

تعیین رخساره‌های مخزنی در سنگ‌های کربناته بر اساس منحنی‌های تزریق جیوه و انواع تخلخل در سازندهای دالان و کنگان، میدان گازی پارس جنوبی

الناز علی‌اکبر دوست^{۱*} و حسین رحیم‌پور بناب^۲

۱- دانشگاه تهران، پردیس علوم، گروه زمین‌شناسی

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

*e.aliakbardoust@gmail.com

دریافت: ۹۱/۷/۲۲ پذیرش: ۹۲/۳/۴

چکیده

حرکت سیالات در سنگ مخزن تابع شبکه‌ی منفذی در برگرفته است. منحنی‌های تزریق جیوه برای ارزیابی سنگ مخزن، تفکیک سنگ‌های با قابلیت مخزنی از انواع غیر مخزنی و تعیین ویژگی‌های شبکه‌ی منفذی (فضای بین دانه‌ای و داخل دانه‌ای و گلوگاه‌ها) مورد استفاده قرار می‌گیرند. این منحنی‌ها به عنوان ابزاری برای برقراری ارتباط میان خصوصیات رسوبی و مخزنی سنگ (قابلیت هدایت سیالات در سنگ مخزن) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه برای برقراری ارتباط میان ویژگی‌های رسوبی و مخزنی، منحنی‌های فشار مویینه بر اساس خصوصیات مویینه رده‌بندی شده‌اند. پس از مشخص کردن شاخص‌هایی از منحنی‌های فشار مویینه که مبین خصوصیات شبکه‌ی منفذی هستند رده‌بندی آن‌ها با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای (MRGC) انجام شد. بدین ترتیب شش رخساره‌ی منفذی در سنگ مخزن شناخته شده و سپس بافت رسوبی و نوع تخلخل اصلی در هر دسته با مطالعات پتروگرافی تعیین شده است. در گام آخر منحنی‌های آب - هوا حاصل از آزمایش‌های سانتیفریوژ، برای تعیین قابلیت عبوردهی سیالات در سنگ مخزن مطالعه و به طور جداگانه رده‌بندی شده‌اند. این رده‌بندی بر اساس تغییرات فشار مویینه در مقادیر متفاوت از اشباع شدگی انجام شده است. با مقایسه‌ی رخساره‌های منفذی تعیین شده و منحنی‌های فشار مویینه‌ی هوا - آب اثر خصوصیات شبکه‌ی منفذی بر رفتار آب اشباع شدگی در سنگ مخزن بررسی شده است. هماهنگی خصوصیات منحنی‌های سانتیفریوژ با رخساره‌های منفذی، نشان دهنده‌ی اهمیت انواع تخلخل و ساختار شبکه‌ی منفذی (به خصوص هندسه‌ی گلوگاه‌ها) در ویژگی‌های مخزنی و رفتار آب اشباع شدگی سنگ مخزن است. این پژوهش نشان می‌دهد تفاوت‌ها در شرایط و نوع آزمایش‌ها موجب اختلافاتی در نتایج می‌شود اما خصوصیات مویینه به شدت تحت تأثیر ساختار شبکه‌ی منفذی است. این روش برای مطالعات مخزنی و رده‌بندی رخساره‌های مخزنی قابل استفاده است و می‌تواند در کاهش ناهماهنگی‌های میان رخساره‌های زمین‌شناسی و خصوصیات جریانی سنگ در مخازن کربناته مفید باشد. در نتیجه، کیفیت سنگ مخزن و رفتار آب اشباع شدگی تابعی از ویژگی‌های شبکه‌ی منفذی هستند که خود به شدت تحت تأثیر تغییرات بافت رسوبی و عوارض دیاژنزی سنگ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تخلخل، منحنی تزریق جیوه، پارس جنوبی، سازند دالان، سازند کنگان

مقدمه

خصوصیات مخزنی و جریان سیالات را کنترل می‌کنند. آزمایش‌های فشار مویینه روشی متداول در مطالعات مخزنی، شناسایی ویژگی‌های شبکه‌ی تخلخل و رفتار سیالات در آن‌ها هستند. آزمایش‌های تزریق جیوه، سانتیفریوژ و صفحه‌ی متخلخل از متداول‌ترین این روش‌ها هستند که توسط بسیاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱]. ۲، ۳، ۴ و ۵. تفاوت در خصوصیات سیالات مورد استفاده، مقدار فشار و روش‌های متفاوت موجب می‌شود که کاربرد هر یک از این آزمایش‌ها متفاوت باشد. برای مثال، آزمایش تزریق جیوه روشی مناسب برای بررسی ویژگی‌های شبکه‌ی گلوگاه‌ها و بنابراین مناسب‌ترین راه برای تعیین

شبکه‌ی تخلخل کنترل کننده‌ی حرکت و رفتار سیالات در سنگ مخزن است که خود حاصل فرآیندهای رسوب‌گذاری و دیاژنزی است. بنابراین میان فرآیندهای رسوب‌گذاری و دیاژنزی و شبکه‌ی منفذی سنگ که خود کنترل کننده‌ی رفتار سیالات است، ارتباطی منطقی وجود دارد که البته یافتن این ارتباط کمی دشوار است. این دشواری به دلیل اهداف متفاوت دنبال شده در آزمایش‌ها، روش‌های متفاوت مورد استفاده و از همه مهم‌تر مقیاس متفاوت آن‌ها است. به عبارت دیگر فرآیندهای زمین‌شناسی با ایجاد تغییر در شبکه‌ی تخلخل،

گازی غیر همراه جهان به شمار می‌روند. این میدان از ساحل آب‌های ایران به سمت کشور همسایه، قطر، گسترش پیدا می‌کند که در آن‌جا به نام میدان شمالی نام‌گذاری شده است. پارس جنوبی کشیدگی شمالی میدان شمالی قطر می‌باشد. وسعت این میدان در بخش مربوط به ایران 3700 km^2 و در بخش مربوط به کشور قطر 6000 km^2 می‌باشد. میدان پارس جنوبی در موقعیت 52° تا $52^\circ/5$ درجه شرقی و $26^\circ/5$ تا 27° درجه شمالی قرار دارد. این میدان در 105 کیلومتری جنوب بندر عسلویه و در 175 کیلومتری غرب جزیره‌ی کیش در آب‌های خلیج فارس قرار گرفته است (شکل ۱). مخازن گازی غیر همراه که در رسوبات کربناته‌ی پرمین-تریاس در پلاتفرم فارس قرار گرفته‌اند شامل آغار، هما، نار، کنگان، دی، سپید زاخور، شانل، لامرد، عسلویه، تابناک و وراوی می‌باشند. در این میدان‌ها ویژگی‌های سیستم نفتی مشابه هم است [۷].

مواد و روش کار

برای این مطالعه از ۸۰ عدد پلاک تهیه شده از مغزه‌های حفاری حاصل از زون مخزنی مربوط به سازندهای دالان بالایی و کنگان در پنج چاه (SP-05, SP-06, SP-07, SP-08, SPD2-04) در میدان پارس جنوبی استفاده شده است (شکل ۱). آزمایش‌های فشار بالای تزریق جیوه در نیمی از نمونه‌ها (حدود ۴۰ عدد) با استفاده از سیستم اتوماتیک^۱ تا فشار ۶۰۰۰ psi انجام شده است. هم‌چنین آزمایش‌های سانتیفریوژ در سیستم هوا-آب در شرایط آزمایشگاهی با خروج تدریجی آب از سیستم تخلخل با افزایش فشار حاصل از عملکرد سانتیفریوژ در نیمی دیگر از نمونه‌ها (۳۷ عدد) انجام شده است. کار سانتیفریوژ بعد از قرارگیری نمونه‌های مغزه در دستگاه به طور مداوم آغاز می‌شود. میزان اشباع شدگی از آب در نمونه‌ها در هر مرحله از فشار با وزن کردن نمونه‌ها انجام می‌شود. کاربرد منحنی‌های تزریق جیوه به ویژه در مخازن کربناته، با ناهمگنی بسیار بالا و پیچیدگی گلوگاه‌ها که استفاده از بسیاری از روش‌های موجود دشوار می‌شود اهمیت بیشتری دارد. دلیل این اهمیت قابلیت این ابزار در شناسایی پیچیدگی‌های شبکه‌ی تخلخل در این مخازن

ارتباط هندسه‌ی گلوگاه‌ها و ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ مخزن هستند. مهم‌ترین مزیت آزمایش‌های سانتیفریوژ امکان استفاده از سیالات مخزنی و مشاهده‌ی رفتار آن‌ها در شبکه‌ی منفذی است.

در این مطالعه ویژگی‌های مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان در میدان پارس جنوبی با استفاده از نمونه‌های حاصل از مغزه‌های حفاری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مخزن کربناته‌ی مورد مطالعه با ناهمگنی بسیار بالا نشان دهنده‌ی طیف وسیعی از بافت‌های رسوبی و عوارض دیاژنزی است که این ویژگی مطالعه‌ی مخزن و برقراری ارتباط بین ویژگی‌های رسوب‌شناسی و مخزنی را بسیار دشوار می‌سازد. در این مطالعه رخساره‌های مخزنی با رده‌بندی منحنی‌های تزریق جیوه و تعیین خصوصیات زمین‌شناسی از جمله بافت رسوبی و انواع تخلخل تعیین شده‌اند. به دلیل اینکه شبکه‌ی منفذی سنگ مستقیماً خصوصیات سنگ مخزن و جریان سیالات در آن را کنترل می‌کند این روش برای رده‌بندی سنگ مخزن انتخاب شده است. به عبارت دیگر، به دلیل اینکه در مخازن کربناته ویژگی‌های شبکه‌ی تخلخل از بافت رسوبی سنگ تبعیت نمی‌کند، هدف از این رده‌بندی، استفاده‌ی مستقیم از خصوصیات شبکه‌ی تخلخل برای تعیین رخساره‌های مخزنی است. در مرحله‌ی دوم، منحنی‌های حاصل از آزمایش‌های سانتیفریوژ برای بررسی اثر خصوصیات زمین‌شناسی به خصوص انواع تخلخل بر رفتار آب اشباع شدگی در سنگ مخزن با رده‌بندی موجود مطابقت داده می‌شوند. با استفاده از این روش کاربرد رخساره‌های منفذی در پیش‌بینی رفتار سیالات مخزنی نیز تعیین می‌شود.

