

بهبود محاسبه اشباع آب در مخازن هیدروکربوری کربناته به کمک داده‌های چاه‌نگاری و آزمایشگاهی

علی مرادزاده^{۱*}، یاسر سلیمی دلشاد^۲ و عزت‌اله کاظم‌زاده^۳

استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران
^۲دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران
^۳استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۹۰/۲/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که لازم است با دقت زیاد محاسبه شود، میزان اشباع‌شدگی آب است. روش متداول برای این منظور، استفاده از داده‌های حاصل از نگارهای الکتریکی متفاوت و به‌کارگیری روابط مربوط است که در بعضی از موارد دارای دقت لازم نیست. از آنجا که داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های مغزه، دارای دقت زیاد است، در تحقیق حاضر تلاش می‌شود تا با بهره‌مندی از این داده‌ها، روشی بهبودیافته برای محاسبه اشباع‌شدگی آب در عمق‌های متفاوت یکی از مخازن هیدروکربوری کربناته عرضه شود. در این روش با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی، به روش تزریق جیوه و طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و همچنین استفاده از تابع لورت و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، میزان اشباع‌شدگی آب در چاه مورد بررسی و در پایان نتایج حاصل از این روش، با مقادیر اشباع‌شدگی آب به‌دست آمده از نگارهای چاه مقایسه می‌شود. نتایج حاصل و مقایسه آن با مقادیر اشباع‌شدگی حاصل از روش چاه‌نگاری نشان می‌دهد که با روش معرفی شده می‌توان میزان اشباع‌شدگی آب را در مخازن هیدروکربوری کربناته با خطایی کم و دقتی مناسب محاسبه کرد.

واژه‌های کلیدی: فشار موئینگی، اشباع‌شدگی آب، واحدهای جریان هیدرولیکی، مخازن هیدروکربوری کربناته

An improvement of water saturation calculation using well logs and laboratory data in carbonate hydrocarbon reservoirs

Moradzadeh, A.¹, Salimi Delshad, Y.² and Kazemzadeh, E.³

¹Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²M.Sc. in Mining Exploration Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³Assistant Professor, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

(Received: 10 May 2011, Accepted: 14 May 2013)

Abstract

One of the most important parameters in reservoir characterization is hydrocarbon saturation. It is assumed that all void spaces in a reservoir consist of water and hydrocarbon, therefore: $S_h = 1 - S_w$, wherein S_h and S_w are hydrocarbon and water saturation respectively. Since estimation of hydrocarbon saturation is not generally an easy task, it is recommended to determine the water saturation and predict the saturation of hydrocarbon using the above equation. The estimation of this important reservoir petrophysical parameter (i.e. S_w) is commonly determined by various electrical and prosity logs using the following formula (Moradzadeh and Ghavami, 2001) for a clean

$$\text{(non shaly) formation: } S_w = \left(\frac{a}{\phi^m} \times \frac{R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}}$$

where R_t is the corrected total electrical resistivity of formation obtained from resistivity logs, is porosity of the rock obtained by porosity logs such as sonic or density, R_w is the water resistivity obtained from self potential (SP) logs or production tests, is a constant which depends on rock type and tortuosity of the fluid path, and m and n are unknown cementation and saturation exponents which need to be determined by petrophysical studies using core data of each formation. The value of a is 0.6 for unconsolidated sandstones, 0.8 for consolidated sandstones and 1 for carbonates (Kamel and Mabrouk, 2002).

The porosity can be quite accurately determined from nuclear or acoustic logs. The uninvaded resistivity R_t is more difficult to obtain because all resistivity measurements are influenced by the resistivity of nearby layers and by the resistivity of the invaded zone in the immediate vicinity of the borehole wall. Generally, R_t is calculated through a combination of shallow, medium and deep resistivities from induction or laterolog tools.

Using of this method is not possible in shaly (unclean) and heterogeneous formations. In shaly sands, the presence of clay adds an additional conductivity. This additional conductivity will cause an error in water saturation estimation. In this cases various models of water saturation has been proposed (Worthington, 1985; Kamel and Mabrouk, 2003; Alimoradi, et al., 2011). In carbonate reservoirs, wide range and irregular distribution of pore sizes change the rock conductivity and adversely affects the precision of Archie's formula in S_w estimation. The effect of pore size and pore distribution in the evaluation of water saturation in these kind of rocks were studied in few research work in which the proposed equation of Lucia (2007) is perhaps the most significant contribution in this regards. As these methods are essentially based on well logs data and some assumption that may not be correct in some real practical cases, so in some situations the results of these methods are not so accurate.

As carbonate rock forms the most prominent hydrocarbon reservoirs in the world and in particular in the Middle East, therefore an accurate water saturation estimation method is highly required. In these reservoir rocks it seems a method based on the core data, hydraulic flow unit concept, capillary pressure and Leverett function which is established for clastic (sandstone) reservoir could be effective to estimate S_w precisely.

In this paper it is attempt to use a set of high accuracy laboratory core tests data to present an improved method for calculation of water saturation within a carbonate reservoir in the southern part of Iran. This method is implemented in the following 10 steps, once the reservoir carbonate rocks were classified using hydraulic flow units concept.

1. Calculation of J functions by Garrouch (1999) formula for all lab data using permeability (k), porosity (ϕ) and mercury injection capillary pressure (P_c) data of each rock sample as well as surface tension (σ) and contact angle (θ) of the fluid in lab condition.

2. Calculation of mean hydraulic radius for each core sample (RQI).

3. Plotting S_{wir} from P_c data against RQI and deriving the best equation. This can be used to predict S_{wir} for any given permeability (k) and porosity (ϕ) data.

4. Calculation of S_w^* by normalizing S_w ; $S_w^* = (S_w - S_{wir}) / (1 - S_{wir})$

5. Plotting J function against S_w^* and deriving equation of the straight line on a log-log plot for each hydraulic unit of the reservoir.

6. Calculation of height above free water level for the reservoir.

7. Calculation of P_c and then J functions using k , ϕ , and values of the reservoir for any

given height above oil-water or gas-oil contact.

8. Determination of S_w^* from the J versus S_w^* relationship derived in setp 5 and J function values determined in step 7.

9. Calculation of reservoir Sw, using S_w^* of step 8. ($S_w = S_w^* \cdot (1 - Sw_{ir}) + Sw_{ir}$)

10. Comparison of the calculated Sw (from step 9) with already available log Sw values.

In this study it has been shown how water saturation values within a well are estimated by integration of mercury injection capillary pressure data, classification of carbonate rocks using hydraulic flow units, and also relation between the Levert function and normalized water saturation. The obtained results and its comparison with those of well logs data indicates that the presented method is capable enough to determine water saturation in carbonate hydrocarbon reservoir precisely.

