

تعیین نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری با استفاده از دستگاه داریسی لاگ

حسام آلوکی بختیاری^۱، عزت اله کاظم زاده^۱، مجید نبی بید هندی^۲، جعفر ولی^۱، رولند لنورمند^۳

^۱پژوهشگاه صنعت نفت (e-mail:valij@ripi.ir)، (e-mail:kazemzadehe@ripi.ir)، (e-mail:bakhtiarh@ripi.ir)

^۲دانشیار گروه فیزیک زمین مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (e-mail:mnbhendi@ut.ac.ir)

^۳مؤسسه نفت فرانسه (e-mail:Roland.LENORMAND@ifp.fr)

(دریافت: ۸۶/۱۱/۱۵، پذیرش نهایی: ۸۷/۰۵/۲۹)

چکیده

اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای مخزنی سنگ شامل تخلخل و نفوذپذیری برای توصیف مخزن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در شرایطی که سازند مورد بررسی مغزه‌گیری نشده باشد و یا به دلایل مشکلات مغزه‌گیری در پاره‌ای از قسمت‌های چاه امکان مغزه‌گیری وجود نداشته باشد، خرده‌سنگ‌های حفاری حمل شده با گل حفاری، تنها شواهد موجود از سازندهای حفاری شده‌اند که دستیابی به اطلاعات تخلخل و نفوذپذیری آنها با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مستقیم دارای اهمیت است.

روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری محدودند و اساس اندازه‌گیری در این روش‌ها ایجاد جریان سیال از درون خرده‌سنگ‌ها، به جای عبور از فضای بین آنها است (اگرمن و همکاران، ۲۰۰۲). در روش به‌کار رفته در این بررسی با استفاده از دستگاه داریسی لاگ فضای خالی بین خرده‌سنگ‌ها با روغن پر می‌شود و با تزریق روغن تحت فشار به خرده‌ها و تراکم هوای محبوس درون آنها، نفوذپذیری نمونه تعیین می‌شود. دستگاه داریسی لاگ، محصول ۲۰۰۴، تحت لیسانس مؤسسه نفت فرانسه است و نخستین بار در کشور در پژوهشگاه صنعت نفت نصب و راه اندازی شده است.

در این مقاله ابتدا دستگاه داریسی لاگ معرفی می‌شود و سپس به منظور بررسی میزان وابستگی نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها به نوع تخلخل، نفوذپذیری نمونه مغزه استوانه‌ای شکل (پلاگ) با نفوذپذیری تکه‌های خرد شده از همان نمونه مغزه که با دستگاه داریسی لاگ اندازه‌گیری شده است، مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های کربناته دارای بافت نامتراکم و تخلخل غالب بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری که نفوذپذیری آنها بیش از ۱ میلی‌داریسی باشد، انطباق خوبی بین نفوذپذیری مغزه با نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها وجود دارد و میانگین خطای نسبی حدود ۵ درصد است. بنابر این روش پیش‌گفته برای تعیین نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های این‌گونه از سنگ‌ها می‌تواند قابل اعتماد باشد. همچنین آزمایش‌ها روشن ساخت که در سنگ‌های کربناته با بافت متراکم و تخلخل و گلوگاه‌های بسیار کوچک و با نفوذپذیری کمتر از ۱ میلی‌داریسی، و همچنین در سنگ‌های کربناته با تخلخل دوگانه، به‌ویژه با افزایش تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای غیر مرتبط، مقدار نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها متفاوت از نفوذپذیری مغزه بوده و میانگین خطای نسبی حدود ۴۷ درصد است که نشان می‌دهد روش یاد شده در این گونه از سنگ‌ها از سطح اعتماد کافی برخوردار نیست.

کلید واژه‌ها: خرده‌سنگ‌های حفاری، نفوذپذیری، داریسی لاگ، تخلخل دوگانه

۱ مقدمه

است. تعیین نفوذپذیری مغزه در آزمایشگاه قابل اعتمادترین روش برای اندازه‌گیری مستقیم نفوذپذیری است، اما تهیه مغزه از سازندهای مورد بررسی به‌دلایلی نظیر توقف حفاری چاه به منظور عملیات مغزه‌گیری، حمل و نقل و همچنین عملیات آزمایشگاهی، بسیار پر هزینه است و نتایج آزمایش‌های مغزه چندین هفته پس از مغزه‌گیری از چاه قابل دسترس خواهند بود.

