

تراوایی معادل مایع با استفاده از تراوایی مطلق هوا در سنگ‌های کربناته یکی از میادین جنوب ایران

بهاره الهی*^۱، عزت اله کاظم‌زاده^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین شناسی نفت، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استادیار پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(*عهده دار مکاتبات - Elahi_bahareh@yahoo.com)

چکیده

تخلخل و تراوایی از مهمترین پارامترهای پتروفیزیکی می‌باشند که در توصیف مخزن نقش اساسی دارند. معمولاً اختلاف بین نفوذ پذیری گاز و مایع می‌تواند برای اندازه‌گیری سریع تراوایی با استفاده از گاز به عنوان سیال منفذ استفاده شود. اختلاف مشاهده شده در تراوایی مایع و گاز (هوا) با توجه به اثر کلینکنبرگ توجیه می‌شود. از آنجایی که اندازه‌گیری نفوذپذیری مطلق هوا در آزمایشگاه سریعتر و با هزینه کمتری انجام می‌گیرد و تعیین نفوذپذیری مایعی مانند آب مستلزم اشباع نمونه سنگ با آب بوده و نیازمند زمان زیادی می‌باشد ارائه مدلی جهت پیش بینی نفوذپذیری مایع از روی نفوذپذیری هوا برای توصیف مخازن هیدروکربوری نقش به‌سزایی دارد. در این تحقیق به بررسی تراوایی مطلق اندازه‌گیری شده هوا و مقایسه آن با تراوایی مطلق آب و تراوایی کلینکنبرگ اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نفوذپذیری‌های هوا، آب و کلینکنبرگ ارتباط آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند بهترین تطابق بهترین تطابق بین نفوذپذیری‌های مطلق هوا و نفوذپذیری کلینکنبرگ وجود دارد و با طبقه‌بندی نمونه‌ها بر مبنای واحدهای جریان هیدرولیکی می‌توان روابط بین نفوذپذیری آب و هوا و آب-کلینکنبرگ را بهبود بخشید.

واژگان کلیدی: واحدهای جریان هیدرولیکی، نفوذپذیری مطلق، تخلخل، اثر کلینکنبرگ.

۱- مقدمه

تراوایی به عنوان یک ویژگی سنگ که در ارتباط با نرخ تولید هیدروکربن است دارای اهمیت زیادی می‌باشد و در واقع قابلیت یک سنگ در عبور مایع می‌باشد. اندازه‌گیری تراوایی معمولاً در آزمایشگاه در شرایط محیط و مخزن انجام می‌شود که در آزمایشات معمولی از هوا به عنوان سیال منفذی استفاده می‌شود. یکی از روش‌های ساده و متداول برای اندازه‌گیری تراوایی، روش حالت یکنواخت می‌باشد که در آن از گاز به عنوان سیال تزریقی استفاده می‌شود که مزیت‌های زیر را دارد:

- ۱- دبی سنج‌های تجاری فراوانی برای اندازه‌گیری دبی هر گاز در محدوده وسیعی از دبی‌های جریان وجود دارد که توسط آن‌ها می‌توان تراوایی را با دقت و سرعت بالا محاسبه کرد.
- ۲- از آن جا که گاز نیتروژن از نظر شیمیایی خنثی می‌باشد (با سنگ واکنش نمی‌دهد)، بنابراین با تغییر فشار همه جانبه وارد بر نمونه سنگ مخزن جذب سطحی رخ نخواهد داد و فقط کافی است تاثیر مکانیکی افزایش فشار را در تغییر تراوایی در نظر گرفت.

۳- گاز در مقایسه با آب حساسیت کمتری نسبت به تغییرات دما (در اثر تزریق) از خود نشان می‌دهد و بنابراین استفاده از گاز به عنوان سیال تزریقی باعث کاهش خطا در محاسبه تراوایی خواهد شد (Tanikawa and Shimamoto, 2008).

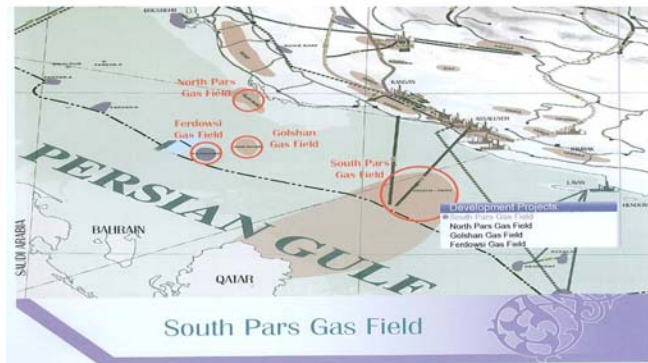
اولین بار نفوذپذیری توسط داری بر روی یک ماسه‌سنگ اندازه‌گیری و مطرح گردید. قانون داری زمانی صادق است که هیچ گونه واکنشی بین مایع و سنگ رخ ندهد و تنها یک فاز مایع به طور کامل منافذ را پر کند. وضعیت برای مخلوط گاز و نفت بسیار پیچیده‌تر می‌شود. کلینکنبرگ (۱۹۴۱) برای اولین بار اختلاف در میزان نفوذپذیری مایع و گاز را مطرح نمود. ایشان با اندازه‌گیری نفوذپذیری در فشارهای متوسط مختلف در یک نمونه معادل نفوذپذیری مایع را ارائه نمود. او دریافت که تراوایی گاز چندین مرتبه بزرگتر از تراوایی مایع است و اختلاف در نفوذپذیری مایع را تفاوت در نتیجه لغزش گاز در مجاری منافذ سنگ عنوان نمودند.