میدان گازی پارس جنوبی

در بخش مهمی از حوضه‌ی پلاتفرم عربی سری‌های کربناته‌ی کم عمق به همراه تبخیری‌ها به سن پرمین میانی تا تریاس پیشین را تحت عنوان سازند خوف نام‌گذاری کرده‌اند [۶]. این واحدها در خلیج فارس و زاگرس به نام سازندهای دالان و کنگان نامیده می‌شوند. این‌ها در کشورهای حوضه خلیج فارس مانند بحرین، قطر، امارات، عربستان سعودی و ایران از سنگ‌های مهم مخزنی هستند. سازندهای به سن پرمین-تریاس در خلیج فارس و معادل آن‌ها در شمال قطر میزبان بزرگ‌ترین میدان

¹Micromeritics AutoPore Mercury Porosimeter

شعاع گلوگاه‌ها: شعاع گلوگاه‌ها در لوله‌های استوانه‌ای مویین در فشارهای متفاوت قابل اندازه‌گیری است. این شاخص با استفاده از معادله لاپلاس با فرض مدل لوله‌های مویین استوانه‌ای تعیین می‌شود. معادله ۱:

$$r = \frac{2\sigma(\cos\alpha)}{P}$$

۱: شعاع گلوگاه؛ σ : کشش سطحی جیوه؛ α : زاویه بین جیوه و دیواره‌ی گلوگاه؛ و P : فشار تزریق جیوه است. **شاخص سوانسون:** این پارامتر بالاترین مقدار نسبت اشباع از جیوه به مقادیر فشار مربوطه است (S/P_c).

ارتفاع از سطح آب آزاد: میزان اشباع از سیالات با ارتفاع از سطح آب آزاد کاهش می‌یابد. شعاع گلوگاه‌ها یکی از عوامل کنترل کننده در این پارامتر است.

$$H = \frac{0.102P_c}{(\rho_w - \rho_g)}$$

H : ارتفاع از سطح آب آزاد؛ P_c : فشار مویینه؛ ρ_w و ρ_g : چگالی آب و گاز هستند.

شاخص جورشدگی گلوگاه‌ها: شاخص جورشدگی گلوگاه‌ها (PTS) از میانگین فشار تزریق جیوه در اشباع ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد به دست می‌آید. این پارامتر با تراوایی رابطه‌ی معکوس داشته و مقادیر بالای آن نشان دهنده‌ی کاهش کیفیت سیستم گلوگاه‌ها است.

رده‌بندی این پارامترها از روش خوشه‌بندی چند تفکیکی گرافیکی (MRGC)^۲ انجام گرفته است. روش مورد استفاده، این قابلیت را دارد که تعداد دسته‌های مناسب را بدون پیش فرض تعیین کرده این رده‌بندی را در شرایط وجود متغیرهای متعدد را در رده‌بندی انجام دهد. در چنین شرایطی که متغیرهای زیادی در رده‌بندی وجود دارد و یا رده‌بندی در فضای چند بعدی انجام می‌شود و تقریباً از نحوه‌ی پراکندگی داده‌ها اطلاعی در دست نیست این روش می‌تواند بهترین گزینه برای رده‌بندی داده‌ها باشد [۲۱]. با رده‌بندی پارامترها با استفاده از این روش منحنی‌های تزریق جیوه یا نمونه‌های سنگ مخزن به ۶ گروه با ویژگی‌های متفاوت تقسیم می‌شوند که هر یک معرف یک نوع هندسه‌ی منفذی هستند. علاوه بر شاخص‌های ذکر شده مقادیر فشار مویینه در نقاط اشباع ۳۵ و ۲۵ درصد (که برای مطالعه‌ی شبکه‌ی منفذی در آزمایش‌های تزریق جیوه معرفی شده‌اند) نیز برای

ناهمگن است که بسیاری از روش‌های موجود این توانایی را ندارند. مطالعات رسوب‌شناسی و پتروگرافی در نمونه‌های حاصل از مغزه‌های حفاری به طور گسترده در این میدان انجام شده است. برای رده‌بندی بافت رسوبی این نمونه‌های مخزنی از رده‌بندی دانهام [۸] و برای رده‌بندی انواع تخلخل از روش لونی [۹] استفاده شده است. در این نمونه‌ها بافت اولیه، اندازه و جورشدگی ذرات، انواع تخلخل، درصد سیمان و دیگر عوارض دیاژنزی مورد مطالعه قرار گرفته و مهم‌ترین عوامل در کیفیت مخزن شناخته شده بحث و معرفی شده‌اند.

رده‌بندی رخساره‌های مخزنی بر اساس هندسه‌ی گلوگاه‌ها

آزمایش‌های تزریق جیوه روشی دقیق برای اندازه‌گیری فشار مویینه و مطالعه‌ی ویژگی‌های شبکه‌ی گلوگاه‌های سنگ مخزن است. این قابلیت موجب شده است که منحنی‌های تزریق جیوه به عنوان ابزاری قدرتمند در مطالعات سنگ مخزن [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵] و تعیین گونه‌های سنگی [۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹] مورد استفاده قرار گیرند. رده‌بندی سنگ مخزن بر اساس هندسه‌ی گلوگاه‌ها یا آنالیز رخساره‌ی منفذی^۲ نسل جدیدی از روش‌های آنالیز رخساره است [۲۰] که در آن کلیه‌ی ویژگی‌های مربوط به شبکه‌ی منفذی می‌تواند نقش داشته باشد. به عبارت دیگر ویژگی‌های معابر سیالات مخزنی پارامترهای کنترل کننده در این نوع رده‌بندی هستند. در این مطالعه برای تعیین رخساره‌های منفذی، ویژگی‌های منحنی‌های تزریق جیوه با استخراج پارامترهایی به صورت کمی درآمده و سپس منحنی‌ها بر اساس این پارامترها رده‌بندی شده و با این روش قابلیت استفاده از منحنی‌ها در تعیین رخساره و مدل‌سازی مخزن افزایش یافته است (جدول ۱). این پارامترها شامل شعاع گلوگاه‌ها در نقاط متفاوت اشباع از جیوه (۳۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪)، فشار ورود جیوه به شبکه متخلخل (Pd)، پارامتر سوانسون (SP)، جورشدگی گلوگاه‌ها (PTS) و ارتفاع از سطح آب آزاد (HAFWL) می‌باشند. این پارامترها برای این‌که بتوانند معرف کیفیت مخزن باشند باید ضریب هم‌بستگی مناسبی (بالاتر از ۰/۶) با تراوایی نشان دهند (شکل ۲).

³Multi resolution graphic based clustering (MRGC)

