پیش‌بینی نفوذپذیری کلینکنبرگ با استفاده از نفوذپذیری مطلق گاز در سنگ‌های کربناته مخازن هیدروکربوری جنوب غرب ایران

حمید شریفی گلویک* و یاسر سلیمی دلشاد

پژوهشگاه صنعت نفت، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشکده مهندسی نفت

*sharifih@ripi.ir

تاریخ دریافت: فروردین ۹۲، تاریخ پذیرش: شهریور ۹۲

چکیده

نفوذپذیری یکی از پارامترهای اساسی در مطالعه مخازن هیدروکربوری می‌باشد که اندازه‌گیری آن با دقت بالا از اهمیت بسیاری برخوردار است. روش‌های متداول برای این منظور استفاده از داده‌های چاه‌آزمایی و یا اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های مغزه حفاری‌شده از چاه می‌باشد. عموما" در آزمایشگاه به دلیل هزینه کم و سرعت عمل بالا، نفوذپذیری مطلق گاز نمونه‌های پلاگ مغزه اندازه‌گیری می‌شود.

نفوذپذیری گاز در محیط متخلخل به فشار متوسط تزریق و نوع گاز وابسته است و با تغییر آن‌ها نتایج متفاوتی بدست می‌آید. بنابراین اندازه‌گیری نفوذپذیری با اشباع کامل نمونه از مایع و یا تعیین نفوذپذیری معادل مایع به طرق دیگر امری ضروری می‌باشد، که البته این روش مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد. کلینکنبرگ برای اولین بار با بررسی پدیده لغزش گاز در محیط متخلخل و اندازه‌گیری نفوذپذیری مطلق انواع گازها در فشارهای مختلف، رابطه‌ای برای تعیین نفوذپذیری معادل مایع ارائه نمود.

هدف از این مطالعه، ارائه روابطی تجربی برای تعیین نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ (معادل مایع) در سنگ‌های کربناته کشور، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری مطلق گاز می‌باشد که تاکنون گزارش نشده است. بدین منظور نفوذپذیری کلینکنبرگ بر روی ٥٤١ نمونه پلاگ از سازندهای مختلف کربناته جنوب غربی ایران با دامنه‌ی گسترده از مقادیر خواص پتروفیزیکی اندازه‌گیری شد. روابطی نمائی با همبستگی بالا بین نفوذپذیری معادل مایع و نفوذپذیری مطلق گاز بدست آمد. با توجه به فراوانی و محدوده وسیع نمونه‌های مورد مطالعه، مدل‌های تجربی ارائه شده در این مقاله را می‌توان جهت پیش‌بینی و تعیین نفوذپذیری معادل مایع در سنگ‌های کربناته جنوب غربی ایران مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری معادل مایع (کلینکنبرگ)، نفوذپذیری مطلق هوا، لغزش گاز، مخازن کربناته

١. مقدمه

مخازن کربناته بیش از نیمی از نفت و گاز دنیا را در خود جای داده‌اند که البته در کشور ما بیش‌ترین درصد مواد هیدروکربوری در مخازن کربناته وجود دارد. به دلیل نحوه شکل‌گیری و دیاژنز سازندهای کربناته، تنوع بافت و ساختار و تخلخل در ابعاد مختلف بسیار است که باعث بوجود آمدن ناهمگنی در مقیاس‌های متفاوت، از میکرو تا ماکرو و میدان، در این گونه سنگی می‌شود.

نفوذپذیری یکی از پارامترهای پایه برای شناسایی و ارزیابی مخازن هیدروکربوری می‌باشد. با وجود ناهمگنی ذاتی بافت سنگ‌های کربناته، وجود شکستگی‌ها، رگه‌های استیلولیت و حفرات (Vug) با ابعاد مختلف و ناهمسانی در نفوذپذیری، امکان پیش‌بینی مقدار نفوذپذیری از دیگر پارامترهای مخزنی وجود نداشته و یا همراه با خطای بسیار زیادی می‌باشد. بنابراین برای تعیین نفوذپذیری هر سازند هیدروکربوری، اندازه‌گیری آن بر روی نمونه‌های مناسب و به تعداد کافی از سنگ مخزن برای پوشش بهتر از زون‌های مختلف مخزنی غیر قابل اجتناب است.

