

کاربرد آنالیز دیجیتال مغزه^۱ در مشخصه‌سازی بهتر مخازن؛ مزایا و چالش‌ها

بابک فاضل عبدالآبادی*، محمد پرواز دوانی، محمدحسین گلستان، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۰۵/۲۷

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۰۶/۱۴

روش عکس‌برداری سی‌تی‌اسکن با دقت زیاد عمدتاً به دلیل همین دقت مناسب تصاویر سه‌بعدی حاصل، در صنایع متعددی مثل پزشکی، مکانیک و غیره کاربرد دارد. در سال‌های اخیر از این فن‌آوری برای مشخصه‌سازی بهتر مخازن هیدروکربنی (جهت به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر از جمله توابع جریان مغزه) استفاده شده است. در این گستره اکثر تحقیقات صنعتی انجام شده در زمینه آنالیز دیجیتال مغزه جهت تفسیر و دقت بیشتر نتایج خواص پتروفیزیکی انجام گردیده است.

در این مقاله مزیت‌ها و چالش‌های استفاده از این فن‌آوری جهت آنالیز دیجیتال مغزه با رویکردی متفاوت ذکر شده است. از مزیت‌های اصلی این فن‌آوری، نتایج دقیق‌تر و کم‌هزینه‌تر برای خواص پتروفیزیکی نسبت به آنالیز مرسوم مغزه، امکان انجام و آنالیز حساسیت خواص استاتیک مخزنی و امکان استفاده از فن‌آوری پردازش موازی کامپیوتری است.

این فن‌آوری در مخازن کربناته نسبت به مخازن ماسه‌سنگی (که در مشخصه‌سازی بهینه‌تر آنها موفق‌تر بوده) با چالش‌هایی روبرو بوده که مهم‌ترین آنها حساسیت نتایج حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه نسبت به ابعاد تصاویر سی‌تی‌اسکن و عدم دقت مطلوب دستگاه‌های میکروسی‌تی‌اسکن برای کاربرد در مخازن کربناته با ناهمگونی زیاد است. علاوه بر این در مبحث کاربرد آنالیز دیجیتال مغزه، هنگام شبیه‌سازی میدانی می‌توان به چالش‌های تعمیم‌پذیری نتایج دیجیتال مغزه از مقیاس حفره به مقیاس میدانی اشاره کرد.

واژگان کلیدی:

مدل‌سازی مقیاس حفره، آنالیز دیجیتال مغزه، مشخصه‌سازی مخزن

مقدمه

مقیاس حفره^۲ بسیار حائز اهمیت است. این فن‌آوری می‌تواند با کاهش زمان انجام آزمایش‌ها و بر اساس مدل سه‌بعدی ساخته شده از نمونه‌ی سنگی مخزن متغیرهای مشخصه‌سازی لازم برای شبیه‌سازی مخازن را متناسب با ویژگی‌های محیط متخلخل و سیالات جریانی در شرایط پایا به‌دست دهد. این فن‌آوری به‌عنوان روشی تکمیلی جهت ساخت بهتر مدل خواص مخزنی و نه به‌عنوان روشی جایگزین برای روش‌های مرسوم آنالیز مغزه بیان می‌گردد. شکل ۱- نقش تکمیلی آنالیز دیجیتال مغزه در شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی را در حالت کلی بیان می‌کند [۲].

هدف اصلی آنالیز دیجیتال مغزه کشف، دانستن و مدل‌سازی روابط بین مشاهدات دور از دسترس ژئوفیزیکی و خواص برجای پتروفیزیکی است. مدل‌های مرسوم پتروفیزیکی بر اساس روابط تجربی حاصل از آزمایش‌ها یا مدل‌های تئوری حاصل از میکروساختارهای ایده‌آل کالیبره شده توسط اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هستند. به دلیل در نظر نگرفتن هندسه‌ی جریانی دقیق محیط متخلخل، نتایج حاصل از مدل‌های مرسوم ساده‌سازی شده‌اند؛ به طوری که برهم‌کنش محیط سنگی و سیالات جریانی به‌خوبی مدل‌سازی نمی‌شود. علاوه بر این، مدل‌های مرسوم فیزیک سنگی، مشخصه‌سازی متفاوتی را از میکروساختارها به‌دست می‌دهند که این مطلب، تفسیر و آنالیز نتایج پتروفیزیکی را با مشکل همراه می‌کند [۳].

شبیه‌سازی جریان چندفازی سیال در محیط متخلخل در بسیاری از فرآیندهای طبیعی و مصنوعی از جمله استخراج، جریان زیرزمینی هیدروکربن‌ها، آب سازندی، ذخیره‌سازی گاز دی‌اکسید کربن، مهاجرت سیالات غیرآبی در محیط خاکی و انتقال واکنشی^۱ جهت بهینه‌سازی فرآیندی حائز اهمیت است. در مهندسی نفت شبیه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل جهت شناخت بهتر مکانیسم‌های تولید طبیعی و نیز بهینه‌سازی تخلیه‌ی طبیعی و ارائه‌ی راهکارهای پیشنهادی جهت ازدیاد برداشت بسیار مفید است. برای درک صحیح محاسبات شبیه‌سازی جریانی باید متغیرهای ورودی مدل‌های شبیه‌ساز از جمله تراوایی نسبی چندفازی، به‌دقت و متناسب با هندسه‌ی جریانی تعیین گردند [۱].

