

اهمیت کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری

گلناز جوزانی کهن^{1*}؛ غلامحسین نوروزی²؛ حسین معماریان³؛ فریدون سبحانی⁴

1- دکترای اکتشاف معدن، استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، gikohan@ut.ac.ir

2- دکترای ژئوفیزیک اکتشافی، استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

3- دکترای شکستگی در سنگ، استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

4- دکترای رسوب شناسی، استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت 30 بهمن 1395، پذیرش 21 شهریور 1396)

چکیده

باتوجه به نقش کلیدی کانی‌های رسی در ارتباط با ارزیابی کیفیت مخازن هیدروکربوری، در این مقاله با بیان خصوصیات ویژه و منحصر به فرد کانی‌های رسی، مروری بر اهمیت و نقش کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری شده است. نحوه تأثیر آن‌ها بر نگارهای پتروفیزیکی و شیل‌ها به عنوان مخازن نامتعارف به تفصیل بررسی شده است. دلایل اهمیت شناسایی نوع، میزان و الگوی توزیع کانی‌های رسی با ذکر نوع و نحوه تأثیر هریک از پارامترهای مذکور بر پارامترهای مخزنی از قبیل تخلخل و تراوایی نیز بیان شده است. در ادامه، با توجه به کاربرد اشتباه اما مصطلح حجم شیل به جای حجم رس که سبب تخمین بیش از حد کانی‌های رسی و در نتیجه تخمین کمتر از اندازه واقعی درجه اشباع آب و نهایتاً تفسیر نادرست از تولیدی بودن مخزن می‌شود، استفاده از عبارت حجم رس (Vcl) به جای حجم شیل (Vsh)، پیشنهاد شده است. در این مقاله مرور کاملی بر روش‌ها و روابط مورد استفاده برای شناسایی نوع، حجم و الگوی توزیع کانی‌های رسی با توجه به اطلاعات پتروفیزیکی شده است. نهایتاً به بررسی تأثیر وجود کانی‌های رسی بر پارامترهای مخزنی مانند تخلخل و تراوایی با بررسی موردی سازند شوربچه پرداخته شد. نتایج نشان می‌دهد 24/16% حجمی افزایش میزان رس، سبب 7/5 p.u واحد کاهش تخلخل مؤثر در سازند شوربچه می‌شود. در ارتباط با تراوایی، افزایش 23/16% حجم رس، سبب 0/64 واحد کاهش در تراوایی افقی و افزایش 18/45% حجم رس، سبب 0/56 واحد کاهش در تراوایی عمودی سازند شوربچه می‌شود.

کلمات کلیدی

کانی‌های رسی، حجم رس، تعیین نوع رس، تعیین الگوی توزیع رس، اکتشاف نفت

1- مقدمه

گزارش شده است [6-12]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، نتایج مطالعه و شناسایی دقیق و تفصیلی نوع، مقدار و نحوه توزیع کانی‌های رسی در تعیین صحیح تخلخل، تراوایی و درجه اشباع آب کاهش‌ناپذیر با داشتن سایر پارامترهای پتروفیزیکی بسیار مؤثر خواهد بود و باعث افزایش تولید و بهره‌وری از مخازن و کاهش هزینه‌ها خواهد شد [11].

در این مقاله مروری بر خواص پتروفیزیکی، نقش و اهمیت کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری، دلایل اهمیت شناسایی نوع، الگوی توزیع و حجم کانی‌های رسی در صنایع بالادستی نفت و نهایتاً نحوه تعیین این سه پارامتر با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی خواهد شد.

2- خواص پتروفیزیکی کانی‌های رسی

در جدول 1 خواص پتروفیزیکی انواع معمول کانی‌های رسی آورده شده است. کانی‌های رسی مقادیر متغیری پتاسیم، توریم و اورانیوم از طریق جذب سطحی دارند [13] و از این لحاظ در اغلب شیل‌ها مقدار این عناصر در مقایسه با ماسه‌سنگ‌ها اغلب بالاتر است. البته میزان متوسط اورانیوم شیل‌ها، در مقایسه با مقدار متوسط پتاسیم و توریم آن‌ها، کمتر است (جدول 2). کائولینیت (کانی رسی بدون پتاسیم) در این زمینه یک استثنای برجسته است. در فرآیند تبدیل کانی‌های رسی با خاصیت پرتوایی بالا (ایلیت، هیدرومیکاه و گونه‌های تجزیه شده) به کائولینیت، کاهش چشمگیری در فعالیت پرتو گامای طبیعی به علت غیاب پتاسیم پرتوزا در ساختار کائولینیت، رخ می‌دهد. مقادیر بالای کائولینیت و کاهش فعالیت پرتو گامای طبیعی، بهبود نسبی خواص مخزن را مشخص می‌کند، چون کائولینیت‌های تازه تشکیل شده نسبتاً پایدارند و امکان استفاده از آب شور و حتی آب تازه در عملیات سیلاب‌زنی را فراهم می‌کنند. در بنتونیت‌ها، مقادیر توریم بالاست [14].

کانی‌های رسی با داشتن سطح ویژه بزرگ و بارهای الکتریکی منفی در سطح، که ناشی از تغییر و تبادل‌های یونی در چهار وجهی و هشت وجهی‌های سازنده آن‌ها و شکستگی پیوندها در لبه واحدهای ساختاری سیلیس-آلومینیم است، خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه‌ای از قبیل خاصیت تبادل یونی، کلوئیدی، تیکسوتروپی، پلاستیک و انبساط‌پذیری در حالت مرطوب، از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را از سایر کانی‌ها متمایز می‌سازد [1]. کانی‌های رسی از یک سو به علت داشتن بار الکتریکی و از سوی دیگر به علت داشتن سطح ویژه بالا، فعالیت شیمیایی زیادی دارند که آن‌ها را مستعد تغییر در ترکیب کانی‌شناسی می‌کند [2]. این امر بر کلیه خواص رس‌ها تأثیرگذار است و سبب ایجاد مشکلاتی در عملیات اکتشاف، حفاری، مغزه‌گیری، تکمیل چاه و از همه مهم‌تر در ارزیابی سازندها بر اساس نگارهای پتروفیزیکی می‌شود و در برخی موارد سبب آسیب به سازند می‌شود [2,3].

اهمیت کانی‌های رسی در صنعت نفت را می‌توان در بخش‌های اکتشاف در ارتباط با تولید ماده آلی (سنگ منشأ) و نگهداری آن (پوش‌سنگ، بیش از 60% پوش سنگ‌های مخازن جهان شیلی است)، حفاری (تهیه گل حفاری، مشکلات حفاری و پایداری در توالی‌های شیلی و غیره) و مهندسی مخزن (تأثیر بر کیفیت مخزن، تأثیر بر چاه نمودارها و غیره) بیان کرد [4]. حضور کانی‌های رسی در مخازن بر ویژگی‌های تولیدی تأثیر شگرفی دارند. این تأثیر به حدی است که در مهندسی مخزن، سازندهای ماسه‌سنگی برحسب میزان کانی‌های رسی به سه گروه، تمیز (10% < رس)، ماسه شیلی (33% < رس < 10%) و کاملاً شیلی (33% > رس) طبقه‌بندی می‌شوند [5].

تأثیر منفی وجود کانی‌های رسی بر کاهش پارامترهای مخزنی مانند تخلخل و تراوایی نیز در مطالعات بسیاری

مطالعات نفتی حجم رس را با استفاده از نگار پرتوزایی تخمین می‌زنند، در صورتی که مؤلفه‌های طیفی این نگار یعنی نگارهای پتاسیم، توریم و اورانیوم موجود باشد، بهترین تخمین از استفاده از داده‌های نگارهای توریم و پتاسیم به دست می‌آید [8,16].

رس‌ها در محیط‌های احيایی به خصوص در حضور کربنات‌ها و سولفیدها، به آسانی اورانیوم را جذب می‌کنند. مطالعات انجام شده روی 500 نمونه مغزه نشان می‌دهد که بیشترین همبستگی بین میزان رس و عناصر پتاسیم و توریم است، در حالی که همبستگی با اورانیوم ناچیز است [15]. علت این مطلب اهمیت این است که در

جدول 1: خواص پتروفیزیکی انواع معمول کانی‌های رسی [14، 19، 20]

کلریت	اسمکتیت	ایلیت	کائولینیت	پارامتر پتروفیزیکی
56	168	160	104	پرتو گاما (API)
3/42	2/63	2/78	2/62	چگالی (g/cc)
>48/2	21/8	24/7	45/1	$f_N (T)$ (خمیره آهکی %)
61/0	17/8	17/6	43/3	$f_N (E)$ (خمیره آهکی %)
8/06	2/89	4/01	2/05	PEF (بارنز/الکترون)
			694/6	Dt (C) (میکرو ثانیه/متر)
			1075/2	Dt (S) (میکرو ثانیه/متر)
	0/16	4/5	0/42	پتاسیم (%)
	2/0-5/0	1/5	1/5-3/0	توریم (ppm)
	14-24	<2/0	6-19	اورانیوم (ppm)
0/34	0/13	0/12	0/36	اندیس هیدروژن
10-40	80-150	10-40	3-15	ظرفیت تبادل کاتیونی (meg/100g)

کائولینیت: $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ ایلیت: $K_1-1.5Al_4[Si_7-6.5Al-1.5O_{20}](OH)_4$ کلریت: $(Mg, Al, Fe)_{12}[(Si, Al)_8O_{20}](OH)_{16}$ واسمکتیت: $(0.5Ca, Na)_{0.7}(Al, Mg, Fe)_4(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$

پرتو گامای طبیعی و مؤلفه‌های آن (پتاسیم، توریم و اورانیوم) در تعیین موقعیت مخازن نفتی تهی شده، چینه‌های غرقاب شده، گذرگاه‌های نفت، میزان رسی بودن

چون اورانیوم در نفت محلول است، استفاده از عناصر پرتوزا به شناسایی منابع نفتی در مطالعات رسوب‌شناسی کمک شایانی می‌کنند. به‌طور کلی، داده‌های طیف سنجی

زون‌های شکسته به تولید بیشتر یا با مشخص کردن مناطق مناسب برای اسیدکاری و شبیه‌سازی چاه نیز کمک می‌کند [21].

سازند، تعیین موقعیت نفوذ آب شور پشت لوله [14]، تفسیر محیط رسوبی قدیم [17]، تعیین همبستگی‌های زیرسطحی و تعیین خصوصیات نوارهای دریایی [18] کاربرد ویژه‌ای دارند. وجود اورانیوم بیش از 20 ppm، اغلب نشانگر وجود فواصل با تراوایی خیلی بالا، شقاق و سیستم‌های شکستگی طبیعی، مناطق گسلی و غیره است. در کربنات‌ها، طیف‌سنجی پرتو گامای طبیعی در توصیف انواع سنگ‌ها، تعیین همبستگی جزئی زون‌ها و تخمین میزان شیلی بودن مفید واقع می‌شود و بعضاً با شناسایی

جدول 2 مقایسه میزان پتاسیم، توریم و اورانیوم در ماسه‌سنگ و شیل [14]

شیل	ماسه‌سنگ	پارامتر پتروفیزیکی
1/6-4/2	0/7-3/8	پتاسیم (%)
میانگین: 2/7	میانگین: 1/1	
8-18	0/7-2/0	توریم (ppm)
میانگین: 12	میانگین: 1/7	
1/5-5/5	0/2-0/6	اورانیوم (ppm)
میانگین: 3/7	میانگین: 0/5	

از قبیل تخلخل و تراوایی را افزایش می‌دهند. تخلخل و تراوایی که توانایی ذخیره‌سازی و انتقال هیدروکربور را در سنگ مخزن کنترل می‌کنند، به شدت تحت تأثیر وجود رس‌ها، حتی در مقادیر اندک هستند [22، 11]. اگر میزان رس به صورت خمیره کاذب¹ بین دانه‌های ماسه زیاد باشد، مانند یک مانع مزاحم در گلوگاه منافذ رفتار می‌کند و می‌تواند با ایجاد نیروهای موئینه بسیار قوی، تراوایی را به سرعت در حین دپازن تدفینی پیش‌رونده، کاهش دهد. فشردگی قطعات شکل‌پذیر خرده‌سنگی غنی از رس نیز می‌تواند منجر به از دست دادن فاجعه‌آمیز تراوایی شود. کانی‌های رسی تنها در مواردی که کلریت در مخازن ماسه‌سنگی با ایجاد پوشش دور دانه‌های کوارتز از پدیده هم‌رشدی² دانه‌های کوارتز جلوگیری می‌کند با حفظ تخلخل تأثیر مثبتی در حفظ کیفیت مخزنی دارند [12]. البته مشکلات و هزینه‌های زیاد حفاری در سازندهای

3- تأثیر وجود کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری

یکی از مهم‌ترین عوامل زمین‌شناسی کنترل‌کننده کیفیت مخازن میزان پر شدن فضاها یا خالی توسط رس-هاست [10]. هنگامی که کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری ظاهر می‌شوند، با کاهش تخلخل و تراوایی سبب افت کیفیت مخزنی می‌شوند. به‌علاوه، کانی‌های رسی اصلی‌ترین دلیل ایجاد فشارهای غیر طبیعی در مخازن و بالا بردن درجه اشباع آب کاهش‌ناپذیر (S_{wir}) هستند. همچنین کانی‌های رسی با داشتن ویژگی‌های خاص و متفاوت با تأثیر بر نگارهای پتروفیزیکی، خطر تفسیرهای اشتباه و تخمین ناصحیح از پارامترهای مخزنی

مقادیر زیادی سیال و نیز هدایت بالای جریان الکتریسته، علت اصلی بالا بردن درصد اشباع آب هستند که این امر به نوبه خود سبب تفسیر نادرست از تولید مخزن می‌شود. تغییرات کمی رس‌ها در میان طبقات دیگر بر روی بازتاب‌های صوتی سازندها در یک توالی حفاری شده نیز تأثیرگذار است [10].

