

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت - اکتشاف

تعیین کیفیت مخزنی، نرخ‌های مختلف یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران

نگارنده: هادی ابراهیمی

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

دی ۱۳۹۶

شماره: ۲۵۵۷/۴۹۹
تاریخ: ۹۶/۱۰/۱۹

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای هادی ابراهیمی با شماره دانشجویی ۹۴۰۱۴۶۴ رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف تحت عنوان: تعیین کیفیت مخزنی بخش‌های مختلف یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب) ☒ مردود ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استادیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی نجاتی کلاته	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر بهزاد تخم چی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر منصور ضیائی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۱۰/۱۹

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در صورت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به:

تمام یونندگان راه علم،...

به پدرم که نظاره کردنش نیروی حیاتم و مادرم که دستان گرمش نیروبخش حیاتم...

عزیزانی که یاوران سختی‌هایم بودند و با صبوری خود عاطفه را معنا بخشیدند و شوق تحصیل را در من زنده نگه داشتند...

تقدیر و شکر

ستایش خداوند جان و جهان که بخشد لطف و کرم بی کران

حمد و سپاس خدای عزوجل را که همواره بندگان را مورد لطف و عنایت خویش قرار داده است، خدایی که بار دیگر مرا تحت الطاف بیکرانیش قرار داد تا بتوانم قدمی دیگر در مسیر اعتلا و پیشرفت تحصیل پیش بردارم. اکنون که به یاری و عنایت خداوند این پایان نامه را به اتمام رساندم شکر و قدردانی از عزیزانی که دستم را گرفتند و یاریم نمودند را بر خود لازم می دانم. در راستای تهیه این مجموعه از منابع اطلاعاتی و نرم افزارهای مختلفی استفاده شده است که بدین وسیله از کلیه ی محققین گرامی در این زمینه شکر و قدردانی می شود. در ادامه مراتب سپاس و قدردانی خود را انشاء اساتید راهنمای ارجمندم، آقایان دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی و دکتر مهرداد سلیمانی مقفرد و همچنین اساتید داور محترم، جناب آقای دکتر تخمچی و جناب آقای دکتر ضیائی نموده و از خداوند متعال سلامتی و موفقیت را برای آنها خواستارم. در خاتمه سپاس گزار کلیه ی دوستان و عزیزانی هستم که مراد پایان رسانیدن این پایان نامه یاری نمودند، مطمئناً موفقیت و سلامتی آنها آرزوی قلبی من است.

با آرزوی موفقیت و سلامتی

هادی ابراهیمی

چکیده:

هدف از مطالعات پتروفیزیکی، زون‌بندی سازند مخزنی، تعیین زون‌های خالص تولیدی و در نهایت بررسی کیفیت مخزن در بخش‌های مختلف سازند، برای تعیین مناسب‌ترین زون‌ها جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن و توسعه آگاهانه‌تر میادین نفتی می‌باشد. تخلخل، اشباع شدگی از آب و هیدروکربن‌ها و تراوایی مهم‌ترین پارامترهایی هستند که باید در ارزیابی پتروفیزیکی جهت پی بردن به کیفیت مخزن تعیین شوند. هدف از این مطالعه تعیین کیفیت مخزن در بخش‌های مختلف سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد مطالعه در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران واقع در خلیج فارس است. ابتدا سازندهای کنگان و دالان با روش تحلیل احتمالی که روشی مبتنی بر احتمالات و مباحث زمین آماری است مورد ارزیابی پتروفیزیکی قرار گرفتند. اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن برای هر کدام از واحدهای مخزنی این سازندها محاسبه شد. در این پژوهش از بین خصوصیات تأثیر گذار بر کیفیت مخزن، ویژگی‌های تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب انتخاب شده و سپس براساس تأثیر هر کدام از این ویژگی‌ها بر کیفیت مخزن، کمیت جدیدی به نام اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته معرفی شد. بسته به اهمیت هر کدام از این پارامترها در کیفیت مخزن مقادیر مختلف به ازای ضرایب ذکر شده در فرمول مزبور انتخاب شده و بهترین مقادیر این ضرایب که سبب ماکزیمم شدن مقدار ضریب تعیین نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته بر حسب اشباع‌شدگی از آب می‌شود تعیین شدند. به منظور تعمیم فرمول اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته برای سایر سازندهای مخزنی با لیتولوژی‌های مختلف، این فرمول برای سازند کربناته سروک در یک میدان نفتی و سازند ماسه‌سنگی بورگان مورد استفاده قرار گرفت که در نتیجه مقادیر متفاوتی برای ضرایب فرمول مورد نظر در سازندهای مختلف مورد مطالعه به دست آمد. مقادیر اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته برای واحدهای K1 و K2 سازند کنگان به ترتیب برابر ۴۵/۱ و ۶/۰۶ و برای واحدهای K3 و K4 سازند دالان فوقانی به ترتیب برابر ۱۵/۴۸ و ۲۰/۳۸ به دست آمد. نتایج حاکی از آن است که بخش K2 سازند کنگان و بخش K4 سازند دالان بالایی بر اساس اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته شرایط مخزنی مناسب‌تری را نسبت به سایر بخش‌ها دارند. در نهایت

به منظور اولویت‌بندی لایه‌های مخزنی به لحاظ کیفیت، از الگوریتم انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت استفاده گردید. نتایج به دست آمده از روش انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت در رتبه‌بندی لایه‌های مخزنی به لحاظ کیفیت یکدیگر را تأیید می‌نمایند. با این حال نتایج انتگرال‌های فازی با ریسک و عدم قطعیت همراه خواهد بود. نتایج نهایی به دست آمده از این دو روش انتگرال فازی همانند اندیس معرفی شده نشان داد که به طور کلی بخش K2 سازند کنگان و بخش K4 سازند دالان در اولویت اول به لحاظ کیفیت قرار می‌گیرند.

کلید واژه: سازند کنگان، سازند دالان، تخلخل، تراوایی، اشباع‌شدگی از آب، اندیس کیفیت مخزن

توسعه یافته، انتگرال‌های فازی

تعهد نامه

اینجانب هادی ابراهیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین کیفیت مخزنی بخش‌های مختلف یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر مهرداد سلیمانی منفرد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
 - در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
 - مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
 - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .
- امضای دانشجو** **تاریخ**

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱. مقدمه	۲
۲-۱. تعریف مسئله	۲
۳-۱. مروری بر سابقه‌ی تحقیق	۵
۴-۱. ضرورت انجام تحقیق	۸
۵-۱. اهداف و روش انجام تحقیق	۹
۶-۱. میدان هیدروکربنی مورد مطالعه	۱۰
۱-۶-۱. وضعیت زمین شناسی میدان مورد مطالعه	۱۰
۱-۶-۲. چینه‌شناسی سازندهای کنگان و دالان در میدان مورد مطالعه	۱۲
۱-۶-۲-۱. سازند کنگان	۱۲
۱-۶-۲-۲. سازند دالان	۱۳
۷-۱. اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه	۱۵
۸-۱. ساختار پایان‌نامه	۱۵
فصل دوم: روش‌شناسی موضوع تحقیق	۱۷
۱-۲. مقدمه	۱۸
۲-۲. ویژگی‌های پتروفیزیکی مؤثر بر کیفیت مخزن	۱۹
۱-۲-۲. تخلخل	۱۹
۲-۲-۲. اشباع‌شدگی از سیال	۲۰

۲۱	 تراوایی ۳-۲-۲
۲۴	 حجم شیل ۴-۲-۲
۲۴	 ضخامت زون خالص تولیدی ۵-۲-۲
۲۵	 لیتولوژی ۶-۲-۲
۲۵	 ارزیابی پتروفیزیکی ۳-۲
۲۵	 ۱-۳-۲. ارزیابی پتروفیزیکی به روش قطعی
۲۶	 ۲-۳-۲. ارزیابی پتروفیزیکی به روش احتمالی
۲۷	 ۱-۲-۳-۲. ساخت ریاضی یک مدل در ارزیابی احتمالی
۳۱	 ۲-۲-۳-۲. ساخت فیزیک یک مدل در ارزیابی احتمالی
۳۲	 ۴-۲. اندیس کیفیت مخزن (RQI)
۳۷	 ۵-۲. اندیس منطقه‌ی جریان (FZI)
۳۸	 ۶-۲. واحد جریان تیاب (H_T)
۴۰	 ۷-۲. ارتباط اندیس کیفیت مخزن (RQI) با اندیس سیال آزاد (FFI)
۴۲	 ۸-۲. اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته (MRQI)
۴۹	 فصل سوم: اندیس کیفیت مخزن
۵۰	 ۱-۳. مقدمه
۵۰	 ۲-۳. ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد مطالعه
۵۲	 ۱-۲-۳. تعیین ترکیب سنگ‌شناسی
۵۳	 ۲-۲-۳. محاسبه‌ی حجم محتوی شیل

۵۴	۳-۲-۳. محاسبه‌ی تخلخل
۵۴	۴-۲-۳. تعیین میزان اشباع آب
۵۵	۵-۲-۳. تعیین زون‌های تولیدی در توالی چاه مورد نظر
۵۶	۳-۳. نتایج و جمع‌بندی ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان
۵۶	۱-۳-۳. بخش K1
۵۷	۲-۳-۳. بخش K2
۶۰	۳-۳-۳. بخش K3
۶۲	۴-۳-۳. بخش K4
۶۴	۴-۳. نتایج اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن
۶۶	۱-۴-۳. بخش K1
۶۶	۲-۴-۳. بخش K2
۶۷	۳-۴-۳. بخش K3
۶۷	۴-۴-۳. بخش K4
۷۲	۵-۳. اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI)
۷۵	۱-۵-۳. مقادیر ضرایب A، B، C و توان‌های α ، β و γ در روش اول تعیین لگاریتم DRQI
۷۵	۱-۱-۵-۳. حالت اول
۷۶	۲-۱-۵-۳. حالت دوم
۷۷	۳-۱-۵-۳. حالت سوم
۷۹	۴-۱-۵-۳. حالت چهارم

۸۰	 ۳-۵-۱-۵ حالت پنجم
۸۱	 ۳-۵-۱-۶ حالت ششم
۸۲	 ۳-۵-۲. مقادیر ضرایب A, B, C و توان‌های α, β و γ در روش دوم تعیین لگاریتم DRQI
۸۲	 ۳-۵-۱-۲. حالت اول
۸۴	 ۳-۵-۲-۲. حالت دوم
۸۵	 ۳-۵-۳-۲. حالت سوم
۸۶	 ۳-۵-۴-۲. حالت چهارم
۸۷	 ۳-۵-۵-۲. حالت پنجم
۸۷	 ۳-۵-۶-۲. حالت ششم
۹۴	 ۳-۶. روش انتگرال‌های فازی
۹۶	 ۳-۶-۱. نتایج انتگرال فازی
۹۸	 ۳-۷. جمع‌بندی
۱۰۱	 فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۲	 ۴-۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۰۵	 ۴-۲. پیشنهادات
۱۰۷	 منابع و مآخذ

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): موقعیت میدان هیدروکربنی مورد مطالعه در جنوب ایران و در خلیج فارس ۱۱
- شکل (۲-۱): ستون چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه همراه با واحدهای مخزنی بررسی شده ۱۴
- شکل (۱-۲): توزیع سیالات در مخازن هیدروکربنی ۲۲
- شکل (۲-۲): تأثیرات ماده‌ی سیمانی کننده‌ی رس بر روی تخلخل و تراوایی ۲۳
- شکل (۳-۲): سیستم جریان پوازئیلی برای لوله‌های موین مستقیم ۳۳
- شکل (۴-۲): مدل یک دسته از لوله‌های موین غیر مستقیم ۳۶
- شکل (۱-۳): نمودار متقاطع تخلخل و تراوایی مغزه واحدهای مخزنی سازندهای کنگان (K1 & K2) و دالان بالایی (K3 & K4) در چاه میدان مورد مطالعه ۵۲
- شکل (۲-۳): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K1 سازند کنگان در چاه میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی ۵۷
- شکل (۳-۳): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K1 سازند کنگان با استفاده از ماژول Multimin به همراه ستون لیتولوژی، تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب ۵۸
- شکل (۴-۳): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K2 سازند کنگان در چاه میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی ۵۹
- شکل (۵-۳): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K2 سازند کنگان به همراه ستون لیتولوژی، تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب ۵۹
- شکل (۶-۳): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K3 سازند دالان بالایی در چاه میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی ۶۰

شکل (۷-۳): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K3 سازند دالان بالایی به همراه ستون لیتولوژی،

تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب ۶۱

شکل (۸-۳): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K4 سازند دالان بالایی در چاه X میدان مورد

مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی ۶۲

شکل (۹-۳): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K4 سازند دالان بالایی به همراه ستون لیتولوژی،

تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب ۶۳

شکل (۱۰-۳): انطباق عمودی پارامترهای RPI، FZI، RQI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K1

سازند کنگان ۶۸

شکل (۱۱-۳): انطباق عمودی پارامترهای RPI، FZI، RQI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K2

سازند کنگان ۶۹

شکل (۱۲-۳): انطباق عمودی پارامترهای RPI، FZI، RQI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K3

سازند دالان فوقانی ۷۰

شکل (۱۳-۳): انطباق عمودی پارامترهای RPI، FZI، RQI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K4

سازند دالان فوقانی ۷۱

شکل (۱۴-۳): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت اول ۷۶

شکل (۱۵-۳): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت دوم ۷۸

شکل (۱۶-۳): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت سوم ۷۸

شکل (۳-۱۷): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت چهارم ۸۰

شکل (۳-۱۸): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت پنجم ۸۱

شکل (۳-۱۹): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت ششم ۸۲

شکل (۳-۲۰): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت اول ۸۳

شکل (۳-۲۱): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت دوم ۸۴

شکل (۳-۲۲): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت سوم ۸۵

شکل (۳-۲۳): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت چهارم ۸۶

شکل (۳-۲۴): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت پنجم ۸۸

شکل (۳-۲۵): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای

واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت ششم ۸۹

شکل (۳-۲۶): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب به ازای مقادیر مختلف A، B، C، α و β برای سازند ماسه‌سنگی بورگان در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غرب خلیج فارس ۹۲

شکل (۳-۲۷): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب به ازای مقادیر مختلف A، B، C، α و β برای سازند سروک در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران ۹۳

فهرست جداول

- جدول (۱-۳): نگارهای خام موجود چاه X در میدان مورد مطالعه ۵۱
- جدول (۲-۳): نتایج ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان بالایی در چاه مورد مطالعه ۶۴
- جدول (۳-۳): مقادیر مینیمم، ماکزیمم و متوسط تراوایی (k)، تخلخل مؤثر (Φ_e)، اشباع از آب (S_w)، آب کاهش ناپذیر (S_{wi}) و هیدروکربن (S_h)، اندیس کیفیت مخزن (RQI)، اندیس منطقه‌ی جریان (FZI)، اندیس پتانسیل مخزن (RPI) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (MRQI) برای بخش‌های مخزنی سازندهای کنگان و دالان چاه مورد مطالعه ۶۷
- جدول (۴-۳): ضرایب تعیین به ازای ضرایب و توان‌های مختلف برای هر دو روش تعیین لگاریتم DRQI برای حالت‌های اول، دوم و سوم ۸۹
- جدول (۵-۳): ضرایب تعیین به ازای ضرایب و توان‌های مختلف برای هر دو روش تعیین لگاریتم DRQI برای حالت‌های چهارم، پنجم و ششم ۹۰
- جدول (۶-۳): فرمول اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به ازای مقادیر مختلف A، B، C، α ، β و γ و ضریب تعیین برای سازند ماسه‌سنگی بورگان و سازند آهکی سروک ۹۱
- جدول (۷-۳): مقادیر متوسط، مینیمم و ماکزیمم تراوایی (k)، تخلخل مؤثر (Φ_e)، اشباع آب (S_w) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) زون خالص تولیدی واحدهای مخزنی سازند کنگان در چاه مورد مطالعه ۹۴
- جدول (۸-۳): مقادیر متوسط، مینیمم و ماکزیمم تراوایی (k)، تخلخل مؤثر (Φ_e)، اشباع آب (S_w) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) زون خالص تولیدی واحدهای مخزنی سازند دالان فوقانی در چاه مورد مطالعه ۹۴

جدول (۹-۳): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و سازند دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع از آب ۹۷

جدول (۱۰-۳): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و سازند دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۴، ۰/۱ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع از آب ۹۷

جدول (۱۱-۳): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و سازند دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۸، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع از آب ۹۸

جدول (۱۲-۳): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع از آب ۹۸

فصل اول

کلیات

۱-۱. مقدمه

در اکتشاف میادین نفت و گاز، پس از مطالعات دورسنجی، زمین‌شناسی سطحی و ژئوفیزیکی، محتمل‌ترین مکان حاوی هیدروکربن برای حفر چاه‌های اکتشافی تعیین می‌شود. پس از حفر چاه‌های اکتشافی، زون‌های حاوی نفت یا گاز قابل تولید (زون تولید^۱) درون هر چاه تعیین می‌شود. روش‌های تعیین زون تولید را می‌توان به طور کلی به دو دسته‌ی مستقیم^۲ و غیرمستقیم^۳ تقسیم‌بندی کرد. در روش‌های مستقیم، زون تولید با مشاهده‌ی سیال مخزنی و دبی تولیدی تشخیص داده می‌شود (مثل آزمون چاه) در حالی که در روش‌های غیرمستقیم تعیین زون تولید با تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی یا پتروفیزیکی (نگارها) انجام می‌شود (Masoudi et al., 2014).

کیفیت مخزن، ظرفیت ذخیره‌سازی، توزیع و جریان سیالات مخزن را کنترل می‌کند. تخلخل و تراوایی مهم‌ترین خصوصیات مخزن می‌باشند که می‌توانند به عنوان ورودی جهت ساخت مدل‌های پتروفیزیکی از مخزن مورد استفاده قرار گیرند. رابطه‌ی تخلخل و تراوایی در قالب واحدهای هیدرولیکی در توصیف سنگ‌های مخازن ناهمگن استفاده می‌شود. شناسایی واحدهای جریان هیدرولیکی می‌تواند برای ارزیابی کیفیت مخزن بر اساس رابطه‌ی تخلخل و تراوایی مورد استفاده قرار گیرد. (Schoen and Schon., 2001).

۱-۲. تعریف مسئله

مطالعات پتروفیزیکی شامل تعیین لیتولوژی سازند، شناخت ویژگی‌های مخزن و به دست آوردن پارامترهای مخزنی از قبیل تخلخل، تراوایی، اشباع از آب و هیدروکربن و حجم شیل است. هدف از این مطالعات، زون‌بندی سازند مخزنی به منظور شناسایی لایه‌های مخزنی که مهم‌ترین مراحل مطالعات مخزنی است که به این ترتیب بخش‌هایی که پتانسیل بیشتری برای تولید هیدروکربن دارند مطالعات تولیدی در آنها متمرکز شود و از هدرروی هزینه‌های گزاف در لایه‌های غیرمخزنی جلوگیری شود،

¹ Net pay

³ Indirect methods

² Direct methods

تعیین زون‌های خالص تولیدی با استفاده از حد برش پارامترهای پتروفیزیکی و در نهایت بررسی کیفیت مخزن^۱ در بخش‌های مختلف سازند، برای تعیین مناسب‌ترین زون‌ها جهت بهره‌برداری بهینه از مخزن و توسعه آگاهانه‌تر میادین نفتی می‌باشد. تعیین میزان تخلخل مؤثر^۲، درجه اشباع شدگی آب سازند^۳ و هیدروکربن‌ها و محاسبه میزان تراوایی^۴ و همچنین حجم محتوی شیل^۵ مهم‌ترین پارامترهایی هستند که می‌بایست در ارزیابی پتروفیزیکی جهت پی بردن به کیفیت مخزن تعیین شوند. برآورد درست این پارامترها نقش مؤثری در مدل سازی‌های مخزن ایفا نموده و درجه‌ی موفقیت بسیاری از فعالیت‌های اکتشافی، حفاری، توسعه و بهره‌برداری از مخازن نفت و گاز به دقت تخمین این پارامترها بستگی دارد (Worthington, 2011). در صنعت نفت پارامترهای مخزن توسط دو روش متداول و کاربردی آنالیز مغزه^۶ به عنوان روش مستقیم و ارزیابی نگارهای چاه‌پیمایی^۷ به عنوان روش غیرمستقیم تعیین می‌شوند. روش آنالیز مغزه که در آزمایشگاه و از طریق آزمایش بر روی مغزه صورت می‌گیرد اطلاعات بسیار مفیدی راجع به سنگ مخزن ارائه می‌کند. استفاده از روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری این پارامترها دارای هزینه‌ی بسیار زیاد و زمان‌بر است، بنابراین استفاده از این روش تنها در تعداد معدودی از چاه‌های یک میدان امکان‌پذیر است. علاوه بر این در بسیاری از چاه‌ها به دلایل گوناگون، عملیات مغزه‌گیری امکان‌پذیر نبوده یا برای فواصل خاصی از درون چاه صورت می‌گیرد. از این‌رو در میادین نفتی به منظور دستیابی به این اهداف، نگارهای چاه‌پیمایی که به طور استاندارد و متداول در تمام چاه‌های نفتی برداشت می‌شوند، استفاده می‌گردد (احمدی و امیری بختیار، ۱۳۹۵).

کیفیت مخزن جزء کلیدی در تعیین ارزش و دارایی مخازن نفت و گاز می‌باشد. عدم برآورد و تخمین دقیق این پارامتر باعث کاهش درجه موفقیت در عملیات بهره‌برداری و استراتژی توسعه میادین هیدروکربنی می‌شود (Rui et al., 2011a; Rui et al., 2011b). کیفیت مخزن پارامتر کلیدی است که

¹ Reservoir quality

² Effective porosity

³ Water saturation

⁴ Permeability

⁵ Shale volume

⁶ Core analyse

⁷ Well logging evaluation

به طور مؤثری اکتشاف و استخراج منابع هیدروکربنی را کنترل می‌کند. کیفیت مخزنی خوب یا بد به طور 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 (Hakimi et al., 2012; Gier et al., 2008).

در اکثر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی کیفیت مخزن از دو پارامتر تراوایی و تخلخل (اندیس کیفیت مخزن^۱ و مشتقات آن) برای توصیف مخزن استفاده می‌شود. هدف از مطالعات پتروفیزیکی شناسایی آن دسته از زون‌های مخزنی است که افزون بر تخلخل بر ذخیره‌ی ماده‌ی هیدروکربنی و ارتباط این حفرات با یکدیگر جهت قابلیت هدایت سیال، دارای اشباع از آب پایین و غنی‌شدگی از ماده هیدروکربن باشد بنابراین تنها شناسایی زون‌های دارای تخلخل و تراوایی مناسب کافی نیست. همچنین اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن همیشه کیفیت واقعی مخزن را زمانی که مقدار تراوایی و تخلخل زون‌های مخزنی پایین باشد، نشان نمی‌دهد. بنابراین باید با به کارگیری داده‌های تجزیه و تحلیل مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی روشی بهبود یافته را در محاسبه‌ی کیفیت مخزن معرفی نمود که علاوه بر تراوایی و تخلخل، اثر اشباع‌شدگی از آب روی کیفیت مخزن بررسی گردد.

در این پژوهش از بین خصوصیات تأثیر گذار بر کیفیت مخزن، ویژگی‌های تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب انتخاب می‌شود و سپس براساس تأثیر هر کدام از این ویژگی‌ها بر کیفیت مخزن، کمیت جدیدی برای تعیین کیفیت مخزن معرفی می‌شود. به منظور تعمیم اندیس معرفی شده برای سایر سازندهای مخزنی با لیتولوژی‌های مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای اولویت‌بندی لایه‌های مخزنی از انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت استفاده می‌شود.

¹ Reservoir quality index

۳-۱. مروری بر سابقه‌ی تحقیق

به طور کلی، مطالعات انجام شده در زمینه کیفیت مخزن محدود است. محققان مختلف، پارامترهای مختلفی را برای بررسی کیفیت در نظر می‌گیرند و در بین این محققان، بعضی فقط یک پارامتر را در نظر گرفته، مانند فقط تراوایی، اما برخی دیگر، کیفیت مخزن را از دید اقتصادی تعیین می‌کنند. برخی از مهم‌ترین مطالعات در زمینه‌ی کیفیت مخزن و استفاده از انتگرال‌های فازی در اولویت‌بندی لایه‌های مخزنی عبارتند از:

اولین مطالعه در زمینه کیفیت مخزن توسط آمافول^۱ و همکاران (۱۹۹۳) انجام شده است. آمافول و همکاران مفهوم اندیس کیفیت مخزن (RQI)، $(k/\phi)^{1/5}$ ، با در نظر گرفتن گلوگاه خلل و فرج، توزیع خلل و فرج و دانه‌ها و دیگر پارامترهای ماکروسکوپی را معرفی کردند که به عنوان شاخص کیفیت مخزنی شناخته می‌شود. این شاخص تقریبی از میانگین شعاع هیدرولیکی در سنگ مخزن می‌باشد و کلیدی برای تعیین واحدهای هیدرولیکی بوده که تخلخل، تراوایی و فشار مویینگی را به هم مرتبط می‌سازد. ورثینگتن^۲ (۲۰۰۸) از شاخص کیفیت مخزن برای تعیین حد برش‌های پارامترهای پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی، اشباع‌شدگی از آب و حجم شیل) با شرایط دینامیکی^۴ جهت تعیین زون خالص تولیدی از زون ناخالص استفاده کرد. ایزدی و قلم‌بر (۲۰۱۳) ضمن ارائه‌ی روشی جدید برای تعیین تراوایی، مفهوم شاخص کیفیت مخزن بهبود یافته^۵ (MRQI) را معرفی کردند که پارامتری جهت تعیین واحدهای هیدرولیکی می‌باشد که در این رابطه علاوه بر تراوایی و تخلخل، اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر^۶ نیز وجود دارد. دینگ^۷ و همکاران (۲۰۱۴) بر اساس نظریه‌ی اساسی تئوری فازی، عوامل اساسی که کیفیت مخازن کربناته را تحت تأثیر قرار می‌دهند انتخاب نموده (برای مثال مجموعه‌ی فاکتور) (تخلخل، تراوایی، اشباع‌شدگی از آب) و با تعیین وزن مناسب برای هر کدام از این پارامترها

^۱ Amaefule

^۲ Worthington

^۳ Cutoff

^۴ Dynamically-conditioned

^۵ Modified reservoir quality index

^۶ Irreducible water saturation

^۷ Ding

(برای مثال مجموعه‌ی وزن) و براساس قانون ارزیابی مشخص، تابع عضویت مناسب برای تعیین درجه عضویت هر کدام از عوامل انتخاب نموده و مدل ارزیابی کمی و جامع کیفیت مخازن کربناته ایجاد کردند. نبوی و العززی^۱ (۲۰۱۵) از اندیس پتانسیل مخزن^۲ (RPI) جهت توصیف و رتبه‌بندی پتانسیل مخزن براساس اندیس کیفیت مخزن و اندیس منطقه‌ی جریان^۳ (FZI) با در نظر گرفتن اشباع‌شدگی از آب و اشباع‌شدگی از هیدروکربن استفاده کردند. شاخص پتانسیل مخزن، میانگین حسابی RQI و FZI می‌باشد. کوتز و دنو^۴ (۱۹۸۱) اندیس سیال آزاد^۵ (FFI) را که به صورت حاصل ضرب اشباع‌شدگی 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^۶ (MNL) به دست می‌آید با تراوایی مرتبط نموده و تیاب و دونالدسون^۷ (۲۰۱۵) بر اساس این رابطه‌ی بین اندیس سیال آزاد و تراوایی، اندیس سیال آزاد را با اندیس کیفیت مخزن مرتبط کردند. تیاب و دونالدسون (۲۰۱۵) از تراوایی برای تعیین کیفیت مخزن استفاده نموده و مقادیر تراوایی بر حسب میلی داری را برای تعیین نوع کیفیت مخزن بیان نمودند: اگر تراوایی کوچکتر از ۱ میلی داری باشد، ضعیف؛ اگر تراوایی بین ۵۰ تا ۲۵۰ میلی داری باشد، خوب و اگر تراوایی بزرگتر از ۲۵۰ میلی داری باشد، بسیار خوب شناخته می‌شود.

ریو^۸ و همکاران (۲۰۱۷) یک سیستم ارزیابی کمی کیفیت مخازن هیدروکربنی برای توسعه ایجاد نمودند؛ برای این منظور کلیه‌ی ویژگی‌های مؤثر در کیفیت مخازن کربناته را انتخاب نموده و با طراحی پرسشنامه‌ای، این پارامترها توسط متخصصین در این حوزه امتیاز داده شده، با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌ی اصلی^۹ (PCA) به هر کدام از این پارامترها وزن داده شد. در نهایت اندیس کیفیت مخزن و اندیس کیفیت داده^{۱۰} برای مخازن تعریف شد.

¹ Nabawy and Al-Azazi

² Reservoir potentiality index

³ Flow zone index

⁴ Coates and Denoo

⁵ Free fluid index

⁶ Magnetic nuclear log

⁷ Tiab and Donaldson

⁸ Rui

⁹ Principal Component Analysis

¹⁰ Data quality index

زینالی و همکاران (۱۳۸۱) برای پهنه‌بندی زون‌های مخزنی سازند آسماری، پارامترهای حاکم بر کیفیت مخزن از قبیل تخلخل، درجه‌ی اشباع، ضخامت و درصد حجم رس و انیدریت از داده‌های پتروفیزیکی را انتخاب نموده، با در نظر گرفتن میزان اهمیت هر کدام در کیفیت مخازن به گونه‌ای که به تخلخل حداکثر امتیاز معادل چهار، به درصد اشباع و ضخامت امتیاز دو و به درصد حجم رس و انیدریت امتیاز یک تعلق داده و سپس با استفاده از روش تلفیق هم‌پوشی این لایه‌های اطلاعاتی را با هم تلفیق نموده در نهایت نقشه‌ای مجزا که زون‌های مطلوب را از غیر مطلوب از هم تفکیک می‌سازد را تولید کردند.

روش‌های هوشمند یکی از روش‌های کاربردی مؤثر در تعیین زون‌های تولیدی (زون‌های حاوی هیدروکربن) است. از جمله پرکاربردترین روش‌های هوشمند، روش‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی و انتگرال‌های فازی^۱ می‌باشند. لطفی عسگرزاده (۱۹۶۵) نظریه‌ی جدید عدم قطعیت را که با تئوری احتمالات متمایز بود ابداع نمود. سپس سوگنو^۲ (۱۹۷۲) از انستیتو تکنولوژی توکیو، نظرات لطفی عسگرزاده را با ارائه مفاهیم اندازه‌ی فازی و انتگرال‌های فازی در رساله‌ی دکترای خود تعقیب کرد. بر پایه‌ی عملگرهای انتگرال فازی، روشی برای ترکیب شواهد (داده، اطلاعات) گوناگون توسعه یافت که شواهد گوناگون را به صورت خطی یا غیر خطی ترکیب می‌نماید. عمل ترکیب روی توابع عضویت و با توجه به اهمیت نسبی منابع اطلاعاتی در تصمیم‌گیری اعمال می‌گردد (Tahani and Keller., 1990). نظریه‌ی انتگرال‌های فازی توسط سوگنو به عنوان ابزاری برای بررسی مسائل غیر قطعی معرفی شد. انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت^۳ پرکاربردترین نوع از انتگرال‌های فازی به شمار می‌روند (Shieh et al., 2009).

از جمله استفاده از انتگرال‌های فازی، مسعودی و همکاران (۱۳۹۰) با به کارگیری روش‌های ترکیب اطلاعات (مبتنی بر نظریه‌ی احتمالات شرطی بیزین و انتگرال‌های فازی) به شناسایی زون‌های تولید

¹ Fuzzy integrals

³ Choquet

² Sugeno

هیدروکربن در مخازن کربناته دست یافتند و همچنین شعبانی کیا و همکاران (۱۳۹۶) از انتگرال‌های فازی برای شناسایی زون‌های مطلوب برای عملیات شکست هیدرولیکی و اولویت‌بندی آنها در تعدادی از چاه‌های جنوب غربی ایران استفاده کردند.

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه‌ی کیفیت مخزن می‌توان نتیجه گرفت که در اکثر روابط موجود نشان‌دهنده‌ی کیفیت مخزن در این مطالعات از دو پارامتر تراوایی و تخلخل و به صورت خیلی کم از اشباع از آب کاهش ناپذیر استفاده می‌شود. با این حال پارامترهای دیگری مانند اشباع از آب و حجم شیل نیز در کیفیت مخزن مؤثر هستند. همچنین تعیین اشباع از آب کاهش‌ناپذیر به روش‌های گوناگونی نظیر آزمایش مغزه صورت می‌گیرد اما به علت‌های گوناگون نظیر هزینه‌های بسیار زیاد و یا ممکن نبودن تهیه مغزه در بعضی از نقاط چاه نمی‌توان این پارامتر را تعیین کرد. همچنین اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن همیشه نتیجه درست و مناسبی را برای بیان کیفیت مخزن، زمانی که مقدار تراوایی زون‌های مخزنی پایین باشد (با توجه به اینکه در این روابط تخلخل در مخرج قرار دارد)، نشان نمی‌دهد. بنابراین باید با به کارگیری داده‌های تجزیه و تحلیل مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی روشی بهبود یافته (رابطه جدید) را در محاسبه‌ی کیفیت مخزن معرفی نمود که علاوه بر تراوایی و تخلخل، اثر اشباع‌شدگی از آب روی کیفیت مخزن بررسی گردد.

۴-۱. ضرورت انجام تحقیق

ارزیابی پتروفیزیکی اهمیت ویژه‌ای در بهره‌برداری مخزن دارد؛ زیرا ارزیابی پتروفیزیکی موجب دستیابی به ویژگی‌های مخزن و توصیف هر چه بهتر آن می‌شود. با دستیابی به این مهم و شناسایی مخزن با همه همگونی و ناهمگونی موجود در آن، چگونگی تولید و برداشت بهینه میسر می‌شود. به این ترتیب در مطالعات اکتشافی و تولیدی بعدی، تمرکز بیشتر روی بخش‌هایی است که پتانسیل بیشتری برای تولید هیدروکربن دارند و از هدرروی هزینه‌های گزاف در لایه‌های غیرمخزنی جلوگیری می‌شود. معمولاً در اکثر مطالعاتی که در زمینه‌ی کیفیت مخزن انجام شده است دو پارامتر تخلخل و تراوایی را

جهت تعیین کیفیت در نظر گرفته و دیگر پارامترهای تأثیر گذار در کیفیت مخزن (اشباع‌شدگی از آب، حجم شیل و لیتولوژی) را در نظر نمی‌گیرند. در این پژوهش علاوه بر این دو پارامتر، اشباع‌شدگی از آب با توجه به اهمیت این پارامتر در تشخیص زون‌های مخزنی از غیرمخزنی، در نظر گرفته می‌شود.

۱-۵. اهداف و روش انجام تحقیق

هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد مطالعه، تعیین مناسب‌ترین زون‌ها (تعیین زون‌های خالص تولیدی) و در نهایت بررسی کیفیت مخزن در بخش‌های مختلف چاه مورد مطالعه بر اساس سه پارامتر تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب می‌باشد. تعیین میزان تخلخل، درجه اشباع‌شدگی آب سازند و هیدروکربن‌ها و تراوایی مهم‌ترین پارامترهایی هستند که می‌بایست در ارزیابی پتروفیزیکی جهت پی بردن به کیفیت مخزن تعیین شوند. برآورد درست این پارامترها نقش مؤثری در مدل سازی‌های مخزن ایفا نموده و درجه موفقیت بسیاری از فعالیت‌های اکتشافی، حفاری، توسعه و بهره‌برداری از مخازن نفت و گاز به دقت تخمین این پارامترها بستگی دارد. تاکنون مطالعاتی جهت تعیین کیفیت مخزن با استفاده از دو پارامتر تخلخل و تراوایی انجام شده است. در این پژوهش علاوه بر این دو پارامتر از پارامتر سومی به نام اشباع‌شدگی از آب جهت تعیین کیفیت مخزن که در مخازن هیدروکربنی قابل استفاده باشد و بتواند کیفیت زون‌های مخزنی را با توجه به این سه پارامتر اولویت‌بندی نماید استفاده شده است.

عمده نفت تولیدی جهان وابسته به سازندهای عظیم کربناته و ماسه‌سنگی به ویژه در بخش‌های نفتی گوناگون خاورمیانه است. به دلیل اهمیت این نوع مخازن، در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های خام بدست آمده از نگارهای چاه‌پیمایی و اطلاعات آزمایشگاهی حاصل از آنالیز مغزه و بکارگیری نرم افزار Geolog، پارامترهای پتروفیزیکی سازندهای مخزنی میدان هیدروکربوری مورد مطالعه واقع در جنوب کشور، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق، تخلخل به روش‌های مختلف محاسبه و مقایسه می‌شوند. همچنین اشباع‌شدگی از روی نگارهای چاه‌پیمایی محاسبه و تعیین می‌شود. بر اساس مقادیر

این پارامترها و با استفاده از روش‌های تلفیق فازی این پارامترها می‌توان مخزن مورد مطالعه را، به لحاظ کیفیت به دسته بندی‌های با کیفیت‌های مختلف تقسیم‌بندی یا تفکیک نمود.