Keywords: Well logs, Capillary pressure, Water saturation, Hydraulic flow unit, Hydrocarbon carbonate reservoirs

۱ مقدمه

زیر را برای محاسبه اشباع‌شدگی آب در سازند ماسه‌سنگی تمیز با داشتن میزان تخلخل (ϕ) آن عرضه کرد (مرادزاده و قوامی ریایی، ۱۳۸۰):

$$S_w = \left(\frac{a}{\phi^m} \times \frac{R_w}{R_i} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

که در آن، پارامترهای a ، m (ضریب سیمان‌شدگی) و n (توان اشباعی) ثابت‌های مجهول و ناشناخته‌ای برای هر سازند هستند که مقادیر آنها را باید با بررسی‌های پتروفیزیکی و تجزیه و تحلیل مغزه در سازندهای گوناگون به دست آورد (لوتی، ۲۰۰۱؛ تیاب و دونالدسون، ۲۰۰۴). همان‌طور که در رابطه (۱) ملاحظه می‌شود، نگرهای مقاومت ویژه و تخلخل از مهم‌ترین نگرهای مورد استفاده در تعیین اشباع‌شدگی آب در رابطه تجربی و اساسی آرچی هستند. تخلخل سازند را با دقت قابل‌قبولی می‌توان از روی نگرهای متفاوت صوتی، چگالی و نوترون به دست آورد اما نگرهای مقاومت ویژه به شدت به حضور شیل و ناخالصی‌های رُس سنگ مخزن و همچنین نوع شاره موجود در سازندها حساس هستند. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که با حضور درصد کمی از کانی‌های رُسی در سنگ مخزن، درصد اشباع آب

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که لازم است با دقت زیاد محاسبه شود، میزان اشباع‌شدگی آب (S_w) است. 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 آب می‌تواند منجر به از دست دادن زون‌های بهره‌ده نفت شود. اگر در محاسبه اشباع‌شدگی آب، خطای خاصی رخ دهد، ممکن است برآورد زیاد، در مورد مخزنی با آب اشباع‌شدگی کم، سبب شود تا آن مخزن بلااستفاده رها شود. عکس این پدیده نیز ممکن است اتفاق بیفتد، بدین‌صورت که مخزن دارای اشباع‌شدگی 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 هیدروکربوری، محاسبه اشباع‌شدگی آب با استفاده از نگرهای چاه و به کارگیری فرمول‌های اشباع‌شدگی آب، صورت می‌گیرد. (آرچی، ۱۹۴۲) با بررسی تغییرات مقاومت ویژه واقعی مخازن هیدروکربوری (R_i) و آب‌سازندی (R_w) رابطه اساسی

به کمک فرمول آرچی، به علت کاهش مقاومت ویژه سازند، بیش از مقدار واقعی به دست می‌آید، لذا به کارگیری رابطه (۱) در این گونه موارد با خطای زیادی همراه خواهد بود (زمینک، ۱۹۸۹؛ لوتی، ۲۰۰۱). به همین دلیل محققان از راه‌های گوناگون سعی کرده‌اند تا با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از فرضیات و لحاظ کردن بعضی از عامل‌های موثر، روابطی را برای محاسبه اشباع آب در سازندهای رُس‌دار عرضه کنند (وکسمن و اسمیت، ۱۹۶۸؛ کلویر و همکاران، ۱۹۷۷؛ سن و همکاران، ۱۹۸۸).

از طرفی پیش‌بینی میزان اشباع آب در مخازن کربناته به علت ناهمگنی پارامترهای پتروفیزیکی، تغییرات گسترده اندازه حفره‌های موجود و همچنین ارتباط نداشتن ضرایب آرچی (ضریب سیمان‌شدگی m) و توان اشباع (n) با کانی‌شناسی و حفره‌های موجود در مخزن، همواره امری بسیار دشوار و پیچیده بوده است و همین مسئله باعث می‌شود تا مقادیر اشباع‌شدگی آب در سنگ‌های کربناته در گستره وسیعی از توان اشباع (n) دچار نوسان شود. این در حالی است که طبق آمار منتشر شده، میزان نفت تولیدی جهان، عمدتاً وابسته به سازندهای عظیم کربناته، به‌ویژه در حوزه‌های نفتی گوناگون خاورمیانه است. به همین علت روشی که بتواند مقدار این پارامتر پتروفیزیکی را با دقت قابل‌قبولی در مخازن هیدروکربوری برآورد کند، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است (الیس و سینگر، ۲۰۰۷). در سنگ‌های کربناته، همانند سازندهای آواری، معمولاً می‌توان از روابط و فرضیاتی که بین درصد اشباع آب با عوامل گوناگونی نظیر مقاومت ویژه شاره سازندی، فشار موئینه، نوع سنگ‌شناسی و نفوذپذیری نسبی و تخلخل وجود دارد، از راه‌های متفاوت برای برآورد اشباع آب استفاده کرد (آلن و همکاران، ۲۰۰۹).

همان‌طور که اشاره شد، پارامترهای لازم برای محاسبه

اشباع‌شدگی آب با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری، به عوامل و شرایط گوناگون حساس و با فرضیاتی همراه هستند که در مورد دقت این روش در شرایط گوناگون جای بحث است (بوری، ۱۹۸۵؛ فاکو و مان، ۱۹۸۷). چرا که روابط در اصل برای مخازن ماسه‌سنگی تمیز، عرضه شده است و برای مخازن شیل‌دار و کربناته با فرضیات و اصلاحاتی باید همراه باشد که در صورت اشتباه در فرضیات، قطعاً از دقت کار کاسته خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت که محاسبه اشباع‌شدگی آب در مخازن هیدروکربوری به‌خصوص مخازن هیدروکربوری کربناته با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری، امری بسیار دشوار و توأم با خطا است (لوتی، ۲۰۰۱). در این شرایط به نظر می‌رسد که به کارگیری روش دیگری که مبنای آن استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های مغزه، مفاهیم واحدهای جریان هیدرولیکی (Hydraulic Flow Units, HFU)، فشار موئینگی و تابع لورت (Leverett) برای محاسبه اشباع‌شدگی آب مخازن هیدروکربوری باشد، امری ضروری است.

هدف اصلی این مقاله به کارگیری داده‌های تجزیه و تحلیل مغزه و نگارهای چاه برای معرفی روشی بهبودیافته در محاسبه اشباع‌شدگی آب یکی از مخازن هیدروکربوری کربناته جنوب کشورمان است. لازم به ذکر است که این روش در اصل برای مخازن هیدروکربوری ماسه‌سنگی عرضه شده است و تاکنون موردی از استفاده و قابلیت‌های آن برای محاسبه اشباع آب در سنگ‌های کربناته گزارش نشده است. در این روش از راه تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش تزریق جیوه و طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و همچنین استفاده از تابع لورت و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، میزان اشباع‌شدگی آب در عمق‌های متفاوت مخزن محاسبه می‌شود. همچنین نتایج حاصل شده از این روش،

همکاران (۲۰۰۷) مشابه شاخص‌های کیفیت مخزنی، شاخص شعاع الکتریکی را برای توصیف خواص الکتریکی سنگ‌ها، در واحدهای جریان الکتریکی عرضه کردند.