از آنجا که نتایج ارزیابی‌های پتروفیزیکی سنگ مخزن به‌طور مستقیم در تعیین میزان ذخیره هیدروکربور و بهره‌دهی چاه به‌کار می‌روند، اندازه‌گیری دقیق و سریع آنها از جمله مهم‌ترین مراحل در توصیف مخزن است. نمودارهای پتروفیزیکی اغلب برآورد خوبی از تخلخل در فواصل عمقی سازند مورد بررسی ارائه می‌دهند، در حالی که ارزیابی نفوذپذیری همواره با دشواری همراه

در این بررسی از روش موسسه نفت فرانسه برای اندازه گیری مستقیم نفوذپذیری خردسنگ‌هایی که نفوذپذیریشان کمتر از یک داریسی است استفاده شده است. در این روش جریان موثر روغن با چسبندگی زیاد سبب تراکم هوای محبوس در خردسنگ‌ها می‌شود و نفوذپذیری با حل عددی معادله ارائه شده به دست می‌آید. در این مقاله ابتدا دستگاه اندازه گیری نفوذپذیری داریسی لاگ معرفی می‌شود و سپس نفوذپذیری اندازه گیری شده نمونه‌های خردسنگی که عمدتاً از جنس کربناته و متعلق به مخازن جنوبی ایران هستند با نفوذپذیری نمونه پلاگ از مغزه به قطر ۱/۵ اینچ و طول حدود ۳ اینچ، قبل از خرد شدن مقایسه شده است. در این مقایسه نقش نوع تخلخل در درستی اندازه گیری نفوذپذیری خردسنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ اصول روش تعیین نفوذپذیری خردسنگ‌های حفاری با استفاده از دستگاه داریسی لاگ

در این روش ابتدا خردسنگ‌ها درون روغن (یا یک سیال چسبنده) غوطه‌ور می‌شوند و فضای خالی بین خردسنگ‌ها کاملاً از روغن پر می‌شود و همزمان، با نفوذ خودبه‌خود روغن به فضای خالی درون خردسنگ‌ها، هوای اولیه موجود در درون خردسنگ‌ها محبوس می‌شود. با تزریق روغن تحت فشار به این مجموعه خردسنگ و روغن، روغن تزریقی هوای محبوس شده در فضاها را خالی می‌کند و درون خردسنگ‌ها را متراکم می‌کند شکل ۱ و بنابر این هوا به جای جریان یافتن در فضای بین خردسنگ‌ها در درون آنها جریان می‌یابد. با اندازه گیری افت فشار ناشی از تراکم هوای محبوس در نمونه و با معلوم بودن چسبندگی روغن، نفوذپذیری تعیین می‌شود. چسبندگی روغن مورد استفاده بستگی به نفوذپذیری سنگ مخزن دارد و بنابر این شناخت قبلی از دامنه تغییرات نفوذپذیری نمونه برای انتخاب روغن مناسب برای به انجام رساندن آزمایش

یکی از روش‌های اندازه گیری مستقیم نفوذپذیری، استفاده از خردسنگ‌های حفاری است. خردسنگ‌های حفاری به طور معمول مورد استفاده زمین‌شناسان سرچاه قرار دارند و با استفاده از آنها علاوه بر توصیف سنگ‌شناسی و فسیل‌شناسی، سازند وجود هیدروکربور را نیز گزارش کنند. روش‌های تعیین نفوذپذیری از خردسنگ‌های حفاری را می‌توان به دو گروه، شامل ارزیابی مستقیم و غیر مستقیم تقسیم کرد.

در روش‌های ارزیابی غیر مستقیم، نفوذپذیری خردسنگ‌های حفاری از روابط تجربی بر اساس توزیع اندازه و ارتباط حفرات بدست می‌آید. در این روابط ویژگی فشار موئینه جیوه (سوانسون ۱۹۸۱)، مطالعات NMR (تیمور ۱۹۶۸)، و یا آنالیز تصویر (فنس و همکاران، ۱۹۹۸) به منظور برآورد نفوذپذیری به کار می‌روند.

از روش‌های ارزیابی مستقیم نفوذپذیری خردسنگ‌های حفاری می‌توان به روشی که (سانتالری و همکاران ۱۹۹۸) ارائه کرده‌اند اشاره کرد. در این روش، خردسنگ‌ها درون رزین اکریلیک قرار می‌گیرند و فضای بین آنها کاملاً با رزین پر می‌شود. با اندازه گیری سطح موثر خردسنگ‌ها و با عبور جریان ثابت هوا از درون آنها، نفوذپذیری اندازه گیری می‌شود. به دلیل مسدود شدن فضای بین خردسنگ‌ها با رزین، هوا کاملاً از درون آنها جریان دارد. روش دیگر را لوفل و همکاران (۱۹۹۳) ارائه کردند. در این روش پس از شستشوی خردسنگ‌ها و خروج مواد هیدروکربوری از درون آنها، نمونه خشک شده و درون محفظه‌ای در فشار جوی قرار می‌گیرد. سپس این محفظه به محفظه دیگری که تحت فشار است مرتبط می‌شود و از میزان کاهش فشار ثبت شده در برآورد نفوذپذیری استفاده می‌شود. به علت استفاده از گاز که گران‌روی کمی دارد از این روش فقط برای نمونه‌های با نفوذپذیری کمتر از ۰/۱ میلی داریسی استفاده می‌شود.

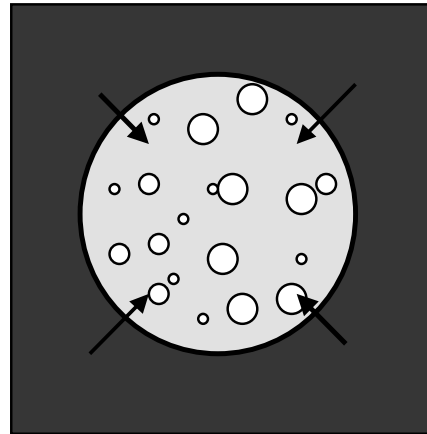
ضروری است.

