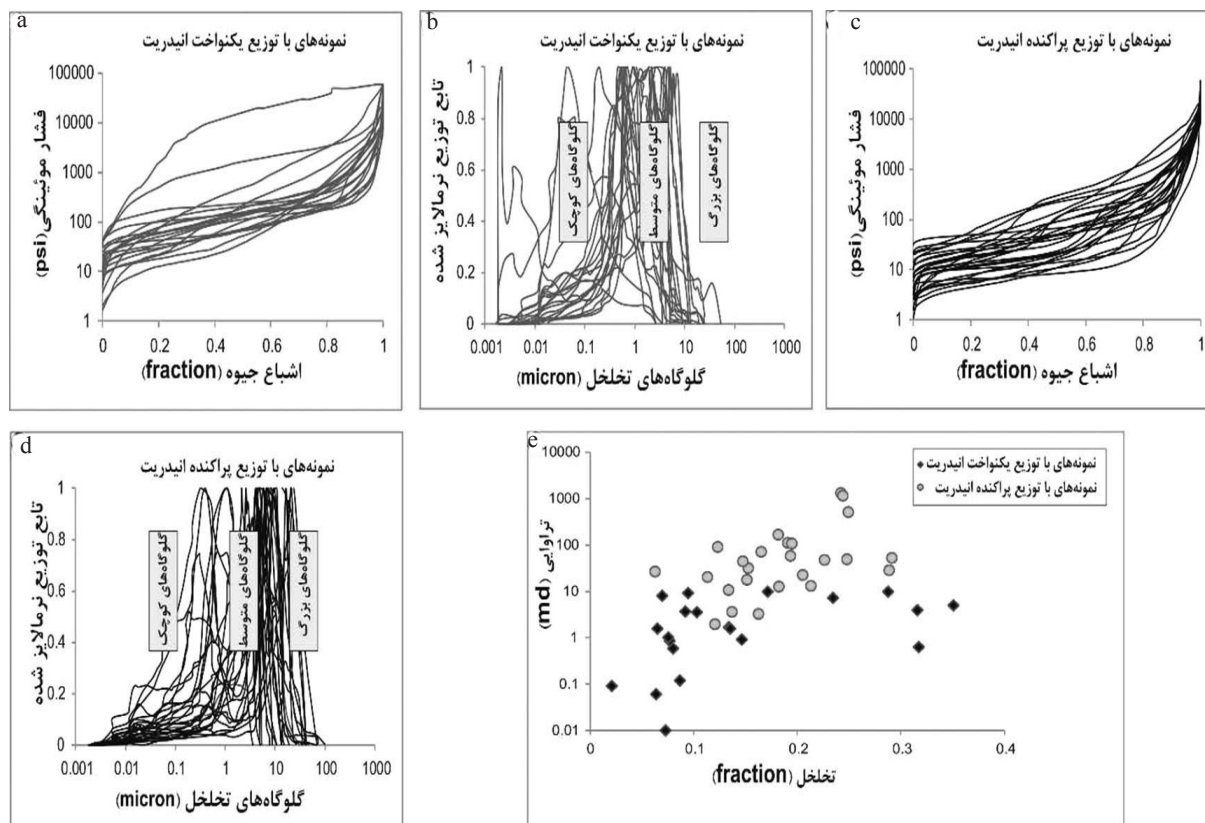
توزیع انیدریت در دولومیت های سازند عرب به صورت یکنواخت و پراکنده می باشد. انیدریت های با توزیع پراکنده (بیش تر به صورت پوکیلو توپیک و در برخی موارد پرکننده تخلخل)، عموماً به دلیل عدم پیوستگی، تاثیری قابل ملاحظه بر تراوایی و گلوگاه ارتباطی منافذ ندارند. تراوایی انیدریت های با توزیع پراکنده عموماً بیش از یک میلی داریسی است. در توزیع انیدریت به صورت یکنواخت و پراکنده، تغییرات پارامترهای فشار مویینه الگویی معین دارد (جدول ۳). نمونه های با توزیع پراکنده، دارای کمترین فشار جابه جایی و فشار آستانه و در مقابل شعاع گلوگاه، پارامتر سوانسون و میانگین



شکل ۴ منحنی‌های فشار موئینه (a-c-e)، توزیع گلوله‌های تخلخل (b-d-f) و نیز توزیع تخلخل-تراوایی (g) براساس گروه‌بندی نمونه‌ها بر مبنای بافت انیدریت. (a-b) نمونه‌های با بافت انیدریت نودولار، (c-d) نمونه‌های با بافت انیدریت پرکننده تخلخل، (e-f) نمونه‌های با بافت انیدریت پویکیلو توپیک، (g) توزیع تخلخل-تراوایی در نمونه‌هایی با بافت متفاوت انیدریت.

جدول ۳ میانگین پارامترهای استخراج‌شده از منحنی‌های فشار موئینه و خصوصیات پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی و پارامتر شاخص زون جریان) در نمونه‌های با توزیع متفاوت انیدریت.

