معرفی اندیس کیفیت مخزن توسعه‌یافته در توصیف مخازن هیدروکربنی، مطالعه سازند کنگان در یکی از میادین جنوب ایران

هادی ابراهیمی، ابوالقاسم کامکار روحانی* و مهرداد سلیمانی‌منفرد

گروه نفت و ژئوفیزیک، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۴/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۴

چکیده

هدف از این مطالعه تعیین کیفیت مخزن در بخش‌های مختلف سازند کنگان در چاه مورد مطالعه واقع در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران است. ابتدا سازند کنگان با استفاده از روش ارزیابی پتروفیزیک احتمالی (Probabilistic) مورد ارزیابی پتروفیزیکی قرار گرفت. در این پژوهش از بین خصوصیات تأثیرگذار بر کیفیت مخزن، ویژگی‌های تخلخل، تراوایی و اشباع از آب انتخاب شده و سپس براساس تأثیر هر کدام از این ویژگی‌ها بر کیفیت مخزن، فرمول جدید اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) معرفی شد. بسته به اهمیت هر کدام از این پارامترها در کیفیت مخزن مقادیر مختلف به ازای ضرایب A، B، C و توان‌های β، α و γ در فرمول مزبور انتخاب شده و بهترین مقادیر این ضرایب و توان‌ها که سبب ماکزیمم شدن مقدار ضریب تعیین نمودار DRQI برحسب اشباع از آب می‌شود تعیین شدند. به منظور تعمیم فرمول DRQI برای سایر سازندهای مخزنی، این فرمول برای سازند کربناته سروک در یک میدان نفتی مورد استفاده قرار گرفت. نمودار DRQI و RQI برای واحدهای مخزنی سازند کنگان در مقابل عمق، رسم و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج محاسبه DRQI برای واحدهای مخزنی سازند کنگان حاکی از آن است که بخش K2 این سازند بر اساس اندیس معرفی شده شرایط مخزنی مناسب‌تری را نسبت به بخش K1 دارد که بررسی نتایج ارزیابی پتروفیزیکی سازند کنگان نیز همین نتیجه را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنگان، تخلخل، تراوایی، اشباع از آب، اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته

مقدمه

هدف از مطالعات و بررسی‌های پتروفیزیکی، زون‌بندی سازند مخزنی، تعیین زون‌های خالص تولیدی و در نهایت بررسی و تعیین کیفیت مخزن[1] در توالی‌های مختلف به منظور بهره‌برداری بهینه و توسعه آگاهانه و دقیق میادین هیدروکربنی است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی kamkar@shahroodut.ac.ir
شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2018.2935.2372)

1. Reservoir Quality

Archive of SID
www.SID.ir

تخلخل (ϕ)، تراوایی (k) و اشباع‌شدگی از آب (Sw) مهم‌ترین پارامترهایی هستند که در ارزیابی پتروفیزیکی به منظور بررسی و تعیین کمّی کیفیت مخزن می‌بایست تعیین شوند.

محاسبه درست و دقیق این پارامترها نقش مؤثری در مدل‌سازی مخزن ایفا می‌نماید و میزان موفقیت در بسیاری از پروژه‌های اکتشافی، حفاری، بهره‌برداری و توسعه مخازن نفت و گاز به دقت برآورد این پارامترها بستگی دارد. در مطالعات مخزنی این پارامترها با استفاده از دو روش کاربردی و متداول آنالیز مغزه به‌عنوان روش مستقیم و استفاده از ارزیابی نگارهای پتروفیزیکی به‌عنوان روش غیرمستقیم تعیین می‌شوند. کیفیت مخزن پارامتر کلیدی در تعیین ارزش و دارایی مخازن نفت و گاز است. این پارامتر به طور مؤثری اکتشاف و استخراج منابع هیدروکربنی را کنترل می‌کند. عدم برآورد و تخمین دقیق این پارامتر باعث کاهش درجه موفقیت در عملیات بهره‌برداری و توسعه میدان می‌شود [۱ و ۲]. کیفیت مخزنی خوب یا بد به‌طور مستقیم میزان ذخایر هیدروکربنی و همچنین ظرفیت تولید مخزن را تعیین می‌کند. که در این صورت تعیین اهمیت و جزئیات پارامترهایی که کیفیت مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهند به منظور ارزیابی تداوم تولید ضروری و لازم است [۳ و ۴].

آمافول و همکاران مفهوم اندیس کیفیت مخزن[1] (RQI)، $(k/\varphi)^{0.5}$، با در نظر گرفتن گلوگاه خلل و فرج، توزیع خلل و فرج و دانه‌ها و دیگر پارامترهای ماکروسکوپی را معرفی کردند. این اندیس تقریبی از میانگین شعاع هیدرولیکی در سنگ مخزن است و کلیدی برای تعیین واحدهای هیدرولیکی بوده که تخلخل، تراوایی و فشار مویینگی را به هم مرتبط می‌سازد [۵]. ورتینگتن از RQI برای تعیین حد برش‌های پارامترهای پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی، اشباع‌شدگی از آب و حجم شیل) با شرایط دینامیکی جهت تعیین زون خالص تولیدی از زون ناخالص استفاده کرد [۶]. نبوی و العززی اندیس پتانسیل مخزن[2] (RPI) را جهت توصیف و رتبه‌بندی پتانسیل مخزن براساس RQI و اندیس منطقه جریان[3] (FZI) با در نظر گرفتن اشباع‌شدگی از آب و هیدروکربن معرفی کردند. RPI، میانگین حسابی RQI و FZI است [۷]. ایزدی و قلم‌بُر ضمن ارائه روشی جدید برای تعیین تراوایی، مفهوم اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته[4] (MRQI) را معرفی کردند که پارامتری جهت تعیین واحدهای هیدرولیکی می‌باشد که در این رابطه علاوه‌بر تراوایی و تخلخل، اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر نیز وجود دارد [۸].

کوتز و دِنو اندیس سیال آزاد[5] (FFI) را که به‌صورت حاصل ضرب اشباع از هیدروکربن و تخلخل تعریف می‌شود و مقیاسی از نرخ نفت و یا آب قابل حرکت بوده و به واحد جریان متصل بوده و از نگار هسته‌ای مغناطیسی[6] (MNL) به‌دست می‌آید با تراوایی مرتبط نموده و تیاب و دونالدسون براساس این رابطه بین FFI و تراوایی، FFI را با RQI مرتبط کردند [۹ و ۱۰]. محققان زیادی از روش اندیس منطقه جریان که خود تابعی از پارامتر RQI است برای تعیین واحدهای جریانی استفاده کرده‌اند (برای مثال اسعدی و همکاران). در این روش با استفاده از نسبت RQI به تخلخل نرمالایز شده، FZI محاسبه می‌شود. مفهوم واحد جریانی که بر پایه ارتباط تخلخل و تراوایی است می‌تواند مخزن را به گونه‌های پتروفیزیکی مجزا تقسیم کند [۱۱].