۳ شرح دستگاه داریسی لاگ و مراحل اندازه‌گیری نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری

این دستگاه شکل ۲ از یک محفظه نمونه برای خرده‌سنگ‌های حفاری به ظرفیت ۱۰ سانتی‌متر مکعب، یک محفظه فشاری با حجمی معلوم، و یک حساسگر فشاری تشکیل شده است. شکل ۳ دستگاه داریسی لاگ را به اجمال نشان می‌دهد. در شروع آزمایش ابتدا همه مسیرهای عبور روغن و محفظه‌های موجود در دستگاه با عبور گاز کربن دی‌اکسید از هوا تخلیه و از این گاز اشباع می‌شود. سپس همه مسیرها و محفظه‌های موجود با روغن دارای چسبندگی حدود ۱۰۰ سانتی‌پوآز پر و دستگاه به اصطلاح هواگیری می‌شود تا حجم گاز کربن دی‌اکسید باقی‌مانده در دستگاه به حداقل ممکن برسد. در این مرحله با باز کردن شیر ورود روغن به محفظه فشاری (V1)، بسته نگه‌داشتن شیر ورود روغن به محفظه نمونه (V2)، روغن به درون محفظه حساسگر فشاری پمپ می‌شود تا فشار درون این محفظه به حدود ۱۰ بار افزایش یابد و پس از آن شیر V1 بسته می‌شود و فشار ۱۰ بار درون محفظه حساسگر فشاری، ثابت می‌ماند.



شکل ۲. دستگاه اندازه‌گیری نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری، داریسی لاگ.



شکل ۱. طرح اجمالی تراکم هوای محبوس شده اولیه در درون خرده‌سنگ‌ها ناشی از جریان روغن.

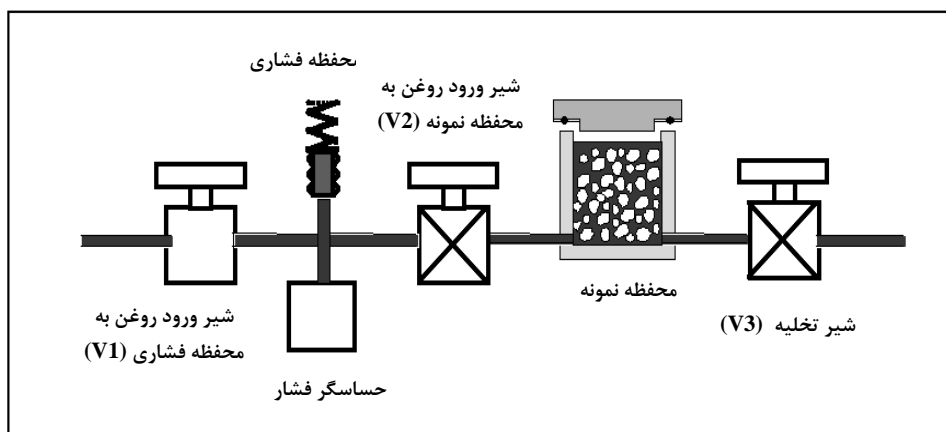
نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری با حل معادلات جریان سیال چسبیده در فضای کروی متراکم و با استفاده از یک مدل عددی، محاسبه می‌شود (اگرمن و همکاران، ۲۰۰۲). الگوی به کار رفته شبیه به روش آزمایش چاه است که در آن به جای تراکم پذیری نفت مخزن، تراکم پذیری گاز و به جای هندسه استوانه‌ای، هندسه کروی به کار رفته است. معادله اساسی در تعیین نفوذپذیری رابطه ۱ است که در آن زمان تعادل جریان (τ)، بستگی به خواص خرده‌سنگ‌های حفاری و روغن مورد استفاده در آزمایش دارد (لنورمند ۲۰۰۵):

$$\tau = \frac{\mu}{k} \cdot \frac{\phi S_{g0}}{P_0} r^2 \quad (1)$$

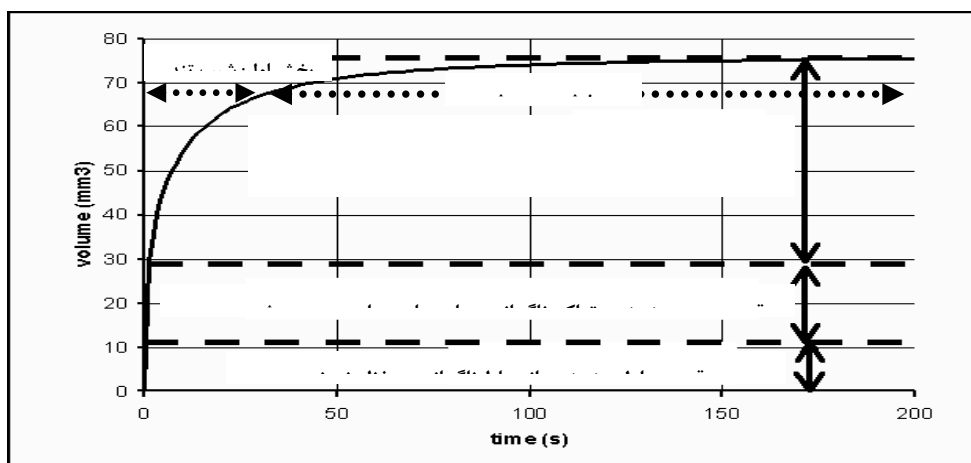
که در μ چسبندگی روغن، k نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری، ϕ تخلخل خرده‌سنگ‌های حفاری، S_{g0} اشباع گاز اولیه خرده‌سنگ‌های حفاری، P_0 فشار تراکم روغن و r میانگین شعاع خرده‌سنگ‌های حفاری است.

