

ارتباط اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزنی در یکی از مخازن کربناته هیدروکربوری جنوب ایران

عزت اله کاظم زاده^۱، یاسر سلیمی دلشاد^۲، علی مرادزاده^۲

^۱ پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۲ دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

*مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: kazemzadehe@ripi.ir

(دریافت: ۸۸/۱۱/۶؛ پذیرش: ۸۹/۳/۲۲)

چکیده

یکی از مهمترین پارامترها در ارزیابی مخازن هیدروکربوری اشباع آب کاهش نیافتنی می باشد که معمولاً از نتایج آزمایشات فشار موئینگی یا نفوذپذیری نسبی بدست می آید. انجام این آزمایشات مستلزم در اختیار داشتن نمونه های سنگ مخزن می باشد، اغلب چنین نمونه هایی در دسترس نبوده و تهیه آنها مستلزم صرف هزینه های زیادی می باشد. در این مطالعه تخمین اشباع آب کاهش نیافتنی، از تلفیق داده های آزمایشگاهی فشار موئینگی و واحد های جریان هیدرولیکی صورت گرفته است. تعداد واحد های جریان هیدرولیکی بر مبنای تخلخل و تراوایی اندازه گیری شده در آزمایشگاه بر روی نمونه های کربناته از یک مخزن هیدروکربوری مشخص شده است. با استفاده از شاخص کیفیت مخزن و نسبت پوکی، شاخص منطقه ای جریان برای هر نمونه محاسبه گردیده و با استفاده از روشهای آنالیز هیستوگرام و مجموع مربعات خطا تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص شده است. با انجام آزمایشات فشار موئینگی به روش تزریق جیوه بر روی نمونه ها و تبدیل آنها به شرایط مخزن، مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نمونه تعیین گردیده و ارتباط بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزنی در واحد های جریان هیدرولیکی بررسی شده است. نتایج نشان می دهند که اشباع آب کاهش نیافتنی با شاخص کیفیت مخزنی در هر واحد جریان هیدرولیکی تطابق خوبی را دارند، بطوریکه مقدار متوسط ضریب همبستگی بین اشباع آب کاهش نیافتنی با شاخص کیفیت مخزنی در واحد های جریان هیدرولیکی، برابر ۰/۹۵ می باشد. لذا روش ارائه شده را می توان جهت تعیین اشباع آب کاهش نیافتنی در اعماقی که اطلاعات کافی موجود نیست مورد استفاده قرار داد.

واژه های کلیدی: فشار موئینگی، اشباع آب کاهش نیافتنی، واحدهای جریان هیدرولیکی، مخازن کربناته هیدروکربوری

مقدمه

می باشند. یک واحد جریان هیدرولیکی در حقیقت بخشی از مخزن است که از لحاظ خصوصیات کنترل کننده حرکت سیال و یا به عبارتی خصوصیات هیدرولیکی با سایر بخشهای مخزن متفاوت است (Abbaszadeh et al. 1996, Amaefule et al. 1993).

فهد و استفن (Fahad & Stephen 2000) با استفاده از تکنیک واحد های جریان هیدرولیکی، تراوایی را از داده های نگارهای چاه پیمایی در یک مخزن ماسه سنگی عربستان تخمین زدند. شدید و ریاض (Shedid & Reyadh 2002) یک فن جدید برای توصیف مخازن کربناته با تعریف عدد مشخصه ارائه نمودند. آنها بر روی ۸۳ نمونه، پارامترهای تخلخل، اشباع آب باقیمانده و تراوایی آب و نفت را اندازه گیری نمودند. نتایج حاصل بیانگر توصیف بهتر مخزن با بکارگیری مفهوم شاخص کیفیت مخزنی نسبت به روش های دیگر می باشد.

کاظم زاده و همکاران (Kazemzadeh et al. 2008) ارتباط مقاومت

اشباع آب کاهش نیافتنی در آزمایشگاه با استفاده از داده های فشار موئینگی به روشهایی نظیر تزریق جیوه، سانتریفیوژ و صفحه متخلخل و یا از داده های نفوذپذیری نسبی بدست می آید که در بسیاری از محاسبات و مدلسازی های مطالعات مخزن نقش مؤثری ایفاء می کند. اما به علل مختلفی نظیر هزینه های انجام آزمایشات و یا عدم امکان تهیه مغزه همیشه این اطلاعات در دسترس نمی باشد. در این مطالعه تمرکز بر ارائه روشی جهت تعیین اشباع آب کاهش نیافتنی، با استفاده از داده های تخلخل و تراوایی صورت گرفته است. در این مطالعه از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده شده است. واحدهای جریان هیدرولیکی تابع شاخص منطقه جریانی هستند. شاخص منطقه جریانی نیز تابعی از شاخص کیفیت مخزن و نسبت پوکی است که دو پارامتر مذکور با استفاده از تراوایی و تخلخل موثر مغزه قابل محاسبه