5- کانی‌های رسی مسبب اصلی آسیب به سازند

براساس تعریف، آسیب به سازند به صورت کاهش در تراوایی اولیه سنگ مخزن پس از عملیات روی چاه است که معمولاً غیرقابل بازگشت است و تأثیر اقتصادی جدی بر روی تولید مخزن دارد. آماس کانی‌های رسی از گروه اسمکتیت، پراکندگی و مهاجرت کانی‌های رسی مانند ایلیت و کائولینیت، تغییر و تحولات فازی کانی‌های رسی علل اصلی آسیب به سازند محسوب می‌شوند [2].

6- تأثیر کانی‌های رسی بر نگارهای پتروفیزیکی

وجود کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری، تأثیر عمده‌ای بر پاسخ اکثر نگارهای پتروفیزیکی و بر شکل روابط پتروفیزیکی استخراج پارامترهای مختلف مخزنی و متعاقباً بر برآورد ذخیره و توان تولید دارد [24]. مثلاً رس‌ها باعث افزایش رسانایی ویژه سازند می‌شوند و برآورد درجه اشباع توسط فرمول آرچی را غیرممکن می‌سازند.

وجود کانی‌های رسی با هشت گروه هیدروکسیل، مانند کائولینیت و کلریت، به شدت بر اندازه‌گیری‌های تخلخل توسط نگار نوترون تأثیرگذار است، به طوری که تخلخل ظاهری نگار نوترون را ممکن است تا 40 p.u بالا ببرند. حساسیت بالای نگار نوترون به وجود سیمان‌هایی از جنس کلریت، کارایی این نگار در تخمین تخلخل را در حضور این کانی به شدت کاهش می‌دهد [25]. به علاوه، وجود لایه‌های آب در ساختار مولکولی رس‌ها سبب می‌شود که زمان عبور صوت (Dt)، به ویژه در سازندهای تحکیم نیافته

شیلی که به علت وجود کانی‌های رسی پیش می‌آید نیز شایان ذکر است [9]. همچنین توالی‌های شیلی می‌توانند سبب تفکیک مخازن ماسه‌سنگی و تقسیم آن‌ها به چندین بخش با سطوح سیالات جداگانه شوند. علاوه بر این، برخی سازندهای شیلی به خاطر داشتن شکستگی، می‌توانند نقش سنگ مخزن را نیز ایفا کنند [4].

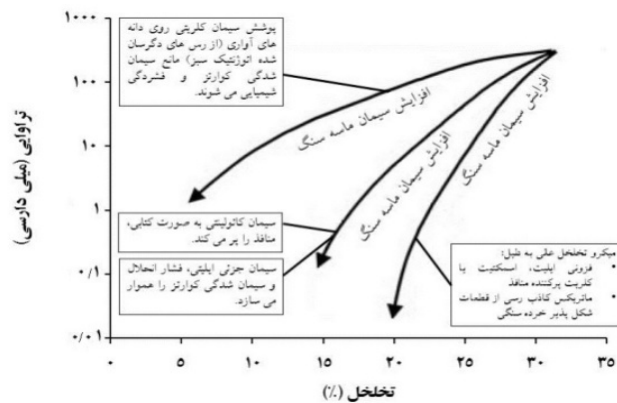
4- مشکلات وجود کانی‌های رسی در مخازن آواری

سازندهای ماسه‌سنگی در صورت داشتن تخلخل و تراوایی مناسب، در زمره بهترین و ایده‌آل‌ترین مخازن هیدروکربوری به شمار می‌روند. اگرچه بیشترین میزان بهره‌برداری از مخازن کربناتی گزارش شده است، اما بیشترین ذخائر کشف شده در مخازن ماسه‌سنگی قرار دارند. مخازن ماسه‌سنگی اندکی در سطح جهان، کاملاً تمیز یعنی عاری از کانی‌های رسی هستند که دلیل آن ناشی از جورشدگی ناکامل در محیط‌های رسوبی تخریبی است [14]. شکل، نوع، مقدار و الگوی توزیع کانی‌های رسی، اثرات مهمی روی خصوصیات ماسه‌سنگ از قبیل تخلخل، تراوایی، چگالی، پرتوزایی طبیعی، هدایت الکتریکی، میزان آب میدان‌های هیدروکربوری و واکنش‌پذیری نسبت به روش‌های مختلف بازیابی هیدروکربور دارد [23].

رس‌ها در مخازن با مسدود کردن خلل و فرج سبب کاهش شدید تخلخل و تراوایی و با تورم یا شکستن تجمعات خود موجب آسیب سازند می‌شوند. همچنین لایه‌بندی یا تورم آن‌ها سبب کاهش نفوذپذیری و تزریق‌پذیری سنگ مخزن و یا حتی انسداد آن با مهاجرت ذرات ژلاتینی می‌شود. در ضمن مشکلات عدیده چاه‌نگاری و تفسیر نگارها و به اشتباه افتادن مفسر نگارهای پتروفیزیکی به خصوص در تفسیرهای اشباع آب و تخلخل از سایر تأثیرات منفی وجود کانی‌های رسی در مخازن است [11]. رس‌ها با تجمع و به دام انداختن

حرکت سیال را سلب می‌کند [28]. کائولینیت اغلب به صورت دسته‌هایی با اشکال کتابی با اتصالات بسیار ضعیفی به دانه‌های ماسه متصل است. در صورت وجود جریان قوی سیال این دسته‌ها جدا می‌شوند و علاوه بر ایجاد مشکل مهاجرت ذرات ریز، گلوگاه منافذ را مسدود می‌کنند و در نتیجه آسیبی دائمی و غیر قابل جبران به مخازن وارد می‌سازند [27].

کائولینیت برجا با اشکال کرمی شکل، باعث تبدیل تخلخل‌های درشت به ریز تخلخل نیز می‌شود. ایلیت با داشتن سطح ویژه بزرگ به صورت پل‌زننده بین منافذ در بخش‌های خالی، سبب ایجاد حجم بزرگی از ریزتخلخل‌ها در مخزن می‌شود که نهایتاً منجر به بالا رفتن درجه اشباع آب کاهش‌ناپذیر می‌شود. در چنین حالتی، هرچند کاهش تخلخل اندک خواهد بود، ولی قطعاً اثر مهمی بر کاهش تراوایی خواهد داشت. بدون داشتن اطلاعات کافی از نوع کانی‌های رسی، امکان ایجاد آسیب‌های جبران‌ناپذیر به تراوایی سازند با به کار بردن گل‌های حفاری نامناسب وجود دارد [11].



شکل 1: اثرات انواع کانی‌های رسی روی تخلخل و تراوایی (اصلاح شده از [23])

رس‌ها در اطراف دانه‌های آواری در ماسه‌سنگ‌ها بدین معناست که اتصالات دانه به دانه اغلب شامل لبه‌های نازک کانی‌های رسی هستند. ایلیت با تشدید فشار انحلال، فشرده‌گی شیمیایی بین دانه‌های کوارتز را زیاد می‌کند و سبب فشرده‌گی، سیمان‌شدگی و متعاقباً کاهش تخلخل و

افزایش یابد و قرائت‌های نگار چگالی کاهش یابد [11]. سطح ویژه رس‌ها بیشترین تأثیر را بر مقاومت ویژه می‌گذارد و موجب کاهش قرائت‌های انواع نگارهای مقاومت ویژه می‌شوند. وجود کانی‌های رسی در مخازن هیدروکربوری بر خصوصیات مخزنی از قبیل تخلخل و تراوایی نیز به شدت تأثیرگذارند. در حضور کانی‌های رسی، تخلخل محاسبه شده از نگارهای نوترون، چگالی و صوتی بیش از اندازه واقعی و تخلخل محاسبه شده از نگار مقاومت ویژه کمتر از اندازه واقعی تخمین زده می‌شود [11].

7- دلایل اهمیت شناسایی نوع کانی‌های رسی

انواع مختلف کانی‌های رسی، مقادیر متغیری ریزتخلخل ایجاد می‌کنند که بسته به موقعیت اشغال در مخزن اثرات متفاوتی روی تراوایی دارد [26,27]. شکل 1، اثرات ناشی از وجود انواع کانی‌های رسی بر تخلخل و تراوایی را نشان می‌دهد. عموماً در خمیره رسی ماسه‌سنگ‌ها، مقدار قابل توجهی فضای خالی با اندازه میکرومتری یا کوچک‌تر با اتصالات ضعیف به هم وجود دارد که در عمل امکان

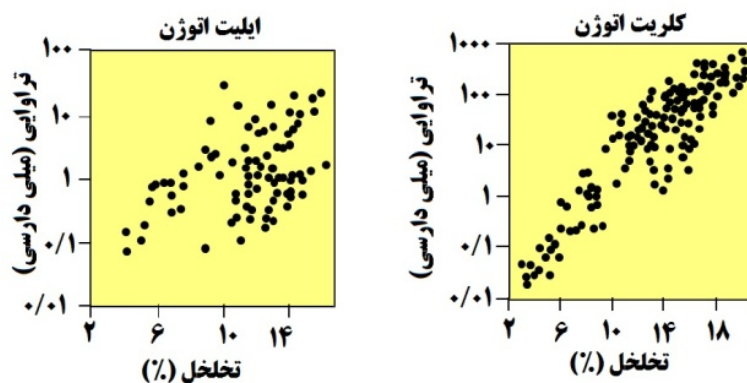
اگر پوشش‌های ضخیمی از جنس کلریت یا ایلیت روی دانه‌ها وجود داشته باشد، تراوایی به شدت کاهش می‌یابد (به ویژه در ماسه‌های ریزدانه با دانه‌بندی خوب)، در حالی که تخلخل بدون تغییر باقی می‌ماند. نوع کانی‌های رسی به شیوه دیگری نیز بر تراوایی اثر می‌گذارد. حضور معمول

مواد اضافه شونده‌ای مانند کلرید پتاسیم به منظور اجتناب از آسیب سازند استفاده می‌شود [11].

کانی‌های رسی انبساط‌پذیر، گروه اسمکتیت‌ها، در حین عملیات تزریق آب به چاه یا به‌طور کلی حفاری عامل اصلی ایجاد مشکلات زیادی از قبیل کاهش قطر چاه، گیر کردن سرمته، لوله و غیره هستند که موجب افزایش هزینه‌های حفاری نیز می‌شود. به‌علاوه وجود اسمکتیت‌ها، هدایت الکتریکی سنگ‌ها را به‌طور معناداری بالا می‌برد. اعضای گروه کلریت به خصوص انواع غنی از آهن، به شدت به اسیدکاری مخازن که به‌منظور انحلال سیمان کربناته و افزایش تولید مخزن انجام می‌شود، حساس هستند. وجود کلریت در حین این عملیات، سبب تشکیل رسوبی ژلاتینی از هیدروکسیدهای آهن می‌شود که مجاری و فضاهای خالی به ویژه گلوگاه منافذ را مسدود می‌کنند و ممکن است تولید را برای همیشه متوقف کند [11]. ماسه‌سنگ‌ها با افزایش میزان رس‌های آهن‌دار (گلوکونیت، کلریت) و نیز با غنی شدن نفت از ترکیبات قطبی، Oil-wet می‌شوند [23].

تراوایی مخزن می‌شود [29]. در حالی که کلریت در این ارتباط کاملاً اثر معکوسی دارد. لبه‌های کلریت دور دانه‌ها، که از کانی برترین³ در ماسه‌سنگ‌های با فشردگی ضعیف دوباره متبلور شده‌اند، مانع سیمان‌شدگی کوارتز و کاهش فشار انحلال (فشردگی شیمیایی) آن می‌شود. بنابراین، حتی وجود یک لایه نازک کلریت روی سطح کوارتز، با بهبود فشار انحلال و ممانعت از رشد مجدد آن، دو برابر به نفع تراوایی است [24]. این مطلب به خوبی در شکل 2 نشان داده شده است.