توزیع انیدریت	تراوایی (md)	تخلخل (%)	شاخص زون جریان	فشار جابجایی	فشار آستانه	شعاع گلوله در ۲۵٪ جیوه	شعاع گلوله در ۵۰٪ جیوه	شعاع گلوله در ۷۵٪ جیوه	اندیس میانگین فشار	پارامتر سوانسون	میانگین شعاع هیدرولیکی
پراکنده	۱۶۷/۲۹	۰/۱۶۷	۳/۰۵	۱۰/۲۶	۱۷/۷۳	۶/۹۴	۳/۳۱	۱/۱۳	۲۱۱/۵۶	۰/۰۶۸	۵/۰۸
یک‌نواخت	۳/۶۴۷	۰/۱۹۶	۱/۲۲۱	۲۰/۷۳	۱۰/۳۴	۲/۰۵	۰/۸۳۴	۰/۳۵۰	۱۳۹۱/۱۷	۰/۰۲۱	۱/۹۰



شکل ۵ منحنی‌های فشار موئینه (a-c)، توزیع گلوگاه‌های تخلخل (b-d) و نیز توزیع تخلخل-تراوایی (e) براساس گروه‌بندی نمونه‌ها بر مبنای توزیع انیدریت. (a-b) نمونه‌های با توزیع یکنواخت انیدریت، (c-d) نمونه‌های با توزیع پراکنده، (e) توزیع تخلخل-تراوایی در نمونه‌هایی با توزیع متفاوت انیدریت.

می‌دهد. توزیع انیدریت که ارتباط زیادی با درصد و بافت انیدریت نشان می‌دهد از سایر پارامترها مورد مطالعه تفکیک بهتری از توزیع زون‌های مخزنی و غیر مخزنی فراهم می‌کند. انیدریت‌های با توزیع یکنواخت که عموماً مرتبط با نمونه‌های با درصد انیدریت بالا و بافت‌های پرکننده تخلخل و نودولار می‌باشند کیفیت مخزنی پایینی نشان می‌دهند. در مقابل انیدریت‌های با توزیع پراکنده که عموماً دارای بافت پویکیلوتوپیک می‌باشند کیفیت مخزنی بالاتری نشان می‌دهند. نکته مهم در بررسی کیفیت مخزنی کربنات‌ها این است که تاثیر همه پارامترها مانند تراکم، انحلال، سیمانی شدن دولومیتی شدن، سیمان کلسیتی و اندازه و شکل بلورهای دولومیت نیز در نظر گرفته شود تا بتوان کیفیت مخزنی را خوب تفسیر و توجیه کرد.

در مقابل بافت پویکیلوتوپیک عموماً به دلیل ماهیت پراکنده و عدم کاهش گلوگاه‌های تخلخل، تاثیر زیادی بر ویژگی‌های پتروفیزیکی اعمال نمی‌کند. در توالی سازند عرب به دلیل ماهیت پیوسته نودول‌های انیدریت، نمونه‌های با این بافت کیفیت مخزنی پایینی نشان می‌دهند. با این وجود در بیشتر موارد انیدریت‌های نودولی در رخساره‌های گل غالب محیط جذر و مدی و بالای جذر و مدی مشاهده شده که این نمونه‌ها به صورت اولیه نیز کیفیت مخزنی پایینی دارند. بافت پرکننده تخلخل نیز در بیشتر موارد با توزیع یکنواخت کیفیت مخزنی را به ویژه در رخساره‌های دانه غالب به شدت کاهش می‌دهد. در مقابل بافت پویکیلوتوپیک به صورت پراکنده منافذ را پر می‌کند و با توجه به عدم مسدود کردن گلوگاه‌های تخلخل، تنها تخلخل را اندکی کاهش

نمودارهای فشار موئینه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در ارزیابی مخازن دولومیتی و تأثیر انیدریتی شدن فرآهم آورد. در این مطالعه شش پارامتر فشار جابه‌جایی، فشار آستانه، شعاع گلوگاه تخلخل در درصد اشباع متفاوت جیوه، اندیس میانگین فشار، پارامتر سوانسون و میانگین شعاع هیدرولیکی از هر نمودار فشار موئینه استخراج و در ارزیابی تأثیر انیدریت بر کیفیت مخزنی استفاده گردید.

۳- در حالت کلی نمونه‌های با درصد اندریت پایین‌تر، بافت پوکیلوتوپیک و توزیع پراکنده اندریت تخلخل-تراوایی بالاتری نشان می‌دهند. براساس مقادیر پارامترهای مستخرج از نمودارهای فشار موئینه، نمونه‌های با کیفیت مخزنی بالاتر دارای فشار جابه‌جایی، فشار آستانه و اندیس میانگین فشار پایین‌تر و شعاع گلوگاه، پارامتر سوانسون و میانگین شعاع هیدرولیکی بالاتری هستند.

۴- بین درصد، بافت و توزیع انیدریت رابطه‌ای مشخص در توالی سازند عرب مشاهده می‌شود. نمونه‌های با درصد انیدریت بالاتر عموماً بافت نودولار و پرکننده تخلخل و توزیع یکنواخت انیدریت را نشان می‌دهند. در مقابل نمونه‌های با درصد انیدریت پایین‌تر عموماً بافت پوکیلوتوپیک و توزیع پراکنده انیدریت دارند.