جونز (۱۹۷۲) رابطه بین تراوایی معادل مایع (K_L) و فاکتور لغزش (b) را بر روی ۱۰۰ نمونه بررسی کرد و دریافت که مقدار لگاریتمی b به طور خطی با افزایش مقدار لگاریتمی K_L یا تراوایی معادل مایع افزایش می‌یابد. پرسوف و هیولن (۲۰۰۱) نیز رابطه فاکتور لغزش و تراوایی مایع را در سنگ‌های کم تراوا بررسی کردند و نتایج شبیه جونز به دست آوردند با این تفاوت که شیب به دست آمده در مطالعات آن‌ها بیشتر از مدل جونز بود. تانی کاوا و شیماموتو (۲۰۰۶) نفوذپذیری سنگ‌های رسوبی دامنه کوه‌های تایوان را بوسیله تزریق گاز نیتروژن و آب مقطر به عنوان سیال منفذی تعیین نمودند. آن‌ها اختلاف در نفوذپذیری‌ها را با تئوری کلینکنبرگ توجیه نمودند. زو و همکاران (۲۰۰۷) زوج فرآیند جریان گاز و تغییر شکل پذیری را در رگه‌های زغال سنگ با استفاده از تأثیرات کلینکنبرگ و خروج گاز آنالیز نموده‌اند. با توجه به اهمیت نفوذپذیری مایع با استفاده از نفوذپذیری گاز در این تحقیق ارتباط بین تراوایی مطلق هوا، تراوایی ارائه شده توسط کلینبرگ و تراوایی آب با استفاده از نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های مغزه واقعی در نمونه‌های کربناته مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مطالعات زمین‌شناسی ناحیه ای میدان پارس جنوبی

میدان گازی فوق عظیم پارس جنوبی که از اکتشافات شرکت ملی نفت ایران و بزرگترین منبع گاز جهان است، بر روی خط مرزی مشترک ایران و قطر در ناحیه خلیج فارس در عمق ۴۰۰۰ متری از کف دریا و فاصله ۱۰۰ کیلومتری از ساحل عسلویه قرار دارد. خلیج فارس حوضه کشیده‌ای است که در محل تنگه هرمز به دریای آزاد عمان مربوط می‌شود. این خلیج بین بلوک عربی و رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد. کشیدگی این حوضه به علت ساختمان زمین‌شناسی یعنی وضعیت ناودیدی آن است، به طوری که محور آن در دوره ژوراسیک و کرتاسه تقریباً در امتداد زاگرس فعلی قرار داشته، ولی بعداً، بتدریج به طرف جنوب غرب تغییر مکان داده است (درویش زاده، ۱۳۸۰). پارس یک میدان گازی گنبدی شکل است که به واسطه حرکت گنبد نمکی زیر آن هنگام رسوبگذاری به وجود آمده است. قطر تقریبی شمالی - جنوبی آن حدود ۲۵ کیلومتر و غربی - شرقی آن حدود ۲۰ کیلومتر و بستگی ساختمانی آن حدود ۱۷۰۰ متر روی سازند کنگان است. سنگ مخزن اصلی این میدان سازندهای دالان و کنگان به سن پرموتریاس است. سازن کنگان متعلق به رسوبات اولین پیشروی دریایی تریاس است. جنس سنگ‌های این سازند، بیشتر کربناته‌ها، بخصوص آهک است و در قسمت بالایی آن مقدار زیادی شیل وجود دارد. سازند دالان که سن آن پرمین است، بیشتر از کربناته‌ها تشکیل شده است و بطور کلی می‌توان این سازند را به سه قسمت تقسیم نمود: کربناته‌های پایینی (دالان پایینی)، کولابی نار و کربناته‌های بالایی (دالان بالایی). کربناته‌های بالایی و پایینی بوسیله کولابی نار از هم جدا شده و تشکیل دو مخزن جدا از هم می‌دهند. علاوه بر لایه‌های گازدار کنگان و دالان که لایه اصلی میدان مشترک پارس جنوبی می‌باشند لایه‌های دیگری در این میدان وجود دارند که حفاری‌های انجام شده وجود نفت را در آن‌ها تأیید

نموده است. این مطالعه با استفاده از داده‌های مغزه اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مربوط به این میدان انجام گرفته است.