سطح ویژه بزرگ و قابلیت تورم‌پذیری زیاد اعضای گروه اسمکتیت در مخازن به‌طور جدی مشکل‌آفرین است. به دلیل وابستگی نزدیک ذرات رس به آب، تولید نفت بدون آب در صورت داشتن درجه اشباع بالا به مونت موریلونیت نسبت داده می‌شود. تنها در صورتی که وجود کانی‌های رسی گروه اسمکتیت به درستی تشخیص داده شود، مناطق تولیدی با درجه اشباع خیلی بالا کنار گذاشته می‌شود. تورم رس‌ها که دلیل آن وجود آب شیرین است، می‌تواند سبب بیرون رانده شدن ذرات از جای خود و انسداد منافذ شود. در چنین مواردی گل پایه روغنی یا



شکل 2 اثرات نوع کانی‌های رسی بر تراوایی، اصلاح شده از [30]

می‌شوند و البته ریزدانه بودن آن‌ها سبب از بین رفتن تراوایی نیز می‌شود [31].

8- دلایل اهمیت شناسایی نحوه توزیع کانی‌های

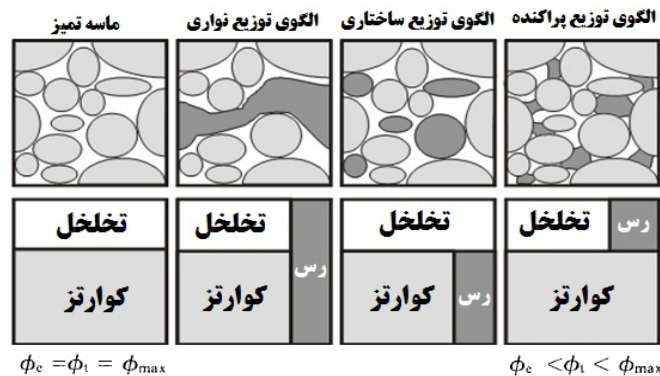
تعیین اندازه کانی‌های رسی نیز در مطالعات مخزنی اهمیت زیادی دارد. مثلاً کائولینیت‌های درشت بلور به‌طرز قابل توجهی تخلخل و تراوایی را کاهش می‌دهند، اما کائولینیت‌های ریز بلور صرفاً باعث کاهش جزئی تخلخل

رسی

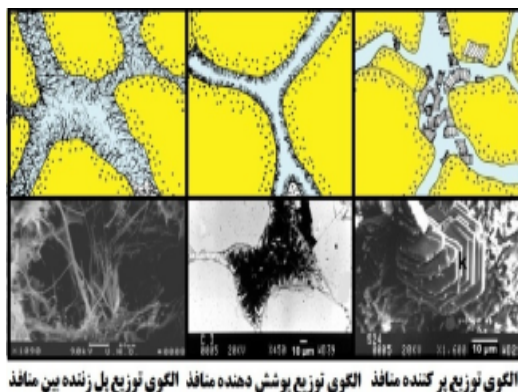
اولین بار توسط محققى به نام نياشام [34]، در مطالعه با میکروسکوپ الکترونی (SEM)، به سه نوع پرکننده، پوشش دهنده و پل زنده بین منافذ طبقه بندی شد (شکل 5). ایجاد انواع مختلف در توزیع پراکنده، تابع نوع کانی رسی و شرایط تشکیل در مرحله دیاژنز است [13].

توزیع پراکنده به شکل پرکننده و پل زنده بین منافذ به ترتیب کمترین و بیشترین تأثیر را در کاهش تخلخل و تراوایی دارد. از میان کانی های رسی، کائولینیت به صورت پرکننده منافذ اولیه و ثانویه، اسمکتیت، کلریت و ایلیت به صورت پل زنده یا پوشش دهنده منافذ به طور افقی یا عمودی در مخازن هیدروکربوری دیده می شوند [34]. نحوه الگوی توزیع بر میزان مقاومت ساختاری سازند نیز مؤثر است [25].

شکل توزیع تیپ های مختلف کانی های رسی در سنگ مخزن، تأثیرات متفاوتی بر تخمین خواص مخزنی از قبیل تخلخل مؤثر، درجه اشباع مؤثر آب، تراوایی و در نتیجه بر تعیین قابلیت تولید و همچنین بر داده های پتروفیزیکی مورد اندازه گیری مانند صوتی، چگالی و مقاومت ویژه دارند [14]. الگوی توزیع کانی های رسی به شرایط رسوب گذاری، فشردگی، زیست آشفستگی ها و فرآیندهای دیاژنزی بستگی مستقیم دارد [32]. توزیع رس در مخزن مطابق شکل 3، به سه دسته ساختاری، نواری و پراکنده تقسیم بندی می شود. حدود ضخامت رس در توزیع نواری از کمتر از 2/5 سانتی متر آغاز و نهایتاً تا 12/5 سانتی متر می رسد [33]. توزیع پراکنده که آسیب زنده ترین نوع توزیع رس در مخازن هیدروکربوری محسوب می شود،



شکل 3: انواع الگوی توزیع رس در مخازن (اصلاح شده از [13])

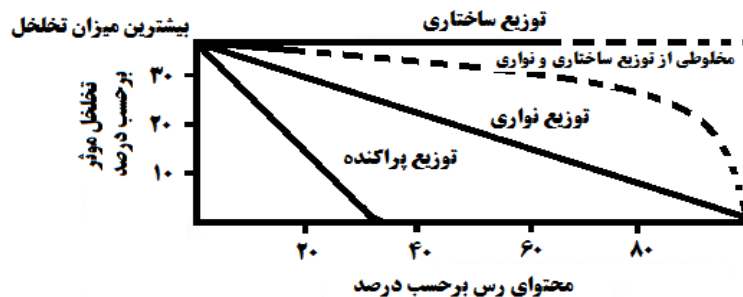


شکل 4: انواع مختلف توزیع پراکنده که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مشخص می شود (اصلاح شده از [34])

چگونگی انواع توزیع کانی های رسی، تأثیرات متفاوتی بر تخلخل (شکل 4) و بر تراوایی مؤثر (شکل 5) دارند. این بدان معناست که حجم یکسانی از رس با توزیع نواری و پراکنده تأثیری کاملاً متفاوت بر قرائت های نگارها (به ویژه مقاومت ویژه) و پارامترهای مخزنی دارند. بنابراین در نظر گرفتن یک حد آستانه برای مقدار شیلی بودن مخازن، بدون در نظر گرفتن نحوه توزیع کانی های رسی، ممکن است منجر به تفسیرهای اشتباه و پرهزینه شود [35].

می‌تواند سبب %28/72، %10/34 و %2/30 کاهش تخلخل مؤثر شود. درصد کاهش تخلخل مؤثر با افزایش مقدار رس به میزان %20، به %57/47، %18/38 و %4/6 برای توزیع‌های پراکنده، نواری و مخلوط (نواری-ساختاری) می‌رسد. وجود %34 رس با توزیع پراکنده، تخلخل مؤثر را به صفر می‌رساند، در حالی که برای سایر الگوهای توزیع، %100 رس سبب صفر شدن تخلخل مؤثر می‌شود. بیشینه مقدار وجود رس با الگوی توزیع پراکنده در مخازن با تولید اقتصادی، %10-20 است، در حالی که این عدد برای توزیع نواری %30-40 است [14].

توزیع ساختاری به‌عنوان بخشی از خمیره سنگ محسوب می‌شود و تأثیر چندانی بر تراوایی یا تخلخل مؤثر ندارد [11 و 14]، اما وجود رس به‌صورت لایه‌هایی با تراوایی اندک (توزیع نواری)، تراوایی قائم را با ایجاد سدی در مقابل جریان سیال شدیداً کاهش می‌دهد و کارایی عملیات بازیابی هیدروکربور را کاهش می‌دهد [10]. اگر ریزتخلخل‌های همراه با کانی‌های رسی زیاد باشند، وجود رس با توزیع پراکنده حتی در مقادیر اندک نیز سبب کاهش چشمگیر تراوایی می‌شود [28]. با توجه به شکل 6، کمترین میزان کاهش تخلخل مؤثر، مربوط به رس‌هایی با توزیع مخلوط (نواری-ساختاری) و بیشترین کاهش مربوط به توزیع پراکنده است. مثلاً %10 رس با توزیع‌های پراکنده، نواری و مخلوط (نواری-ساختاری) به‌ترتیب



شکل 5: اثرات نحوه توزیع کانی‌های رسی بر کاهش تخلخل مؤثر [14]

توزیع کانی‌های رسی نشان می‌دهد. به‌طور کلی، رس‌هایی که در حاشیه سطوح دانه‌ها به‌صورت مماس با دانه قرار گرفته‌اند، به نسبت کانی‌های رسی که عمود بر سطح دانه‌ها یا در فضاهای خالی داخل گلوگاه‌ها قرار گرفته‌اند، اثرات بسیار کمتری روی تراوایی دارند [36، 37]. تجمعات رسی ناپیوسته (مثلاً خرده‌سنگ‌های آواری دگرسان شده یا اینترا کلاست-های غنی از رس) تا هنگامی که در سرتاسر شبکه منافذ به سبک خمیره‌گری‌وک گسترش نیافته‌اند، تأثیر مستقیم بسیار کمی روی تراوایی دارند [38].

بسیاری از شبه خمیره‌های رسی بین ماسه‌های با دانه‌بندی خوب، مانند یک سرپوش روی دهانه خلل و فرج

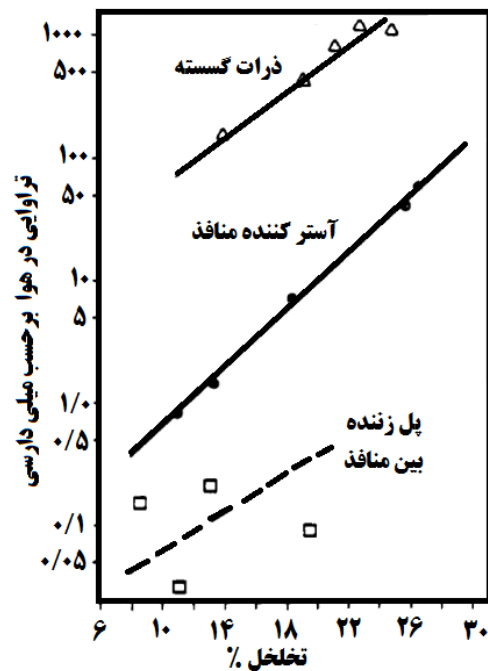
انواع مختلف توزیع کانی‌های رسی، اثرات به شدت متفاوتی روی تراوایی دارند. برای یک تخلخل مشخص، توزیع پوشش‌دهنده منافذ، منجر به ایجاد تراوایی‌هایی تا حدود 1 تا 2 درجه بزرگ‌تر در مقایسه با سایر الگوهای توزیع می‌شود (میلی‌داری $k = 1-200$). البته پوشش‌های نازک رسی روی دانه‌ها اثرات کمی روی تراوایی دارند، مگر این که در گلوگاه منافذ به هم درآمیخته شده باشند. ذرات رسی مجزا منجر به ایجاد تراوایی‌های بالا (بیش از 100 میلی‌داری و در محدوده داری) می‌شوند. بنابراین در نظر گرفتن یک حد آستانه برای تراوایی مخزن بستگی زیادی به نوع توزیع کانی‌های رسی دارد [14]. شکل 6 رابطه تخلخل-تراوایی اندازه‌گیری شده در هوا را برای ماسه‌سنگ‌ها برحسب نحوه

9- دلایل اهمیت تخمین صحیح مقدار کانی‌های رسی،

حجم رس نه حجم شیل

کاربرد دو واژه "شیل" و "رس" به جای یکدیگر در پتروفیزیک، اصلی‌ترین دلیل تخمین بیش از حد کانی‌های رسی و متعاقباً تخمین کمتر از اندازه واقعی درجه اشباع آب است که این خطا به نوبه خود تفسیری نادرست از تولید خوب داشتن مخزن را در پی خواهد داشت [41, 42]. به کار بردن "حجم شیل" به جای "حجم رس" بدین معناست که شیل، 100% از کانی‌های رسی تشکیل شده است که این فرض کاملاً اشتباه است. آنالیز هزاران نمونه شیل توسط محققان مختلف در سراسر جهان نشان داده است، شیل به‌طور متوسط از 50 تا 70 درصد کانی‌های رسی تشکیل شده است [41, 43, 44]. چون پاسخ‌های بیشتر نگارهای پتروفیزیکی متأثر از وجود کانی‌های رسی است و نه سایر کانی‌ها (بخش غیر رسی شیل) یا اندازه مشخصی از ذرات (اندازه رس)، لذا دو واژه حجم شیل و حجم رس باید از یکدیگر تفکیک شوند [41-42]. در این مقاله، واژه "حجم رس" به‌عنوان معیاری از میزان کانی‌های رسی موجود در مخزن به کار رفته است. حجم رس، بحرانی‌ترین پارامتر در ارزیابی کیفیت مخازن هیدروکربوری است که تخمین صحیح و دقیق آن برای تصحیح تخلخل کلی و محاسبه تخلخل مؤثر که از روی آن متعاقباً اشباع آب مؤثر و توان تولید مخزن محاسبه می‌شود، ضروری و لازم است. تنها معادله درجه اشباع آب که در آن حجم رس نقشی ندارد، معادله واگسمن-اسمیت است که در آن پارامتر دیگری به نام ظرفیت تبادل یونی (QV) جانشین حجم رس شده است. اما چون به‌دست آوردن ظرفیت تبادل یونی مستلزم انجام آزمایش‌های وقت‌گیر روی نمونه‌های مغزه است، معادله واگسمن-اسمیت روش پرهزینه و زمان‌بر تعیین درجه اشباع آب محسوب می‌شود که کمتر هم به کار برده می‌شود [13]. اگر حجم رس بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شود، درجه اشباع آب کمتر از اندازه واقعی تخمین زده می‌شود و نهایتاً سبب می‌شود مخزن تولیدی تولیدی به نظر برسد. برعکس اگر حجم رس کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شود، درجه اشباع آب بیشتر از اندازه واقعی خود تخمین زده می‌شود که نهایتاً سبب می‌شود تا یک مخزن تولیدی