نفوذپذیری معمولا" بر روی نمونه‌های پلاگ مغزه حفاری شده از چاه، که به طور استاندارد قطر ١/٥ و طول ٢ اینچ دارند اندازه‌گیری می‌گردد. روش‌های متداول تعیین نفوذپذیری، اندازه‌گیری نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری مطلق مایع در حالت اشباع کامل مغزه می‌باشد. در آزمایشگاه‌های مطالعات مغزه، از گازها بخصوص هوای خشک، به دلیل راحتی، صرف وقت و هزینه بسیار کم، امکان اندازه‌گیری در محدوده‌ی بسیار وسیع نفوذپذیری، سرعت عمل بالا، خنثی بودن گاز و عدم واکنش با جنس سنگ و حساسیت کم به تغییرات دما، جهت اندازه‌گیری نفوذپذیری استفاده می‌گردد (تانیکاوا، ٢٠٠٦). به دلیل ماهیت و حالت، گاز باعث ایجاد خطا و عدم اعتبار کافی نفوذپذیری مطلق برای استفاده در ارزیابی و شبیه‌سازی تولید نفت و گاز از مخازن می‌شود. بنابراین از نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ (١٩٤١) که معادل نفوذپذیری مایع می‌باشد در مطالعات مخزن استفاده می‌گردد.

٢. نفوذپذیری سنگ‌ها

نفوذپذیری خصوصیتی از محیط متخلخل می‌باشد که بیان‌گر توانایی آن محیط برای عبور سیال می‌باشد. اساس اندازه‌گیری نفوذپذیری در مغزه بر این اصل استوار است که گرادیان فشار در شرایط جریان پایدار ثابت بوده و متناسب با سرعت جریان می‌باشد که توسط دارسی به صورت زیر ارائه گردیده است (طارق احمد، ٢٠٠١).

$$\frac{d_p}{d_x} = -\frac{\mu}{k} v_x \qquad (١)$$

در این رابطه k نفوذپذیری مطلق بر حسب دارسی است که عامل کنترل‌کننده جهت و سرعت حرکت سیال در محیط متخلخل می‌باشد و v_x سرعت سیال برحسب متر بر ثانیه در راستای طول نمونه، μ گرانروی سیال بر حسب سانتی پواز، و $\frac{d_p}{d_x}$ افت فشار برحسب واحد طول می‌باشد.

بنابراین در رژیم جریان دارسی افت فشار در واحد طول متناسب با سرعت جریان می‌باشد در حالی‌که برای سرعت‌های بالای جریان و اختلاف فشار زیاد این ارتباط خطی نمی‌باشد و جریان غیردارسی بوجود می‌آید. به دلیل تراکم‌پذیری گازها، رابطه دارسی برای اندازه‌گیری نفوذپذیری مطلق گازها با در نظرگرفتن متوسط فشار تزریق به صورت زیر می‌باشد:

$$K_a = \frac{1000 P_a \mu Q_a L}{A(P_1 - P_2)(P_1 + P_2)/2} \qquad (٢)$$

K_a نفوذپذیری مطلق هوا (میلی دارسی)، P_a فشار مطلق جو (اتمسفر)، Q_a نرخ جریان گاز (سی‌سی بر ثانیه)، L طول نمونه سنگ (سانتیمتر)، A سطح مقطع نمونه سنگ (سانتیمتر مربع)، $(P_1+P_2)/2$ فشار متوسط نمونه (اتمسفر) و (P_1-P_2) اختلاف فشار دو سر نمونه (اتمسفر) می‌باشد. از آنجایی که نفوذپذیری گاز در محیط متخلخل به فشار متوسط تزریق و نوع گاز وابسته است، اندازه‌گیری نفوذپذیری با اشباع کامل نمونه از مایع و یا تعیین معادل آن به طرق دیگر امری ضروری می‌باشد، که البته این شیوه مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد.

در اندازه‌گیری نفوذپذیری با استفاده از تزریق گاز، لغزش گاز که یک تاثیر غیر دارسی و مرتبط با جریان غیرخطی گاز در محیط متخلخل است بوجود می‌آید. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که اندازه متوسط شعاع گلوگاه‌های سنگ نزدیک به اندازه متوسط مسیر آزاد ملکول‌های گاز باشد و باعث شتاب گرفتن مولکول‌های گاز یا لغزش آنها در تماس با سطح سنگ گردد. لغزش گاز وابسته به فشار، دما، اندازه مولکول‌های گاز و انرژی جنبشی گاز می‌باشد (یوشو و همکاران، ۱۹۹۸). کلینکنبرگ (۱۹٤۱)، اولین کسی بود که پدیده لغزش گازها را در محیط متخلخل بررسی نمود. وی نشان داد که نفوذپذیری اندازه‌گیری شده گاز تابعی از فشار متوسط تزریق می‌باشد:

$$K = K_\infty(1+\frac{b}{P_m}) \qquad (۳)$$

کلینکنبرگ اعلام کرد نفوذپذیری هوا را بایستی در فشار میانگین تزریق (P_m) اندازه‌گیری و تعیین کرد. میزان خطا نیز با کاهش نفوذپذیری افزایش می‌یابد و مقدار آن در مقادیر کمتر از ۱ میلی‌دارسی قابل توجه است. بر این اساس، با اندازه‌گیری نفوذپذیری گاز در فشارهای متوسط مختلف، از برازش خطی داده‌های نفوذپذیری گاز بر حسب عکس فشار متوسط در نقطه‌ای که فشار متوسط گاز از لحاظ تئوری بینهایت می‌شود، نفوذپذیری معادل مایع یا نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ تعیین می‌شود که آن‌را با نماد K_∞و یا K_L نمایش می‌دهند. از شیب این خط ضریب لغزش گاز(b) بدست می‌آید(شکل ۱). برای هر گاز از داده‌های نفوذپذیری در فشارهای متوسط مختلف خط مستقیمی ایجاد می‌شود که خط‌های حاصل از تمام گازها در نقطه مشترکی (K_L) به هم می‌رسند (کلینکنبرگ، ۱۹٤۱). b وابسته به متوسط حرکت آزاد مولکول‌های گاز (λ) در فشار متوسط تزریق (P_m) می‌باشد:

$$b = \frac{4C'\lambda P_m}{r} \qquad (٤)$$

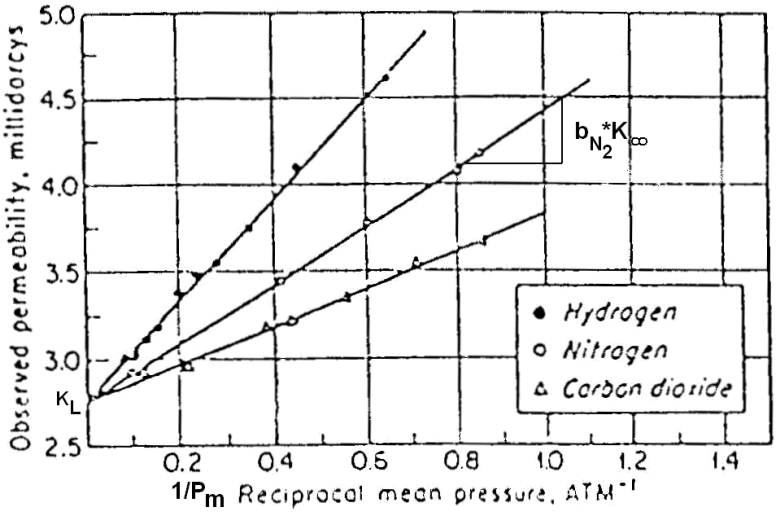
r شعاع منفذ و C' تقریبا برابر با ۱ می‌باشد.

مهمترین عوامل موثر بر لغزش گازها وزن مولکولی گاز، اندازه مجاری عبور گاز از منافذ سنگ و فشار گاز می‌باشد. هر چقدر وزن مولکولی گازها کمتر باشد مقدار لغزش گازها افزایش می‌یابد. همچنین هر اندازه مجاری عبور گاز کوچک‌تر باشد تاثیر لغزش گاز بیشتر است. پدیده لغزش در گازها رابطه معکوس با فشار دارد (یوشو و همکاران، ۱۹۹۸، راشینگ و همکاران، ۲۰۰٤). لازم به ذکر است که نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ مستقل از نوع گاز تزریقی می‌باشد.

نفوذپذیری مایع با فرضیات جریان آرام، عدم واکنش بین سنگ و سیال و اشباع ثابت است، در حالی‌که برای گازها متفاوت است. وقتی‌که مایع از منفذ سنگ عبور می‌کند سرعت مولکول‌های مایع در مرکز بیشتر از دیواره منفذ است در صورتی‌که جریان گاز در منافذ شکل یکنواخت‌تری دارد. علت عمده این اختلاف را می‌توان به فشار متوسط جریان گاز در زمان اندازه‌گیری نفوذپذیری نسبت داد.