شکل ۱: موقعیت میدان پارس جنوبی در خلیج فارس

۳- بررسی اثر لغزش گاز یا اثر کلینکنبرگ

کلینکنبرگ (۱۹۴۱) نشان داد که فاز سیال جریانی مورد استفاده در آزمایش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری بر نتایج آزمایش‌ها تاثیر گذار می‌باشد بطوری‌که نفوذپذیری اندازه‌گیری شده یک مغزه با استفاده از جریان هوا، همیشه مقداری بزرگتر از نفوذپذیری اندازه‌گیری شده همان مغزه با استفاده از جریان مایع می‌باشد. کلینکنبرگ به این نتیجه رسید که این تفاوت در مقدار نفوذپذیری اندازه‌گیری شده، به دلیل متفاوت بودن مقدار سرعت سیالات در مجاور دیواره‌های مجراها (خلل و فرج) می‌باشد، زیرا سرعت مایعات در نزدیکی دیواره‌های خلل و فرج، ناچیز و در حد صفر است ولی سرعت گازها، غیر صفر می‌باشد. در فشار متوسط پائین میزان لغزش گاز افزوده می‌شود که این امر، باعث یک افزایش ظاهری در نفوذپذیری می‌شود. در فشار گاز بالا (بی نهایت)، نفوذپذیری گاز با نفوذپذیری مایع برابری می‌نماید. معادله (۱) توسط کلینکنبرگ ارائه شد که نفوذپذیری گاز را به یک مقدار نفوذپذیری معادل مایع کاهش می‌دهد.

$$k_g = k_{\infty} \left(1 + \frac{b}{p_m}\right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

b = ضریب لغزش گاز - k_g = نفوذپذیری مطلق هوا - K_L = نفوذپذیری کلینکنبرگ - P_m = فشار متوسط
در نهایت می‌توان گفت که مطالعات کلینکنبرگ نشان داد که نفوذپذیری گاز در فشار متوسط مغزه تابعی از ترکیب گاز می‌باشد. نفوذپذیری مایع در هر صورت مستقل از ترکیب است.

۴- بررسی واحدهای جریان هیدرولیکی

واحدهای جریان هیدرولیکی در واقع یک روش برای طبقه‌بندی نوع سنگ‌ها و پیش بینی خواص جریانی بر مبنای پارامترهای زمین شناسی و فیزیک جریان در مقیاس منافذ و حفرات است. واحدهای جریانی نه تنها بر پایه موقعیت و خصوصیات زمین شناسی آن‌ها در توالی عمودی، بلکه همچنین بر خصوصیات پتروفیزیکی مخصوصاً تخلخل و تراوایی تعریف شده است. کوزنی (۱۹۲۷) و کارمن (۱۹۳۷) برای یافتن ارتباطی مناسب بین تخلخل و تراوایی محیط متخلخل را به صورت مجموعه‌ای از لوله‌های موئینه مدلسازی کردند. آن‌ها با ترکیب قانون داریسی برای حرکت سیال در محیط متخلخل و قانون پوزیله برای حرکت سیال در لوله‌ها رابطه جدیدی بین تخلخل و تراوایی ارائه نمودند. در این رابطه فاکتوری به نام عامل پیچاپیچی و مساحت حجم دانه هم به رابطه اضافه شده است زیرا در یک مدل واقعی لوله‌های موئینه مستقیم نبوده و دارای خمیدگی‌های متفاوتی هستند. این رابطه به صورت ذیل ارائه شده است:

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

در این رابطه (τ) عامل پیچاپیچی، K تراوایی بر حسب میکرومتر مربع و ϕ_e به صورت کسری بیان می شود. F_s فاکتور شکل بوده و مقدار آن برای لوله های مویینه با مقطع دایره برابر ۲ است. $F_s \tau^2$ ثابت کوزنی می باشد. در حقیقت عبارت S_{gv}^2 تابعی از خصوصیات زمین شناسی محیط متخلخل و تغییرات هندسه حفرات است. به همین دلیل می توان از آن به عنوان معیاری برای تمایز واحدهای جریان هیدرولیکی از یکدیگر استفاده کرد. آمیقول و همکاران (۱۹۹۳) با تقسیم رابطه (۲) بر ϕ_e تغییرات ثابت کوزنی را مورد بررسی قرار داده و رابطه ذیل را ارائه نمودند:

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

از رابطه فوق می توان شاخص کیفیت مخزن، شاخص منطقه ای جریان و تخلخل نرمالیزه شده را به صورت ذیل تعریف کرد (Orodu and et al., 2009):

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{1 - \phi_e} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این روابط بر حسب میلی داری است و عدد ثابت ۰.۰۳۱۴ برای تبدیل از میکرومتر مربع به میلی داری آورده شده است (Soto and et al., 2001).

با توجه به رابطه (۴) تا (۶) رابطه (۳) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$RQI = \phi_z \times FZI \quad \text{رابطه (۷)}$$

با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله (۷) خواهیم داشت:

$$\text{Log}RQI = \text{Log}\phi_z + \text{Log}FZI \quad \text{رابطه (۸)}$$

در اینجا با کلاسه بندی مقادیر FZI تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی تعیین می شود.