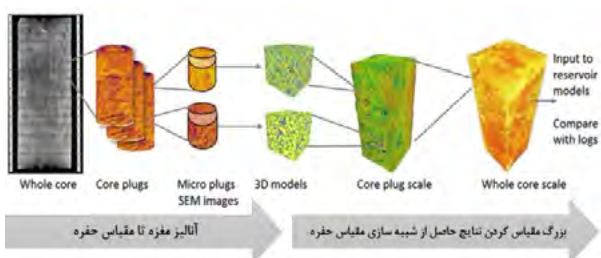
یکی از چالش‌های بسیار مهم روش‌های مرسوم آنالیز مغزه در تعیین متغیرهای پتروفیزیکی (به‌خصوص در مخازن کربناته)، علاوه بر زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌ها (به‌خصوص آزمایش‌های ویژه‌ی مغزه از جمله تراوایی نسبی پایا در شرایط مخزن)، در نظر نگرفتن دقیق برهم‌کنش‌های سنگ و سیال و هندسه‌ی جریانی محیط متخلخل است که منجر به تخمین همراه با خطای توابع جریانی در شبیه‌سازی دینامیک مخزنی می‌گردد. جهت تعیین بهینه‌ی توابع جریانی مدل‌های شبیه‌سازی مقیاس میدانی، به‌کارگیری فن‌آوری آنالیز دیجیتال مغزه در شبیه‌سازی و محاسبات

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (fazalb@ripi.ir)

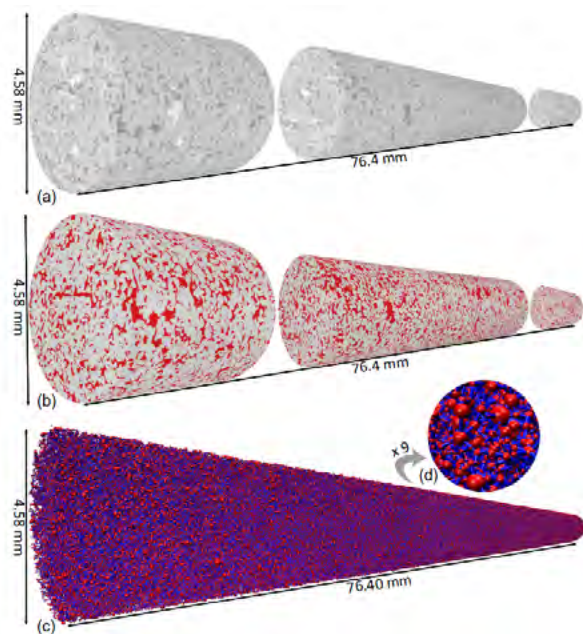
مرسوم قطعه‌بندی، فیلتراسیون فضایی^۱، رفع اختلالات مصنوعی^۲، آستانه‌سازی^۳، عملیات مورفولوژی^۴ و آنالیز خوشه‌ای^۵ است. روش دیگر تهیهی مدل سه‌بعدی روش‌های آماری است که در آنها تخمین خواص آماری نمونه‌ی سنگ با استفاده از عکس‌برداری دوبعدی از جمله SEM^{۱۲} انجام می‌شود. یکی از مزیت‌های این روش‌ها تولید مدل‌های سه‌بعدی بسیار زیاد از نمونه‌ی عکس‌برداری شده با خواص آماری یکسان است که پیچیدگی‌های مدل‌های غیر آماری طبیعی که موجب کاربرد محدود آنها می‌شود را ندارد (شکل-۳).

به‌طور کلی مدل‌های شبیه‌ساز جریان سیال در مقیاس حفره به دو روش زیر تقسیم‌بندی می‌شوند: [۵]

■ روش‌های مستقیم^{۱۳}: در این روش‌ها محاسبات روی مدل سه‌بعدی



شکل ۲ | روند به‌دست آوردن خواص سنگ مخزن به‌کمک آنالیز دیجیتال مغزه [۴]



شکل ۳ | مدل شبکه‌ی حفره‌ای نمونه از مغزه‌ی ماسه‌سنگی Berea (a) حجم خروجی سیاه-سفید نمونه‌ی ماسه‌سنگی اسکن شده با دستگاه سی‌تی‌اسکن با کیفیت ۲/۴۹ میکرومتر (b) حجم خروجی جدایش حفره و ماتریس دانه‌ای (قرمزها حفره و خاکستری‌ها ماتریس هستند) (c) شبکه‌ی حفره‌ای تولید شده از عکس‌ها a و b (قرمزها حفره و آبی‌ها گلوگاه‌ها هستند) (d) عکس بزرگ‌نمایی شده‌ی بخش کوچکی از مدل شبکه‌ای ماسه‌سنگ

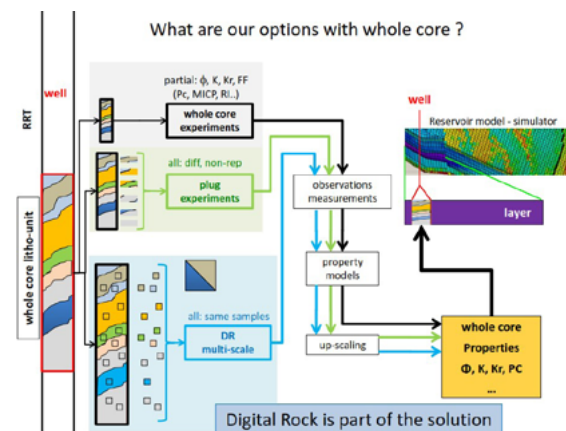
استفاده از اسکن‌های با کیفیت می‌تواند به‌عنوان منبعی بالقوه در مشخصه‌سازی هرچه بهتر محیط‌های سنگی پیچیده و تعیین خواص پتروفیزیکی (خواص الاستیک ژئومکانیکی، انتقال جریانی و الکتریکی) در نظر گرفته شود. به‌عبارتی بر اساس عکس‌برداری سنگی و در قدم بعدی، شبیه‌سازی مقیاس مغزه، محیط سنگی خواص جریانی از جمله تراوایی نسبی با صحت بیشتری تعیین می‌گردند. طی سال‌های اخیر به‌دلیل پیشرفت‌های گسترده‌ی عکس‌برداری‌های میکرو و نانو‌سی‌تی‌اسکن در علوم دیگر، استفاده‌ی آن در حوزه‌ی بالادستی نفت نیز بسیار مفید متصور می‌شود.