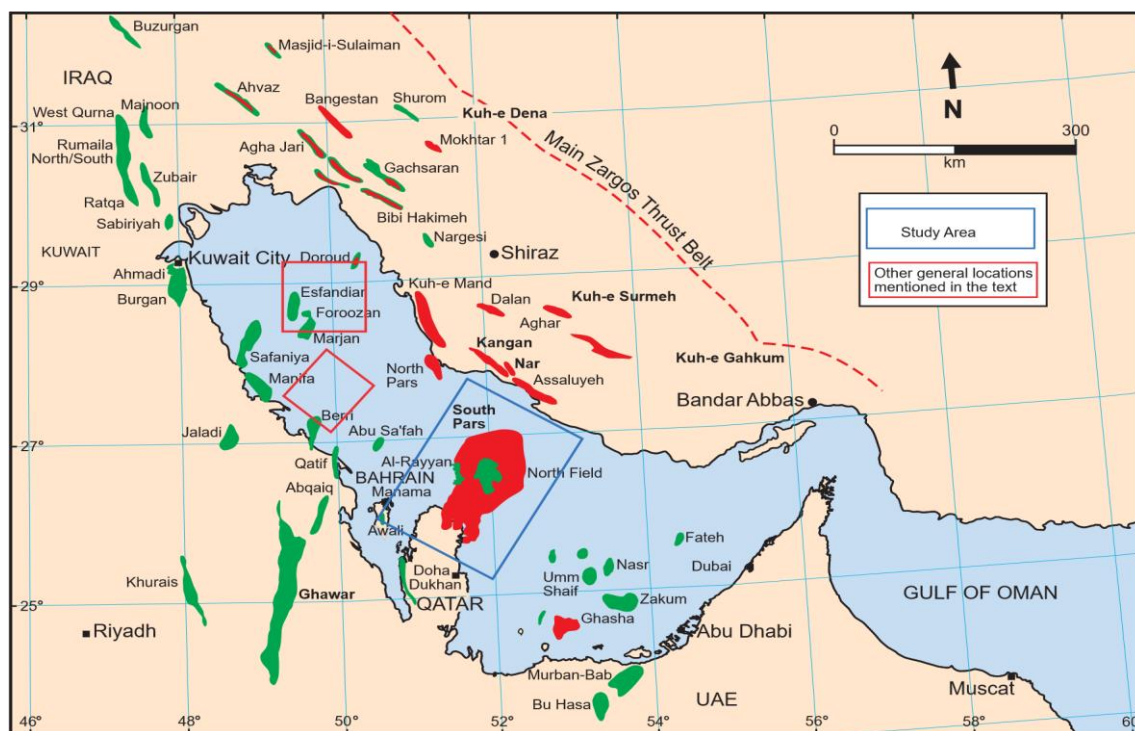
۱-۶. میدان هیدروکربنی مورد مطالعه

میدان هیدروکربنی مورد مطالعه، بزرگترین میدان گازی جهان روی خط مرزی مشترک ایران و قطر به فاصله‌ی ۱۰۰ کیلومتری از بندر عسلویه، در ساحل جنوبی ایران، ۱۰۵ کیلومتری شمال شرقی شبه جزیره‌ی قطر و ۳۳۰ کیلومتری شمال غربی دبی در آب‌های خلیج فارس قرار دارد (شکل (۱-۱)). این میدان در سال ۱۹۹۱ میلادی در بخش ایرانی کشف شد (نجم‌آبادی، ۱۳۷۲) در صورتی که بخش قطری آن با نام گنبد شمالی^۱ در سال ۱۹۷۱ میلادی کشف شده بود (Konert et al., 2001). مساحت کل میدان بیشتر از 10000 Km^2 است که 3700 Km^2 آن متعلق به ایران است. میزان ذخیره‌ی میدان مورد مطالعه بیش از ۱۴ تریلیون متر مکعب گاز، معادل ۶٪ کل ذخیره‌ی گاز جهان و ۵۰٪ ذخایر گازی ایران، به همراه ۱۸ میلیارد میعانات گازی است. سنگ مخزن میدان هیدروکربنی مورد مطالعه، سازندهای کنگان و دالان به سن پرموتریاس است. توالی کربناته‌ی پرموتریاس مهم‌ترین سنگ مخزن ذخایر گازی ناحیه‌ی خلیج فارس و نواحی اطراف را تشکیل می‌دهند (Ehrenberg et al., 2007).

۱-۶-۱. وضعیت زمین شناسی میدان مورد مطالعه

ساختمان زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه که بخش شمالی گنبد شمالی را تشکیل می‌دهد، دارای یال‌های ملایم است که خود تشکیل‌دهنده‌ی یکی از چند قله‌ی ساختمانی برآمدگی قطر- فارس روی سکوی کربناته منطقه است (Zeigler, 2001; Konert et al, 2001). کمان قطر با حدود ۵۰۰ کیلومتر مربع وسعت و روند شمال خاور- جنوب، جنوب باختر یکی از مهم‌ترین ساختارهای زمین ساختی بالا آمده روی صفحه عربی است که از روند گسلی شمالی- جنوبی پیروی می‌کند و حوضه‌ی خلیج فارس را به دو زیر حوضه‌ی خاوری و باختری تقسیم کرده است.

¹ North dome



شکل (۱-۱): موقعیت میدان هیدروکربنی مورد مطالعه در جنوب ایران و در خلیج فارس (Insalaco et al., 2006)

ستبرای رسوبات در زیر حوضه‌ی باختری $6/7$ کیلومتر و در زیر حوضه‌ی خاوری $5/2$ کیلومتر است که این ستبرای نسبی رسوبات در مقایسه با نواحی پیرامون (ستبرای 7 تا 14 کیلومتری رسوبات کمربند چین خورده زاگرس) نشان می‌دهد که این بخش در بیشتر دوران پالئوزوئیک یک بالآمدگی ساختاری بوده است (Esrafilili-Dizaji and Rahimpour-Bonab; 2009). در زمان‌های گذشته‌ی زمین‌شناسی، ایالت‌های مختلف زاگرس سرگذشت یکسان زمین‌ساختی و رسوب‌گذاری با ایالت کمان قطر- فارس جنوبی داشته‌اند و بخش‌های مختلف زاگرس محصول 4 مرحله مختلف زمین‌شناسی هستند که با تفاوت‌های کمی در جزئیات آن، در مورد ایالت کمان قطر- فارس نیز این مراحل صادق است (Alavi, 2004).

از زمان نئوپروتروزویک تا کربنیفر، توالی‌ها به طور کلی در یک حاشیه غیر فعال قاره‌ای پایدار در شمال خاور خشکی گندوانا نهشته شده‌اند. از زمان پرمین تا تریاس فعالیت دوباره یک سری گسل‌های عادی و گسترش گرابن‌ها و نیمه‌گرابن‌ها در ارتباط با باز شدن نتوتتیس بوده است. رسوبات کربناتی در

این زمان در زاگرس و ایالت کمان قطر - فارس جنوبی بیشتر در یک سکوی حاشیه‌ای پانگه‌آ نهشته شده‌اند (Alavi, 2004; Insalaco et al., 2006).

۱-۶-۲. چینه‌شناسی سازندهای کنگان و دالان در میدان مورد مطالعه

میدان هیدروکربنی مورد مطالعه از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات زمین‌شناسی برخوردار است. توالی کربناته و تبخیری سازندهای دالان با سن پرمین فوقانی و کنگان با سن تریاس زیرین از اصلی‌ترین مخازن گازدار محسوب می‌شوند که معادل سازند خوف^۱ می‌باشند. نبود لایه‌های نفوذ ناپذیر میان این دو سازند موجب یکپارچه شدن این مخزن شده است. ویژگی‌های این دو سازند در ایران و معادل آنها در صفحه عربی (سازند خوف) مختصر تفاوت‌هایی دارند که ناشی از نوسانات شرایط محیطی در حوضه رسوبی است (Koehrer et al, 2010; Rahimpour-Bonab, 2010; Al-Jallal, 1995). در شکل (۱-۲) ستون چینه‌شناسی سازندهای کنگان و دالان به همراه واحدهای مخزنی آنها نشان داده شده است. انتظار می‌رود که شیل‌های سیلورین سنگ منشاء مخازن نفتی و گازی بسیار بزرگ پالئوزوئیک در این حوضه رسوبی و سازندهای کنگان و دالان سنگ مخزن این ذخایر عظیم هستند. لیتولوژی اصلی سازندهای کنگان و دالان بالایی، سنگ آهک و دولومیت با میان لایه‌هایی از شیل و انیدریت است. از لحاظ مخزنی سازند کنگان و دالان بالایی به چهار واحد مخزنی K1، K2، K3 و K4 تقسیم می‌شود. هر یک از سازندهای کنگان و دالان به واحدهای کوچک‌تری تقسیم می‌شوند. در زیر به صورت مختصر به چینه‌شناسی هر کدام از آنها پرداخته می‌شود:

۱-۶-۲-۱. سازند کنگان

نام این سازند از روستای کنگان گرفته شده است. مقطع تیپ این سازند در چاه کوه سیاه ۱ با ضخامت ۲۵۰ متر قرار دارد (Szabo and Kheradpir, 1978). این سازند در کوه دنا و سورمه نیز بیرون‌زدگی دارد. سازند کنگان از سه رخساره‌ی اصلی تشکیل شده است (Szabo and Kheradpir, 1978).

¹ Khuff

الف- رخساره کربناته، که در لرستان بیشترین گسترش را دارد.

ب- رخساره‌ی آهک خالص^۱ که اغلب دولومیتی شده و گاهی مقادیر ناچیزی تبخیری در آن دیده می‌شود.

ج- رخساره‌ی آواری شیلی که در قاعده‌ی این سازند مشاهده می‌شود. گسترش این رخساره بسیار محدود است و در میدان مورد مطالعه دیده نمی‌شود. مرز پایینی سازند کنگان با سازند دالان به صورت ناپیوستگی بوده (Rahimpour-Bonab et al., 2010) و مرز بالایی آن با سازند شیلی آغار^۲ پیوسته است. از لحاظ مخزنی سازند کنگان به دو واحد مخزنی K1، معادل کنگان بالایی و K2، معادل کنگان زیرین تقسیم می‌شود (Szabo and Kheradpir, 1978). واحد K1 بیشتر از دولومیت، سنگ آهک دولومیتی و میان لایه‌های انیدریتی تشکیل شده است. لایه‌های ستر انیدریت و سنگ آهک انیدریتی متراکم در بخش قاعده‌ی واحد K1، این واحد را از واحد K2 تفکیک کرده است. واحد K1 با نهشته‌های آواری - تبخیری سازند دشتک (پوش سنگ گروه دهرم) پوشیده شده است.

واحد K2 بیشتر از سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی تشکیل شده است. این بخش از دیدگاه مخزنی دارای اهمیت است. تخلخل و تراوایی در این بخش دستخوش تغییرات فراوان بوده است و در فواصل کوتاه تغییرات بسیاری نشان می‌دهند. این واحد با مرز فرسایشی هم‌شیب روی واحد K3 (مربوط به بخش بالایی سازند دالان) قرار گرفته است. گسترش افق ستر رخساره ترمبولیتی از ویژگی‌های واحد K2 است. این افق در واحد K2 و کمی بالاتر از مرز پرموتریاس قرار دارد.

۱-۶-۲-۲. سازند دالان

نام این سازند از تاق‌دیس دالان که در حدود ۱۱۰ کیلومتری جنوب شرقی شیراز قرار دارد گرفته شده است. مقطع تیپ این سازند در کوه سیاه ۱ می‌باشد که ۷۴۸ متر ضخامت دارد. در ۱۲۰ کیلومتری جنوب شیراز یعنی در پلانژ غربی تاق‌دیس کوه سورمه نزدیک‌ترین رخنمون به مقطع تیپ قرار دارد که

¹ Clean carbonate

² Aghar

به عنوان مقطع مرجع سازند دالان شناخته می‌شود. ضخامت این مقطع ۶۳۸ متر است (Szabo and Kheradpir, 1978). این سازند به سه بخش کربناته بالایی، تبخیری و نار و کربناته پایینی تقسیم شده است. در قسمت‌های کربناته بالایی و پایینی دولومیت با آهک دیده می‌شود. تقسیم‌بندی دیگری نیز وجود دارد که از نام سازند خوف عربی گرفته شده است و با نام اختصاری K مشخص می‌گردد. برای مثال دالان پایینی، K5 و دالان بالایی معادل K3 و K4 می‌باشد. جنس K3، آهک - دولومیت و انیدریت و جنس K4 در بخش بالایی آن آهکی بوده و با نزدیک شدن به نار میزان انیدریت آن افزایش می‌یابد.

		CHRONOSTRATIGRAPHY		FORMATIONS		RESERVOIR	
		STANDARD	TETHYS	North	South		
TRIASSIC	Early	?Olenekian		Aghar Shale	Sudair Shale	K1	Studied Intervals
		Induan		Kangan		K2	
PERMIAN	Late (Lopingian)	Changhsingian	Dorashamian	Upper Dalan	Upper Khuff	K3	
		Wuchiapingian	Dzhulfian			K4	
	Middle (Guadalupian)	Capitanian	Midian	Nar Anhydrite	Middle Anhydrite		
		Wordian	Murgabian	Lower Dalan	Lower Khuff	K5-7	
		?Roadian	?Kubergandian				
		?Early (Cisuralian)		Faraghan	Haushi-Unayzah		

شکل (۲-۱): ستون چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه همراه با واحدهای مخزنی بررسی شده (همراه با اندکی تغییر) (Insalaco et al., 2006)

در میدان مورد مطالعه، همانند بسیاری از میادین ناحیه‌ی فارس و خلیج فارس، سازندهای کنگان و دالان سنگ مخزن عظیم گازی ناحیه هستند. چون هیچ لایه‌ی نفوذناپذیری این دو لایه را از هم جدا نمی‌کند، مخزنی واحد در نظر گرفته می‌شوند. لیتولوژی اصلی سازندهای کنگان و دالان بالایی سنگ آهک و دولومیت است که بعضاً با میان لایه‌هایی از شیل و انیدریت همراه هستند، اما بخش تشکیل دهنده‌ی سنگ مخزن همان واحدهای آهکی و دولومیتی است. از لحاظ مخزنی سازند کنگان و دالان بالایی به چهار واحد مخزنی تقسیم می‌شود که در این مطالعه با توجه به اطلاعات در دسترس، این چهار بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۷-۱. اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه

برای این مطالعه از اطلاعات کمی متعلق به یک حلقه چاه حفاری شده در سازندهای کنگان و دالان در میدان مورد مطالعه استفاده شده است. این اطلاعات شامل: نتایج آنالیز مغزه که شامل تخلخل و تراوایی مغزه، چگالی مغزه، اشباع آب کاهش ناپذیر، نگارهای خام پتروفیزیکی که شامل نگار پرتو گاما (CGR)، نگارهای مقاومتی کم عمق و عمیق (LLD&LLS)، چگالی (RHOB)، نوترون (NPHI)، صوتی (DT)، قطرسنجی (CAL) و فوتوالکتریک (PEF) و اطلاعات مربوط به سربرگ چاه مورد مطالعه و همچنین داده‌های تراوایی، تخلخل و اشباع‌شدگی از آب مربوط به دو چاه حفاری شده در سازند سروک (میدان بلال) و سازند کژدمی (میدان نوروز) واقع در دو میدان هیدروکربنی خلیج فارس می‌باشد.

۸-۱. ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در چهار فصل تهیه و تنظیم شده است. فصل جاری شامل مقدمه، تعریف مسئله، بررسی سوابق کارهای انجام شده، اهمیت و ضرورت مطالعه، اهداف مطالعه مورد نظر و اطلاعاتی درباره‌ی میدان هیدروکربنی مورد مطالعه و داده‌های استفاده شده است. پس از بیان کلیات در فصل اول به بررسی مبانی تحقیق به صورت فنی در فصل دوم پرداخته می‌شود. در فصل سوم ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان انجام شده و سپس بر اساس مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه، شرایط مخزن و

داده‌های موجود، پارامترهای مؤثر انتخابی بروی کیفیت مخازن مورد مطالعه را انتخاب و یک اندیس جدید برای تعیین کیفیت مخازن تعریف شده و در نهایت با استفاده از روش انتگرال‌های فازی، واحدهای مخزنی سازندهای کنگان و دالان بالایی به لحاظ کیفیت اولویت‌بندی می‌شوند. در نهایت فصل چهارم که فصل آخر پایان‌نامه است به جمع‌بندی مطالب فصل‌های قبلی پرداخته و در انتها پیشنهاداتی ارائه می‌شود.

فصل دوم

روش‌شناسی موضوع تحقیق

از مهم‌ترین ویژگی‌های پتروفیزیکی که کیفیت مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به تخلخل، تراوایی، اشباع شدگی از آب و هیدروکربن و درصد حجم رس و انیدریت اشاره نمود در کنار این خواص پتروفیزیکی، لیتولوژی و ضخامت زون خالص به ناخالص^۱ (NTG) که به کمک خواص مخزنی مانند تخلخل و تراوایی و غیره تعیین می‌شوند نیز بر کیفیت مخزن اثر می‌گذارند (Worthington., 2011).

ماهیت سنگ‌های مخزن حاوی نفت و گاز، مقادیر سیالات به تله افتاده را در درون فضای تهی این سنگ‌ها، توانایی این سیالات به جریان یافتن از درون سنگ‌ها و دیگر خواص فیزیکی مربوطه را وضع می‌کند. مقیاس فضای تهی به صورت تخلخل سنگ تعریف می‌شود و مقیاس توانایی سنگ برای انتقال سیالات تراوایی نامیده می‌شود. اطلاعاتی درباره‌ی این دو خاصیت قبل از این که سؤالات مربوط به انواع سیالات، مقدار سیالات، آهنگ‌های جریان سیال و ارزیابی‌های بازیافت سیال پاسخ داده شوند، اساسی به نظر می‌رسد. روش‌های اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی، اکثر آثار چاپی فنی صنعت نفت را در بر می‌گیرد. دیگر خواص مهم مخزن شامل بافت، مقاومت سنگ و سیالات محتوی آن نسبت به جریان الکتریکی، محتوی آب به صورت تابعی از فشار موینگی و ماهیت پیچاپیچی^۲ کانال‌های منفذی و روزنه‌ای می‌شود (Tiab and Donaldson., 2015).

بافت سنگ‌های رسوبی عمدتاً به وسیله‌ی شکل دانه‌ای، گردش‌دگی، جورشدگی، اندازه‌ی دانه و دانه‌بندی، کشیدگی دانه‌ها، تجمع و تراکم دانه‌ها و ترکیب شیمیایی آنها مشخص می‌شود. ترکیب معین این متغیرها ممکن است اطلاعاتی را درباره‌ی سازوکارهای عملیاتی در حین انتقال، ته‌نشین و تراکم و تغییر شکل مواد رسوبی آشکار سازد. در بعضی حالات، بافت ممکن است اطلاعاتی را درباره‌ی تراوایی سازند و تخلخل فراهم کند. برای مثال، ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز با دانه‌های زاویه‌دار بدون دانه‌بندی عموماً چگالی پایین‌تری نسبت به ماسه‌سنگ‌هایی که دانه‌های درشت و خوب دانه‌بندی شده دارند. تغییر

¹ Net to gross² Tortuous

تراوایی ممکن است از تغییر اندازه‌ی دانه و شکل و از توزیع کانال‌های خلل و فرج در سنگ پیش‌بینی شود (Tiab and Donaldson., 2015).

مقاومت ویژه تمام سازندها نسبت به جریان الکتریکی تابعی از مقدار آب در آن سازند و مقاومت ویژه خود آب است. دانه‌های سنگ و همچنین هیدروکربن‌ها عایق هستند. تغییرات در اشباع‌شدگی از آب وقتی که با تغییرات در مقاومت ویژه سیالاتی که خلل و فرج سنگ را پر کرده ترکیب شود نمایه‌های مقاومت را در نگارهای چاه‌پیمایی به وجود می‌آورد. این نمایه‌ها (نیم رخ‌ها) در تعیین مکان سازندهای حاوی هیدروکربن به ما کمک می‌کنند (Schlumberger, 1991). در زیر توضیح مختصری راجع به هر کدام از ویژگی‌های پتروفیزیکی مؤثر در کیفیت مخزن آورده شده است.

۲-۲. ویژگی‌های پتروفیزیکی مؤثر بر کیفیت مخزن

۲-۲-۱. تخلخل

فضای تهی‌ای که در سرتاسر سنگ در بین دانه‌ها ایجاد شده، فضای متخلخل نامیده شده که به وسیله‌ی سیالات (مایعات و یا گازها) اشغال شده است. تخلخل سنگ مخزن به صورت آن بخش از حجم کل مخزن که به وسیله‌ی مواد جامد مخزن اشغال نشده تعریف می‌شود. که به شکل ریاضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = \frac{V_b - V_{gr}}{V_b} = \frac{V_p}{V_b} \quad (1-2)$$

که در آن ϕ ، تخلخل به صورت کسر، V_p ، حجم خلل و فرج، V_{gr} ، حجم دانه و V_b ، حجم کل سنگ مخزن به صورت کسر است (مطیعی، ۱۳۸۷).

با توجه به این تعریف تخلخل مواد متخلخل می‌تواند هر مقدار داشته باشد ولی تخلخل اکثر سنگ‌های رسوبی عموماً کمتر از ۵۰٪ است (قاسم العسگری، ۱۳۸۹).

تخلخل‌های مخازن نفت در محدوده‌ای از ۵٪ تا ۴۰٪ قرار می‌گیرند ولی اغلب در بین ۱۰٪ و ۲۰٪ قرار دارند. عواملی که بر روی بزرگی تخلخل در رسوبات آواری مؤثر واقع شده عبارتند از: یکنواختی

اندازه‌ی دانه، درجه‌ی سیمانی شدن، مقدار تراکم در حین و بعد ته‌نشینی و روش‌های متراکم شدن. تخلخل از دیدگاه مهندسی به دو نوع تخلخل مطلق و تخلخل مؤثر بر اساس ارتباط خلل و فرج سنگ طبقه‌بندی می‌شود. به طور کلی تفاوت بین تخلخل کل (مطلق) و تخلخل مؤثر را تخلخل غیر مؤثر می‌گویند.

۲-۲-۲. اشباع‌شدگی از سیال

تخلخل سنگ مخزن، چون مقیاسی از توانایی آن سنگ برای ذخیره کردن سیالات (نفت، گاز و آب) بوده بسیار حائز اهمیت است. وسعت نسبی که خلل و فرج سنگ با سیالات مشخص پر می‌شوند به همان اندازه مهم است. این خاصیت اشباع سیال نامیده شده و به صورت کسر یا درصد کل حجم خلل و فرج اشغال شده به وسیله‌ی نفت، گاز یا آب بیان می‌گردد. بنابراین برای مثال اشباع نفت، S_o ، برابر است با (Schlumberger, 1991):

$$S_o = \frac{V_o}{V_p} \quad (2-2)$$

که در آن، V_o ، حجم نفت در خلل و فرج سنگ و V_p ، حجم کل خلل و فرج سنگ می‌باشد.

عبارات مشابه می‌توانند برای گاز و آب نوشته شوند. واضح است که:

$$S_o + S_g + S_w = 1 \quad (3-2)$$

و

$$V_o + V_g + V_w = V_p \quad (4-2)$$

اشباع‌شدگی با آب به نسبت حجمی از کل فضاهای پیوسته‌ی سنگ که توسط آب پر شده است اطلاق می‌شود. اشباع از آب یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی است که لازم است با دقت زیاد محاسبه شود، اشباع آب با مقادیر آب، نفت و گاز موجود در خلل و فرج مخازن هیدروکربوری در ارتباط مستقیم است. برآورد درست این پارامتر در مدل‌سازی‌های مخزن، نقش مؤثری ایفا می‌کند. هرگونه اشتباه در محاسبه میزان اشباع‌شدگی از آب می‌تواند منجر به از دست دادن زون‌های بهره‌ده نفت شود.

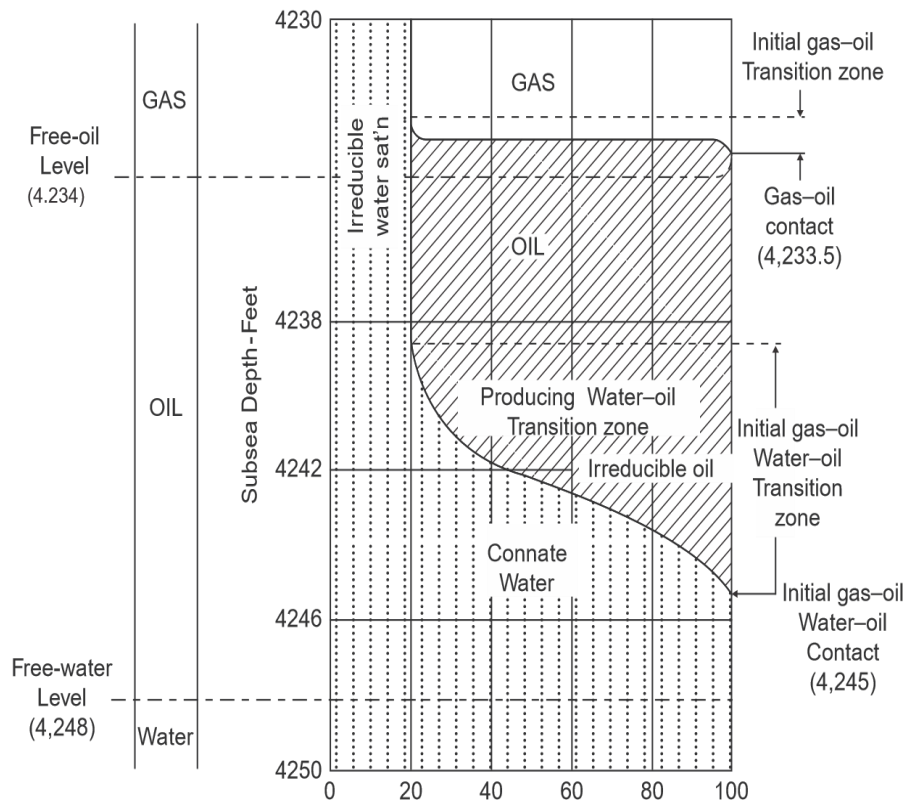
اگر در محاسبه اشباع شدگی از آب، خطای خاصی رخ دهد، ممکن است برآورد زیاد، در مورد مخزنی با آب اشباع شدگی کم، سبب شود تا آن مخزن بلااستفاده رها شود. عکس این پدیده نیز ممکن است اتفاق بیفتد، بدین صورت که مخزن دارای اشباع شدگی از آب زیاد باشد و به علت خطای محاسبه، مقدار آن کمتر برآورد شود و در نتیجه هزینه‌های هنگفتی صرف مخزنی شود که پتانسیل تولید هیدروکربن را ندارد. معمولاً در مخازن هیدروکربنی، محاسبه اشباع شدگی آب با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی و به کارگیری فرمول‌های اشباع شدگی از آب، صورت می‌گیرد. اگر تمام فضاهاى سنگ از آب پر شده باشد، در این صورت درجه‌ی اشباع با آب ۱۰۰ درصد است. درجه‌ی اشباع با آب سازندى می‌تواند از ۱۰۰ درصد تا مقدار خیلی کمی متغیر باشد ولی در مورد نفت هیچ وقت ۱۰۰ درصد نیست. غالباً در سنگ مخزن مقداری آب مویینگی وجود دارد که توسط نفت امکان جابجایی آن وجود ندارد که به آن درجه‌ی اشباع آب غیر قابل کاهشی^۱ (Sw_{ir}) می‌گویند و به میزان غنی بودن سنگ با آب بستگی ندارد. بزرگی Sw_{ir} و ارتفاع ناحیه‌ی گذار به اندازه‌ی خلل و فرج و بافت بستگی دارد. مقادیر Sw_{ir} بالا، نشان‌دهنده‌ی اندازه‌های منافذ کوچک است. ناحیه‌ی گذار به ناحیه‌ی اشباع آب تغییر پذیر مربوط می‌شود. چاه‌هایی که در درون این ناحیه تکمیل می‌شوند هیدروکربن‌ها و آب را تولید خواهند کرد و چاه‌هایی که در بالای این ناحیه تکمیل می‌شوند، یعنی در درون ناحیه‌ی اشباع آب کاهش ناپذیر، فقط هیدروکربن‌ها را تولید خواهند کرد (شکل (۲-۱)) (Anderson, 1975).

۲-۳. تراوایی

توانایی سنگ برای هدایت کردن سیالات به صورت تراوایی بیان می‌شود (Friedman., 1976). تراوایی سنگ به تخلخل مؤثر آن بستگی دارد در نتیجه به وسیله‌ی اندازه‌ی دانه سنگ، شکل دانه، توزیع اندازه‌ی دانه (جور شدگی)، انباشت دانه و درجه‌ی استحکام و سیمانی شدن تأثیرپذیر می‌شود. نوع رس یا ماده‌ی سیمانی کننده در بین دانه‌های ماسه نیز بر روی تراوایی، به ویژه در جایی که آب

¹ Irreducible water saturation

شیرین وجود دارد، تأثیر می‌گذارد. بعضی از رس‌ها به ویژه اسمکتیت‌ها (بنتونیت‌ها) و مونت‌موریلونیت‌ها در آب شیرین متورم شده و تمایل پیدا می‌کنند فضاهای منافذ را به صورت جزئی یا کامل مسدود کنند.



شکل (۱-۲): توزیع سیالات در مخازن هیدروکربنی (Tiab and Donaldson, 2015)

دارسی معادله‌ی جریان سیال را که از آن زمان تا به حال یک ابزار ریاضی استاندارد مهندسی نفت

محسوب شده، توسعه داد. این معادله به صورت دیفرانسیل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u = \frac{q}{A_c} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (۵-۲)$$

که در آن سرعت سیال (u) بر حسب cm/s ، دبی (q) بر حسب cm^3/s ، تراوایی سنگ متخلخل (k)

بر حسب دارسی ($0.986923 \mu\text{m}^2$)، مساحت مقطع عرضی سنگ (A_c) بر حسب cm^2 ، ویسکوزیته‌ی

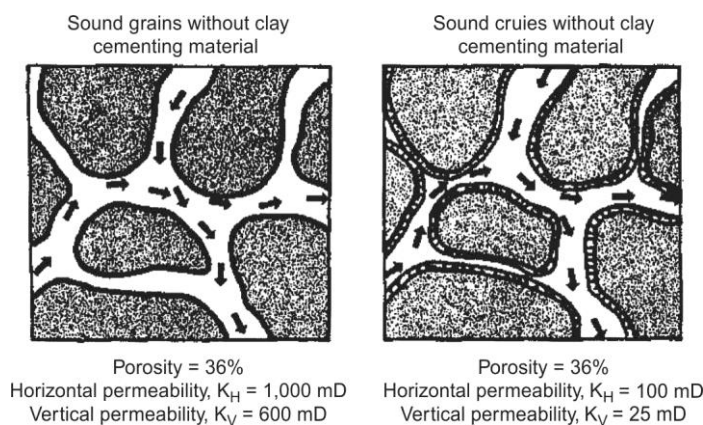
سیال (μ) بر حسب سانتی‌پواز (cp)، طول نمونه سنگ (l) بر حسب cm و گرادیان فشار در جهت

جریان atm/cm ، (dp/dl) است (Darcy, 1856).

یک داری تراوایی نسبتاً بالایی است. تراوایی اکثر مخازن هیدروکربنی کمتر از ۱ داری است. بنابراین واحد کوچکتری از داری، میلی داری (mD) در صنعت نفت و گاز به طور وسیع مورد استفاده قرار می گیرد. در سیستم واحدهای SI، تراوای بر حسب میکرومتر مربع (μm^2) به جای متر مربع (m^2) بیان می شود (Tiab and Donaldson., 2015).

مخازن هیدروکربنی می توانند تراوایی اولیه که به تراوایی زمینه نیز معروف بوده و تراوایی ثانویه داشته باشند. تراوایی زمینه در زمان ته نشینی و سنگی شدن (سفت شدن) سنگ های رسوبی نشأت گرفته است. تراوایی ثانویه از دگرسانی زمینه ی سنگ به وسیله ی تراکم، سیمانی شدن و انحلال حاصل می شود.

در حالی که تراکم و سیمانی شدن عموماً تراوایی را (شکل (۲-۲)) کاهش می دهند، شکستگی و انحلال سعی می کنند آن را افزایش دهند (Klinkenberg, 1941). در بعضی از سنگ های مخزنی، به ویژه کربنات های با تخلخل کم، تراوایی ثانویه، مجرای جریان عمده را برای مهاجرت سیال فراهم می کند. تراوایی مخازن نفتی ممکن است در محدوده ی ۰/۱ تا ۱۰۰۰ میلی داری یا بیشتر قرار گیرد.



شکل (۲-۲): تأثیرات ماده ی سیمانی کننده ی رس بر وی تخلخل و تراوایی (Klinkenberg, 1941).

۲-۲-۴. حجم شیل

حجم شیل یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی و توجه در کلیه مطالعات پتروفیزیکی و کیفیت مخزنی است. حجم شیل به معنی حجم کانی‌های رسی موجود در مخزن است و یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی کیفیت مخزنی است و در واقع تعیین دقیق کیفیت مخزنی و پارامترهای دیگر پتروفیزیکی مانند تخلخل، نوع و توزیع سیال مخزنی، لیتولوژی و تراوایی عمدتاً بر مبنای ارزیابی و تعیین این پارامتر است. علاوه بر اثر حضور شیل به عنوان یکی از اجزای مهم سنگی در آنالیز نگارهای چاه‌پیمایی بر روی تخلخل و تراوایی، خواص الکتریکی آنها نیز تأثیر زیادی روی مقاومت ویژه محاسبه شده می‌گذارد. کانی‌های رسی به دلیل ریز تخلخل‌هایی که دارند خواص پتروفیزیکی مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهند که در نتیجه‌ی آن، محاسبه‌ی پارامترهایی مانند تخلخل و اشباع‌شدگی تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Tiab and Donaldson, 2015).

۲-۲-۵. ضخامت زون خالص تولیدی

ضخامت زون ناخالص^۱، ضخامت کل زون‌های حفاری شده بدون احتساب مقادیر حدود برش مورد نظر جهت تخلخل و اشباع آب می‌باشد. ضخامت زون خالص^۲ عبارت است از میزان ضخامتی از سازند که شرایط مخزنی و پتروفیزیکی قابل قبول و قابلیت ذخیره سازی سیال در آن وجود دارد. این شرایط توسط حدود برش‌های در نظر گرفته شده جهت پارامترهای پتروفیزیکی تعیین می‌شود. بنابراین نسبت ضخامت زون خالص به کل (زون ناخالص) برای مشخص شدن لایه‌های اقتصادی، نسبت به ضخامت کل مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه این مقدار به عدد یک نزدیک‌تر شود کیفیت مخزن بهبود می‌یابد. زون تولید شاخص مهمی در کیفیت مخزن به شمار می‌آید (Cosentino, 2001).

¹ Gross thickness

² Net thickness

۲-۲-۶. لیتولوژی

لیتولوژی یک مرحله‌ی مهم در ارزیابی خواص مخزنی محسوب می‌شود و می‌تواند به جداسازی مناطق دارای خصوصیات مخزنی از غیر مخزنی کمک کند.

۲-۳. ارزیابی پتروفیزیکی

ارزیابی پتروفیزیکی علم تعبیر و تفسیر اطلاعات حاصل از چاه‌پیمایی است که یکی از فاکتورها در تعیین ویژگی‌های سنگ مخزن هیدروکربنی است. منظور از ارزیابی پتروفیزیکی، محاسبه‌ی پارامترهای پتروفیزیکی سازند از قبیل تخلخل، تراوایی، حجم شیل، اشباع از آب و هیدروکربن و حجم کانی‌ها می‌باشد. ارزیابی پتروفیزیکی نقش مهمی در ارزیابی بهره‌دهی چاه و در نهایت مقدار هیدروکربن درجا دارد. ارزیابی پتروفیزیکی در نرم‌افزار Geolog به دو روش ارزیابی پتروفیزیکی به روش قطعی^۱ و ارزیابی پتروفیزیکی به روش احتمالی^۲ انجام می‌شود.

۲-۳-۱. ارزیابی پتروفیزیکی به روش قطعی

ارزیابی پتروفیزیکی به روش قطعی معروف به ارزیابی گام به گام یا مرحله به مرحله نیز می‌باشد. این روش که سنتی و قدیمی می‌باشد برای محاسبه‌ی خصوصیات پتروفیزیکی سازند است از جمله این خصوصیات پارامترهای پتروفیزیکی سازند از قبیل تخلخل، تراوایی، حجم شیل، اشباع از آب و هیدروکربن است. در روش قطعی ممکن است از چند روش مختلف برای محاسبه‌ی یک پارامتر در یک مرحله استفاده نمود به عنوان مثال برای محاسبه‌ی حجم شیل از معادلات مختلفی می‌توان استفاده نمود و سپس مرحله‌ی دوم که محاسبه‌ی تخلخل می‌باشد، از حجم شیل محاسبه شده در مرحله‌ی قبلی برای محاسبه‌ی تخلخل محاسبه می‌شود و مراحل بعدی با استفاده از پارامترهای محاسبه شده در مراحل قبل محاسبه خواهد شد که تا حدودی نتایج به دست آمده در هر مرحله، از نتایج حاصله در مراحل قبلی به دست می‌آید. همین مسئله اصل روش ارزیابی پتروفیزیکی قطعی را بیان می‌کند که

^۱ Deterministic petrophysics

^۲ Probabilistic petrophysics

نتایج در هر مرحله به صورت زنجیروار به هم ارتباط دارند. از مزایای این روش می‌توان به داشتن راه حل واحد و پارامترهای آنالیزی ثابت آن اشاره نمود (علائی و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۳-۲. ارزیابی پتروفیزیکی به روش احتمالی

مایر و سیبیت^۱ (۱۹۸۰) یک رویکرد جدید رادیکالی را برای ارزیابی‌های پتروفیزیکی به دست آوردند. در این رویکرد که بر اساس حل معادلات هم زمان می‌باشد، به جای اینکه تنها به پاسخ به دست آمده از یک نگار برای اندازه‌گیری پارامتر پتروفیزیکی مورد نظر بسنده کنند، از تمام نگارهای در دسترس برای پیش‌بینی و محاسبه‌ی ناشناخته‌ها که شامل حجم سیالات و کانی‌ها می‌باشند استفاده می‌نمایند. سپس این مقادیر را برای به دست آوردن نتیجه مطلوب (احتمال بیشتر) تنظیم می‌کنند. در این روش ارزیابی، آنالیزور می‌تواند در مورد حضور یا عدم حضور کانی یا سیالات به صورت دلخواه تصمیم‌گیری کند. ایجاد بهترین هماهنگی میان داده‌ها، مدل‌ها، نتایج حاصله و شیوه‌ی عملکردی، مبنای پتروفیزیک احتمالی است. اگر یک مجموعه‌ی کامل از نگارهای پتروفیزیکی در دسترس باشد، یک پاسخ بهینه به دست خواهد آمد. روش پتروفیزیک احتمالی بر پایه‌ی آمار و احتمال بوده و نتایج حاصله بر پایه‌ی آمار و احتمالات می‌باشد که در نهایت بهترین احتمال از راه حل‌های آماری پذیرفته خواهد شد. بر خلاف روش پتروفیزیک قطعی، این روش شامل یک نظارت وسیع بر نتایج پیش‌بینی شده در مدل است (Fertl, 1987).