بنابراین با ثابت دانستن این تغییرات می‌توان انتظار داشت که کیفیت مخزنی دولومیت‌های با درصد پایین انیدریت، بافت پوکیلوتوپیک و توزیع پراکنده بهتر باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر پارامترهای درصد، بافت و توزیع انیدریت در توالی دولومیتی سازند عرب در یکی از میادین هیدروکربنی خلیج فارس، براساس تلفیق توصیف مغزه‌ها، مطالعات پتروگرافی و داده‌های تخلخل-تراوایی مغزه و نیز نمودارهای فشار موئینه منجر به نتایج زیر گردید.

۱- فرآیند کانی‌زایی تبخیری یکی از عوامل مهم ایجاد ناهمگنی می‌باشد و تأثیر مهمی بر کاهش کیفیت مخزنی دارد. علاوه بر این سایر فرآیندها از قبیل انحلال، تراکم و پارامترهای مرتبط با دولومیتی شدن نیز بر توزیع ویژگی‌های مخزنی این توالی‌ها نقش دارند که به منظور سادگی در نظر گرفته نشده است. به این دلیل تا حدودی پراکندگی در توزیع پارامترهای پتروفیزیکی و شکل نمودارهای تزریق جیوه و نیز توزیع گلوگاه‌های تخلخل در بررسی پارامترهای مرتبط با فرآیند کانی‌زایی تبخیری در مخزن مشاهده می‌شود.

۲- استخراج پارامترهای مرتبط با هندسه منافذ از

مراجع

- [1]. Aleali M., Rahimpour Bonab H., Moussavi Harami R., and Jahani D "Environmental and sequence stratigraphic Implications of anhydrite textures: a case from the lower triassic of the central persian gulf," Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 75, pp. 110-125, 2013.
- [2]. Ehrenberg S. N., Nadeau P. H. and Agrawi A. A. M., "A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East," American Association of Petroleum Geologists, Vol. 91, No. 3, pp. 275-286, 2007.
- [3]. Lucia F. J., "Carbonate reservoir characterization," Springer-Verlag, Berlin, p. 341, 2007.
- [4]. Ahr W. M., "Geology of carbonate reservoirs," John Wiley and Sons, Chichester, p. 296, 2008.

- [5]. Rahimpour Bonab H., Esrafil Dizaji B. and Tavakoli V., "Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the South Pars Gas-field, offshore Iran: controls on reservoir quality," *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 33, pp. 43-66, 2010.
- [6]. Cantrell D. and Hagerty R. M. "Reservoir rock classification, Arab-D reservoir, ghawar field, Saudi Arabia," *Geo-Arabia*, Vol. 8, pp. 435-462, 2003.
- [7]. Ehrenberg S. N., Eberli G. P., Keramati M., and Moallemi A., "Permeability-porosity relationships in interbedded limestone-dolostone reservoirs," *American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 90, pp. 91-114, 2006.
- [8]. Chehrazi A., Rezaie R. and Rahimpour Bonab H., "Pore-facies as a tool for incorporation of small-scale dynamic information in integrated reservoir studies," *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 8, pp. 2002-2024, 2011.
- [9]. Rahimpour Bonab H., and Aliakbardoust E., "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*, Vol. 11, no. 3, pp. 1-20, 2014.
- [10]. Hollis C., Vahrenkamp V., Tull S., Mookerjee A., Taberner C. and Huang Y., "Pore system in heterogeneous carbonates: an alternative approach to widely-used rock-typing methodologies," *Marine Petroleum Geology*, Vol. 27, pp. 772-793, 2010.
- [11]. Cantrell D., Swart P. K., Handford R. C., Kendall C. G. and Westphal H., "Geology and Production; Significance of dolomite, Arab-D reservoir, ghawar field, Saudi Arabia," *Geo-Arabia*, Vol. 6, pp. 45-60, 2001.
- [12]. Alsharhan A. S., and Kendall C. G., "Depositional setting of the upper jurassic hith anhydrite of the Arabian Gulf: an analog to holocene evaporates of the united Arab Emirates and lake macLeod of Western Australia", *American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 78, pp. 1075-1096, 1994.
- [13]. Al Hussein M. I., "Jurassic sequence stratigraphy of the western and southern Arabian Gulf," *Geo-Arabia*, Vol. 2, pp. 361-382, 1997.
- [14]. Aliakbardoust E., and Rahimpour Bonab H., "Effects of pore geometry and rock properties on water saturation of a carbonate reservoir," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 112, pp. 296-309, 2013.
- [15]. Bliefnick D. M. and Kaldi J. G., "Pore geometry: control on reservoir properties, walker creek field, columbia and lafayette counties, Arkansas," *American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 80, pp. 1027-1044, 1996.
- [16]. Rahimpour Bonab H., Enayati Bidgoli A. H., Navidtalab A., and Mehrabi H., "Appraisal of intra-reservoir barriers in the permo-triassic successions of the central Persian Gulf, offshore Iran," *Geologica Acta, An International Earth Science Journal*, Vol. 12, no, 1, pp. 87-107, 2014.