به‌طور کلی روند کاری آنالیز دیجیتال مغزه (DRP) به سه قسمت تقسیم می‌شود که شماتیک آن در شکل ۲-ارائه شده است:

- عکس‌برداری دیجیتالی (عکس‌برداری سه‌بعدی با دقت زیاد جهت مشخصه‌سازی نمونه در مقیاس حفره)
- پردازش عکس دیجیتالی جهت تشخیص حفرات از ماتریس سنگی و تهیه‌ی عکس قطعه‌بندی شده^۴
- شبیه‌سازی پدیده‌های فیزیکی در محدوده‌ی ریزساختار عکس‌برداری شده جهت تعیین خواص مؤثر آن از جمله تراوایی (مطلق و نسبی)، مقاومت الکتریکی و مدول ژئومکانیکی یانگ

روش مدرن ساخت مدل سه‌بعدی سنگ مخزن، استفاده از دستگاه میکروسوپی‌تی‌اسکن است که می‌تواند برای نمونه‌های استوانه‌ای کوچک با قطر چند میلی‌متر یا کمتر از آن استفاده گردد. خروجی مرحله‌ی عکس‌برداری، فایل باینری^۵ است که توسط آن بر اساس تصویر حاصل از اشکال رادیویی که در زوایای مختلف به‌دست آمده‌اند مدل سه‌بعدی ساخته می‌شود. نتیجه‌ی نهایی ساخت مدل سه‌بعدی، عکسی سیاه و سفید است که شفافیت آن متناسب با عدد بی‌بعد CT^۶ و مواد تشکیل‌دهنده‌ی محیط سنگی است (شکل-۳).

قطعه‌بندی عکس تهیه شده شامل تشخیص و تعیین فازهای حفرات و کانی‌ها در محدوده‌ی عکس‌برداری شده است. از جمله ابزارهای



شکل ۱ | نقش تکمیلی آنالیز دیجیتال مغزه در شبیه‌سازی بهینه‌ی مخازن هیدروکربنی

گرافیک^{۲۶}، واحدهای پردازش مرکزی^{۲۷} و واحدهای پردازش مرکزی چندهسته‌ای^{۲۸}) وجود دارد. همچنین محاسبات دیجیتال مغزه قابلیت انجام در سیستم‌های عامل یونیکس^{۲۹} یا لینوکس^{۳۰} را نیز دارد که از نمونه‌های مشابه ویندوز سریع‌تر است و معمولاً به‌عنوان سیستم‌های عامل مطرح در محاسبات سریع استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ی اخیر انجام شده [۷] با به‌کارگیری همزمان مجموعه‌ی ۵۴ کارت گرافیکی و ۴۸۰ واحد پردازش مرکزی محاسباتی، قابلیت تسریع محاسبات دیجیتال مغزه (تا ۱۳۴ مرتبه سریع‌تر) تأیید شده است. این امر همچنین می‌تواند جهت افزایش طول نمونه‌ی در نظر گرفته شده استفاده گردد.

۲- چالش‌های روش دیجیتال مغزه

با وجود مزایای ذکر شده، به‌کارگیری روش دیجیتال مغزه چالش‌هایی نیز دارد. تحقیقات جدیدی جهت شناخت این چالش‌ها و ارائه‌ی راهکارهای پیشنهادی انجام شده که در ادامه ذکر خواهد شد. این چالش‌ها به اختصار شامل سه مورد کلی زیر است:

- حساسیت نتایج حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه نسبت به ابعاد (یا دقت) تصاویر
- عدم وجود معیاری جهانی در انتخاب حجم معیار^{۳۱} جهت انتخاب و آنالیز تصاویر
- عدم دقت مطلوب خصوصیات پتروفیزیکی حاصل از این روش برای سنگ‌های کربناته (به‌دلیل نیاز به دقت تصویربرداری بیشتر)

نخستین چالش به‌کارگیری آنالیز دیجیتال مغزه، حساسیت نتایج حاصل نسبت به ابعاد تصاویر^{۳۲} (یا دقت تصاویر^{۳۳}) استفاده شده است. در ۲۰۱۳ الیافی و همکاران در بررسی حساسیت خصوصیات پتروفیزیکی حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه نسبت به دقت تصاویر، به نکات ارزنده‌ای دست یافتند [۸]. نخست آنکه نتایج حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه روی تصاویر سی‌تی‌اسکن جهت توزیع ابعاد حفرات^{۳۴} نسبت به نتایج حاصل از آزمایش‌های فشار موئینگی با تزریق جیوه^{۳۵} متفاوت بوده (شکل ۴-۴) که این تفاوت در وهله‌ی اول در تغییر شکل منحنی توزیع بوده است. همچنین منحنی‌های توزیع حاصل، نسبت به ابعاد تصاویر انتخابی حساسیت داشته‌اند. گرچه در ماسه‌سنگ‌ها وضعیت بهتر است اما حتی در این نمونه‌ها نیز با افزایش ابعاد تصاویر، نتایج حاصل از دیجیتال مغزه تغییر کرده و مقادیر حداکثری آنها به سمت مقادیر کوچک‌تر میل می‌کند. توجه به این نکته ضروری است که دقت عکس‌برداری تصاویر سی‌تی‌اسکن استفاده شده توسط الیافی و همکاران حدود ۲/۷ میکرومتر بوده که عملاً نمی‌تواند در تشخیص المان‌های با ابعاد کوچک‌تر از میکرومتر استفاده شود. حال آنکه بر اساس نتایج تابع توزیع حاصل از آزمایش در سنگ‌های کربناته، تعداد زیادی از حفرات در محدوده‌ی پایین‌تر از این ابعاد قرار می‌گیرند که عملاً تشخیص آنها از این طریق را غیرممکن می‌کند.