در آزمایشگاه برای محاسبه مقدار تخلخل باید دو پارامتر از سه پارامتر حجم کل، حجم منافذ خالی و یا حجم دانه های سنگ را اندازه گیری نمود. دستگاههای مناسب جهت اندازه گیری حجم منافذ شامل تخلخل سنج جیوه و تخلخل سنج های هلیوم در شرایط محیط و مخزن می باشند. در این مطالعه تخلخل توسط دستگاه Ultra Porosimeter 200A اندازه گیری شد.

جهت اندازه گیری تراوایی مطلق از دستگاه Ultra Permeameter استفاده شده است. اساس کار دستگاه مطابق قانون دارسی بوده که در آن سیال عبور کننده هوای خشک می باشد. نمونه مورد آزمایش که به شکل استوانه ای می باشد در داخل استوانه ای از جنس لاستیک مخصوص که در داخل مغزه نگهدار قرار دارد جاگذاری شده و فشار مناسب از اطراف بر نمونه وارد می شود. با داشتن اختلاف فشار بین دو سر نمونه، دبی جریان، سرعت حرکت سیال و نیز معلوم بودن ابعاد نمونه، تراوایی محاسبه شده است.

منحنی های فشار موئینگی یکی از نیازهای اساسی مهندسی مخازن جهت شناسایی مخزن می باشد. فشار موئینگی برای نخستین بار توسط لورت (Levert 1941) در صنعت نفت مطرح گردید. تحقیقات وی اساس فشار موئینگی را که امروزه نیز در محیط های متخلخل مورد استفاده قرار می گیرد پایه ریزی نمود. فشار موئینگی که در نتیجه کشش سطحی بین فازهای گاز-آب-نفت و سنگ مخزن بوجود می آید بصورت زیر تعریف شده است.

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad (1)$$

که در این رابطه P_c فشار موئینگی، P_{nw} فشار فاز تر ناشونده و P_w فشار فاز ترشونده می باشند

روشهای مختلفی برای اندازه گیری فشار موئینگی پیشنهاد شده است. سه روشی که امروزه در صنعت بیشتر متداول بوده و مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از روش صفحه متخلخل، روش سانتریفوژ و روش تزریق جیوه.

در این مقاله به منظور محاسبه آب کاهش نیافتنی برای هر ۲۳ نمونه از روش آزمایشگاهی تزریق جیوه استفاده شده است. منحنی های تزریق جیوه به وسیله رسم کردن فشار در مقابل اشباع جیوه به دست می آید که نتایج یک نمونه اندازه گیریهای فشار موئینگی در شکل ۱ آورده شده است.

همچنین این روش نسبت به دو روش اندازه گیری فشار موئینگی با استفاده از روش صفحه متخلخل (نیمه تراوا)، و روش سانتریفوژ ارزانتر و سریعتر می باشد.

برای تبدیل داده های فشار موئینگی در سیستم هوا/جیوه اندازه گیری شده به شرایط واقعی مخزن از رابطه زیر استفاده شده است.

ویژه سازندی و تخلخل را در واحدهای جریان هیدرولیکی بررسی نمودند. رضایی و همکاران (Rezaee *et al.* 2007) مشابه شاخص های کیفیت مخزنی، شاخص شعاع الکتریکی را برای توصیف خواص الکتریکی سنگها در واحدهای جریان الکتریکی ارائه نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان می دهد که با استفاده از روش واحدهای جریان الکتریکی ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل به مقدار قابل ملاحظه ای بهبود می یابد همچنین تحقیقات انجام شده توسط پراسد (Prasad 2003) بیانگر بهبود ارتباط بین سرعت امواج تراکمی و تراوایی درون واحدهای جریان هیدرولیکی می باشد. ضریب همبستگی بین سرعت امواج تراکمی و تراوایی برای واحدهای جریان هیدرولیکی در محدوده ۰/۶۵ تا ۰/۸۷ گزارش شده است.