شرایط فشار و دما، محفظه نمونه از راه شیر V2 به محفظه حساسگر فشاری حاوی روغن با فشار حدود ۱۰ بار مرتبط می‌شود و روغن با فشار به درون خرده‌سنگ‌ها وارد می‌شود و هوای محبوس شده در آنها را متراکم می‌کند. حجم روغن وارد شده به خرده‌سنگ‌های حفاری متناسب با افت فشار خواهد بود که با درجه‌بندی کردن محفظه روغن تحت فشار، قابل اندازه‌گیری است. نرخ تزریق روغن به درون نمونه کاملاً وابسته به چسبندگی روغن و نفوذپذیری نمونه خرده‌سنگ است.

از سوی دیگر پیش از آن که نمونه خرده‌سنگ وارد محفظه نمونه دستگاه شود، روی چند سانتی‌متر مکعب از آن روغن ریخته می‌شود تا فضای بین خرده‌سنگ‌ها با روغن پر شود و با گذشت زمان، هوای محبوس در بین آنها کاملاً خارج شود. در این مرحله مقداری روغن از سطح خرده‌سنگ‌های حفاری به صورت خودبه‌خود به درون آنها وارد می‌شود. مقداری از هوای اولیه موجود در نمونه در انتهای این مرحله در حکم گاز محبوس و غیر مرتبط باقی مانده در سنگ به تله می‌افتد. سپس خرده‌ها به محفظه نمونه دستگاه ریخته می‌شود و پس از ثابت شدن



شکل ۳- طرح اجمالی دستگاه داری لگ شامل یک محفظه نمونه و یک محفظه فشاری با حجمی معلوم و یک حساسگر فشاری.



شکل ۴. نمودار حجم روغن ورودی به درون خرده‌سنگ‌های حفاری به‌مثابه تابعی از زمان

ورود روغن به درون خرده‌سنگ‌ها با زمان و با بهره‌گیری از منحنی درجه‌بندی فشار- حجم دستگاه، منحنی حجم- زمان به دست می‌آید. برای محاسبه نفوذپذیری ابتدا پس از وارد کردن مقادیر تخلخل، وزن، چگالی خرده‌سنگ و چسبندگی سیال در نرم‌افزار دستگاه، برای سه پارامتر نفوذپذیری، میزان اشباع هوای اولیه درون خرده‌سنگ‌ها و حجم هوای خارج از خرده‌سنگ‌ها مقادیری در نقش برآورد اولیه در نظر گرفته می‌شود. سپس با اجرای نرم‌افزار دستگاه، این سه پارامتر به‌طور مرتب در نرم‌افزار مربوطه تغییر می‌کنند تا شبیه‌ساز عددی که از رابطه ۱ پیروی می‌کند، بر نتایج آزمایش منطبق شود. بر اساس شکل ۴ در قسمت سوم منحنی، نقطه شروع که در حدود ۳۰ میلی‌متر مکعب است نشان‌دهنده مجموع حجم انبساط ناگهانی (قسمت اول منحنی) و حجم تراکم ناگهانی گاز کربن دی‌اکسید خارج از خرده‌ها (قسمت دوم منحنی)، دامنه منحنی بیانگر میزان اشباع‌شدگی خرده‌ها از هوا و مقدار انحای منحنی تعیین‌کننده مقدار نفوذپذیری خرده‌هاست. قسمت سوم این منحنی خود از دو بخش تشکیل می‌شود: بخش اول، منحنی با شیب تند است که نشانگر تغییرات سریع حجم نسبت به زمان و مرتبط با افت ناگهانی فشار پس از اتصال محفظه نمونه به محفظه فشاری است که بیان‌کننده تراکم ناگهانی هوای محبوس در خلل و فرج بزرگ‌تر و مرتبط در نمونه است. بخش دوم، منحنی با شیب کند است که تغییرات کند حجم نسبت به زمان را نشان می‌دهد و مربوط به تخلخل‌ها و گلوگاه‌های بسیار ریز و دارای ارتباط ضعیف است که به واسطه تدریجی بودن ورود روغن به درونشان و تراکم هوای محبوس در آنها افت فشار نیز تدریجی خواهد بود. مسلماً تاثیر تخلخل‌های مرتبط در بخش اول منحنی در قابلیت گذردهی سیال از نمونه به مراتب بیش از حفرات ریزتر و یا حفرات با گلوگاه‌های بسیار کوچک در بخش دوم است. بنابراین کافی است که فقط با شبیه‌سازی