تفکیک گونه‌های سنگی با استفاده از روش‌های مختلف یکی از مفیدترین مطالعات به منظور تحلیل کیفیت مخزنی و گاهی زون‌بندی یک مخزن است. به‌دلیل ارتباط مؤثر بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی در هر واحد جریان هیدرولیکی، شناخت

1. Reservoir Quality Index
2. Reservoir Potentiality Index
3. Flow Zone Index
4. Modified Reservoir Quality Index
5. Free Fluid Index
6. Magnetic Nuclear Log

Archive of SID

www.SID.ir

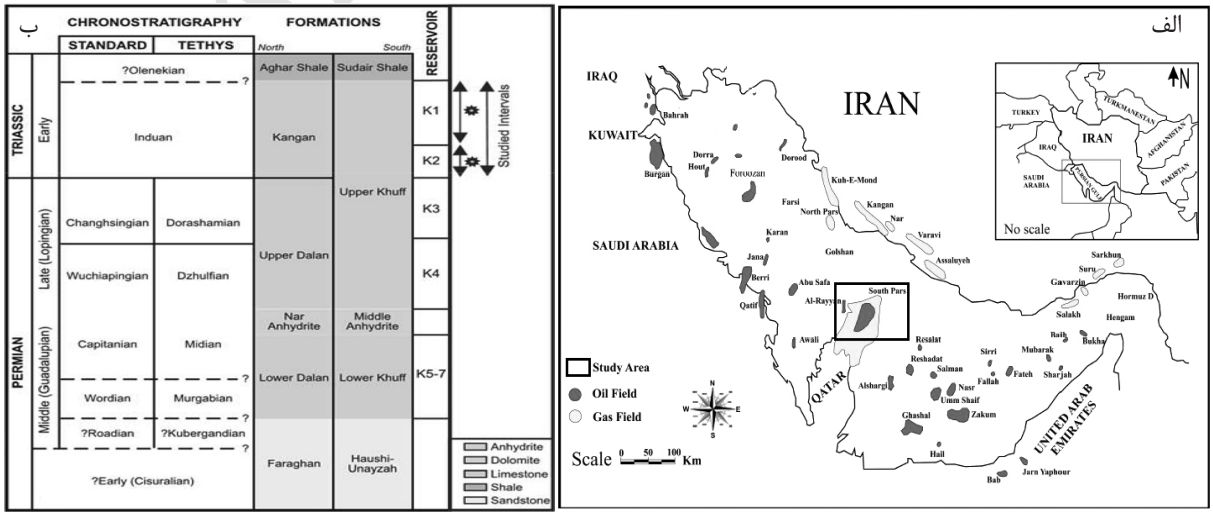
چگونگی توزیع واحدهای جریان در یک مخزن می‌تواند در تفکیک مخزن به واحدهای متنوع با شرایط مخزنی متفاوت مفید است که بر همین اساس نوریان و همکاران از روش واحدهای جریانی و روش خوشه‌بندی، گروه‌های سنگی مخزن بنگستان در میدان منصوری را تعیین کردند [۱۲]. جدیری آقایی و همکاران کیفیت مخزنی سازند میشرف را در میدان‌های نفتی سیری با بررسی واحدهای جریانی و رخساره‌های الکتریکی توصیف کردند [۱۳]. در حفاری چاه‌های تولیدی و توسعه‌ای، هدف اصلی تولید هیدروکربن است اما تولید هیدروکربن از تمام سنگ‌های حاوی هیدروکربن سودآوری حداکثری ندارد. یکی از راه‌های تولید هیدروکربن با حداکثر سود، تولید از افق‌های خاص با دبی مناسب و بیشترین کیفیت است که یافتن این افق‌ها امروزه بر عهده مهندسین اکتشاف نفت است پارامترهای مختلفی جهت تعیین کیفیت مخزن در نظر گرفته می‌شود.

موقعیت و چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه، بزرگ‌ترین میدان گازی جهان، برروی خط مرزی مشترک ایران و قطر در خلیج‌فارس قرار دارد. این میدان در ۱۰۵ km جنوب غربی بندر عسلویه و ادامه میدان گازی گنبد شمالی قطر می‌باشد. انتظار می‌رود که شیل‌های سیلورین سنگ منشأ مخازن نفتی و گازی بسیار بزرگ پالئوزوئیک در این حوضه رسوبی و سازندهای کنگان و دالان سنگ مخزن این ذخایر عظیم هستند. لیتولوژی اصلی سازند کنگان، سنگ آهک و دولومیت با میان لایه‌هایی از شیل و انیدریت است. از لحاظ مخزنی سازند کنگان به دو واحد مخزنی K1 و K2 تقسیم می‌شود. در شکل ۱ موقعیت میدان مورد مطالعه در آب‌های خلیج‌فارس و کشورهای مجاور و همچنین ستون چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه نشان داده شده است.

پارامترهای پتروفیزیکی مؤثر بر کیفیت مخزن

از مهم‌ترین خواص پتروفیزیکی که کیفیت مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به تخلخل، تراوایی، اشباع از آب و هیدروکربن و حجم شیل اشاره نمود. در کنار این خواص پتروفیزیکی، لیتولوژی و ضخامت زون خالص به ناخالص (NTG) که به‌کمک خواص مخزنی مانند تخلخل و تراویی و غیره تعیین می‌شود نیز بر کیفیت مخزن اثر می‌گذارند. در این پژوهش از سه پارامتر تخلخل، تراوایی و اشباع از آب جهت تعیین کمّی کیفیت مخزن استفاده شده و کمیت جدیدی در این زمینه معرفی گردیده است.



شکل ۱ الف- موقعیت میدان هیدروکربنی مورد مطالعه در جنوب ایران و در خلیج‌فارس و ب) ستون چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه (همراه با اندکی تغییر) [۱۴و ۱۵]