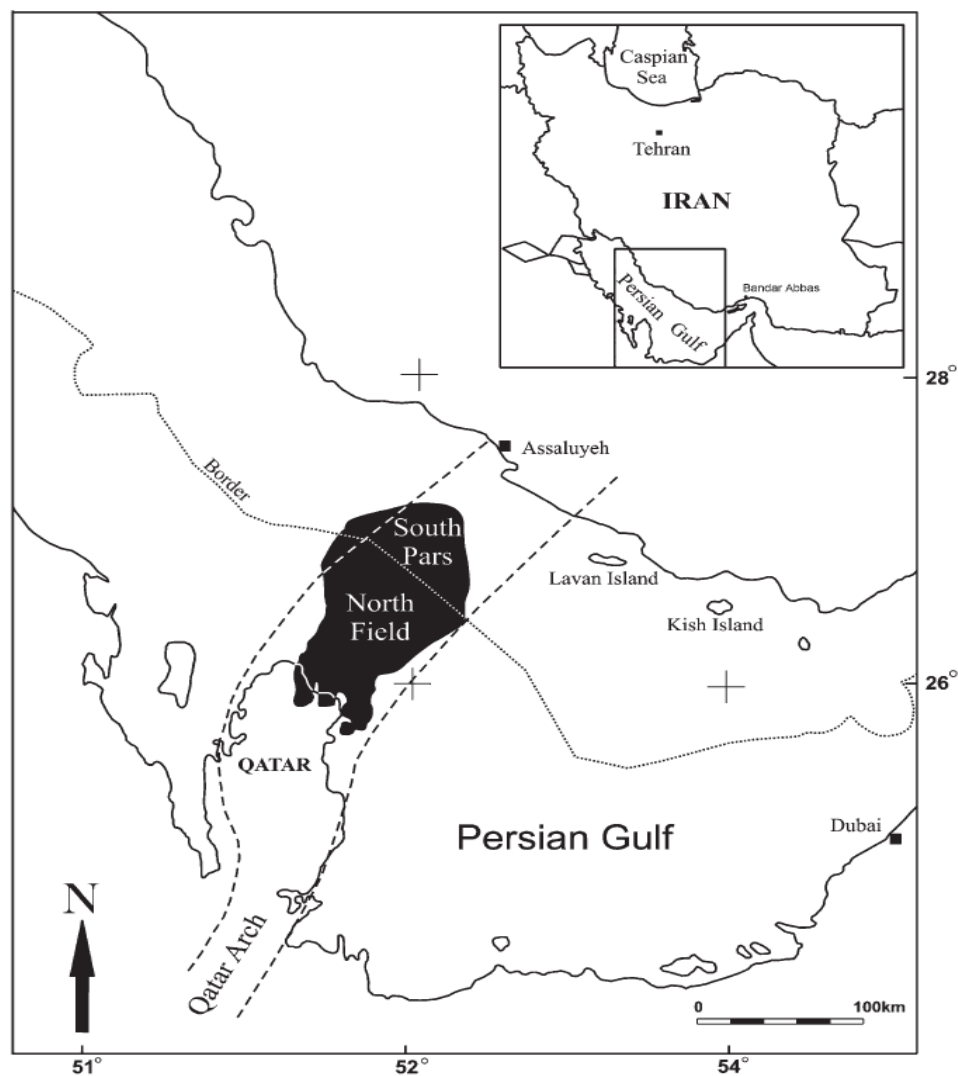
²Pore facies analysis

گلوگاه‌های نوع ۱

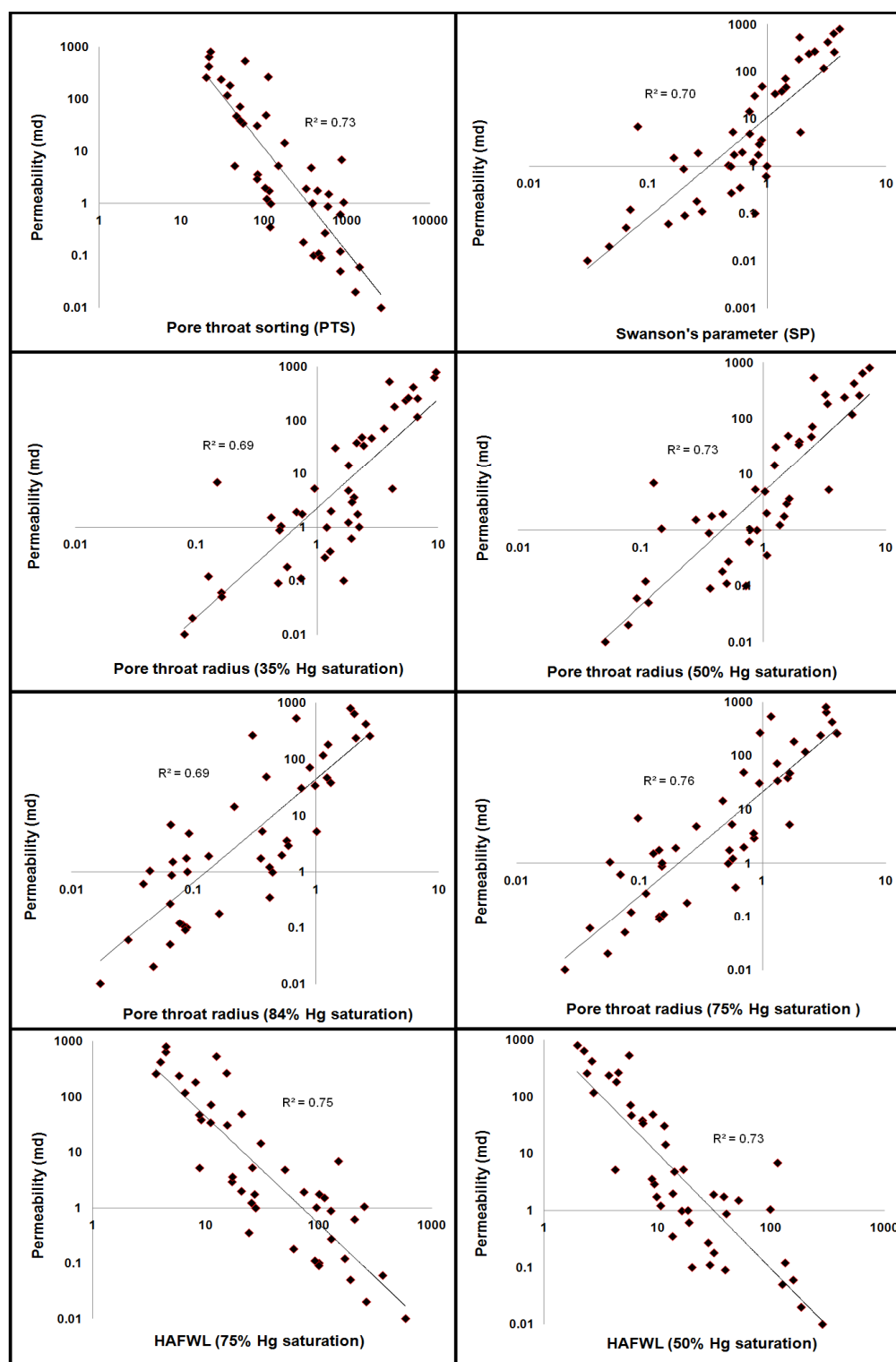
ویژگی‌ها: پایین‌ترین فشار ورود جیوه به شبکه‌ی منفذی یعنی کمتر از ۱۰ psi؛ اشباع بیش‌تر از ۹۰ درصد حجم منفذی در فشار ۱۰۰ psi؛

این رخساره حاوی بهترین سنگ‌های مخزنی از نظر کیفیت شبکه‌ی تخلخل است که جورشدگی و پیوستگی بسیار بالای گلوگاه‌ها در شکل آ-۳ قابل مشاهده است. خم چنین کشیدگی بسیار زیاد منحنی‌های پراکندگی اندازه‌ی گلوگاه‌ها و تک قله‌ای بودن آن‌ها نشان دهنده‌ی یکنواختی و جورشدگی بالای گلوگاه‌ها است (شکل ب-۳).

مطالعه‌ی منحنی‌های تزریق جیوه استخراج شده‌اند که به دلیل پیچیدگی شبکه‌ی منفذی در این مخزن و بنابراین پیچیده ساختن ارتباط ساختار منفذی، با تراوایی رابطه‌ی مورد نظر با تراوایی را نشان نداده و در نتیجه در رده‌بندی منحنی‌های تزریق جیوه مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. رده‌بندی پارامترهای استخراج شده از منحنی‌های تزریق جیوه و میانگین آن‌ها در هر دسته در جدول ۱ آورده شده و در ادامه خصوصیات کلی هر گروه ذکر شده است. این خصوصیات از منحنی‌های تزریق جیوه‌ی مربوط به هر دسته و منحنی میانگین هر دسته قابل مشاهده است.



شکل ۱. نقشه‌ی محل قرارگیری میدان گازی پارس جنوبی [۲۷]



شکل ۲. رابطه‌ی شاخص‌های استخراج شده از منحنی‌های تزریق جیوه و تراوایی

جدول ۱. مقادیر میانگین شاخص‌های استخراج شده از منحنی‌های MICP و دیگر شاخص‌های پتروفیزیکی مربوط به رخساره‌های منفذی تعیین شده

رخساره‌ی منفذی	K (md)	PHI (%)	R 75%	R 50%	FZI	RQI	PTS	HAFWL 75% (m)	HAFWL 50% (m)	SP	Pd (Kpa)	مهم‌ترین بافت رسوبی و نوع تخلخل
۱	۴۰۹/۵۳	۲۳/۵۱	۳/۲۲	۵/۸۸	۴/۴۰	۱/۲۶	۲۵/۲۱	۴/۷۹	۲/۶۱	۰/۷۷	۴۹/۵۱	دولوگ‌ترین استون با تخلخل بین دانه ای با پیوستگی بالا
۲	۱۵۱/۵	۲۳/۲۸	۱/۳	۲/۴۵	۱/۹۶	۰/۷۰	۶۴/۶۷	۱۲/۰۵	۶/۲۴	۰/۳۶	۹۰/۶۵	دولوگ‌ترین استون با تخلخل بین دانه ای و سیمان بین دانه ای
۳	۶/۶۵	۲۳/۴۴	۰/۷۴	۱/۵	۰/۸۱	۰/۱۶	۱۲۷/۷۱	۲۳/۶	۱۰/۷۳	۰/۲	۱۲۰/۴۵	گرین استون با تخلخل قالبی خوب جور شده
۴	۱/۹۶	۱۸/۵	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۸۶	۰/۱۰	۴۲۸/۸	۷۱/۱	۴۱/۱	۰/۰۵	۴۹۴/۲۶	گرین استون با تخلخل قالبی پر شده و جورشدگی ضعیف
۵	۰/۴۹	۱۴/۰۷	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۰۵۴	۵۳۴/۹۱	۱۳۲/۶۱	۲۱/۳۵	۰/۱۵	۵۰/۴۴	گرین استون با تخلخل های قالب و حفره ای بدون جورشدگی
۶	۰/۴۳	۲۱/۳۱	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۳۲	۱۱۷۵/۰۴	۲۷۵/۰۳	۱۴۵/۶	۰/۰۴	۸۶۰/۸۸	گرین استون با تخلخل های کاملاً جدا از هم و مسدود شده

گلوگاه‌های نوع ۲

ویژگی‌ها: فشار ورود جیوه بین ۱۰ تا ۲۰ psi؛ اشباع حدود ۸۰ درصد از حجم منفذی در ۱۰۰ psi؛ این رخساره‌ی منفذی نماینده‌ی دومین رتبه از نظر کیفیت سنگ مخزن در نمونه‌های مخزنی است. مقایسه‌ی خصوصیات منحنی‌های تزریق جیوه (شکل ج-۳) با رخساره‌ی قبل نشان دهنده‌ی پیوستگی کمتر و کوچک‌تر بودن شعاع گلوگاه‌ها در این گروه است (شکل د-۳) که کاهش کشیدگی منحنی‌های پراکندگی اندازه‌ی گلوگاه‌ها و دوقله‌ای بودن تعدادی از آن‌ها این ویژگی‌ها را تأیید می‌کند.