در فشارهای متوسط (P_m) پایین نفوذپذیری مطلق گاز بیشتر از نفوذپذیری مطلق مایع می‌باشد. در فشارهای متوسط بالا نفوذپذیری مطلق گازها به نفوذپذیری مطلق مایع نزدیک شده و طبق معادله (۳) در فشارهای متوسط بینهایت نفوذپذیری مطلق گاز و مایع برابر می‌گردند. البته مایعی با خواص نیوتنی با جریان آرام که با سنگ واکنش نداده و تمایل چسبندگی نداشته باشد.

توجه به این نکته بسیار مهم است که اندازه‌گیری نفوذپذیری گازها در آزمایشگاه وابسته به فشار متوسط در حین آزمایش می‌باشد و بدون اطلاع از فشار متوسط، نفوذپذیری نمونه‌های مختلف قابل مقایسه نیستند (کالین، ١٩٩١). این امر لزوم اندازه‌گیری نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ (معادل مایع) بر روی نمونه‌های سنگ را می‌رساند.



شکل ١: تغییرات نفوذپذیری گاز با متوسط فشار و پارامترهای تعیین نفوذپذیری معادل مایع با رابطه کلینکنبرگ (b, K_L)، (کلینکنبرگ، ١٩٤١).

٣. شرح کار آزمایشگاهی

نمونه‌های استوانه‌ای (پلاگ) با طول ٥ و قطر ٣/٨ سانتیمتر از مغزه‌های چاه‌های مختلف حفاری شده و پس از آماده‌سازی، شستشو و خشک گردیدند. این نمونه‌های منتخب از نمونه‌های تمام مغزه زون بازده سنگ‌های کربناته مخازن هیدروکربوری مختلف در جنوب غرب ایران تهیه شدند. در این مطالعه، نفوذپذیری مطلق گاز، تخلخل، چگالی و همچنین نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ ٥٤١ عدد نمونه پلاگ با خواص پتروفیزیکی متنوع از این مخازن کربناته با استفاده از دستگاه Ultra-Permeameter 200A (١٩٩٤) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های منتخب از لحاظ زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفتند تا نمونه‌های حاوی درزه، شکاف و ندول‌های انیدریتی در این مطالعه و ارائه روابط مورد استفاده قرار نگیرند.

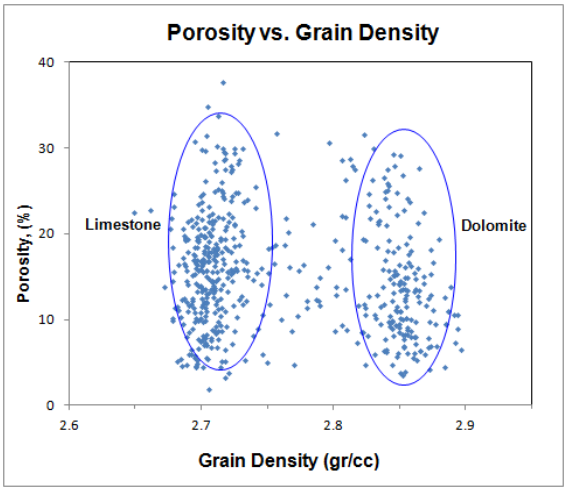
به منظور خارج ساختن آلودگی‌های حاصل از گل حفاری و هیدروکربورهای سبک و سنگین از داخل نمونه‌های مغزه، آنها را در دستگاه ساکسولت در تماس با یک حلال نفتی قرار داده و پس از حل‌شدن مواد هیدروکربوری در حلال، نمونه‌ها شسته و تمیز شدند. در این مطالعه از سیال تولوئن و متانول جهت عاری نمودن نمونه‌های پلاگ از هیدروکربور و آب سازندی استفاده شد و نمونه‌ها در آون معمولی خشک شدند.