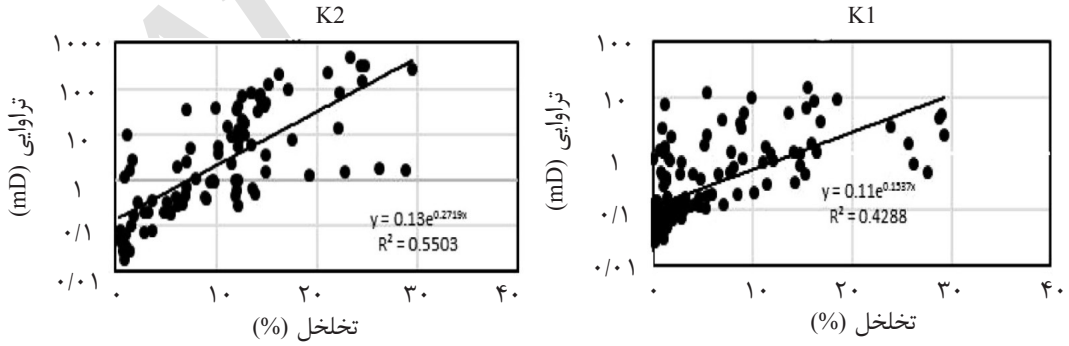
Archive of SID

www.SID.ir

مواد و روش‌ها

ارزیابی پتروفیزیکی سازند کنگان در چاه مورد مطالعه

خواص پتروفیزیکی مخزن معمولاً توسط روش‌هایی مانند آنالیز مغزه و نگارهای پتروفیزیکی به‌دست می‌آیند. آنالیز مغزه مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی می‌باشد. بنابراین روش بهینه برای کاهش هزینه‌ها و زمان استفاده از ارزیابی‌های موجود در نرم‌افزارهای پیشرفته مانند Geolog به‌کمک نگارهای اندازه‌گیری شده در چاه می‌باشد. در این پژوهش برای انجام ارزیابی پتروفیزیکی سازند کنگان در نرم‌افزار Geolog با استفاده از ماژول مالتی‌مین از یک مجموعه کامل نگارهای پتروفیزیکی شامل نگار پرتو گاما (CGR)، نگارهای مقاومتی کم عمق و عمیق (LLD&LLS)، چگالی (RHOB)، نوترون (NPHI)، صوتی (DT)، فوتوالکتریک (PEF) و قطرسنجی (CAL)، نتایج آنالیز مغزه (تخلخل و تراوایی) و اطلاعات سر برگ یک حلقه چاه حفاری شده در سازند کنگان مطالعه استفاده شده است. روند تغییرات تخلخل و تراوایی در واحدهای سازند کنگان نشان می‌دهد که ارتباط بین تخلخل و تراوایی کم است و یک رابطه منطقی بین آنها وجود ندارد (شکل ۲). پس از طراحی مدل بر پایه نوع سنگ‌شناسی (کلسیت، دولومیت، انیدریت و ایلیت) و سیال سازند (گاز و آب)، محاسبه عدم قطعیت نگارها (جدول ۱) و متغیرهای مربوط، با اجرای ماژول مالتی‌مین، محاسبات هم‌زمان متغیرهای پتروفیزیکی انجام شد. این ارزیابی پتروفیزیکی سازند شامل محاسبه تخلخل، حجم شیل، تعیین لیتولوژی، اشباع سیال و ضخامت زون خالص تولیدی به زون ناخالص است. تعیین میزان اشباع از آب یکی از متغییرهای بسیار مهم در تعیین اشباع‌شدگی سیال هیدروکربنی در خلل و فرج واحدهای چینه‌شناسی است. در این پژوهش با توجه به اینکه نوع کانی رسی و میزان CEC (ظرفیت تبادل کاتیونی[1]) در دسترس بود از روش اشباع آب دوگانه[2] برای به‌دست آوردن میزان اشباع از آب استفاده شد. در توالی چاه مورد ارزیابی که یک مخزن گازی با لیتولوژی کربناته است، به‌دلیل تمیز بودن مخزن از لحاظ کانی‌های رسی (شیل)، و همچنین در دست نداشتن میزان تراوایی مخزن، از این دو پارامتر صرف نظر شد و برای دقت بیشتر در تعیین فواصل مخزنی از حد برش دو پارامتر تخلخل مؤثر (۵٪) و اشباع از آب (۷۰٪) براساس گزارش چاه استفاده شد.



شکل ۲ ارتباط تخلخل و تراوایی در واحدهای مخزنی سازند کنگان

جدول ۱ نگارهای مورد استفاده برای ارزیابی پتروفیزیکی و عدم قطعیت هر کدام از نگارها

نگار	NPHI(V/V)	DT(μS/M)	CGR(gAPI)	RHOB(g/cc)	LLS(Ω-m)	LLD(Ω-m)	PEF
عدم قطعیت	۰/۰۱۵	۷/۴	۲/۲۵	۰/۰۲۷	۲۲۰	۱۰۰	۰/۱۵

1. Cation Exchange Capacity
2. Dual Water Saturation

Archive of SID

www.SID.ir

کـه خلاصـه نتایـج ارزیابـی پتروفیزیکـی در جـدول ۲ نشـان داده شـده اسـت.

بخش K1

بررسـی لیتولـوژی بخـش K1 نشـان می‌دهـد کـه عمدتـاً شـامل دولومیـت، آهـک در قسـمت بالایـی و مقـداری انیدریـت در بخـش پایینـی لایـه می‌باشـد. بخـش انتهایـی ایـن واحـد از عمـق ۳۰۵۰ m تـا انتهـا، مقـدار اشـباع از آب ۱۰۰٪ اسـت. همچنیـن مقـدار تخلخـل در بخـش پایینـی ایـن واحـد به‌دلیـل وجـود انیدریـت پاییـن اسـت. متوسـط مقـدار تخلخـل مؤثـر در زون خالـص تولیـدی برابـر ۷/۲٪ اسـت. متوسـط اشـباع از آب در ایـن ناحیـه ۲۰/۹٪ می‌باشـد.

بخش K2

بررسـی لیتولـوژی واحـد مخزنـی K2 براسـاس نتایـج ارزیابـی پتروفیزیکـی نشـان می‌دهـد عمدتـاً شـامل دولومیـت، در بخـش بالایـی و آهـک در بخـش پایینـی لایـه اسـت. در ایـن واحـد مقـدار اشـباع از آب بـا افزایش عمـق افزایـش می‌یابـد و بـه مقـدار ۱۰۰٪ در انتهـای ایـن بخـش می‌رسـد. همچنیـن مقـدار تخلخـل به‌دلیـل وجـود لایه‌هـای دولومیتـی زیـاد اسـت. متوسـط مقـدار تخلخـل مؤثـر در زون خالـص تولیـدی برابـر ۹/۵٪ اسـت. متوسـط اشـباع از آب در ایـن ناحیـه ۱۵/۶٪ اسـت. محاسـبه اشـباع از آب در سـازند کنـگان نشـان می‌دهـد کـه بخـش K1 دارای اشـباع از آب بیشـتری نسـبت بـه بخـش K2 بـوده و همچنیـن تخلخـل مؤثـر بخـش K2 بیشـتر از تخلخـل مؤثـر بخـش K1 اسـت. حضـور شـیل و مخصوصـاً انیدریـت باعـث کاهـش تخلخـل در بخـش K1 شـده اسـت. ارزیابـی انجـام شـده نشـان می‌دهـد نسـبت NTG بخـش K1 و بخـش K2 به‌ترتیـب برابـر ۷۳/۸ و ۸۰/۵۸٪ اسـت در نتیجـه بخـش K2 دارای کیفیـت مخزنـی بهتـری نسـبت بـه بخـش K1 اسـت.