۲ مواد و روش تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل کشش سطحی و زوایای تماس شماره‌ها در شرایط آزمایشگاهی و مخزنی (جدول ۱)، خواص پتروفیزیکی مثل تخلخل و نفوذپذیری آزمایشگاهی (جدول ۲) و داده‌های فشار موئینگی برای ۲۳ نمونه کربناته، و همچنین مقادیر اشباع‌شدگی آب و هیدروکربور در عمق‌های متفاوت و ستون سنگ‌شناسی حاصل از تفسیر نگارهای متفاوت (شکل ۱) چاه A در میدان گازی پارس جنوبی است.

روش کار محاسبه اشباع‌شدگی آب (S_w) در تحقیق حاضر بدین صورت است که داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل مغزه‌ها طبق مراحل زیر مورد پردازش قرار می‌گیرد: ۱- تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، ۲- محاسبه تابع لورت (J) برای همه نمونه‌ها، ۳- محاسبه اشباع آب کاهش نیافتنی (S_{wir})، ۴- محاسبه اشباع آب نرمال شده، ۵- به دست آوردن رابطه‌ای بین اشباع آب نرمال شده و تابع لورت، ۶- محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع‌های بالای سطح ایستابی آب، ۷- محاسبه تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب، ۸- محاسبه مقادیر S_w^* برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن، ۹- محاسبه مقادیر S_w برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن.

۱-۲ تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی

در واقع یک واحد جریان هیدرولیکی زیرمجموعه‌ای از کل گونه‌های سنگ مخزن است که با خواص زمین‌شناسی کنترل‌کننده جریان شماره سازگار و از سایر

با مقادیر اشباع‌شدگی آب به دست آمده از چاه‌نگاری بررسی می‌شود و مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

رابطه بین فشار موئینه و اشباع آب را می‌توان درحکم روشی مستقل از نگارها در برآورد اشباع آب برحسب عمق (ارتفاع) برای واسنجی کردن اشباع آب به دست آمده از نگارها و یا ارزیابی کیفیت و اشباع شاره‌های سنگ مخزن به کار برد. در این روش به اندازه‌گیری‌های خواص مغزه و داده‌های مربوط به فشار موئینه نیاز است. مدل‌های متعددی از اشباع- ارتفاع وجود دارد که تابع لورت یکی از این مدل‌ها است و به نحو گسترده‌ای همراه با طبقه‌بندی سنگ مخزن با لحاظ کردن مفهوم جریان هیدرولیکی برای توصیف فضای متخلخل به کار می‌رود (گوراج، ۱۹۹۹).

یک واحد جریان هیدرولیکی در حقیقت بخشی از مخزن است که از لحاظ خصوصیات کنترل‌کننده حرکت شاره و یا به عبارتی خصوصیات هیدرولیکی، با سایر بخش‌های مخزن متفاوت است (آمافیول و همکاران، ۱۹۹۳؛ عباس‌زاده و همکاران، ۱۹۹۶). محققان با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و به کارگیری نگارهای چاه توانستند تراوایی مخازن ماسه‌سنگی را به خوبی برآورد کنند (فهد و استفن، ۲۰۰۰) و همچنین با به کارگیری این مفهوم و لحاظ کردن داده‌های مغزه، توصیف مخازن کربناته را عملی سازند (شدید و ریاد، ۲۰۰۲). نتایج حاصل توصیف بهتر مخزن را با استفاده از مفهوم شاخص کیفیت مخزنی (Reservoir Quality Index, RQI) نسبت به روش‌های دیگر بیان می‌دارد. علاوه بر آن سودمندی استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی در بررسی ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل مخازن کربناته و همچنین بررسی رابطه بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزن در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران نیز مورد بررسی قرار گرفت (کاظم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹). رضایی و

کمیتی به نام شعاع هیدرولیکی میانگین ($r_{mh} = r/2$) و ترکیب آن با معادله کوزنی- کارمن برای بیان ارتباط نفوذپذیری (K) و تخلخل موثر (ϕ_e) سازندی با شعاع حفرات متوسط r است و به صورت رابطه (۲) عرضه می‌شود:

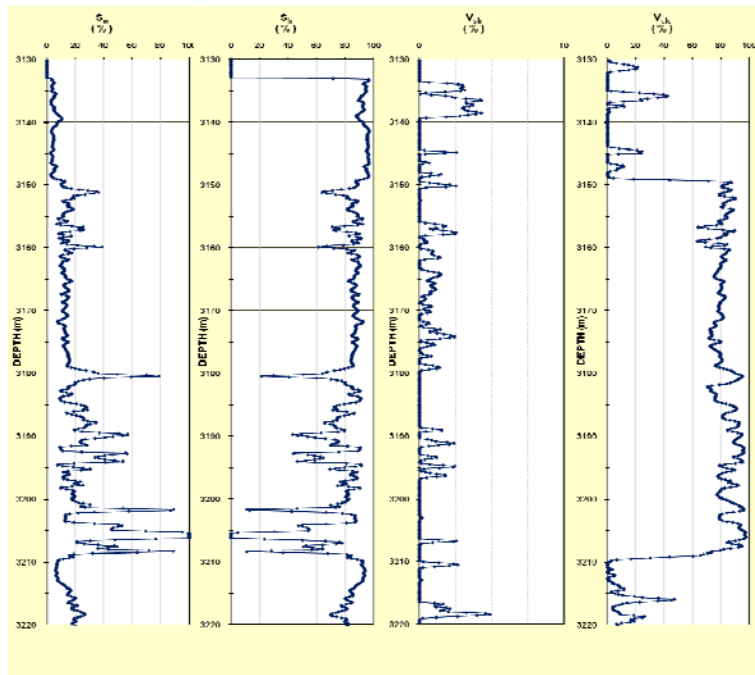
خواص قابل پیش‌بینی است. تیاب و همکاران، (۲۰۰۴) و همچنین آمیفول و همکاران، (۱۹۹۳) روشی را برای تعیین و توصیف یک سازند با خواص هیدرولیکی مشابه برمبنای اندازه‌گیری‌های میکروسکوپی مغزه‌های سنگی عرضه کردند. اساس روش عرضه شده برمبنای تعریف

جدول ۱. مقادیر کشش سطحی و زاویه تماس در شرایط آزمایشگاه و مخزن (پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۸۴).

سامانه	زاویه تماس (θ) درجه	کشش سطحی (σ) (dyne/cm)	$\sigma * \cos \theta$
گاز/آب نمک	۰	۵۰	۵۰
گاز/جیوه	۱۴۰	۴۸۰	۳۶۷

جدول ۲. داده‌های پتروفیزیکی حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته روی نمونه‌های مغزه (پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۸۴).