نفوذپذیری مطلق گاز نمونه‌ها بر اساس قانون دارسی برای گازها و با اندازه‌گیری اختلاف فشار بین دو سر نمونه، دبی جریان و ابعاد نمونه‌ها بدست آمد. به‌منظور بدست آوردن میزان نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ (K_L معادل مایع)، مقادیر نفوذپذیری مطلق نسبت به هوا (K_{air}) در ٥ فشار متوسط (P_m) و در شرایط آزمایشگاهی یکسان (دمای محیط و فشار محدودکننده ٥٠٠ پام) اندازه‌گیری شده، و سپس بر روی نموداری مشابه با شکل (١)، مقادیر نفوذپذیری مطلق نسبت به هوا در فشارهای متوسط مختلف ترسیم می‌گردد. از محل برخورد خط حاصل از امتداد نمودار با محور عمودی و یا به عبارت دیگر حالتی‌که مقدار فشار متوسط گاز به بی‌نهایت می‌رسد، می‌توان مقدار نفوذپذیری معادل مایع را بدست آورد. فشارهای متوسط تزریق به گونه‌ای

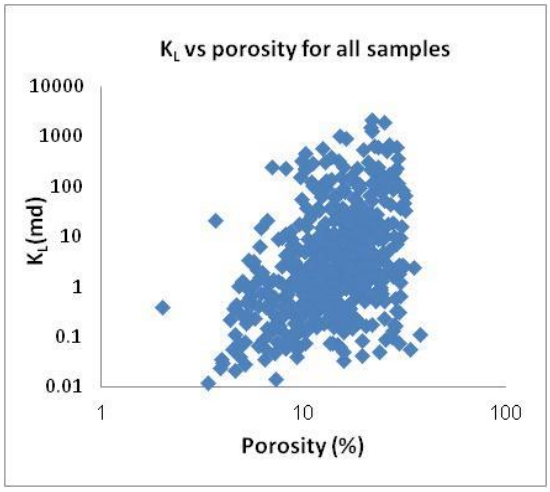
انتخاب شدند که در محدوده جریان دارسی باشند. در نهایت با بررسی و تحلیل نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی مقادیر (K_L) بر حسب (K_{air}) در نمونه‌های کربناته سازندهای مختلف از میادین جنوب غرب ایران ارائه شده است.

٤. بحث و بررسی

بر اساس بررسی‌های به عمل آمده، تاکنون رابطه‌ای بین نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ برای نمونه‌های کربناته ارائه نشده است. با توجه به نمودار شکل ۳ رابطه‌ای بین نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ و تخلخل نمونه‌ها مشاهده نگردید که تنوع زیاد خواص پتروفیزیکی نمونه‌های منتخب را می‌رساند. به توجه به تعداد زیاد نمونه‌ها و تنوع بافتی، ساختاری و ناهمگنی نمونه‌های کربناته مورد مطالعه، امکان تقسیم‌بندی نمونه‌ها بر اساس دسته‌بندیهای ارائه شده توسط محققانی همچون آرچی (۱۹۵۲)، لوسیا (۱۹۸۳) و یا غیره در مقابل تغییرات نفوذپذیری نبود.

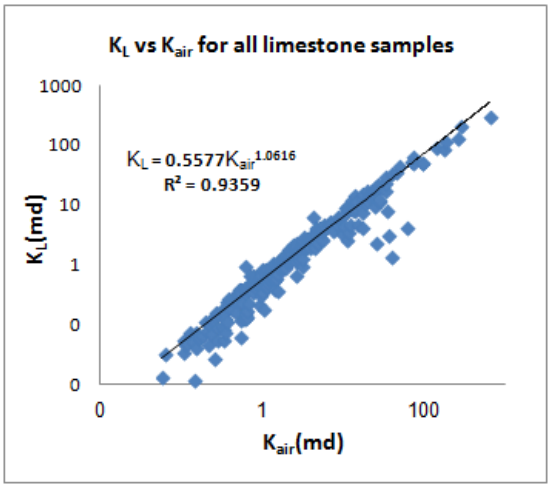


شکل ۲: نمودار تخلخل در مقابل چگالی دانه‌ای تمامی نمونه‌ها

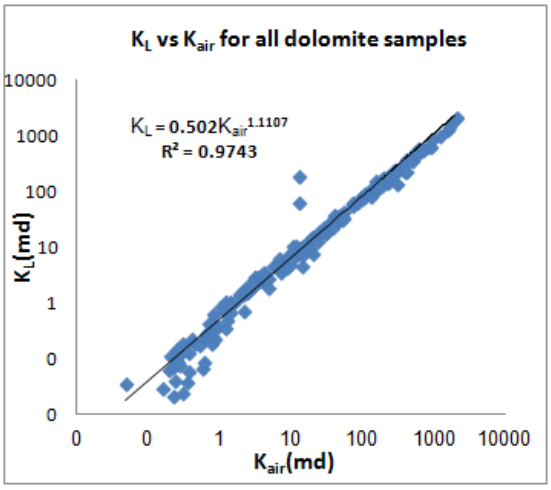


شکل ۳: نمودار نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ در مقابل تخلخل تمامی نمونه‌ها.