گلوگاه‌های نوع ۳

فشار ورود جیوه به شبکه‌ی منفذی حدود ۲۰ psi و اشباع حدود ۶۵ درصد از حجم منفذی در ۱۰۰ psi (شکل ر-۳) این گروه را در رتبه‌ی سوم در میان رخساره‌های منفذی قرار می‌دهد. در مقایسه با گروه‌های قبل، این خصوصیات حاکی از پیوستگی کمتر، اندازه‌ی کوچک‌تر و به طور کلی کیفیت پایین‌تر شبکه گلوگاه‌ها است (شکل س-۳).

گلوگاه‌های نوع ۴

فشار ورود جیوه به شبکه‌ی منفذی در این گروه بین ۷۰ تا ۹۰ psi است؛ در فشار ۱۰۰ psi تنها حدود ۵ درصد از حجم منفذی از جیوه اشباع شده است (شکل ص-۴). بنابراین شعاع گلوگاه‌ها و پیوستگی و جورشدگی آن‌ها بسیار ضعیف‌تر از گروه‌های قبل می‌باشد. بر اساس منحنی‌های پراکندگی شعاع گلوگاه‌ها (شکل ع-۴) در این نمونه‌ها حجم بالاتری از گلوگاه‌های با تخلخل میکروسکوپی دیده می‌شود (حرکت قله‌ی منحنی‌ها به سمت گلوگاه‌های کوچک‌تر از ۱ میکرون).

گلوگاه‌های نوع ۵

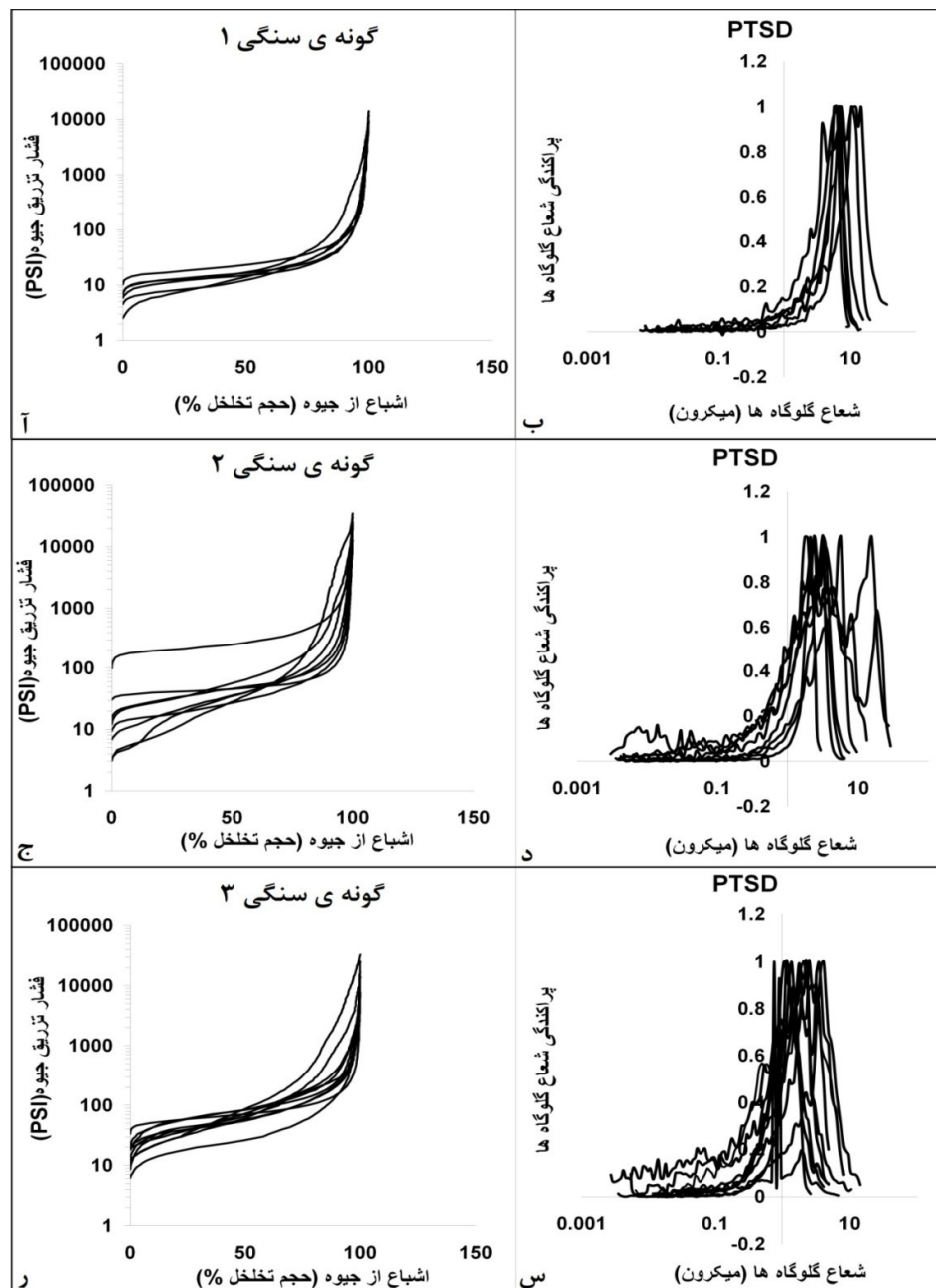
فشار ورود جیوه به شبکه‌ی منفذی بسیار کم (کم‌تر از ۱۰ psi)، در ۱۰۰ psi حدود ۴۵ درصد از حجم منفذی از جیوه اشباع شده است. این گروه از سنگ‌های مخزنی با محدوده‌ی بسیار وسیع شعاع گلوگاه‌ها مشخص شده‌اند. پراکندگی بسیار زیاد اندازه‌ی منافذ و گلوگاه‌های آن‌ها چهره‌ای متفاوت به منحنی‌های تزریق جیوه و پراکندگی اندازه‌ی گلوگاه‌ها در این گروه بخشیده است (شکل‌های ن-۴، و-۴).

گلوگاه‌های نوع ۶

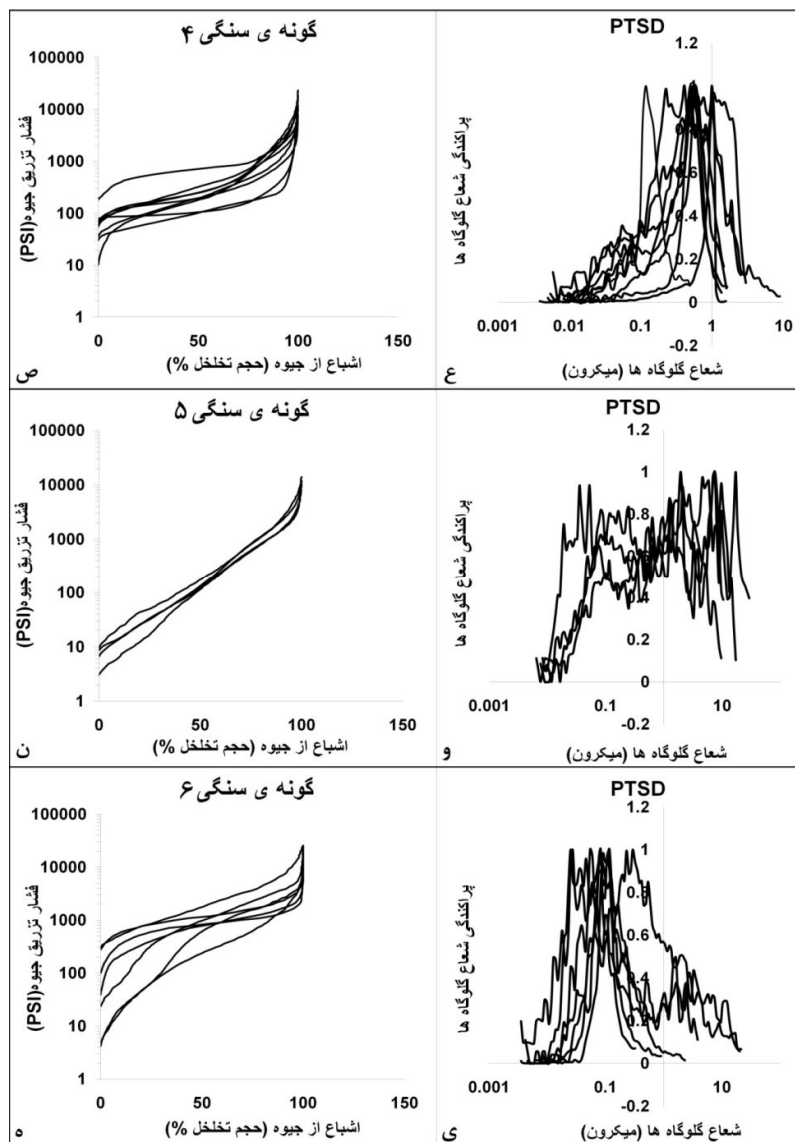
رخساره‌ی منفذی ۶ نماینده‌ی سنگ‌های غیر مخزنی است. فشار ورود جیوه به شبکه‌ی منفذی بالای ۱۰۰ psi است و هم‌چنین برای اشباع ۵۰ درصد از حجم منفذی به فشاری بیش‌تر از ۱۰۰۰ psi نیاز است (شکل‌های ۴-۴-۴-۴).