۵- روش کار

تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی درون یک مخزن با داده های مغزه (تخلخل و تراوایی) انجام می شود. سه روش آنالیز هیستوگرام، نمودار احتمال و الگوریتم طبقه بندی تحلیلی بوسیله محققین جهت گروه بندی مناسب واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده شده است. در این مطالعه جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی از

روش آنالیز هیستوگرام استفاده شده است که با استفاده از نرم افزار Matlab و آنالیز خوشه‌ای مقادیر FZI، چهار واحد جریان هیدرولیکی برای کل داده‌ها بدست آمده است. روش کار بدین صورت است که ابتدا مقدار شاخص منطقه‌ای جریان (FZI) با استفاده از روابط (۴)، (۶) و (۷) برای هر نمونه محاسبه گردید. سپس آنالیز هیستوگرام با استفاده از ستون FZI به دست آمده توسط نرم افزار Matlab انجام می‌شود. بعد از انجام آنالیز هیستوگرام، آنالیز خوشه‌ای K-means توسط نرم افزار Matlab انجام می‌گیرد که مجموعه‌ای از داده‌های شبیه به هم را در یک گروه قرار داده و بدین ترتیب مشخص می‌شود که هر نمونه در چه واحد جریان هیدرولیکی قرار دارد.

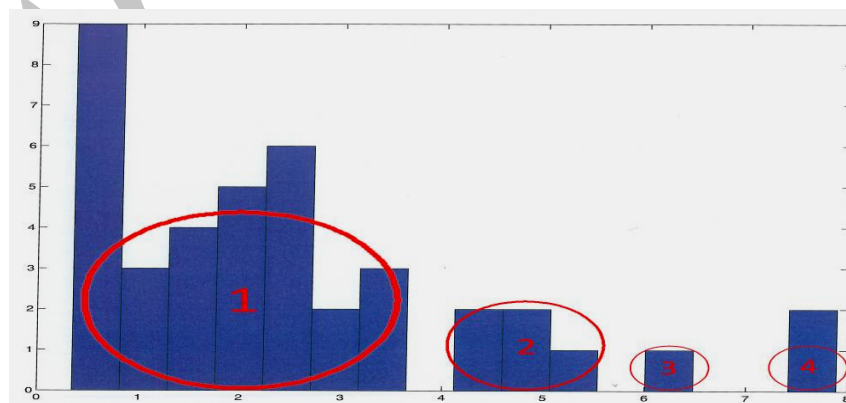
از آنجایی که تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از آنالیز خوشه‌ای و آنالیز احتمال نرمال تابع کاربر می‌باشد و احتمال ایجاد خطا در محاسبات زیاد است، لذا به منظور کاهش خطا از پارامتر مجموع مربع خطاها (SSE) استفاده شده است. روش کار بدین صورت است که ابتدا تعداد دسته‌ها را برابر یک فرض کرده و آنالیز خوشه‌ای K-means را انجام می‌دهیم. سپس آنالیز رگرسیون خطی را بر روی داده‌ها انجام داده و مقدار مجموع مربع خطاها را در هر واحد جریان هیدرولیکی محاسبه می‌نماییم.

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9) \text{ رابطه}$$

این کار را به همین صورت برای تعداد دسته‌های دیگر نیز انجام و در نهایت نموداری از مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد دسته‌ها ترسیم می‌کنیم (شکل ۲).

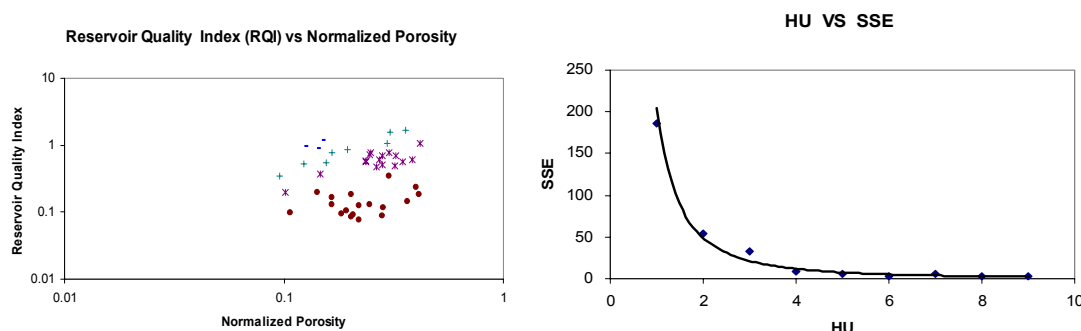
۶- بحث و بررسی

پس از کنترل کیفی داده‌ها، مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه‌ها مقادیر نفوذپذیری هوا بیشتر از نفوذپذیری معادل مایع (کلینکنبرگ) و نفوذپذیری معادل مایع بیشتر از نفوذپذیری آب می‌باشد. سپس با استفاده از تراوایی مطلق هوا و تخلخل اندازه‌گیری شده مغزه در آزمایشگاه، واحدهای جریان هیدرولیکی تعیین گردیدند. بدین منظور مقادیر ϕ_e ، RQI و FZI با استفاده از روابط آمیفل و همکاران برای ۴۱ نمونه از ۳ چاه میدان پارس جنوبی توسط معادلات (۴)، (۶) و (۷) محاسبه گردید. سپس آنالیز هیستوگرام با استفاده از ستون FZI در نرم افزار Matlab انجام شده است (شکل ۲). نتایج بیانگر تبعیت توزیع شاخص منطقه‌ای جریان از چهار توزیع نرمال می‌باشد، بنابراین داده‌ها به چهار واحد جریان هیدرولیکی تقسیم گردیدند (شکل ۲). پس از تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، از آنالیز خوشه‌ای K-means برای مقادیر FZI در چهار واحد جریان هیدرولیکی استفاده شده است.