شماره نمونه‌ها	عمق (m)	نفوذپذیری (mD)	تخلخل %	چگالی gr/cm ³
۱	۲۸۹۶.۱	۱۰.۶۳۹	۱۱.۴۹	۲.۷۵
۲	۲۹۰۱.۱	۴.۸۹۲	۲۹.۰۸	۲.۷۱
۳	۲۹۰۴.۱	۳.۱۱۲	۲۳.۸۷	۲.۶۹
۴	۲۹۲۱.۹	۲۸.۹۸۲	۲۰.۰۴	۲.۸۵
۵	۲۹۲۵.۲	۳.۳۰۳	۱۹.۷۱	۲.۸۶
۶	۲۹۷۰.۲	۱۰.۴۶۵	۸.۷۶	۲.۸۶
۷	۲۹۷۴.۹	۱۷.۷۳۵	۱۲.۸	۲.۸۵
۸	۲۹۸۴.۴	۲۴۷.۷۸	۲۲.۳۳	۲.۸۴
۹	۲۹۸۹.۲	۱۳.۱۵۷	۲۲.۰۹	۲.۷۲
۱۰	۳۰۰۰.۲	۰.۹۶۲	۹.۶۹	۲.۷۲
۱۱	۳۰۱۷.۲	۴۴.۴۸۷	۱۷.۱۹	۲.۸۴
۱۲	۳۰۳۶.۹	۱.۰۹۳	۵.۹۸	۲.۸۶
۱۳	۳۱۳۴.۴	۱.۷۳۵	۱۲.۷۶	۲.۸۴
۱۴	۳۱۳۸.۵	۰.۹۸۵	۱۰.۱۷	۲.۸۶
۱۵	۳۱۴۷.۳	۱.۷۴۱	۲۱.۹	۲.۷۱
۱۶	۳۱۶۰.۴	۵.۰۱۸	۲۱.۳۹	۲.۷۱
۱۷	۳۱۶۲.۹	۱.۸	۲۱.۵۲	۲.۷۱
۱۸	۳۱۶۵.۵	۲.۸۸۸	۱۸.۰۳	۲.۷
۱۹	۳۱۶۸.۲	۱۳.۴۵۹	۲۰.۳۸	۲.۷۱
۲۰	۳۱۷۰.۵	۴۰.۲۴۸	۲۳.۶۵	۲.۷۱
۲۱	۳۱۸۳.۷	۴.۴۰۸	۱۹.۳۱	۲.۶۹
۲۲	۳۱۹۲.۸	۱.۲۲	۱۶.۸۸	۲.۷۲
۲۳	۳۲۰۰.۵	۲.۰۴۶	۲۰.۵۶	۲.۷۱



شکل ۱. نمودار تغییرات مقادیر اشباع‌شدگی آب و هیدروکربور، میزان شیل و میزان دولومیت حاصل از داده‌های چاه‌پیمایی.

$$RQI = \phi_z \times FZI \quad (۴)$$

که با گرفتن لگاریتم از دوطرف معادله (۴) خواهیم داشت:

$$\text{Log RQI} = \text{Log } \phi_z + \text{Log FZI} \quad (۵)$$

نمودار تغییرات RQI برحسب ϕ_z در یک مقیاس لگاریتمی کامل، خطی مستقیم با شیب واحد برای مخازن تمیز خواهد بود که محل تقاطع این خط مستقیم در $\phi_z = 1$ مقدار شاخص منطقه‌ای جریان (FZI) هر واحد جریان هیدرولیکی را نتیجه می‌دهد. نمونه‌هایی از داده‌های مغزه که روی چنین خط راستی قرار می‌گیرند ویژگی منافذ (گلوگاه) مشابهی دارند و بنابراین یک واحد هیدرولیکی جریان را شکل می‌دهند. این در حالی است که دیگر نمونه‌های با مقادیر متفاوت FZI روی سایر خطوط موازی یا در دیگر واحدهای هیدرولیکی جریان قرار می‌گیرند.

با توجه به موارد فوق برای هر واحد جریانی در اصل باید یک مقدار FZI وجود داشته باشد، ولی به سبب

$$K = \frac{\phi_e^3}{(1-\phi_e)^2} \times \frac{1}{F_S \tau^2 S_{gv}^2} \quad (۲)$$

که در آن، K تراوایی برحسب μm^2 ، F_S فاکتور شکل، τ پیچ‌پیچی مسیر شاره، $F_S \tau^2$ ثابت کوزنی و S_{gv} سطح ویژه بر واحد حجم دانه‌های سنگ هستند. با تقسیم دوطرف رابطه فوق بر ϕ_e و گرفتن جذر آنها رابطه ساده‌تری را می‌توان به صورت زیر به دست داد:

$$0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}} = \left[\frac{\Phi_e}{1-\Phi_e} \right] \frac{1}{\sqrt{F_S \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (۳)$$

که در آن، K برحسب میلی‌داریسی (mD) است و عدد ثابت 0.0314 ، برای تبدیل واحد K از μm^2 به میلی‌داریسی آورده شده است.

با معرفی شاخص منطقه‌ای جریان (Flow Zone Indicator, FZI)، شاخص کیفیت مخزنی (RQI) و نسبت حجم فضای منافذ به حجم خمیره سنگ یا نسبت پوکی ($\phi_z = \phi_e / (1 - \phi_e)$) رابطه (۳) به صورت زیر در می‌آید:

هزینه‌های بسیار زیاد و یا ممکن نبودن تهیه مغزه در بعضی نقاط از چاه نمی‌توان از این روش در تعیین Swir استفاده کرد. به همین سبب در این تحقیق سعی شد از روشی دیگری برای تعیین Swir، با استفاده از سایر پارامترها (θ) و (K) در نقاط دیگر چاه استفاده شود. بدین منظور ابتدا رابطه بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزن در هر واحد جریان هیدرولیکی به دست می‌آید و سپس میزان Swir مخزن (با داشتن مقادیر K و θ مخزن) پیش‌بینی می‌شود.

قبل از اینکه داده‌های فشار موئینه حاصل از تزریق جیوه را بتوان برای مخزن به کار برد، داده‌ها باید از سامانه هوا/جیوه آزمایشگاه به سامانه هیدروکربور/آب شور مخزن تبدیل شوند. این عمل با معادله زیر به انجام رسید (هسلر و پروئر، ۲۰۰۷).

$$Pc_{res} = Pc_{lab} \cdot \frac{(\sigma \cdot \cos \theta)_{res}}{(\sigma \cdot \cos \theta)_{lab}} \quad (7)$$

که در آن، مقادیر θ_r و θ_l به ترتیب زاویه تماس سامانه‌های هیدروکربور/آب شور، سنگ در مخزن و هوا/جیوه، سنگ در آزمایشگاه و همچنین σ_r و σ_l به ترتیب کشش‌های سطحی سامانه‌های هیدروکربور/آب شور و هوا/جیوه هستند.