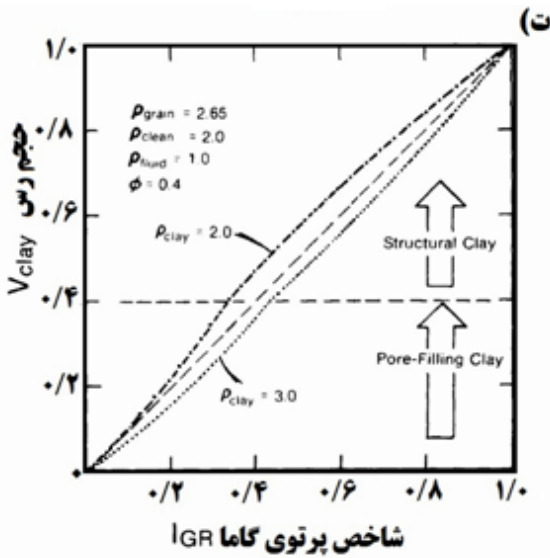
عمل می‌کنند و می‌توانند به سرعت تراوایی را در طول فرایند دفن کاهش دهند [23]. تراوایی پوش سنگ‌هایی که از کانی‌های رسی مانند رس‌های مخلوط لایه مونت‌موریلونیت-هیدرومیکا تشکیل شده‌اند، به ترکیب هندسی دانه‌ها و الگوهای ریزبافتی و ساختاری بستگی مستقیم دارد [14].



شکل 6: رابطه تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده در هوای ماسه‌سنگ‌ها بر حسب نحوه توزیع کانی‌های رسی [40]

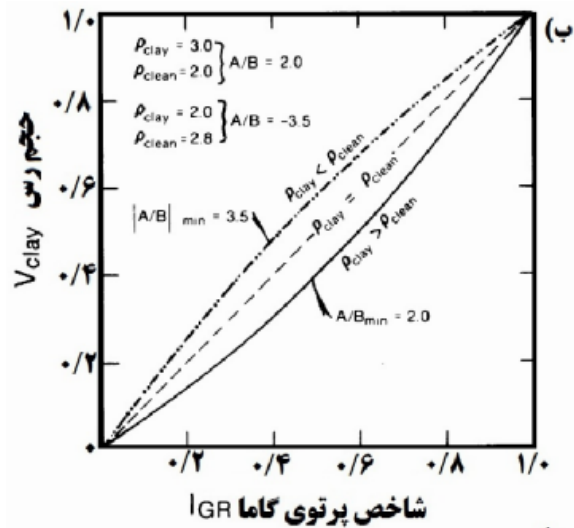
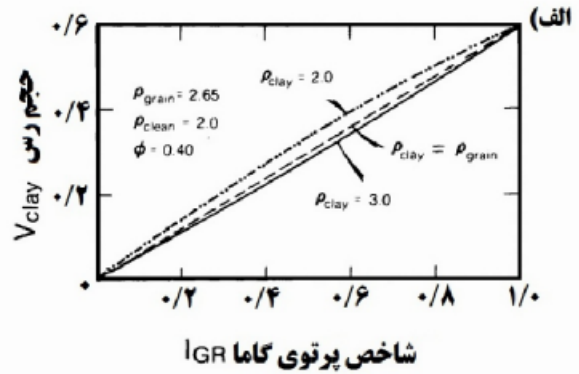
نحوه توزیع کانی‌های رسی بر محاسبه حجم رس نیز مؤثر است. در توزیع ساختاری یا نواری، اگر چگالی رس مرطوب با چگالی دانه‌های سنگ یکسان باشد، حجم رس تابعی خطی از میزان قرائت پرتو گاما است، در غیر این صورت مطابق شکل 7 (الف و ب) حجم رس حاصل اعمال تصحیحی غیر خطی بر شاخص پرتو خواهد بود. در توزیع پراکنده، همواره اعمال تصحیحی غیر خطی با قوسی مقعر و رو به بالا برای محاسبه حجم رس لازم است (شکل 7، پ و ت). انحنای منحنی‌های تصحیح کننده با افزایش چگالی رس، افزایش می‌یابد [39].

کنار گذاشته شود. دلایل تخمین کمتر یا بیشتر از اندازه واقعی در کانی‌شناسی سازند، نوع رس و خاستگاه آن، نوع هیدروکربن و تغییرات چاه خلاصه می‌شود [16].



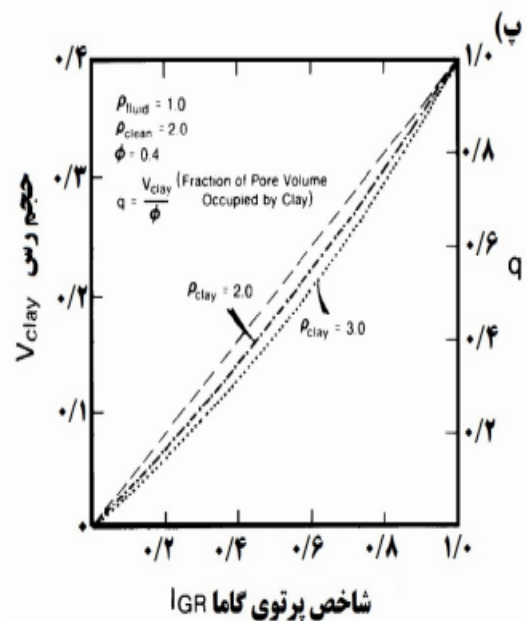
شکل 7 نحوه تأثیر چگالی و الگوی توزیع بر محاسبه حجم رس با استفاده از شاخص پرتوی گاما (I_{GR})، (الف) توزیع ساختاری، (ب) توزیع نواری، (پ) توزیع پراکنده از نوع پرکننده منافذ و (ت) مخلوطی از توزیع ساختاری و پرکننده [39]

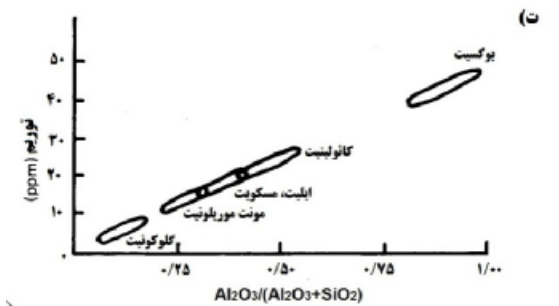
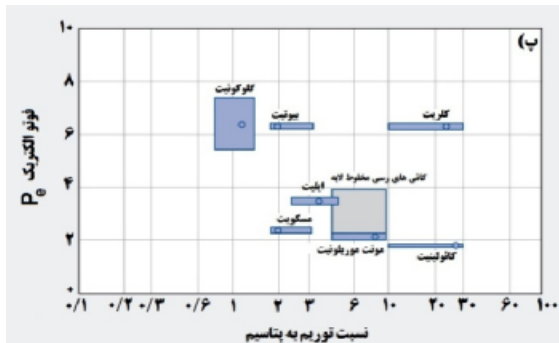
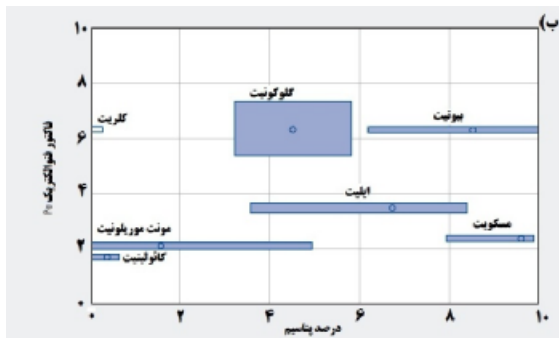
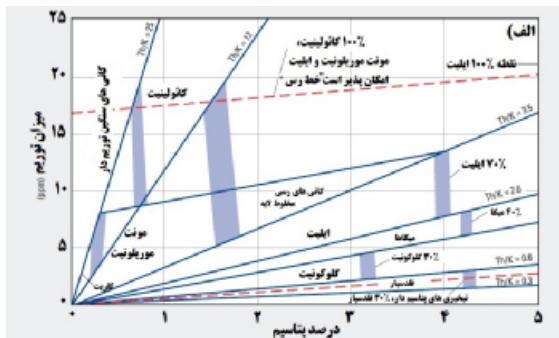
چون وجود رس در توالی‌های مورد مطالعه، کلیه نگارهای پتروفیزیکی را متأثر می‌سازد، بنابراین با اندازه‌گیری تغییرات حاصل از وجود رس در تمام نگارهای به‌دست آمده از سازندهای حاوی هیدروکربور، می‌توان حجم رس را به‌طور تقریبی محاسبه کرد [5].



10- نحوه شناسایی نوع کانی‌های رسی با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی

عدم وجود فرمول شیمیایی ثابت برای کانی‌های رسی، شناسایی آن‌ها را صرفاً از طریق داده‌های پتروفیزیکی بسیار دشوار می‌کند. اولین ایده‌های شناسایی نوع کانی‌های رسی با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی، مبتنی بر شناسایی عناصر غالب سازنده آن‌ها توسط نگارهای پتروفیزیکی بود. به‌طور مثال هیدروژن که یکی از عناصر اصلی سازنده کانی‌های رسی است، تأثیر عمده‌ای بر نگار نوترون دارد. آهن نیز که سازنده برخی کانی‌های رسی (از قبیل کلریت) است، توسط نگار فوتوالکتریک قابل شناسایی است. کانی‌های رسی به علت





شکل 8: نمودارهای متقاطع پتروفیزیکی مورد استفاده برای شناسایی رس‌ها: الف) نمودار متقاطع پتاسیم-توریم [48]، ب) نمودار متقاطع پتاسیم-فوتوالکتریک [48]، پ) نمودار متقاطع نسبت توریم به پتاسیم در مقابل فوتوالکتریک [48] و ت) نمودار متقاطع نسبت $Al_2O_3/(Al_2O_3+SiO_2)$ در مقابل توریم [15]

محققانی چند از نمودارهای متقاطع شکل 8 به‌منظور شناسایی کانی‌های رسی در مطالعاتشان استفاده نموده‌اند [46، 14-47].

وجود پتاسیم پرتوزا در ساختار خود یا جذب سطحی کاتیون‌های پرتوزا به خوبی توسط طیف‌سنجی پرتو گاما قابل شناسایی هستند [11]. بنابراین طبیعی است که تلاش‌های اولیه برای تشخیص سایر عناصر سازنده رس‌ها و به تبع آن شناسایی نوع رس از طریق نگارهای پتروفیزیکی بیشتر بر پایه اطلاعات نگار پرتو گامای طبیعی متمرکز باشد [46-45]. متعاقباً، یک مدل عمومی مطرح شد که در آن اندازه‌گیری‌های پتروفیزیکی موجود را با روش‌های محاسباتی از نوع رگرسیون به رس‌های انبساط پذیر مربوط می‌ساخت [47]. در دهه هشتاد میلادی، استفاده از نسبت اندیس هیدروژن (HI) به ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) رس خشک به عنوان شاخص کانی‌شناسی رس مطرح شد [47]. در حالی که ایلیت و کلریت مقادیر CEC مشابهی دارند، مقدار HI کلریت خشک سه برابر ایلیت است. کائولینیت کمترین مقدار CEC و بیشترین مقدار HI را در میان رس‌های خشک دارد، اسمکتیت‌ها (مونت موریلونیت) بیشترین مقادیر CEC و کمترین مقادیر HI را دارند. از این رو، نسبت CEC/HI برای انواع کانی‌های رسی متفاوت است (جدول 3). مقادیر HI با افزایش عمق نسبتاً ثابت باقی می‌ماند، در حالی که CEC به‌شدت کاهش می‌یابد [14].

نوع کانی‌های رسی پس از تصحیح داده‌های نگارهای پرتوزایی، نوترون و چگالی با استفاده از نمودارهای متقاطع پتاسیم-فوتوالکتریک، توریم/پتاسیم-فوتوالکتریک، پتاسیم-توریم و $Al_2O_3/(Al_2O_3+SiO_2)$ -توریم نیز قابل شناسایی است [15، 48]. شکل 8 محدوده هر نوع کانی رسی را در هر یک از نمودارهای متقاطع یاد شده نشان می‌دهد. مقادیر Al_2O_3 و SiO_2 در صورت در دسترس بودن نمونه‌های مغزه از آنالیز طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) به‌دست می‌آید و یا با استفاده از داده‌های نگار ECS^4 ، یک نوع نگار جدید کانی‌شناسی که قادر به اندازه‌گیری برخی عناصر از قبیل سیلیسیم، آهن، کلسیم، گوگرد، تیتانیم، گادولونیم، کلر، باریوم، هیدروژن و غیره است، به‌دست می‌آید [48].