به منظور تعیین اشباع آب باقیمانده برای هر نمونه از روش آزمایشگاهی تزریق جیوه استفاده شده است. روش تزریق جیوه برای ارزیابی توزیع استاتیک اولیه سیالات مخزن قبل از تولید، پیشنهاد می شود، زیرا این توزیع به وسیله مشخصات اشباع شدگی اولیه کنترل می شود. آزمایش فشار موئینه تزریق جیوه به وسیله تزریق جیوه به درون یک پلاگ مغزه تمیز خشک شده صورت می گیرد. فشار موئینه به صورت مرحله به مرحله افزایش یافته و حجم منافذ اشباع شده سنگ از جیوه در هر مرحله بعد از رسیدن به حالت تعادل ثبت می شود. منحنی های تزریق جیوه به وسیله رسم کردن فشار در مقابل اشباع جیوه به دست می آید. اشباع کاهش نیافتنی برای هر نمونه در این منحنی عبارت است از اشباعی که در آن، منحنی مذکور مجانب خط قائم می باشد.

در این مطالعه ابتدا با استفاده از محاسبه شاخص کیفیت مخزن و نسبت پوکی، شاخص منطقه ای جریان برای هر نمونه تعیین گردید، سپس با استفاده از آنالیز هیستوگرام و مجموع مربع خطها تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی تعیین گردید. با استفاده از آزمایشات فشار موئینگی به روش تزریق جیوه بر روی نمونه ها و تبدیل آنها به شرایط مخزن، مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نمونه مشخص شده و ارتباط بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزنی به منظور تخمین اشباع آب کاهش نیافتنی در اعماقی که اطلاعات فشار موئینگی موجود نمی باشد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

مراحل انجام کار

مطالعه حاضر بر روی ۲۳ نمونه کربناته از یک مخزن هیدروکربوری انجام گرفته است. بدین منظور نمونه هایی استوانه ای شکل به قطر یک و نیم اینچ و به طول تقریبی حدود دو اینچ تهیه گردید و در ادامه بر روی این نمونه ها آزمایشات تعیین تخلخل، تراوایی و فشار موئینگی به شرح زیر انجام گردید.

بوده و قابل پیش بینی از سایر خواص می باشد. تئوری روش ابتدا توسط آمیفول و همکاران (Amaefule et al. 1993) و سپس توسط سایر محققین تعمیم یافت. این تکنیک بیشتر در تخمین تراوایی چاههای فاقد مغزه با استفاده از اطلاعات نگارهای چاه پیمایی بکار گرفته شده است. تئوری مربوط به طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی بر این فرض استوار است که منافذ را می توان به صورت دسته ای از لوله های موئین در نظر گرفت. برای لوله های موئین مستقیم استوانه ای به شعاع r ، با ترکیب رابطه داری و رابطه پویزله میتوان نوشت.

$$K = \frac{r^2}{8} \phi_e \quad (3)$$

که در آن K تراوایی و ϕ_e تخلخل موثر می باشند. رابطه ساده فوق بیانگر این است که ارتباط تخلخل و تراوایی بستگی به هندسه فضای منافذ شامل اندازه منافذ (شعاع r) و شکل منافذ (عدد λ در معادله فوق برای لوله های استوانه ای شکل) دارد. برای یک محیط متخلخل واقعی کوزنی (Kozeny 1927) و کارمن (Carman 1937) دو پارامتر پیچاچی (τ) و مساحت سطح واحد حجم دانه (Sgv) را در رابطه (3) اعمال نموده و رابطه زیر را ارائه نمودند:

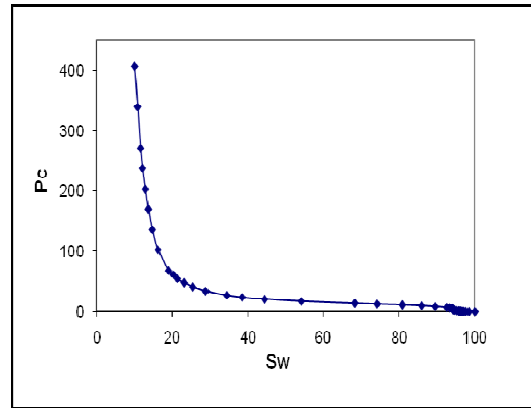
$$K = \frac{\phi_e^3}{(1 - \phi_e)^2} \times \frac{1}{F_S \tau^2 S_{gv}^2} \quad (4)$$

که در آن F_S فاکتور شکل، K تراوایی بر حسب میکرومتر مربع و ϕ_e به صورت کسری بیان می شود.