از دیگر موارد چالشی، تغییر شبکه‌ی اتصالاتی حفرات^{۳۶} در اثر تغییر دقت تصاویر سی‌تی‌اسکن است. در اغلب موارد شبکه‌ی اتصالاتی حاصل از تصاویر سی‌تی‌اسکن، تعداد حفرات را (در ابعاد میکرومتر) کمتر حدس

واقعی حاصل از عکس‌برداری سه‌بعدی و قطعه‌بندی انجام شده است. در این روش دو دسته زیرروش شبیه‌سازی با استفاده از گریدبندی و بدون استفاده از گریدبندی به کار می‌رود. از جمله مدل‌های شبیه‌ساز روش‌های بدون گرید لاگرانژین بر اساس حرکت ذرات از قبیل MPS^{۱۴}، SPH^{۱۵} و LBM^{۱۶} است. از جمله روش‌های مبتنی بر گریدبندی نیز می‌توان به المان محدود^{۱۷} اشاره کرد. این روش‌ها به‌دلیل انجام شبیه‌سازی روی مدل واقعی سنگی و نیز پیچیدگی‌های حاصل از تماس سنگ و سیال و هندسه‌ی محیط متخلخل، بسیار زمان‌بر هستند و به‌همین دلیل جهت ساده‌سازی، روش غیرمستقیم دیگری برای مدل‌سازی شبکه‌ای مطرح گردیده است.

■ روش مدل‌سازی شبکه‌ای^{۱۸}: در این روش محاسبات روی شبکه‌ای از حفرات و گلوگاه‌های ایده‌آل انجام می‌شود.

۱- مزایای استفاده از آنالیز دیجیتال مغزه

یکی از اصلی‌ترین کاربردهای آنالیز دیجیتال مغزه تعیین خواص پتروفیزیکی محیط سنگی (شامل خواص معمولی مغزه^{۱۹} و خواص ویژه‌ی مغزه^{۲۰}) است. نتایج حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه با نتایج آزمایشگاه قابل‌مقایسه است و از لحاظ هزینه و زمان انجام نیز نسبت به آن برتری دارد. علت اصلی دقت زیاد نتایج حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه، شبیه‌سازی فیزیکی فرآیندها روی هندسه‌ی دقیق محیط متخلخل با استفاده از امکانات محاسبات سرعت بالا^{۲۱} است. به‌عبارت دیگر مطالعات آنالیز دیجیتال مغزه نسبت به آزمایش‌های مرسوم دو مزیت اصلی دارد [۶]:

■ امکان به‌دست آوردن نتایج دقیق‌تر و کم‌هزینه‌تر خواص پتروفیزیکی که آزمایش‌های مربوط به آنها هزینه‌بر است از جمله خواص پایای ویژه‌ی مغزه^{۲۲}. مثلاً تراوایی نسبی دو یا سه‌فازی برای یک نمونه‌ی تمام مغزه^{۲۳} با توجه به زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های پایای آن، در آزمایشگاه تا چندین ماه زمان می‌برد. از روش ناپایا برای تعیین منحنی‌ها استفاده می‌شود که منحنی‌های حاصل به‌دلیل استفاده از روش‌های مبتنی بر متغیرهای تخمینی حاصل از توابع انطباقی^{۲۴} عددی، با خطا همراهند. شکل ۱۳- خطای نتایج تراوایی نسبی دوفازی آب/نفت در شرایط ناپایا را نسبت به نتایج پایا نشان می‌دهد.

■ امکان انجام آنالیز حساسیت روی خواص استاتیک مخزنی از جمله زاویه‌ی تماس سنگ و کشش سطحی و بررسی توزیع آنها طبق هندسه‌ی جریانی جهت تخمین دقیق‌تر خواص انتقالی فازهای جریانی سیالات در محیط متخلخل.

از دیگر مزیت‌های منحصر به‌فرد روش دیجیتال مغزه، امکان بهره‌گیری از قابلیت‌های شگفت‌انگیز نوین کامپیوتری (مثل پردازش موازی داده‌ها^{۲۵}) جهت تسریع محاسبات در این فن‌آوری است. همزمان با افزایش روزافزون توان سخت‌افزاری کامپیوترها، بهره‌گیری از این فن‌آوری‌های فوق‌سریع می‌تواند دورنمای مثبتی را برای روش دیجیتال مغزه در عرصه‌ی صنعتی رقم بزند. خوشبختانه در این روش امکان بهره‌گیری از سخت‌افزارهای پردازش سریع (مثل کارت‌های

روش‌های محاسباتی دینامیک سیال^{۳۹} (که از آن به شبیه‌سازی مستقیم^{۴۰} نام برده شده) یا روش محاسباتی مبتنی بر شبکه‌ی اتصال‌ی حفرات^{۴۱} (روش غیرمستقیم) محاسبه کرده‌اند (شکل-۶) [۸]. همچنین در برخی گزارش‌های دیگر برای محاسبه‌ی نفوذپذیری در آنالیز دیجیتال مغزه از روش لئیس-بولتزمن^{۴۲} استفاده شده است [۹ و ۱۰]. نتایج به‌وضوح گویای تأثیر زیاد ابعاد تصاویر انتخابی بر نفوذپذیری محاسبه شده است. در برخی موارد (در نمونه‌های کربناته) این نفوذپذیری می‌تواند تا ۳۰ درصد مقادیر مشابه (حاصل از ابعاد بزرگ‌تر) کاهش یابد. این امر بیانگر وجود میکروحفراتی در شبکه‌ی کربناته است که به‌نحو چشم‌گیری در مسیر جریان سیال تأثیر گذارند.