مقادیر اشباع آب، از کم کردن میزان اشباع جیوه در هر مرحله از آزمایش تزریق جیوه از عدد ۱۰۰ به دست خواهد آمد. با رسم نمودار Pc در برابر Sw میزان Swir هر نمونه به دست آمد. اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نمونه عبارت است از اشباعی که در آن، منحنی پیش‌گفته، مجانب خط قائم شود (شکل ۲).

جدول ۳. مقادیر متوسط شاخص منطقه‌ای جریان (FZI) در هر واحد جریان هیدرولیکی.

۳	۲	۱	واحد جریان هیدرولیکی
۲/۷۰۴	۱/۰۰۹	./۴۲۶	مقادیر متوسط FZI

خطاهای موجود در تجزیه و تحلیل مغزه یک توزیع از FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود دارد. از این رو برای تعیین دقیق تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی در هر مخزن بایستی به طریقی تابع توزیع جداگانه اطراف FZI متوسط را به دست آورد که در این تحقیق نگارندگان مقاله با بهره‌گیری از نتایج دو روش تجزیه و تحلیل بافت‌نگار و مجموع مربع خطا و با استفاده از نرم‌افزار مت‌لب سه واحد جریان هیدرولیکی با مقادیر متفاوت FZI را مطابق جدول ۳ برای مخزن گازی مورد نظر نتیجه گرفته‌اند. جزئیات محاسبه روش‌های فوق در کار تحقیقی دیگر محققان عرضه شده است (کاظم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹).

۲-۲ محاسبه تابع لورت (J) برای همه نمونه‌ها

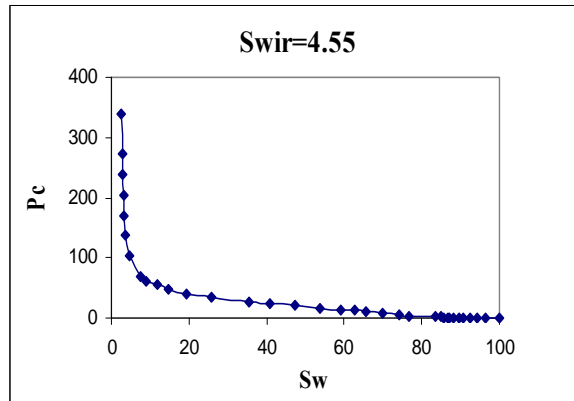
در این مرحله با استفاده از رابطه زیر (گوراج، ۱۹۹۹):

$$J_{sw} = \frac{0.217P_c}{\sigma \cos \theta} \sqrt{k/\phi} \quad (6)$$

و داشتن مقادیر فشار موئینی تزریق جیوه (P_c)، تخلخل (ϕ) و نفوذپذیری (K) هر نمونه و همچنین زاویه تماس (θ) و کشش سطحی (σ) شاره‌ها در شرایط آزمایشگاه (جدول ۱)، مقادیر تابع بدون بُعد لورت (J_{sw}) برای هر نمونه برحسب Pc محاسبه شد.

۳-۲ محاسبه اشباع آب کاهش نیافتنی (Swir)

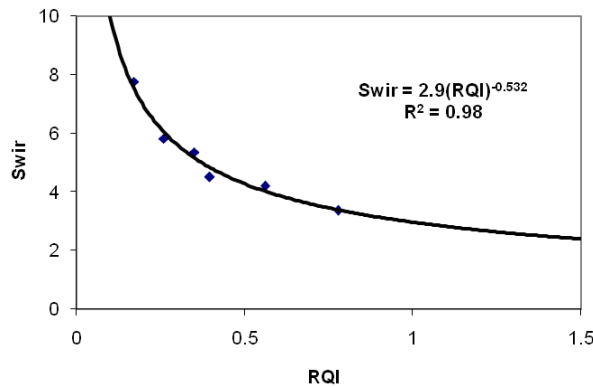
اشباع آب کاهش نیافتنی (Swir) یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخازن هیدروکربوری است که در بسیاری از محاسبات و مدل‌سازی‌های تحقیقات مخزن، نقش مؤثری ایفا می‌کند. تعیین Swir به روش‌های گوناگونی نظیر آزمایش‌های چاه، استفاده از داده‌های چاه‌نگاری و آزمایش مغزه صورت می‌گیرد. دقیق‌ترین و البته پُرهزینه‌ترین روش به منظور تعیین این پارامتر پتروفیزیکی، اجرای آزمایش مغزه است. اما به علت‌های گوناگونی نظیر



شکل ۲. به دست آوردن Swir با استفاده از نمودار Sw - Pc برای نمونه شماره ۹.

(Determination coefficient) بالا بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزن در واحدهای جریان هیدرولیکی سه گانه مطابق جدول ۴ محاسبه شد. پس از آن با در اختیار بودن مقادیر تراوایی و تخلخل مقدار شاخص کیفیت مخزن هر نمونه به دست آمد و در نهایت با استفاده از رابطه موجود بین Swir و RQI برای هر واحد جریان هیدرولیکی اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نقطه عمقی مورد نظر چاه محاسبه شد.

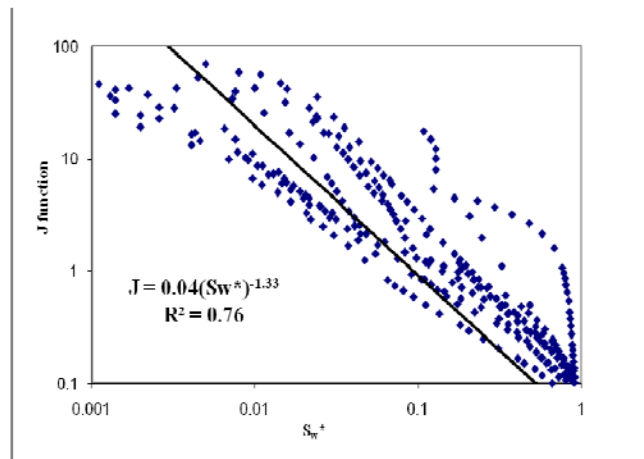
با آزمایش‌های فشار موئینگی به روش تزریق جیوه روی نمونه‌ها و تبدیل آنها به شرایط مخزن، مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نمونه مشخص شد. همچنین از آنجا که مقادیر تخلخل و نفوذپذیری هر نمونه موجود است، یک مقدار RQI برای هر نمونه محاسبه شد. پس از رسم نمودار جداگانه Swir بر حسب RQI برای نمونه‌های هر واحد جریان هیدرولیکی (شکل ۳)، معادلات بهترین توابع برازش شده بر آنها با مقدار ضریب تعیین



شکل ۳. رابطه بین Swir و RQI در واحد جریان هیدرولیکی ۳.