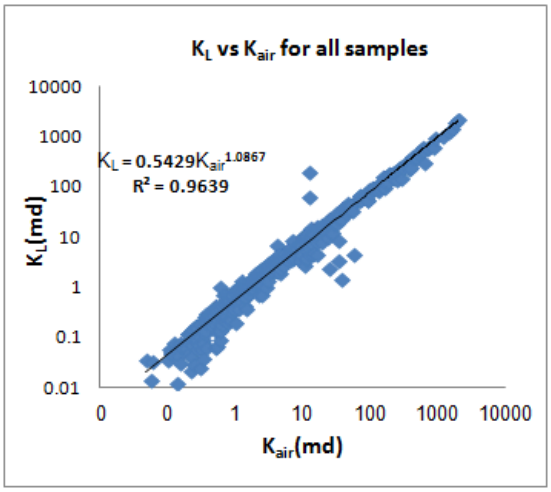
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که توابع نمایی بهترین برازش را بر داده‌های نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ در مقابل نفوذپذیری مطلق هوا دارند. رابطه‌های بدست آمده بر اساس نوع سازند و مخزن، چگالی دانه‌ای (که معرف نوع سنگ می باشد) و مقادیر نفوذپذیری تقسیم‌بندی شده است (جدول ۱). همان‌طوری‌که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد تقریبا" نیمی از نمونه‌ها سنگ آهک با چگالی دانه‌ای متوسط ۲/۷۲ و حدود نیم دیگر نیز دولومیت با چگالی دانه‌ای متوسط ۲/۸٦ می‌باشند و تعدادی نیز مابین این دو نوع سنگ قرار دارند. با توجه به تنوع خواص پتروفیزیکی نمونه‌های منتخب روابط بدست آمده را می‌توان در محدوده وسیع از خواص پترفیزیکی مورد استفاده قرار داد.



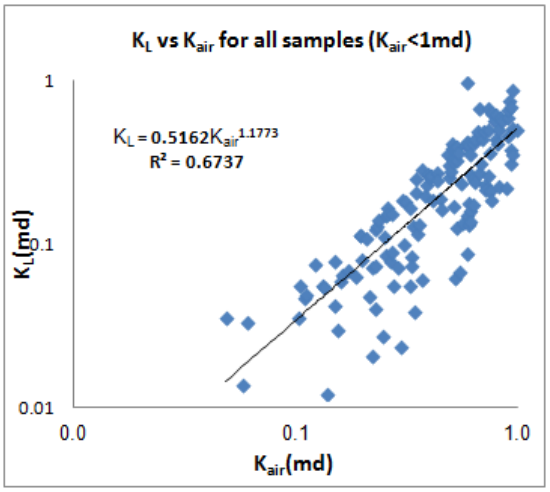
شکل ٤: نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ برای نمونه‌های آهکی.



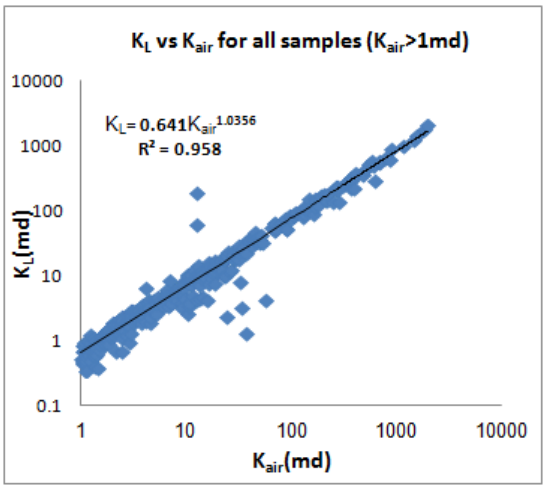
شکل ٥: نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ برای نمونه‌های دولومیتی.



شکل ٦: نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ برای تمامی نمونه‌های مورد مطالعه.