همان‌گونه که در ابتدای این بخش ذکر شد تاکنون هیچ‌گونه روند^{۴۳} استاندارد جهت انتخاب ابعاد حجم معیار در روش دیجیتال مغزه ارائه نشده است. در حالی که همان‌طور که مشاهده شد نتایج حاصل تأثیر زیادی از ابعاد در نظر گرفته شده خواهند پذیرفت. البته اخیراً تلاش‌هایی جهت این مشخصه‌سازی انجام شده است [۹]. در نخستین تلاش، فرض بر تعیین روند انتخاب حجم معیار بر مبنای انتخاب المان‌های حجمی از نقاط مختلف (بالا-وسط-پایین) تصاویر دیجیتالی بوده که این تلاش (به‌ویژه در خصوص سنگ‌های کربناته) موفقیت‌آمیز نبوده است (شکل-۷). علت این امر عدم حصول ساختاری یکسان برای خواص پتروفیزیکی محاسبه شده از روش دیجیتال مغزه است. مثلاً نتایج نفوذپذیری محاسبه شده در سنگ‌های کربناته (با انتخاب حجم معیار از نقاط مختلف تصویر) هیچ انطباقی بر یکدیگر ندارند (شکل-۷).

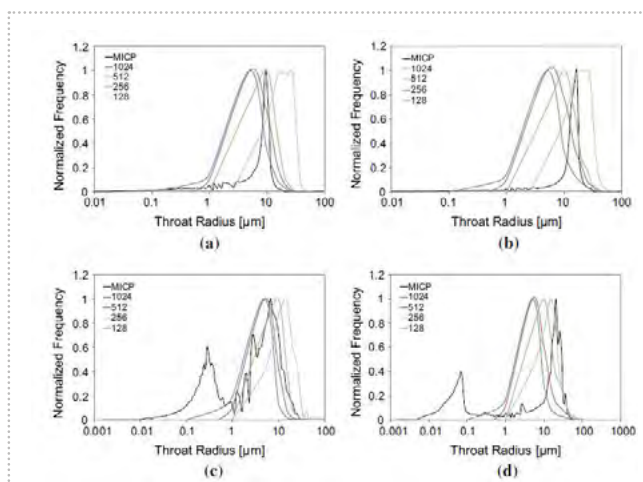
در عین ذکر چالش‌های مذکور، توجه به این نکته‌ی کلیدی ضروری است که علت این قبیل تفاوت‌ها با نتایج آزمایشگاهی، عدم تشخیص کامل المان‌های با ابعاد کوچک‌تر از میکرومتر است که مثلاً در نمونه‌های کربناته بخش عمده‌ای از ساختار حفرات را شامل می‌شود. اما این معضل با انجام سی‌تی‌اسکن در ابعاد نانومتر^{۴۴} قابل حل است؛ چراکه در این صورت حتی کوچک‌ترین حفرات شبکه‌ی کربناته نیز قابل شناسایی خواهند بود و بنابراین نتایج به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک‌تر خواهند شد.

می‌زند (شکل-۵). ممکن است علت این امر در الگوریتم ایجاد شبکه‌ی اتصال‌ی حفرات باشد؛ چراکه در حال حاضر این شبکه‌ی اتصال‌ی با استفاده از الگوریتم بزرگ‌ترین کره^{۳۷} در روش دیجیتال مغزه ایجاد می‌شود که نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

در خصوص سنگ‌های کربناته (با فرض تولید تصاویر سی‌تی‌اسکن با دقت میکرومتر) مقدار تخلخل حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه نسبت به نتایج آزمایشگاهی، تا حداکثر ۷۰-۶۰ درصد همپوشانی خواهد داشت (جدول-۱).

گرچه با افزایش ابعاد تصاویر، دقت تخلخل محاسبه شده از آنالیز دیجیتال مغزه بهبود می‌یابد اما این عدد همواره کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است.

از دیگر چالش‌های روش دیجیتال مغزه، محاسبه‌ی نفوذپذیری^{۳۸} است. تنوع تحقیقات انجام شده در این زمینه بیشتر از سایر موارد است. مثلاً در برخی گزارش‌ها نفوذپذیری در تصاویر سی‌تی‌اسکن را به



شکل ۸ | نتایج نرمال‌شده‌ی تابع توزیع ابعاد حفرات حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه در ابعاد تصاویر مختلف ۱۰۲۴ (آبی)، ۵۱۲ (قرمز)، ۲۵۶ (سبز پررنگ)، ۱۲۸ (سبز کم‌رنگ)، آزمایش MICP (مشکی) برای دو نمونه ماسه‌سنگ (a), (b) و دو نمونه سنگ کربناته‌ی (c), (d) [۸]