بر اساس رده‌بندی ارائه شده توسط اشنایدر و همکاران [۲۲ و ۲۳]، این نمونه‌ها با نشان دادن چنین فشاری در

نقطه‌ی اولیه ورود جیوه و سایر نقاط در اشباع شدگی‌های متفاوت در دسته‌ی سنگ‌های غیر مخزنی قرار می‌گیرند. فشار بسیار بالای مورد استفاده در آزمایش‌های تزریق جیوه موجب دستیابی سیال به بخش اعظم شبکه‌ی منفذی می‌شود که این فشار در روش‌های دیگر موجب افزایش درصد سیالات باقی‌مانده در شبکه‌ی منفذی و یا عدم امکان دستیابی سیالات به بخش عمده‌ای از این شبکه می‌شود.



شکل ۳. منحنی‌های تزریق جیوه و پراکندگی اندازه‌ی گلوگاه‌ها مربوط به رخساره‌های منفذی ۱ تا ۳



شکل ۴. منحنی‌های تزریق جیوه و پراکندگی اندازه‌ی گلوگاه‌ها مربوط به رخساره‌های منفذی ۴ تا ۶

خصوصیات پتروفیزیکی- مخزنی در آن انکار ناپذیر است. نکته‌ی قابل توجه این است که ایجاد ارتباط میان ویژگی‌های زمین‌شناسی و خصوصیات پتروفیزیکی و مخزنی به علت تفاوت در روش‌های مورد استفاده در مطالعات و مقیاس آن‌ها دشوار اما با مطالعات جامع و البته با نتایج کافی و دقیق امکان‌پذیر است. به عبارت دیگر، تغییرات در فرآیندهای تشکیل یک سنگ، کلیه‌ی اجزای آن را تحت تاثیر قرار داده، هر گونه تغییر در یک مقیاس با نشانه‌هایی در مقیاس دیگر همراه است. در این بخش مهم‌ترین بافت‌های اولیه و نوع تخلخل در نمونه‌های موجود در هر رخساره‌ی منفذی معرفی می‌شود.

بافت سنگ و انواع تخلخل مربوط به رخساره‌های منفذی

فرآیندهای رسوبی و دیاژنزی به ترتیب به عنوان کنترل کننده‌ی بافت اولیه‌ی سنگ و عامل ایجاد کننده‌ی تغییرات نهایی در آن، ویژگی‌های کنونی سنگ مخزن و خصوصیات شبکه منفذی در آن را کنترل می‌کنند. به طور کلی فرآیندهای زمین‌شناسی با ایجاد تغییر در شبکه تخلخل سنگ، ظرفیت ذخیره و عبوردهی یا رفتار سیالات را در آن کنترل می‌کنند. بنابراین وجود ارتباطی تنگاتنگ بین تغییرات حاصل از فرآیندهای زمین‌شناسی و

رخساره‌ی منفذی ۱

دولوگرینستون با تخلخل بین دانه‌ای و پیوستگی بسیار بالا اصلی‌ترین ویژگی‌های سنگی در این گروه هستند (شکل ۵ الف). تراوایی بالا در این نمونه‌ها به علت به هم پیوستگی بسیار خوب شبکه‌ی تخلخل و حضور بسیار کم سیمان بین دانه‌ای است.

رخساره‌ی منفذی ۲

دولوگرینستون با میانگین اندازه‌ی ذرات متوسط تا درشت و جورشده‌گی خوب، به همراه تخلخل بین دانه‌ای مهم‌ترین ویژگی‌های نمونه‌های این گروه هستند (شکل ۵ ب). عامل اصلی تفکیک کننده‌ی این سیستم از تخلخل مشابه در گروه قبل حضور سیمان بین دانه‌ای است. این سیمان در حدی است که خصوصیات شبکه‌ی منفذی را تغییر داده است. سیمان بین دانه‌ای (انیدریت و دولومیت) به شکل بخشی فضای بین دانه‌ای را پر کرده و موجب کاهش قطر آن‌ها در بخش‌هایی از این نمونه‌ها شده است.

رخساره‌ی منفذی ۳

گرینستون با تخلخل قالبی بافت و نوع تخلخل اصلی در این گروه است (شکل ۵ پ). گریناستون‌ها غالباً آبییدی با جورشده‌گی خوب هستند که موجب شده جورشده‌گی خوب تخلخل قالبی در این نمونه‌ها شده است. تخلخل‌های قالبی غالباً حفظ شده و دوباره توسط سیمان پر نشده‌اند که این دومین دلیل خوب بودن جورشده‌گی در نمودارهای تزریق جیوه در آن‌ها است.

رخساره‌ی منفذی ۴

در این گروه نیز گرینستون با تخلخل قالبی بافت اولیه و نوع تخلخل اصلی هستند. محدوده‌ی وسیع‌تر در اندازه‌ی ذرات و پر شدن تخلخل قالبی به صورت فراگیر و نامنظم با سیمان موجب کاهش جورشده‌گی در شبکه‌ی منفذی شده است (شکل ۵ ت). طبیعتاً با افزایش سیمان در قالب‌های تخلخل میزان سیمان در گلوگاه‌های آن‌ها نیز افزایش می‌یابد و این پر شدگی در گلوگاه‌ها مانند قالب‌ها به صورت بخشی و نامنظم است. بنابراین افزایش درصد سیمان در این نوع تخلخل علاوه بر مسدود کردن گلوگاه‌ها با کاهش جورشده‌گی در شبکه‌ی منفذی نیز همراه است.

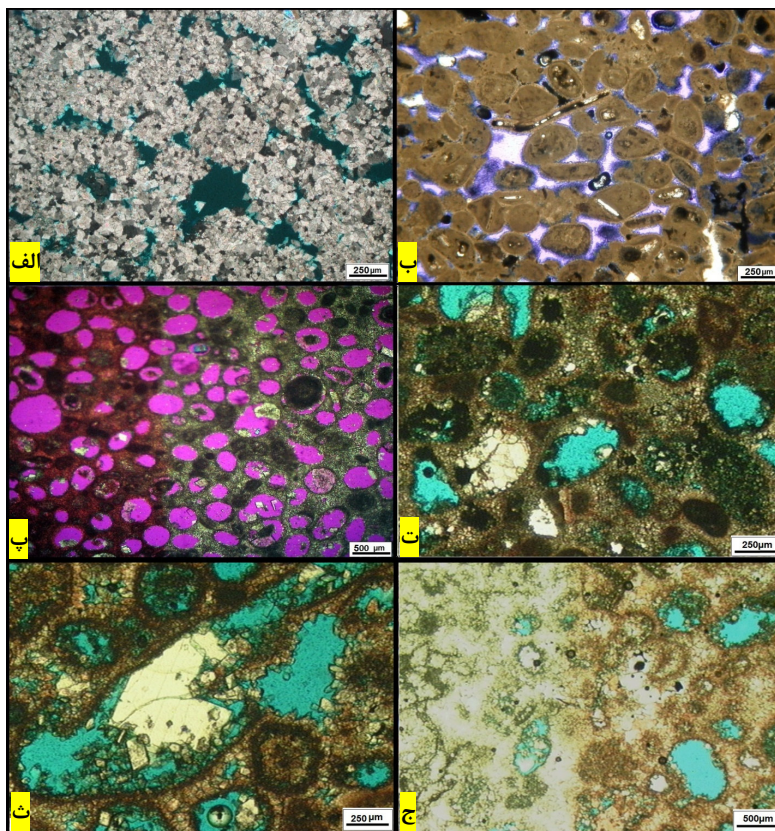
رخساره‌ی منفذی ۵

ویژگی اصلی قابل مشاهده در نمونه‌های این گروه، وجود انواع تخلخل داخل دانه‌ای، بین دانه‌ای، قالبی و حفره‌ای با محدوده‌ی وسیع اندازه‌ی آن‌ها در نمونه‌ها است (شکل ۵ ث). این تغییرات در اندازه‌ی گلوگاه‌های مربوطه نیز وجود دارد که از منحنی‌های تزریق جیوه قابل مشاهده است. انحلال در این نمونه‌ها به صورت نامنظم انجام گرفته و موجب ایجاد حفراتی جدا از هم در اندازه‌های مختلف شده است که نه تنها اثری در بهبود کیفیت مخزنی ندارد بلکه به دام افتادن سیالات در شبکه‌ی تخلخل را نیز افزایش می‌دهد. بخش مهمی از این انواع تخلخل نیز به صورت تخلخل میکروسکوپی و داخل دانه‌ای است که نقشی در بهبود کیفیت سیستم تخلخل ندارد.

رخساره‌ی منفذی ۶

شبکه‌ی تخلخل در نمونه‌های مربوط به این گروه سنگی تا حد زیادی توسط سیمان مسدود شده است. گریناستون با تخلخل قالبی (که حجم بالایی از آن پر شده) کاملاً جدا از هم و با جورشده‌گی بسیار ضعیف، فراوان‌ترین ویژگی‌های سنگی و نوع تخلخل قابل مشاهده در این گروه است (شکل ۵ ج). تخلخل و تراوایی مربوط به نمونه‌ی سنگ مخزن مربوط به این عکس دقیقاً ۱۰ درصد و ۰/۰۶ میلی‌داری است. بنابراین حضور قالب‌های تخلخل در این سنگ به دلیل پراکندگی در سنگ و عدم ارتباط مناسب با یکدیگر نه تنها اثری در افزایش کیفیت مخزن نداشته است بلکه وجود قالب‌های بزرگ و پراکنده احتمال به دام افتادن سیالات در شبکه‌ی تخلخل را نیز افزایش می‌دهد که در ادامه بیش‌تر در این مورد بحث می‌شود.