گروه $F_S \tau^2$ به عنوان ثابت کوزنی شناخته شده و محدودیت اصلی در کاربرد معادله فوق می باشد، زیرا مقادیر واقعی از ثابت کوزنی معمولاً برای یک سنگ خاص ناشناخته بود و عبارت S_{gv}^2 در محاسبات منظور نمی گردید. تکنیک واحدهای جریان هیدرولیکی، با در نظر گرفتن مشخصات اصلی زمین شناسی و هندسه فضای متخلخل و تقسیم بندی شاخص منطقه ای جریان، تغییرات ثابت کوزنی و عبارت S_{gv}^2 را در نظر می گیرد. آمیفول و همکاران (Amaefule et al., 1993) با تقسیم رابطه (4) بر ϕ_e تغییرات ثابت کوزنی را مورد مطالعه قرار داده اند و رابطه (5) را ارائه نمودند:

$$0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} = \left[\frac{\Phi_e}{1 - \Phi_e} \right] \frac{1}{\sqrt{F_S \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (5)$$

ثابت 0.0314 جهت تبدیل میکرومتر مربع به میلی داری است. عبارتهای شاخص منطقه ای جریان (FZI)، شاخص کیفیت مخزنی (RQI) و نسبت حجم فضای منافذ به حجم خمیره سنگ یا نسبت پوکی (ϕ_z) به صورت زیر تعریف می شود:



شکل ۱: منحنی فشار موئینه تزریق جیوه (MICP)

$$P_{cr} = P_{cl} * \frac{(\sigma_r \cos \theta_r)}{(\sigma_l \cos \theta_l)} \quad (2)$$

که در آن P_{cr} فشار موئینه در سیستم هیدروکربور/ آب سازندی، P_{cl} فشار موئینه در سیستم هوا/جیوه، σ_r و σ_l به ترتیب کشش های سطحی سیستم های هیدروکربور/ آب سازندی و هوا/جیوه و θ_r و θ_l به ترتیب زاویه تماس در شرایط مخزن و آزمایشگاه می باشد (جدول ۱). مقادیر اشباع آب، از کم کردن میزان اشباع جیوه در هر مرحله از آزمایش تزریق جیوه از عدد ۱۰۰ بدست می آید. با رسم نمودار P_c در برابر Sw می توان میزان Sw_{ir} را برای هر نمونه بدست آورد.

جدول ۱- مقادیر σ و θ در شرایط آزمایشگاه و مخزن

System	Contact angle θ	IFT, dyne/cm, σ	$\sigma * \cos \theta$
Gas/Brine	0	50	50
Gas/Mercury	140	480	367

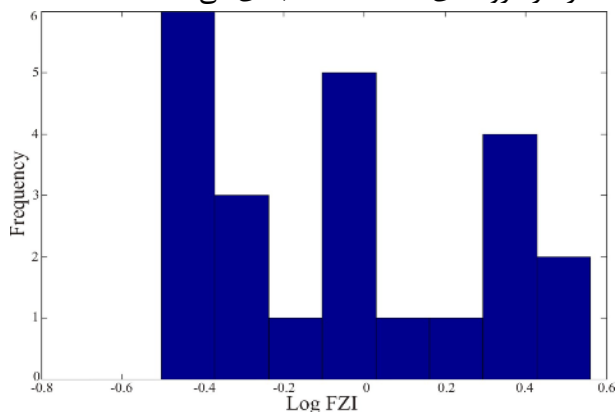
تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی

عمده ترین پارامترهایی که جریان سیال را تحت الشعاع قرار می دهند شامل نوع، فراوانی و محل قرارگیری کانیهها و بافت سنگها شامل اندازه دانه، شکل دانه، جورشدگی و فشردگی می باشند. تلفیق های متنوع از عوامل تاثیرگذار زمین شناسی می توانند واحدهای جریان هیدرولیکی مجزا را بوجود آورند که هر کدام خواص انتقال سیال مشابه ای دارند. واحدهای جریان هیدرولیکی روشی برای طبقه بندی انواع سنگها نسبت به خواص جریانی بر پایه پارامترهای زمین شناسی و فیزیک جریان در مقیاس منافذ است. بنابراین واحدهای جریان هیدرولیکی شامل گونه های زمین شناسی متفاوت می باشند و گروه بندی سنگها بر اساس شاخص های زمین شناسی سنگ مرتبط با جریان، مبنای طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی می باشد در واقع یک واحد جریان هیدرولیکی زیر مجموعه ای از کل گونه های سنگ مخزن می باشد که با خواص زمین شناسی کنترل کننده جریان سیال سازگار

الف - آنالیز هیستوگرام

جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی از روش آنالیز هیستوگرام با استفاده از نرم افزار Matlab و آنالیز خوشه ای مقادیر FZI استفاده شده است، که نتایج بیانگر تبعیت توزیع شاخص منطقه ای جریان از ۳ توزیع نرمال می باشد بنابراین داده ها به سه واحد جریان هیدرولیکی تقسیم گردیدند (شکل ۲).