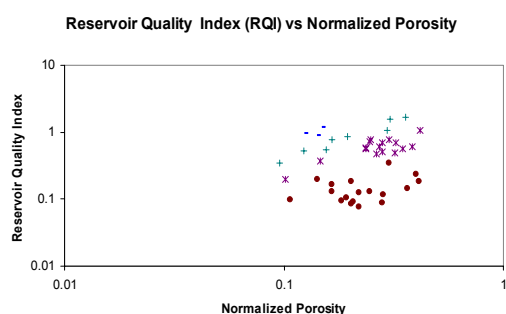


شکل ۲: آنالیز هیستوگرام بر روی داده‌های لگاریتمی شاخص منطقه‌ای جریان در ۴ دسته

پس از تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، از آنالیز خوشه‌ای K-means برای مقادیر FZI در چهار واحد جریان هیدرولیکی استفاده شده است. سپس از پارامتر مجموع مربع خطا استفاده شد (شکل ۳).

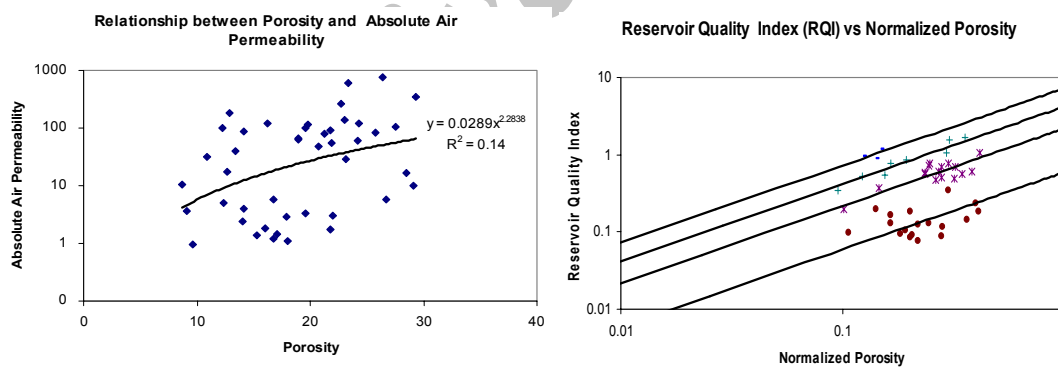


شکل ۳: نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی

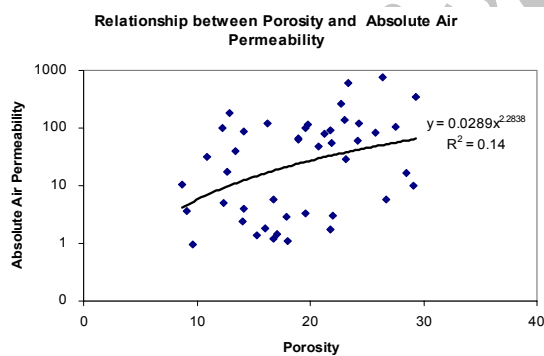


شکل ۴: شاخص کیفیت مخزن (RQI) بر حسب تخلخل نرمالیزه شده (ϕ_z)

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی مقدار مجموع مربع خطاها کاهش یافته، اما از یک مقداری به بعد تغییرات در مجموع مربع خطا محسوس نبوده و قابل صرف نظر کردن است و نتیجه حاصل از مجموع مربع خطا حاکی از چهار واحد جریان هیدرولیکی است. نتایج حاصل از دو روش آنالیز هیستوگرام و مجموع مربع خطاها نشان می‌دهند که داده‌ها به چهار واحد جریان هیدرولیکی تقسیم می‌شوند. سپس مقادیر ϕ_z بر حسب RQI (شکل ۴) و نمودار تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی (شکل ۵) رسم گردید. همانطور که مشاهده می‌شود داده‌هایی که دارای مقادیر یکسان FZI باشند بر روی یک خط با شیب ثابت قرار می‌گیرند و هر یک نمایانگر یک واحد جریان هیدرولیکی هستند. نمونه‌های با مقادیر متفاوت FZI بر روی خطوط موازی هم قرار می‌گیرند.