کویرین^۲ و همکاران (۱۹۸۶) این تکنیک را به وسیله‌ی اعمال یک مجموعه‌ی ویژه از معادلات پاسخ به صورت خطی، گسترش دادند. این معادلات سبب مدل شدن ابزارهای بیشتری که در نگار برداری از چاه استفاده می‌شوند، گردید. کانون و کوآتس^۳ (۱۹۹۰) مقاله تأثیر دانستن اطلاعاتی درباره‌ی کانی‌ها و استفاده از آنها در تفسیر نگارهای استاندارد را ارائه دادند. این مقاله ثابت می‌کند در یک مدل پتروفیزیکی کامل، داده‌ها فقط از نگارهای به دست آمده از نگار برداری تشکیل نشده است. در ارزیابی احتمالی از

¹ Mayer and Sibbit

³ Cannon and Coates

² Quirein

نتایج پتروگرافی، زمین‌شناسی، مهندسی مخزن، نتایج آنالیز مغزه و نگارها برای انجام یک ارزیابی پتروفیزیکی یکپارچه استفاده می‌شود. همچنین در روش احتمالی امکان محاسبه‌ی عدم قطعیت‌ها به صورت یک مقدار ثابت یا یک نگار برای تمام نگارهایی که در معادلات مورد استفاده در این روش حاضر هستند، وجود دارد.

روش احتمالی به روش قطعی مزیت‌هایی دارد که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ارزیابی به روش قطعی دارای روندی مرحله به مرحله می‌باشد به این معنی که از پاسخ هر مرحله در مرحله‌ی بعد استفاده می‌شود. بنابراین وجود هر گونه خطایی در مرحله‌ی قبل، در محاسبات مرحله‌ی بعدی اثر گذار خواهد بود. در صورتی که در روش احتمالی یک ارتباط چندگانه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پاسخ‌ها وجود دارد.

در روش ارزیابی احتمالی علاوه بر استفاده از داده‌های حاصل از نگارهای پتروفیزیکی برای انجام عملیات ارزیابی از سایر داده‌ها نظیر داده‌های پتروگرافی می‌توان استفاده نمود. در روش احتمالی امکان محاسبه‌ی عدم قطعیت برای نگارهای موجود در معادله که میزان اعتبار حاصل از محاسبات را مشخص می‌کند، وجود دارد. در روش احتمالی مدل برای انجام محاسبات بر طبق نظر کاربر بوده و میزان دقت محاسبات انجام شده به صورت آماری بیان می‌شود.

۲-۳-۱. ساخت ریاضی یک مدل در ارزیابی احتمالی

نحوه مدل شدن یک معادله پاسخ ابزار، موضوع اصلی این بخش است. در این بخش تعدادی از معادلات پاسخ، با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا یک مدل پتروفیزیکی جامع و کامل را تشکیل دهند. ابتدا مدل یک معادله‌ای بررسی می‌شود. در این بخش نگار چگالی سازند مدل می‌شود و در حقیقت مدل معادله پاسخ نگار چگالی ساخته می‌شود. مدل‌های ایجاد شده در ارزیابی احتمالی به حجم کانی‌ها و سیالات مرتبط می‌شوند. در بخش ابتدایی مدل تعیین می‌شود که کدام یک از محتویات سازند روی چگالی تأثیر می‌گذارد و آن را به عنوان یک اندازه‌گیری در نظر می‌گیرد. این محتویات برای یک مدل

واقعی باید در نظر گرفته شود. در صورتی که پاسخ ابزار چگالی را که در چاه اندازه‌گیری شده، ρ_b نامیده شود معادله پاسخ مرتبط با چگالی (ρ_b) به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\rho_b = \rho_{\text{gas}} V_{\text{gas}} + \rho_w V_w + \rho_{\text{cal}} V_{\text{cal}} + \rho_{\text{dol}} V_{\text{dol}} \quad (6-2)$$

سمت راست معادله‌ی (۶-۲) از چهار بخش مختلف تشکیل شده است که هر کدام از آنها حجم یکی از محتویات سازند ذکر شده را که در چگالی مشخص آن پارامتر ضرب شده است، نشان می‌دهد. این معادله یک فرم خطی دارد. در این معادله حجم هر کدام از پارامترها به پارامتر مربوط به آن مرتبط است (به طور مثال حجم گاز به چگالی گاز). در حالی که در معادلات به فرم غیر خطی حجم هر کدام از پارامترها به سایر پارامترها مرتبط می‌شود. تعداد بی‌نهایتی از ترکیب حجم‌های چهار قسمت مختلف که در این سازند ارائه شده است، می‌توانند انتخاب شوند. به عبارت دیگر حجم‌های مختلفی را برای پارامترهای مرتبط با هر کدام از آنها می‌توان انتخاب کرد. یک انتخاب خوب می‌تواند یک هماهنگی و همبستگی مناسبی بین مقدار چگالی سازندی پیش‌بینی شده یا مدل شده با مقدار چگالی اندازه‌گیری شده ایجاد کند. بنابراین بهترین نتیجه زمانی رخ می‌دهد که مجموع محتویات و پارامترهای مؤثر در یک سازند برای یک ویژگی خاص (به طور مثال چگالی سازند) با مقدار اندازه‌گیری شده برای آن ویژگی برابر شود. این معادله را برای نگارهای دیگر مؤثر در ارزیابی نیز می‌توان نوشت و تمام معادلات را به صورت همزمان حل کرد. اما با توجه به اینکه به طور طبیعی بین مقدار اندازه‌گیری شده و مدل پیش‌بینی شده اختلافی وجود دارد، تابع خطا به دست خواهد آمد. بنابراین اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده توسط ابزار و مقدار مدل شده برای هر ویژگی درون سازند را به عنوان خطا در نظر می‌گیرند که به آن تابع عدم تطابق می‌گویند.

$$\varepsilon_{pb} = \rho_b - \rho_{pb} \quad (7-2)$$

در معادله‌ی (۷-۲)، ε_{pb} همان خطای به دست آمده برای نگار چگالی است. بنابراین برای به دست آوردن حجم‌های مناسب برای هر معادله مرتبط با هر نگار باید خطای حاصل را به دست آورد و سعی کرد تا مقدار این خطا کمینه شود. چرا که هر آنچه این خطا کمتر باشد، نشان‌دهنده نزدیک‌تر بودن

مقدار قرائت شده (اندازه‌گیری شده) برای هر نگار و مقدار مدل شده آن نگار می‌باشد. بنابراین باید به دنبال روشی برای کمینه کردن مقدار خطا برای هر نگار بود. همچنین ابزاری که چگالی را به دست می‌آورد خودش خطا دارد. علاوه بر این پارامترهای مختلفی مانند ریزش در چاه نیز بر روی قرائت مقدار چگالی تأثیر گذار است. بنابراین باید یک عدم قطعیت نیز برای نگار در نظر گرفته شود که آن را با U_{ρ_b} نشان می‌دهند. به این ترتیب معادله (۷-۲) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\varepsilon_{\rho_b} = \frac{\rho_b - \rho_b}{U_{\rho_b}} \quad (۸-۲)$$

حال هدف کمینه کردن معادله برای نگار چگالی می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کمینه کردن این معادله از نقطه نظر ریاضی وجود دارد. استفاده از معادله درجه دوم (روش کم‌ترین مربعات) بهترین نتیجه را برای کاهش و کمینه کردن خطاها به دست می‌دهد. معادله پیش‌بینی شده تابعی از حجم‌ها است.

$$\varepsilon_{\rho_b}^2 = \left[\frac{\rho_b - f_{\rho_b}(v_i)}{U_{\rho_b}} \right]^2 \quad (۹-۲)$$

معادله‌ی (۹-۲) بر اساس چگالی و حجم هر کدام از محتویات درون سازند نوشته شده است. این معادله تنها برای یک ویژگی سازند (چگالی سازندی) نوشته شده است و اگر برای تمام اندازه‌گیری‌ها و ابزارها نوشته شود، به صورت زیر خواهد شد:

$$\varepsilon_k^2 = \left[\frac{t_k - f_k(v_i)}{U_k} \right]^2 \quad (۱۰-۲)$$

در این معادله k نشان دهنده هر ابزار و اندازه‌گیری صورت گرفته است. حال اگر تمام خطاهای حاصل از ابزارهای مختلف با یکدیگر جمع شود مقدار خطای کلی برای ارزیابی به دست خواهد آمد که به آن تابع عدم تطابق گفته می‌شود.

$$\Delta^2 = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k^2 = \sum_{k=1}^n \left[\frac{t_k - f_k(v_i)}{U_k} \right]^2 \quad (۱۱-۲)$$

در نهایت هدف، کمینه کردن مقدار تابع عدم تطابق می‌باشد و به عبارت دیگر حجم‌هایی که در حالت کمینه به دست می‌آیند برای هر ویژگی درست و مناسب است. بنابراین در ارزیابی احتمالی هدف به دست آوردن حجم شیل، تخلخل و اشباع از آب به صورت قدم به قدم نیست و تمام معادلات به صورت هم زمان برای تمام ابزارها با استفاده از روش کم‌ترین مربعات حل می‌شود تا کم‌ترین مقدار برای تابع عدم تطابق حاصل شود.

در ارزیابی احتمالی، تابع عدم تطابق به صورت یک معادله ماتریسی حل می‌شود. ماتریس‌های موجود در این معادله، شامل ماتریس معلومات (t) که در این ماتریس نگارهایی که در ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرند، وجود دارد، ماتریس ضرائب (P) که در این ماتریس پاسخ هر ابزار برای ماتریکس کانی‌ها و سیالات موجود در سازند مرتبط با هر ویژگی در نظر گرفته می‌شود، ماتریس مجهولات (V) که همان ماتریس حجم‌ها می‌باشد و ماتریس عدم قطعیت (U) ابزار که این ماتریس شامل عدم قطعیت هر ابزار می‌باشد.

در نهایت ماتریس تابع عدم تطابق را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\Delta = V^T (P^T U P) V - 2t^T U P V + t^T U t \quad (12-2)$$

نتیجه بهترین زمانی رخ می‌دهد که تابع عدم تطابق کمینه باشد (مقدار بردار عدم تطابق کمینه باشد). این بردار فقط نسبت به تخمین حجم‌های V وابسته است و بنابراین با حذف بخش سوم معادله ساده می‌شود. زیرا بخش سوم نسبت به V مستقل می‌باشد. بنابراین معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta = \frac{1}{2} V^T (P^T U P) V - T^T U P V \quad (13-2)$$

معادله (13-2) را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$\Delta = \frac{1}{2} V^T A V - b^T V \quad (14-2)$$

در این معادله:

$$A = P^T U P \quad (15-2)$$

$$b^T = T^T U P \quad (16-2)$$

ماتریس A یک ماتریس انعطاف‌پذیر است که علاوه بر متقارن بودن آن برای هر بردار حجم V نیز مثبت است. به عبارت دیگر ماتریس حجم V مثبت است. این ماتریس برای انجام یک ارزیابی و بهینه‌سازی سریع استفاده می‌شود. ویژگی مثبت بودن عبارت آن با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$V^T A V \geq 0. \quad (17-2)$$

در نهایت گام نهایی کمینه کردن تابع عدم تطابق برای به دست آوردن بهترین ارزیابی با روش استفاده از احتمالات و آمار می‌باشد. در نرم‌افزار Geolog از دو روش با توجه به معادلات پاسخ نگارها برای کمینه کردن تابع عدم تطابق استفاده می‌شود. روش اول زمانی استفاده می‌شود که معادله پاسخ نگار یک فرم خطی داشته باشد. بهترین راه برای کمینه کردن آن استفاده از روش کم‌ترین مربعات است. اما در برخی موارد معادله پاسخ نگار که در ارزیابی احتمالی استفاده می‌شود، فرم غیر خطی دارد (مانند معادلات پاسخ نگار نوترن که به صورت خطی یا غیر خطی هستند یا معادله غیر خطی اشباع آب). در این موارد ابتدا یک تقریب خطی از معادلات خطی ساخته می‌شود تا تخمینی از کمینه زده شود. در مرحله دوم یک فرض پیچیده تکراری از حساسیت تابع عدم تطابق در نظر گرفته می‌شود تا در هر اجزاء تغییراتی ایجاد شود. این بخش به وسیله شکل دادن استخراج جزئی از تابع عدم تطابق، مرزها و قیود با رعایت و توجه کردن به حجم هر کدام از اجزاء به دست می‌آید. کیفیت مدل ساخته شده نیز اهمیت زیادی دارد. به طوری که مدلی که ضعیف باشد در ارزیابی ارزشمند نیست.

۲-۳-۲. ساخت فیزیک یک مدل در ارزیابی احتمالی

همان‌طور که اشاره شد لازم است تا دانش زمین‌شناسی وارد بهینه‌سازی و ارزیابی صورت گرفته شود. این کار در بخش مرزها^۱ و قیدها^۲ انجام می‌شود.

الف) مرزها: هر حجمی که برای پارامتری تعریف می‌شود باید از نظر فیزیکی مقادیر امکان‌پذیری را شامل شود. اگر ارزیابی صرفاً اجازه دهد تا کم‌ترین مقدار یک تابع هدف را (تابع عدم تطابق) پیدا کند، حجم‌ها به صورت غیر منطقی می‌توانند بزرگ محاسبه شوند. همچنین وجود حجم‌های منفی

¹ Bounds

² Constraint

امکان پذیر می شود. بنابراین محدودیت هایی روی کانی ها و سیالات ایجاد می شود تا جواب های به دست آمده از نظر فیزیکی قابل اطمینان باشند. این محدودیت ها به نام مرز شناخته می شوند و دارای یک حد بالایی و پایینی می باشند. برای مثال مرز معمول برای تمام محتویات حاضر در سازند وجود دارد بدین صورت که حد پایینی بر روی صفر تنظیم می شود تا هیچ محتوی در مدل حجم منفی نداشته باشد. در حد بالایی اگر فقط یک بخش وجود داشته باشد، آن بخش نمی تواند بزرگتر از حجم کل سنگ که همان یک است، باشد.

ب) قیدها: برای به دست آوردن ارتباطات زمین شناسی و پتروفیزیکی مشخص بین حجم های موجود از محتویات مختلف درون سازند، محدوده هایی کشف شده اند. این محدوده ها و ارتباطات به نام قیود نامیده می شوند و با زبان ریاضی قیدهای مختلفی را بیان می کنند تا ارزیابی صورت گرفته از نظر فیزیکی به واقعیت نزدیک تر باشد. قیدها در طبیعت خطی هستند و سرعت بهینه سازی (ارزیابی) را حفظ می کنند. از جمله قیدهای در نظر گرفته شده در ارزیابی، قید واحد سنگ است که طراحی شده تا تمام سنگ را در نظر بگیرد و مدل آن را بسازد. این قید از تمام حجم کانی ها و بخش های سیالی در حجم های متناسب با خود تشکیل شده است تا مجموع آنها به واحد یا یک برسد و قید معادل بودن سیالات که تخلخل زون دست نخورده می تواند از طریق جمع تمام حجم های سیالات در این زون محاسبه شود.

۲-۴. اندیس کیفیت مخزن (RQI)

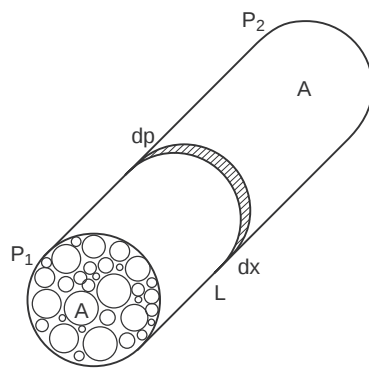
آمافول و همکاران (۱۹۹۳) مفهوم اندیس کیفیت مخزن (RQI)، با در نظر گرفتن دهانه ی خلل و فرج، توزیع خلل و فرج و توزیع دانه ها و دیگر پارامترهای ماکروسکوپی را معرفی کردند RQI به عنوان شاخص کیفیت مخزنی شناخته می شود. این شاخص تقریبی از میانگین شعاع هیدرولیکی در سنگ مخزن می باشد. اندیس کیفیت مخزن (RQI) یکی از بهترین پارامترهای پتروفیزیکی برای توصیف کمی

ساختار خلل و فرج در مخازن می‌باشد. مقادیر بالای اندیس کیفیت مخزن در سنگ، نشانگر کیفیت بالای مخزن می‌باشد (Jin et al., 2013).

کوزنی^۱ (۱۹۲۷) یکی از بنیادی‌ترین و مشهورترین روابط را که تراوایی را به صورت تابعی از تخلخل و مساحت سطح ویژه^۲ بیان می‌نماید، بدست آورد. نمونه‌ی سنگ متخلخلی با مساحت مقطع عرضی A و طول L را در نظر بگیرید (شکل (۳-۲)) که از تعداد n لوله‌ی موئین مستقیم و به صورت موازی تشکیل شده و فضای بین لوله‌ها بوسیله‌ی ماده‌ی سیمانی بسته شده است. اگر تمام لوله‌های موئین دارای شعاع یکسان r و طول L باشند دبی یا آهنگ جریان از درون این دسته از لوله، بنابر معادله‌ی پوازئیلی^۳ به صورت زیر است:

$$q = \left(\frac{n\pi r^4}{8\mu} \right) \frac{\Delta P}{L} \quad (۱۸-۲)$$

که در آن q ، دبی بر حسب cm^3/s ، r و L به ترتیب شعاع و طول لوله‌ی موئین بر حسب cm ، ΔP ، افت فشار در سرتاسر طول L بر حسب dynes/cm^2 (دین بر سانتیمتر مربع) و μ ، ویسکوزیته سیال بر حسب cp (سانتی پواز) بیان می‌شود (Tiab and Donaldson., 2015).



شکل (۳-۲): سیستم جریان پوازئیلی برای لوله‌های موئین مستقیم (Tiab and Donaldson., 2015).

قانون دارسی نیز می‌تواند جریان سیالات را از درون این n لوله‌ی موئین به صورت زیر تخمین بزند (Darcy, 1856):

¹ Kozeny

² Specific surface area

³ Poiseuille's equation

$$q = \left(\frac{kA_c}{\mu} \right) \frac{\Delta P}{L} \quad (19-2)$$

در معادله‌ی فوق A_c ، کل مساحت سطح مقطع، شامل نواحی سیمانی شده‌ی این دسته لوله‌های مویین بر حسب cm^2 و k ، تراوایی بر حسب cm^2 (1 $\text{cm}^2 = 1.013 \times 10^8 \text{ darcys}$) می‌باشد. اگر معادلات (18-2) و (19-2) با هم برابر قرار داده شوند مقدار k (تراوایی) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$k = \left(\frac{n\pi r^4}{8A_c} \right) \quad (20-2)$$

طبق تعریف تخلخل، تخلخل برای این دسته از لوله‌های مویین از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (Tiab and Donaldson, 2015):

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{n\pi r^2}{A_c} \quad (21-2)$$

که ϕ ، تخلخل به صورت کسر، V_p ، حجم خلل و فرج و V_b ، حجم کل سنگ مخزن به صورت کسر است. با جایگزین کردن $A_c = n\pi r^2 / \phi$ از معادله‌ی (21-2) در معادله‌ی (20-2) رابطه‌ی ساده‌ای بین تخلخل و تراوایی برای خلل و فرج با اندازه‌های مشابه و شعاع‌های برابر r بدست می‌آید.

$$k = \frac{\phi r^2}{8} \quad (22-2)$$

که در آن k بر حسب cm^2 یا بر حسب μm^2 و ϕ یک کسر است.

اگر S_{vp} مساحت سطح درونی در واحد حجم خلل و فرج باشد، جایی که مساحت سطح (A_s) برای n لوله‌ی مویین برابر $n(2\pi rL)$ و حجم فضای خالی (V_p)، برابر $n(\pi r^2 L)$ است (Tiab and Donaldson, 2015):

$$S_{vp} = \frac{A_s}{V_p} = \frac{n(2\pi rL)}{n(\pi r^2 L)} = \frac{2}{r} \quad (23-2)$$

اگر S_{Vgr} مساحت سطح ویژه‌ی ماده‌ی متخلخل یا کل مساحت نمایان در درون فضای خلل و فرج در واحد حجم دانه باشد برای یک دسته لوله‌ی مویین کل مساحت نمایان (A_t)، معادل سطح درونی (A_s)، است و حجم دانه (V_{gr})، برابر $A_c L(1-\phi)$ است بنابراین (Tiab and Donaldson, 2015):

$$S_{Vgr} = \frac{n(2\pi rL)}{A_c L(1-\phi)} = \frac{2\pi nr}{A_c(1-\phi)} = \frac{\pi nr^2}{A_c} \left(\frac{2}{r}\right) \frac{1}{1-\phi} \quad (24-2)$$

با ترکیب معادلات (۲۳-۲) و (۲۴-۲) معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$S_{Vgr} = S_{Vp} \left(\frac{\phi}{1-\phi}\right) \quad (25-2)$$

معادله‌ی (۲۲-۲) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$k = \left(\frac{\phi}{2}\right) \frac{1}{(2/r)^2} = \left(\frac{1}{2S_{Vp}^2}\right)\phi \quad (26-2)$$

با جایگزین کردن برای S_{Vp} از معادله‌ی (۲۵-۲) خواهیم داشت (Kozeny, 1927):

$$k = \left(\frac{1}{2S_{Vgr}^2}\right) \frac{\phi^3}{(1-\phi^2)} \quad (27-2)$$

S_{Vp} از داده‌های مویین، نگار مغناطیسی هسته‌ای^۱ (NML) یا آنالیز تصویر پتروگرافی^۲ (PIA) به دست می‌آید، سپس برای بدست آوردن S_{Vgr} معادله‌ی (۲۵-۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Tiab and Donaldson, 2015).

تمام معادلات بالا که برای بدست آوردن رابطه‌ی بین تراوایی و تخلخل مورد استفاده قرار گرفتند با این فرض که سنگ متخلخل می‌تواند بوسیله‌ی دسته‌ای لوله‌ی مویین مستقیم در نظر گرفته شود، استوار است. به هر حال متوسط طول مسیری که سیال باید بپیماید در حقیقت بزرگتر از طول L نمونه‌ی مغزه مطابق شکل (۴-۲) است. انحراف واسطه‌ای متخلخل از دسته‌ای از لوله‌های مویین مستقیم

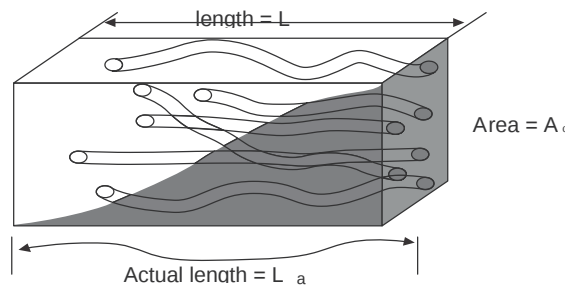
¹ Nuclear magnetic log

² Petrographic image analysis

می‌تواند بوسیله‌ی فاکتور پیچ‌پیچی^۱ (τ)، که به صورت زیر بیان شده، اندازه‌گیری شود
(Pirson, 1958; Amyx et al., 1960):

$$\tau = \frac{L_a}{L} \quad (2-28)$$

که در آن L_a ، مسیر جریان واقعی و L ، طول مغزه است.



شکل (۲-۴): مدل یک دسته از لوله‌های موئین غیر مستقیم (Watfa and Youssef, 1987)

بنابراین برای دسته‌ای از لوله‌های موئین پیچ و خم‌دار، قانون پوازئیلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$q = \left(\frac{n\pi r^4}{8\mu} \right) \frac{\Delta P}{L\tau} \quad (2-29)$$

با ترکیب کردن معادله‌ی (۲-۲۹) و معادله‌ی (۲-۱۹) و با استفاده از روش مشابه فوق معادلات (۲-۲۲)

، (۲-۲۶) و (۲-۲۷) به ترتیب به صورت زیر نشان داده می‌شوند (Kozeny, 1927):

$$k = \frac{\phi r^2}{8\tau} \quad (2-30)$$

$$k = \left(\frac{1}{2\tau S_{vp}^2} \right) \phi \quad (2-31)$$

$$k = \left(\frac{1}{2\tau S_{vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (2-32)$$

ویلی و اسپنگلر^۲ (۱۹۵۲) پیشنهاد نمودند که ضریب ۲ بوسیله‌ی پارامتر عمومی‌تری، یعنی فاکتور

شکل خلل و فرج^۳ (K_{ps}) جایگزین شود. کارمن (۱۹۳۹) گزارش کرد که حاصل ضرب $K_{ps}\tau$ ممکن

^۱ Tortuosity coefficient

^۲ Wyllie and Spangler

^۳ Pore shape factor

است برای اکثر مواد متخلخل برابر ۵ در نظر گرفته شود. معادله‌ی (۳۲-۲) برای سنگ‌های متخلخل می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (Carman, 1937):

$$K = \left(\frac{1}{5S_{Vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (33-2)$$

معادله‌ی (۳۳-۲) مشهورترین شکل معادله‌ی کوزنی، اگر چه در سنگ متخلخل واقعی $K_{ps}\tau$ متغیر و بسیار بزرگتر از ۵ بوده، است و به معادله‌ی کوزنی - کارمن^۱ معروف است و شکل کلی آن به صورت زیر است (Carman, 1937., Kozeny, 1927):

$$k = \left(\frac{1}{K_{ps} \tau S_{Vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (34-2)$$

اگر هر دو طرف معادله‌ی (۳۴-۲) بر تخلخل تقسیم شوند و ریشه‌ی دوم از هر دو طرف گرفته شود رابطه‌ی زیر را تولید خواهد کرد:

$$\sqrt{\frac{k}{\phi_e}} = \frac{1}{S_{Vgr} \sqrt{K_{ps} \tau}} \left(\frac{\phi_e}{1-\phi_e} \right) \quad (35-2)$$

اگر تراوایی بر حسب میلی داری و تخلخل به صورت کسر بیان شوند سمت چپ معادله‌ی (۳۵-۲) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} \quad (36-2)$$

که در آن RQI، اندیس کیفیت مخزن و بر حسب میکرومتر (μm) بیان می‌شود (Amaefule et al., 1993).

۵-۲. اندیس منطقه‌ی جریان (FZI)

اندیس منطقه‌ی جریان از معادله‌ی (۳۵-۲) تعریف می‌شود (Amaefule et al., 1993):

¹ Kozeny – Carman equation

$$FZI = \frac{1}{S_{Vgr} \sqrt{K_{ps} \tau}} \quad (37-2)$$

بنابراین معادله‌ی (۳۵-۲) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$RQI = FZI(\phi_z) \quad (38-2)$$

که در آن ϕ_z نسبت حجم خلل و فرج به حجم دانه است.

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \quad (39-2)$$

اگر از هر دو طرف معادله‌ی (۳۸-۲) لگاریتم گرفته شود معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\log(RQI) = \log(FZI) + \log(\phi_z) \quad (40-2)$$

معادله‌ی (۴۰-۲) خط راستی را بروی نمودار تمام لگاریتمی RQI بر حسب ϕ_z با شیب واحد تولید

می‌کند. تلاقی این خط راست در $\phi_z = 1$ نشانگر زون جریان است. خطوط مستقیم با شیب‌های برابر

واحد انتظار می‌رود اساساً در سازندهای ماسه‌سنگی تمیز وجود داشته باشند. شیب‌های بزرگ‌تر از یک

نشان‌دهنده‌ی سازند شیلی است (Tiab and Donaldson., 2015).

۲-۶. واحد جریان تیاب^۱ (H_T)

اسنیدر و کینگ^۲ (۱۹۸۳) نشان دادند که اکثر خواص پتروفیزیکی ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراها می‌توانند با اندازه‌ی دانه و دانه‌بندی، درجه‌ی استحکام سنگ، سیمانی شدن، اندازه‌های خلل و فرج و اتصال‌های درونی خلل و فرج مرتبط باشند. آنها همچنین نشان دادند که تعداد محدودی از انواع سنگ‌ها و هندسه‌های خلل و فرج مربوطه وجود دارند که واحدهای زمین‌شناختی را مشخص می‌کنند. به هر حال واحدهای زمین‌شناختی ممکن است با واحدهای جریان هیدرولیکی منطبق شوند یا نشوند.

^۱ Tiab flow unit

^۲ Snieder and King

همچنین امکان دارد که یک واحد زمین شناختی حاوی چندین واحد جریان باشد. معادله‌ی (۳۴-۲) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (Tiab and Donaldson., 2015):

$$H_T = K_{ps} \tau S_{Vgr}^2 = \frac{1}{k} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (41-2)$$

که در آن H_T عامل مشخص کننده‌ی واحد جریان تیاب نامیده می‌شود. با جایگزین کردن S_{Vgr} (K_{gs} / d_{gr}) به صورت زیر نشان داده خواهد شد:

$$H_T = K_{ps} \tau (K_{gs} / d_{gr})^2 \quad (42-2)$$

که در آن K_{gs} فاکتور شکل دانه و d_{gr} قطر دانه است (Tiab and Donaldson., 2015).

پیچ و خم می‌تواند از معادله‌ی زیر تخمین زده شود:

$$\tau = \phi^{1-m} \quad (43-2)$$

اگر τ در معادله‌ی (۴۲-۲) قرار داده شود اصطلاح عمومی‌ای برای عامل مشخص کردن واحد جریان تیاب تولید می‌کند (Tiab and Donaldson., 2015):

$$H_T = K_{ps} \phi^{1-m} (K_{gs} / d_{gr})^2 \quad (44-2)$$

عامل مشخص کننده‌ی واحد جریان تیاب به طور واضح تمام خواص پتروفیزیکی و زمین‌شناختی را که در بالا به وسیله‌ی اسنیدر و کینگ به آن اشاره شد با هم ترکیب می‌کند.

H_T و FZI به وسیله‌ی معادله‌ی زیر به هم مرتبط می‌شوند (Tiab and Donaldson., 2015):

$$H_T = \frac{1}{FZI^2} \quad (45-2)$$

سمت راست معادله‌ی (۴۱-۲) نیز البته H_T است یعنی:

$$H_T = \frac{\phi_R}{k} \quad (46-2)$$

که در آن ϕ_R از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$\phi_R = \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (47-2)$$

به هر حال، H_T که از معادله‌ی (۴۴-۲) بدست می‌آید خواص پتروفیزیکی میکروسکوپی را منعکس می‌کند در حالی که H_T محاسبه شده با استفاده از معادله‌ی (۴۶-۲) واحد جریان را در مقیاس ماکروسکوپی بیان می‌نماید (Tiab and Donaldson., 2015).

۷-۲. ارتباط اندیس کیفیت مخزن (RQI) با اندیس سیال آزاد (FFI)

حجم آب معمولاً برای شناسایی مخزن در شرایط اشباع آب باقی‌مانده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این حجم آب با حاصل ضرب تخلخل کل در اشباع آب بدست می‌آید (قاسم العسگری، ۱۳۹۰):

$$BVW = \phi S_w \quad (۴۸-۲)$$

که در آن BVW^1 حجم آب و ϕ و S_w به ترتیب تخلخل و اشباع از آب به صورت کسر است. مخازن هیدروکربنی که اشباع آب آنها معادل آب باقی‌مانده یا اشباع آب همزاد باشد، نفت و گاز بدون آب تولید می‌کنند تا اینکه آب منافذ را اشغال کند و توسط کشش سطحی و فشار مویینگی حفظ شود. در این حالت حجم آب، همان حجم آب باقیمانده می‌باشد و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (قاسم العسگری، ۱۳۹۰):

$$BVI = \phi S_{wir} \quad (۴۹-۲)$$

BVI^2 ، حجم آب باقیمانده، ϕ و S_{wir} ، به ترتیب تخلخل و اشباع آب کاهش‌ناپذیر است. اگر تخلخل بین دانه‌ای ثانویه نباشد و سنگ دارای مقدار کمی رس در دهانه‌ی خلل و فرج باشد، پارامتر BVW عموماً تخمین خوبی از درجه‌ی اشباع آب باقی‌مانده است. هنگامی که مخزن در این شرایط نیست و زون مخزنی آب تولید می‌کند، نمودارهای مقاومت نمی‌توانند اشباع آب باقیمانده را نشان دهند. در این مورد تاریخچه‌ی مخزنی بهترین راهنما برای تعیین درصد اشباع آب و احتمالاً اشباع آب باقی‌مانده در نظر گرفته می‌شود.

¹ Bulk volume water

² Bulk water volume irreducible

اندیس سیال آزاد به صورت حاصل ضرب اشباع هیدروکربن و تخلخل تعریف می‌شود. این اندیس یک اندازه‌گیری از مایعات قابل حرکت (هیدروکربن یا آب) را نشان می‌دهد و بنابراین با واحد جریان ارتباط پیدا می‌کند. این پارامتر از نگار هسته‌ای مغناطیسی (NML) قابل اندازه‌گیری و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (قاسم العسگری، ۱۳۹۰):

$$FFI = \phi(1 - S_{wir}) \quad (50-2)$$

کوتز و دنو (۱۹۸۱) تراوایی را با اندیس سیال آزاد (FFI) به صورت زیر مرتبط کردند:

$$k = (10\phi)^4 \left(\frac{FFI}{\phi - FFI} \right)^2 \quad (51-2)$$

با قرار دادن معادله‌ی (۵۰-۲) در معادله‌ی (۵۱-۲) معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$k = (10\phi)^4 \left(\frac{1 - S_{wir}}{S_{wir}} \right)^2 \quad (52-2)$$

ثابت رابطه، ۱۰، این معادله را به مخازنی که در آنها اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر به خوبی تعریف شده، تخلخل میان دانه‌ای است و سنگ حاوی مقدار کمی رس است، محدود می‌کند. با ترکیب معادله (۵۱-۲) با تعریف اندیس کیفیت مخزن (RQI) رابطه‌ی مفیدی بین RQI و FFI به صورت زیر برقرار می‌کند (Tiab and Donaldson., 2015):

$$RQI = 3.14 \left(\frac{FFI}{\phi - FFI} \right) \sqrt{\phi^3} \quad (53-2)$$

که در آن FFI و تخلخل به صورت کسری، تراوایی بر حسب mD و RQI بر حسب μm بیان می‌شوند. با لگاریتم گرفتن از طرفین معادله‌ی (۵۳-۲) معادله‌ی زیر را حاصل می‌کند:

$$\log RQI = \log \left(3.14 \frac{FFI}{\phi - FFI} \right) + \log \sqrt{\phi^3} = \log \sqrt{\phi^3} + \log (I_F) \quad (54-2)$$

$$I_F = 3.14 \frac{FFI}{\phi - FFI} \quad (55-2)$$

بنابراین نمودار تمام لگاریتمی شاخص کیفیت مخزن بر حسب $\sqrt{\phi^3}$ خط راستی را با شیب واحد، با این فرض که مخزن یک سازند ماسه‌سنگی همگن تمیز بوده، تولید می‌کند. تلاقی در $\sqrt{\phi^3} = 1$ ممکن

است برای محاسبه‌ی شاخص سیال آزاد مورد استفاده قرار گیرد، که در جایگاه خود می‌تواند برای ارزیابی مقدار متوسط اشباع آب کاهش ناپذیر برای کل واحد جریان یا مخزن به کار رود. نمودار تمام لگاریتمی RQI بر حسب ϕ نیز خط راستی را با تلاقی مشابه ولی با شیب ۱/۵ به وجود می‌آورد (Tiab and Donaldson., 2015).