جدول 3: مقادیر نسبت CEC/HI انواع کانی‌های رسی [13]

نوع کانی رسی	محدوده تغییرات CEC/HI	میانگین CEC/HI
کائولینیت	0/08-0/7	0/25
کلریت	0/3-1/1	0/70
ایلیت	0/8-3/3	2/10
مونت موریلونیت	6/10-11/5	8/60

موجود در مخزن به منظور توصیف دقیق و قابل اعتماد از مخازن انجام شده است. اما، بدون دانش کافی از مقدار کانی‌های رسی موجود در مخازن، خطر تفسیرهای پتروفیزیکی اشتباه از کیفیت و پارامترهای مخزنی و به تبع آن، میزان تولید مخازن به شدت بالا می‌رود [53-57]، 16، 25].

صحیح‌ترین روش به‌دست آوردن حجم رس، اندازه‌گیری آزمایشگاهی این مقدار با استفاده از نمونه‌های مغزه است. اما چون همیشه مغزه‌گیری ممکن نیست یا نمونه‌های مغزه در دسترس نیستند و از سویی دیگر، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نیز اغلب پرهزینه و زمان‌بر است، سعی بر توسعه روش‌های تجربی پتروفیزیکی با استفاده از داده‌های انواع نگارها برای تخمین این پارامتر بحرانی ارزیابی کیفیت مخازن ماسه سنگی است. کاربرد آسان، سرعت بالا، پوشش کلیه توالی‌های حفاری و نمودارگیری شده و به ویژه کم‌هزینه بودن روش‌های پتروفیزیکی سبب شده است تا روش‌های متعددی بر مبنای استفاده از داده‌های انواع نگارها برای تخمین حجم رس توسعه یابد [47]. با توجه به تأثیرپذیری کلیه نگارهای پتروفیزیکی از وجود رس در توالی‌ها، با استفاده از تمام نگارها می‌توان حجم رس را محاسبه کرد [13] که در این میان استفاده از نگارهای پرتوزایی برای محاسبه مقدار رس متداول‌ترین و آسان‌ترین روش محسوب می‌شود [51-52، 32، 14]. اما نباید این روش به‌تنهایی ملاک تعیین نهایی حجم رس قرار گیرد، زیرا اغلب روش‌هایی که در آن‌ها از ترکیب چند نگار برای تخمین حجم رس استفاده می‌شود، دقت بالاتری دارند [58].

استفاده از هر نگار برای تخمین حجم رس در شرایط خاصی بهترین عملکرد را دارد و بنابراین بهتر است برای محاسبه حجم رس در هر محیط زمین‌شناسی از روش‌ها و نگارهای پتروفیزیکی مختلف استفاده شود و سپس برای خنثی‌سازی عواملی که سبب تخمین بیش از حد رس

11- نحوه شناسایی پتروفیزیکی الگوی توزیع رس

شناسایی الگوی توزیع رس با استفاده از نگار نوترون انجام می‌شود. این امر با مقایسه حجم رس نواری حاصل از تقسیم تفاضل تخلخل مؤثر از تخلخل کل بر تخلخل کل با حجم رس به‌دست می‌آید. در صورتی که حجم رس سازند و حجم رس نواری برابر به‌دست آید، تنها توزیع موجود در مخزن نواری است. اگر حجم رس نواری کمتر از حجم رس سازند محاسبه شود، توزیع‌های ساختاری و نواری همزمان در سازند وجود دارند و نهایتاً اگر حجم رس نواری بیشتر از حجم رس سازند به‌دست آید، توزیع رس به‌صورت ترکیبی از توزیع‌های نواری و پراکنده وجود دارد [49]. تأثیر الگوی توزیع رس به ویژه توزیع پراکنده بر پارامترهای مخزنی و تولید مخازن هیدروکربوری توسط محققان مختلفی مطالعه شده است [50، 35، 14].

12- تخمین پتروفیزیکی حجم رس

طبق تعریف، حجم رس برابر با حجم کانی‌های رسی به حجم کل سنگ است [13]. اگرچه هیچ ابزار منفرد (یا ترکیبی) چاه‌نگاری وجود ندارد که بتواند حجم رس را کاملاً صحیح محاسبه کند [32]، اما به‌دست آوردن تخمینی دقیق و قابل اعتماد از حجم رس، اولین گام در مطالعات کمی ارزیابی مخازن هیدروکربوری است [52، 51، 32]. تحقیقات فراوانی در ارتباط با اهمیت تعیین کمی کانی‌های رسی

طبیعی، پتاسیم، توریم و اورانیوم را محاسبه کرد. البته در اغلب موارد فرض‌های عنوان شده صحیح نیست و همین امر سبب می‌شود تا تخمین‌های حاصل از رابطه خطی خطای بسیار زیادی در تخمین بیش از اندازه واقعی حجم رس به دنبال داشته باشند [63]. بنابراین محققان بسیاری با معرفی ضرائب تصحیحی سعی بر اصلاح این رابطه بر روی آن کرده‌اند که هریک از این تصحیحات بر اساس فرض‌های خاصی توسعه داده شده است و به نام همان محقق شناخته می‌شود [64-67، 41، 32]. اولین رابطه تصحیح‌کننده را لارینف در سال 1969 [64]، براساس سن سنگ مطرح کرد. روابط وی با توجه به این فرض که سنگ‌های جوان و تحکیم‌نیافته مقدار فلدسپات قلیایی بیشتر (و رس پرتوزای کمتری) نسبت به سنگ‌های قدیمی‌تر و تحکیم‌یافته دارند، توسعه یافت و معرفی شد. روابط لارینف 2 و 3 که به نام روابط لارینف-1 و لارینف-2 شناخته می‌شوند [64]، به ترتیب برای محاسبه حجم رس سنگ‌های دوران مزوزوئیک و رسوبات دوران ترشیاری با استفاده از شاخص پرتو استفاده می‌شوند. دو سال پس از معرفی لارینف، محقق دیگری به نام کلاویر، رابطه تجربی 4 را براساس اختلاف چگالی رس‌ها در ماسه‌سنگ و شیل ارائه کرد [65]. دو سال پس از آن، استیبر تفاوت توزیع رس در ماسه‌سنگ و شیل را مبنای تعریف رابطه تجربی دیگری، یعنی رابطه 5 قرار داد [66].

روابط 1 تا 5، تقریباً توسط تمام شرکت‌های معروف نگارگری در کتاب‌های راهنما برای تخمین حجم رس معرفی می‌شوند [61، 48]. شکل 9، نحوه تخمین این روابط را به‌ازای شاخص پرتوهای متفاوت نشان می‌دهد. ده سال بعد با در نظر گرفتن این نکته که میزان پرتوزایی سازند تابع چگالی اجزای سازنده آن است، محققى به نام دوان⁵ [32] رابطه ترکیبی خود را معرفی کرد. در رابطه او یعنی رابطه 6 از داده‌های دو نگار چگالی و پرتوزایی همزمان استفاده می‌شود. رابطه 7 که در آن عامل جدیدی به نام فاکتور زمین شناسی استفاده می‌شود، در واقع اعمال‌کننده ضربی است که با به‌کار بردن آن معادله نتایجی بین روابط کلاویر و

می‌شوند، در صورتی که پاسخ‌های آزمایشگاهی موجود نیست، کمترین تخمین به‌عنوان حجم نهایی رس انتخاب شود [59]. در صورت موجود بودن نتایج آنالیز مغزه، پاسخ تخمین‌های پتروفیزیکی باید اعتبارسنجی شود تا بر این اساس، بهترین روش و بهترین نگار شاخص رس برای منطقه انتخاب شود [60]. اندازه‌گیری‌های پرتوزایی طبیعی از لحاظ آماری برای تخمین حجم کانی‌هایی مانند فلدسپات‌های قلیایی، کائولینیت و کلریت از داده‌های نگار بسیار مهم است. نگارهای پرتوزایی طبیعی یعنی نگار پرتو گاما و مولفه‌های طیفی آن (پتاسیم، توریم و اورانیوم)، پرتوزایی طبیعی سازندها که از ایزوتوپ‌های ^{40}K (0/01167% پتاسیم طبیعی)، ^{232}Th (100% توریم طبیعی) و ^{235}U (99/27% اورانیوم طبیعی) ساطع می‌شود را اندازه‌گیری می‌کنند [61]. در غیاب فلدسپات‌های قلیایی، میکا، دولومیت پرتوزا، قطعات خرده‌سنگی پرتوزا، مواد آلی، کانی‌های سنگین (مانند توپاز و موناژیت)، شکستگی‌های طبیعی (که محل تجمع اورانیوم است) و سایر کانی‌های پرتوزا، کانی‌های رسی به علت وجود پتاسیم پرتوزا در ساختار خود یا جذب سطحی کاتیون‌های پرتوزا، منشاء اصلی پرتوزایی در سازندها هستند [11]. این مطلب سبب می‌شود که به‌راحتی بتوان قرائت‌های کم و زیاد پرتو گاما را به مناطق تمیز (ماسه بدون رس) و مناطق شیلی (وجود کانی‌های رسی در مقادیر عمده) نسبت داد [47].

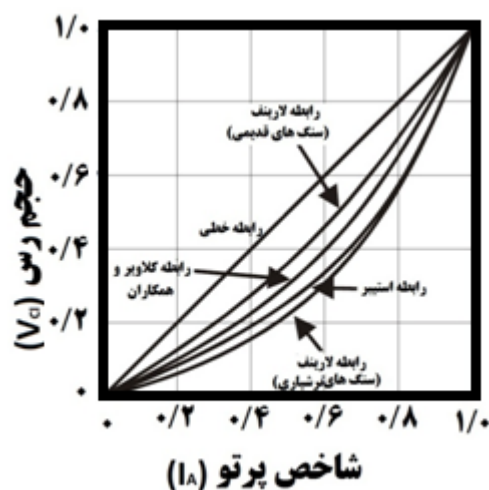
با فرض پرتوزایی ثابت، شرایط خوب چاه، عدم وجود کانی‌های غیر رسی پرتوزا و عدم تغییرات چگالی، حجم رس تابعی خطی، مطابق رابطه 1، از میزان نگار پرتو گامای طبیعی و مولفه‌های طیفی آن است [62]. در این رابطه حجم رس برابر با شاخص پرتو (I_A) در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از مقادیر بیشینه (Amax) و کمینه (Amin)، قرائت نگار پرتوزایی از صفر تا یک به‌هنجار می‌شود. شایان ذکر است که از داده‌های نگارهای پرتو گامای طبیعی (GR)، پتاسیم (POTA)، توریم (THOR) و اورانیوم (URAN) می‌توان در این رابطه استفاده کرد و شاخص‌های پرتو گامای

$$V_{Cl} = \frac{0.5I_A}{1.5 - I_A} \quad 5$$

$$V_{Cl} = I_A \times \left(\frac{\rho_b}{\rho_{b_{cl}}} \right)^3 \quad 6$$

$$V_{Cl} = I_A^{GR\ Factor + I_A} \quad 7$$

$$V_{Cl} = 0.6I_A \quad 8$$



شکل 9 مقایسه نحوه تخمین روابط 1الی 4، اصلاح شده از [48]

روش دیگری نیز برای ارزیابی و تخمین حساسیت آسیب سازند مخازن شیلی بر مبنای داده‌های نگار (ترجیحاً شاخص‌های پتاسیم-توریم) بر اساس درصد رس‌های انبساط‌پذیر موجود در سازند مطرح شده است [75]. این شاخص اثر سیلت‌های پرتوزا را که عیارهای بالای اورانیوم دارند را کاهش می‌دهد و تقریباً از نوع رس مستقل است. در این روش، مقدار V_{cl} ترکیب شده با مقدار اکسید پتاسیم (Potv) که از طیف پرتو گامای طبیعی محاسبه می‌شود با نسبت لایه‌های رسی انبساط پذیر (PCEC) به صورت زیر همبستگی دارد:

$$PCEC = aPOTV^2 - bPOTV + c \quad 9$$

استیبر را شبیه سازی می‌کند. این ضریب وقتی 1/25 در نظر گرفته شود، دقیقاً نتایج رابطه کلاویر و زمانی که 1/5 در نظر گرفته شود، نتایج رابطه استیبر را خواهد داد و به نوعی می‌توان گفت که رابطه چندان جدیدی نیست. اما، رابطه 8 که توسط بویان-پاسی در سال 1994 ارائه شده است، کاملاً مبنای جدیدی دارد. برخلاف سایر روابط ذکر شده که غیرخطی است و به ازای قرائت بیشینه نگار پرتوزایی، حجم رس را 100% در نظر می‌گیرند، در این رابطه خطی به ازای قرائت بیشینه نگار پرتوزایی، حجم رس 60% به دست می‌آید [41]. این رابطه در عین سادگی بسیار بر مبنای تفاوت بین تعریف حجم "شیل" و حجم "رس" استوار شده است. در شیل‌ها طبق میانگین جهانی، حدوداً 59% کانی رسی وجود دارد [43] که با تقریب در این رابطه، 60% در نظر گرفته شده است. البته این ضریب می‌تواند با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های شیل محلی و محاسبه درصد کانی‌های رسی منطقه مورد بررسی، تغییر داده شود [41].