شکل ۴ نشان‌دهنده حجم روغن ورودی به درون خرده‌سنگ‌های حفاری بر حسب زمان می‌باشد و بیانگر سه سازوکار زیر است:

۱- انبساط ناگهانی محفظه نمونه: جابه‌جایی شیر و واشر محفظه نمونه و تراکم‌پذیری روغن سبب افت فشار روغن می‌شود. برای اندازه‌گیری حجم انبساط ناگهانی، پیش از شروع آزمایش و پس از درجه‌بندی کردن دستگاه، آزمایش یک بار با محفظه خالی از نمونه صورت می‌گیرد. حجم انبساط ناگهانی محفظه نمونه باید کمتر از ۱۰ میلی‌متر مکعب باشد (این مقدار برای هر دستگاه کاملاً تابع شرایط فیزیکی دستگاه است). مقدار بیش از آن نشان‌دهنده وجود گاز کربن دی‌اکسید در محفظه است که موجب ایجاد خطا در آزمایش می‌شود.

۲- تراکم ناگهانی حباب‌های هوای محبوس شده در بین خرده‌سنگ‌های حفاری: این حجم باید در حداقل ممکن باشد و حداکثر ممکن است تا ۲۰ میلی‌متر مکعب باشد.

۳- حجم ناشی از به تعادل رسیدن جریان روغن در درون خرده‌سنگ‌های حفاری.

اگر چسبندگی روغنی که در ابتدای آزمایش بر روی نمونه خرده‌سنگ ریخته می‌شود مناسب باشد، تعادل جریان که تابعی از چسبندگی روغن و خواص خرده‌سنگ‌های حفاری است، خیلی سریع و یا خیلی کند نخواهد بود و منحنی تعادل جریان از رابطه ۱ پیروی خواهد کرد. در این صورت نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری با نرم‌افزار دستگاه به نام CYDAR و با بهره‌گیری از یک مدل عددی و حل معادلاتی که جریان روغن چسبنده را در هندسه کروی فضای متراکم بیان می‌کنند، محاسبه می‌شود. همان‌گونه که در رابطه ۱ مشخص است، باید قبل از محاسبه نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها، تخلخل آنها با دقت اندازه‌گیری شود.

بعد از به‌انجام رساندن آزمایش و ثبت مقادیر ناشی از

مدت زمان تعادل ۵۰ ثانیه در شکل ۵-ب و شبیه‌سازی آن که مربوط به افت فشار ناگهانی حاصل از تراکم هوای محبوس در منافذ بزرگ‌تر است (بخش اول منحنی)، نفوذپذیری حقیقی نمونه محاسبه شده است.

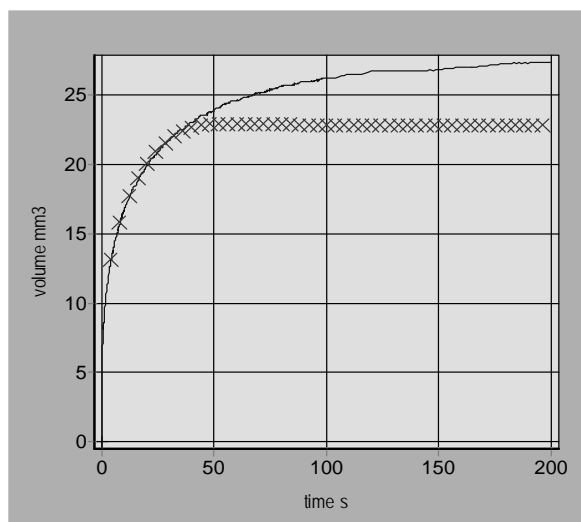
۴ مقایسه نتایج اندازه‌گیری نفوذپذیری

خرده - سنگ‌های حفاری با نفوذپذیری مغزه

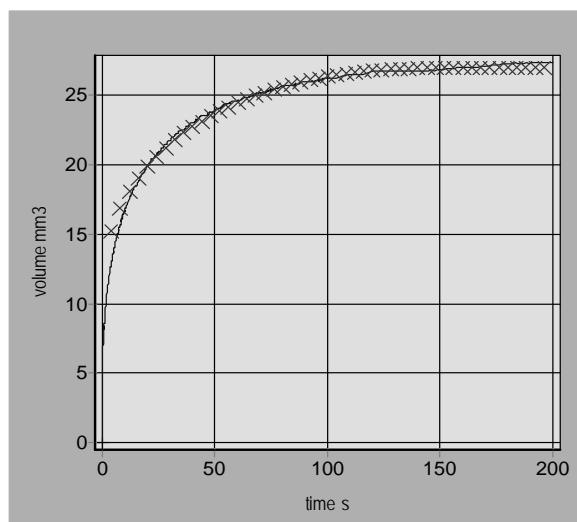
به منظور مقایسه نفوذپذیری اندازه‌گیری شده از روش فوق برای خرده‌سنگ‌های حفاری با روش‌های متداول اندازه‌گیری نفوذپذیری مغزه، تعداد ۱۶ نمونه مغزه کرناته با تنوع در نوع تخلخل شکل ۶ و ۲ نمونه مغزه ماسه‌سنگی انتخاب شدند. ابتدا نمونه‌های مغزه به منظور پاک شدن از آب سازندی و مواد آلی با تولوئن و متانول شسته و سپس کاملاً خشک شدند. پس از تعیین تخلخل و نفوذپذیری هوا در نمونه‌ها انتخابی،

بخش اول از قسمت سوم منحنی حجم - زمان با نرم‌افزار دستگاه به میزان نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها پی برد. بخش دوم این منحنی تاثیری در نفوذپذیری سنگ ندارد.