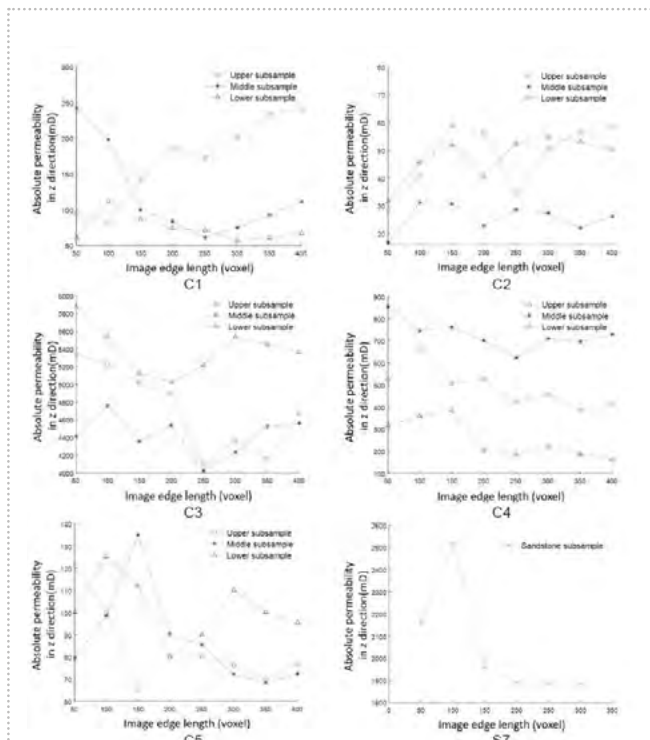
جدول ۱ | نسبت تخلخل محاسبه شده از آنالیز دیجیتال مغزه به تخلخل آزمایشگاهی در ابعاد مختلف تصاویر انتخابی برای نمونه‌ی ماسه‌سنگ‌های (Berea, Doddington) و نمونه‌ی سنگ‌های کربناته (Estailades, Ketton) [۸]

تخلخل عکس / تخلخل (%)				تخلخل عکس (%)				اندازه عکس (وکسل)
۱۲۸ ^۳	۲۵۶ ^۳	۵۱۲ ^۳	۱۰۲۴ ^۳	۱۲۸ ^۳	۲۵۶ ^۳	۵۱۲ ^۳	۱۰۲۴ ^۳	
۹۵/۲	۹۵/۷	۹۶/۲	۹۶/۲	۲۰/۰	۲۰/۱	۲/۲۰	۲۰/۲	Berea
۹۸/۲	۹۸/۲	۹۸/۲	۹۸/۶	۲۱/۶	۲۱/۶	۲۱/۶	۲۱/۷	Doddington
۱۳/۲	۳۰/۷	۴۷/۵	۶۰/۴	۳/۷	۸/۶	۳/۱۳	۱۶/۹	Estailades
۴۲/۲	۵۴/۳	۶۰/۹	۶۶/۱	۹/۷	۱۲/۵	۱۴/۰	۱۵/۲	Ketton

Upscaling به صورت قطعی و دقیق انجام می شود. بدین معنی که اطلاعات مربوط به چینش حفره ها در هر گونه ای حفره ای^{۴۵} بر نتایج مؤثر است و امکان لحاظ کردن دقیق تأثیر هر یک از آنها در روند Upscaling وجود دارد. باید توجه داشت که مخازن کربناته به دلیل ناهمگنی فراوان ناشی از جنس خاص آنها، گونه ای سنگی و همچنین گونه ای حفره ای پیچیده ای دارند که آنالیز دیجیتال مغزه با دقت بسیار زیادی خصوصیات آنها را بررسی کند [۴].

۴- نقش آنالیز دیجیتال مغزه در مشخصه سازی بهتر مخزن و ساخت مدل خواص مخزنی در مخازن کربناته

برای مشخصه سازی بهتر مخزن، یکپارچه سازی نتایج مقیاس حفره تا مقیاس مدل مخزن بسیار کاربردی و تأثیرگذار خواهد بود. همیشه در صنعت نفت چالش هایی برای انتقال داده های دقیق حاصل از مقیاس حفره به مقیاس های دیگر وجود داشته است. هدف از مشخصه سازی مخزن به دست آوردن با کیفیت ترین داده ای پتروفیزیکی در مدل زمین شناسی جهت تخمین درست سیال درجاست. به همین دلیل باید اطلاعات دقیقی از خواص پتروفیزیکی استاتیک (از قبیل تخلخل، تراوایی، ضریب سازند) و دینامیک (از قبیل فشار موئنیگی، تراوایی نسبی و شاخص مقاومت) را در دست داشت. برای انتقال داده ها از مقیاس حفره به مقیاس مدل مخزنی، مقیاس های میانی زیادی وجود دارند

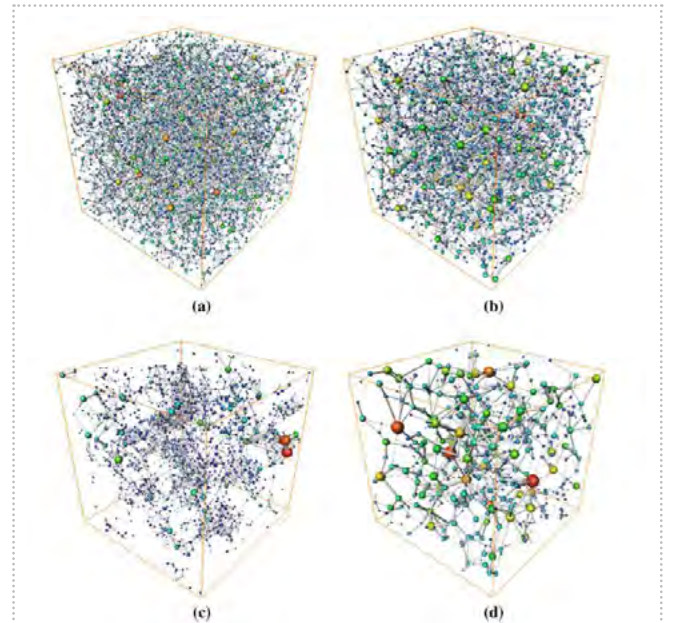


مقادیر نفوذپذیری محاسبه شده از آنالیز دیجیتال مغزه | که بر اساس گزینه های مختلف انتخاب حجم معیار از بخش بالایی (قرمز)، بخش وسطی (مشکی) و بخش پایینی (آبی) تصاویر دیجیتال در نمونه های سنگ کربناته ای (C1, C2, C3, C4, C5) و نمونه ای ماسه سنگ (S7) حاصل شده است [۹]