۲-۸. اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته (MRQI)

ایزدی و قلم‌بر (۲۰۱۳) روشی جدید برای تعیین تراوایی و واحدهای جریان هیدرولیکی ارائه نمودند، برای این منظور مفهوم اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته (MRQI) را معرفی کردند که پارامتری جهت تعیین واحدهای هیدرولیکی می‌باشد که در این رابطه علاوه بر تراوایی و تخلخل، اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر نیز وجود دارد. اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته به صورت زیر تعیین می‌شود:

روش ارائه شده بر اساس معادله‌ی پوازنیلی؛ ترکیب معادله‌ی دارسی و معادله‌ی پوازنیلی و تعریف پارامترها در مدل جدید بدست آمده است (Izadi, 2009). معادله‌ی هیگن - پوزیل^۱ که در لوله‌ی موئین تکی و مستقیم کاربرد پیدا می‌کند ساده‌ترین معادله‌ی جریان است و قانون فیزیکی است که جریان تراکم‌ناپذیر ویسکوز آرام را از درون یک مقطع دایره‌ای ثابت توصیف می‌کند. و آن می‌تواند از معادلات نوایر - استوکز^۲ با فرض حالت جریان رژیم پایدار و خطی یا افزایش ویسکوزیته و نیروهای فشاری در لوله‌ها بدست آید (Izadi and Ghalambor., 2013).

$$\frac{1}{\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{1}{R} \frac{d}{dR} R \frac{dv}{dR} \quad (۲-۵۶)$$

در معادله‌ی فوق η ثابت همبستگی در معادله‌ی ویسکوزیته و R شعاع کل لوله‌ی موئین بر حسب (cm) و v ، نرخ جریان یا دبی بر حسب (cm^3/s) است. حل این معادله نیاز به تعریف شرایط مرزی دارد. در اینجا شرایط مرزی جدید تعریف شده و معادله بر اساس این شرایط مرزی حل می‌شود. مفروضاتی

¹ Hagen-Poiseuille equation

² Navier-Stokes equations

که برای حل این معادله در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از: معادله در یک لوله‌ی موئین با رژیم پایدار بکار برده می‌شود، جریان آرام، تقارن محوری برای سیال، مولکول‌ها بروی هم نمی‌لغزند و یک لوله با اندازه موئینگی (اندازه در حد میکرون) در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی جدید در تماس با اشباع آب غیر قابل کاهشی در داخل لوله‌های موئین، به عنوان یک بخش بدون حرکت است. اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر (S_{wir}) در داخل لوله‌ی موئین به صورت زیر تعریف می‌شود (Izadi and Ghalambor, 2013):

$$S_{wir} = \frac{V_{water}}{V_{pore}} = \frac{\pi R^2 L - \pi r^2 L}{\pi R^2 L} = \frac{R^2 - r^2}{R^2} \quad (57-2)$$

در این رابطه V_{water} حجم آب در داخل لوله موئین و V_{pore} حجم فضای خالی یا خلل و فرج در داخل لوله موئین بر حسب (ft^3) می‌باشند و r شعاع متغییر لوله موئین بر حسب (cm) است.

به منظور تأیید این فرض می‌توان گفت که مخزن ابتدا از آب پر بوده است سپس این آب توسط هیدروکربن بوسیله‌ی نیروهای موئینگی در طی مهاجرت ثانویه جایگزین شده است. در حالت ایده‌آل باید همه‌ی آب از مخزن خارج شده باشد اما در واقع این اتفاق نمی‌افتد و مقداری آب در فضای خالی مخزن باقی می‌ماند که آب محتوی^۱، آب بینابینی^۲ یا آب اولیه^۳ نامیده می‌شود.

معادله‌ی (57-2) می‌تواند به صورت زیر نوشت:

$$r = R \sqrt{1 - S_{wir}} \quad (58-2)$$

معادله‌ی (58-2) شرایط مرزی جدید را برای لوله‌ی موئین نشان می‌دهد. که با اعمال این شرایط

مرزی معادله‌ی (56-2) به صورت‌های زیر تبدیل می‌شود:

$$v(r) = 0 \rightarrow r = R \sqrt{1 - S_{wir}} \quad (59-2) \text{ (شرایط مرزی بدون شیب در دیواره)}$$

$$\frac{dv}{dr} = 0 \rightarrow r = 0 \quad (60-2) \text{ (محور متقارن)}$$

¹ Connate water

² Connate water

³ Initial water

معادله‌ی (۲-۵۶) را می‌توان با اعمال شرایط مرزی حل کرد (Izadi and Ghalambor, 2013).

$$q = \frac{\pi}{2\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} \int_0^R [rR^2(1-S_{wir}) - r^3] dr = \frac{\Delta p \pi R^4 (1-S_{wir})^2}{8\eta \Delta x} \quad (۲-۶۱)$$

کوزنی و کارمن (۱۹۲۷) برای یافتن ارتباطی مناسب بین تخلخل و تراوایی، محیط متخلخل را به صورت مجموعه‌ای از لوله‌های مویینه مدل‌سازی کردند. آنها با ترکیب قانون داریسی برای حرکت سیال در محیط متخلخل و قانون پوازئیلی برای حرکت سیال در لوله‌ها، رابطه‌ی جدیدی بین تخلخل و تراوایی ارائه نمودند. بعد از این ارتباط استفاده شده مدل واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی می‌تواند ساخته شود. اگر معادلات (۲-۱۹) و (۲-۶۱) با هم برابر قرار داده شوند مقدار k از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$k = \frac{n\pi R^4 (1-S_{wir})^2}{8A_c} \quad (۲-۶۲)$$

طبق تعریف تخلخل، تخلخل از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (Tiab and Donaldson, 2015):

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{n\pi R^2 L}{A_c L} \quad (۲-۶۳)$$

با جایگزین کردن $A_c = n\pi R^2 / \phi$ از معادله‌ی (۲-۶۳) در معادله‌ی (۲-۶۲) رابطه‌ی ساده‌ای بین تخلخل و تراوایی برای خلل و فرج با اندازه‌های مشابه و شعاع‌های برابر r بدست می‌آید (Izadi and Ghalambor, 2013).

$$k = \frac{\phi(1-S_{wir})^2 R^2}{8} \quad (۲-۶۴)$$

معادله‌ی (۲-۶۴) رابطه‌ی ساده‌ای را بین تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی نشان می‌دهد و این معادله می‌تواند اساسی برای بیشتر ارتباطات بین تخلخل و تراوایی برای سنگ مخازن متفاوت باشد. معادله‌ی (۲-۶۴) که برای بدست آوردن رابطه‌ی بین تراوایی و تخلخل و اشباع‌شدگی از آب کاهش ناپذیر مورد استفاده قرار گرفت با این فرض که سنگ متخلخل می‌تواند بوسیله‌ی دسته‌ای لوله‌ی مویین مستقیم در نظر گرفته شود، استوار است. به هر حال متوسط طول مسیری که سیال باید بپیماید در حقیقت بزرگتر

از طول L نمونه‌ی مغزه است. در این روش نیز همانند روش تعیین اندیس کیفیت مخزن باید فاکتور پیچاپیچی را نیز در معادلات اعمال نمود.

با توجه به تعریف فاکتور پیچاپیچی و ترکیب آن با معادله‌ی (۶۳-۲) و حل آن برای تراوایی و با استفاده از روش مشابه فوق معادله‌ی (۶۴-۲) به صورت زیر نشان داده می‌شود (Izadi and Ghalambor, 2013):

$$k = \frac{\phi(1-S_{wir})^2 R^2}{8\tau} \quad (۶۵-۲)$$

اگر S_{vp} مساحت سطح درونی در واحد حجم خلل و فرج باشد، جایی که مساحت سطح (A_s) برای n لوله‌ی موئین برابر $n(2\pi RL\sqrt{1-S_{wir}})$ و حجم فضای خالی (V_p) برابر $n(\pi R^2 L)$ است:

$$S_{vp} = \frac{A_s}{V_p} = \frac{n(2\pi RL\sqrt{1-S_{wir}})}{n(\pi R^2 L)} = \frac{2\sqrt{1-S_{wir}}}{R} \quad (۶۶-۲)$$

اگر S_{vgr} مساحت سطح ویژه‌ی ماده‌ی متخلخل یا کل مساحت نمایان در درون فضای خلل و فرج در واحد حجم دانه باشد برای یک دسته لوله‌ی موئین کل مساحت نمایان (A_t) ، معادل سطح درونی (A_s) ، است و حجم دانه (V_{gr}) ، برابر $A_c L(1-\phi)$ است بنابراین (Izadi and Ghalambor, 2013):

$$S_{vgr} = \frac{A_s}{V_{gr}} = \frac{n(2\pi RL\sqrt{1-S_{wir}})}{A_c L(1-\phi)} = \frac{2\sqrt{1-S_{wir}}}{R} \times \frac{\pi n R^2}{A_c} \times \frac{1}{1-\phi} \quad (۶۷-۲)$$

با ترکیب معادلات (۶۶-۲) و (۶۷-۲) معادله‌ی زیر حاصل می‌شود (Tiab and Donaldson, 2015):

$$S_{vgr} = S_{vp} \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right) \quad (۶۸-۲)$$

معادله‌ی (۶۵-۲) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$k = \left(\frac{\phi}{2\tau} \right) \frac{1}{(2\sqrt{1-S_{wir}} / R)^2} (1-S_{wir})^3 \quad (۶۹-۲)$$

معادله‌ی (۶۹-۲) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$k = \frac{1}{2\tau S_{vp}^2} (1-S_{wir})^3 \quad (۷۰-۲)$$

با ترکیب معادلات (۶۸-۲) و (۷۰-۲) خواهیم داشت:

$$k = \left(\frac{1}{2\tau S_{Vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} (1-S_{wir})^3 \quad (۷۱-۲)$$

بر اساس معادله‌ی بهبود یافته‌ی کوزنی - کارمن (۱۹۳۷) که به صورت زیر است:

$$k = \left(\frac{1}{K_{ps} \tau S_{Vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (۷۲-۲)$$

در این معادله K_{ps} فاکتور شکل خلل و فرج است و برای سیلندر استوانه‌ای این فاکتور برابر ۲ است

بنابراین معادله‌ی (۷۱-۲) را می‌توان به صورت عمومی زیر نوشت (Izadi and Ghalambor, 2013):

$$k = \left(\frac{1}{K_{ps} \tau S_{Vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} (1-S_{wir})^3 \quad (۷۳-۲)$$

پارامتر $K_{ps}\tau$ تابعی از اندازه و شکل خلل و فرج، اندازه و شکل دانه، توزیع خلل و فرج و دانه، پیچاپیچی، سیمانی شدن و نوع سیستم خلل و فرج (مثل میان‌دانه‌ای، بین‌بلوری، حفره‌ای و ...) می‌باشد. این پارامتر در بین واحدهای جریان متغیر خواهد بود ولی در درون واحد معین ثابت است. این پارامتر را می‌توان برای سازند ماسه‌سنگی همگن با استفاده از داده‌های فشار موئین و تابع J لورت^۱ بدست آورد (Tiab, 1993).

رابطه‌ی جدید نشان می‌دهد که تراوایی تابعی از اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر و همچنین خصوصیات ذاتی سنگ است. در حقیقت عبارت $K_{ps}\tau S_{Vgr}^2$ تابعی از خصوصیات زمین‌شناسی محیط متخلخل و تغییرات هندسه حفرات است. به همین دلیل می‌توان از آن به عنوان روشی جدید برای تمایز واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده کرد. اگر هر دو طرف معادله‌ی (۷۳-۲) بر تخلخل تقسیم شوند:

$$\frac{k}{\phi} \times \frac{1}{(1-S_{wir})} = \left(\frac{1}{K_{ps} \tau S_{Vgr}^2} \right) \frac{\phi^2}{(1-\phi)^2} (1-S_{wir})^2 \quad (۷۴-۲)$$

و ریشه‌ی دوم از هر دو طرف گرفته شود رابطه‌ی زیر را تولید خواهد کرد:

¹ Leverett

$$\sqrt{\frac{k}{\phi}} \times \frac{1}{\sqrt{(1-S_{wir})}} = \left(\frac{1}{\sqrt{K_{ps} \tau S_{Vgr}}} \right) \frac{\phi}{(1-\phi)} (1-S_{wir}) \quad (75-2)$$

با تغییر معادله‌ی (۷۵-۲) معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\sqrt{\frac{k}{\phi}} \times \sqrt{(1-S_{wir})} = \left(\frac{1}{\sqrt{K_{ps} \tau S_{Vgr}}} \right) \frac{\phi}{(1-\phi)} (1-S_{wir})^2 \quad (76-2)$$

در این رابطه k برحسب میکرومتر مربع است. تبدیل k از میکرومترمربع به میلی داری معادله‌ی

(۷۶-۲) به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود:

$$0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi}} \times \sqrt{(1-S_{wir})} = \left(\frac{1}{\sqrt{K_{ps} \tau S_{Vgr}}} \right) \frac{\phi}{(1-\phi)} (1-S_{wir})^2 \quad (77-2)$$

اگر تراوایی بر حسب میلی داری و تخلخل به صورت کسر بیان شوند سمت چپ معادله‌ی (۷۷-۲)

به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$MRQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi}} \times \sqrt{(1-S_{wir})} \quad (78-2)$$

یا به صورت:

$$MRQI = \left(\frac{1}{\sqrt{K_{ps} \tau S_{Vgr}}} \right) \frac{\phi}{(1-\phi)} (1-S_{wir})^2 \quad (79-2)$$

$$FZI = \left(\frac{1}{\sqrt{K_{ps} \tau S_{Vgr}}} \right) \quad (80-2)$$

$$\phi_z = \frac{\phi}{(1-\phi)} \quad (81-2)$$

از دو معادله‌ی اخیر معادله‌ی (۷۸-۲) رایج‌تر است. MRQI اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته نامیده

می‌شود و $\left(\frac{1}{\sqrt{K_{ps} \tau S_{Vgr}}} \right)$ اندیس منطقه‌ی جریان (FZI) و $\frac{\phi}{(1-\phi)}$ تخلخل نرمالایز شده (ϕ_z) است

(Izadi and Ghalambor, 2013).

فصل سوم

اندیس کیفیت مخزن

۳-۱. مقدمه

در این فصل ابتدا سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد مطالعه مورد ارزیابی پتروفیزیکی قرار می‌گیرند تا ضمن تهیه‌ی اطلاعات مورد نیاز، بتوان یک شناخت کلی نسبت به هر کدام از واحدهای مخزنی این سازندها بدست آورد. اندیس کیفیت مخزن (RQI)، اندیس منطقه‌ی جریان (FZI)، اندیس پتانسیل مخزن (RPI) و اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته (MRQI) برای هر کدام از بخش‌های مخزنی سازندهای کنگان و دالان محاسبه و مقایسه می‌شود. سپس از پارامترهای مؤثر در کیفیت مخزن، تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب را انتخاب نموده و بر اساس ارتباط هر کدام با کیفیت مخزن و بر اساس مطالعات صورت گرفته، فرمول جدید برای تعیین کیفیت مخازن هیدروکربنی به منظور توصیف این مخازن معرفی می‌شود. در نهایت به منظور اولویت‌بندی لایه‌های مخزنی به لحاظ کیفیت، از الگوریتم انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت استفاده می‌گردد.

۳-۲. ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد مطالعه

قبل از انجام هر نوع ارزیابی پتروفیزیکی، لازم است بررسی کیفی نمودارها صورت گیرد. بررسی کیفی نمودارها شامل مطالعه سربرگ نمودار، مقیاس‌ها، عمق‌ها، تطابق‌های صورت گرفته و بررسی ملاحظات می‌باشد. تعیین خواص پتروفیزیکی یک مخزن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از مهم‌ترین خواص پتروفیزیکی می‌توان به تعیین محتوی حجم شیل، تخلخل، اشباع‌شدگی از آب و همچنین تراوایی اشاره نمود. در کنار خواص پتروفیزیکی، تعیین لیتولوژی و ضخامت زون خالص تولیدی به زون ناخالص (NTG) مخزن مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. خواص پتروفیزیکی مخزن معمولاً توسط روش‌هایی مانند آنالیز مغزه و آزمایش چاه^۱ نیز بدست می‌آیند که مستلزم صرف زمان و هزینه‌ی زیادی می‌باشد و همچنین با توجه به تغییرات سنگ‌شناسی و نبود مغزه‌های کافی، نتایج حاصل از تعیین این پارامترها توسط روش‌های ذکر شده از کیفیت مناسبی

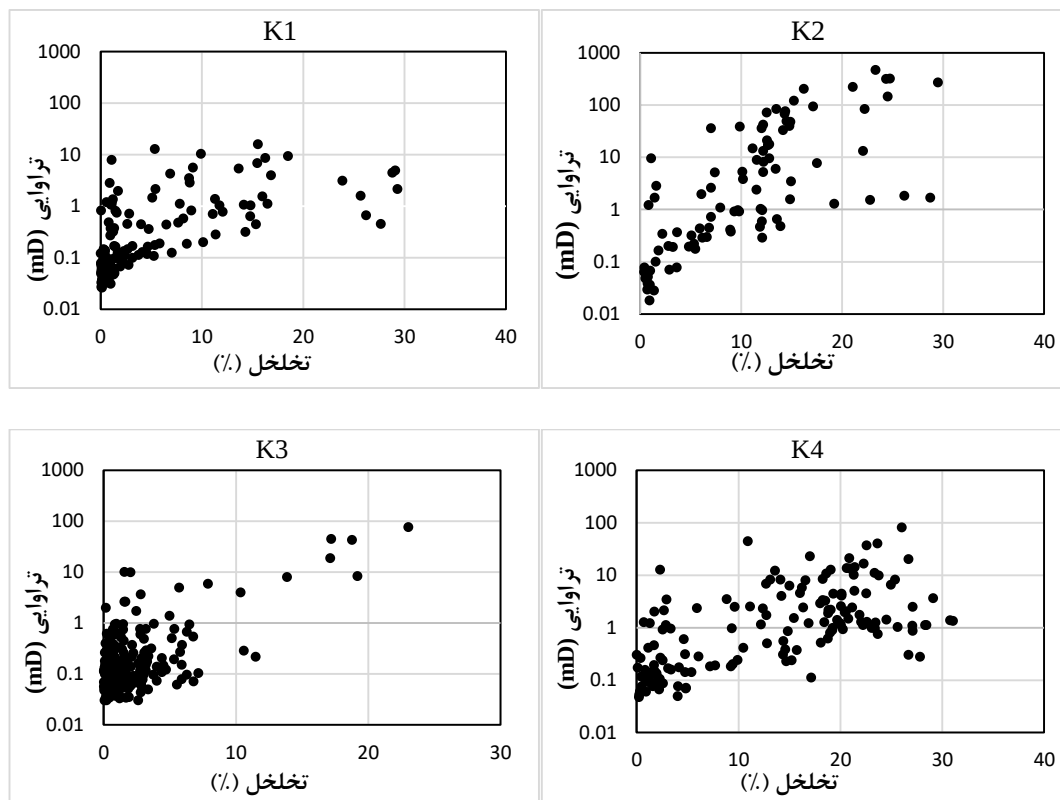
¹ Well test

برخوردار نمی‌باشند. بنابراین روش بهینه برای کاهش هزینه‌ها و زمان ارزیابی‌های پتروفیزیکی به کمک نگارهای چاه‌پیمایی اندازه‌گیری شده در مخزن می‌باشد.

به منظور ارزیابی کیفیت مخزنی سازندهای کنگان و دالان برای این مطالعه از اطلاعات کمی متعلق به یک حلقه چاه حفاری شده در سازندهای کنگان و دالان در میدان مورد مطالعه همان طور که در فصل اول به آن اشاره شد، استفاده شده است. این اطلاعات شامل: نتایج آنالیز مغزه، نگارهای خام پتروفیزیکی (جدول (۱-۳)) و اطلاعات مربوط به سربرگ چاه مورد مطالعه می‌باشد. شکل (۱-۳) روند تغییرات تراوایی و تخلخل مؤثر واحدهای سازندهای کنگان و دالان به منظور شناخت بهتر هر یک از واحدها آورده شده است. با انتخاب روش‌های محاسباتی و ساخت مدل مناسب با توجه به نوع مخزن و کانی‌های سازنده، بعد از محاسبات مقدماتی و تصحیحات محیطی برای انجام ارزیابی پتروفیزیکی در نرم‌افزار Geolog با توجه به مزایای پتروفیزیک احتمالی از روش احتمالی که روشی مبتنی بر احتمالات و مباحث زمین آماری است نسبت به روش پتروفیزیک قطعی، استفاده شده است. این ارزیابی پتروفیزیکی سازند شامل تعیین سنگ‌شناسی، محاسبه تخلخل، اشباع‌شدگی و تعیین حجم محتوی شیل است که به صورت زیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است:

جدول (۱-۳): نگارهای خام موجود چاه X در میدان مورد مطالعه

نام چاه	نگارهای گرفته شده از چاه مورد مطالعه
X	CGR - LLD&LLS - RHOB – NPHI – DT – CAL - PEF



شکل (۳-۱): نمودار متقاطع تخلخل و تراوایی مغزه واحدهای مخزنی سازندهای کنگان (K1 & K2) و دالان بالایی (K3 & K4) در چاه میدان مورد مطالعه

۳-۲-۱. تعیین ترکیب سنگ‌شناسی

در تحلیل کمی نگارها دلایل بسیاری بر اهمیت تعیین سنگ‌شناسی وجود دارد. یکی از این دلایل این که ابزارهای تخلخل برای محاسبه‌ی تخلخل به سنگ‌شناسی سازند نیازمند هستند. روش‌ها و نمودارهای متقاطع بسیاری برای تعیین سنگ‌شناسی وجود دارند، نمودارهای متقاطع مختلف شامل نوترون - چگالی، نوترون - صوتی، چگالی - صوتی و چگالی - فتوالکتریک افزون بر تعیین تخلخل، برای سنگ‌شناسی نیز کاربرد دارند. که بهترین و دقیق‌ترین نمودار متقاطع برای تعیین لیتولوژی و تخلخل در یک مخزن، نمودار متقاطع نوترون - چگالی است. زیرا نگارهای نوترون و چگالی علاوه بر تخلخل، تابع جنس سنگ نیز هستند. نمودار متقاطع این دو نگار، بهترین حد تفکیک کانی‌های مختلف سازند را در بین نمودارهای متقاطع دوتایی دارد (Rider, 1986).

خطوط مربوط به کوارتز، سنگ آهک و دولومیت به خوبی این سه لیتولوژی را از هم تفکیک کرده است. همچنین شایع‌ترین تبخیری‌ها (انیدریت) را می‌توان به راحتی شناسایی و تفکیک کرد (Schlumberger, 1991). در این مطالعه از نمودارهای متقاطع نوترون - چگالی برای تعیین سنگ‌شناسی غالب بخش‌های مخزنی سازندهای کنگان و دالان استفاده شده است (برای مثال شکل (۲-۳)).

۲-۲-۳. محاسبه‌ی حجم محتوی شیل

حجم شیل یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی و قابل توجه در کلیه‌ی مطالعات پتروفیزیکی و کیفیت مخزنی است. علاوه بر این حضور شیل به عنوان یکی از اجزای مهم سنگی در آنالیز نگارهای پتروفیزیکی بر روی تخلخل و تراوایی مخزن تأثیر گذاشته و خواص الکتریکی آنها نیز تأثیر زیادی روی مقاومت ویژه محاسبه شده می‌گذارد. کانی‌های رسی به دلیل ریز تخلخل‌هایی که دارند خواص پتروفیزیکی مخزن را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهند (Tiab and Donaldson, 2015). بنابراین محاسبه حجم شیل به منظور برآورد دقیق تخلخل از نگارهای چاه‌پیمایی ضرورت دارد. حجم شیل بر روی نتایج محاسبه‌ی تخلخل، بر روی تراوایی و اشباع آب مخزن نیز اثر گذار می‌باشد. حجم شیل با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی قابل محاسبه است که برای این منظور می‌توان از یک نگار به تنهایی یا از ترکیب چند نگار استفاده نمود (Kamel and Mabrouk, 2003).

به طور معمول محاسبه‌ی حجم شیل با استفاده از نگارهای GR، CGR و SGR انجام می‌گیرد. مقدار شیل محاسبه شده از نگار SGR بیشتر از مقدار شیل محاسبه شده از نگار CGR است؛ زیرا نگار SGR، افزون بر عناصر پتاسیم (K) و توریم (Th) که با نگار CGR ثبت می‌شود، اورانیوم کانی‌های غیر رسی رادیواکتیو دار مانند دولومیت را نیز ثبت می‌کند. متداول‌ترین روش محاسبه‌ی حجم شیل، روش خطی با استفاده از نگار تصحیح شده‌ی اشعه گاما است معادله‌ی (۳-۱) شاخص حجم شیل را نشان می‌دهد (Kamel and Mabrouk, 2003).

$$V_{sh} = \frac{CGR - CGR_{min}}{CGR_{max} - CGR_{min}} \quad (1-3)$$

در معادله‌ی (۱-۳) V_{sh} ، شاخص حجم شیل؛ CGR_{min} ، مقدار گامای محاسبه شده در سازندهای غیر شیلی؛ CGR_{max} ، مقدار گامای خوانده شده در سازندهای ۱۰۰ درصد شیلی و GR ، مقدار گامای خوانده شده در عمق مورد نظر است. در این مطالعه از نگار CGR برای محاسبه‌ی حجم شیل استفاده شده است.

۳-۲-۳. محاسبه‌ی تخلخل

تخلخل کمیت اساسی مورد نیاز برای محاسبات حجمی مخزن و توصیف فابریک سنگ به شمار می‌رود (Lucia, 2007). حجم فضای خالی سنگ یا رسوب به حجم کل سنگ تعریف می‌شود. این فضای خالی در مخازن هیدروکربنی عمدتاً توسط سیالاتی مانند نفت، گاز و آب پر می‌شود. در این مطالعه برای محاسبه تخلخل با استفاده از نگارهای تخلخل شامل چگالی، نوترون و صوتی به بررسی تخلخل پرداخته شده است. روش‌های مختلفی برای محاسبه تخلخل در ارزیابی پتروفیزیکی چاه وجود دارد. روشی که مورد استفاده قرار می‌گیرد بستگی به نوع نگارهای موجود دارد. همچنین می‌توان تخلخل را از یک نگار و یا ترکیبی از نگارهای مختلف بدست آورد (Hearst et al, 1985). در این پایان‌نامه با توجه به این که هر سه این نگار در دسترس بود از هر سه نگار برای محاسبه‌ی تخلخل استفاده شده است. بدین صورت که از هر نگار، یک تخلخل به دست نیامده است. از هر سه نگار برای ساخت مدل پتروفیزیکی استفاده شده است و حجم سیال (گاز و آب) که برابر با حجم خلل و فرج سنگ مخزن است به عنوان تخلخل سنگ مخزن در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۴. تعیین میزان اشباع آب

اشباع شدگی از آب یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان اشباع‌شدگی سیالات هیدروکربنی در فضاهای خالی موجود در واحدهای چینه‌شناسی است. در این مطالعه با توجه به این که اطلاعات دقیقی

از نوع کانی‌های رسی و میزان ظرفیت تبادل کاتیونی^۱ (CEC) در دسترس بود، برای بدست آوردن اشباع‌شدگی از آب از معادله‌ی اشباع آب دوگانه^۲ ارائه شده توسط آقای کلوییر^۳ و همکاران (۱۹۸۴) استفاده شد.

۳-۲-۵. تعیین زون‌های تولیدی در توالی چاه مورد نظر

با توجه به موضوع پایان‌نامه که تعیین کیفیت مخزن می‌باشد باید بخش‌های مخزنی سازند یعنی زون‌های تولیدی تعیین شوند. برای تعیین زون‌های تولیدی در توالی چاه مورد نظر، از روش حد برش با استفاده از نگارهای ارزیابی شده‌ی چاه که شامل میزان پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه شده بود، استفاده گردید. در این روش که بر اساس محاسبات عددی استوار است، جهت مشخص نمودن فواصلی که دارای بالاترین میزان حجم هیدروکربن هستند، برای پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه شده شروطی را در نظر گرفته و فواصلی را که با شروط تعیینی صادق باشند به عنوان زون تولیدی و سایر فواصل به عنوان زون ناخالص در نظر گرفته می‌شوند.

پارامترهای پتروفیزیکی که برای مشخص نمودن این فواصل می‌توان از آنها استفاده کرد به ترتیب اهمیتی که در تشخیص زون‌های تولیدی دارند شامل تراوایی، اشباع‌شدگی، تخلخل و حجم شیل هستند. تعیین حدود برش برای پارامترهای مخزنی نیز به عوامل مختلفی بستگی دارد. یکی از این عوامل، نوع هیدروکربن موجود در مخزن است. گاز یا نفت بودن هیدروکربن موجود در مخزن برای تعیین برخی از حدود برش مانند تخلخل بسیار مهم است. از جمله عوامل دیگر، لیتولوژی مخزن است که در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی حدود برش متفاوتی برای پارامترهای پتروفیزیکی باید در نظر گرفت. در بین پارامترهای پتروفیزیکی ذکر شده، دو پارامتر تراوایی و اشباع‌شدگی در تعیین زون‌های تولیدی به روش حد برش، نقش بسیار مهمی دارند. در بسیاری از موارد از پارامترهای دیگری از قبیل تخلخل و حجم شیل برای تعیین زون‌های تولیدی استفاده می‌شود. اگرچه تخلخل به عنوان یکی از ورودی‌های مهم در

¹ Cations exchange capacity

³ Clavier

² Dual water saturation equation

تعیین زون‌های تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی استفاده از یک معیار تخلخل به تنهایی برای تعیین زون‌های تولیدی می‌تواند اشتباهاتی در محاسبات به وجود آورد (باقری و خوشبخت، ۱۳۹۳).

در توالی چاه مورد ارزیابی که یک مخزن گازی با لیتولوژی کربناته بود، به دلیل تمیز بودن مخزن از لحاظ کانی‌های رسی (شیل)، از پارامتر حجم شیل صرف نظر شد و برای دقت بیشتر در تعیین فواصل مخزنی از پارامترهای تخلخل مؤثر، و اشباع از آب و تراوایی استفاده شد. بر اساس گزارش چاه با توجه به گازی بودن مخزن، حدود برش برای این پارامترهای پتروفیزیکی مورد نظر به ترتیب برابر ۲/۵ درصد، ۷۰ درصد و ۰/۱ میلی داری در نظر گرفته شد. درحقیقت با تعیین این حدود برش برای این سه پارامتر پتروفیزیکی در کل توالی مورد ارزیابی، فواصلی را که هر سه شرط وارد شده در آنها صدق می‌کند، به عنوان زون تولیدی در نظر می‌گیرد به این صورت که در این فواصل تخلخل مؤثر بیشتر از ۲/۵ درصد و همچنین اشباع از آب کمتر از ۷۰ درصد و تراوایی بیشتر از ۰/۱ میلی داری خواهد بود.

۳-۳. نتایج و جمع‌بندی ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان

بررسی سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد مطالعه به نتایج زیر منتهی شد:

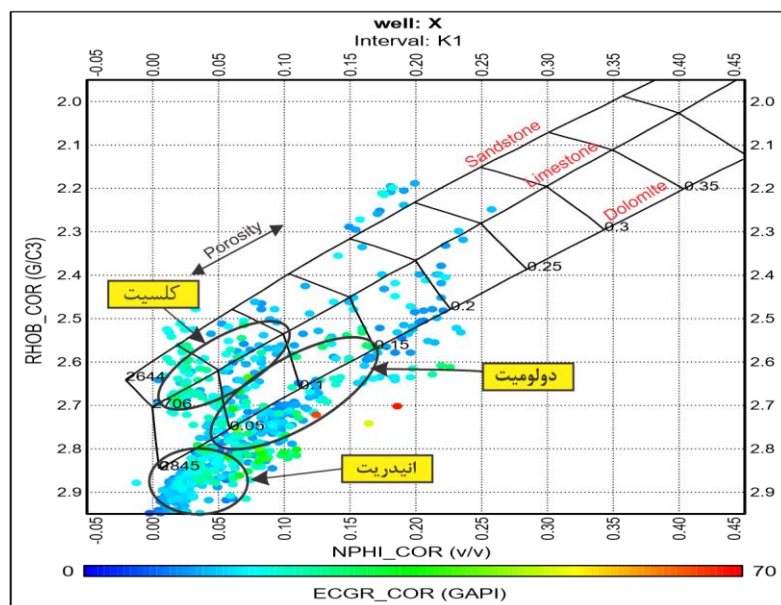
۳-۳-۱. بخش K1

رسم نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K1 سازند کنگان، سنگ‌شناسی سنگ آهک، دولومیت و انیدریت را نشان می‌دهد (شکل (۳-۲)). نتایج ارزیابی پتروفیزیکی این بخش نیز نشان می‌دهد که عمدتاً شامل دولومیت، آهک در قسمت میانی و مقداری انیدریت در بخش بالایی و پایینی لایه می‌باشد (شکل (۳-۳)). بخش انتهایی این واحد از عمق ۲۰۵۰ متری تا انتها، مقدار اشباع آب ۱۰۰ درصد است. همچنین مقدار تخلخل مؤثر در بخش بالایی و پایینی این واحد به دلیل وجود انیدریت پایین است. متوسط مقدار تخلخل مؤثر در زون خالص تولیدی برابر ۷/۲ درصد است. متوسط اشباع از آب در این ناحیه ۲۰/۹ درصد می‌باشد (جدول (۳-۲)).

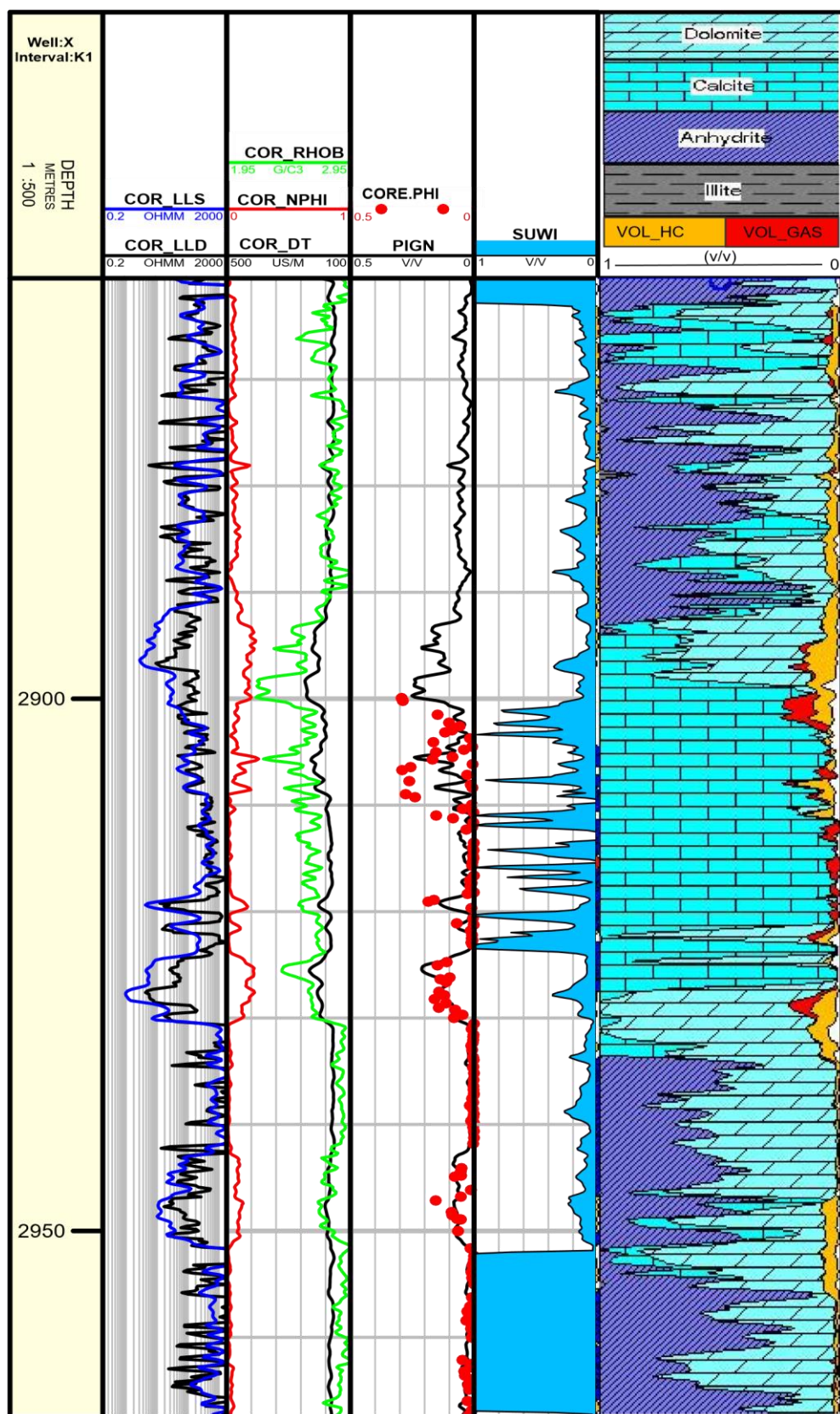
۳-۲-۲. بخش K2

بر اساس نمودار متقاطع نوترون - چگالی، لیتولوژی واحد K2 شامل آهک و دولومیت است (شکل (۳-۴)). بررسی لیتولوژی واحد مخزنی K2 بر اساس نتایج ارزیابی پتروفیزیکی نشان می‌دهد عمدتاً شامل دولومیت، در بخش بالایی و آهک در بخش پایینی لایه می‌باشد. در این واحد مقدار اشباع آب با افزایش عمق افزایش می‌یابد و به مقدار ۱۰۰ درصد در انتهای این بخش می‌رسد. همچنین مقدار تخلخل به دلیل وجود لایه‌های دولومیتی زیاد است (شکل (۳-۵)). متوسط مقدار تخلخل مؤثر در زون خالص تولیدی برابر ۹/۵ درصد است. متوسط اشباع‌شدگی از آب در این ناحیه ۱۵/۶ درصد می‌باشد (جدول (۳-۲)).