در اکثـر مطالعـات انجـام شـده در زمینـه کیفیـت مخـزن از دو پارامتـر تراوایـی و تخلخـل (RQI و مشـتقات آن (FZI، RPI و MRQI)) بـرای توصیـف کیفیـت مخـزن اسـتفاده می‌شـود. هـدف از مطالعـات پتروفیزیکـی شناسـایی آن دسـته از زون‌های مخزنـی اسـت کـه افـزون بـر تخلخـل و تراوایـی، دارای اشـباع از آب پاییـن باشـد بنابرایـن تنهـا شناسـایی زون‌هـای دارای تخلخـل و تراوایـی مناسـب کافی نیسـت. همچنیـن RQI و مشـتقات آن همیشـه نتیجـه درسـت و مناسـبی را زمانـی کـه مقـدار تراوایـی و تخلخـل زون‌های مخزنـی پاییـن باشـد، نشـان نمی‌دهنـد [۱۶]. هـدف ایـن مطالعـه ارائـه یـک رابطـه جدیـد بـرای بیـان کمـی کیفیـت مخـزن اسـت کـه علاوه‌بـر تراوایـی و تخلخـل، اثـر اشباع‌شـدگی از آب روی کیفیـت مخـزن بررسـی گـردد. پارامترهـای تخلخـل و تراوایـی ارتبـاط مسـتقیم بـا کیفیـت مخـزن دارنـد یعنـی بـا افزایـش تخلخـل و تراوایـی کیفیـت مخـزن افزایـش و بـا کاهـش ایـن دو پارامتـر، کیفیـت مخـزن کاهـش می‌یابـد. اشباع‌شـدگی از آب ارتبـاط غیرمسـتقیم بـر کیفیـت مخـزن دارد یعنـی بـا افزایـش درجـه اشباع‌شـدگی از آب در سـازند مخزنـی، کیفیـت مخـزن کاهـش و بـا کاهـش درجـه اشباع‌شـدگی از آب در سـازند مخزنـی کیفیـت مخـزن افزایـش می‌یابـد. براسـاس ارتبـاط تخلخـل، تراوایـی و اشباع‌شـدگی از آب بـا کیفیـت مخـزن، فرمولـی کـه بـرای کیفیـت مخـزن تعریـف می‌شـود به‌صـورت زیـر اسـت:

$$DRQI = \frac{Ak^{\alpha} + B\phi^{\beta}}{CS_w^{\gamma}} \qquad (۱)$$

جدول۲ نتایج ارزیابی پتروفیزیکی (مقادیر متوسط پارامترهای پتروفیزیکی) واحدهای مخزنی سازند کنگان در چاه مورد مطالعه

واحدهای مخزنی	زون ناخالص (Gross)			زون خالص تولیدی (Net-pay)			
	تخلخل مؤثر (٪)	اشباع از آب (٪)	حجم شیل (٪)	زون خالص تولیدی به زون ناخالص (٪)	تخلخل مؤثر (٪)	اشباع از آب (٪)	حجم شیل (٪)
K1	۵/۹	۳۳/۷	۰	۷۳/۸	۷/۲	۲۰/۹	۰
K2	۸/۴	۳۵/۴	۰	۸۱/۴	۹/۵	۱۵/۶	۰

Archive of SID

www.SID.ir

که در آن DRQI، اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته[1]، k، تراوایی برحسب میلی‌دارسی (mD) و ϕ و Sw به‌ترتیب تخلخل و اشباع از آب به‌صورت کسری از یک هستند. ضرایب A، B و C و همچنین توان‌های β، α و γ که به‌ترتیب به‌عنوان توان‌های پارامترهای تخلخل، تراوایی و اشباع از آب در رابطه اخیر معرفی شده‌اند، مقادیر ثابتی هستند که براساس درجه اهمیت هر کدام از این سه پارامتر تعیین می‌شوند و از مخزنی به مخزن دیگر تغییر می‌کنند. کوتز و دنو تراوایی (k) را با اندیس سیال آزاد (FFI) به‌صورت زیر مرتبط کردند [۱۰]:

$$k = (10\phi)^4 (\frac{FFI}{\phi - FFI})^2 \quad (۲)$$

که در آن FFI از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱۰]:

$$FFI = \phi(1 - S_{wir}) \quad (۳)$$

با قرار دادن رابطه ۳ در رابطه ۲ رابطه جدید زیر حاصل می‌شود:

$$k = (10\phi)^4 (\frac{1 - S_{wir}}{S_{wir}})^2 \quad (۴)$$

این معادله برای مخازنی استفاده می‌شود که در آنها اشباع از آب کاهش‌ناپذیر به خوبی تعریف شده، تخلخل میان دانه‌ای است و سنگ حاوی مقدار کمی رس است. تیاب و دونالدسون با ترکیب رابطه (۲) با تعریف اندیس کیفیت مخزن (RQI) رابطه مفیدی بین RQI و FFI به‌صورت زیر ایجاد کردند:

$$RQI = 3.14 (\frac{FFI}{\phi - FFI}) \sqrt{\phi^3} \quad (۵)$$

که در آن FFI و تخلخل به‌صورت کسری، تراوایی برحسب mD و RQI برحسب µm بیان می‌شوند [۱۰]. با لگاریتم گرفتن از طرفین رابطه ۵، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\log RQI = \log(3.14 \frac{FFI}{\phi - FFI}) + \log \sqrt{\phi^3} \quad (۶)$$

بنابراین نمودار تمام لگاریتمی RQI برحسب $\sqrt{\phi^3}$ خط راستی را با شیب واحد، با این فرض که مخزن یک سازند ماسه‌سنگی همگن تمیز بوده، تولید می‌کند [۱۰]. مشابه با کار تحقیقاتی تیاب و دونالدسون، در صورتی‌که از طرفین رابطه ۱ لگاریتم گرفته شود معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\log DRQI = \log(Ak^{\alpha} + B\phi^{\beta}) - \gamma \log CS_w \quad (۷)$$

داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد که نمودار DRQI برحسب CS_w بر نمودار تمام لگاریتمی خط راستی را می‌دهد که شیب آن γ- می‌باشد. برای تعیین مقادیر ضرایب A ، B و C و توان‌های β ، α و γ برای معرفی DRQI در چاه تولیدی در میدان مورد مطالعه از آزمون سعی و خطا استفاده می‌شود و به‌صورت حالت‌های مختلف، مقادیر مناسب این ضرایب و توان‌ها تعیین می‌شود.

تعیین مقادیر ضرایب A، B، C و توان‌های β ،α و γ

حالت اول

ابتدا تغییرات کیفیت مخزن برحسب هر کدام از پارمترهای پتروفیزیکی تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب، به‌صورت خطی در نظر گرفته می‌شود بنابراین با قرار دادن توان‌های β، α و γ برابر یک، رابطه ۱ به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{Ak + B\phi}{CS_w} \quad (۸)$$

با توجه به اهمیت خیلی بیشتر تراوایی بر کیفیت مخزن نسبت به تخلخل و اشباع‌شدگی از آب و تأثیر بیشتر تخلخل بر کیفیت مخزن نسبت به اشباع‌شدگی از آب، چنانچه مقادیر ضرایب A، B و C به‌ترتیب برابر با ۴، ۲ و ۱ قرار داده شود رابطه ۸ در صورت لگاریتم گرفتن به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$\log DRQI = \log (4k + 2\phi) - \log S_w \quad (۹)$$

بنابراین با رسم مقادیر DRQI برحسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضریب تعیین (R^2) که میزان همبستگی این دو پارامتر به یکدیگر را نشان می‌دهد برای واحدهای مخزنی K1 و K2 به‌ترتیب برابر ۰/۳۷۱۴ و ۰/۷۶۳۹ به‌دست می‌آید (شکل ۳).