پس از تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، برای اینکه مجموعه ای از داده‌ها را که بسیار شبیه به هم هستند را در یک گروه قرار دهیم، از آنالیز خوشه‌ای K-means برای مقادیر FZI استفاده شده است. آنالیز خوشه ای به روش K-means، داده ها را در گروه های مشخص از هم جدا کرده به طوری که داده های مربوط به هر گروه با سایر گروه ها متفاوت است. در این روش بعد از تعیین تعداد دسته ها که از آنالیز هیستوگرام استفاده شده است، نرم افزار به تعداد دسته های تعیین شده نقاطی را به عنوان نقاط مرکزی در نظری می گیرد و فاصله سایر نقاط تا نقطه مرکزی را محاسبه می کند و بدین ترتیب داده ها را در گروه های مختلف دسته بندی می کند.



شکل ۲: آنالیز خوشه ای بر روی داده های لگاریتمی شاخص منطقه جریانی

ب - مجموع مربع خطا

از آنجایی که تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از آنالیز خوشه ای و آنالیز احتمال نرمال تابع کاربر می باشد و احتمال ایجاد خطا در محاسبات زیاد است، لذا به منظور کاهش خطا از پارامتر مجموع مربع خطاها (SSE) استفاده شده است. روش کار بدین صورت است که ابتدا تعداد دسته ها را برابر یک فرض کرده و آنالیز خوشه‌ای K-means را توسط نرم افزار Matlab انجام می دهیم. سپس آنالیز رگرسیون خطی را بر روی داده ها انجام داده و مقدار مجموع مربع خطاها را محاسبه می کنیم. این کار را به همین صورت برای تعداد دسته های دیگر نیز انجام و در نهایت نموداری از مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد دسته ها ترسیم می کنیم (شکل ۳). همانطور که در شکل مشاهده می شود که با افزایش تعداد واحدهای جریان

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (6)$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} \quad (7)$$

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \quad (8)$$

با توجه به روابط (۶) تا (۸)، رابطه (۵) به صورت $RQI = \phi_z \times FZI$ تبدیل خواهد شد. با گرفتن لگاریتم از طرفین این معادله خواهیم داشت:

$$\text{Log RQI} = \text{Log } \phi_z + \text{Log FZI} \quad (9)$$

شرایط ایده آل نمودار لگاریتمی RQI بر حسب ϕ_z یک نمودار خطی خواهد بود که مقادیر مختلف FZI، گلوگاههای منافذ یکسانی داشته و یک واحد جریانی هیدرولیکی خاصی را تعریف می کنند. هر خط یک واحد جریان هیدرولیکی است و محل تلاقی این خط با $\phi_z = 1$ مقدار متوسط FZI برای این واحد جریان هیدرولیکی می باشد.

مبنای طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص کردن گروههای داده از خطوط راست با شیب یک روی نمودار لگاریتمی RQI بر حسب ϕ_z است. تراوایی نقاط نمونه از یک واحد جریانی هیدرولیکی با بکار بردن مقادیر متوسط FZI و مقادیر تخلخل مربوطه از رابطه زیر بدست می آید (Svirsky et al. 2004).

$$K = 1014 FZI^2 \frac{\phi_e^3}{(1 - \phi_e)^2} \quad (10)$$

تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی درون یک مخزن با داده های مغزه انجام می شود. اندازه گیریهای تخلخل بر حسب تراوایی تحت فشار همه جانبه خالص از داده های معمولی مغزه جهت محاسبه FZI، ϕ_z و RQI استفاده می شود. اگرچه برای هر واحد جریانی می بایستی یک مقدار FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود داشته باشد، ولی بدلیل خطاهای اندازه گیری تصادفی در آنالیز مغزه یک توزیع از FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود دارد. تابع توزیع کلی FZI ها یک انطباق از توابع توزیع جداگانه اطراف متوسط FZI مربوط به هر واحد جریان هیدرولیکی است. سه روش آنالیز هیستوگرام، نمودار احتمال و مجموع مربع خطاها بوسیله محققین جهت گروه بندی مناسب واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده شده است. روشهای طبقه بندی گرافیکی شامل آنالیز هیستوگرام و نمودارهای احتمالی، توزیع FZI را بصورت تصویری مشخص می سازد که امکان تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را فراهم می سازد. در این مقاله جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی از دو روش آنالیز هیستوگرام و مجموع مربع خطا با استفاده از نرم افزار Matlab استفاده شده است.