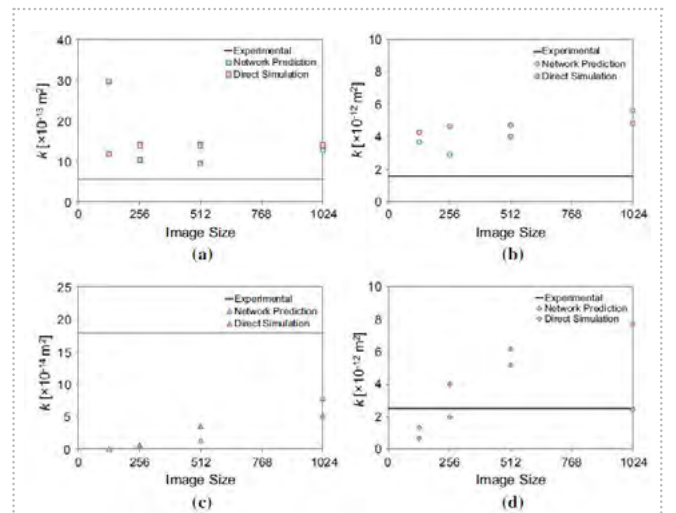


۳- چالش تعمیم پذیری نتایج آنالیز دیجیتال مغزه (Upscaling) در مخازن کربناته

پس از انجام شبیه سازی ها روی نمونه ای ریز (در مقیاس میکرومتر) باید آنها را برای ورود به شبیه ساز مخزن آماده کرد که به این مرحله Upscaling گفته می شود. روند انجام Upscaling نتایج آزمایش های مرسوم و آنالیز دیجیتال مغزه یکسان است؛ با این تفاوت که در هنگام آنالیز دیجیتال مغزه به دلیل اطلاع کامل از خصوصیت تمامی حفره ها،



تصاویر شبکه ای اتصال حفرات حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه برای دو نمونه ماسه سنگ (a), (b) و دو نمونه سنگ کربناته ای (c), (d) [۸]



مقادیر نفوذپذیری محاسبه شده از آنالیز دیجیتال مغزه | به روش شبیه سازی مستقیم (آبی) و روش شبیه سازی مبتنی بر شبکه ای اتصال حفرات (غیرمستقیم) (قرمز) بر حسب ابعاد تصاویر مختلف برای دو نمونه ماسه سنگ (a), (b) و دو نمونه سنگ کربناته ای (c), (d)، خط مشکی افقی نمایانگر نفوذپذیری تک فاز آزمایشگاهی است [۸]



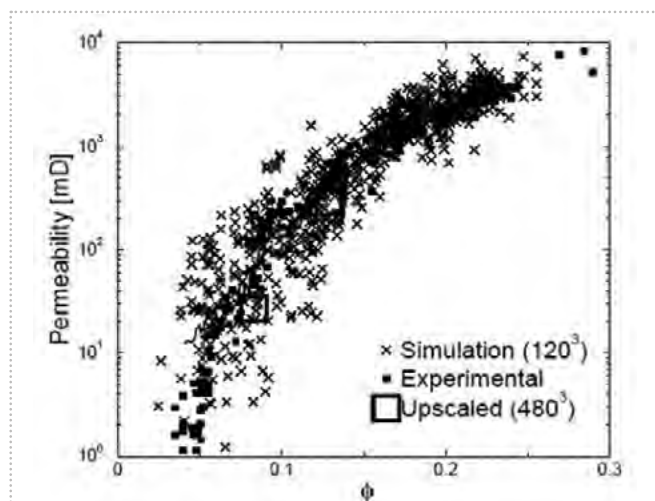
فراهم کرد. تعیین گونه‌ی سنگی توسط این فن آوری، امکان پیش‌بینی بهتر روابط تخلخل-تراوایی و فشار موئینگی، ضریب سازند، شاخص مقاومت سنگ و تراوایی نسبی را فراهم می‌کند. همان‌گونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود نتایج آنالیز دیجیتال مغزه با داده‌های آزمایشگاهی تطابق کامل دارد.

نمونه‌ی دیگر، مطالعه‌ی میدانی مربوط به یک میدان نفتی در کشور امارات است. هدف از انجام این تحقیق بررسی کاربرد آنالیز دیجیتال مغزه برای یک مخزن کربناته با چهار گونه‌ی سنگی بوده که تطابق بسیار خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و آنالیز دیجیتال مغزه حاصل شده است. البته به دلیل مشابهت دو نوع از گونه‌های سنگی، بررسی‌ها روی سه گونه‌ی سنگی (RRT4، RRT2، و RRT6) انجام شده است. خواص مورد بررسی ضریب اشباع، سیمان‌شدگی، شاخص مقاومت سنگ، تخلخل، تراوایی مطلق و تراوایی نسبی هستند. همان‌گونه که در شکل ۱۱- مشاهده می‌شود نتایج آنالیز دیجیتال مغزه برای روند تخلخل-تراوایی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

نتایج مقایسه‌ی آزمایش‌های فشار موئینگی تخلیه در شکل ۱۲- نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج آنالیز دیجیتال مغزه با نتایج صفحه‌ی متخلخل تطابق بسیار خوبی دارد که این از مزایای آنالیز دیجیتال مغزه است؛ چراکه می‌توان نتایج آزمایش‌های صفحه‌ی متخلخل که بسیار زمان‌بر و گران‌قیمت هستند و نتایج سازگارتری که با حرکت سیال در مخزن ارائه می‌دهند را در زمانی بسیار کمتر و با هزینه‌ی کمتری به دست آورد.