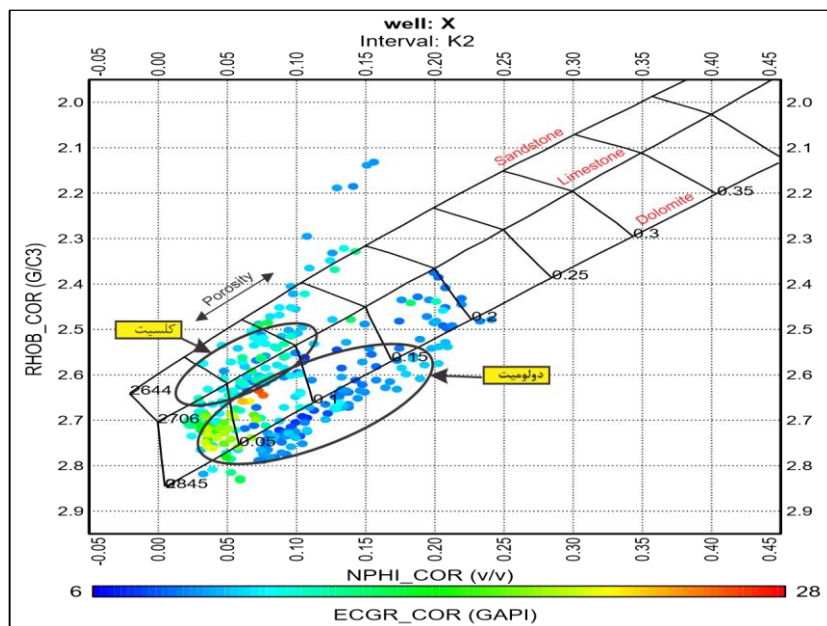
محاسبه‌ی اشباع از آب در سازند کنگان نشان می‌دهد که بخش K1 دارای اشباع از آب بیشتری نسبت به بخش K2 بوده و همچنین تخلخل مؤثر بخش K2 بیشتر از تخلخل مؤثر بخش K1 است. حضور شیل و مخصوصاً انیدریت باعث کاهش تخلخل در بخش K1 شده است. ارزیابی انجام شده نشان می‌دهد نسبت NTG بخش K1 و بخش K2 به ترتیب برابر ۷۳/۸ و ۸۰/۵۸ درصد است در نتیجه بخش K2 دارای بهترین کیفیت مخزنی است



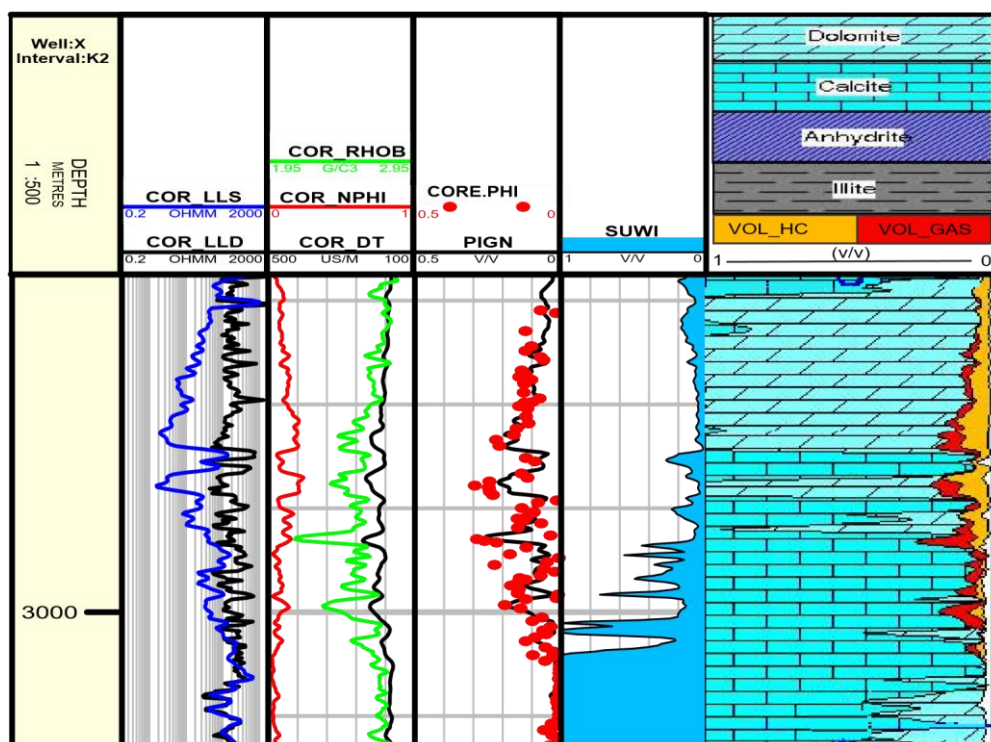
شکل (۳-۲): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K1 سازند کنگان در چاه میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی



شکل (۳-۳): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K1 سازند کنگان با استفاده از ماژول Multimin به همراه ستون لیتولوژی، تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب



شکل (۳-۴): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K2 سازند کنگان در چاه میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی

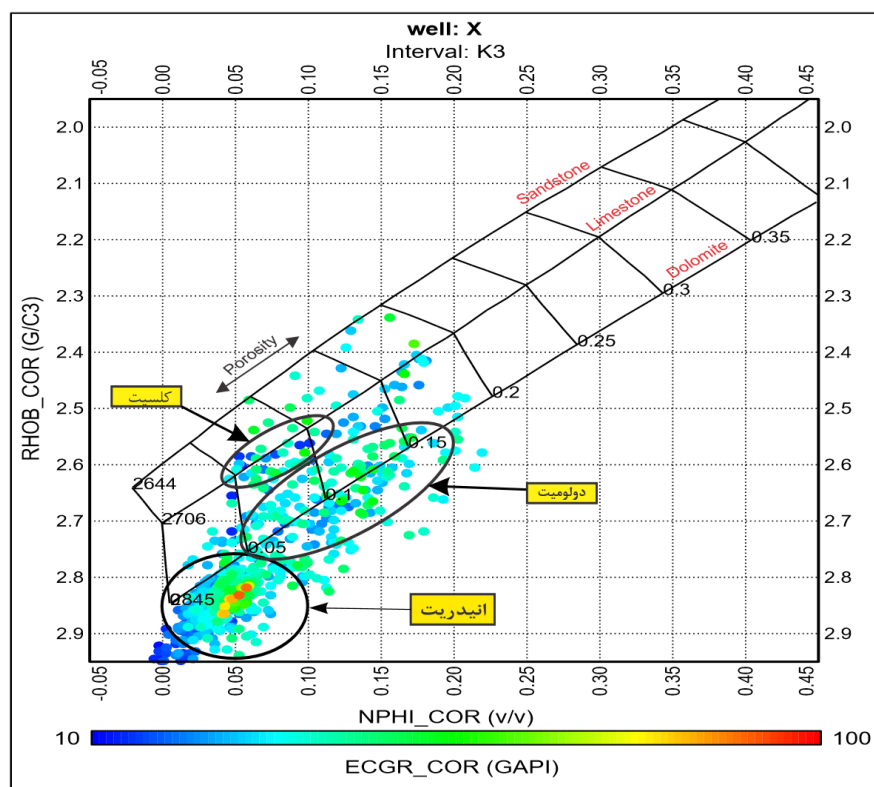


شکل (۳-۵): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K2 سازند کنگان به همراه ستون لیتولوژی، تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب

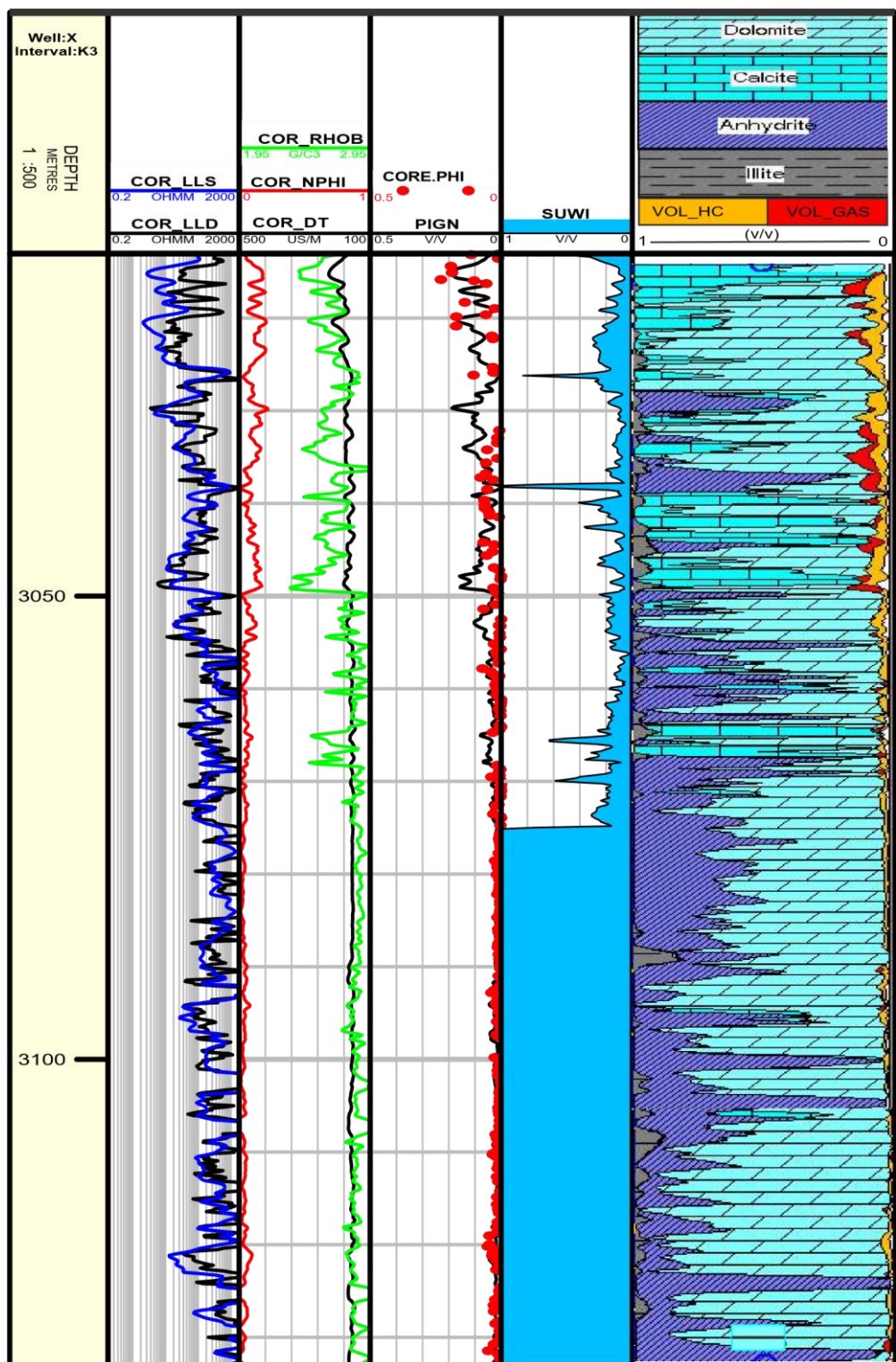
نتایج ارزیابی سازند دالان به شرح زیر است:

۳-۳-۳. بخش K3

نمودار متقاطع نوترون - چگالی در واحد مخزنی K3، لیتولوژی انیدریت، آهک و دولومیت را نشان می‌دهد (شکل (۶-۳)). ستون لیتولوژی این بخش عمدتاً شامل دولومیت، مقداری انیدریت در بخش میانی و در بخش پایینی لایه و مقداری آهک در بخش بالایی لایه می‌باشد. در این واحد نیز مقدار اشباع آب با افزایش عمق افزایش می‌یابد به طوری که از عمق ۳۰۷۵ متری مقدار اشباع آب ۱۰۰ درصد است. همچنین مقدار تخلخل به دلیل وجود انیدریت و شیل بسیار پایین است (شکل (۷-۳)). متوسط مقدار تخلخل مؤثر در زون خالص تولیدی برابر ۶/۶ درصد است. متوسط اشباع‌شدگی از آب در این ناحیه ۱۹/۲ درصد می‌باشد. (جدول (۲-۳)).



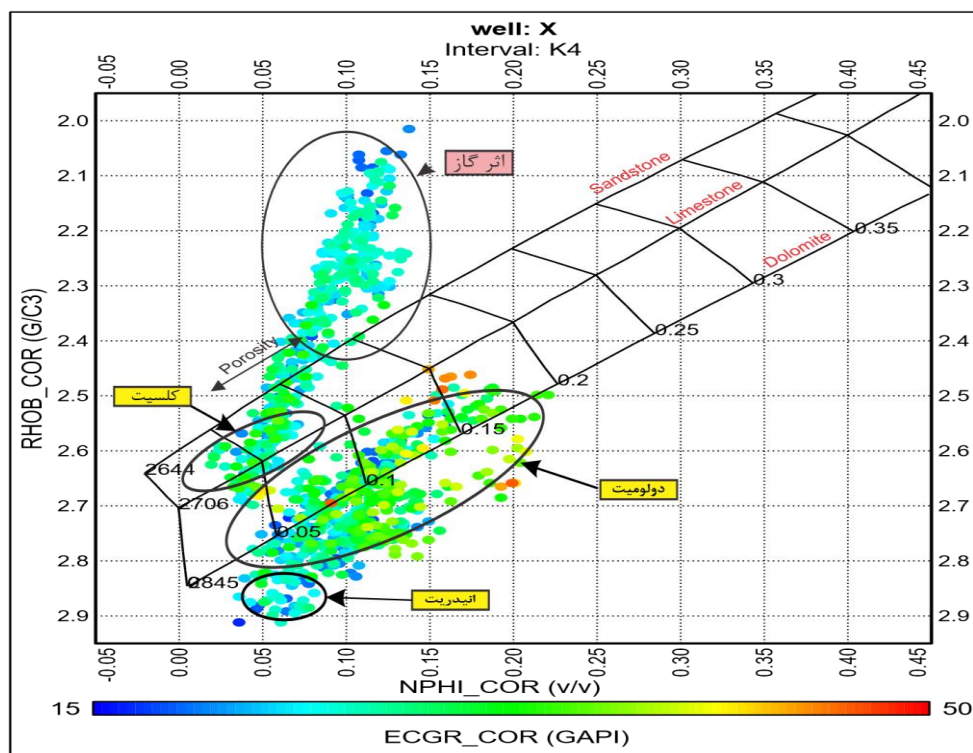
شکل (۶-۳): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K3 سازند دالان بالایی در چاه میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی



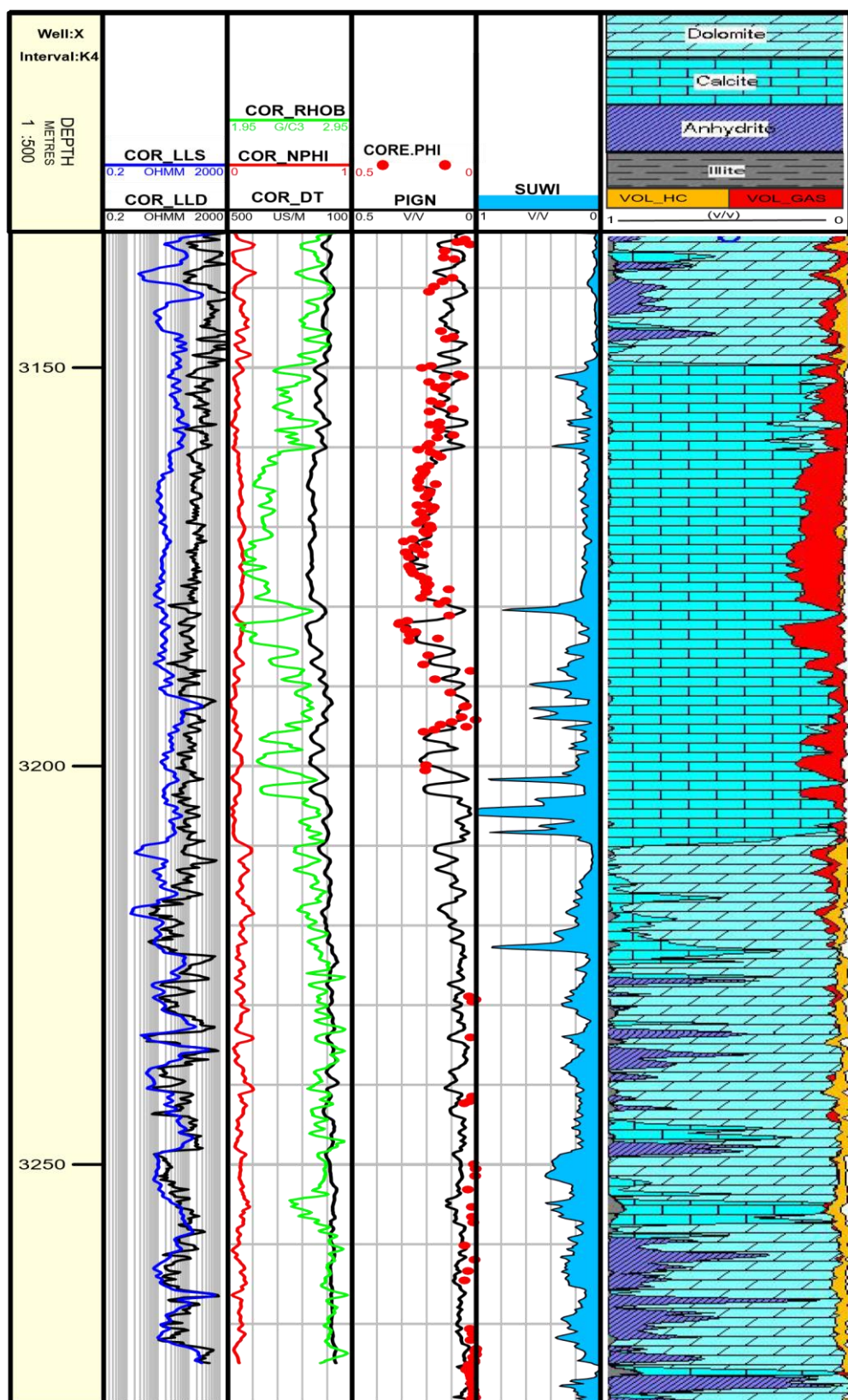
شکل (۷-۳): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K3 سازند دالان بالایی به همراه ستون لیتولوژی، تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب

۳-۳-۴. بخش K4

در نمودار متقاطع نوترون - چگالی واحد مخزنی K4، اثر گاز باعث منتقل شدن داده‌ها به سمت چپ بالای این نمودار شده است همچنین بررسی لیتولوژی نشان می‌دهد این بخش شامل دولومیت و مقداری انیدریت است (شکل (۳-۸)). ستون سنگ‌شناسی عمدتاً دولومیت و آهک با مقداری انیدریت در بخش بالایی و در بخش پایینی لایه را نشان می‌دهد (شکل (۳-۹)). در بخش انتهایی این واحد مقدار تخلخل به دلیل وجود انیدریت کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقدار تخلخل به دلیل وجود آهک و آهک دولومیتی زیاد است. متوسط مقدار تخلخل مؤثر در زون خالص تولیدی برابر ۱۰/۷ درصد است. متوسط اشباع‌شدگی از آب در این ناحیه ۱۸/۳ درصد می‌باشد (جدول (۳-۲)).



شکل (۳-۸): نمودار متقاطع نوترون - چگالی در بخش K4 سازند دالان بالایی در چاه X میدان مورد مطالعه برای تعیین سنگ‌شناسی



شکل (۳-۹): نتایج مطالعات ارزیابی پتروفیزیکی بخش K4 سازند دالان بالایی به همراه ستون لیتولوژی، تخلخل لاگ و مغزه و اشباع‌شدگی آب

محاسبه‌ی تخلخل در سازند دالان نشان می‌دهد که بخش K4 دارای تخلخل بالاتری نسبت به بخش K3 است. حضور انیدریت در بخش K3 باعث کاهش کیفیت مخزنی شده است. همچنین محاسبه‌ی اشباع از آب نشان می‌دهد بخش K3 دارای اشباع آب بیشتری نسبت به بخش K4 است. ارزیابی پتروفیزیکی سازند دالان نشان می‌دهد که نسبت NTG بخش‌های K3 و K4 به ترتیب برابر ۵۹/۳ و ۸۹/۸ می‌باشد در نتیجه بخش K4 سازند دالان دارای کیفیت مخزنی بهتری نسبت به بخش K3 است (جدول (۲-۳)).

جدول (۲-۳): نتایج ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان بالایی در چاه مورد مطالعه

سازندهای مخزنی	زون ناخالص (Gross)			زون خالص تولیدی (Net-pay)			
	ضخامت (m)	تخلخل مؤثر (%)	اشباع از آب (%)	ضخامت (m)	زون خالص تولیدی به زون ناخالص (%)	تخلخل مؤثر (%)	اشباع از آب (%)
K1	۱۰۷	۵/۹	۳۳/۷	۷۹/۰۶	۷۳/۸	۷/۲	۲۰/۹
K2	۴۶	۸/۴	۳۵/۴	۳۷/۰۷	۸۰/۵۸	۹/۵	۱۵/۶
K3	۱۲۰	۴/۶	۵۷/۹	۷۱/۲۵	۵۹/۳	۶/۶	۱۹/۲
K4	۱۵۸	۱۰/۵	۱۹/۸	۱۴۱/۹۵	۸۹/۸	۱۰/۷	۱۸/۳

۳-۴. نتایج اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن

برای توصیف کیفیت مخزن واحدهای مخزنی سازندهای کنگان و دالان چاه مورد مطالعه، اندیس کیفیت مخزن (RQI)، اندیس تخلخل نرمالایز شده^۱ (NPI) و اندیس منطقه‌ی جریان (FZI) ارائه شده توسط آمافول و همکاران (۱۹۹۳) به صورت زیر محاسبه شد. نتایج محاسبه شده برای هر بخش در جدول (۳-۳) نشان داده شده است.

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} \quad (۳-۳)$$

^۱ Normalized Porosity Index

که در آن RQI، اندیس کیفیت مخزن و بر حسب میکرومتر (μm) و k تراوایی بر حسب میلی داری و ϕ_e ، تخلخل مؤثر به صورت کسر است (Amaefule et al., 1993).

اندیس تخلخل نرمالایز شده به صورت زیر محاسبه می شود (Amaefule et al., 1993):

$$NPI = \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \quad (3-3)$$

اندیس منطقه‌ی جریان تابعی از اندیس کیفیت مخزن است و به صورت زیر محاسبه می شود (Amaefule et al., 1993):

$$FZI = \frac{RQI}{NPI} \quad (4-3)$$

در این مطالعه از اندیس پذیرفته شده‌ی دیگری تحت عنوان اندیس پتانسیل مخزن (RPI) برای توصیف پتانسیل مخزن بر اساس RQI و FZI و با در نظر گرفتن اشباع هیدروکربن و آب، ارائه شده توسط نبوی و العززی (۲۰۱۵) استفاده شده است. اندیس پتانسیل مخزن، میانگین حسابی RQI و FZI است و به صورت زیر محاسبه می شود نتایج محاسبه شده برای هر بخش در جدول (۳-۳) نشان داده شده است (Nabawy and Al-Azazi, 2015):

$$RPI = \frac{RQI + FZI}{2} \quad (5-3)$$

اشباع از آب کاهش ناپذیر (S_{wir}) یکی از مهم ترین پارامترهای مخازن هیدروکربنی است که در بسیاری از محاسبات و مدل سازی های تحقیقات مخزن نقش مؤثری ایفا می کند. ایزدی و قلم بر (۲۰۱۳) با بهبود اندیس کیفیت مخزن، اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته را ارائه نمودند. در این رابطه علاوه بر تراوایی و تخلخل، اشباع آب کاهش ناپذیر نیز وجود دارد. برای واحدهای مخزنی کنگان و دالان به صورت زیر محاسبه شد نتایج محاسبه شده برای هر بخش در جدول (۳-۳) نشان داده شده است:

$$MRQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} * \sqrt{1 - S_{wir}} \quad (6-3)$$

که در آن MRQI، اندیس کیفیت مخزن بهبود یافته، k تراوایی بر حسب میلی داری و ϕ_e ، تخلخل مؤثر به صورت کسر و S_{wir} ، اشباع آب کاهش ناپذیر به صورت کسر می‌باشد (Izadi and Ghalambor, 2013).

۳-۴-۱. بخش K1

در بخش K1 سازند کنگان از عمق ۲۸۰۲ متری تا عمق ۲۹۰۰ متری با توجه به تخلخل مناسب و اشباع آب پایین، میزان هیدروکربن در این بخش از سازند، قابل تولید می‌باشد و این مقدار به سمت پایین افزایش می‌یابد. از عمق ۲۹۰۰ متری تا عمق ۲۹۱۰ متری مقدار آب موجود در این فاصله قابل توجه است (شکل (۳-۱۰)). آب موجود در این بخش از نوع کاهش نیافتنی نیست بنابراین مقدار RQI و MRQI با هم برابر است. از عمق ۲۹۱۰ متری تا عمق ۲۹۲۵ متری مقدار آب موجود در این فاصله قابل توجه است و مقداری از آب موجود در این بخش از نوع کاهش نیافتنی است بنابراین مقدار RQI از MRQI بیشتر است. از عمق ۲۹۲۵ متری تا عمق ۲۹۵۲ متری مقدار آب موجود در سازند پایین است و فواصلی که دارای تخلخل و تراوایی بالایی می‌باشند به عنوان بخش تولیدی مخزن است. از عمق ۲۹۵۲ متری تا انتهای بخش K1 فضای متخلخل سازند با ۱۰۰ درصد اشباع آب پر شده است این بخش به عنوان زون غیر تولیدی است و آب تولید می‌کند. در سازند کنگان واحد مخزنی K1 مقدار متوسط FZI و همچنین مقدار متوسط RPI بیشتری را نسبت به واحد مخزنی K2 در کل سازند دارا می‌باشد (جدول (۳-۳)).

۳-۴-۲. بخش K2

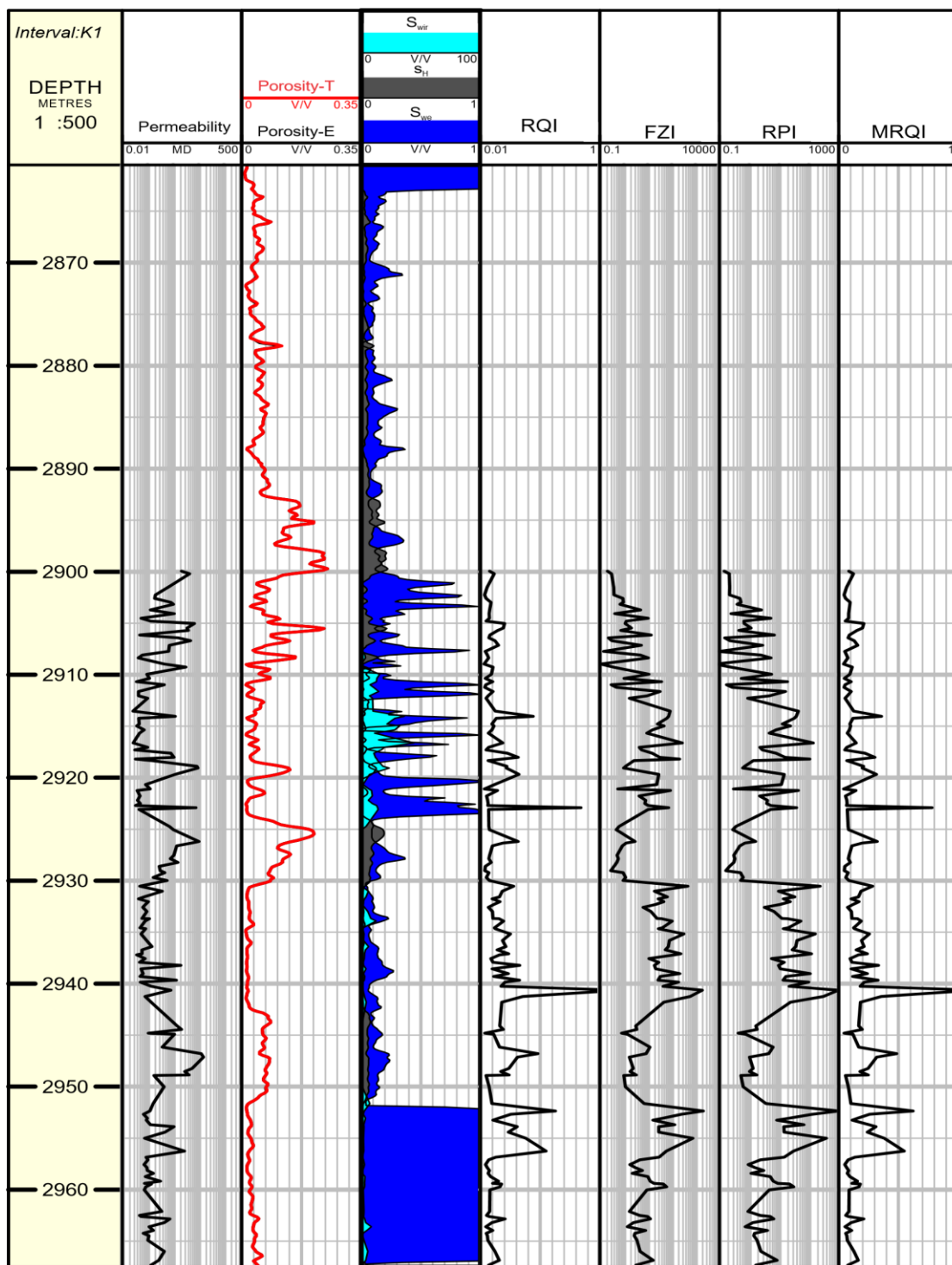
در این بخش از سازند کنگان از ابتدای این بخش تا عمق ۳۰۰۰ متری مقدار تراوایی و تخلخل بالا و مقدار اشباع آب پایین است و آب موجود در این بخش کاهش پذیر است بنابراین مقدار RQI و MRQI در این بخش برابر است. از عمق ۳۰۰۰ متری تا ابتدای بخش K3 مقدار تخلخل و تراوایی کاهش و مقدار اشباع آب افزایش و به ۱۰۰ درصد می‌رسد. بخش K2 از سازند کنگان دارای بیشترین مقدار متوسط RQI و MRQI نسبت به بخش K1 این سازند است (شکل (۳-۱۱)) و جدول (۳-۳).

۳-۴-۳. بخش K3

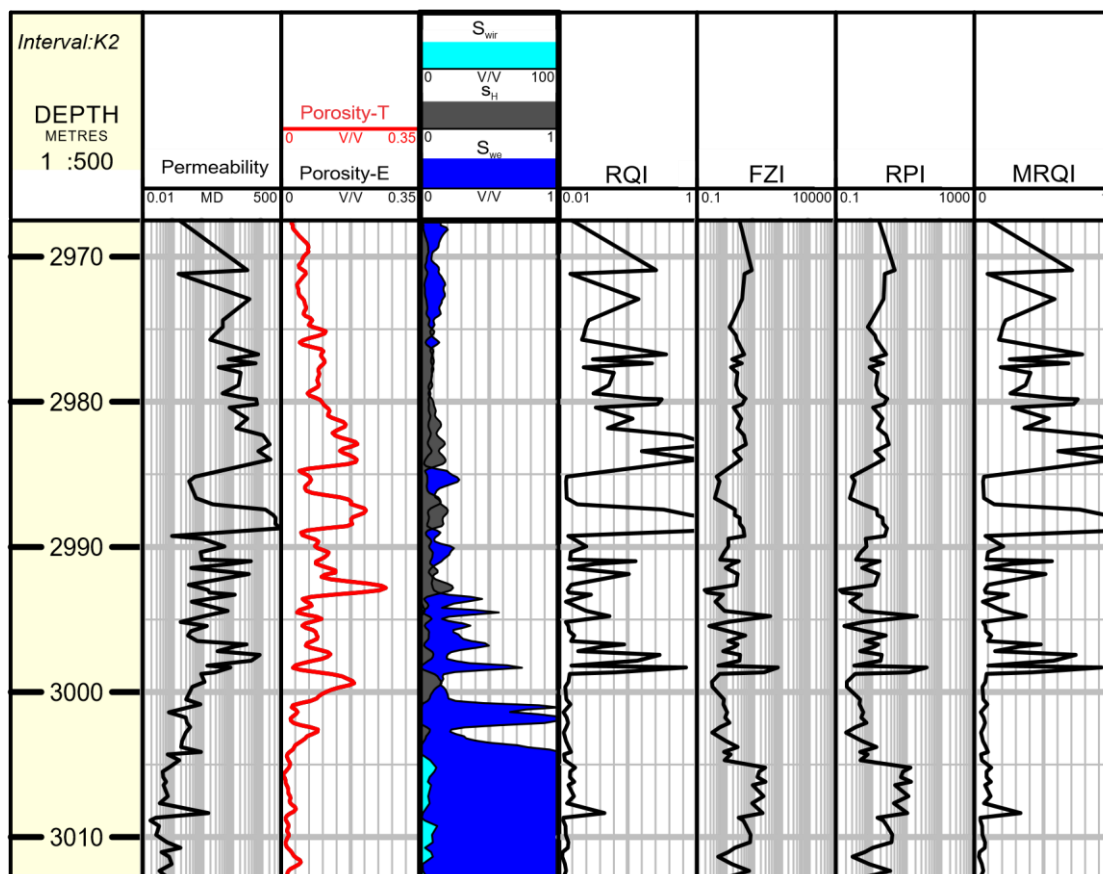
از ابتدای بخش K3 تا عمق ۳۰۳۰ متری به دلیل مقدار تراوایی و تخلخل مناسب و اشباع آب پایین مقدار هیدروکربن تولیدی این بخش قابل توجه است آب موجود در این بخش از نوع کاهش پذیر است بنابراین مقادیر RQI و MRQI با هم برابر هستند (شکل (۳-۱۲)). از عمق ۳۰۳۰ متری تا عمق ۳۰۷۵ متری با توجه به وجود انیدریت و ایلیت مقدار تراوایی و تخلخل نسبت به فاصله‌ی قبلی کاهش می‌یابد. آب موجود در این بخش از نوع کاهش ناپذیر است بنابراین مقدار RQI از MRQI بیشتر است. از عمق ۳۰۷۵ متری تا ابتدای بخش K4 سازند دالان فوقانی مقدار اشباع آب ۱۰۰ درصد است. این فاصله از بخش K3 آب تولید می‌کند و به عنوان زون غیر تولیدی سازند کنگان است. بخش K3 سازند دالان فوقانی دارای مقدار متوسط RQI، FZI، RPI و MRQI بیشتری را نسبت به بخش K4 این سازند به دلیل تخلخل پایین بخش K3 دارا می‌باشد.

۳-۴-۴. بخش K4

از ابتدای این بخش تا عمق ۳۱۸۰ متری مقدار تراوایی و تخلخل بسیار بالا و مقدار آب موجود در این بخش مقدار خیلی کمی است. این بخش به عنوان زون تولیدی واحد مخزنی K4 است مقدار تولیدی هیدروکربن این ناحیه به دلیل اشباع آب خیلی پایین زیاد است. از عمق ۳۱۸۰ متری تا انتهای این بخش مقدار اشباع آب افزایش می‌یابد و این اشباع آب از نوع کاهش پذیر است. همچنین با توجه به وجود مقدار کمی انیدریت، تراوایی و تخلخل این فاصله نسبت به بخش ابتدایی این واحد مخزنی کاهش می‌یابد (شکل (۳-۱۳)).