شکل ۵: نمودار تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی

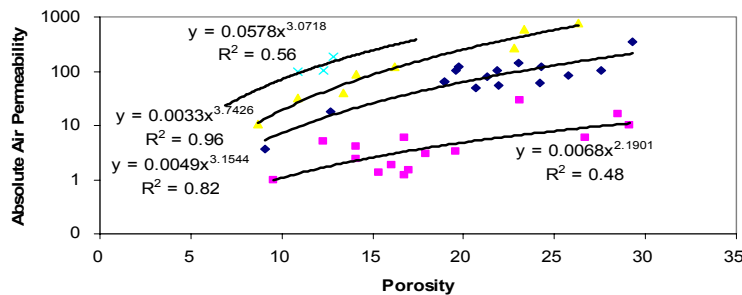


شکل ۶: رابطه میان تخلخل و تراوایی مطلق هوا برای کل نمونه‌ها

سپس نمودار تخلخل بر حسب تراوایی مطلق هوا برای کل نمونه‌ها (شکل ۶) و همچنین در هر واحد جریان هیدرولیکی (شکل ۷) رسم گردید و مقادیر همبستگی آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است زمانی که داده‌های تخلخل و تراوایی مطلق هوا در مقابل هم ترسیم می‌شوند مشاهده می‌شود داده‌ها از یک توزیع نیمه لگاریتمی تبعیت می‌کنند و معادله رگرسیونی آن‌ها از تابع نمایی $Y = aX^b$ تبعیت می‌کند. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود نمودار تخلخل بر حسب تراوایی از تابع نمایی $y = 0.0289 x^{2.2838}$ تبعیت می‌کند و مقدار ضریب همبستگی در آن کم ($R^2 = 0/14$) می‌باشد که علت اصلی آن را می‌توان به ناهمگنی سنگهای کربناته نسبت داد.

در ادامه ارتباط تخلخل و تراوایی در هر واحد جریان هیدرولیکی بررسی شده است. نتایج در شکل (۷) آمده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود مقدار ضریب همبستگی ارتباط بین تخلخل و تراوایی مطلق هوا در هر

چهار واحد جریانی بهبود یافته است و بیشترین مقدار ضریب همبستگی در واحد جریانی شماره سه ($R^2 = 0/96$) و کمترین مقدار مربوط به واحد جریانی شماره دو ($R^2 = 0/48$) می باشد (جدول ۱).



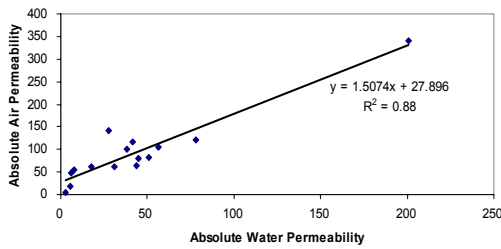
شکل ۷: رابطه میان تخلخل و تراوایی مطلق هوا در هر واحد جریانی

جدول ۱: ضرایب همبستگی ارتباط تخلخل بر حسب تراوایی مطلق هوا در کل نمونه ها و در هر واحد جریان هیدرولیکی

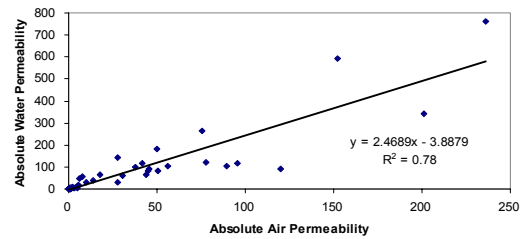
واحد جریان هیدرولیکی	ضریب همبستگی (R^2)
۱	۰/۸۲
۲	۰/۴۸
۳	۰/۹۶
۴	۰/۵۶
کل نمونه ها	۰/۱۴

پس از بررسی رابطه تخلخل و تراوایی بر حسب تراوایی در کل نمونه ها و بر اساس واحدهای جریانی در ادامه رابطه بین تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب بررسی می گردد. نمودار تراوایی مطلق هوا بر حسب تراوایی مطلق آب برای کل نمونه ها (شکل ۸) و همچنین در هر واحد جریانی، شکل های (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) رسم گردید و مقادیر همبستگی آن ها در جدول (۲) آورده شده است. در شکل (۸) رابطه تراوایی مطلق هوا بر حسب تراوایی مطلق آب از یک تابع خطی تبعیت می کند که معادله آن $Y = 2/4689 X - 3/8879$ می باشد. در شکل های (۹)، (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) مقدار ضریب همبستگی در هر واحد جریان هیدرولیکی نسبت به مقدار آن در کل نمونه ها بهبود یافته است. بیشترین مقدار R^2 در ارتباط بین تراوایی مطلق هوا بر حسب تراوایی مطلق آب مربوط به واحد جریانی شماره سه ($R^2 = 0/96$) و کمترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به واحد جریانی شماره یک ($R^2 = 0/48$) می باشد (جدول ۲). بنابراین می توان نتیجه گرفت تعیین تراوایی مطلق آب از روی تراوایی مطلق هوا با استفاده از طبقه بندی سنگ ها به واحدهای جریان هیدرولیکی روش مناسبی می باشد.

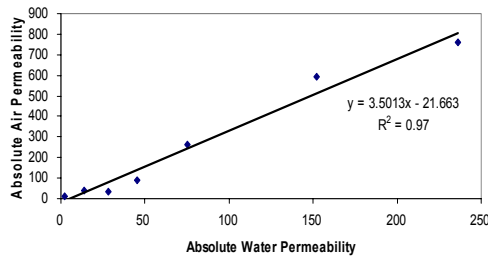
در مرحله بعد رابطه تراوایی مطلق آب بر حسب تراوایی معادل مایع (تراوایی کلینکنبرگ) بررسی گردید. در شکل (۱۳) رابطه تراوایی مطلق آب بر حسب تراوایی معادل مایع در کل نمونه ها از تابع خطی $Y = 2/2718 X - 4/5244$ تبعیت می کند و مقدار ضریب همبستگی آن ($R^2 = 0/77$) می باشد. در شکل های (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) مقدار ضریب همبستگی در هر واحد جریان هیدرولیکی نسبت به مقدار آن در کل نمونه ها بهبود یافته است. بیشترین مقدار R^2 در ارتباط بین تراوایی مطلق آب بر حسب تراوایی معادل مایع مربوط به واحد جریانی شماره سه ($R^2 = 0/99$) و کمترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به واحد جریانی شماره چهار ($R^2 = 0/81$) می باشد (جدول ۳).