بدیهی است که انتخاب صحیح زمان مربوط به بخش اول این منحنی که بیان‌کننده مدت زمان افت فشار ناگهانی ناشی از وجود تخلخل‌هایی است که تعیین‌کننده نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها هستند بسیار مهم است. برای مثال در شکل ۵-الف اگر چه با انتخاب زمان ۲۰۰ ثانیه که مربوط به هردو بخش ذکر شده در منحنی حجم - زمان است، انطباق خوبی بین منحنی شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار دستگاه داری لاگ (منحنی که با علامت ضربدر مشخص شده است) و نتایج آزمایش وجود دارد ولی مقدار نفوذپذیری محاسبه شده با واقعیت انطباق ندارد. علت خطا در این محاسبه نفوذپذیری، در نظر گرفتن طول زمان مربوط به بخش دوم منحنی حجم - زمان با شیب کند در محاسبات است که تخلخل‌های مربوط به آن هیچ نقشی در نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها ندارند. این در حالی است که با انتخاب

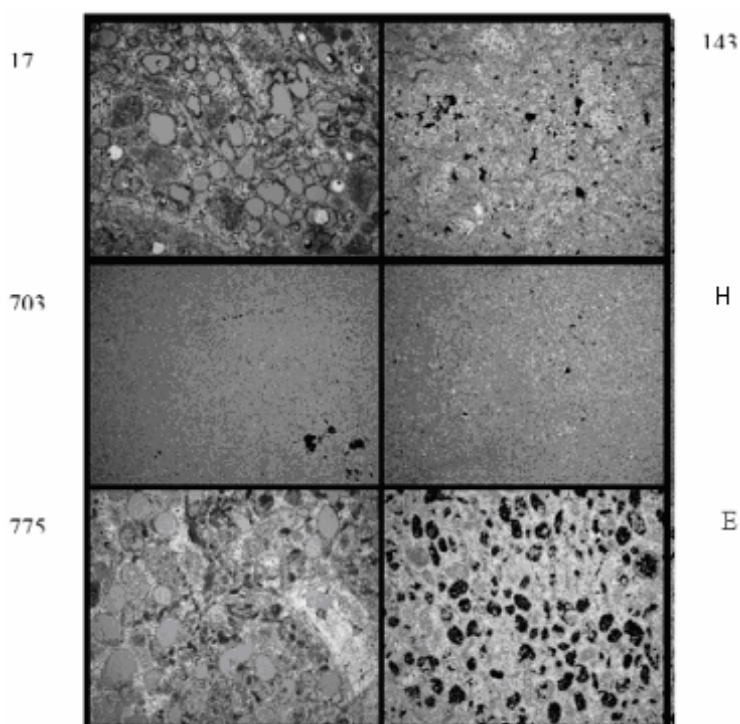


ب



الف

شکل ۵. نتایج آزمایش (منحنی پیوسته) و تفسیر (نقاط ضربدر حاصل از مدل شبیه‌ساز) در منحنی حجم - زمان، الف) تفسیر در مدت زمان طولانی مربوط به بخش اول و دوم منحنی، ب) تفسیر بر پایه زمان کوتاه مربوط به بخش اول منحنی



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی از مقاطع نازک چند نمونه که تخلخل و نفوذپذیری آنها اندازه‌گیری شده است

۱۴۳: دولوستون با تخلخل بین‌بلوری،

۱۷: کلسیت با تخلخل قالبی،

H: کلسیت با تخلخل بین‌بلورین

۷۰۳: دولوستون با تخلخل غالب بین‌بلوری،

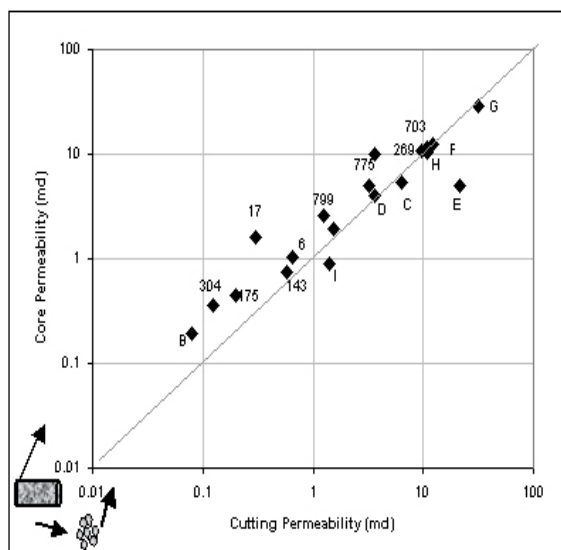
E: کلسیت با تخلخل قالبی.