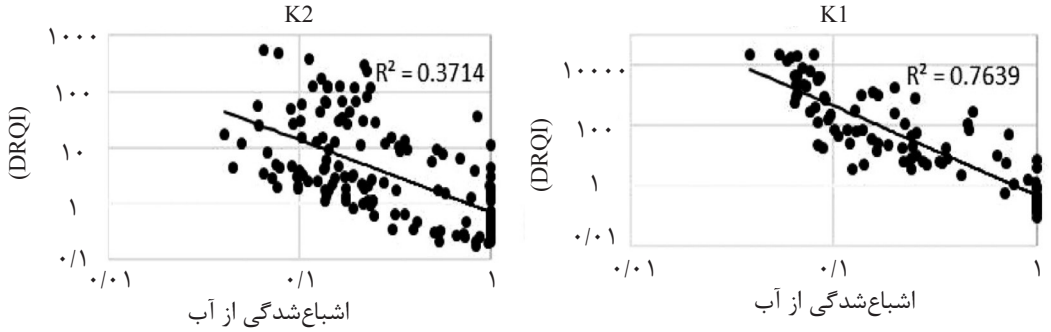
حالت دوم

براساس رابطه ۴ می‌توان گفت که تأثیر تراوایی بر کیفیت مخزن تقریباً توان ۴ برابر تخلخل می‌باشد. در حالت دوم همانند حالت اول، مقادیر A، B و C به‌ترتیب برابر ۴، ۲ و ۱ در نظر گرفته می‌شود.

1. Developed Reservoir Quality Index (DRQI)

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳ نمودار DRQI (اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته) به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1 و K2 در حالت اول

مقدار α و β به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۱ و مقدار γ برابر ۱، رابطه ۷ به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\log DRQI = \log (4k^{0.4} + 2\phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۱۰)$$

با رسم مقادیر DRQI برحسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی ضریب تعیین برای واحدهای مخزنی K1 و K2 به‌ترتیب برابر ۰/۸۲۱۱ و ۰/۹۰۸۰ به‌دست می‌آید (شکل ۴).

حالت سوم

در این حالت مقادیر B، C، β، α و γ همانند حالت قبل ولی مقدار A برابر با ۴/۱ انتخاب می‌شود رابطه ۷ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\log DRQI = \log (4.1k^{0.4} + 2\phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۱۱)$$

با رسم مقادیر DRQI برحسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1 و K2 سازند کنگان میدان مورد مطالعه به‌ترتیب برابر ۰/۸۱۷۰ و ۰/۹۰۷۴ به‌دست می‌آید شکل ۵. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر دو واحد مخزنی نسبت به حالت قبل کاهش یافته است.

حالت چهارم

در این حالت مقادیر B، A و C برابر ۱ و مقادیر α، β و γ همانند حالت قبل به‌ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۱ و ۱ انتخاب می‌شود رابطه ۷ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\log DRQI = \log (k^{0.4} + \phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۱۲)$$

با رسم مقادیر DRQI برحسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1 و K2 سازند کنگان میدان مورد مطالعه به‌ترتیب برابر ۰/۹۰۳۱ و ۰/۹۲۵۹ به‌دست می‌آید شکل ۶.

حالت پنجم

در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر β و γ همانند حالت قبل به‌ترتیب برابر با ۰/۱ و ۱ انتخاب می‌شود ولی مقدار α برابر با ۰/۴۱ قرار داده می‌شود رابطه ۷ به‌صورت زیر معرفی می‌شود:

$$\log DRQI = \log (k^{0.41} + \phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۱۳)$$

با رسم مقادیر DRQI برحسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1 و K2 سازند کنگان به‌ترتیب برابر ۰/۹۰۱۵ و ۰/۹۲۳۰ به‌دست می‌آید. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر دو واحد مخزنی نسبت به‌حالت قبل کاهش یافته است (شکل ۷).

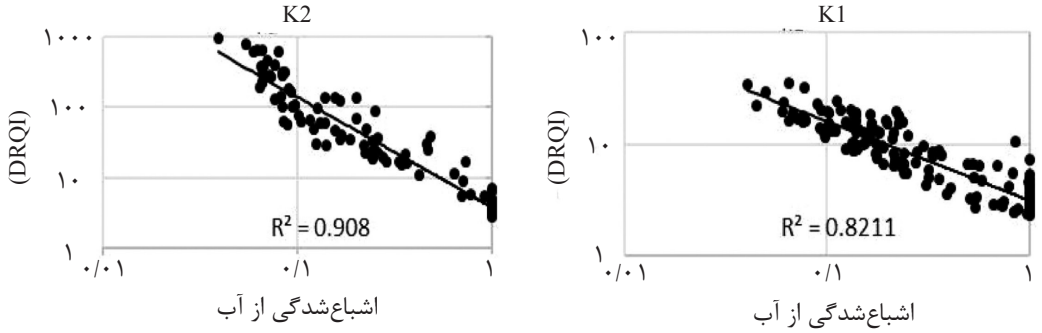
حالت ششم

در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر α و γ همانند حالت چهارم به‌ترتیب برابر با ۰/۴ و ۱ انتخاب می‌شود ولی مقدار β برابر با ۰/۱۱ قرار داده شد رابطه ۷ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

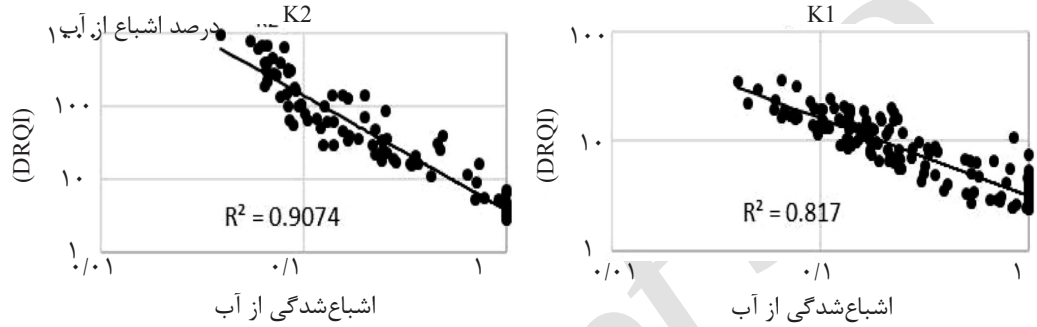
$$\log DRQI = \log (k^{0.4} + \phi^{0.11}) - \log S_w \quad (۱۴)$$

با رسم مقادیر DRQI برحسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1 و K2 سازند کنگان میدان مورد مطالعه به‌ترتیب برابر ۰/۸۹۲۲ و ۰/۹۲۶۴ به‌دست می‌آید. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر دو واحد مخزنی نسبت به حالت چهارم کاهش یافته است (شکل ۸).