در رده‌بندی ارائه شده، هر یک از رخساره‌های منفذی شامل تعدادی از بافت‌های سنگی و انواع تخلخل هستند که در اینجا فقط فراوان‌ترین نوع در هر گروه به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های هر رخساره آورده شده است. بنابراین می‌توان گفت که تغییرات ایجاد شده در اثر دیاژنز به گونه ای بافت اولیه‌ی آن‌ها را تغییر داده که نمونه‌های مشابه از نظر بافت رسوبی در گروه‌هایی با کیفیت مخزنی متفاوت قرار گرفته‌اند و البته عکس این شرایط نیز صادق است. برای مثال در گروه ۶ که حاوی نمونه‌های غیر مخزنی است علاوه بر مهم‌ترین نوع ذکر شده انواع دیگری از بافت



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی رخساره‌های منفذی الف: دولوگ‌رینستون - رخساره‌ی منفذی ۱ PPL (۳۱۵۷/۸ m): ب: دولوگ‌رینستون با سیمان بین دانه‌ای - رخساره‌ی منفذی ۲ PPL (۲۹۹۲/۹ m): پ: گرینستون با تخلخل قالبی - رخساره‌ی منفذی ۳ PPL (۳۰۹۵/۲ m): ت: گرینستون با تخلخل قالبی - رخساره‌ی منفذی ۴ PPL (۳۱۱۹/۴ m): ث: گرینستون با تخلخل قالبی و حفره‌ای - رخساره‌ی منفذی ۵ PPL (۲۹۱۶/۲ m): ج: گرینستون با تخلخل قالبی - رخساره‌ی منفذی ۶ PPL (۲۹۳۴/۲ m).

شبکه تخلخل وجود دارد. در این روش امکان شبیه‌سازی فشار تدفین نیز وجود دارد. در این آزمایش‌ها سیال تر کننده با افزایش فشار حاصل از عملکرد سانتریفیوژ از شبکه تخلخل خارج می‌شود.

سنگ با شبکه‌ی متخلخل مسدود شده نیز می‌تواند حضور داشته باشد.

منحنی‌های فشار مویینه هوا-آب حاصل از آزمایش‌های سانتریفیوژ

آزمایش‌های سانتریفیوژ یکی از متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری فشار مویینه است. این روش در سیستم‌های زهکشی^۱ و نوشاب^۲ سیالات مخزنی قابل استفاده است. این روش به علت محدودیت فشار مورد نیاز، اثر ترکندگی سیالات مورد استفاده و در نتیجه پراکندگی غیرمنظم سیالات در شبکه تخلخل، راه مناسبی برای سنجش ویژگی‌های هندسه‌ی شبکه‌ی منفذی به خصوص اندازه‌گیری شعاع و پراکندگی شعاع گلوگاه‌ها نیست. از طرفی در این روش به علت استفاده از سیالات مخزنی، در مقایسه با تزریق جیوه امکان مطالعه‌ی رفتار سیالات در

اثر هندسه‌ی شبکه تخلخل و خصوصیات بافت سنگ بر آب اشباع شدگی در سنگ مخزن منحنی‌های هوا-آب حاصل از آزمایش‌های سانتریفیوژ بر اساس تغییرات رفتار آب کاهش نیافتنی و تغییرات فشار در مقادیر متفاوت از آب اشباع شدگی (۰.۳۵٪، ۰.۶۰٪ و ۰.۸۵٪) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بررسی و مشاهده‌ی رفتار آب اشباع شدگی در نمونه‌هایی با ویژگی‌های سنگی مشابه (بافت، نوع تخلخل و درصد سیمان) با رخساره‌های منفذی اساس این رده‌بندی است. بر اساس نتایج به دست آمده این نمونه‌ها رفتار قابل تفکیکی در آب اشباع شدگی

^۱drainage

^۲imbibition

نشان می‌دهند. در نتیجه با بررسی انطباق این دو رده‌بندی اهمیت ساختار منفذی و خصوصیات سنگی بر رفتار سیالات در سنگ مخزن مشخص می‌شود. نمونه‌های مورد مطالعه به شش گروه تقسیم شده‌اند. هر گروه دارای ویژگی‌های متفاوت از نظر بافت رسوبی، نوع تخلخل و درصد سیمان است. گروه ۱ با کم‌ترین میزان آب کاهش نیافتنی و فشار مویینه در مقادیر متفاوت از اشباع شدگی حاوی بهترین نمونه‌های سنگ مخزن است. تراوایی و دیگر خصوصیات پتروفیزیکی نیز این را تأیید می‌کنند. دولوگرینستون با تخلخل بین دانه‌ای و مقادیر بسیار کم سیمان بین دانه‌ای، اصلی‌ترین خصوصیات پتروگرافی در این گروه است. در گروه ۲ رفتار آب اشباع شدگی با خصوصیات پتروفیزیکی مطابقت ندارد که علت آن پر شدگی بخشی از گلوگاه‌ها با سیمان است. دولوگرینستون با تخلخل بین دانه‌ای و سیمانی که به صورت بخشی این تخلخل را مسدود کرده اصلی‌ترین ویژگی‌های سنگی آن است. این مسدود شدگی موجب می‌شود که بخشی از سنگ با گلوگاه‌های با شعاع کوچک‌تر حرکت سیالات را به تأخیر انداخته یا آن را متوقف کند. در حالی که در بخش دیگری از شبکه تخلخل سیالات راحت‌تر به حرکت خود ادامه می‌دهند و موجب بالا رفتن تراوایی می‌شوند. این رفتار دوگانه موجب اختلاف فشار در مقادیر متفاوت از آب اشباع شدگی نیز می‌شود. گرینستون با تخلخل قالبی خوب جور شده اصلی‌ترین ویژگی‌های پتروگرافی گروه شماره ۳ است. اما این نوع تخلخل در گروه ۴ در بسیاری از بخش‌ها به صورت نامنظم پر شده است و شبکه تخلخل در آن به صورت گسترده با سیمان مسدود شده است. بنابراین شبکه تخلخل جورشدگی خود را از دست داده و تا حد زیادی مسدود شده است. در گروه ۴، ۵ و ۶ به ترتیب کاهش کیفیت سنگ مخزن و افزایش فشار مویینه قابل مشاهده است. مهم‌ترین علت جدایی گروه ۵ از ۴ تفاوت در نوع تخلخل آن‌ها است. از تفکیک این دو گروه مشخص می‌شود که حضور این حفرات و قالب‌های بزرگ در تخلخل که به صورت جدا از هم هستند نه تنها اثری در بهبود کیفیت مخزن ندارد بلکه باعث افزایش به دام انداختن سیالات نیز می‌شود تا حدی که کیفیت ساختار تخلخل در نمونه‌های این دسته پایین‌تر از گروه ۴ قرار گرفته است. نهایتاً گروه ۶ دارای نمونه‌هایی با خصوصیات

غیرمخزنی است. فشار بسیار بالای مورد نیاز برای خروج سیال از شبکه‌ی منفذی در این نمونه‌ها بیش‌تر از محدوده‌ی قابل دستیابی در آزمایش‌های سانتیفریوژ است. شبکه تخلخل در نمونه‌های سنگ مخزن در گروه شماره ۶ نیز تا حد زیادی با سیمان پر شده، تخلخل‌های قالبی کاملاً جدا از هم و به صورت پراکنده و با جورشدگی ضعیف هستند. با تبدیل تخلخل بین دانه‌ای به انواع قالبی و حفره‌ای به دلیل تبدیل شبکه‌ی منظم و پیوسته‌ی بین دانه‌ای به انواع بسته‌تر، امکان جابه‌جایی سیالات دشوار می‌شود. این پدیده به دلیل عدم ارتباط مناسب قالب‌ها و حفرات در شبکه‌ی منفذی است. جدول ۲ مقادیر میانگین اشباع شدگی نسبت داده شده به این گروه و رخساره‌ی منفذی ۶ را نشان می‌دهد. در منحنی میانگین تزریق جیوه مربوط به این رخساره، فشار بسیار بالایی برای ورود جیوه به شبکه‌ی منفذی قابل مشاهده است. باید به این نکته توجه کرد که در آزمایش‌های تزریق جیوه فشار بسیار بالایی (تا ۶۰۰۰ psi) مورد استفاده قرار می‌گیرد و این فشار به سیال مورد استفاده در آزمایش کمک می‌کند تا به بخش عمده‌ای از شبکه‌ی منفذی راه پیدا کند، اما در آزمایش‌های سانتیفریوژ عدم حضور این فشار مورد نیاز موجب به دام افتادن حجم زیادی از سیال (آب) در شبکه‌های منفذی با اتصال ضعیف می‌شود. بار دیگر لازم به ذکر است مقادیر میانگین‌گیری شده در جدول ۲ مقادیر میانگین نسبت داده شده به رخساره‌های تعیین شده است. منحنی‌های میانگین هوا - آب در هر دسته و میانگین پارامترهای استخراج شده از این منحنی‌ها در شکل ۶ و جدول ۲ قابل مشاهده است.