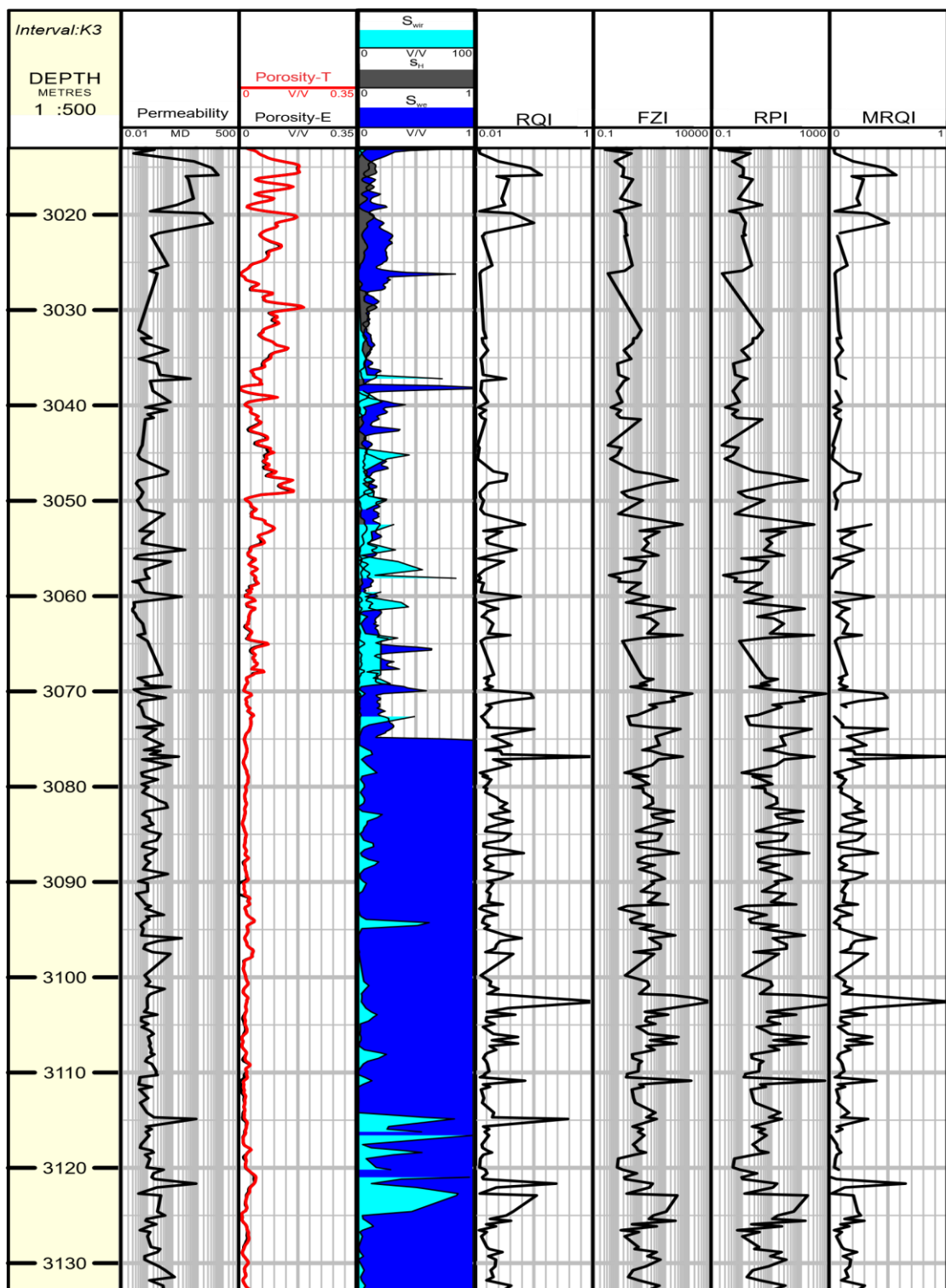
شکل (۳-۱): انطباق عمودی پارامترهای RQI، FZI، RPI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K1 سازند کنگان



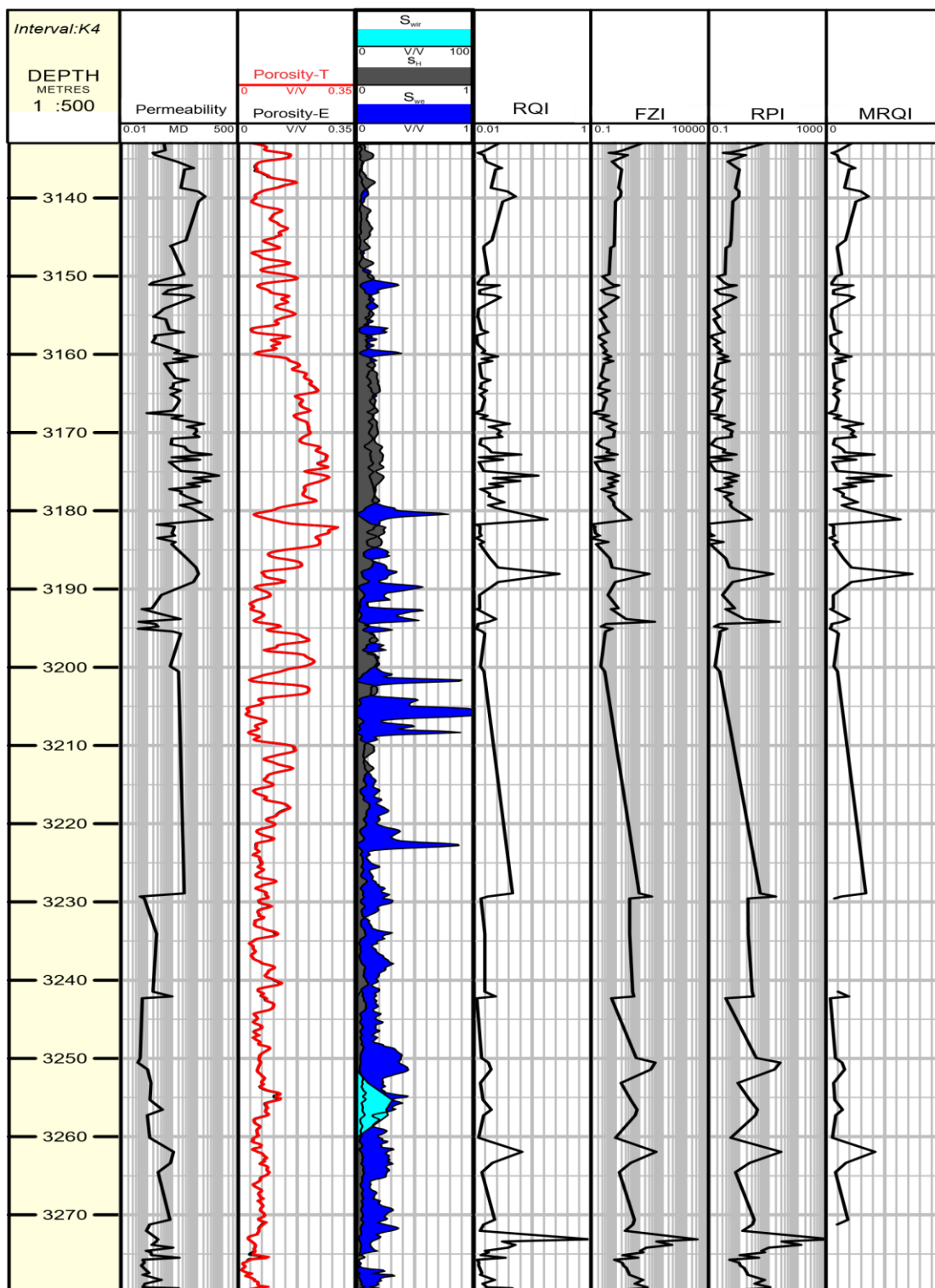
شکل (۳-۱۱): انطباق عمودی پارامترهای RQI, FZI, RPI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K2 سازند کنگان

جدول (۳-۳): مقادیر مینیمم، ماکزیمم و متوسط تراوایی (k)، تخلخل مؤثر (ϕ_e)، اشباع از آب (S_w)، آب کاهش ناپذیر (S_{wi}) و هیدروکربن (S_h)، اندیس کیفیت مخزن (RQI)، اندیس منطقه‌ی جریان (FZI)، اندیس پتانسیل مخزن (RPI) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (MRQI) برای بخش‌های مخزنی سازندهای کنگان و دالان چاه مورد مطالعه

Member	Depth(m)		k(mD)	ϕ_e (%)	S_w (%)	S_{wir} (%)	S_h (%)	RQI(μ m)	FZI	RPI	MRQI
K1	2860.5 2967.5	Mean	1.055	4.74	43.11	5.07	3.52	0.1572	68.00	34.08	0.157
		min	0.026	0.03	0	0.12	0	0.0402	0.105	0.0726	0.042
		max	15.79	29.3	100	44.3	20.62	1.1615	2102	1051.01	1.153
K2	2967.5 3013	Mean	31.46	9.92	39.88	1.64	6.71	0.2895	5.451	2.8701	0.2886
		Min	0.018	0.41	3.9	0.028	0	0.0361	0.187	0.1315	0.0343
		Max	468.51	29.5	100	12.54	22.48	1.407	82.85	41.189	1.4072
K3	3013 3133	Mean	1.224	2.08	66.69	13.22	1.91	0.1707	113.06	56.61	0.1602
		Min	0.03	0.01	3.7	0.09	0	0.032	0.3305	0.1867	0.0121
		Max	75.58	23.03	100	0.099	15.57	1.0702	10600	5300.9	1.0393
K4	3133 3291	Mean	4.09	13.44	16.36	1.019	11.3	0.1455	28.372	14.26	0.1386
		Min	0.047	0.03	0	0.02	1.39	0.0253	0.0816	0.0565	0.0253
		Max	81.255	31.07	47.5	31.12	24.74	0.9979	3325.3	1663.18	0.7319



شکل (۳-۱۲): انطباق عمودی پارامترهای RQI, FZI, RPI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K3 سازند فوقانی



شکل (۳-۱۳): انطباق عمودی پارامترهای RQI، FZI، RPI و MRQI در برابر عمق مربوط به بخش K4 سازند دالان فوقانی

معادلات (۳-۵) و (۳-۶) را می‌توان به ترتیب به صورت زیر نوشت:

$$MRQI = \sqrt{1 - S_{wir}} * RQI \quad (۳-۷)$$

$$RPI = \left(\frac{1 + NPI}{2} \right) FZI \quad (۳-۸)$$

بررسی روند تغییرات نمودار پارامترهای RQI، FZI، RPI و MRQI در برابر عمق مربوط به هر چهار بخش سازندهای کنگان و دالان فوقانی نشان می‌دهد که روند تغییرات نمودارهای RQI و MRQI با توجه به اینکه روابط این دو اندیس ذکر شده بر اساس معادله (۷-۳) یکسان است و فقط در قسمتی از مخزن که اشباع آب کاهش‌ناپذیر وجود دارد مقدار RQI از مقدار MRQI بیشتر است، شبیه هم هستند. همچنین نمودارهای FZI و RPI با توجه به معادله (۸-۳) نیز شبیه هم هستند بدین صورت که مقدار RPI کسری از FZI می‌باشد.

۳-۵. اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته^۱ (DRQI)

هدف اصلی این پایان‌نامه به کارگیری داده‌های تجزیه و تحلیل مغزه و نگارهای چاه برای معرفی روشی بهبود یافته در محاسبه‌ی کیفیت مخزن یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران است که علاوه بر تراوایی و تخلخل، اثر اشباع شدگی از آب روی کیفیت مخزن بررسی گردد. ماهیت سنگ‌های مخزن حاوی نفت و گاز، مقادیر سیالات به تله افتاده را در درون فضای تهی این سنگ‌ها، توانایی این سیالات به جریان یافتن از درون سنگ‌ها و دیگر خواص فیزیکی مربوطه را وضع می‌کند. مقیاس فضای تهی به صورت تخلخل سنگ تعریف می‌شود و مقیاس توانایی سنگ برای انتقال سیالات تراوایی نامیده می‌شود. با توجه به تعریف تخلخل و تراوایی، این دو پارامتر ارتباط مستقیم با کیفیت مخزن دارند یعنی با افزایش تخلخل و تراوایی کیفیت مخزن افزایش و با کاهش این دو پارامتر، کیفیت مخزن کاهش می‌یابد. تخلخل سنگ مخزن چون مقیاسی از توانایی سنگ برای ذخیره کردن سیالات بوده بسیار حائز اهمیت است. مقدار نسبی سیالات مشخص و پرکننده سنگ به همان اندازه مهم است. این خاصیت اشباع از سیال نامیده می‌شود و به صورت کسر یا درصد کل حجم خلل و فرج اشغال شده به وسیله‌ی نفت، گاز یا آب بیان می‌گردد. بنابراین برای مثال اشباع از آب، برابر است با (Cosentino, 2001):

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \quad (۹-۳)$$

¹ Developed reservoir quality index

که V_w ، حجم آب در خلل و فرج سنگ و V_p ، حجم کل خلل و فرج سنگ است. این عبارت می‌تواند برای گاز و آب نیز نوشته شود. بنابراین اشباع‌شدگی از آب به نسبت حجمی از کل فضاهای سنگ که توسط آب پر شده است گفته می‌شود. بنابراین اشباع‌شدگی از آب ارتباط غیر مستقیم بر کیفیت مخزن دارد یعنی با افزایش درجه اشباع‌شدگی از آب در سازند مخزنی، کیفیت مخزن کاهش و با کاهش درجه‌ی اشباع‌شدگی از آب در سازند مخزنی کیفیت مخزن افزایش می‌یابد. بر اساس ارتباط تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب با کیفیت مخزن، فرمول‌هایی که برای کیفیت مخزن در این پایان‌نامه توسعه داده شده، به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$DRQI = \frac{Ak^{\alpha} + B\phi^{\beta}}{CS_w^{\gamma}} \quad (10-3)$$

$$DRQI = \frac{Ak^{\alpha} \times B\phi^{\beta}}{CS_w^{\gamma}} \quad (11-3)$$

که در آن $DRQI$ ، اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته، k ، تراوایی بر حسب میلی داریسی (mD) و ϕ و S_w به ترتیب تخلخل و اشباع‌شدگی از آب به صورت کسری از یک می‌باشند. ضرایب A ، B و C و همچنین توان‌های α ، β و γ که به ترتیب به عنوان ضرایب و توان‌های پارامترهای تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب در روابط اخیر معرفی شده‌اند، مقادیر ثابتی هستند که بر اساس درجه اهمیت هر کدام از این سه پارامتر تعیین می‌شوند و از مخزنی به مخزن دیگر تغییر می‌کنند.

کوثر و دنو (۱۹۸۱) تراوایی (k) را با اندیس سیال آزاد (FFI) به صورت زیر مرتبط کردند (Coates and Denoo., 1981):

$$k = (10\phi)^4 \left(\frac{FFI}{\phi - FFI} \right)^2 \quad (12-3)$$

که در آن k ، تراوایی بر حسب میلی داریسی، ϕ ، تخلخل مؤثر به صورت کسر و FFI اندیس سیال آزاد است. که در آن اندیس سیال آزاد از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (Tiab and Donaldson., 2015):

$$FFI = \phi(1 - S_{wir}) \quad (13-3)$$

در رابطه‌ی (۳-۱۳)، S_{wir} ، اشباع آب کاهش ناپذیر و ϕ ، تخلخل مؤثر به صورت کسر است. با قرار دادن معادله‌ی (۳-۱۳) در معادله‌ی (۳-۱۲)، معادله‌ی زیر حاصل می‌شود (Tiab and Donaldson, 2015):

$$k = (10\phi)^4 \left(\frac{1 - S_{wir}}{S_{wir}} \right)^2 \quad (3-14)$$

این معادله برای مخازنی به کار برده می‌شود که در آنها اشباع‌شدگی از آب کاهش‌ناپذیر به خوبی تعریف شده، تخلخل میان دانه‌ای است و سنگ حاوی مقدار کمی رس است. تیاب و دونالدسون (۲۰۱۵) با ترکیب معادله (۳-۱۴) با تعریف اندیس کیفیت مخزن (RQI) رابطه‌ی مفیدی بین RQI و FFI به صورت زیر برقرار کردند:

$$RQI = 3.14 \left(\frac{FFI}{\phi - FFI} \right) \sqrt{\phi^3} \quad (3-15)$$

که در آن FFI و تخلخل به صورت کسری، تراوایی بر حسب mD و RQI بر حسب μm بیان می‌شوند. با لگاریتم گرفتن از طرفین معادله‌ی بالا، معادله‌ی زیر حاصل می‌شود (Tiab and Donaldson, 2015):

$$\log RQI = \log \left(3.14 \frac{FFI}{\phi - FFI} \right) + \log \sqrt{\phi^3} \quad (3-16)$$

بنابراین نمودار تمام لگاریتمی اندیس کیفیت مخزن بر حسب $\sqrt{\phi^3}$ خط راستی را با شیب واحد، با این فرض که مخزن یک سازند ماسه‌سنگی همگن تمیز بوده، تولید می‌کند

مشابه با کار تحقیقاتی تیاب و دونالدسون (۲۰۱۵)، در صورتی که از طرفین معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱) لگاریتم گرفته شود معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$\log DRQI = \log(Ak^\alpha + B\phi^\beta) - \gamma \log CS_w \quad (3-17)$$

$$\log DRQI = \log(Ak^\alpha \times B\phi^\beta) - \gamma \log CS_w \quad (3-18)$$

داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد که نمودار DRQI بر حسب CS_w بر نمودار تمام لگاریتمی خط راستی را می‌دهد.

۳-۵-۱. مقادیر ضرایب A، B، C و توان‌های α ، β و γ در روش اول تعیین لگاریتم DRQI

۳-۵-۱-۱. حالت اول

ابتدا تغییرات کیفیت مخزن بر حسب هر کدام از پارمترهای پتروفیزیکی تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب، به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود بنابراین با قرار دادن توان‌های α ، β و γ برابر یک، معادله‌ی (۳-۱۰) به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{Ak + B\phi}{CS_w} \quad (۳-۱۹)$$

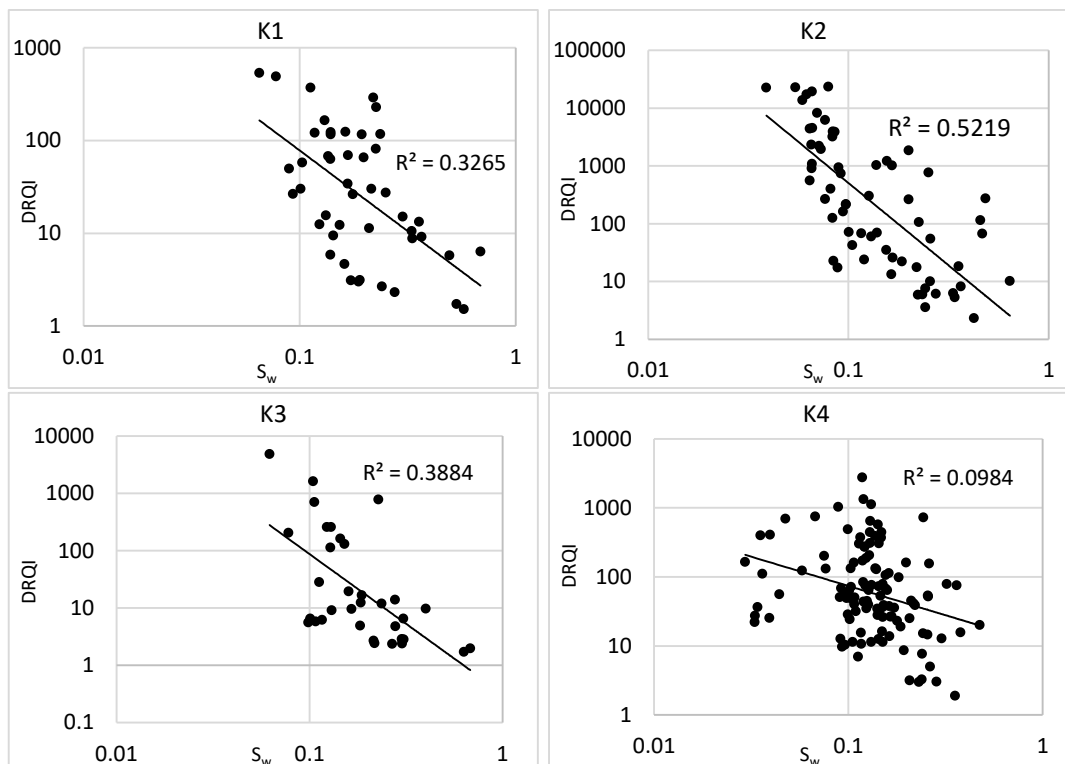
با توجه به اهمیت خیلی بیشتر تراوایی بر کیفیت مخزن نسبت به تخلخل و اشباع‌شدگی از آب و تأثیر بیشتر تخلخل بر کیفیت مخزن نسبت به اشباع‌شدگی از آب، چنانچه مقادیر ضرایب A، B و C به ترتیب برابر با ۴، ۲ و ۱ قرار داده شود معادله‌ی (۳-۱۹) به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{4k + 2\phi}{S_w} \quad (۳-۲۰)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (4k + 2\phi) - \log S_w \quad (۳-۲۱)$$

بنابراین با رسم مقادیر DRQI بر حسب 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، K2، K3 و K4 به ترتیب برابر ۰/۳۲۶۵، ۰/۵۲۱۹، ۰/۳۸۸۴ و ۰/۰۹۸۴ بدست می‌آید که همبستگی کمی را بین این دو پارامتر نشان می‌دهد (شکل (۳-۱۴)).



شکل (۳-۱۴): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت اول

۳-۵-۱-۲. حالت دوم

بر اساس معادله‌ی (۳-۱۴) 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 به ترتیب برابر ۴، ۲ و ۱ در نظر گرفته می‌شود. مقدار α و β به ترتیب ۰/۴ و ۰/۱ و مقدار γ برابر ۱، معادله‌ی (۳-۱۰) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{4k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۲۲)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (4k^{0.4} + 2\phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۲۳)$$

با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی ضریب تعیین

برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 به ترتیب برابر ۰/۷۸۴۵، ۰/۷۵۴۵، ۰/۶۹۶۶ و ۰/۵۷۲۴

بدست می‌آید. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر ۴ واحد مخزنی سازندهای کنگان و دالان به ازای ضرایب و توان‌های تعیین شده افزایش یافته در نتیجه میزان همبستگی DRQI و S_w افزایش یافته است (شکل (۳-۱۵)).

۳-۱-۵-۳. حالت سوم

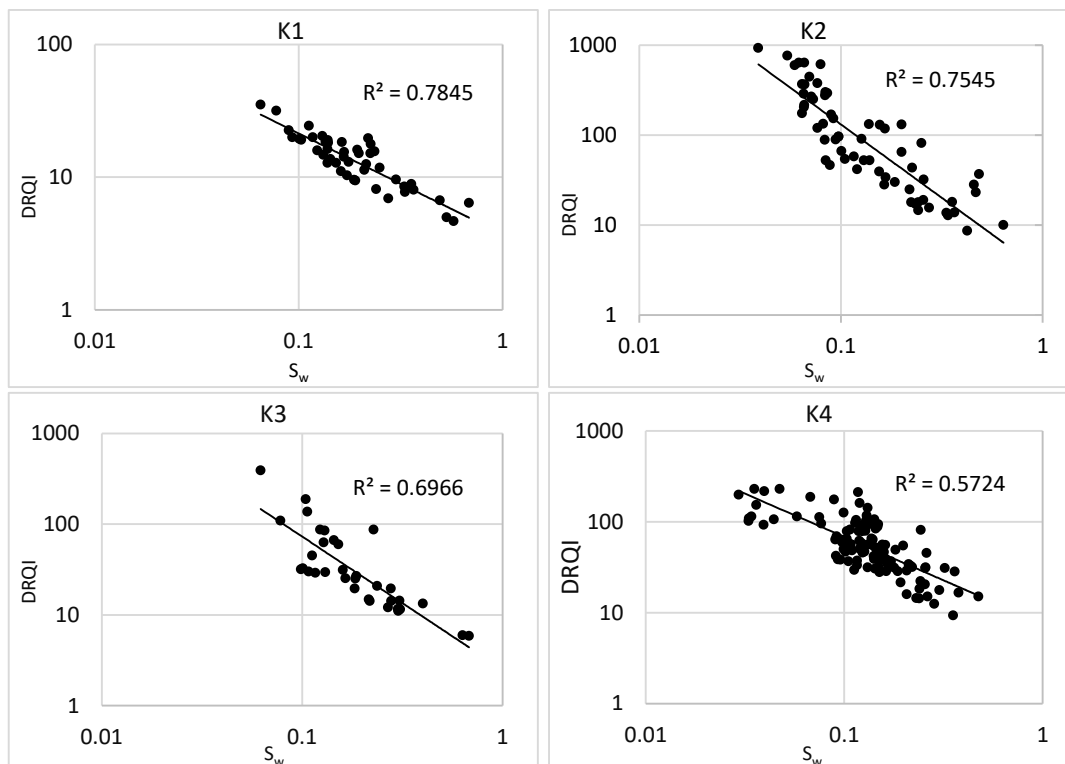
در این حالت مقادیر B ، C ، α ، β و γ همانند حالت قبل ولی مقدار A برابر با $4/1$ انتخاب می‌شود معادله‌ی (۳-۱۰) به صورت زیر می‌شود:

$$DRQI = \frac{4.1k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۲۴)$$

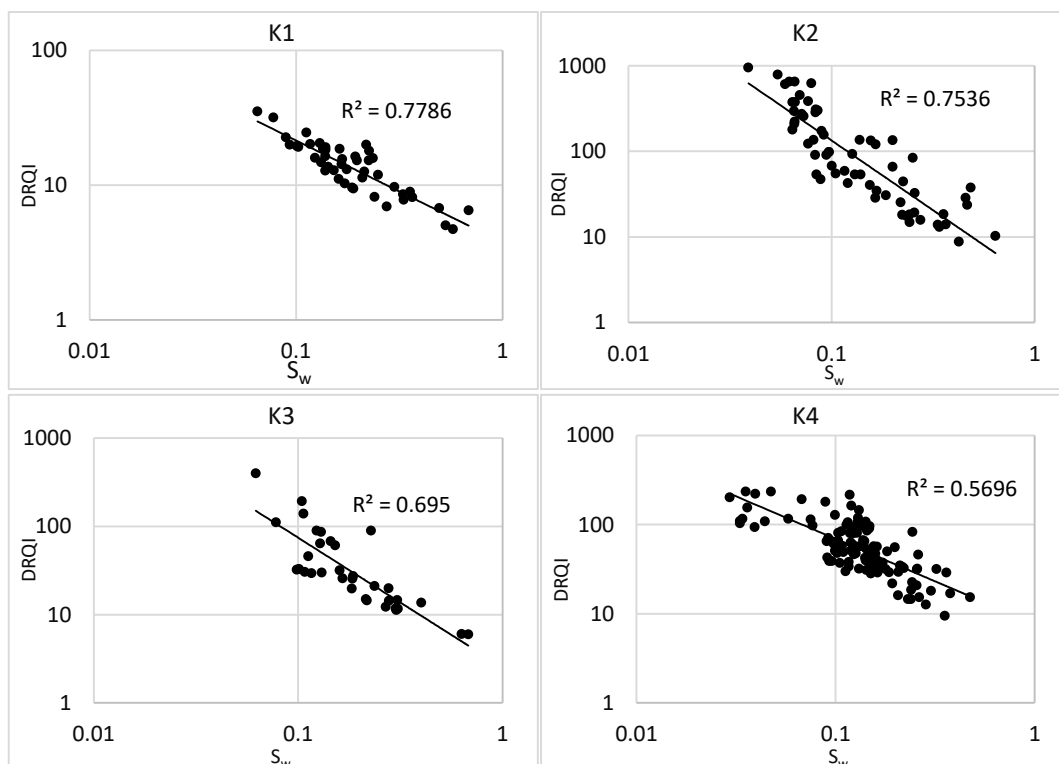
و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (4.1k^{0.4} + 2\phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۲۵)$$

در صورتی که مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی رسم شود با برآزش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی $K1$ ، $K2$ ، $K3$ و $K4$ سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر 0.7786 ، 0.7536 ، 0.695 و 0.5696 بدست می‌آید (شکل (۳-۱۶)). در این حالت همبستگی بالایی بین مقادیر DRQI و S_w مشاهده می‌شود ولی مقادیر ضرایب تعیین برای هر چهار واحد مخزنی نسبت به حالت قبل کاهش یافته است. بنابراین با افزایش ضریب تراوایی، مقدار ضرایب تعیین کاهش می‌یابد.



شکل (۳-۱۵): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت دوم



شکل (۳-۱۶): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت سوم

۳-۵-۱-۴. حالت چهارم

در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر α ، β و γ همانند حالت قبل به ترتیب برابر با ۰/۴،

۰/۱ و ۱ انتخاب می‌شود معادله‌ی (۳-۱۰) به صورت زیر می‌شود:

$$DRQI = \frac{k^{0.4} + \phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۲۶)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (k^{0.4} + \phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۲۷)$$

با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین

برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر

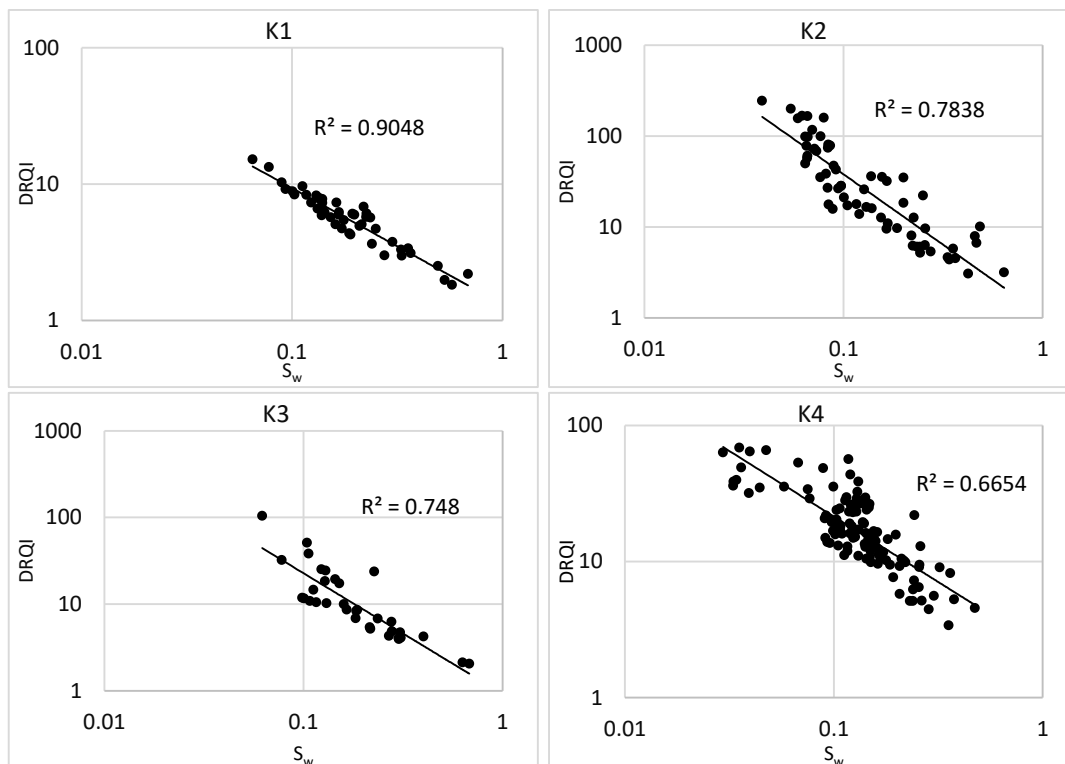
۰/۹۰۴۸، ۰/۷۸۳۸، ۰/۷۴۸۰ و ۰/۶۶۵۴ بدست می‌آید. مقادیر ضرایب تعیین به ازای ضرایب و توان‌های

تعیین شده، نسبت به حالت‌های قبلی افزایش یافته است. با بررسی این حالت و حالت‌های قبلی می‌توان

نتیجه گرفت در صورتی که مقادیر ضرایب پارامترهای تخلخل، تراوایی و اشباع از آب برابر یک قرار داده

شود، فرمول معرفی شده به فرم ساده‌تری تبدیل شده و همچنین مقادیر ضرایب تعیین یا همبستگی

افزایش می‌یابد (شکل (۳-۱۷)).



شکل (۳-۱۷): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت چهارم

۳-۵-۱-۵. حالت پنجم

در این حالت مقادیر ضرایب A، B و C برابر ۱ و مقادیر β و γ همانند حالت قبل به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۱ انتخاب می‌شود ولی مقدار α برابر با ۰/۴۱ قرار داده می‌شود معادله‌ی (۳-۱۰) به صورت زیر می‌شود:

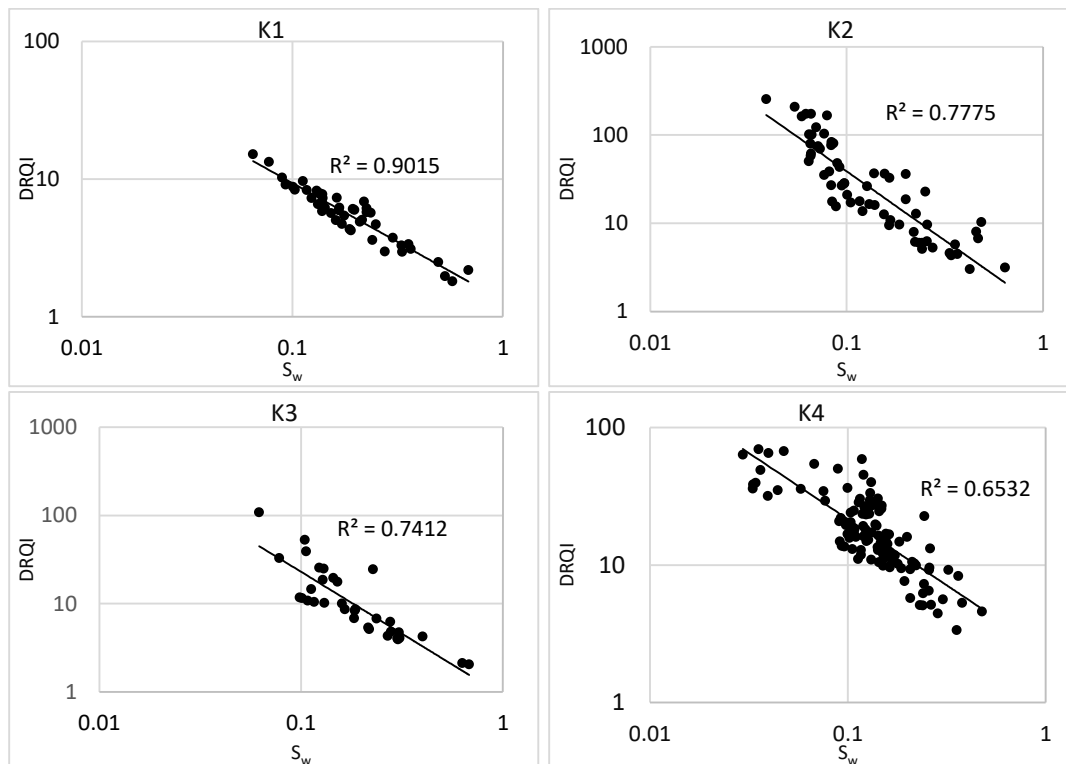
$$DRQI = \frac{k^{0.41} + \phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۲۸)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (k^{0.41} + \phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۲۹)$$

با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر ۰/۹۰۱۵، ۰/۷۷۷۵، ۰/۷۴۱۲ و ۰/۶۵۳۲ بدست می‌آید. با افزایش مقدار توان تراوایی به مقدار ۰/۰۱

در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر چهار واحد مخزنی نسبت به حالت قبل کاهش یافته است. (شکل ۳-۱۸).



شکل (۳-۱۸): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت پنجم

۳-۵-۱-۶. حالت ششم

در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر α و γ همانند حالت چهارم به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۱ انتخاب می‌شود ولی مقدار β برابر با ۰/۱۱ قرار داده می‌شود معادله‌ی (۳-۱۰) به صورت زیر می‌شود:

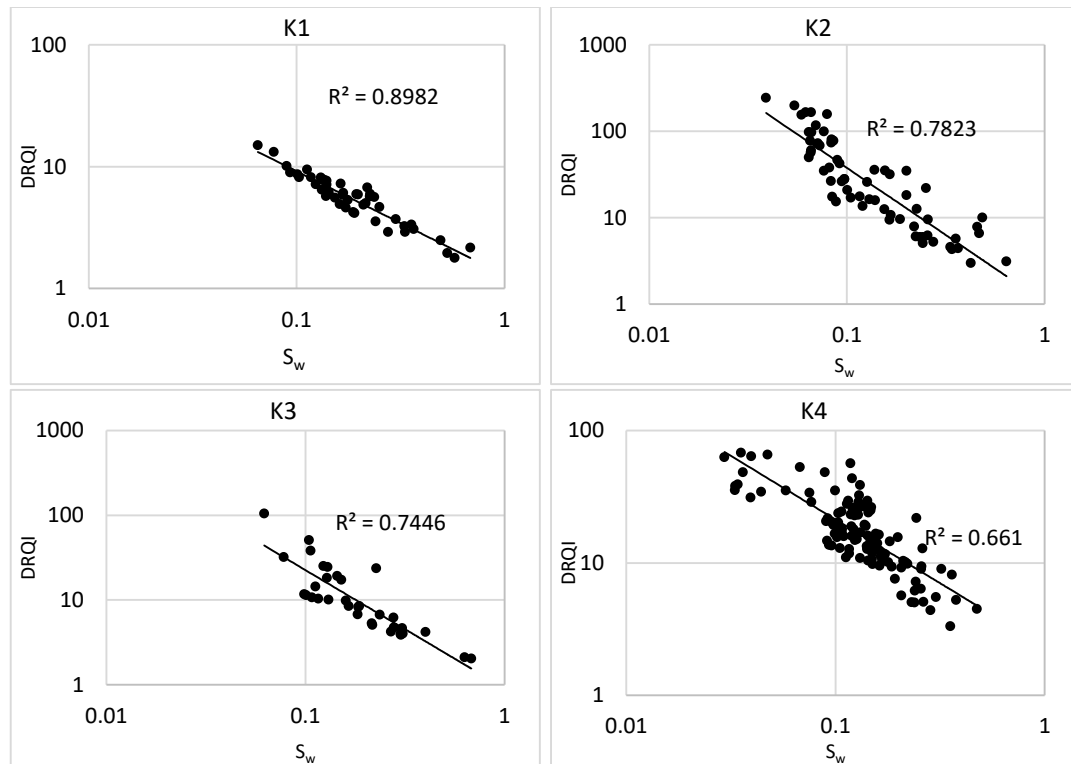
$$DRQI = \frac{K^{0.4} + \phi^{0.11}}{S_w} \quad (۳-۳۰)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (k^{0.4} + \phi^{0.11}) - \log S_w \quad (۳-۳۱)$$

اگر مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی رسم شود و بر روی داده‌ها منحنی خطی برازش شود، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 سازندهای کنگان و دالان میدان

مورد مطالعه به ترتیب برابر ۰/۸۹۸۲، ۰/۷۸۲۳، ۰/۷۴۴۶ و ۰/۶۶۱۰ بدست می‌آید. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر چهار واحد مخزنی نسبت به حالت چهارم کاهش یافته است بنابراین با افزایش مقدار توان تخلخل نیز مقدار همبستگی بین DRQI و S_w کاهش می‌یابد. (شکل (۳-۱۹)).