بهینه نیز انتخاب نمود، اما بهبودی در نتایج حاصل نشده و تنها محاسبات مشکلتر و پیچیده تر می شود. نتایج حاصل از دو روش نشان می دهند که داده ها به سه واحد جریان هیدرولیکی تقسیم می شوند. (جدول ۲).

هیدرولیکی مقدار مجموع مربع خطاها کاهش یافته، اما از یک مقداری به بعد تغییرات در مجموع مربع خطاها محسوس نبوده و قابل صرف نظر کردن است. این مقدار همان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه است. تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه به این معنا است که، می توان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را بیش از مقدار

جدول ۲: دسته بندی نمونه ها در واحدهای جریان هیدرولیکی

Sample no.	Depth in Meter	Air permeability, (mD)	Helium (porosity %)	Grain Density, (gr/cc)	ϕ_z	R QI	F ZI	Hydraulic Unit
2	2901.07	4.892	29.08	2.71	0.410	0.129	0.314	1
3	2904.09	3.112	23.87	2.69	0.314	0.113	0.362	1
15	3147.31	1.741	21.9	2.71	0.280	0.089	0.316	1
17	3162.89	1.8	21.52	2.71	0.274	0.091	0.331	1
22	3192.84	1.22	16.88	2.72	0.203	0.084	0.416	1
23	3200.54	2.046	20.56	2.71	0.259	0.099	0.383	1
5	2925.21	3.303	19.71	2.86	0.245	0.129	0.524	1
16	3160.41	5.018	21.39	2.71	0.272	0.152	0.559	1
18	3165.49	2.888	18.03	2.7	0.220	0.126	0.571	1
21	3183.74	4.408	19.31	2.69	0.239	0.150	0.627	1
9	2989.16	13.157	22.09	2.72	0.284	0.242	0.855	2
10	3000.15	0.962	9.69	2.72	0.107	0.099	0.922	2
13	3134.43	1.735	12.76	2.84	0.146	0.116	0.792	2
14	3138.53	0.985	10.17	2.86	0.113	0.098	0.863	2
19	3168.18	13.459	20.38	2.71	0.256	0.255	0.997	2
20	3170.45	40.248	23.65	2.71	0.310	0.410	0.322	2
4	2921.92	28.982	20.04	2.85	0.251	0.378	0.507	2
1	2896.13	10.639	11.49	2.75	0.130	0.302	0.328	3
7	2974.87	17.735	12.8	2.85	0.147	0.370	0.518	3
11	3017.17	44.487	17.19	2.84	0.208	0.505	0.433	3
12	3036.87	1.093	5.98	2.86	0.064	0.134	0.111	3
6	2970.18	10.465	8.76	2.86	0.096	0.343	0.575	3
8	2984.38	247.776	22.33	2.84	0.287	0.046	0.638	3

آوردن یک مقدار معادل FZI برای هر گروه طبق معادله (۹) وقتی RQI را برحسب ϕ_z در یک نمودار لگاریتمی رسم می کنیم باید یک خط با شیب ثابت 45° بدست آوریم.

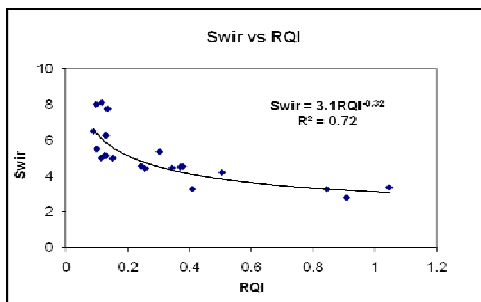
طبق رابطه (۹) چنانچه مقادیر RQI و ϕ_z در یک مقیاس لگاریتمی ترسیم شده باشند، داده هایی که دارای مقادیر یکسان FZI باشند بر روی یک خط با شیب ثابت قرار می گیرند و نمونه های با مقادیر متفاوت FZI بر روی خطوط موازی هم قرار می گیرند. برای بدست