شکل ٧: نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ برای نمونه‌های با نفوذپذیری کمتر از ١ میلی



شکل ٨: نفوذپذیری مطلق هوا و نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ برای نمونه‌های با نفوذپذیری بیشتر از ١ میلی

چنان‌که در جدول ۱ و شکل‌های ٤ تا ۸ مشاهده می‌شود رابطه بدست آمده برای نمونه‌های با نفوذپذیری کمتر از ۱ میلی‌دارسی دارای پایین‌ترین ضریب همبستگی می‌باشد، ولی روابط دیگر دارای ضریب همبستگی بالایی می‌باشند. بنابراین با استفاده از روابط تجربی بدست آمده می‌توان بدون اندازه‌گیری مستقیم دستگاهی در آزمایشگاه، مقدار نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ را از روی نفوذپذیری مطلق هوا برای نمونه‌های سازندهای مختلف کربناته ایران بدست آورد.

بدلیل آنکه نمونه‌های دارای نفوذپذیری کمتر از ۱ میلی دارسی به لحاظ بافت سنگ و اندازه حفرات در محدوده سنگ‌های متراکم مخازن هیدروکربوری قرار دارند و در اندازه‌گیری توسط دستگاه‌های آزمایشگاهی با خطای تعیین دقیق اختلاف فشار و دبی گاز عبوری مواجه می‌گردند، بنابراین در مدل تجربی دارای بیشترین خطا می‌باشند.

جدول ۱: روابط تجربی بدست آمده بین نفوذپذیری کلینکنبرگ و نفوذپذیری مطلق هوا برای نمونه سنگ‌های کربناته مطالعه شده.

رابطه تجربی	نام سازند	تعداد نمونه پلاگ
$K_L = 0.6568K_{air}^{1.0942}$ $R^2 = 0.9613$	سروک	۱۰۳ عدد
$K_L = 0.5867K_{air}^{0.9732}$ $R^2 = 0.9124$	فهلیان	۱۰۲ عدد
$K_L = 0.4957K_{air}^{1.122}$ $R^2 = 0.9731$	کنگان	۳۳٦ عدد
$K_L = 0.5429K_{air}^{1.0867}$ $R^2 = 0.9639$	تمامی نمونه‌های سنگی (سروک- فهلیان- کنگان)	٥٤۱ عدد
$K_L = 0.5162K_{air}^{1.1737}$ $R^2 = 0.6737$	سروک- فهلیان- کنگان با نفوذپذیری کمتر از ۱ میلی‌دارسی	۱٤۱ عدد
$K_L = 0.641K_{air}^{1.0356}$ $R^2 = 0.958$	سروک- فهلیان- کنگان با نفوذپذیری بیشتر از ۱ میلی‌دارسی	٤۰۰ عدد
$K_L = 0.5577K_{air}^{1.0616}$ $R^2 = 0.9359$	سروک- فهلیان- کنگان (آهکی)	۳۲٦ عدد
$K_L = 0.502K_{air}^{1.1107}$ $R^2 = 0.9743$	سروک- فهلیان- کنگان (دولومیتی)	۱۹٦ عدد

۵. نتیجه‌گیری

۱- تاکنون رابطه‌ای برای پیش‌بینی نفوذپذیری تصحیح‌شده کلینکنبرگ (معادل مایع) بر حسب نفوذپذیری مطلق هوا برای سنگ‌های کربناته، بخصوص ایران، ارائه نشده است. روابط بدست آمده در این مقاله با همبستگی بالا قابل استفاده برای پیش‌بینی نفوذپذیری معادل مایع از روی نفوذپذیری مطلق هوا که به طور معمول در آزمایشگاه‌های مغزه اندازه‌گیری می‌شوند کاربرد دارد.

۲- تابع نمایی $K_L = aK_{air}^{\ b}$ برازش خوبی را جهت تعیین نفوذپذیری کلینکنبرگ از نفوذپذیری مطلق هوا در سنگ‌های کربناته جنوب غرب ایران نشان می‌دهد. مقادیر a در محدوده‌ی ۰/٤۹٥۷ تا ۰/٦٥٦۸ و مقادیر b در محدوده‌ی ۰/۹۷۳۲ تا ۱/۱۲۲ می باشد.

٣- نتایج حاصل موکد این مطلب است که در سنگ‌های متراکم با گلوگاه‌ها و منافذ کوچک، پدیده لغزش گاز حائز اهمیت بیشتری است. همچنان که ضریب همبستگی پایین‌تری برای این نمونه‌ها بدست آمده است.