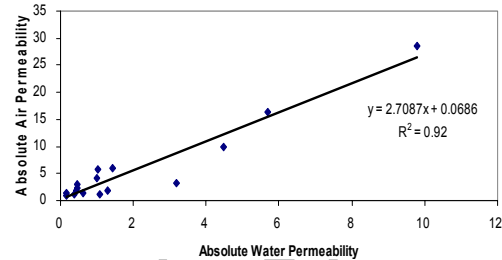
شکل ۹: رابطه میان تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۱



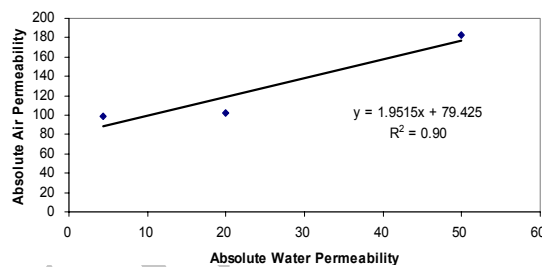
شکل ۸: رابطه میان تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب در کل نمونه ها



شکل ۱۱: رابطه میان تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۳



شکل ۱۰: رابطه میان تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۲



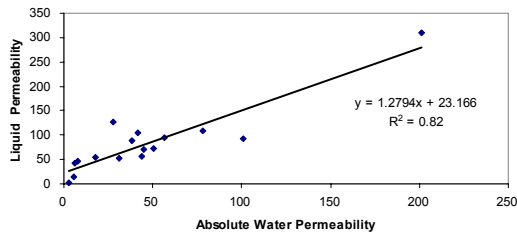
شکل ۱۲: رابطه میان تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۴

جدول ۲: ضرایب همبستگی ارتباط تراوایی مطلق هوا و تراوایی مطلق آب در

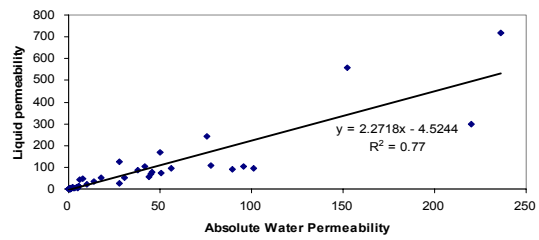
تمامی نمونه ها و در هر واحد جریان هیدرولیکی

واحد جریان هیدرولیکی	ضریب همبستگی (R^2)
۱	۰/۸۸
۲	۰/۹۲
۳	۰/۹۷
۴	۰/۹۰
کل نمونه ها	۰/۷۸

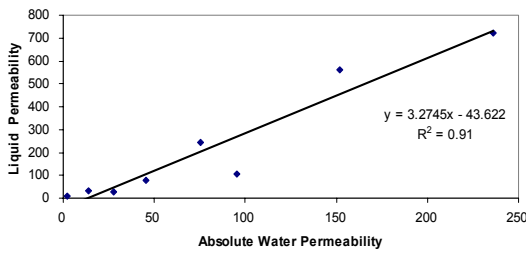
سپس ارتباط تراوایی مطلق هوا بر حسب تراوایی معادل مایع (تراوایی کلینکنبرگ) در کل نمونه‌ها بررسی گردید (شکل ۱۸). رابطه بین تراوایی مطلق هوا و تراوایی معادل مایع از تابع خطی $K_L = 0/09439K_{Air} - 3.0314$ تبعیت می‌کند و دارای ضریب همبستگی قابل توجهی $R^2 = 0/۹۹$ می‌باشد بنابراین جهت تراوایی معادل مایع لازم نیست در آزمایشگاه برای تمامی نمونه‌ها تراوایی معادل مایع (کلینکنبرگ) را اندازه‌گیری نمود. با استفاده از رابطه ارائه شده می‌توان از مقادیر نفوذپذیری مطلق هوا، مقادیر نفوذپذیری معادل مایع را تعیین نمود.



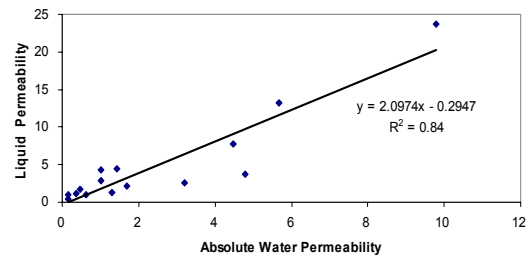
شکل ۱۴: رابطه میان تراوایی مطلق آب و تراوایی معادل مایع در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۱