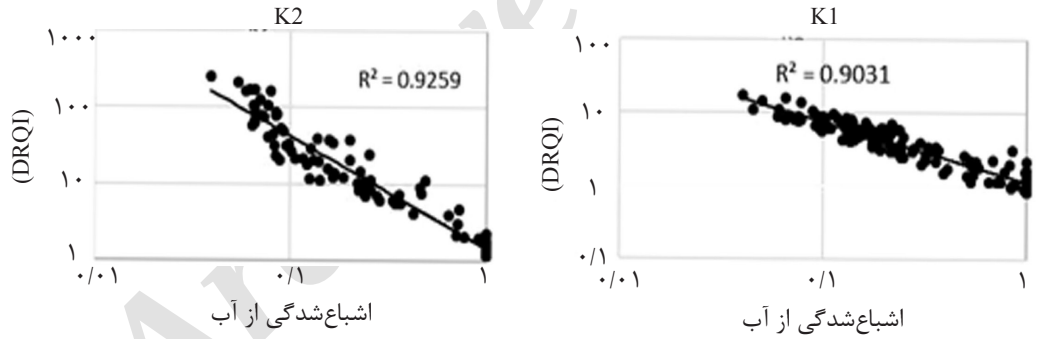
Archive of SID
www.SID.ir



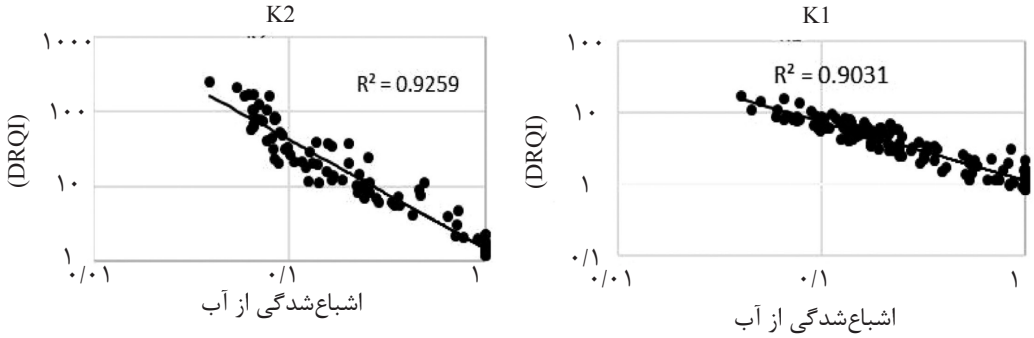
شکل ۴ نمودار DRQI (اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته) به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1 و K2 در حالت دوم



شکل ۵ نمودار DRQI به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1 و K2 در حالت سوم

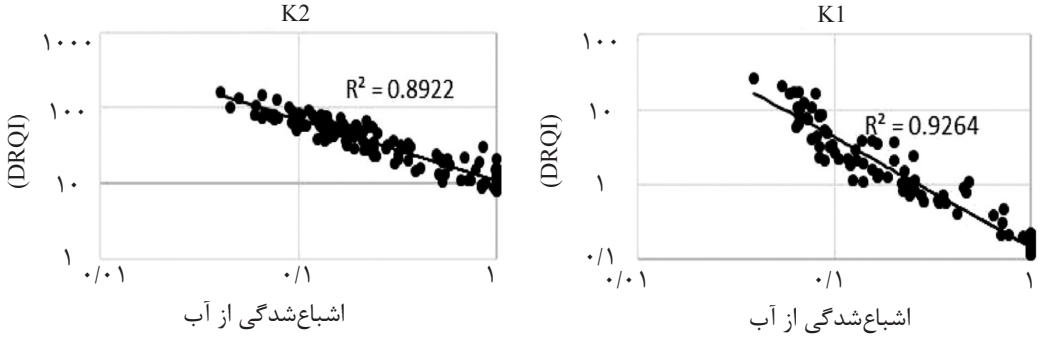


شکل ۶ نمودار DRQI به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1 و K2 در حالت چهارم



شکل ۷ نمودار DRQI به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1 و K2 در حالت پنجم

www.SID.ir



شکل ۸ نمودار DRQI (اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته) به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1 و K2 در حالت ششم

به منظور تعیین اعتبار DRQI برای سایر سازندهای مخزنی، مدل پیشنهادی برروی داده‌های تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب یک حلقه چاه حفاری‌شده در سازند سروک (مخزن کربناته) در یکی از میادین واقع در جنوب ایران اعمال شد که نتایج به‌ازای مقادیر مختلف A، B، C، β، α و γ در شکل ۹ و جدول ۳ نشان داده شده است.

با بررسی حالت‌های مختلف به ازای مقادیر A، B و C برابر ۱ و α، β و γ به‌ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۱ و ۱ ضرایب تعیین برای هر دو واحد مخزنی سازند کنگان و سازند سروک، بیشترین مقدار را نسبت به سایر حالت‌های ممکن دارند بنابراین رابطه ۲ به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{k^{\alpha} + \phi^{\beta}}{S_w^{\gamma}} \qquad (۱۵)$$

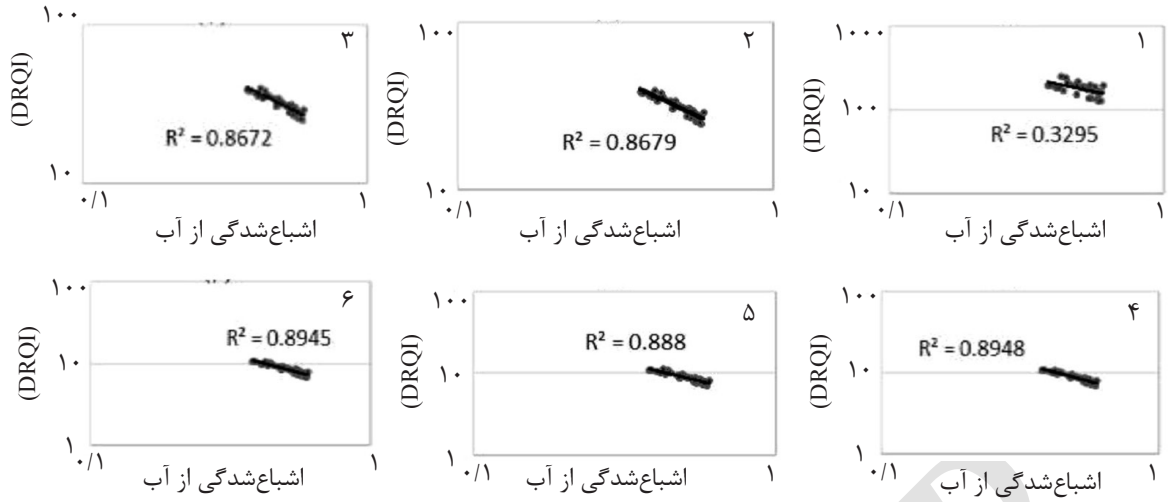
و یا رابطه ۱۵ را می توان به‌صورت لگاریتمی زیر بیان نمود:

$$\log DRQI = \log\left(k^{\alpha} + \phi^{\beta}\right) - \gamma \log S_w \qquad (۱۶)$$