بحث

در این مطالعه ابتدا سنگ مخزن بر اساس هندسه‌ی شبکه‌ی منفذی رده‌بندی و سپس مهم‌ترین ویژگی‌های پتروگرافی در هر دسته مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر گروه از سنگ‌های مخزنی با هندسه‌ی گلوگاه‌های مشابه دارای محدوده‌ی خاصی از تغییرات در بافت و نوع تخلخل هستند. بنابراین هر گونه تغییر در بافت سنگ، شبکه‌ی گلوگاه‌ها و ویژگی‌های آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هم‌چنین ویژگی‌های مخزنی تنها وابسته به بافت اولیه‌ی سنگ نیست و اثر دیاژنز معمولاً خصوصیات اولیه سنگ را در مخازن کربناته کاملاً دگرگون

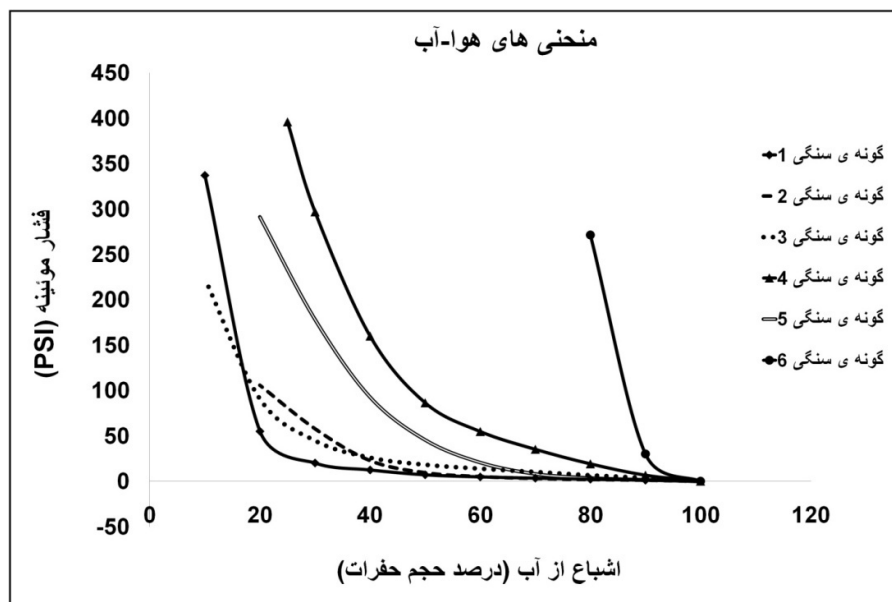
می‌سازد. بنابراین برای مطالعه‌ی سنگ مخزن و به خصوص مدل‌سازی مخزن عوارض دیاژنزی باید در نظر گرفته شوند [۲۴]. تغییرات در تراوایی نیز با رده‌بندی سنگ‌های مخزنی بر اساس هندسه‌ی گلوگاه‌ها هماهنگ است و میانگین تراوایی از رخساره منفذی ۱ تا ۶ کاهش می‌یابد. مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی کنترل‌کننده‌ی تخلخل و تراوایی در این میدان دولومیتی شدن، سیمانی شدن و انحلال است [۷ و ۲۵]. این ویژگی‌ها در رخساره‌ی منفذی ۱ به روشنی قابل مشاهده است. خصوصیات این گروه از سنگ‌های مخزنی از دیگر گروه‌ها به روشنی تفکیک می‌شوند و همین خصوصیات است که معمولاً مورد توجه است و اهمیت بیش‌تری برای فرد مطالعه کننده دارد. در این گروه بافت اولیه‌ی سنگ مهم‌ترین نقش را در کیفیت مخزن دارد. جورشدگی و شعاع گلوگاه‌ها از رخساره‌ی منفذی ۱ تا ۶ کاهش می‌یابد. این تغییرات با تبدیل تخلخل بین دانه‌ای به نوع قالبی و حفره‌ای، افزایش درصد سیمان و کاهش جورشدگی در شبکه‌ی تخلخل همراه است. کاهش اهمیت بافت اولیه در کیفیت مخزن و هم‌چنین کاهش نقش جورشدگی و اندازه‌ی ذرات در جورشدگی شبکه‌ی منفذی به دلیل افزایش اثر دیاژنز به ویژه افزایش درصد سیمان است. شبکه‌ی تخلخل در رخساره‌ی منفذی ۴ به طور گسترده‌ای توسط سیمان مسدود شده است اما کیفیت شبکه‌ی تخلخل در این گروه از سنگ‌های مخزنی در مقایسه با نمونه‌های موجود در رخساره‌ی منفذی ۵ با داشتن حفره‌ها و قالب‌های تخلخل بزرگ‌تر وضعیت بهتری را نشان می‌دهد. علت این پدیده را می‌توان حضور شبکه‌ی نامنظم و ناپیوسته‌ی تخلخل در نمونه‌های رخساره‌ی منفذی ۵ معرفی کرد که تنها موجب افزایش درصد تخلخل شده و اثری در بهبود کیفیت مخزن نداشته است. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که اثر پارامترهای ذکر شده به ویژه فرآیندهای دیاژنزی در مخازن کربناته مهم‌ترین کنترل‌کننده‌ی خصوصیات شبکه منفذی و در نتیجه خواص مخزنی هستند.

در رده‌بندی سنگ مخزن با استفاده از آزمایش‌های سانتیفریوژ، نمونه‌های با بافت و انواع تخلخل متفاوت به روشنی رفتار متفاوتی در اشباع شدگی از یکدیگر نشان می‌دهند. نمونه‌های سنگی مشابه با رخساره‌های منفذی تعیین شده عموماً رفتاری قابل تفکیک از سایر نمونه‌ها

نشان می‌دهند و بنابراین قابلیت رده‌بندی شدن را دارند. منحنی‌های هوا-آب بر اساس درصد آب کاهش نیافتنی و فشار مویینه در درصدهای متفاوت اشباع شدگی از هم تفکیک شده‌اند. بنابراین شش گروه موردنظر بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی و رفتار آب اشباع شدگی از هم تفکیک می‌شوند. در گروه ۱ نمونه‌هایی با کم‌ترین میزان آب کاهش نیافتنی و فشار مویینه حضور دارند. دولوگرینستون با تخلخل بین دانه‌ای به هم پیوسته و درصد سیمان بین دانه‌ای بسیار کم ویژگی‌های اصلی این نمونه‌های سنگ مخزن هستند. نمونه‌های با ویژگی‌های ذکر شده در رده‌بندی داده‌های تزریق جیوه نیز در اولین گروه با بالاترین کیفیت مخزنی قرار می‌گیرند که این نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های با تخلخل بین دانه‌ای بهترین شرایط را در عبور دادن سیالات و کمترین درصد به دام افتادن سیالات را نشان می‌دهند. در گروه ۲، رفتار آب اشباع شدگی با خصوصیات پتروفیزیکی هماهنگ نیست. این عدم هماهنگی به دلیل پیچیدگی‌های سنگ مخزن است. در بخش‌های قبل ذکر شد که در این گروه از سنگ‌های مخزن تخلخل به صورت نامنظم با سیمان پر شده است. این ویژگی موجب کاهش شعاع گلوگاه‌ها و مسدود شدن آن‌ها در بخشی از نمونه می‌شود. بنابراین مقداری از آب کاهش نیافتنی توسط گلوگاه‌های کوچک شده به دام افتاده و فشار اعمال شده توسط سانتیفریوژ توانایی تخلیه‌ی این بخش‌ها را ندارد. این پیچیدگی‌ها در مخازن کربناته بسیار فراوان است که نیاز به مطالعات گسترده دارد. در گروه ۵ رفتار اشباع شدگی در نمونه‌های با تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای ضعیف‌تر از نمونه‌های گروه ۴ با شبکه‌ی تخلخل مسدود شده‌ی آن است. سیستم تخلخل در نمونه‌های گروه ۵ با جورشدگی ضعیف و نامنظم دلیل این پدیده است. این قالب‌ها و حفره‌های بزرگ موجب به دام افتادن سیالات شده و حرکت آن‌ها را مختل می‌کنند. اثر حفره‌های بزرگ در رفتار آب اشباع شدگی سنگ تا حدودی توسط برخی از مؤلفین گزارش شده است [۲۶]. این نتایج اول نشان می‌دهد که درصد تخلخل در این نوع مخازن اثر مهمی در بهبود کیفیت مخازن ندارد و دیگر اینکه جورشدگی تخلخل و نسبت گلوگاه‌ها به بدنه‌ی تخلخل در ویژگی‌های مخزنی و رفتار سیالات بسیار با اهمیت است. این نتایج اهمیت ویژگی-های شبکه تخلخل را در رفتار سیالات در مخزن نشان

برای مثال نمونه‌های با کیفیت رخساره‌ی ۱ همیشه در دسته‌ی بهترین نمونه‌های مخزنی قرار می‌گیرند بنابراین، پتانسیل بالایی از نظر کیفیت مخزنی دارند. روابط سنگ-سیال می‌تواند این ویژگی را بهبود ببخشد و یا کاهش دهد اما نمونه‌های موجود در رخساره‌های منفذی ۵ و ۶ هیچ‌گاه شرایط مورد نیاز برای یک سنگ مخزن ایده‌آل را به دست نمی‌آورند.

می‌دهد. نتایج رده‌بندی‌های معرفی شده تا حد زیادی با هم هماهنگ هستند و نمونه‌های با ویژگی‌های زمین‌شناسی و هندسه‌ی گلوگاه‌های متفاوت رفتار متفاوتی را در اشباع از سیالات مخزنی نشان می‌دهند. نهایتاً لازم به ذکر است که روابط سنگ و سیال مانند تر شدگی و غیره در پراکندگی سیالات در شبکه‌ی منفذی اهمیت بسیاری دارند اما این ویژگی‌ها بعد از شناسایی دقیق خصوصیات شبکه تخلخل باید بررسی شوند.