جدول ۴. معادلات بهترین توابع برازش شده بین Swir و RQI برای هر واحد جریان هیدرولیکی.

۳	۲	۱	واحد جریان هیدرولیکی
$S_{wirr} = 2.9(RQI)^{-0.53}$	$S_{wirr} = 2(RQI)^{-0.66}$	$S_{wirr} = 2.8(RQI)^{-0.31}$	رابطه بین Swir و RQI
0.98	0.87	0.97	مقدار ضریب تعیین (R^2)



شکل ۴. رابطه بین S_w^* و تابع J برای واحد جریان هیدرولیکی شماره ۱.

متفاوت محاسبه شد. واضح است که هر دو پارامتر پیش گفته، تابع‌هایی از فشار موئینگی هستند، بنابراین رابطه‌ای بین این دو پارامتر در فشارهای موئینگی متفاوت در هر نمونه وجود خواهد داشت. برای به دست آوردن رابطه موجود، مقادیر تابع J را برحسب اشباع آب نرمال شده نمونه‌های هر واحد جریان هیدرولیکی به صورت مجزا روی یک نمودار لگاریتمی کامل رسم می‌کنیم تا معادله‌ای بین این دو پارامتر در هر واحد جریان هیدرولیکی به دست آید. نتایج در شکل‌های ۴ تا ۶ آورده شده است.

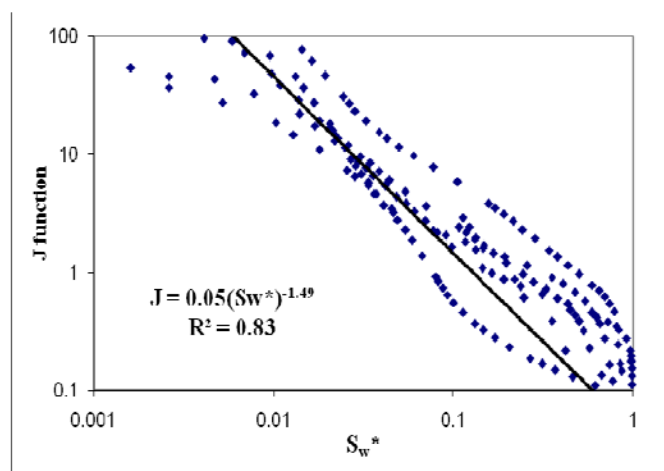
۴-۲ محاسبه اشباع آب نرمال شده

پس از محاسبه اشباع آب کاهش نیافتنی با استفاده از فرمول زیر اشباع آب نرمال شده (S_w^*) برای یکایک نمونه‌ها در مقادیر متفاوت فشار موئینه محاسبه شد (تیاب و دونالدسون، ۲۰۰۴).

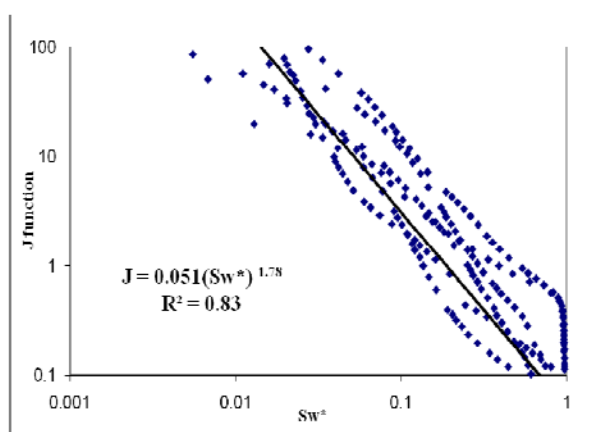
$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir}} \quad (۸)$$

۵-۲ به دست آوردن رابطه بین S_w^* و تابع لورت

همان‌طور که اشاره شد مقادیر تابع لورت و اشباع آب نرمال شده (S_w^*) برای هر نمونه در فشارهای موئینگی



شکل ۵. رابطه بین S_w^* و تابع J برای واحد جریان هیدرولیکی شماره ۲.



شکل ۶. رابطه بین S_w^* و تابع J برای واحد جریان هیدرولیکی شماره ۳.

متری از سطح زمین است. همچنین بر اساس اندازه گیری‌های صورت گرفته، مقادیر چگالی آب نمک $1/107$ و چگالی هیدروکربور گازی مخزن $0/26$ در نظر گرفته شده است. بنابراین با داشتن اطلاعات پیش گفته مقادیر فشار موئینه در نقاط متفاوت چاه به کمک رابطه (۹) محاسبه شد تا در مراحل بعدی استفاده شود.

۷-۲ محاسبه تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب

در این مرحله تابع J برای نقاط بالای سطح ایستابی آب به کمک رابطه (۶) محاسبه شد. با این تفاوت که در این مرحله: (P_c) ، فشار موئینگی در شرایط مخزن است که در مرحله ۶ محاسبه شده است. K و ϕ ، نفوذپذیری و تخلخل آزمایشگاهی نقاط ارتفاعی مورد نظر هستند و σ و θ ، کشش سطحی و زاویه تماس سامانه‌های هیدروکربورگازی/ آب شور در شرایط مخزن هستند که مقادیرشان در جدول ۱ آمده است.

۸-۲ محاسبه مقادیر S_w^* برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن

همان‌طور که مشاهده شد در مرحله ۵ در هر واحد جریان

مشاهده می‌شود که برای هر واحد جریان هیدرولیکی معادله‌ای بین S_w^* و تابع J با ضریب تعیین بالا به دست آمد.

۶-۲ محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع‌های بالای سطح ایستابی آب

فشار موئینه تابعی از ارتفاع بالای سطح آب آزاد (Free Water Level) و تفاوت بین چگالی فاز تر (آب) و فاز غیر تر (هیدروکربور) است که با رابطه زیر بیان می‌شود (برگ، ۱۹۷۰):

$$h = \frac{P_c}{0.433(\rho_w - \rho_{hc})} \quad (9)$$

و در آن، P_c : فشار موئینه بر حسب psi، ρ_{hc} : چگالی هیدروکربور (g/cm^3)، ρ_w : چگالی آب (g/cm^3)، h : ارتفاع بالای سطح آب آزاد (ft) و $0/433$ psi/ft برابر شیب آب خالص در شرایط محیط است.