۷۷۵: کلسیت با تخلخل حفره‌ای و قالبی،

جدول ۱. تخلخل و نفوذپذیری مغزه‌ها و خرده سنگ‌های حفاری به همراه چگالی و طبقه‌بندی سنگ‌شناسی

| شماره نمونه | نام سنگ | تخلخل پلاگ مغزه (%) | نفوذپذیری هوای پلاگ مغزه (md) | نفوذپذیری خرده سنگ (md) | چگالی دانه‌آی (gr/cm ³) | نوع تخلخل | طبقه‌بندی آرچی |
|-------------|----------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------|
| ۶ | کلسیت | ۱۳/۰ | ۱/۰۲۸ | ۰/۶۵۴ | ۲/۷۰ | بین‌بلوری | II, B |
| ۱۷ | کلسیت | ۲۵/۷ | ۱/۵۸۳ | ۰/۳۰۴ | ۲/۷۱ | قالبی | II/I, C/D |
| ۱۴۳ | دولوستون | ۸/۱ | ۰/۷۴۴ | ۰/۵۸۱ | ۲/۸۶ | بین‌بلوری | I, A |
| ۱۷۵ | کلسیت | ۹/۰ | ۰/۴۴۲ | ۰/۲۰۴ | ۲/۷۰ | قالبی، بین‌بلوری | II, B |
| ۲۶۹ | دولوستون | ۱۳/۸ | ۱۰/۶۱۲ | ۹/۵۵۲ | ۲/۸۰ | بین‌بلوری | II, A/B |
| ۳۰۴ | کلسیت | ۸/۸ | ۰/۳۶۲ | ۰/۱۲۳ | ۲/۷۰ | قالبی، بین‌بلوری | II, B |
| ۷۰۳ | دولوستون | ۱۹/۸ | ۱۲/۶۸۵ | ۱۲/۳۶۲ | ۲/۸۳ | بین‌بلوری | II, B |
| ۷۷۵ | کلسیت | ۲۲/۴ | ۱۰/۰۹۵ | ۳/۲۶۴ | ۲/۷۰ | حفره‌ای، قالبی | II, C, |
| ۷۹۹ | کلسیت | ۲۰/۱ | ۲/۵۵۹ | ۱/۲۳۲ | ۲/۷۰ | حفره‌ای، قالبی | II, C, |
| A | کلسیت | ۱۶/۶ | ۱/۹۶۳ | ۱/۵۲۴ | ۲/۶۸ | بین‌بلوری | II, B/C |
| B | کلسیت | ۱۰/۸ | ۰/۱۹۴ | ۰/۰۸۲ | ۲/۷۰ | بین‌بلوری | II/I, A/B |
| C | کلسیت | ۱۵/۲ | ۵/۲۸۷ | ۶/۳۴۸ | ۲/۶۷ | بین‌بلوری، حفره‌ای | II, B |
| D | دولوستون | ۱۶/۱ | ۳/۹۷۲ | ۳/۶۵۸ | ۲/۸۱ | بین‌بلوری، حفره‌ای | II, B/C |
| E | کلسیت | ۲۷/۴ | ۴/۹۶۳ | ۲/۱۴۸۸ | ۲/۶۸ | قالبی | II, C/D, |
| H | کلسیت | ۲۳/۵ | ۱۰/۴۲۵ | ۱۰/۸۳۴ | ۲/۶۶ | بین‌بلوری | II, B |
| I | دولوستون | ۱۱/۹ | ۰/۸۹۳ | ۱/۴۲۱ | ۲/۷۸ | حفره‌ای، بین‌بلوری | II, B/C |
| F | ماسه سنگ | ۱۵/۹ | ۱۱/۶۹۳ | ۱۰/۹۷۳ | ۲/۶۹ | بین‌دانه‌ای | - |
| G | ماسه سنگ | ۱۷/۷ | ۲۹/۰۶۹ | ۳۱/۴۳۷ | ۲/۶۸ | بین‌دانه‌ای | - |

کربناته افزوده می‌شود و برعکس از مقدار تخلخل‌های مرتبط کاسته می‌شود، زمان بخش اول از قسمت سوم منحنی حجم- زمان شکل ۴ کوتاه‌تر می‌شود و برعکس زمان به تعادل رسیدن حجم و یا به عبارت دیگر زمان بخش دوم (قسمت شیب کند) از قسمت سوم منحنی در این منحنی طولانی است. در این گونه از موارد تغییرات حجم نسبت به زمان بسیار تدریجی است و تشخیص بخش اول از این منحنی و شناسایی بازه زمانی آن مشکل و با خطا همراه است. بنابراین نفوذپذیری اندازه‌گیری شده برای خرده‌سنگ‌ها با نفوذپذیری مغزه خیلی مشابه نیست و دقت کمتری دارد.



شکل ۷. نفوذپذیری مغزه در مقابل نفوذپذیری خرده‌سنگ‌های حفاری که از همان مغزه‌ها به دست آمده‌اند.