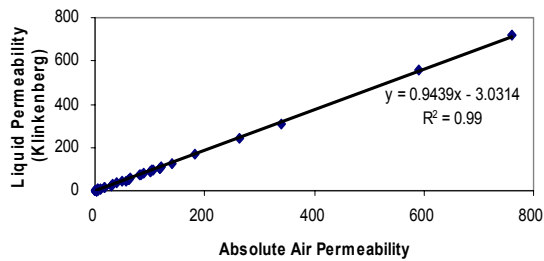
شکل ۱۳: رابطه میان تراوایی مطلق آب و تراوایی معادل مایع در کل نمونه‌ها



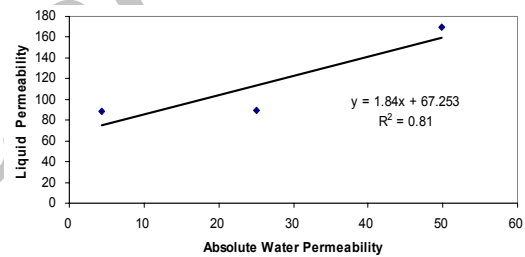
شکل ۱۶: رابطه میان تراوایی مطلق آب و تراوایی معادل مایع در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۳



شکل ۱۵: رابطه میان تراوایی مطلق آب و تراوایی معادل مایع در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۲



شکل ۱۸: رابطه میان تراوایی مطلق هوا و تراوایی معادل مایع در کل نمونه‌ها



شکل ۱۷: رابطه میان تراوایی مطلق آب و تراوایی معادل مایع در واحد جریان هیدرولیکی شماره ۴

جدول ۳: ضرایب همبستگی ارتباط تراوایی مطلق آب و تراوایی مطلق معادل مایع در کل نمونه‌ها و در هر واحد جریان هیدرولیکی

واحد جریان هیدرولیکی	ضریب همبستگی (R^2)
۱	۰/۸۲
۲	۰/۸۴
۳	۰/۹۱
۴	۰/۸۱
کل نمونه‌ها	۰/۷۷

۷- نتیجه گیری

❖ نتایج حاصل از دو روش آنالیز هیستوگرام و مجموع مربع خطاها نشان می‌دهند که داده‌ها از چهار واحد جریان هیدرولیکی پیروی می‌کنند.

- ❖ در تمامی نمونه ها مقادیر نفوذپذیری هوا بیشتر از نفوذپذیری معادل مایع (کلینکنبرگ) و نفوذپذیری معادل مایع بیشتر از نفوذپذیری آب می باشد. $K_{Air} > K_L > K_W$
- ❖ ارتباط نفوذپذیری معادل مایع (کلینکنبرگ) با هوا به صورت $K_L = 0/09439K_{Air} - 3.0314$ می باشد که ضریب همبستگی برابر $R^2 = 0/99$ است و می توان از رابطه ارائه شده در سنگهای کربناته استفاده شود.
- ❖ استفاده از طبقه بندی داده ها به واحدهای جریان هیدرولیکی ارتباط بین تراوایی و تخلخل را به مقدار قابل توجهی بهبود می بخشد.
- ❖ نتایج نشان می دهند تابع نمایی به صورت $Y = aX^b$ بهترین برازش را بین مقادیر تخلخل و تراوایی ارائه می نماید.
- ❖ نتایج نشان می دهند که جهت تعیین نفوذپذیری معادل مایع (کلینکنبرگ) نیازی به انجام آزمایش بر روی تعداد زیادی نمونه نمی باشد. با استفاده از معادله تجربی ارائه شده در این پایان نامه می توان K_L را از روی K_{Air} محاسبه نمود.

۸- سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می دانند از مدیریت محترم شرکت نفت و گاز پارس به خاطر حمایت های لازم در انجام این مطالعه تشکر و قدردانی نمایند.

۹- منابع

۱. درویش زاده، ع.، ۱۳۸۰، زمین شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، تهران، ایران.
2. 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 uncured intervals / wells, SPE 26436, Presented at 68th ann. Tech. Conf., and Exhibite. Houston, Tx.
3. Jones, S.C., 1972, A rapid accurate unsteady-state Klinkenberg parameter: SPE Journal, 383-397.
4. Klinkenberg, L.J., 1941, The Permeability of porous media to liquids and gases: Am Pet Inst Drill Pract, 200-13.
5. Orodu, O.D.; Tang, Z. and fei, Q., 2009, Hydraulic Flow Unit Determination and permeability prediction: A case study of Bloc Shen-95, Liaohe Oilfield, north-East China.
6. Persoff, P. and Hulen, J.B., 2001, Hydrologic characterization of reservoir metagraywacke from shallow and deep levels of the Geysers vapor-dominated geothermal system: California, USA, Geothermics, 30, 169-192.
7. Soto, B.R.; Garcia, J.C.; Torres, F. and Perez, G.S., 2001, Permeability prediction using hydraulic flow units and hybrid soft computing systems: SPE 71455, 1-10.
8. Tanikawa, W. and Shimamoto, T., 2006, Klinkenberg effect for gas permeability and its comparison to water permeability for porous sedimentary rocks: Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 3, 1315-1338.
9. Tanikawa, W. and Shimamoto, T., 2008, Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks: International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 229-238.
10. Zhu, W.C.; Liu, J.; Sheng, J.C. and Elsworth, D., 2007, Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and klinkenberg effects in coal seams: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44, 971-980.