همان‌طور که در رابطه (۹) مشاهده می‌شود برای محاسبه فشار موئینه، داشتن مقادیر چگالی آب و هیدروکربور و همچنین ارتفاع‌های بالای سطح ایستابی آب الزامی است. سطح آب آزاد تعیین شده برای چاه A براساس گزارش شرکت نفت و گاز پارس عمق ۳۲۶۱

یک نقطه عمقی مشترک مشخص شود. از آنجا که مبنای ارتفاعی در نظر گرفته شده برای محاسبه اشباع آب در روش مورد بررسی، سطح آزاد آب بوده است، به همین علت از همین نقطه (FWL=۳۲۶۱ متری) به منزله نقطه مبنای مقایسه دو سری از مقادیر فوق استفاده می‌شود. شکل ۷ چنین مقایسه‌ای را برای چاه موردنظر در زون بهره‌ده مخزن (از عمق ۳۱۴۰ متری تا ۳۲۰۰ متری) نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که برای بازه عمقی مورد مقایسه مقادیر اشباع آب حاصل از نگار چاه برای هر ۱۵ سانتی‌متر موجود است و جمعاً ۳۹۵ داده وجود دارد. درحالی‌که برای روش موردنظر فقط ۶۵ داده برای همین بازه عمقی وجود دارد که در مقایسه باید به این نکته توجه شود. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بین مقادیر اشباع‌های آب به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های چاه‌نگاری تطابق به نسبت خوبی وجود دارد. در ضمن جذر میانگین مربع (RMS) خطای مقادیر اشباع حاصل از دو روش کمتر از ۱۰ درصد برای ۶۵ نقطه عمقی موردنظر است. با وجود این در بعضی از نقاط، بین نتایج دو روش تفاوت‌هایی وجود دارد که علت این مسئله را می‌توان با بررسی نمودار حجم شیل مخزن (شکل ۱) به درصد متفاوت شیل موجود در بخش‌های متفاوت مخزن نسبت داد که به سهم خود روی نگارهای مقاومت ویژه مورد استفاده برای اشباع آب روش چاه‌نگاری اثرات نامطلوبی می‌گذارد. از آنجا که داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر داده‌های حاصل از آزمایش‌های مغزه بوده است و حضور شیل تاثیری در نتایج این آزمایش‌های ندارد، بنابراین می‌توان گفت که مقادیر اشباع آب به دست آمده از این روش، دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر است.

هیدرولیکی رابطه‌ای بین تابع J و S_w^* به دست آمد که با استفاده از این روابط و با معلوم بودن تابع J (حاصل از مرحله ۷) مقدار اشباع آب نرمال شده (S_w^*) در هر نقطه بالای سطح ایستایی آب مخزن محاسبه شد تا در مرحله بعد برای محاسبه اشباع آب مخزن استفاده شود.

۹-۲ محاسبه مقادیر S_w برای هر نقطه ارتفاعی بالای

سطح ایستایی آب مخزن

با در اختیار بودن اشباع آب نرمال شده (S_w^*) و اشباع آب کاهش نیافتنی (S_{wir}) مقادیر S_w مخزن در هر نقطه ارتفاعی بالای سطح ایستایی آب به کمک رابطه زیر محاسبه شد (تیاب و دونالدسون، ۲۰۰۴).

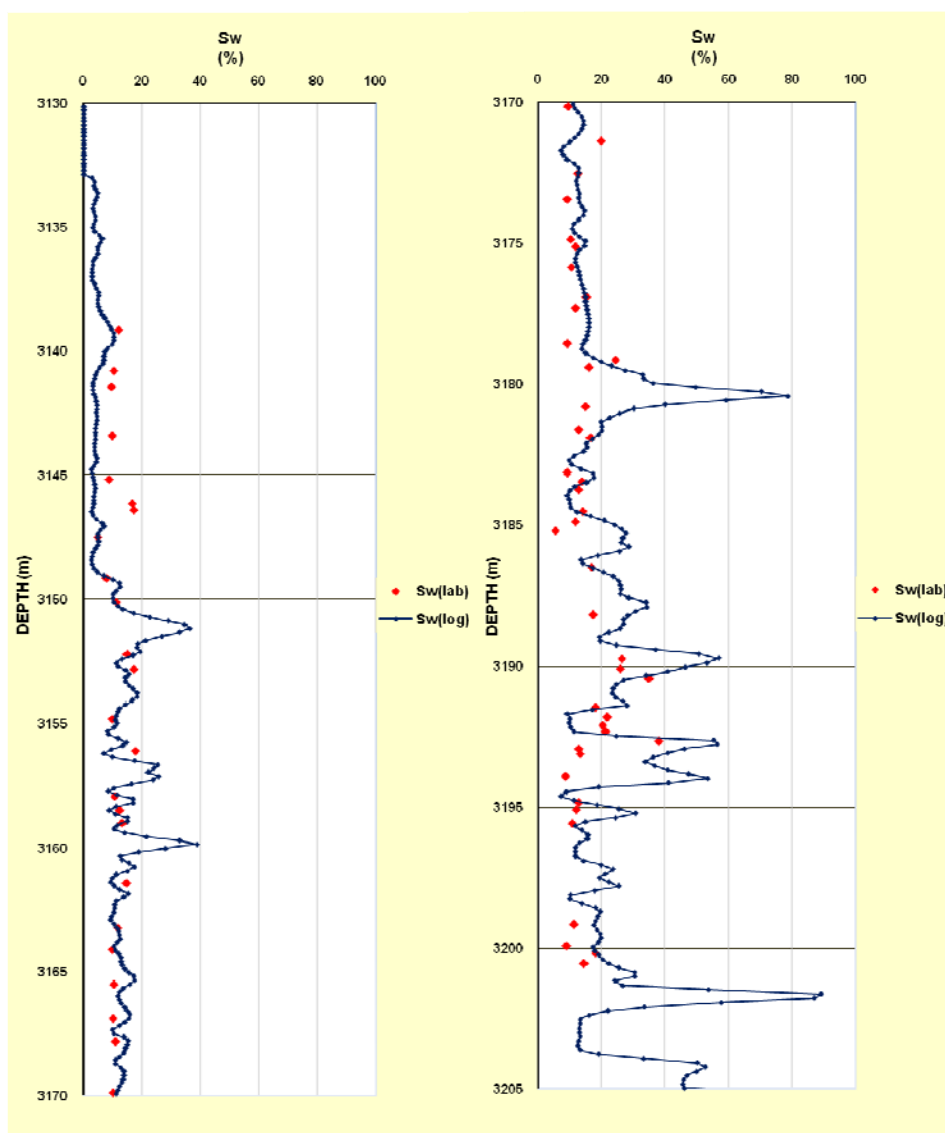
$$S_w = S_w^* (1 - S_{wir}) + S_{wir} \quad (10)$$

همان‌طور که مشاهده شد با طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و رسم نمودار RQI برحسب S_{wir} در هر واحد جریان هیدرولیکی، می‌توان همبستگی این دو پارامتر را به خوبی مشاهده کرد و روابطی با دقت زیاد بین پارامترهای پیش‌گفته به دست آورد. در نهایت با استفاده از رابطه موجود بین S_{wir} و RQI در هر واحد جریان هیدرولیکی، مقدار اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نقطه از چاه محاسبه شد و سپس با در اختیار بودن مقادیر اشباع آب نرمال شده (S_w^*) حاصل از مرحله ۸ مقدار اشباع آب در هر نقطه ارتفاعی مخزن به کمک رابطه (۱۰) محاسبه شد.