۵ نتیجه‌گیری

روش ارائه شده برای اندازه‌گیری نفوذپذیری در خرده‌سنگ‌های از جنس ماسه‌سنگ با تخلخل بین‌دانه‌ای و کربناته با بافت نامتراکم و با تخلخل‌های مرتبط از دقت بسیار خوبی برخوردار است. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که میانگین خطای نسبی در این گونه از نمونه‌ها حدود ۵

مغزه‌ها برای تولید نمونه‌های خرده‌سنگی از آنها خرد شدند و پس از سرند کردن خرده‌سنگ‌ها، نمونه‌هایی با محدوده قطر ۲ تا ۳ میلی‌متر برای آزمایش نفوذپذیری تهیه شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نفوذپذیری مغزه و خرده‌سنگ‌های آنها به همراه نوع تخلخل و نیز طبقه‌بندی آرچی، برای سنگ‌های کربناته در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. همچنین در شکل شماره ۷ نفوذپذیری مغزه‌ها و خرده‌سنگ‌های حفاری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که در دو نمونه ماسه‌سنگی F و G که نوع تخلخل در آنها از نوع بین‌دانه‌ای است، انطباق بسیار خوبی بین نفوذپذیری خرده‌ها با نفوذپذیری مغزه وجود دارد، همچنین نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در نمونه خرده‌سنگی کربناته با بافت نامتراکم، یکنواخت و تخلخل بین‌بلوری (برای مثال نمونه‌های H و ۷۰۳ در شکل ۶)، از دقت زیادی برخوردار است و میانگین خطای اندازه‌گیری در این نوع از نمونه‌های انتخابی حدود ۵ درصد است. ولی هرچه از میزان یکنواختی در بافت نمونه‌های کربناته کاسته می‌شود و بر میزان تراکم دانه‌ای، تخلخل‌های غیر مرتبط حفره‌ای، قالبی (نمونه‌های ۱۷، ۷۷۵ و E در شکل ۶) بین‌دانه‌ای و فسیلی افزوده می‌شود از دقت نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در خرده‌سنگ‌ها کاسته می‌شود. میانگین خطای نسبی اندازه‌گیری در این گونه از نمونه‌های انتخابی حدود ۴۷ درصد است. از آنجا که در این روش اندازه‌گیری فقط زمان بخش اول (قسمت شیب تند) از قسمت سوم منحنی حجم- زمان شکل ۴ در محاسبات مربوط به تعیین نفوذپذیری مد نظر است و این زمان مختص به تراکم هوای محبوس در حفرات مرتبطی است که نقش اصلی را در نفوذپذیری سنگ ایفا می‌کنند، لذا در ماسه‌سنگ‌ها با تخلخل بین‌دانه‌ای و در کربنات‌ها با تخلخل غالب بین‌بلوری و بافت نامتراکم دقت این روش بسیار زیاد است، ولی هرچه بر تنوع تخلخل‌های غیر مرتبط در سنگ

Timur, A., (1968) An investigation of permeability, porosity and residual water saturation relationships for sandstone reservoirs, Paper J, in 9th Annual well logging transactions, Society of Professional Well Log Analysts, SPWLA.

درصد است.

در سنگ‌های کربناته با بافت متراکم که در آنها تخلخل غالب گلوگاه‌های بسیار ریز و غیر مرتبط است و نیز در سنگ‌های کربناته با نوع تخلخل غالب حفره‌ای و قالبی و با ارتباط ضعیف، از دقت این روش کاسته می‌شود و میانگین خطای نسبی تا حدود ۴۷ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نفوذپذیری در خرده‌سنگ‌ها به نوع حفرات سنگ و هندسه فضای خالی آن بستگی دارد و در اندازه‌گیری آنها فقط حفرات و گلوگاه‌های مرتبط نمونه سنگ که در تولید و بهره‌دهی سنگ مخزن موثرند، در نظر گرفته می‌شوند، لذا مقادیر نفوذپذیری اندازه‌گیری شده در خرده‌سنگ‌ها اگرچه ممکن است با نفوذپذیری هوا متفاوت باشد ولی به مقادیر نفوذپذیری موثر سنگ نزدیک‌تر است و در مواردی که مغزه چاه موجود نباشد، استفاده از نتایج نفوذپذیری خرده‌سنگ‌ها در بررسی مخزن، سبب کاهش عدم قطعیت این پارامتر می‌شود.

منابع

- Egermann P., Lenormand R., Longeron D., Zarcone C., (2002) A fast and direct method of permeability measurement from drill cuttings, *Petrophysics*, v. July-August, p. 243-252.
- Fens, T. W., M. A. Kraaijveld, L. Riepe et al., (1998) Archie's dream: petrophysics from sidewall sample and cuttings, SCA No. 9805, Society of Core Analysts, The Hague, The Netherlands.
- Lenormand R., (2005) Measurement of cuttings permeability with Darcylog, IFP Patent, France.
- Luffel D. L., Hopkins C. W., and Holditch S. A., (1993) Matrix permeability measurements of gas productive shales, SPE No. 26633, Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 1993.
- Santarelli, F.J. Marsala, A. F., Brignoli M., (1998) Formation evaluation from logging on cuttings, *SPE Reservoir Eval. & Eng.*, v. June, p 238-244.
- Swanson, B. F., (1981) A simple correlation between permeability and mercury capillary pressures, *JPT*, v. December, p. 2498-2504.