٤- با استفاده از روابط تجربی بدست آمده، بدون اندازه‌گیری مستقیم دستگاهی، می‌توان مقدار نفوذپذیری معادل مایع (کلینکنبرگ) نمونه‌های سازندهای مختلف کربناته ایران را تنها با داشتن نفوذپذیری مطلق هوا بدست آورد؛ که این امر از لحاظ زمان و هزینه مقرون به صرفه می‌باشد.

٥- نمونه‌های با نفوذپذیری کمتر از ١ میلی‌دارسی دارای کمترین مقدار ضریب همبستگی می‌باشد (٠/٦٧٣٧). لذا نفوذپذیری پیش‌بینی شده با آن با خطای بیشتری مواجه است.

٦- با بدست آمدن داده‌های بیشتری از نفوذپذیری مطلق هوا و کلینکنبرگ از نمونه سنگ‌های مخازن کربناته ایران، روابط ارائه‌شده در آینده بهبود می‌یابد که توسط نویسندگان منتشر خواهد شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب امتنان خود را از گروه پژوهش و فناوری سنگ و سیال پژوهشکده مهندسی نفت پژوهشگاه صنعت نفت به جهت حمایت از تحقیقات منتهی به این مقاله اعلام می‌دارند.

"هیئت تحریریه مجله از آقایان دکتر بهرام موحد و دکتر فرهاد خوشبخت که داوری مقاله را بر عهده داشته اند کمال تشکر وسپاس را دارد"

منابع

[1] W. Tanikawa and T. Shimamoto (2006), Klinkenberg effect for gas permeability and its comparison to water permeability for porous sedimentary rocks, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 3, 1315–1338.

[2] Klinkenberg, L.J. (1941). The permeability of porous media to liquids and gases. API Drilling and Production Practice, 200-213.

[3] Ahmed، Tarek, (2001). Reservoir Engineering Handbook-Ch. 4، Fundamental of rock properties، Second Edition، Gulf Professional Publishing.

[4] Yu-Shu Wu, K. Pruess and P. Persoff (1998,) Gas flow in porous media with Klinkenberg effects, Transport in Poros Media 32; 117-137.

[5] Rushing، J.A.، Newsham، K.E.، Lasswell، P.M and Blasingame، T.A، (2004). Klinkenberg – corrected permeability measurement in tight gas sands: Steady state versus unsteady state techniques، SPE، No. 89867، 1-11.

[6] Colin A. McPhee and Kevin G. Arthur (1991). Klinkenberg permeability measurement problems and practical solutions, Edinburgh Petroleum Services Limited، UK.

[7] Ultra-Permeameter 200A Operation Manual، Core Laboratories Instruments، USA، (1994).

[8] Archie, G. E. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations, AAPG Bulletin, V.36: 278-98.

[9] Lucia, F. J. (1983). Petrophysical Parameters Estimated from Visual Descriptions of Carbonate Rocks: a Field Classification of Carbonate Pore Space. JPT: 629-37.

Klinkenberg Permeability Prediction by Using Absolute Gas Permeability in Carbonate Hydrocarbon Reservoir Rocks of South-West of Iran

Hamid Sharifi Galiuk, Yaser Salimi Delshad

Abstract

Permeability is one of the main parameters in the study of hydrocarbon reservoirs which are needed to be measured correctly. The conventional methods are well testing and direct permeability measurement on the drilled core samples. Absolute air permeability of core plug samples is often measured in the laboratory which is cheap and fast.
The absolute air permeability of a rock sample depends on the flowing mean pressure and type of gas and varies with changing them. Hence, measuring liquid permeability of fully saturated core sample or determination of corrected gas permeability which is equivalent to the liquid permeability is essential. This needs to spend enough time and budget. Klinkenberg investigated the effect of gas slippage in porous media and measured absolute permeability of different gases in various mean pressures. He yielded an equation for correcting absolute gas permeability and defining equivalent liquid permeability.
The aim of this study was to present some practical relations for determining Klinkenberg corrected gas permeability of carbonate rocks by using their absolute air permeability, which has not been reported yet. For this purpose, Klinkenberg corrected gas permeability of 541 core plugs, with various petrophysical properties from different carbonate formations in the Southwest of Iran was measured. Exponential relations were obtained with very good correlation coefficients. Considering vast petrophysical properties of the studied samples, the yielded equations can be used to predict and determine equivalent liquid permeability of carbonate core samples of Southwest of Iran from their absolute air permeability.

Keywords: Equivalent Liquid Permeability (Klinkenberg), Absolute Air Permeability, Gas Slippage, Carbonate Reservoirs.