بدست آوردن رابطه بین اشباع آب باقیمانده و شاخص کیفیت مخزنی

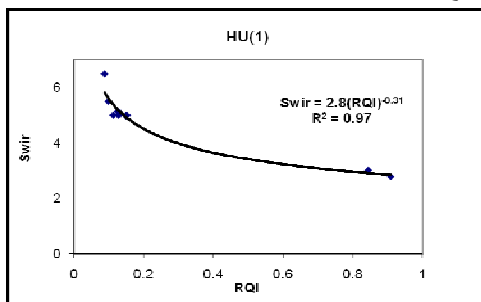
با آزمایشات فشار موئینگی به روش تزریق جیوه بر روی نمونه ها و تبدیل آنها به شرایط مخزن، مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برای هر نمونه مشخص شد. از آنجایی که مقادیر تخلخل و نفوذپذیری هر نمونه در اختیار می باشد، یک مقدار Swir و یک مقدار RQI برای هر نمونه بدست آورد. نمودار Swir برحسب RQI برای تمامی نمونه ها در شکل ۵ آمده است. همانطوریکه مشاهده می شود ضریب همبستگی بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزن برابر ۰/۷۲ می باشد. حال برای هر واحد جریان هیدرولیکی شاخص منطقه ای جریان را بر حسب مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی در نمودارهای جداگانه رسم نموده و معادلات بهترین توابع برازش شده بر آنها مشخص گردید (شکلهای ۶، ۷ و ۸).

همانطوریکه مشاهده می شود ارتباط اشباع آب کاهش نیافتنی با شاخص کیفیت مخزنی در هر واحد جریان هیدرولیکی تطابق خوبی را دارند بطوریکه مقدار متوسط ضریب همبستگی بین اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزن در هر واحد جریان هیدرولیکی اعداد ۰/۹۸، ۰/۸۷ و ۰/۹۷ می باشد.

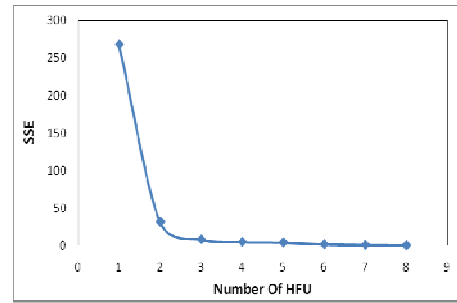
بنابراین با طبقه بندی داده ها با استفاده از مفهوم واحد های جریان هیدرولیکی و رسم نمودار شاخص کیفیت مخزنی بر حسب مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی در هر واحد جریان هیدرولیکی می توان همبستگی این دو پارامتر را به خوبی مشاهده نموده و روابطی با دقت بالا بین پارامترهای مذکور بدست آورد.



شکل ۵: مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برحسب شاخص منطقه ای جریان برای تمامی نمونه ها



شکل ۶: مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برحسب شاخص کیفیت مخزنی در واحد جریان هیدرولیکی ۱



شکل ۳: نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحد های جریان هیدرولیکی

برای بدست آوردن خط تقریبی با زاویه 45° ($y=x+b$) از روش منیمم کردن مربع خطاها (انحراف مقادیر واقعی از خط تقریب) استفاده شده است (شکل ۴).

$$\sum E = \sum (Y - y)^2 = S \tag{11}$$

E = خطا (انحراف)

$$b = \text{LogFZI}$$

$$y = \log RQI$$

$$x = \text{Log}\phi_z$$

برای کاهش مجموع انحرافات یا خطاها باید مشتق رابطه ۹ را بر حسب متغیرها برابر صفر قرار داده که در اینصورت خواهیم داشت:

$$S = \sum (Y - x - b)^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n 2(-1)(y - x - b) = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n (y - x - b) = 0$$

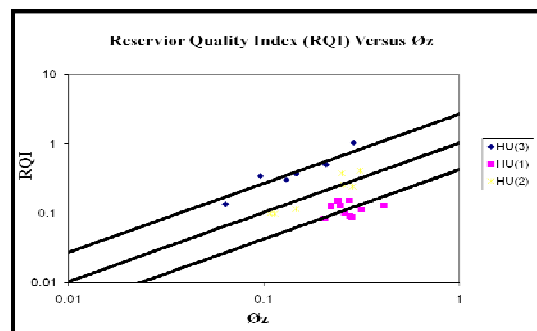
$$\Rightarrow \sum y - \sum x = nb$$

$$\Rightarrow b = \frac{\sum y - \sum x}{n}$$

بعد از بدست آوردن b می توان FZI را برای هر واحد محاسبه نمود (جدول ۳).

جدول ۳: مقادیر متوسط شاخص منطقه ای جریان (FZI) در هر واحد جریان هیدرولیکی

واحد جریان هیدرولیکی	1	2	3
FZI	0.426	1.009	2.704



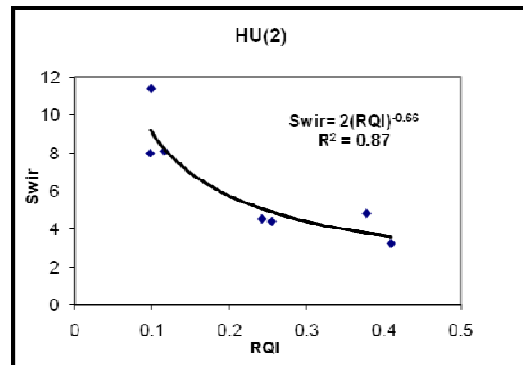
شکل ۴- شاخص کیفیت مخزن بر حسب ضریب پوکی

هیدرولیکی همبستگی قوی بین اشباع آب کاهش نیافتنی حاصل از آزمایشات فشار مویبندی و شاخص کیفیت مخزنی در هر واحد جریان هیدرولیکی مشاهده شد.