شکل (۳-۱۹): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت ششم

۳-۵-۲. مقادیر ضرایب A، B، C و توان‌های α ، β و γ در روش دوم تعیین لگاریتم DRQI

۳-۵-۲-۱. حالت اول

در این روش نیز همانند روش اول تعیین لگاریتم DRQI، ابتدا تغییرات کیفیت مخزن بر حسب هر کدام از پارمترهای پتروفیزیکی تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب، به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود بنابراین با قرار دادن توان‌های α ، β و γ برابر یک، معادله‌ی (۳-۱۱) به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{Ak \times B\phi}{CS_w} \quad (۳-۳۲)$$

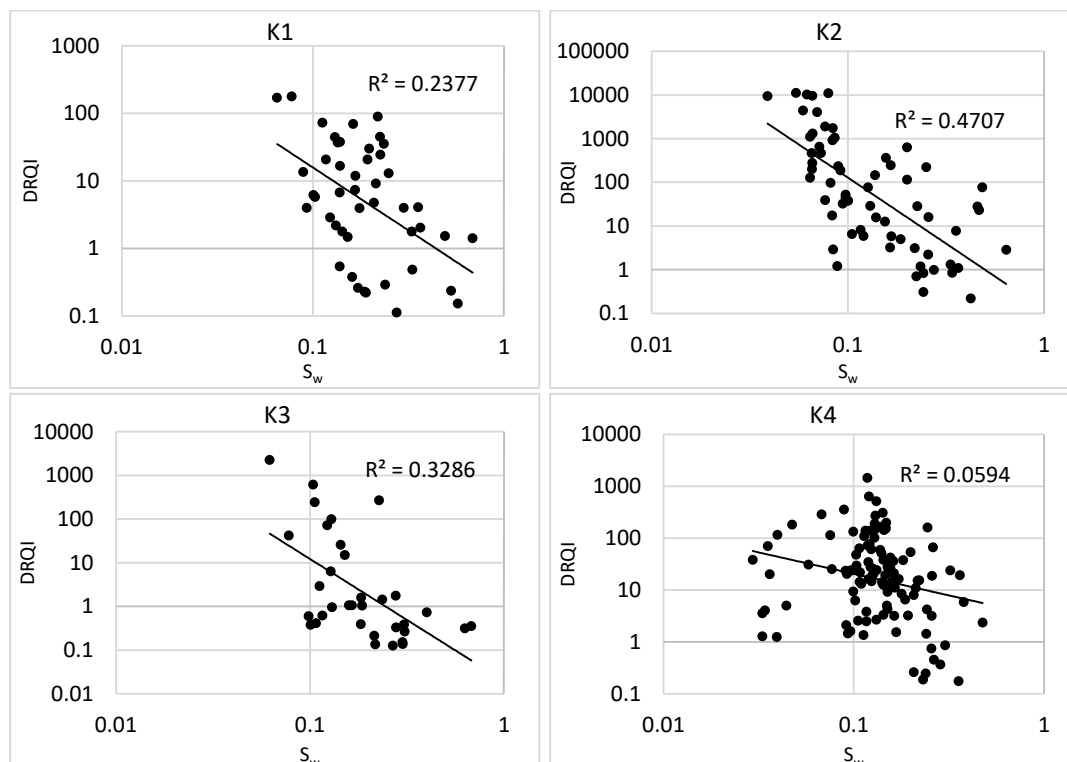
با توجه به اهمیت خیلی بیشتر تراوایی بر کیفیت مخزن نسبت به تخلخل و اشباع‌شدگی از آب و تأثیر بیشتر تخلخل بر کیفیت مخزن نسبت به اشباع‌شدگی از آب، چنانچه مقادیر ضرایب A، B و C به ترتیب برابر با ۴، ۲ و ۱ قرار داده شود معادله‌ی بالا به معادله‌ی زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{4k \times 2\phi}{S_w} \quad (3-33)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (4k \times 2\phi) - \log S_w \quad (3-34)$$

بنابراین با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضریب تعیین (R^2) برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 به ترتیب برابر ۰/۲۳۷۷، ۰/۴۷۰۷، ۰/۳۲۸۶ و ۰/۰۵۹۴ بدست می‌آید که همبستگی پایینی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی این ضرایب تعیین با ضرایب تعیین حالت اول روش اول تعیین لگاریتم DRQI، این مقادیر ضرایب برای هر چهار واحد مخزنی کاهش یافته است (شکل (۳-۲۰)).



شکل (۳-۲۰): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت اول

۳-۵-۲-۲. حالت دوم

در حالت دوم همانند حالت اول، مقادیر A، B و C به ترتیب برابر ۴، ۲ و ۱ در نظر گرفته می‌شود.

مقدار α و β به ترتیب ۰/۴ و ۰/۱ و مقدار γ برابر ۱، معادله‌ی (۳-۱۱) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{4k^{0.4} \times 2\phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۳۵)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

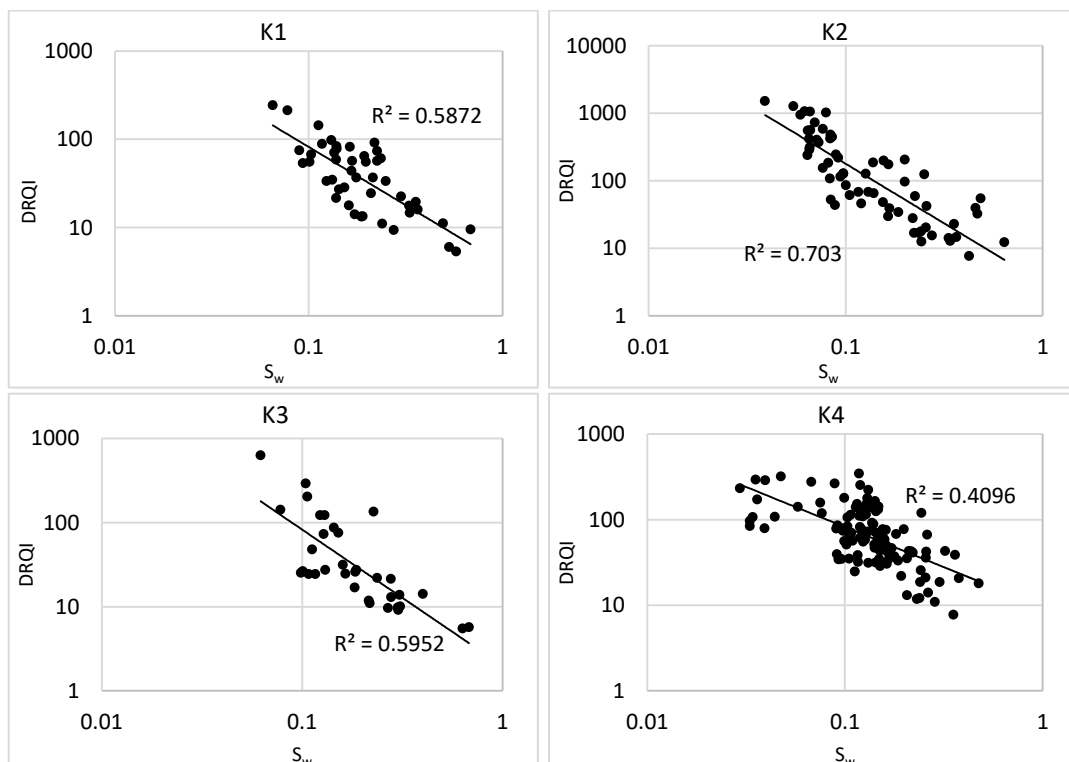
$$\log DRQI = \log (4k^{0.4} \times 2\phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۳۶)$$

با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی ضریب تعیین

برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 به ترتیب برابر ۰/۵۸۷۲، ۰/۷۰۳۰، ۰/۵۹۵۲ و ۰/۴۰۹۶

بدست می‌آید. با در نظر گرفتن توان‌های مورد نظر مقادیر ضرایب تعیین نسبت به حالت قبل افزایش

در نتیجه میزان همبستگی بین اندیس معرفی شده و اشباع از آب افزایش می‌یابد. (شکل (۳-۲۱)).



شکل (۳-۲۱): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت دوم

۳-۵-۲-۳. حالت سوم

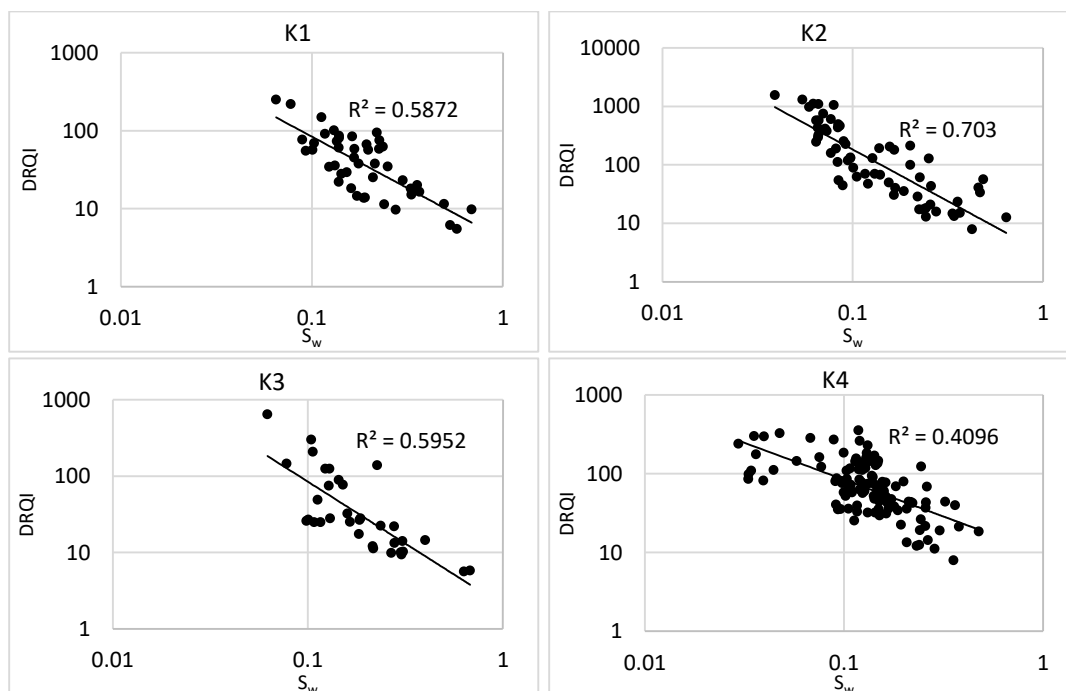
در این حالت مقادیر C ، α ، β و γ همانند حالت قبل ولی مقدار A به مقدار $0/1$ افزایش و مقدار آن برابر $4/1$ در نظر گرفته می‌شود معادله‌ی (۳-۱۱) به صورت زیر می‌شود:

$$DRQI = \frac{4.1k^{0.4} \times 2\phi^{0.1}}{S_w} \quad (3-37)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (4.1k^{0.4} \times 2\phi^{0.1}) - \log S_w \quad (3-38)$$

در صورتی که مقادیر $DRQI$ بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی رسم شود با برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی $K1$ ، $K2$ ، $K3$ و $K4$ سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر $0/5872$ ، $0/703$ ، $0/5952$ و $0/4096$ بدست می‌آید (شکل (۳-۲۲)). در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر چهار واحد مخزنی نسبت به حالت قبل تغییری نداشته است. بنابراین به ازای مقادیر مختلف A ، B و C ضرایب تعیین برای هر ۴ واحد مخزنی مذکور تغییر نمی‌کند بنابراین برای ساده نمودن اندیس مورد نظر مقدار این ضرایب برابر یک در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳-۲۲): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی $K1$ ، $K2$ ، $K3$ و $K4$ در حالت سوم

۳-۵-۲-۴. حالت چهارم

در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر α ، β و γ همانند حالت قبل به ترتیب برابر با ۰/۴،

۰/۱ و ۱ انتخاب می‌شود معادله‌ی (۳-۱۱) به صورت زیر می‌شود:

$$DRQI = \frac{k^{0.4} \times \phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۳۹)$$

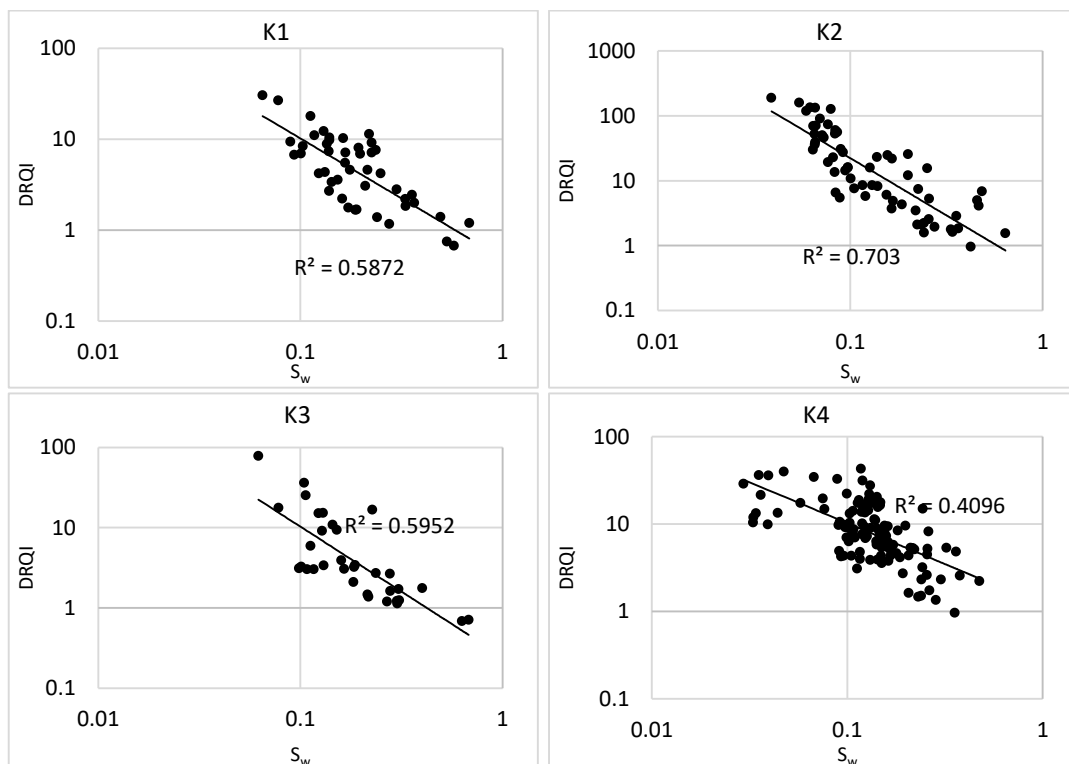
و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (k^{0.4} \times \phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۴۰)$$

با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین

برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر

۰/۵۸۷۲، ۰/۷۰۳۰، ۰/۵۹۵۲ و ۰/۴۰۹۶ بدست می‌آید (شکل (۳-۲۳)).



شکل (۳-۲۳): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت چهارم

۳-۵-۲. حالت پنجم

در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر β و γ همانند حالت قبل به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۱ انتخاب می‌شود ولی مقدار α افزایش و برابر با ۰/۴۱ قرار داده می‌شود معادله‌ی (۳-۱۱) به صورت زیر می‌شود:

$$DRQI = \frac{k^{0.41} \times \phi^{0.1}}{S_w} \quad (۳-۴۱)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

$$\log DRQI = \log (k^{0.41} \times \phi^{0.1}) - \log S_w \quad (۳-۴۲)$$

در این حالت نیز با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر ۰/۵۷۸۷، ۰/۶۹۷۵، ۰/۵۸۸۴ و ۰/۳۹۷۵ بدست می‌آید. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر چهار واحد مخزنی نسبت به حالت قبل کاهش یافته است (شکل (۳-۲۴)).

۳-۵-۲.۶. حالت ششم

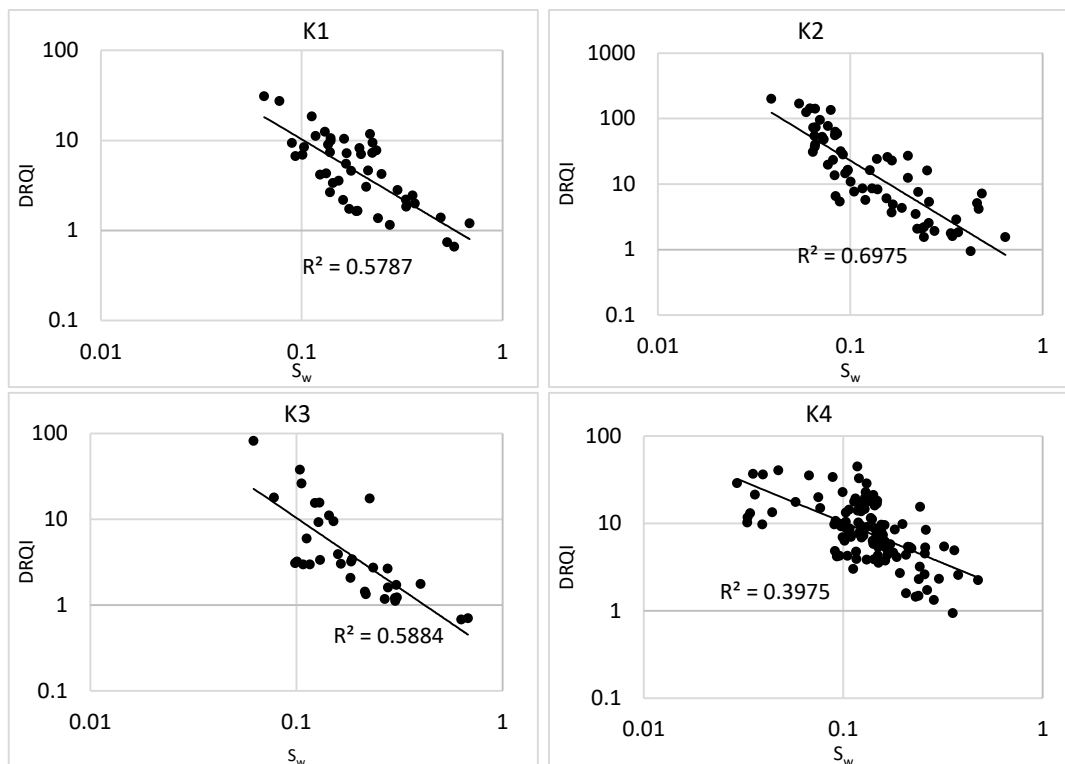
در این حالت مقادیر A، B و C برابر ۱ و مقادیر α و γ همانند حالت چهارم به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۱ انتخاب می‌شود ولی مقدار β برابر با ۰/۱۱ قرار داده می‌شود معادله‌ی (۳-۱۱) به صورت زیر می‌شود:

$$DRQI = \frac{k^{0.4} \times \phi^{0.11}}{S_w} \quad (۳-۴۳)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

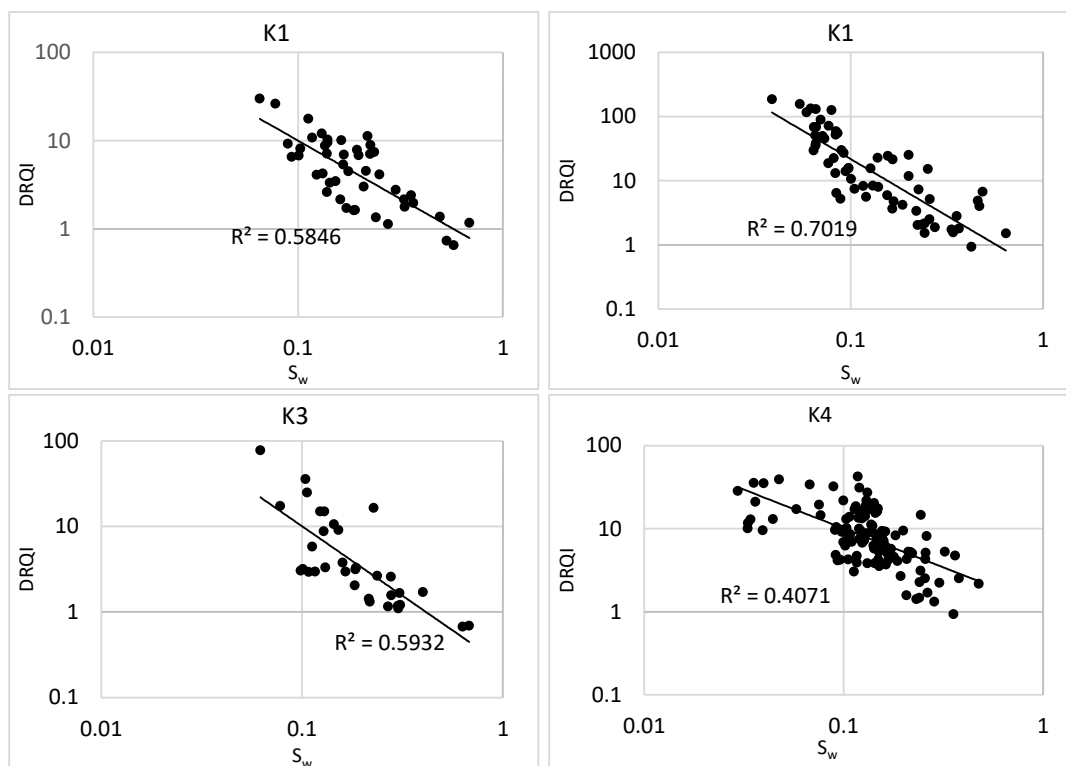
$$(۳-۴۴)$$

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



شکل (۳-۲۴): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت پنجم

با رسم مقادیر DRQI بر حسب S_w در مقیاس تمام لگاریتمی و برازش منحنی خطی، ضرایب تعیین برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 سازندهای کنگان و دالان میدان مورد مطالعه به ترتیب برابر ۰/۵۸۴۶، ۰/۷۰۱۹، ۰/۵۹۳۲ و ۰/۴۰۷۱ بدست می‌آید. در این حالت مقادیر ضرایب تعیین برای هر چهار واحد مخزنی نسبت به حالت چهارم کاهش یافته است (شکل (۳-۲۵)).



شکل (۳-۲۵): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب برای واحدهای مخزنی K1، K2، K3 و K4 در حالت ششم

با مقایسه‌ی حالت‌های مختلف در دو روش تعیین لگاریتم DRQI، ضرایب تعیین (R^2) در روش

اول تعیین لگاریتم DRQI، مقادیر بیشتری را نسبت به روش دوم تعیین لگاریتم DRQI دارا

می‌باشند (جدول (۳-۴) و (۳-۵)). بنابراین روش اول تعیین لگاریتم DRQI به عنوان فرمولی جدید

برای تعیین کیفیت مخزن در نظر گرفته می‌شود.

جدول (۳-۴): ضرایب تعیین به ازای ضرایب و توان‌های مختلف برای هر دو روش تعیین لگاریتم DRQI برای حالت‌های اول، دوم و

سوم

member	$DRQI = \frac{4k + 2\phi}{S_w}$	$DRQI = \frac{4k \times 2\phi}{S_w}$	$DRQI = \frac{4k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{4k^{0.4} \times 2\phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{4.1k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{4.1k^{0.4} \times 2\phi^{0.1}}{S_w}$
K1	0.3265	0.2377	0.7845	0.5872	0.7786	0.5872
K2	0.5219	0.4707	0.7545	0.7030	0.7536	0.7030
K3	0.3884	0.3286	0.6966	0.5952	0.6950	0.5952
K4	0.0984	0.0594	0.5724	0.4096	0.5696	0.4096

جدول (۳-۵): ضرایب تعیین به ازای ضرایب و توان‌های مختلف برای هر دو روش تعیین لگاریتم DRQI برای حالت‌های چهارم،

پنجم و ششم

member	$DRQI = \frac{k^{0.4} + \phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{k^{0.4} \times \phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{k^{0.41} + \phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{k^{0.41} \times \phi^{0.1}}{S_w}$	$DRQI = \frac{k^{0.4} + \phi^{0.11}}{S_w}$	$DRQI = \frac{k^{0.4} \times \phi^{0.11}}{S_w}$
K1	0.9048	0.5872	0.9015	0.5787	0.8982	0.5846
K2	0.7838	0.7030	0.7775	0.6975	0.7823	0.7019
K3	0.7480	0.5952	0.7412	0.5884	0.7446	0.5932
K4	0.6654	0.4096	0.6532	0.4032	0.6610	0.4071

به منظور تعیین اعتبار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته برای سایر میادین با لیتولوژی‌های مختلف، مدل پیشنهادی بر روی داده‌های تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب یک حلقه چاه حفاری شده در سازند بورگان (میدان نوروز) واقع در جنوب غرب خلیج فارس و یک حلقه چاه حفاری شده در سازند سروک (میدان بلال) واقع در جنوب ایران اعمال شد که نتایج به ازای مقادیر مختلف A ، B ، C ، α ، β و γ در شکل‌های (۳-۲۶) و (۳-۲۷) و جدول (۳-۶) نشان داده شده است.

با بررسی حالت‌های مختلف در روش اول تعیین لگاریتم DRQI به ازای مقادیر A ، B و C برابر ۱ و α ، β و γ به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۱ و ۱ ضرایب تعیین برای هر ۴ واحد مخزنی کنگان و دالان و سازند سروک و همچنین به ازای α ، β و γ به ترتیب برابر ۰/۴، ۰/۱ و ۱ برای مخزن ماسه‌سنگی بورگان، بیشترین مقدار را نسبت به سایر حالت‌های ممکن دارند (شکل (۳-۲۶)، (۳-۲۷)، جدول (۳-۶)).

در این صورت معادله‌ی (۳-۱۰) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$DRQI = \frac{k^{\alpha} + \phi^{\beta}}{S_w^{\gamma}} \quad (۳-۴۵)$$

و یا به صورت لگاریتمی:

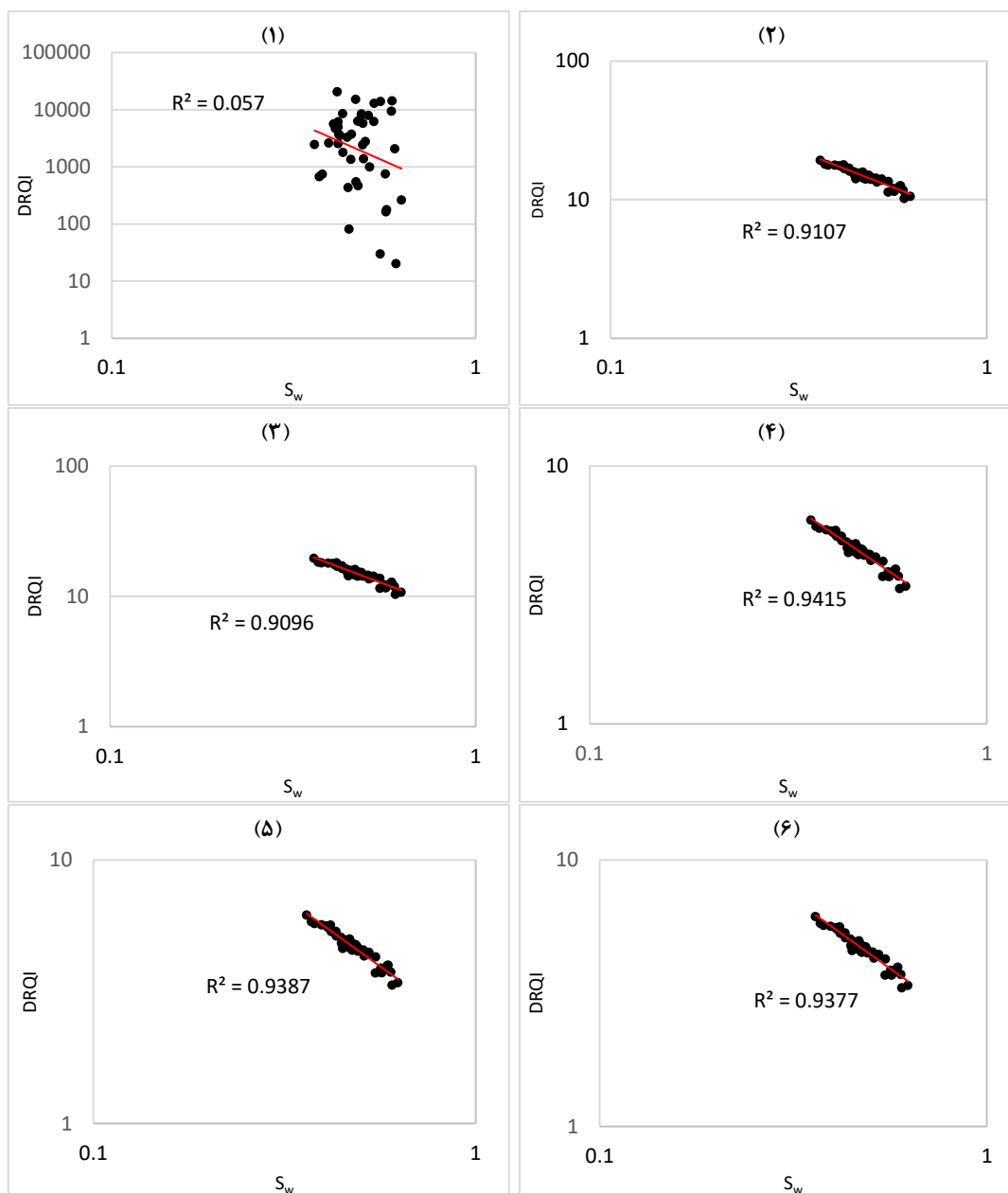
$$(۳-۴۶)$$

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

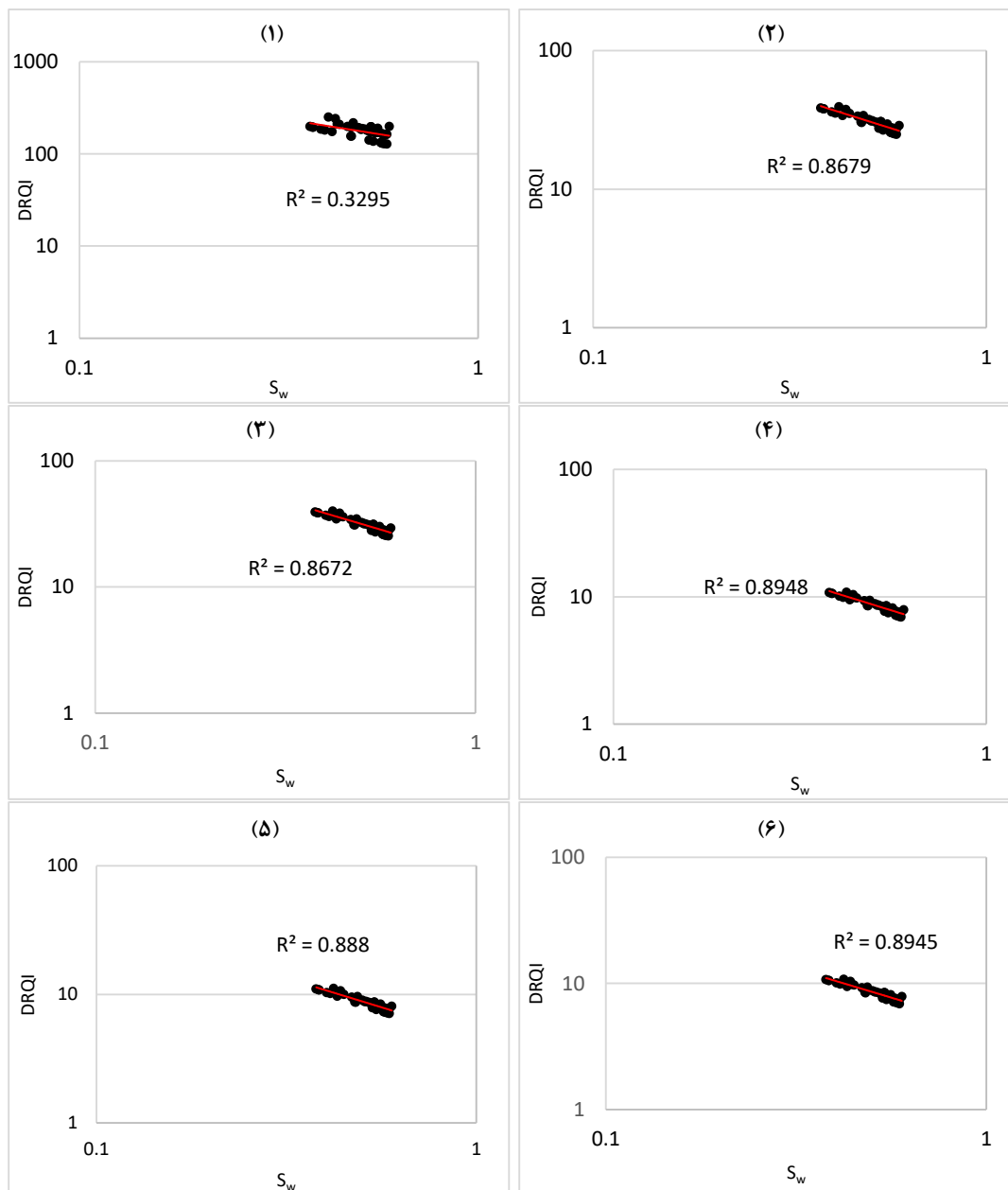
در صورت محاسبه‌ی اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته معرفی شده برای واحدهای مخزنی سازند کنگان (جدول (۷-۳)) بر اساس معادله‌ی (۴۵-۳) یا (۴۶-۳) با ضرایب و توان‌های تعیین شده، واحد مخزنی K2، کیفیت مخزنی بیشتری نسبت به واحد مخزنی K1، را دارا می‌باشد همچنین در صورت محاسبه‌ی اندیس معرفی شده برای واحدهای مخزنی سازند دالان فوقانی (جدول (۸-۳)) بر اساس معادله‌ی (۴۵-۳) یا (۴۶-۳)، واحد مخزنی K4، کیفیت مخزنی بیشتری نسبت به واحد مخزنی K3، را دارا می‌باشد.