شکل ۶. میانگین منحنی‌های هوا-آب نسبت داده شده به رخساره‌های منفذی

جدول ۲. میانگین مقادیر اشباع آب در فشارهای متفاوت در منحنی‌های هوا-آب مربوط به رخساره‌های منفذی ۱ تا ۶

فشار (اشباع ۸۵٪)	فشار (اشباع ۶۰٪)	فشار (اشباع ۳۵٪)	فشار (اشباع ۱۶٪)	Swir%	FZI	RQI	PHI %	K (md)	رخساره ی منفذی
۱/۶۷	۴/۷۵	۱۵/۱۴	۶۴/۲۶	۹/۵۵	۶/۱۵	۱/۴۴	۱۹/۲	۴۰۶/۴	۱
۱/۷۱	۵/۲۴	۳۸/۰۸	۱۲۲/۴۳	۱۶/۵۶	۱/۱۹	۰/۴۴	۲۷/۷	۵۳/۶	۲
۴/۸۵	۱۳/۸۱	۳۱/۹۲	۱۳۱/۷۱	۱۰/۶۰	۰/۸۲	۰/۲۰	۲۰/۸	۸/۶	۳
۱۲/۴۶	۵۴/۷۸	۲۰۹/۶۴	۴۹۰/۵۹	۲۷/۵۴	۰/۶۸	۰/۱۴	۱۷/۲	۳/۳	۴
۲/۶۴	۲۰/۷۴	۱۲۰/۸۷	۵۲۹/۱۴	۱۹/۵۲	۰/۳۱	۰/۰۶	۱۸/۵	۰/۸۵	۵
۱۰۶/۲۸	>۲۰۰۰	>۲۰۰۰	>۲۰۰۰	۷۱/۱	۰/۶۳	۰/۰۴	۶/۵	<۰/۱	۶

نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه شامل موارد زیر می‌باشند:

۱- مطالعه‌ی دقیق در ویژگی‌های شبکه منفذی سنگ مخزن برای ارزیابی واقعی آن ضروری است. این مطالعات شامل مطالعات میکروسکوپی انواع تخلخل و هندسه گلوگاه‌های این شبکه است. دلیل این ضرورت کنترل کنندگی شبکه‌ی منفذی بر توانایی سنگ در عبور دادن و ذخیره‌ی سیالات است. شبکه تخلخل در سنگ ارتباط دهنده‌ی خصوصیات استاتیک و دینامیک مخزن است.

۲- برای شناسایی عوامل مؤثر در کیفیت سنگ مخزن و ارزیابی اهمیت آن‌ها باید نتایج مطالعات رسوب‌شناسی و پتروگرافی آن‌ها در خصوصیات مخزنی مقایسه و انطباق داده شود. با افزایش پیچیدگی سنگ مخزن در اثر فرآیندهای دیاژنزی ضرورت کار افزایش پیدا می‌کند. با رده‌بندی سنگ مخزن بر اساس بافت رسوبی امکان مطالعه‌ی تغییرات خصوصیات مخزنی و رفتار سیالات در شبکه‌ی منفذی وجود ندارد. از طرفی اثر فرآیندهای زمین‌شناسی بر خصوصیات شبکه‌ی منفذی، خصوصیات گلوگاه‌ها و رفتار اشباع شدگی سنگ مخزن در هر مقیاسی قابل پیگیری است که البته مطالعات دقیقی برای یافتن این روابط مورد نیاز است.

۳- هماهنگی خصوصیات منحنی‌های سانتیفریوژ با رخساره‌های منفذی، نشان دهنده‌ی اهمیت انواع تخلخل و ساختار شبکه‌ی منفذی به خصوص هندسه‌ی گلوگاه‌ها در ویژگی‌های مخزنی و رفتار اشباع شدگی سنگ مخزن است. این هماهنگی نشان می‌دهد که با وجود تفاوت‌ها در شرایط و نوع آزمایش‌ها که موجب اختلافاتی در نتایج می‌شود، خصوصیات مویینه به شدت تحت تأثیر ساختار شبکه‌ی منفذی است.

۴- منحنی‌های تزریق جیوه ابزار مناسبی برای مطالعه و رده‌بندی سنگ مخزن هستند. این روش قابل استفاده برای مطالعات مخزنی و رده‌بندی رخساره‌های مخزنی است که می‌تواند در کاهش ناهماهنگی‌های میان رخساره‌های زمین‌شناسی و خصوصیات جریان‌ی سنگ در مخازن کربناته اثر مهمی داشته باشد.

۵- داده‌های به دست آمده از نتایج منحنی‌های تزریق جیوه قابلیت استفاده در رده‌بندی سنگ مخزن و زون‌های جریان‌ی نیز دارند که از اهداف این پژوهش نبوده است.

۶- با وجود اینکه لاگ‌های رسوبی در نشان دادن موقعیت رخساره‌ای مخزن، پراکندگی عمودی رخساره‌ها و مدل سازی مخزن بسیار مفید هستند ولی به دلیل ملاحظات امنیتی از به کار بردن آن‌ها در مقاله پرهیز شده است.

منابع

- [1] Newsham, K. E., Rushing, J. A., Lasswell, P. M (2003) Use of Vapor Desorption Data to Characterize High Capillary Pressures in a Basin-Centered Gas Accumulation with Ultra-Low Connate Water Saturations, Society of petroleum engineers SPE 84596.
- [2] Newsham, K. E., Rushing, J. A., Lasswell, P. M., Blasingame, T. A., A (2004) Comparative Study of Laboratory Techniques for Measuring Capillary Pressures in Tight Gas Sands. Society of petroleum engineers, SPE 89866.
- [3] Saller, B., Hamon, G (2005) Micritic limestone of the middle east: influence of the wettanility, pore network and experimental technique on drainage capillary pressure, SCA-08.
- [4] Masalmeh, S. K., Jing, X. D (2006) Capillary pressure characteristics of carbonate reservoirs: relationship between drainage and imbibitions curves, Society of core analysts SCA-16.
- [5] Wardlaw, N. C (1976) Pore Geometry of Carbonate Rocks as Revealed by Pore Casts and Capillary Pressure. AAPG, 60, 245-257.
- [6] Alsharhan, A. S (2006) Sedimentological character and hydrocarbon parameters of the middle Permian to Early Triassic Khuff Formation, United Arab Emirates. GeoArabia, 11, 121-158.
- [7] Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., Tavakoli, V (2010) Dolomitization and Anhydrite precipitation in Permo-Triassic Carbonates at the South Pars gasfield, offshore Iran: controls on reservoir quality. J. Petrol. Geol. 33, 43-66.
- [8] Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to their depositional texture Classification of Carbonate Rocks. Vol. 1 ed W. E Ham (Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists) pp 108-21.
- [9] Lønøy, A (2006) Making sense of carbonate pore systems. AAPG, 90, 1381-1405.
- [10] Purcell, W. R (1949) Capillary pressures: their measurement using mercury and the calculation of permeability there from Trans.AIME, 186, 39-48.
- [11] Dullien, F.A.L., and Dhawan, G. K (1974) Characterization of pore structure by a combination of quantitative photomicrography and mercury porosimetry. Journal of Colloid and Interface Science, v.47, no. 2, p. 337-349.

- Geology and SCAL. Society of petroleum engineers 2008 Abu Dhabi International Petrol. Exhibition and Conf., 3-6 November: Society of petroleum engineers, 118284.
- [25] Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B (2011) Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach, *Geoscience*, 343, 55-71.
- [26] Masalmeh, S.K., Jing, X. D (2004) Carbonate SCAL: characterization of carbonate rock types for determination of saturation functions and residual saturations. Society of Core Analysts held in Abu Dhabi, UAE, 5-9 October, 2004-08.
- [27] Aali, J., Rahimpour-Bonab, H., and Kamali, M.R (2006) Geochemistry and origin of the world largest gas field from Persian Gulf, Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 50, 161-175.
- [12] Jennings, J.B (1987) Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology. *AAPG Bulletin*, v.71, no.10, p.1196-1209.
- [13] Melas, F.F. & Friedman, G. M (1992) Petrophysical Characteristics of the Jurassic Smackover Formation, jay field, Conecuh embayment, Alabama and florida, *AAPG.*, 76, 81-100.
- [14] Luo, P. & Machel, H. G (1995) Pore Size and Pore Throat Types in a Heterogeneous Dolostone Reservoir, Devonian Grosmont Formation, Western Canada Sedimentary Basin. *AAPG.*, 79, 1698-1720.
- [15] Bliefnick, D. M. & Kaldi, J. G (1996) Pore Geometry: Control on Reservoir Properties, Walker Creek Field, Columbia and Lafayette Counties, Arkansas. *AAPG.*, 80, 1027-1044.
- [16] Leal, L., Barbato, R., Quaglia, A., Porras, J. C., Lazarde, H (2001) Bimodal behavior of mercury injection capillary pressure curve and its relationship to pore geometry, rock quality and production performance in a laminated and heterogenous reservoir. Society of petroleum engineers SPE 69457.
- [17] Porras, J .C. and Campos, O (2001) Rock Typing: A Key Approach for Petrophysical Characterization and Definition of Flow Units, Santa Barbara Field, Eastern Venezuela Basin. Society of petroleum engineers, SPE 69458.
- [18] Bagheri, A. M. Biranvand, B (2006) Characterization of reservoir rock types in a heterogeneous clastic and carbonate reservoir. *JUST* 32(2), p 29-38.
- [19] Skalinski, M., Gottlib-Zeh. S. and Moss, B (2006) Defining and predicting rock types in Carbonates-preliminary results from an integrated approach using core and log data from the Tengiz field. *Petrophysics*, VOL. 47, NO.1; P. 37-52.
- [20] Chehrazi, A., Rezaee, R., Rahimpour-Bonab, H (2011) Pore-facies as a tool for incorporation of small-scale dynamic information in integrated reservoir studies. *J. Geophys. Eng.* 8, 202-224.
- [21] Ye, S. J. & Rabiller, P. A (2000) New Way for Elecro-Facies Analysis: Multi-Resolution Graph-Based Clustering. *SPWL*, 41st Annual Logging Symposium, June 4-7.
- [22] Sneider, R. M (1987) Practical petrophysics for exploration and development: AAPG Education Department Short Course Notes, variously paginated.
- [23] Vavra, C. L., Kaldi, J. G. & Sneider, R. M (1992) Geological Applications of Capillary Pressure: A Review. *American association of petroleum geologists*, 86, 840-850.
- [24] Gomes, J.S., Riberio, M.T., Strohmenger, C.J., Neghaban, S., Kalam, M.Z (2008) Carbonate reservoir Rock Typing-the Link between