در صورت محاسبه DRQI برای واحدهای مخزنی سازند کنگان براساس رابطه‌های ۱۵ یا ۱۶، واحد مخزنی K2، با توجه به تراوایی و تخلخل بالاتر و اشباع از آب کمتر نسبت به واحد K1، مقدار DRQI بیشتری (۳۳/۵۹) نسبت به واحد مخزنی K1 (۴/۱۷)، دارا می‌باشد. همچنین مقدار متوسط DRQI سازند سروک با توجه به مقدار اشباع از آب زیاد، نسبت به واحد K2 کمتر بوده و با توجه به مقدار تراوایی و تخلخل بیشتر سازند سروک نسبت به واحد K1، مقدار DRQI سازند سروک نسبت به واحد K1 بیشتر است (جدول ۴). نمودار DRQI و RQI برای واحدهای مخزنی سازند کنگان در مقابل عمق ترسیم شد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱، ستون ۷). با مقایسه نمودار DRQI و RQI می‌توان نتیجه گرفت که RQI در مواردی نتیجه درست و مناسبی را ارائه نمی‌دهد برای مثال در واحد K2 در شکل ۱۱ ستون ۷ برای نقاط تعیین شده تغییرات مقدار RQI ثابت است هر چند که مقدار اشباع از آب کاهش یافته است ولی DRQI، این تغییرات را نشان می‌دهد یعنی با کاهش اشباع از آب، کیفیت مخزنی افزایش می‌یابد در صورتی‌که مقدار RQI ثابت و همانند نقاط بالایی و پایینی نقاط تعیین شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۹ نمودار DRQI (اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته) به‌صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب به ازای مقادیر مختلف A، B، C، β، α و γ برای سازند سروک

جدول ۳ فرمول DRQI به ازای مقادیر مختلف A، B، C، β، α و γ و ضرایب تعیین برای سازند آهکی سروک

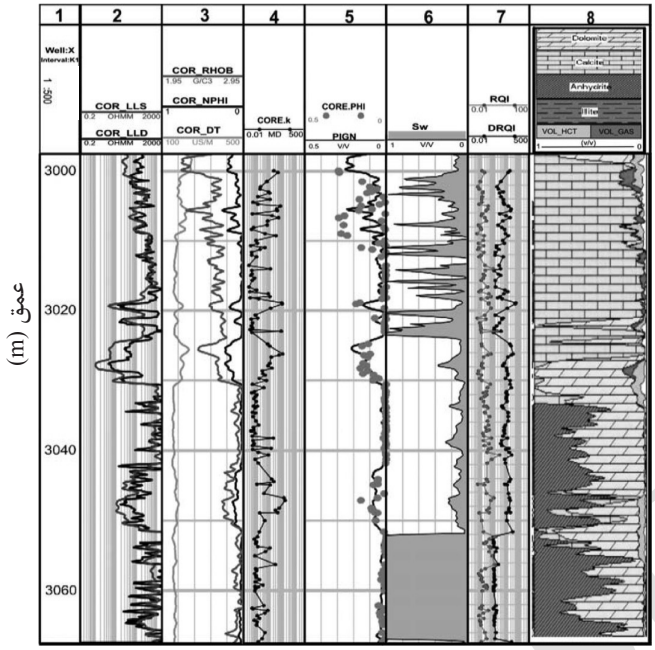
سازند سروک	فرمول	ضریب تعیین	سازند سروک	فرمول	ضریب تعیین
(۱)	$DRQI = \frac{4k + 2\phi}{S_w}$	۰/۳۲۹۵	(۴)	$DRQI = \frac{k^{0.4} + \phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۹۴۸
(۲)	$DRQI = \frac{4k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۶۷۹	(۵)	$DRQI = \frac{k^{0.41} + \phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۸۸۰
(۳)	$DRQI = \frac{4.1k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۶۷۲	(۶)	$DRQI = \frac{k^{0.4} + \phi^{0.11}}{S_w}$	۰/۸۹۴۵

جدول ۴ مقادیر تراوایی، تخلخل، اشباع از آب و DRQI برای واحدهای مخزنی سازند کنگان و سازند سروک

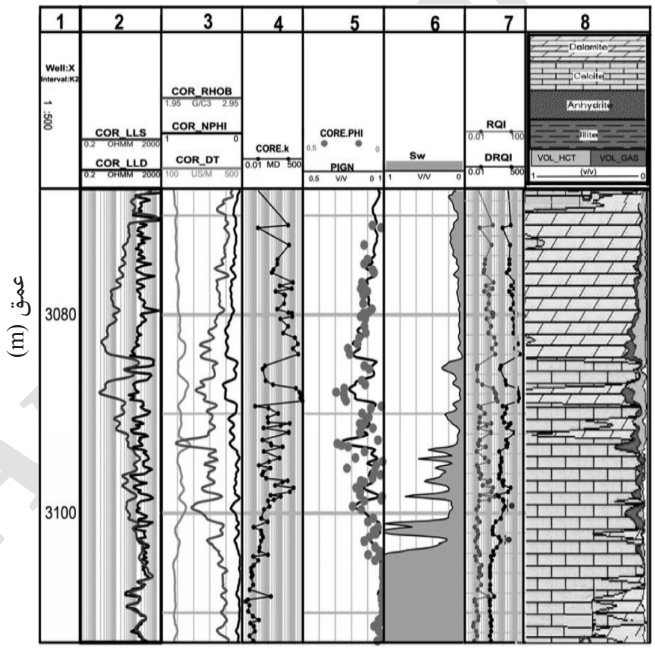
Member		تراوایی (mD)	تخلخل (٪)	اشباع از آب (٪)	DRQI
K1	Mean	۱/۰۶	۴/۷۷	۴۳/۴	۴/۱۷
	min	۰/۰۲۶	۰/۰۳	۴	۰/۸۲۲۴
	max	۱۵/۷۹۴	۲۹/۳	۱۰۰	۱۶/۷۳
K2	Mean	۳۱/۴۶	۹/۹۲	۳۹/۸۸	۳۳/۵۹
	Min	۰/۰۱۸	۰/۴۱	۳/۹۰۰	۱/۱۹
	Max	۴۶۸/۵۱۱	۲۹/۵	۱۰۰	۲۵۶/۱۶
سروک	Mean	۲۲/۵۳	۱۹/۸۵	۵۱/۶۱	۸/۴۹
	min	۱۸/۵۸	۱۴/۰۳	۳۷/۸۹	۶/۹۱
	max	۲۹/۶۹	۲۴/۵۴	۵۹/۹۸	۱۰/۸۱

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۰ نتایج ارزیابی پتروفیزیکی بخش K1 سازند کنگان: (۱) ستون عمق (۲ و ۳) نگارهای پتروفیزیکی (۴) تراوایی مغزه (۵) تخلخل لاگ و مغزه (۶) اشباع از آب (۷) اندیس کیفیت مخزن (RQI) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) و (۸) ستون لیتولوژی.