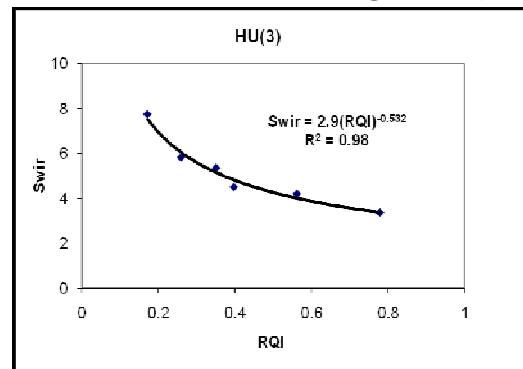
معادلات توانی به شکل $y=ax^b$ بهترین برازش را بین داده های مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزنی دارد. متوسط ضریب همبستگی بین داده های مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی و شاخص کیفیت مخزنی در واحد های جریان هیدرولیکی برابر ۰/۹۵ می باشد در حالیکه برای کل نمونه ها این مقدار برابر ۰/۷۲ است.

روابط ارائه شده را میتوان در پیش بینی مستقیم و سریع میزان اشباع آب کاهش نیافتنی در هر نقطه از چاه در صورت داشتن تراوایی، تخلخل و تعیین شاخص کیفیت مخزنی مورد استفاده قرار داد. با توجه به اینکه اشباع آب کاهش نیافتنی یکی از مهمترین پارامترها در ارزیابی مخازن هیدروکربوری می باشد که تعیین مستقیم آن هزینه زیادی دارد، استفاده از روش ارائه شده می تواند در توصیف مخازن ارزش قابل توجهی داشته باشد.

روش مورد مطالعه در چاه هایی که داده های مغزه (تراوایی و تخلخل) موجود است، قابل استفاده می باشد. اگر بتوان با استفاده از روش های آماری و هوشمند شاخص کیفیت مخزن را از لاگ تخمین زد، این روش می تواند به مراتب کاربردی تر گردد.



شکل ۷- مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برحسب شاخص کیفیت مخزنی در واحد جریان هیدرولیکی ۲



شکل ۸: مقادیر اشباع آب کاهش نیافتنی برحسب شاخص کیفیت مخزنی در واحد جریان هیدرولیکی ۳

نتیجه گیری:

با طبقه بندی و مرتب نمودن داده ها بر حسب واحدهای جریان

منابع:

- Abbaszadeh M.R.J., Fujii H., Fujimoto F., 1996: Permeability Prediction by Hydraulic Flow Units-Theory and Applications. SPE Formation Evaluation, 263-271.
- 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, SPE paper No. 26436, Presented at 68th Annual Technical Conference and Exhibition Houston, Tx.
- Carman, P. C., 1937: Fluid flow through granular beds, *Trans AICHE*, **15**: 150-166.
- Fahad A. A., and Stephen A. H., 2000: Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia Reservoir, SPE paper No. 63254, 787-799.
- Kazemzadeh E., Nabi-Bidhendi M., Rezaee M. R., 2008: Study of formation resistivity factor by using hydraulic flow units method in carbonate reservoir, *Journal of Science Tehran University*, No.1:13-21.
- Kozeny J., 1927: Uber kapillare leitung des wassers im boden, *stuzurgsberichte*, Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class1, 136, 271-306.
- Leveret M. C., 1941: Capillary behavior in porous solids, *Trans, AIME*, **142**: 152-169.
- Prasad M., 2003, Velocity-Permeability relation within hydraulic units, *Geophysics*, **68**. 108-117.
- Rezaee M. R., Motiei, H., and Kazemzadeh, E., 2007: A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates, *JPSE*, **56**: 241-251.
- Shedid A. S., and Reyadh A. A., 2002: A new approach of reservoir description of carbonate reservoirs, SPE paper No. 74344: 1-10.
- Svirsky D., Ryazanov, A., Pankov, M., and Posysoev, A., 2004: Hydraulic flow units resolve reservoir description challenges in a Siberian oil field. SPE paper No. 87056: 1-15