جدول (۶-۳): فرمول اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به ازای مقادیر مختلف A، B، C، α، β و γ و ضریب تعیین برای سازند ماسه‌سنگی بورگان و سازند آهکی سروک

سازند بورگان	فرمول	ضریب تعیین	سازند سروک	فرمول	ضریب تعیین
(۱)	$DRQI = \frac{4k + 2\phi}{S_w}$	۰/۰۵۷۰	(۱)	$DRQI = \frac{4k + 2\phi}{S_w}$	۰/۳۲۹۵
(۲)	$DRQI = \frac{4k^{0.04} + 2\phi^{0.01}}{S_w}$	۰/۹۱۰۷	(۲)	$DRQI = \frac{4k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۶۷۹
(۳)	$DRQI = \frac{4.1K^{0.04} + 2\phi^{0.01}}{S_w}$	۰/۹۰۹۶	(۳)	$DRQI = \frac{4.1k^{0.4} + 2\phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۶۷۲
(۴)	$DRQI = \frac{k^{0.04} + \phi^{0.01}}{S_w}$	۰/۹۴۱۵	(۴)	$DRQI = \frac{K^{0.4} + \phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۹۴۸
(۵)	$DRQI = \frac{k^{0.041} + \phi^{0.01}}{S_w}$	۰/۹۳۸۷	(۵)	$DRQI = \frac{k^{0.41} + \phi^{0.1}}{S_w}$	۰/۸۸۸۰
(۶)	$DRQI = \frac{k^{0.04} + \phi^{0.02}}{S_w}$	۰/۹۳۷۷	(۶)	$DRQI = \frac{k^{0.4} + \phi^{0.11}}{S_w}$	۰/۸۹۴۵



شکل (۳-۲۶): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب به ازای مقادیر مختلف A ، B ، C ، α و β برای سازند ماسه‌سنگی بورگان در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غرب خلیج فارس



شکل (۳-۲۷): نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته به صورت تابعی از اشباع‌شدگی از آب به ازای مقادیر مختلف A ، B ، C ، α ، β و γ برای سازند سروک در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران

جدول (۷-۳): مقادیر متوسط، مینیمم و ماکزیمم تراوایی (k)، تخلخل مؤثر (ϕ_e)، اشباع آب (S_w) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) زون خالص تولیدی واحدهای مخزنی سازند کنگان در چاه مورد مطالعه

Member	Depth(m)		$k(mD)$	$\phi_e(\%)$	$S_w(\%)$	DRQI
K1	2860.5 2967.5	Mean	2.713	12.12	21.67	6.0590
		min	0.107	2.67	6.508	1.8201
		max	15.794	29.3	68.53	15.1783
K2	2967.5 3013	Mean	47.3712	13.72	16.94	45.1088
		Min	0.193	3.66	3.900	3.0439
		Max	468.511	29.5	64.09	243.32

جدول (۸-۳): مقادیر متوسط، مینیمم و ماکزیمم تراوایی (k)، تخلخل مؤثر (ϕ_e)، اشباع آب (S_w) و اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته (DRQI) زون خالص تولیدی واحدهای مخزنی سازند دالان فوقانی در چاه مورد مطالعه

Member	Depth(m)		$k(mD)$	$\phi_e(\%)$	$S_w(\%)$	DRQI
K3	3013 3133	Mean	6.6112	7.58	21.23	15.4789
		Min	0.1030	2.76	6.20	2.0623
		Max	75.582	23.03	68.00	104.87
K4	3133 3291	Mean	7.05	17.15	14.83	20.3807
		Min	0.111	2.57	2.94	3.3948
		Max	81.255	31.07	47.5	68.7820

۳-۶. روش انتگرال‌های فازی

برای رتبه‌بندی و اولویت‌بندی لایه‌های مخزنی بر اساس کیفیت هر کدام از لایه‌ها می‌توان از روش‌های ترکیب اطلاعات استفاده نمود. از نقطه نظر ترکیب داده/اطلاعات، برای ترکیب تصمیم‌های مقدماتی که هر یک بر اساس اطلاعات برگرفته از یک منبع اطلاعاتی اتخاذ شده‌اند یک عملگر تجمیع^۱ می‌تواند به کار رود تا تصمیمی قابل اطمینان‌تر و و صحیح‌تر نسبت به تصمیمی که فقط براساس یک منبع اطلاعاتی گرفته می‌شود اخذ گردد. هدف نهایی استفاده از انتگرال فازی ترکیب تصمیم‌های برگرفته از منابع اطلاعاتی مختلف با توجه به توانایی و خبرگی آنهاست. انتگرال فازی به عنوان یک

^۱ Aggregation operator

ترکیب کننده‌ی طبقه‌بندی کننده‌ها، تاکنون در کاربردهای مختلف موفقیت‌های زیادی داشته است (Kazemian et al, 2007; Grabisch, 1995)

این روش‌ها با استفاده از تلفیق منابع اطلاعاتی چندگانه یک سیستم تصمیم‌گیری ارائه می‌کنند. انتگرال‌های فازی به عنوان یکی از قدرتمندترین و انعطاف‌پذیرترین عملگرهای ترکیب اطلاعات شناخته می‌شوند که اولین بار توسط سوگنو (۱۹۷۲) ارائه شدند. این انتگرال‌ها را می‌توان در بسیاری از تصمیم‌گیری‌های برنامه‌های کاربردی استفاده کرد؛ به طوری که اجازه می‌دهند اطلاعات تحت فرضیات مختلف با منبع اطلاعاتی مستقل با هم ترکیب شوند، حتی زمانی که منابع اطلاعاتی مستقل از هم نیستند (Torra and Narukawa, 2006). فلسفه‌ی ترکیب کننده‌های فازی این است که نه تنها قدرت تأثیر گذاری هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها را به صورت تنها بررسی می‌کند، بلکه قدرت تأثیرگذاری هر زیر مجموعه از طبقه‌بندی کننده‌ها را نیز جداگانه بررسی می‌نمایند. این قدرت تأثیرگذاری را اندازه فازی می‌نامند. به دلیل اینکه این انتگرال‌ها می‌توانند ارتباط میان معیارها را مدل کنند، در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. در ادامه الگوریتم استفاده شده برای پرکاربردترین انتگرال‌های فازی، یعنی انتگرال سوگنو که یک ترکیب کننده‌ی غیر خطی است و انتگرال چوکویت که یک ترکیب کننده‌ی خطی است، در انتخاب لایه با بهترین کیفیت بیان شده است (Kuncheva, 2004). اگر $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ یک مجموعه از ورودی‌های مسئله مورد بررسی باشد و $P(x)$ مجموعه توانی X باشد، آنگاه تابع $g : P(x) \rightarrow [0,1]$ برای اندازه‌گیری فازی تعریف می‌گردد که شرایط (۳-۴۷)، (۳-۴۸) و (۳-۴۹) را ارضا می‌کند:

$$g(\emptyset) = 0, g(X) = 1 \quad (۳-۴۷)$$

$$\text{if } A, B \in P(X) \text{ and } A \subset B \rightarrow g(A) \leq g(B) \quad (۳-۴۸)$$

$$\text{if } A, B \subset X, A \cap B = \emptyset \rightarrow g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B) \quad (۳-۴۹)$$

در حالت کلی که λ ، که چگالی فازی نامیده می‌شود، می‌تواند با توجه به شرایط مرزی g_λ تعیین گردد. مقدار λ با استفاده از معادله‌ی $g(X)=1$ و با حل معادله‌ی زیر بدست می‌آید (Kuncheva, 2004):

$$g_{\lambda}(X) = \frac{1}{\lambda} \left(\prod_{i=1}^n (1 + \lambda g^i) - 1 \right) \quad \lambda \neq 0 \quad (50-3)$$

در صورتی که $A_i = \{x_{\pi_1}, x_{\pi_2}, \dots, x_{\pi_m}\}, i=1, \dots, n$ باشد مقدار $g(A_i)$ به صورت بازگشتی با استفاده از روابط (51-3) و (52-3) تعیین می‌شود:

$$g(A_1) = g(\{x_1\}) = g_1 \quad (51-3)$$

$$g(A_i) = g^i + g(A_{i-1}) + \lambda g^i g(A_{i-1}) \quad 1 < i \leq n \quad (52-3)$$

با فرض اینکه $h(x_i)$ مقدار پارامتر λ در مجموعه X و g معیار فازی تعریف شده بروی این مجموعه باشد، انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت به ترتیب مطابق با روابط (53-3) و (54-3) تعریف می‌شوند:

$$\int_s h.g = \bigvee_{i=1}^n (h(x_{\pi_i}) \cap g(A_i)) \quad (53-3)$$

$$\int_c h.g = \sum_{i=1}^n h(x_{\pi_i}) [g(A_i) - g(A_{i-1})] \quad (54-3)$$

که در آن $h(x_{\pi_1}) \geq h(x_{\pi_2}) \geq \dots \geq h(x_{\pi_n})$ و $h(x_{\pi_0}) = 0$ است (Kuncheva, 2004).

در این روش برای تعیین اهمیت نسبی معیارها (g_i) در انتخاب لایه‌ی با بهترین کیفیت و همچنین به منظور تعیین قابلیت اطمینان به پاسخ هر معیار ($h(x_i)$) در انتخاب این لایه، مقادیر مختلف برای هر ویژگی براساس اثر و اهمیت هر کدام بر کیفیت مخزن در نظر گرفته شد.

۳-۶-۱. نتایج انتگرال فازی

جهت رتبه‌بندی لایه‌های مخزنی به لحاظ کیفیت، به ترتیب پارامترهای تراوایی، تخلخل مؤثر و اشباع‌شدگی از آب انتخاب شد. بر اساس اهمیت هر کدام در کیفیت مخزن بیشترین وزن به تراوایی و کمترین وزن به پارامتر اشباع از آب تعلق گرفت. با استفاده از روش انتگرال‌های فازی و با به کارگیری همه‌ی اطلاعات و دخیل نمودن همه اوزان معیارها، طبقه‌بندی و رتبه‌بندی جامعی از همه‌ی واحدهای مخزنی صورت گرفت. برای این منظور الگوریتم مورد بحث در بخش قبلی در نرم‌افزار MATLAB به کار گرفته شد و در نهایت مطابق جدول‌های (9-3) تا (12-3) نتایج رتبه‌بندی هر یک از واحدهای

مخزنی سازندهای کنگان و دالان توسط انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت نشان داده شد. همان‌طور که در جدول‌های (۹-۳)، (۱۰-۳)، (۱۱-۳) و (۱۲-۳) مشاهده می‌شود، واحد مخزنی K2 سازند کنگان در چاه مورد مطالعه به دلیل تراوایی بسیار مناسب، اشباع آب کم و تخلخل خیلی خوب نسبت به واحد مخزنی K1 این سازند به ازای وزن‌های مختلف در اولویت اول قرار می‌گیرد؛ به طوری که صحت این موضوع توسط هر دو انتگرال فازی سوگنو و چوکویت تأیید شده است. همچنین واحد مخزنی K4 سازند دالان فوقانی در چاه مورد مطالعه به دلیل اشباع آب کم و تخلخل خیلی خوب نسبت به واحد مخزنی K3 این سازند به ازای وزن‌های مختلف معیارها، در اولویت اول قرار می‌گیرد؛ به طوری که صحت این موضوع نیز توسط هر دو انتگرال فازی سوگنو و چوکویت نیز تأیید شده است.

جدول (۹-۳): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و سازند دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع آب

رتبه لایه	زون	سازند	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	تراوایی (میلی داریسی)	امتیاز انتگرال فازی سوگنو	امتیاز انتگرال فازی چوکویت
۱	K2	کنگان	۳۷	۱۵/۶	۹/۵	۴۷/۳۷	۰/۲۵۱۲	۰/۱۵۴۵
۲	K1		۷۹	۲۰/۹	۷/۲	۲/۷۱	۰/۲۰۲۷	۰/۱۰۶۳
۱	K4	دالان	۱۴۱	۱۸/۳	۱۰/۷	۷/۰۵	۰/۱۹۹۵	۰/۱۳۳۳
۲	K3		۷۱	۱۹/۲	۶/۶	۶/۶۱	۰/۱۴۵۵	۰/۰۷۵۰

جدول (۱۰-۳): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و سازند دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۴، ۰/۱ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع آب

رتبه لایه	زون	سازند	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	تراوایی (میلی داریسی)	امتیاز انتگرال فازی سوگنو	امتیاز انتگرال فازی چوکویت
۱	K2	کنگان	۳۷	۱۵/۶	۹/۵	۴۷/۳۷	۰/۱۷۷۶	۰/۱۲۸۱
۲	K1		۷۹	۲۰/۹	۷/۲	۲/۷۱	۰/۱۶۵۴	۰/۰۷۳۳
۱	K4	دالان	۱۴۱	۱۸/۳	۱۰/۷	۷/۰۵	۰/۱۵۰۵	۰/۰۸۳۱
۲	K3		۷۱	۱۹/۲	۶/۶	۶/۶۱	۰/۱۲۵۱	۰/۰۵۹۰

جدول (۳-۱۱): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و سازند دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۸، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع آب

رتبه لایه	زون	سازند	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	تراوایی (میلی داری)	امتیاز انتگرال فازی سوگنو	امتیاز انتگرال فازی چوکویت
۱	K2	کنگان	۳۷	۱۵/۶	۹/۵	۴۷/۳۷	۰/۲۴۸۷	۰/۱۳۸۶
۲	K1		۷۹	۲۰/۹	۷/۲	۲/۷۱	۰/۱۹۶۵	۰/۰۶۵۸
۱	K4	دالان	۱۴۱	۱۸/۳	۱۰/۷	۷/۰۵	۰/۱۹۷۱	۰/۰۷۷۴
۲	K3		۷۱	۱۹/۲	۶/۶	۶/۶۱	۰/۱۴۳۶	۰/۰۵۶۱

جدول (۳-۱۲): ارزیابی معیارها و اولویت بندی زون‌های مخزنی سازند کنگان و دالان با استفاده از انتگرال فازی سوگنو و انتگرال فازی چوکویت در چاه مورد مطالعه به ازای ضرایب وزنی ۰/۶، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای تراوایی، تخلخل و اشباع آب

رتبه لایه	زون	سازند	ضخامت (متر)	اشباع آب (درصد)	تخلخل (درصد)	تراوایی (میلی داری)	امتیاز انتگرال فازی سوگنو	امتیاز انتگرال فازی چوکویت
۱	K2	کنگان	۳۷	۱۵/۶	۹/۵	۴۷/۳۷	۰/۲۵۰۴	۰/۱۶۱۱
۲	K1		۷۹	۲۰/۹	۷/۲	۲/۷۱	۰/۱۹۹۴	۰/۱۰۱۲
۱	K4	دالان	۱۴۱	۱۸/۳	۱۰/۷	۷/۰۵	۰/۱۹۸۱	۰/۱۲۹۳
۲	K3		۷۱	۱۹/۲	۶/۶	۶/۶۱	۰/۱۴۴۴	۰/۰۷۳۰

۳-۷. جمع بندی

در این فصل ابتدا ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد نظر به کمک نگارهای پتروفیزیکی (شامل نگار تخلخل، چگالی، صوتی، گاما و فوتوالکتریک) با استفاده از روش احتمالی در نرم افزار Geolog انجام شد. براساس مطالعات انجام شده پس از محاسبه ی پارامترهای مورد نیاز، اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن برای هر سازند محاسبه و مقایسه شد. سپس نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته بر حسب اشباع شدگی از آب برای سازندهای مختلف به ازای ضرایب و توانهای مختلف رسم شد، در صورتی که 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 اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته بر حسب اشباع‌شدگی از آب برای هر چهار بخش مخزنی سازندهای کنگان و دالان، افزایش می‌یابد به منظور تعمیم رابطه برای سایر مخازن با لیتولوژی‌های مختلف، این اندیس تعریف شده برای سازند بورگان و سازند سروک نیز استفاده شده است. با توجه به اهمیت بیشتر تراوایی نسبت به تخلخل در کیفیت مخزن، مقادیر α و β با سعی و خطا به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۱ برای بخش‌های مختلف سازندهای کنگان و دالان و سازند سروک و برابر با ۰/۰۴ و ۰/۰۱ برای سازند بورگان انتخاب شد. در صورت افزایش مقادیر α و β به مقادیر ۰/۴۱ و ۰/۱۱ برای بخش‌های مختلف سازندهای کنگان و دالان و سازند سروک و برابر با ۰/۰۴۱ و ۰/۰۱۱ برای سازند بورگان، در این حالت مقادیر ضرایب تعیین در نمودار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته بر حسب اشباع‌شدگی از آب برای هر چهار بخش مخزنی سازندهای کنگان و دالان، سازند بورگان و سازند سروک کاهش می‌یابد.

بنابراین مقادیر α و β به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۱ برای بخش‌های مختلف سازندهای کنگان و دالان و سازند سروک و برابر با ۰/۰۴ و ۰/۰۱ برای سازند بورگان انتخاب شد. براساس نتایج ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان، بخش K4 سازند دالان بیشترین مقدار متوسط تخلخل مؤثر و بخش K2 بیشترین مقدار متوسط تراوایی مغزه در زون خالص تولیدی را دارا می‌باشند. با محاسبه‌ی مقدار اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته بر اساس ضرایب تعیین شده، بخش K2 سازند کنگان کیفیت مخزنی بهتری نسبت به بخش K1 این سازند و بخش K4 سازند دالان فوقانی کیفیت مخزنی بهتری نسبت به بخش K3 این سازند دارا می‌باشد. همچنین نتایج انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت به ازای وزن‌های مختلف برای هر کدام از پارامترهای تراوایی، تخلخل و اشباع آب نشان می‌دهد بخش K2 سازند کنگان در اولویت اول در این سازند و بخش K4 سازند دالان فوقانی نیز در رتبه‌بندی اول این سازند قرار می‌گیرد.

فصل چہارم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۴-۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پایان‌نامه، تعیین کیفیت زون‌های مخزنی و اولویت‌بندی آنها با رویکرد انتگرال‌های فازی در یکی از چاه‌های تولیدی در یکی از میادین جنوب ایران واقع در دریای خلیج فارس بود. برای این منظور ابتدا ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان در چاه مورد نظر به کمک نگارهای پتروفیزیکی (شامل نگار تخلخل، چگالی، صوتی، گاما و فوتوالکتریک) با استفاده از روش احتمالی در نرم‌افزار Geolog انجام شد. اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن برای هر کدام از واحدهای مخزنی این سازندها محاسبه شد. سپس بر اساس مطالعات صورت گرفته و با توجه به شرایط مخزن و داده‌های موجود در چاه مورد مطالعه، پارامترهای تراوایی، تخلخل و اشباع‌شدگی از آب به عنوان مهم‌ترین و اثر گذارترین معیارها در تعیین کیفیت لایه‌های مخزنی انتخاب شدند. سپس بر اساس این معیارها و ارتباط هر کدام از این معیارها بر کیفیت مخزن، اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته معرفی شد. در نهایت به منظور رتبه‌بندی و اولویت‌بندی لایه‌های مخزنی براساس کیفیت آنها از روش انتگرال‌های فازی سوگونو و چوکویت استفاده گردید.

با توجه به مطالب گفته شده در فصل‌های قبل، نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- بررسی نتایج آنالیز مغزه و نتایج ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان فوقانی با استفاده از روش پتروفیزیک احتمالی نشان می‌دهد که واحد مخزنی K2 سازند کنگان بیشترین مقدار متوسط تراوایی مغزه (۴۷ میلی داری) و واحد مخزنی K4 سازند دالان فوقانی دارای بیشترین مقدار متوسط تخلخل (۱۷ درصد) در زون خالص تولیدی دارا می‌باشند. واحد مخزنی K3 سازند دالان فوقانی دارای کمترین مقدار متوسط تخلخل (۷/۵۸ درصد) و واحد مخزنی K1 سازند کنگان دارای کمترین مقدار متوسط تراوایی (۲/۷ میلی داری) و بیشترین مقدار متوسط اشباع آب (۲۱/۶۷ درصد) را در زون خالص تولیدی می‌باشند. همچنین تخلخل محاسبه شده با استفاده از روش پتروفیزیک احتمالی تطابق خوبی (۹۰ درصد) را با تخلخل مغزه نشان می‌دهد.

۲- نتایج محاسبه‌ی اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن نشان می‌دهد که در سازند کنگان واحد مخزنی K1 مقدار متوسط FZI (۶۸) و همچنین مقدار متوسط RPI (۳۴) بیشتری را نسبت به واحد مخزنی K2 (مقدار FZI و RPI بخش K2 به ترتیب برابر ۵/۴۵ و ۲/۸۷) و همچنین بخش K2 این سازند دارای مقدار متوسط RQI (۰/۲۹ میکرومتر) و MRQI (۰/۲۸ میکرومتر) بیشتری نسبت به بخش K1 (مقدار RQI و MRQI بخش K1 برابر ۰/۱۵) این سازند دارا می‌باشد. بخش K3 سازند دالان فوقانی دارای مقادیر متوسط RQI (۰/۱۷ میکرومتر)، FZI (۱۱۳)، RPI (۵۶) و MRQI (۰/۱۶ میکرومتر) بیشتری نسبت به بخش K4 (مقادیر RQI، FZI، RPI و MRQI بخش K4 به ترتیب برابر ۰/۱۴، ۲۸، ۱۴ و ۰/۱۳ می‌باشد) این سازند (به دلیل تخلخل پایین بخش K3 نسبت به بخش K4) دارا می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن همیشه کیفیت واقعی مخزن را نشان نمی‌دهند. در این مورد بخش K4 دارای تراوایی (۴/۰۹ میلی داری) و تخلخل بالاتری (۱۳/۴۴ درصد) نسبت به بخش K3 (تراوایی و تخلخل بخش K3 به ترتیب ۱/۲۲ میلی داری و ۲/۰۸ درصد) است حال آن که بخش K3 در مقایسه با بخش K4 دارای مقادیر بالاتر اندیس کیفیت مخزن و مشتقات آن می‌باشد.

۳- با مقایسه‌ی حالت‌های مختلف در دو روش تعیین لگاریتم DRQI، ضرایب تعیین در روش اول تعیین لگاریتم DRQI، نسبت به روش دوم تعیین لگاریتم DRQI بالاتر می‌باشند. بنابراین روش اول تعیین لگاریتم DRQI را می‌توان به عنوان رابطه‌ای جدید و قابل اعتماد برای تعیین کیفیت مخزن در نظر گرفت. با بررسی حالت‌های مختلف رسم نمودار DRQI بر حسب S_w برای سازندهای مختلف در این روش، در صورتی که 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 بر S_w برای هر چهار بخش مخزنی سازندهای کنگان و دالان، سازند بورگان و سازند سروک افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به اهمیت بیشتر تراوایی نسبت به تخلخل در کیفیت مخزن، در صورتی که مقادیر α و β با روش سعی و خطا به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۱ برای بخش‌های مختلف سازندهای کنگان و دالان و سازند سروک و برابر با ۰/۰۴ و ۰/۰۱ برای سازند بورگان انتخاب شود، در این صورت

مقادیر ضرایب تعیین در نمودار DRQI بر حسب S_w برای هر چهار بخش مخزنی سازندهای کنگان و دالان فوقانی، سازند بورگان و سازند سروک بیشترین مقدار را نسبت به سایر حالتها دارند.

۴- با محاسبه‌ی مقدار DRQI بر اساس ضرایب و توان‌های تعیین شده، بخش K2 سازند کنگان مقدار متوسط DRQI بیشتری ($45/1$) نسبت به بخش K1 ($6/05$) و بخش K4 سازند دالان فوقانی دارای مقدار متوسط DRQI ($20/38$) بیشتری نسبت به بخش K3 ($15/47$) را دارا می‌باشند.

۵- نتایج نهایی حاصل از اولویت‌بندی انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت نشان می‌دهد که بر اساس پارامترهای انتخابی (تراوایی، تخلخل مؤثر و اشباع آب)، و به ازای وزن‌های اختصاص یافته به هر کدام از این پارامترها بر اساس اهمیت آنها در کیفیت مخزن، در سازند کنگان چاه مورد مطالعه، واحد مخزنی K2 کیفیت مخزنی بیشتری نسبت به واحد مخزنی K1 این سازند یا به عبارتی در اولویت اول و همچنین در سازند دالان فوقانی واحد مخزنی K4 کیفیت مخزنی بیشتری نسبت به واحد مخزنی K3 این سازند دارا می‌باشند.

۶- طبق مطالعه‌ی صورت گرفته، روش انتگرال‌های فازی، ابزار مناسبی برای اولویت‌بندی کیفیت لایه‌های مخزنی است. این روش رتبه‌بندی می‌تواند سهم عمده‌ای در روند تصمیم‌سازی و سرمایه‌گذاری‌های آتی در خصوص اجرای عملیات تولید و توسعه میدان ایفا کند. گرچه شاید مطالعات تجربی بر اساس داده‌های خام بتواند طبقه‌بندی اولیه و محدودی از لایه‌های مناسب ارائه نماید، ولی با استفاده از روش انتگرال‌های فازی می‌توان با بکارگیری همه اطلاعات و اعمال وزن‌های مناسب بر روی معیارهای تأثیرگذار، به طبقه‌بندی و اولویت‌دهی جامعی از همه‌ی لایه‌ها به منظور اولویت در تولید یا اولویت در توسعه دست یافت.

۷- نتایج بدست آمده از روش انتگرال‌های فازی سوگنو و چوکویت در رتبه‌بندی لایه‌های مخزنی به لحاظ کیفیت یکدیگر را تأیید می‌نمایند؛ همچنین انتگرال فازی چوکویت به دلیل آنکه نوعی عملگر جمع می‌باشد، نسبت به انتگرال فازی سوگنو نتایج دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تری ارائه می‌دهد. بنابراین می‌توان از این انتگرال در تصمیم‌گیری‌ها استفاده نمود.

۴-۲. پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، می‌توان موارد زیر را برای تحقیق بیشتر در این زمینه پیشنهاد نمود:

۱- همان طور که ذکر شد از مهم‌ترین ویژگی‌های پتروفیزیکی که کیفیت مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهند می‌توان به تخلخل، تراوایی، اشباع شدگی از آب و هیدروکربن، درصد حجم شیل و غیره اشاره نمود. حجم شیل یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی و توجه در کلیه مطالعات پتروفیزیکی و کیفیت مخزنی است. بنابراین پیشنهاد می‌شود این پارامتر نیز در کنار دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت مخزن در روابط کیفیت مخزن مورد بررسی قرار گیرد.

۲- در این پایان‌نامه تعیین مقادیر ضرایب A ، B و C و توان‌های α ، β و γ برای معرفی اندیس کیفیت مخزن توسعه یافته در چاه تولیدی در میدان مورد مطالعه با استفاده از آزمون سعی و خطا صورت گرفت. توصیه می‌شود با مطالعه بیشتر در این زمینه و پیدا نمودن روشی جدید و کد نویسی آن، مقادیر مناسب‌تر این ضرایب و توان‌ها محاسبه شود.

۳- در این پایان‌نامه برای تعیین زون تولید (زون خالص تولیدی) از روش حد برش‌ها استفاده شده است. برای این منظور فواصلی که دارای بالاترین میزان حجم هیدروکربن هستند، برای پارامترهای پتروفیزیکی محاسبه شده شروطی را در نظر گرفته و فواصلی که با شروط تعیینی صادق باشند به عنوان زون خالص تولیدی و سایر فواصل به عنوان زون ناخالص در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه اندیس ارائه شده برای زون‌های تولیدی تعریف شده است پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌های تعیین زون تولیدی استفاده شود.

۴- پیشنهاد می‌شود از دیگر روش‌های هوشمند در زمینه ترکیب اطلاعات مانند شبکه‌ی عصبی و سایر تصمیم‌گیری‌های چند معیاره نظیر AHP فازی، Topsis، Saw، Vikor و ANP نیز برای انتخاب بهترین بخش مخزنی با بهترین کیفیت در میدان مورد مطالعه استفاده گردد و نتایج این روش‌ها با

یکدیگر مقایسه و یا ترکیب گردند تا بتوان با اطمینان بیشتری در مورد انتخاب لایه‌ی مخزنی با بهترین

کیفیت در چاه مورد مطالعه و میدان مورد مطالعه اظهار نظر کرد.

منابع و مأخذ

منابع و مآخذ فارسی

احمدی، ر.، امیری بختیار، م.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی خواص پتروفیزیکی سازند آسماری میدان نفتی بزرگ مارون واقع در جنوب غرب کشور با استفاده از نگارهای چاه پیمایی"، **زمین شناسی کاربردی پیشرفته**، ۶(۱۹)، ۲۲-۱۰.

باقری، ح.، خوشبخت، ف.، (۱۳۹۳)، "تعیین زون تولیدی به دو روش حد برش و خوشه بندی داده های لاگ در یک مخزن گازی کربناته"، **پژوهش نفت**، ۲۵(۸۱)، ۹۷-۱۱۱.

زینالی، م.، ۱۳۸۱، "پهنه بندی زون های مخزنی سازند آسماری میدان درود واقع در خلیج فارس با استفاده از سیستم های اطلاعات مکانی (GIS)"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده ی فنی، دانشگاه تهران، ۱۴۸ صفحه.

شعبانی کیا، ا.، ۱۳۹۶، "شناسایی زون های مطلوب برای عملیات شکست هیدرولیکی و اولویت بندی آنها با رویکرد انتگرال های فازی در تعدادی از چاه های جنوب غربی ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۱۷ صفحه.

مسعودی، پ.، (۱۳۹۰)، "شناسایی فازی زون های تولید هیدروکربن در مخازن کربناته با رویکرد ترکیب اطلاعات"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۵۴ صفحه.

نجم آبادی، س.، (۱۳۷۲)، "گزارش زمین شناسی چاه شماره ی ۱ میدان گازی پارس جنوبی"، **شرکت ملی نفت ایران**، گزارش زمین شناسی، چاپ نشده.

قاسم العسگری م. ک.، (۱۳۹۰)، "اصول پتروفیزیک"، انتشارات ستایش، ۴۹۹ صفحه.

مطیعی، ه.، (۱۳۸۷)، "زمین شناسی نفت سنگ های کربناتی"، جلد دوم، چاپ اول، انتشارات آراین زمین، تهران، ص ۴۵۱.

علائی، س.، ۱۳۹۶، "ارزیابی خواص پتروفیزیکی شیل گازی (سازند دشتک) توسط روش احتمالی در میدان نفتی سلمان"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۰۶ صفحه.

- Alavi, M. (2004). "Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution". *American journal of Science*, 304(1), 1-20.
- Al-Jallal, I. A. (1995). "The Khuff Formation: its regional reservoir potential in Saudi Arabia and other Gulf countries; depositional and stratigraphic approach". In *Middle East Petroleum Geosciences Conference, GEO* .Vol. 94, No. 1, pp. 103-119.
- Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G., & Keelan, D. K. (1993, January). "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.
- Amyx, J. W., Bass, D. M., & Whiting, R. L. (1960). "*Petroleum reservoir engineering*": *physical properties* (Vol. 1). McGraw-Hill College.
- Anderson, G. (1975). "Coring and Core Analysis Handbook", *Petroleum Publishing*, Tulsa, OK, 200 p. 590–594.
- Carman, P. C. (1939). "Permeability of saturated sands, soils and clays". *The Journal of Agricultural Science*, 29(2), 262-273.
- Cannon, D. E., & Coates, G. R. (1990, January). "Applying mineral knowledge to standard log interpretation". In *SPWLA 31st Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Carmen, P. C. (1937). "Fluid Flow through Granular Beds". *Trans. AIChE* V. 15, 150166.
- Coates, G., & Denoo, S. (1981). "The producibility answer product". *The Technical Review*, 29(2), 55-63.
- Cosentino, L. (2001). "Integrated reservoir studies". *Editions Technip*. Chicago
- Darcy, H.J. (1856). "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon", *Librairie de Corps Impé'riaux des Pontset Chaussée's etdes Mines*, Paris, p. 590–594.
- Ding, X., Tan, X., Li, L., Yan, Z., Zhao, Z., (2014). "Quantitative Evaluation Model of Carbonate Reservoirs Based on Multi-Level Fuzzy Theory". *J Geol Geosci.*, Vol. 3, pp. 143-149.

Ehrenberg, S. N., Nadeau, P. H., & Aqrawi, A. A. M. (2007). "A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East". *AAPG bulletin*, 91(3), 275-286.

Fertl, W. H. (1987). "Log-derived evaluation of shaly clastic reservoirs". *Journal of petroleum technology*, 39(02), 175-194.

Friedman, M. (1976). "Porosity, permeability, and rock mechanics-a review". In *The 17th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.

Gier, S., Worden, R. H., Johns, W. D., & Kurzweil, H. (2008). "Diagenesis and reservoir quality of Miocene sandstones in the Vienna Basin, Austria". *Marine and Petroleum Geology*, 25(8), 681-695.

Grabisch, M. (1995). "Fuzzy integral in multicriteria decision making". *Fuzzy sets and Systems*, 69(3), 279-298.

Hakimi, M. H., Shalaby, M. R., & Abdullah, W. H. (2012). "Diagenetic characteristics and reservoir quality of the Lower Cretaceous Biyadh sandstones at Kharir oilfield in the western central Masila Basin, Yemen". *Journal of Asian Earth Sciences*, 51, 109-120.

Hearst, J. R., & Nelson, P. H. (1985). "Well logging for physical properties".

Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., & Monibi, S. (2006). "Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture. *GEOARABIA-MANAMA*-, 11(2), 75.

Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A & Monibi, S. (2006). "Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostratigraphy and stratigraphic architecture". *GEOARABIA-MANAMA*-, 11(2), 75.

Izadi, M. (2009). "A New Approach to Hydraulic Flow Unit Determination and Its Application in Prediction of Petrophysical Properties of Oil and Gas Reservoirs", *MS thesis, University of Louisiana at Lafayette*, Lafayette, Louisiana, May. 1–75.

Izadi, M., & Ghalambor, A. (2013). "New approach in permeability and hydraulic-flow-unit determination". *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 16(03), 257-264.

Jin, L., Guiwen, W., Min, C., Shunan, W. A. N. G., Yu, C. H. A. I., Chao, C. A. I., ... & Jianlun, L. I. (2013). "Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: A case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin". *Petroleum Exploration and Development*, 40(5), 606-614.

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.

Kazemian, M., Moshiri, B., Nikbakht, H., & Lucas, C. (2007). "A new expertness index for assessment of secondary structure prediction engines". *Computational biology and chemistry*, 31(1), 44-47.

Klinkenberg, L. J. (1941, January). "The permeability of porous media to liquids and gases". In *Drilling and production practice*. American Petroleum Institute.

Koehrer, B. S., Heymann, C., Prousa, F., & Aigner, T. (2010). "Multiple-scale facies and reservoir quality variations within a dolomite body–outcrop analog study from the Middle Triassic, SW German Basin". *Marine and Petroleum Geology*, 27(2), 386-411.

Konert, G., Afifi, A. M., Al-Hajri, S. A., De Groot, K., Al Naim, A. A., & Droste, H. J. (2001). *AAPG Memoir 74*, "Chapter 24: Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate".

Kozeny, J. (1927). "Über kapillare leitung der wasser in boden". *Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I*, 136, 271-306.

Kuncheva, L. L. (2004). "Combining Pattern Classifiers, Methods and Algorithms", *A Wiley-Interscience Publication*, Hoboken, 350 pp.

Lucia, F. J. (2007). "Carbonate reservoir characterization: an integrated approach". Springer Science & Business Media.

Masoudi, P., Arbab, B., & Mohammadrezaei, H. (2014). Net pay determination by Dempster rule of combination: Case study on Iranian offshore oil fields. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 123, 78-83.

Mayer, C. Sibbit, A. (1980, January). "GLOBAL, a new approach to computer-processed log interpretation". In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Nabawy, B. S., & Al-Azazi, N. A. (2015). "Reservoir zonation and discrimination using the routine core analyses data: the upper Jurassic Sab'atayn sandstones as a case study, Sab'atayn basin, Yemen". *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), 5511-5530.

Pirson, S. J. (1977). "Oil reservoir engineering". *RE Krieger Publishing Company*. J.W. Amyx, D.M.

Quirein, J., Kimminau, S., La Vigne, J., Singer, J., & Wendel, F. (1986, January). "A coherent framework for developing and applying multiple formation evaluation models". In *SPWLA 27th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., & Tavakoli, V. (2010). "Dolomitization and Anhydrite Precipitation in Permo-Triassic Carbonates at the South Pars Gasfield, Offshore Iran: Controls on Reservoir Quality". *Journal of Petroleum Geology*, 33(1), 43-66.

Rider, M. H. (1986). "The geological interpretation of well logs".

Rui, Z., Lu, J., Zhang, Z., Guo, R., Ling, K., Zhang, R., & Patil, S. (2017). "A quantitative oil and gas reservoir evaluation system for development". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 42, 31-39.

Rui, Z., Metz, P. A., Reynolds, D. B., Chen, G., & Zhou, X. (2011). "Historical pipeline construction cost analysis". *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 4(3), 244-263.

Rui, Z., Metz, P. A., Reynolds, D. B., Chen, G., & Zhou, X. (2011). "Regression models estimate pipeline construction costs". *Oil and Gas Journal*, 109(14), 120.

Schlumberger Limited. (1991). "Log Interpretation Principles/Applications". *Schlumberger Educational Services*.

Schoen, J. H., & Schön, S. J. (2011). *Handbook of Petroleum Exploration and Production*.

Shieh, J. I., Wu, H. H., Liu, H.C. (2009). "Applying a complexity – based choquet integral to evaluate students' performance". *Expert systems with Application*, vol. 36, pp. 5100-5106.

- Sneider, R. M., King, H. R., Hawkes, H. E., & Davis, T. B. (1983). "Methods for detection and characterization of reservoir rock, deep basin gas area, western Canada". *Journal of Petroleum Technology*, 35(09), 1-725.
- Szabo, F., & Kheradpir, A. (1978). "PERMIAN AND TRIASSIC STRATIGRAPHY, ZAGROS BASIN, SOUTH-WEST IRAN". *Journal of Petroleum Geology*, 1(2), 57-82.
- Tahani H. and Keller J.M. (1990) "Information fusion in computer vision using the fuzzy integral Systems" *Man and Cybernetics*, 20, 3, pp. 733-741.
- Tiab, D. (1993). "Modern Core Analysis, Vol. I–Theory". *Core Laboratories, Houston, TX*.
- Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). "Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties". *Gulf professional publishing*.
- Torra, V., Narukawa, Y. (2006). "The interpretation of fuzzy in computer vision using the fuzzy integral systems". *International journal of approximate reasoning* 41(1), 43-58
- Wafra, M., & Youssef, F. Z. (1987, January). "An improved technique for estimating permeability in carbonates". In *Middle East Oil Show*. Society of Petroleum Engineers.
- Worthington, P. F. (2008). "The application of cutoffs in integrated reservoir studies". *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 11(06), 968-975.
- Worthington, P. F. (2011). "The Petrophysics of Problematic Reservoirs". SPE Society of Petroleum Engineers, 63(12), 88-97.

Abstract

The aim of petrophysical studies is the reservoir formation zoning, determination of net pay zones, and, finally, investigation of the reservoir quality of in different parts of the reservoir formation, and therefore, to determine the most suitable zones for optimal production from the reservoir and for more expert development of the hydrocarbon field. Porosity, water and hydrocarbon saturations, and permeability are the most important parameters that should be determined in petrophysical assessment to understand the reservoir quality. The purpose of this study is to determine the reservoir quality in different zones of Kangan and Dalan reservoir formations in a well located at one of hydrocarbon fields in south of Iran. This study was performed to evaluate the reservoir petrophysical characteristics of Kangan and Dalan formations. For this, petrophysical evaluation of these formations was carried out using multimin method in Geolog software. The multimin method is based on probabilistic and geostatistical techniques. In this study, the effective parameters on the reservoir quality comprising of porosity, permeability and water saturation were selected. Then, the effect of each of the parameters on the reservoir quality was investigated, and as a result, a new index or formula, called developed reservoir quality index (DRQI), was introduced. Based on the importance of each of these parameters in the introduced reservoir quality, different values were selected for the coefficients A, B, C, and powers α , β and γ in the formula, and consequently, the best values of these coefficients and powers were obtained by plotting the DRQI in terms of water saturation, and maximizing the amount of regression or determination coefficient. In order to determine the validity of the formula introduced as the DRQI for other reservoir formations having different lithologies, this formula was used for the Sarvak carbonate formation in an oil field, and also, for the Burgan sandstone formation. As a result, Different values were obtained for these coefficients and powers in the formula. The values of the developed reservoir quality index for zones K1 and K2 of the Kangan Formation is 45.1 and 6.06, respectively, and for zones K3 and K4 of the upper Dalan Formation is 15.48 and 20.38, respectively. The results of this study indicate that the zone K2 of the Kangan Formation and the zone K4 of the upper Dalan Formation have an appropriate reservoir quality in terms of the DRQI. Finally, to determine the priority of the reservoir zones in terms of the reservoir quality, the methods of Sogeno

and Choquet fuzzy integrals were used. The results of both methods are generally in agreement with each other. However, these results are associated with risk and uncertainty. The final results showed that the zone K2 of the Kangan formation and the zone K4 of Dalan formation like index introduced are in the first priority from the aspect of the reservoir quality.

Key Words: Kangan formation, Dalan formation, Porosity, Permeability, Water saturation, Developed reservoir quality index (DRQI), Fuzzy integrals.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics engineering
M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering - Exploration

Determination of reservoir quality in different zones of a hydrocarbon field in south of Iran

By: Hadi Ebrahimi

Supervisors:

Dr .Abolghasem Kamkar Rouhani
Dr .Mehrdad Soleimani Monfared

December 2017