در تحقیقات بسیاری نشان داده شده است که تخمین پتروفیزیکی حجم رس با استفاده از نگار پرتو گامای طبیعی تصحیح شده، همبستگی خوبی با حجم رس به دست آمده از آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس [73-68 و 14] یا نتایج حجم رس به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ظرفیت تبادل کاتیونی [74] دارد.

$$I_A = \frac{A_{log} - A_{min}}{A_{max} - A_{min}}; A: GR, POTV, THOR, URAN \quad 1$$

$$V_{Cl} = 0.33[2^{2I_A} - 1.0] \quad 2$$

$$V_{Cl} = 0.083[2^{3.7I_A} - 1.0] \quad 3$$

$$V_{Cl} = 1.7 - \sqrt{3.38 - (I_A + 0.7)^2} \quad 4$$

$$\left(\frac{\rho_{SH}-\rho_{ma}}{\rho_f-\rho_{ma}}\right)V_{Cl}^2 - \left(\phi_N + \frac{\rho_b-\rho_{ma}}{\rho_f-\rho_{ma}} + \rho_{SH}-\rho_{ma}\rho_f-\rho_{ma}-2\Delta tsh-\Delta tma\Delta tf-\Delta tmaV_{Cl}+\phi_N+\rho_b-\rho_{ma}\rho_f-\rho_{ma}-2\Delta t-\Delta tma\Delta tf-\Delta tma\times 100\Delta tsh=0\right) \quad 12$$

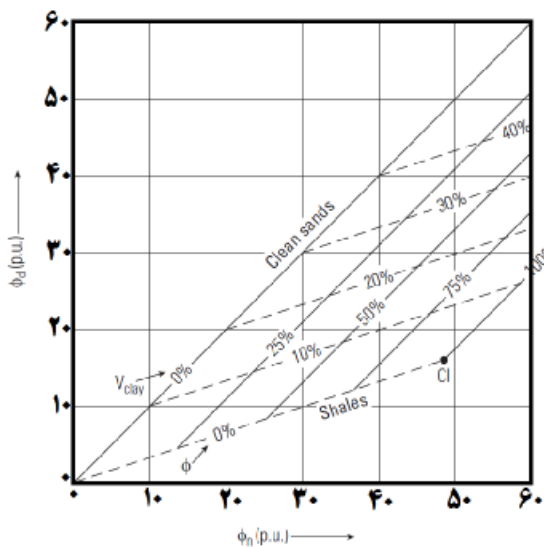
$$AV_{Cl}^2 + BV_{Cl} + C = 0 \quad 13$$

$$V_{Cl} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = \left(\frac{\rho_{SH} - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}}\right) \quad 14$$

$$B = -\left(\phi_N + \frac{\rho_b-\rho_{ma}}{\rho_f-\rho_{ma}} + \frac{\rho_{SH}-\rho_{ma}}{\rho_f-\rho_{ma}} - 2\Delta tsh-\Delta tma\Delta tf-\Delta tma\right) \quad 15$$

$$C = \left(\phi_N + \frac{\rho_b-\rho_{ma}}{\rho_f-\rho_{ma}} - 2\frac{\Delta t-\Delta tma}{\Delta t_f-\Delta tma} \times \frac{100}{\Delta t_{sh}}\right) \quad 16$$



شکل 10: نحوه تخمین حجم رس با استفاده از تخلخل حاصل از نگارهای نوترون و چگالی [48]

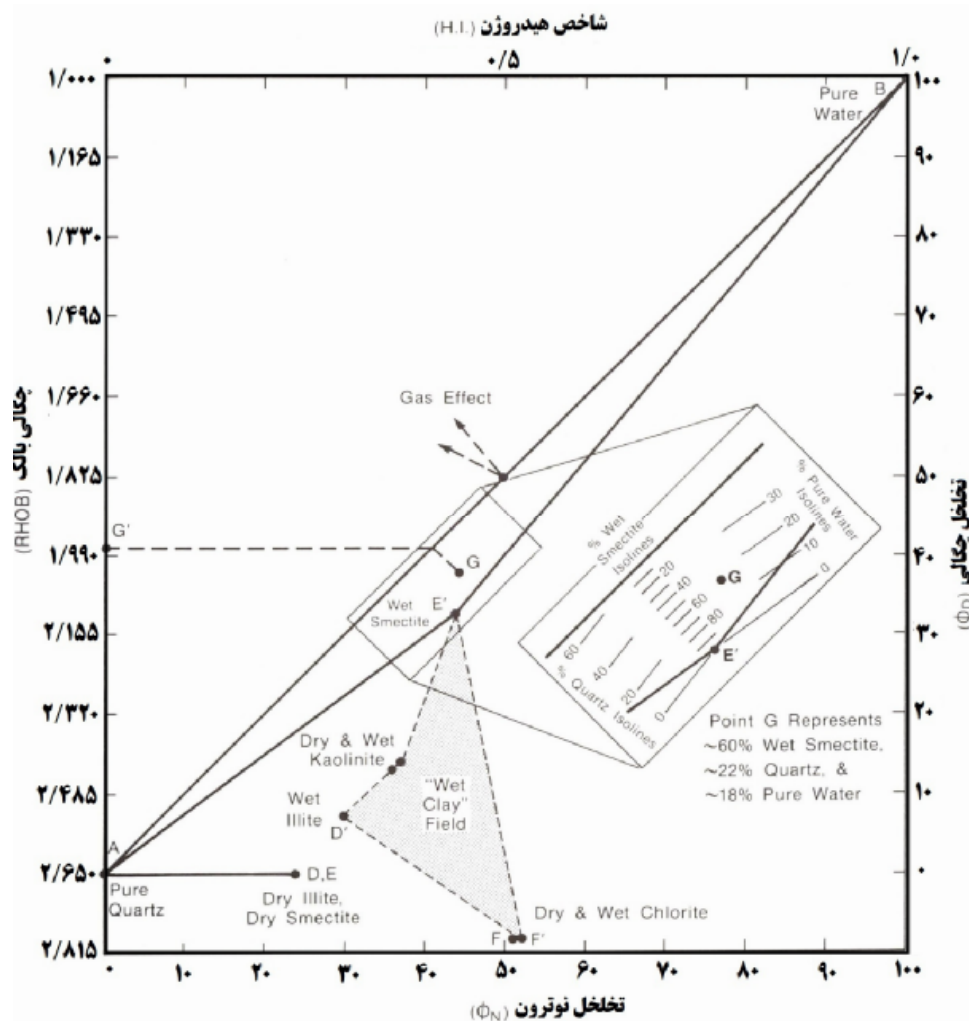
$$CEC = (dPCEC + e) V_{cl} \quad 10$$

$$V_{Cl} = \frac{\text{Log}^{CEC} + 2.4473}{1.9832} \quad 11$$

بعلاوه، تناسب مستقیم درصد لایه‌های رسی انبساط‌پذیر و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (رابطه 10)، اجازه تخمین مقدار CEC (که در آن a, b, c, d و e ثابت‌های تجربی برای ناحیه زمین‌شناسی مورد مطالعه هستند) را می‌دهد. رابطه 11 نیز برای تخمین حجم رس با فرض معلوم بودن ظرفیت تبادل کاتیونی توسعه داده شده است [76].

البته روش‌های دیگری نیز مبتنی بر داده‌های سایر نگارهای پتروفیزیکی وجود دارد. در برخی رویکردها با استفاده از رسم نمودارهای مقاطع مثلاً تخلخل حاصل از چگالی در مقابل تخلخل نوترون، حجم رس تخمین زده می‌شود [48]. شکل 10، نحوه محاسبه حجم رس از این طریق را نشان می‌دهد. نمودارهای مقاطع دیگری نیز (شکل 11) برای این منظور وجود دارند که علاوه بر تخمین حجم رس، نوع کانی‌های رسی را نیز می‌توان با آن‌ها تشخیص داد.

در سال 2003، روش جدیدی برای محاسبه حجم رس از طریق حل یک معادله درجه دوم، رابطه 12، با استفاده از داده‌های سه نگار نوترون، چگالی و صوتی توسعه داده شد [5]. این معادله علاوه بر این که تأثیر پارامترهای خمیره، سیال و رس را در نظر می‌گیرد، صرف نظر از نحوه توزیع، برای بسیاری از سازندها کاربرد دارد. ریشه‌های معادله 12 که از فرمول داده شده در رابطه 13 به دست می‌آید، حجم رس سازند خواهد بود. پارامترهای حل معادله درجه دوم و به دست آوردن ریشه یعنی A, B و C از روابط 14 تا 16 به دست می‌آید.



شکل 11: نمودار متقاطع برای تعیین نوع و مقدار کانی‌های رسی [77]

شیل، بسته به مقدار و نوع مواد آلی و میزان پختگی می‌تواند هم به‌عنوان شیل نفتی و هم شیل گازی شناخته شود [78]. هیچ دو مخزن شیلی را نمی‌توان یافت که خصوصیات یکسانی داشته باشند. نوع کانی‌های موجود، نوع سیال و خواص پتروفیزیکی شیل روی خواص مکانیکی مخزن و خواص ترک‌های حاصل تأثیر عمده‌ای می‌گذارند [79].

شیل نفتی سنگ رسوبی بسیار دانه ریز با تخلخل غیرمفید بالا و تراوایی کم بوده که دارای مقداری مواد آلی (کروژن) است. پارامترهای مهم برای شناسایی و ارزیابی شیل‌ها عبارتند از: میزان تخلخل، نفوذپذیری، مقدار اشباع آب، کانی‌شناسی، مقدار کل کربن آلی و ویژگی‌های

در سال 2011 اسزابو⁶ [77] بر اساس روش‌های آمار چند متغیره، نگار جدیدی بر مبنای آنالیز فاکتوری از سری داده‌های چاه‌نگاری ساخت که همبستگی بالایی با حجم رس نشان می‌داد که آن را به‌عنوان روشی جدید برای تخمین حجم رس ارائه کرد. در سال 2013 رابطه بالا بیشتر توسعه داده شد و برای اطمینان از تعمیم‌پذیری آن، روش مذکور روی چندین نمونه از ایالات متحده آمریکا و مجارستان به‌طور موفقیت‌آمیزی آزمایش شد [77]. در سال 2015، از شبکه عصبی چندلایه به‌طرز موفقیت‌آمیزی برای تخمین حجم رس استفاده شد [73].

13- رس‌ها به‌عنوان مخازن هیدروکربوری

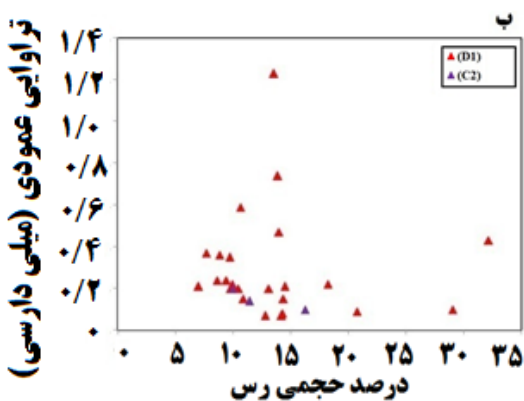
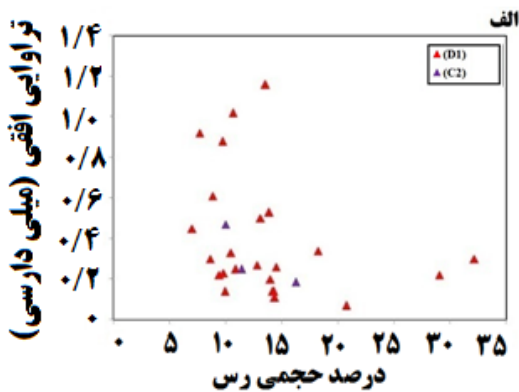
وجود کانی‌های رسی از نوع کائولینیت و ایلیت سبب کاهش تخلخل و تراوایی در ماسه سنگ های مخزنی کژدمی شده است که در این میان تأثیر کائولینیت بر کاهش تراوایی کمتر از ایلیت تلقی شده است [80]. براساس مطالعه‌ای، وجود کانی‌های رسی در مخازن شیل گازی، منافذی با اندازه‌های میکرو تا نانومتری ایجاد می‌کند که سبب ایجاد تخلخلی در حدود 16% می‌شود [81]. اگر نوع کانی رسی موجود در مخزن از نوع کلریتی باشد با سیمان نمودن کوارتز سبب رشد مجدد بلورهای کوارتز می‌شود و تخلخل حفظ می‌شود [12]. کانی‌های رسی به‌تنهایی عامل مؤثری در ایجاد فشار مؤثر در ماسه‌های غنی از رس نیستند [82]. ایلیت و کلریت بیشترین آسیب را به سازندها وارد می‌کنند [83]. اگر حجم رس کمتر از 4% باشد، تأثیری بر تراوایی ندارد [84]. مدل جدیدی برای محاسبه حجم رس با در نظر گرفتن تخلخل و چگالی برای سازندهای نرم و فشرده در سال 2017 ارائه شده است [85]. با استفاده از لاگ جدید شولامبرژه با نام FMI^7 نیز حجم رس را می‌توان در سازندهای با ضخامت کم با دقت خوبی اندازه‌گیری کرد [86-87].