شکل ۱۱ نتایج ارزیابی پتروفیزیکی بخش K2 سازند کنگان: (۱) ستون عمق (۲ و ۳) نگارهای پتروفیزیکی (۴) تراوایی مغزه (۵) تخلخل لاگ و مغزه (۶) اشباع از آب (۷) اندیس کیفیت مخزن (RQI) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) و (۸) ستون لیتولوژی

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج آنالیز مغزه و نتایج ارزیابی پتروفیزیکی سازند کنگان با استفاده از روش پتروفیزیک احتمالی نشان می‌دهد که واحد مخزنی K2 این سازند مقدار متوسط تراوایی مغزه (۳۱/۴۶ mD) وتخلخل (۹/۹۲٪) بیشتری نسبت به واحد K1 دارا است. واحد مخزنی K1 این سازند مقدار متوسط اشباع از آب (۴۳/۴٪) بیشتری نسبت به واحد K2 دارا است. همچنین تخلخل محاسبه شده با استفاده از روش پتروفیزیک احتمالی تطابق خوبی (۹۰٪) را با تخلخل مغزه نشان می‌دهد.

www.SID.ir

برای توصیف کیفیت مخزن، کمیت‌های مختلفی از جمله RPI، FZI، MRQI، RQI و غیره ارائه گردیده است. اما این کمیت‌ها در برخی از مخازن هیدروکربنی، پاسخ مناسبی در مورد کیفیت مخزن ارائه نمی‌دهند. یک دلیل عمده در این زمینه آن است که اغلب این کمیت‌ها فقط تخلخل و تراوایی را در بیان کیفیت مخزن مدنظر قرار می‌دهند با این حال پارامترهای دیگری مانند اشباع از آب، حجم شیل، ضخامت مخزن و غیره در کیفیت مخزن مؤثر هستند [۱۶]. اندیس جدید معرفی شده در این مقاله تحت عنوان DRQI علاوه‌بر تخلخل و تراوایی مقدار اشباع از آب را در بیان کیفیت مخزن دخالت می‌دهد و در مواردی پاسخ بهتری در مورد کیفیت مخزن در برداشته است.

با بررسی حالت‌های مختلف رسم نمودار DRQI برحسب اشباع‌شدگی از آب برای سازندهای مختلف، در صورتی‌که مقادیر ضرایب A، B و C برابر یک قرار داده شود فرمول کلی که برای کیفیت مخزن در نظر گرفته شده به فرم ساده‌تری تبدیل شده و در این حالت مقادیر ضرایب تعیین در نمودار DRQI برحسب اشباع‌شدگی از آب برای هر دو بخش مخزنی سازند کنگان و سازند سروک افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت بیشتر تراوایی نسبت به تخلخل در کیفیت مخزن، مقادیر α و β با سعی و خطا به‌ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۱ برای بخش‌های مخزنی سازند کنگان و سازند سروک انتخاب شد. در صورت افزایش مقادیر α و β به ۰/۴۱ و ۰/۱۱ برای واحدهای سازند کنگان و سازند سروک، در این حالت مقادیر ضرایب تعیین در نمودار DRQI برحسب اشباع‌شدگی از آب برای هر دو بخش مخزنی سازند کنگان و سازند سروک کاهش می‌یابد. بنابراین مقادیر α و β به‌ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۱ برای بخش‌های سازند کنگان و سازند سروک انتخاب شد. با محاسبه مقدار DRQI براساس ضرایب تعیین شده، بخش K2 سازند کنگان مقدار متوسط DRQI بیشتری نسبت به بخش K1 دارد.

مراجع

[1]. Rui Z., Metz P. A., Reynolds D. B., Chen G. and Zhou X., *"Historical pipeline construction cost analysis,"* International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 4, No.2, pp. 244-263, 2011.

[2]. Rui Z., Metz P. A., Reynolds D. B., Chen G. and Zhou X., *"Regression models estimate pipeline construction costs,"* Oil and Gas Journal, Vol. 109, No. 14, pp. 110-115, 2011.

[3]. Hakimi M. H., Shalaby M. R. and Abdullah W. H., *"Diagenetic characteristics and reservoir quality of the Lower Cretaceous Biyadh sandstones at Kharir oil field in the western central Masila Basin, Yemen,"* Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 51, pp. 109-120, 2012.

[4]. Gier S., Worden R. H., Johns W. D. and Kurzwei l. H., *"Diagenesis and reservoir quality of Miocene sandstones in the Vienna Basin, Austria,"* Marine and Petroleum Geology, Vol. 25, No. 8, pp. 681-695, 2008.

[5]. Amaefule J. O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D. G. and Keelan D. K., *"Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells,"* SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1993.

[6]. Worthington P. F., *"The application of cutoffs in integrated reservoir studies,"* SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 968-975, 2008.

[7]. Nabawy B. S. and Al-Azazi N. A., *"Reservoir zonation and discrimination using the routine core analyses data: the*

Archive of SID

www.SID.ir

upper Jurassic Sab'atayn sandstones as a case study, Sab'atayn basin, Yemen," Arabian Journal of Geosciences, Vol. 8, No. 8, pp. 5511-5530, 2015.

[8]. Izadi M. and Ghalambor A., *"New approach in permeability and hydraulic-flow-unit determination,"* SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 257-264, 2013.

[9]. Coates G. and Denoo S., *"The producibility answer product,"* The Technical Review, Vol. 29, No. 2, pp. 55-63, 1981.

[10]. Tiab D. and Donaldson E. C., *"Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties,"* Gulf Professional Publishing, 2015.

[۱۱]. اسعدی ع.، هنرمند ج.، معلمی س. و عبداللهی فرد ا.، "تعیین واحدهای جریانی در بخش مخزنی سازند سروک، مطالعه موردی در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غرب ایران"، فصلنامه علمی – پژوهشی پژوهش نفت، دوره ۲۴، شماره ۶-۹۵، صفحات ۸۲-۶۶، ۱۳۹۵.

[۱۲]. نوریان ی.، موسوی حرمی س.، محبوبی ا.، کدخدایی ع. و عبدالهی موسوی س.، "تفکیک گروه‌های سنگی با استفاده از واحدهای جریانی و روش خوشه‌بندی: مطالعه موردی، مخزن بنگستان در میدان منصوری"، فصلنامه علمی – پژوهشی علوم زمین، دوره ۲۴، شماره ۹۵، صفحات ۲۰۸-۱۹۹، ۱۳۹۴.

[۱۳]. جدیری آقایی ر.، رحیم‌پور بناب ح.، توکلی و.، کدخدایی ایلخچی ر. و یوسف‌پور م.، "بررسی واحدهای جریانی و رخساره های الکتریکی در سازند میشریف (بخش بالایی سازند سروک) و برآورد ستبرای زون مخزنی در میدان های نفتی سیری (خلیج فارس)"، فصلنامه رسوب¬شناسی کاربردی، دوره ۵، شماره ۹، صفحات ۹۸-۸۶، ۱۳۹۶.

[14]. Mashhadi ZS., Rabbani AR., "*Organic geochemistry of crude oils and Cretaceous source rocks in the Iranian sector of the Persian Gulf: an oil–oil and oil–source rock correlation study*", International Journal of Coal Geology, Vol. 146, pp. 118-144, 2015.

[15]. Insalaco E., Virgone A., Courme B., Gaillot J., Kamali M., Moallemi A., Monibi S., "*Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: Depositional System, biostratigraphy and stratigraphic architecture*", Geoarabla-manama, Vol. 11, No. 2, p. 75, 2006.

[۱۶]. ابراهیمی ه.، "تعیین کیفیّت مخزنی بخش‌های مختلف یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران، ۱۳۹۶.

Archive of SID

www.SID.ir