۳ مقایسه مقادیر S_w محاسبه شده، با مقادیر S_w

حاصل از چاه‌نگاری

برای مقایسه مقادیر اشباع آب به دست آمده از این روش، با مقادیر S_w حاصل شده از داده‌های چاه‌نگاری بایستی



شکل ۷. مقایسه اشباع آب به دست آمده از روش مورد نظر ($S_w(\text{lab})$) با اشباع آب حاصل از چاه‌نگاری ($S_w(\text{log})$) در بازه عمقی ۳۱۴۰ تا حدود ۳۲۰۰ متری مخزن مورد نظر.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روشی بهبود یافته، با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش تزریق جیوه و طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و همچنین استفاده از تابع لورت و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، اولین بار میزان اشباع‌شدگی آب در عمق‌های متفاوت مخزن کربناته محاسبه شد و در پایان مقادیر آنها با مقادیر

اشباع‌شدگی آب به دست آمده از نگاره‌های چاه مورد مقایسه قرار گرفت. در نتیجه مشخص شد که روش مورد نظر قادر است میزان اشباع آب را با دقت مناسبی و خطایی کمتر از ۱۰ درصد در سراسر زون بهره‌ده مخزن برآورد کند. مقایسه نتایج حاصل از دو روش در جاهایی که درصد ناخالصی شیل موجود مخزن کم است، بسیار خوب است ولی تفاوت دو روش در بخش‌هایی از مخزن که حجم شیل بالا می‌رود افزایش می‌یابد. این مطلب

در این مقاله با استفاده از روشی بهبود یافته، با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش تزریق جیوه و طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و همچنین استفاده از تابع لورت و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، اولین بار میزان اشباع‌شدگی آب در عمق‌های متفاوت مخزن کربناته محاسبه شد و در پایان مقادیر آنها با مقادیر

- مغزه (SCAL) چاه A، میدان پارس جنوبی.
- مرادزاده، ع. و قوامی ریایی، ر.، ۱۳۸۰، چاه‌پیمایی برای مهندسين، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Abbaszadeh, M. R. J., Fujii, H. and Fujimoto, F., 1996, Permeability prediction by hydraulic flow units-theory and applications, SPE Formation Evaluation, 263-271.
- Allen, D., Griffiths, R., Montaron, B. and Ramamoorthy, R., 2009, Improving formation evaluation and reserves estimation, Vol. 9, Middle East & Asia Reservoir Review.
- Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G. and Kedan, D. K., 1993, Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. Presented at 68th Annual Technical Conference and Exhibition Houston, Tx SPE paper No. 26436.
- Berg, R. R., 1970, Method for determining permeability from reservoir rock properties. Trans, GCAGS, **20**, 303-309.
- Borai, A. M., 1985, A new correlation for cementation factor in low-porosity carbonates. SPE paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, **14401**, 22-25.
- Clavier, C., Coates, G. and Dumanoir, J., 1977, Theoretical and experimental bases for the dual water model for interpretation of shaly sands, SPE paper No. 6859, in 52nd Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Professional Engineers.
- Ellis, D. V., and Singer, J. M., 2007, Well logging for earth scientists, Second edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Fahad, A. A. and Stephen, A. H., 2000, Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia Reservoir, SPE , **63254**, 787-799.
- Focke, J. W. and Munn, D., 1987, Cementation exponents in Middle Eastern carbonate reservoirs. SPE paper 13735, SPE Formation Evaluation, **2**, 155-167.
- Garrouch, A., 1999, A modified leverett J-function for the dune and yates carbonate fields, American Chemical Society, Journal of Energy and Fuels, **13**, 1021-1029.
- Hassler, G. L. and Brunner, E., 2007, Measurement of capillary pressures in small core samples, SPE, Trans. of the AIME, **160**, 114-123, SPE Doc. ID, 945114-G.
- احتمالاً به حساسیت ویژه نگارهای مقاومت ویژه مورد استفاده در چاه‌نگاری برای اشباع‌شدگی آب مرتبط است. این در حالی است که در روش مورد استفاده چنین نیست. بنابراین می‌توان گفت نتایج حاصل از روش عرضه شده، دقت و قابلیت اعتماد بیشتری نسبت به روش چاه‌نگاری برای محاسبه اشباع‌شدگی آب مخازن کربناته دارد. با وجود این پیشنهاد می‌شود که به علت ناهمگنی اغلب مخازن کربناته، در مراحل اولیه با استفاده از داده‌های مغزه حاصل از چاه‌های متفاوت یک میدان و استفاده از روش‌های محاسباتی هوشمند، شاخص کیفیت مخزن به کمک نگارهای گوناگون با دقت بیشتر برآورد شود و سپس از روش موردنظر با اطمینان بیشتری در محاسبه اشباع آب مورد استفاده قرار گیرد.
- ### تشکر و قدردانی
- تحقیق عرضه شده نتیجه کاری پژوهشی است که نگارندگان با حمایت شرکت نفت و گاز پارس عملی ساخته‌اند و جا دارد مراتب سپاس و تشکر خود را از مسئولان و کارشناسان این شرکت ابراز داریم.
- ### منابع
- کاظم زاده، ع.، سلیمی دلشاد، ی. و مرادزاده، ع.، ۱۳۸۹، ارتباط اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزنی در یکی از مخازن کربناته هیدروکربوری جنوب ایران، مجله علوم دانشگاه تهران، **۳۵**(۴)، ۱۷۳-۱۸۳.
- کاظم‌زاده، ع.، نبی بیدهندی، م. و رضایی، م.، ۱۳۸۷، مطالعه مقاومت ویژه سازندی با استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته، مجله علوم دانشگاه تهران، **۳۴**(۱)، ۲۱-۱۳.
- پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۸۴، گزارش آزمایش‌های ویژه

- Shedid, A. S. and Reyadh A. A., 2002, A new approach of reservoir description of carbonate reservoirs. SPE, **74344**, 1-10.
- Tiab, D. and Donaldson, E. C., 2004, Petrophysics, theory and practice of measuring reservoir rocks and fluid properties, second edition. Gulf Publishing Co.
- Waxman, M. H. and Smits, L. J. M., 1968, Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands, J. Soc. Pet. Eng., **8**, 107-122.
- Zemanek, J., 1989, Low resistivity hydrocarbon bearing sand reservoirs. SPEFE, 515-521.
- Luthi, E. M., 2001, Geological well logs, their use in reservoir modeling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Rezaee, M. R., Motiei, H. and Kazemzadeh, E., 2007, A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates, Journal of Petroleum Science and Engineering, **56**(4), 241-251.
- Sen, P. N., Goode, P. A. and Sibbit, A. M., 1988, Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities, J. Appl. Physics, **63**, 4832-4840