در مطالعه‌ای روی سازند مخزنی شورپیجه [88، 8]، 24 نمونه از زیربخش D_1 و 3 نمونه از زیربخش C_2 چاه شماره 9 که هم دارای داده‌های آزمایشگاهی درصد حجمی رس و هم داده‌های تخلخل آزمایشگاهی بودند، ملاک بررسی رابطه تخلخل و میزان حجم رس قرار گرفت. در سازند شورپیجه می‌توان گفت صرف‌نظر از نوع الگوی توزیع، در حضور 8% حجمی رس میانگین تخلخل مؤثر حدود 10 p.u است و با افزایش درصد حجمی رس به بیشینه مقدار خود یعنی 24/16%، تخلخل به 2/5 p.u کاهش می‌یابد. یعنی 24/16% حجمی افزایش رس، سبب 7/5 p.u واحد کاهش تخلخل مؤثر در سازند شورپیجه می‌شود (شکل 12).

ژئومکانیکی و ژئوشیمیایی که با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی و آنالیز مغزه قابل ارزیابی هستند. برای اکتشاف نفت نامتعارف بررسی‌های زمین‌شناسی در سال 1334 در منطقه البرز جنوبی و در سال 1354 در قالیکوه و زردکوه لرستان انجام گرفته است. با آزمایش‌های به‌عمل آمده از شیل نفتی در این منطقه مشخص شده است که مقدار نفت منابع مذکور بیش از متوسط جهانی بوده، اما به‌علت صعب‌العبور بودن مناطق بالا و هزینه‌های بالای تولید، استخراج و تولید از این منابع در حال حاضر در اولویت نیست. در زمینه برآورد حجم این ذخایر، طبق برآورد اولیه انجام شده در سال 1334 توسط شرکت آمریکایی TOSCO، حجم ذخیره قابل استحصال مقدار قابل توجهی اعلام شده است. هم‌اکنون پروژه‌هایی برای برآورد حجم برجای این ذخایر در مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت، تعریف شده است. شیل گازی را می‌توان به‌عنوان سنگی ریزدانه و غنی از مواد آلی که دارای ذخیره اقتصادی گازی باشد، تعریف کرد. سازندهای شیل گازی اغلب نازک و دارای گسترش زیادی هستند که تخلخل پایینی دارند و برای داشتن تولید اقتصادی از آن ایجاد شکستگی ضروری است [78]. در حال حاضر بیشتر تولیدات مخازن شیل گازی از سنگ منشأهای فوق‌بالغ حاوی کروژن نوع I و II است. مخازن شیل گازی دارای حداقل کل کربن آلی 2-0/5 درصد می‌باشند. در ایران، سازندهای گرو و سرگلو در بخش مرکزی استان لرستان به‌عنوان مناطق پیشنهادی برای بررسی‌های تفصیلی پیشنهاد شده است. مطالعات نشان می‌دهد، سازند گرو دارای مقدار TOC خوبی بوده و توان هیدروکربورزایی نسبتاً خوبی را بر اساس نمونه‌های چاه نشان می‌دهد و کروژن نوع III و II/III دارد. از نظر Tmax در مرحله تولید میعانات گازی قرار دارد. سازند سرگلو نیز دارای مقدار TOC خوبی بوده و دارای کروژن نوع III است و از نظر Ro وارد مرحله گاززایی شده است. همچنین سازند کژدمی در دزفول شمالی دارای توان هیدروکربورزایی خوبی است [79].

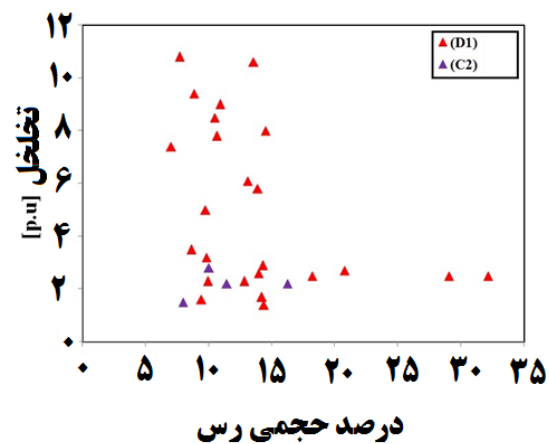
14- تأثیر وجود کانی‌های رسی بر تخلخل و تراوایی

دارسی کاهش می‌یابد. یعنی 18/45% حجمی افزایش رس، سبب 0/56 واحد کاهش در تراوایی عمودی سازند شوربجه می‌شود. تراوایی افقی و عمودی مخزن خواهد شد که در این میان تأثیر کاهش تخلخل بیش از تراوایی است. حدود 20% افزایش حجم رس سبب کاهش چشمگیر تخلخل می‌شود.



شکل 13: نحوه تغییرات (الف) تراوایی افقی و (ب) تراوایی عمودی با تغییرات درصد حجمی رس در سازند شوربجه

بازیابی نفت نیز مؤثرند. تفسیر صحیح نگارهای پتروفیزیکی نیز در گرو بررسی دقیق کانی‌های رسی موجود است. کاربرد اشتباه اما مصطلح حجم شیل به جای حجم رس سبب تخمین بیش از حد کانی‌های رسی و در نتیجه تخمین کمتر از اندازه واقعی درجه اشباع آب و نهایتاً تفسیر نادرست از تولیدی بودن مخزن خواهد شد. روش‌ها و روابط پتروفیزیکی متعددی برای شناسایی نوع، حجم و الگوی



شکل 12: رابطه درصد حجمی رس و تخلخل کل در نمونه‌های مغزه زیربخش‌های مختلف سازند شوربجه

در ارتباط با تأثیر حجم رس بر میزان تراوایی با بررسی شکل 13 نیز در مجموع می‌توان گفت، صرف‌نظر از کلاستر تشکیل شده از داده‌های با حجم رس - تراوایی افقی پایین شکل 13 (الف)، در حضور 9% حجمی رس میانگین تراوایی افقی حدود 0/94 میلی دارسی است و با افزایش درصد حجمی رس به بیشینه مقدار خود یعنی 32/16% تراوایی افقی به 0/30 میلی دارسی کاهش می‌یابد. یعنی 23/16% حجمی افزایش رس، سبب 0/64 واحد کاهش در تراوایی افقی سازند شوربجه می‌شود. در ارتباط با تراوایی عمودی، صرف‌نظر از کلاستر تشکیل شده از داده‌های با حجم رس - تراوایی عمودی پایین شکل 13 (ب)، می‌توان گفت در حضور 13/71% حجمی رس میانگین تراوایی عمودی حدود 0/99 میلی دارسی است و با افزایش درصد حجمی رس به بیشینه مقدار خود یعنی 32/16% تراوایی عمودی به 0/43 میلی

15- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب یاد شده، ارزیابی کیفیت مخازن هیدروکربوری، صرفاً با تعیین نوع، نحوه توزیع و درصد حجمی کانی‌های رسی به درستی انجام خواهد شد. کانی‌های رسی در بازسازی تاریخچه تدفین و عملیات

Potv	مقدار پتاسیم	توزیع کانی‌های رسی با توجه به اطلاعات پتروفیزیکی موجود است.
PCEC	درصد لایه‌های رسی انبساط‌پذیر	
CEC	ظرفیت تبادل کاتیونی	توضیح علائم اختصاری
ρ_{SH}	چگالی شیل	I_A شاخص پرتو
ρ_{ma}	چگالی خمیره	A_{log} قرائت نگار پرتوایی در هر عمق دلخواه
ρ_f	چگالی سیال	A_{min} کمینه میزان قرائت نگار پرتوایی
ϕ_N	تخلخل نگار نوترون	A_{max} بیشینه میزان قرائت نگار پرتوایی
Δt_{sh}	قرائت نگار صوت در شیل	V_{cl} حجم رس
Δt_{ma}	قرائت نگار صوت در خمیره	ρ_b چگالی بالک سازند
Δt_f	قرائت نگار صوت در سیال	$\rho_{b_{cl}}$ چگالی بالک رس موجود در سازند
		$GR\ Factor$ فاکتور سازند (پارامتری تجربی است).

مراجع

composition on aquifer permeability. *Applied Thermal Engineering*, 118, 551-560.

[8] جوزانی کهن، گ.، 1393، "ارزیابی محتوا و تعیین کانیهای رسی سازند شورچینه میدان گنبدلی با روش‌های آزمایشگاهی و ترکیب اطلاعات"، رساله دکترای تخصصی رشته مهندسی معدن، گرایش اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، 260 صفحه.

[9] Merriman, R. J. (2005). Clay minerals and sedimentary basin history. *European Journal of Mineralogy*, 17(1), 7-20.

[10] Slatt, R. M. (2006). *Stratigraphic reservoir characterization for petroleum geologists, geophysicists, and engineers* (Vol. 61). Elsevier.

[11] Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). *Well logging for earth scientists* (Second Edition). Dordrecht: Springer.

[12] Taylor, T. R., Giles, M. R., Hathon, L. A., Diggs, T. N., Braunsdorf, N. R., Birbiglia, G. V., ... & Espejo, I. S. (2010). Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality. *AAPG bulletin*, 94(8), 1093-1132.

[13] نوروزی، غ. ح.، 1388، "چاه‌نگاری"، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، 475 صفحه.

[1] Murray, H. H. (2006). *Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskitesepiolite, and common clays* (Vol. 2). Elsevier.

[2] Wilson, M. J., Wilson, L., & Patey, I. (2014). The influence of individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with some new insights. *Clay Minerals*, 49(2), 147-164.

[3] Barson, D., Christensen, R., Decoster, E., Grau, J., Herron, M., Herron, S., & Guru, U. K. (2005). Spectroscopy: the key to rapid, reliable petrophysical answers. *Oilfield Rev*, 17(2), 14-33.

[4] شیخ زاده، ح.، 1386، "اهمیت شیل‌ها و کانی‌های رسی در مخازن نفتی"، ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، 44 (5)، 1-2.

[5] Kamel, M. H., & Mabrouk, W. M. (2003). Estimation of shale volume using a combination of the three porosity logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 40(3), 145-157.

[6] Aksu, I., Bazilevskaya, E., & Karpyn, Z. T. (2015). Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. *GeoResJ*, 7, 1-13.

[7] Liu, X., Jiang, X., Liu, J., Li, J., & Li, W. (2017). The effect of the injection salinity and clay

- reservoirs. *Clay Mineral Cements in Sandstones: (Special Publication 34 of the IAS)*, 34(34), 191.
- [25] Golab, A. N., Knackstedt, M. A., Averdunk, H., Senden, T., Butcher, A. R., & Jaime, P. (2010). 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones. *The Leading Edge*, 29(12), 1476-1483.
- [26] Lanson, B., Beaufort, D., Berger, G., Bauer, A., Cassagnabere, A., & Meunier, A. (2002). Authigenic kaolin and illitic minerals during burial diagenesis of sandstones: a review. *Clay minerals*, 37(1), 1-22.
- [27] Bloch, S., Lander, R. H., & Bonnell, L. (2002). Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability. *AAPG bulletin*, 86(2), 301-328.
- [28] Kuila, U., McCarty, D. K., Derkowski, A., Fischer, T. B., Topór, T., & Prasad, M. (2014). Nano-scale texture and porosity of organic matter and clay minerals in organic-rich mudrocks. *Fuel*, 135, 359-373.
- [29] Fisher, Q. J., Knipe, R. J., & Worden, R. H. (2009). Microstructures of deformed and non-deformed sandstones from the North Sea: implications for the origins of quartz cement in sandstones. *Quartz Cementation in Sandstones: Special Publication 29 of the IAS*, 14, 129.
- [30] Taylor, T. R., Giles, M. R., Hathon, L. A., Diggs, T. N., Braunsdorf, N. R., Birbiglia, G. V., ... & Espejo, I. S. (2010). Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality. *AAPG bulletin*, 94(8), 1093-1132.
- [31] Li, Z., Wu, S., Xia, D., Zhang, X., & Huang, M. (2017). Diagenetic alterations and reservoir heterogeneity within the depositional facies: A case study from distributary-channel belt sandstone of Upper Triassic Yanchang Formation reservoirs (Ordos Basin, China). *Marine and Petroleum Geology*.
- [32] Dewan, J. T. (1983). *Essentials of modern open-hole log interpretation*. PennWell Books.
- [33] Darling, T. (2005). *Well logging and formation evaluation*. Elsevier.
- [34] Neasham, J. W. (1977, January). The Morphology Of Dispersed Clay In Sandstone
- [14] Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J. F., & Baudin, F. (2006). Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic–early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, UK). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4), 303-320.
- [15] Hassan, M., Hossin, A., & Combaz, A. (1976). Fundamentals of the differential gamma ray log-Interpretation technique: Trans. In *17th Ann. Logging Symp., Soc. Prof. Well Log Analysts, Paper H*.
- [16] Causey, G. L. (1991). *Computer determination and comparison of volume of clay derived from petrophysical and laboratory analysis* (Master dissertation, Texas Tech University), Lubbock, Texas, USA.
- [17] Miall, A. (2013). *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer.
- [18] Ruffell, A. H., Worden, R. H., & Evans, R. (2003). Palaeoclimate controls on spectral gamma-ray radiation from sandstones. *Clay Mineral Cements in Sandstones: (Special Publication 34 of the IAS)*, 10, 93-108.
- [19] Tucker, M. E. (Ed.). (2009). *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. John Wiley & Sons.
- [20] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). General introduction: clays, clay minerals, and clay science. *Developments in clay science*, 1, 1-18.
- [21] Quirein, J., Witkowsky, J., Truax, J. A., Galford, J. E., Spain, D. R., & Odumosu, T. (2010, January). Integrating core data and wireline geochemical data for formation evaluation and characterization of shale-gas reservoirs. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [22] Civan, F. (2015). *Reservoir formation damage*. Gulf Professional Publishing.
- [23] Worden, R. H., & Morad, S. (2003). *Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution* (pp. 1-41). Blackwell Publishing Ltd.
- [24] Worthington, P. F. (2003). Effect of clay content upon some physical properties of sandstone

modification and application. In Tech Publication, Croatia.

[45] Fertl, W. H., Welker, D., & Hopkinson, E. C. (1979). *The Dresser Atlas Spectralog: A Look at Basic Principles, Field Applications and Interpretive Concepts of Gamma Ray Spectral Logging*. Dresser Atlas.

[46] Juhasz, I. (1981, January). Normalised Qv-the key to shaly sand evaluation using the Waxman-Smits equation in the absence of core data. In SPWLA 22nd Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

[47] Quirein, J. A., Baldwin, J. L., Terry, R. L., & Hendricks, M. (1981, January). Estimation of clay types and volumes from well log data-An extension of the global method. In SPWLA 22nd Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

[48] SLB (R&D), (2009). Schlumberger Chart Book. Schlumberger Educational Services (Research and Development Section), France.

[49] Fertl, W. H. (1986, January). Clay Typing Based On Well Logs. In *Annual Technical Meeting*. Petroleum Society of Canada (SIM), Calgary, Canada.

[50] Almon, W. R., & Davies, D. K. (1981). Formation damage and the crystal chemistry of clays. *Short course in clays and the resource geologist: Montreal, Mineralogical Association of Canada*, 7, 81-102.

[51] Hilchie, D.W., (1982). *Advanced electric log analysis*. Douglas W. Hilchie Inc., Golden Colorado, USA.

[52] Asquith, G. B., Krygowski, D., & Gibson, C. R. (2004). *Basic well log analysis* (Vol. 16). Tulsa, OK: American association of petroleum geologists.

[53] Bandaru, A. R., (2010). Clay-typing, Depositional Environment and Framing a Petrophysical Model for Formation Evaluation in Vashista Field, Krishna - Godavari Basin-a Case Study. In: 8th Biennial international conference & exposition of petroleum geophysics, Hyderabad, India.

[54] Sarkisyan, S. G. (1972). Origin of authigenic clay minerals and their significance in petroleum geology. *Sedimentary Geology*, 7(1), 1-22.

Reservoirs And Its Effect On Sandstone Shaliness Pore Space And Fluid Flow Properties. In *SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

[35] He, J., Ding, W., Zhang, J., Li, A., Zhao, W., & Dai, P. (2016). Logging identification and characteristic analysis of marine-continental transitional organic-rich shale in the Carboniferous-Permian strata, Bohai Bay Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 70, 273-293.

[36] Liu, X., Jiang, X., Liu, J., Li, J., & Li, W. (2017). The effect of the injection salinity and clay composition on aquifer permeability. *Applied Thermal Engineering*, 118, 551-560.

[37] Kwon, O., Kronenberg, A. K., Gangi, A. F., Johnson, B., & Herbert, B. E. (2004). Permeability of illite bearing shale: 1. Anisotropy and effects of clay content and loading. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B10).

[38] Worden, R. H., & Burley, S. D. (2003). Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*, 4, 3-44.

[39] Nagel, W. A. (1984, January). Gamma-Ray Log Calibration--Theory. In *SPWLA 25th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

[40] Fertl, W. H., & Chilingar, G. V. (1990). Type and distribution modes of clay minerals from well logging data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 3(4), 321-332.

[41] Bhuyan, K., & Passey, Q. R. (1994, January). Clay estimation from GR and neutron-density porosity logs. In *SPWLA 35th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

[42] Worthington, P. F. (2010). Quality-assured evaluation of effective porosity using fit-for-purpose estimates of clay-mineral volume fraction. *Journal of Applied Geophysics*, 71(1), 36-45.

[43] Ross, D. J., & Bustin, R. M. (2009). The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6), 916-927.

[44] Jiang, S. (2012). Clay Minerals from the Perspective of Oil and Gas Exploration. In: clay minerals in nature, their characterization,

- [66] Steiber, R. G. (1973). Optimization of shale volumes in open hole logs. *Journal of Petroleum Technology*, 31, 147-162.
- [67] Bateman, R. M. (1986). *Openhole log analysis and formation evaluation*, International human resources development corporation, Boston, USA.
- [68] Revil, A. (2012). Spectral induced polarization of shaly sands: Influence of the electrical double layer. *Water Resources Research*, 48(2).
- [69] Handwerger, D., Ma, Y. Z., & Sodergren, T. (2015). EFFECTIVE CORE SAMPLING FOR IMPROVED CALIBRATION OF LOGS AND SEISMIC DATA. *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook: Evaluation and Development*, 335.
- [70] Nazeer, A., Abbasi, S. A., & Solangi, S. H. (2016). Sedimentary facies interpretation of Gamma Ray (GR) log as basic well logs in Central and Lower Indus Basin of Pakistan. *Geodesy and Geodynamics*, 7(6), 432-443.
- [71] Schnyder, J., Ruffell, A., Deconinck, J. F., & Baudin, F. (2006). Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic-early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, UK). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 229(4), 303-320.
- [72] Cosenza, P., Robinet, J. C., Prêt, D., Huret, E., Fleury, M., Géraud, Y., Lebon, P., Villiéras, F., & Zamora, M. (2014). Indirect estimation of the clay content of clay-rocks using acoustic measurements: New insights from the Montiers-sur-Saulx deep borehole (Meuse, France). *Marine and Petroleum Geology*, 53, 117-132.
- [73] Jozanikohan, G., Norouzi, G. H., Sahabi, F., Memarian, H., & Moshiri, B. (2015). The application of multilayer perceptron neural network in volume of clay estimation: Case study of Shurijeh gas reservoir, Northeastern Iran. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22, 119-131.
- [74] Byrnes, A., Cluff, R., Webb, J., Victorine, J., Stalder, K., Osburn, D., ... & Krygowski, D. (2008). Analysis of Critical Permeability, Capillary Pressure and Electrical Properties for Mesaverde Tight Gas Sandstones from Western US Basins. University Of Kansas Center For Research Incorporated.
- [55] Wu, L. M., Zhou, C. H., Keeling, J., Tong, D. S., & Yu, W. H. (2012). Towards an understanding of the role of clay minerals in crude oil formation, migration and accumulation. *Earth-Science Reviews*, 115(4), 373-386.
- [56] Hurst, A. (1987). Mineralogical analysis and the evaluation of the petrophysical parameter V_{shale} . *Marine and petroleum geology*, 4(1), 82-91.
- [57] Soto Becerra, R., Arteaga, D., Hidalgo, C. M., & Rodriguez, F. (2010, January). The Correct Shale-Volume Characterization Increases Hydrocarbon Reserves: Case Study of Cretaceous Formation Lake of Maracaibo Venezuela. In *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- [58] Adeoti, L., Ayolabi, E. A., & James, P. L. (2009). An integrated approach to volume of shale analysis: Niger Delta example, Offshore Field. *World Appl Sci J*, 7, 448-452.
- [59] Doveton, J. Pfeffer. (July 2001) Petrofacies Evaluation of Formations for Engineering Reservoirs. *The University of Kansas*.
- [60] Hamada, G. M. (1999). An Integrated Approach To Determine Shale Volume And Hydrocarbon Potential In Shaly Sands In The Gulf Of Suez. *The log analyst*, 40(03).
- [61] Dresser Atlas. (1982). Well logging and interpretation techniques. *The course for home study*. Dresser Atlas Publ.
- [62] Benedetto, F., & Tosti, F. (2013). GPR spectral analysis for clay content evaluation by the frequency shift method. *Journal of Applied Geophysics*, 97, 89-96.
- [63] Jadoon, Q. K., Roberts, E., Blenkinsop, T., Wust, R. A., & Shah, S. A. (2016). Petrophysical evaluation and uncertainty analysis of Roseneath and Murteree shales reservoirs in Cooper Basin, Australia (a case study). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147, 330-345.
- [64] Larionov, V. V. (1969). Borehole radiometry. *Nedra, Moscow, Russia*.
- [65] Clavier, C., Hoyle, W., & Meunier, D. (1971). Quantitative interpretation of thermal neutron decay time logs: part I. Fundamentals and techniques. *Journal of Petroleum Technology*, 23(06), 743-755.

in shale reservoirs: Implication for the accumulation of shale gas. *Sedimentary Geology*, 342, 180-190.

[83] Xiao, W. L., Jiang, L., Li, M., Zhao, J. Z., Zheng, L. L., Li, X. F., & Zhang, Z. P. (2015). Effect of clay minerals on the effective pressure law in clay-rich sandstones. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 1242-1251.

[84] Fang, W., Jiang, H., Li, J., Li, W., Li, J., Zhao, L., & Feng, X. (2016). A new experimental methodology to investigate formation damage in clay-bearing reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 143, 226-234.

[85] Rashid, F., Glover, P. W. J., Lorinczi, P., Hussein, D., & Lawrence, J. A. (2017). Microstructural controls on reservoir quality in tight oil carbonate reservoir rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

[86] Wang, H., Liu, T., Tang, T., & Shi, Y. (2017). A unified model to evaluate shaliness in compacted and soft formations using downhole GR log. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

[87] Noah, A. Z., & Moustafa, E. A. A. (2017). Comparison of Quantitative Analysis of Image Logs for Shale Volume and Net to Gross Calculation of a Thinly Laminated Reservoir between VNG-NERGE and LAGIA-EGYPT. *Egyptian Journal of Petroleum*.

[88] Jozanikohan, G., Sahabi, F., Norouzi, G. H., Memarian, H., & Moshiri, B. (2016). Quantitative analysis of the clay minerals in the Shurijeh Reservoir Formation using combined X-ray analytical techniques. *Russian Geology and Geophysics*, 57(7), 1048-1063.

بی‌نوشت

[75] Amiri, M., Yunan, M. H., Zahedi, G., Jaafar, M. Z., & Oyinloye, E. O. (2012). Introducing new method to improve log derived saturation estimation in tight shaly sandstones—A case study from Mesaverde tight gas reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 92, 132-142.

[76] Waxman, M. H., & Smits, L. J. M. (2003). Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *SPE Reprint Series*, 107-122.

[77] Szabó, N. P., & Dobróka, M. (2013). Extending the application of a shale volume estimation formula derived from factor analysis of wireline logging data. *Mathematical Geosciences*, 45(7), 837-850.

[78] Wu, C., Tuo, J., Zhang, L., Zhang, M., Li, J., Liu, Y., & Qian, Y. (2017). Pore characteristics differences between clay-rich and clay-poor shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Northern Guizhou area, and insights into shale gas storage mechanisms. *International Journal of Coal Geology*, 178, 13-25.

[79] لطفی یار، ا.، چهارازی، ع.، ثابتی، ن.، 1395 بررسی شیلها به عنوان منابع نامتعارف ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز. شماره 135، 65-72.

[80] Sayed, M. A., Al-Muntasheri, G. A., & Liang, F. (2017). Development of shale reservoirs: Knowledge gained from developments in North America. *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

[81] کردی، م.، بشری، ع.، 1382، شناخت کانی‌های رسی سازند کژدمی (ماسه های بورگان) و تأثیر آن‌ها بر سنگ مخزن در خلیج فارس، ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز. شماره 5، 16-17.

[82] Chen, S., Han, Y., Fu, C., Zhu, Y., & Zuo, Z. (2016). Micro and nano-size pores of clay minerals

¹ - Pseudomatrix

² - Overgrowth

³ - Berthierine

⁴ - Elemental capture spectroscopy

⁵ - Dewan

⁶ - Szabó

⁷ Fullbore Formation Micro Imager