نتایج مقایسه‌ی آزمایش‌های تراوایی نسبی در شکل ۱۳- قابل مشاهده است. همان‌گونه که دیده می‌شود نتایج آزمایش‌های حالت پایا با نتایج حاصل از آنالیز دیجیتال مغزه تطابق بسیار خوبی دارند. این تطابق نشان‌دهنده‌ی دقت زیاد محاسبات شبیه‌سازی مقیاس حفره در تبیین اثر هندسه‌ی جریان و برهم‌کنش سیالات در محیط متخلخل است.

آنالیز دیجیتال مغزه می‌تواند در تفسیر لاگ‌ها و حساسیت‌سنجی آنها نسبت به متغیرهای مختلف به زمین‌شناسان کمک کند. علاوه بر آن، این



مقایسه‌ی روند تخلخل-تراوایی آزمایشگاهی و خروجی DRP

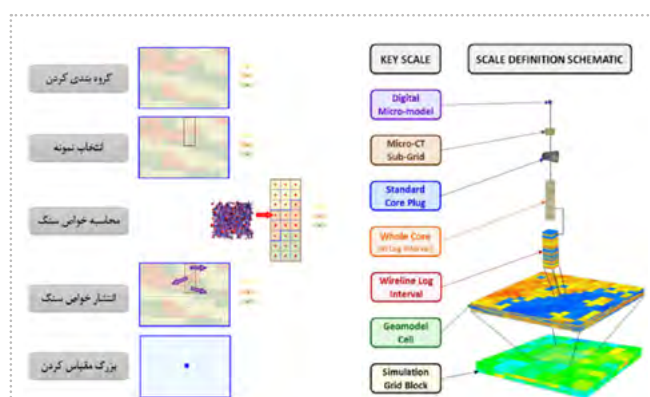
شکل ۹ | [۱۱]

(شکل ۸- سمت راست). یکی از چالش‌های موجود در مشخصه‌سازی چندمقیاسی، حجم مورد بررسی در هر مقیاس است. به دلیل تغییر بسیار زیاد مقیاس از حفره به مدل شبیه‌سازی، مشخصه‌سازی را به مراحل کوچک‌تری تقسیم کرده‌اند (شکل ۸- سمت چپ). در مرحله‌ی گروه‌بندی، بلوک‌های مقیاس ریز، گروه‌بندی سنگی می‌شوند. سپس نماینده‌ی گروه‌بندی‌های سنگی در مرحله‌ی انتخاب نمونه مشخص می‌شود تا خواص آن ارزیابی گردد. در مرحله‌ی بعد (محاسبه‌ی خواص سنگ) خواص استاتیکی و دینامیک نمونه‌ها در مقیاس حفره محاسبه می‌شود. اینجاست که مزیت استفاده از این مراحل برای مخازن کربناته نمایان می‌شود. در سنگ‌های کربناته به دلیل ناهمگنی در مقیاس حفره، باید خواص از این مقیاس ارزیابی و بزرگ‌مقیاس گردند. در مرحله‌ی انتشار خواص، خواص محاسبه شده به گونه‌های سنگی در مقیاس بزرگ تعمیم داده می‌شوند و در مرحله‌ی آخر نیز خواص بزرگ‌مقیاس شده و خواص مدل مخزنی محاسبه می‌گردند [۴].

۵- مثال کاربردی آنالیز دیجیتال مغزه در مطالعات میدانی مخازن کربناته

همان‌گونه که گفته شد جهت آنالیز دیجیتال مغزه، ساختار درونی سنگ مخزن نقش به‌سزایی بر نتایج مدل‌سازی خواهد داشت که با پیشرفت فن آوری عکس‌برداری سه‌بعدی در دهه‌ی اخیر، این روش آنالیز بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین نوین بودن روش مذکور، توانسته توجه صنعت‌گران را به خود جلب کند و در مطالعات میدانی مورد استفاده قرار گیرد. از جمله کاربردهای آنالیز دیجیتال مغزه در مطالعات میدانی می‌توان به مخزن کربناته‌ی شعیبا از میدان الشاهین کشور قطر [۱۱] (میدان مشترک با میدان گازی پارس جنوبی) و یکی از مخازن کربناته‌ی کشور امارات [۱۲] اشاره کرد.

هدف از مطالعه‌ی انجام شده در میدان الشاهین فراهم کردن یک سیستم تعیین گونه‌ی سنگی بر اساس ساختار سه‌بعدی حفره‌های سنگ مخزن است که در مقیاس میدانی کارآیی داشته باشد. در این مطالعه ساختار سه‌بعدی فضای متخلخل سنگ مخزن و توپولوژی^{۴۶}، امکان تعیین سه‌بعدی مقیاس حفره‌گونه‌ی سنگی مخزن^{۴۷} را



مقیاس‌های مورد بررسی برای مشخصه‌سازی مخزن (سمت راست)، مراحل مشخصه‌سازی مخزن (سمت چپ) [۴]

شکل ۸ | [۴]

انتقالی فازهای جریانی سیالات در محیط متخلخل استفاده کرد. این عملکرد می تواند سبب کاهش عدم قطعیت در شبیه سازی میدانی مخازن هیدروکربنی گردد.

نتایج درخشان حاصل از به کارگیری فن آوری دیجیتال مغزه برای نمونه های ماسه سنگی به وضوح بیانگر آنست که می توان با ارتقاء دقت تصاویر سی تی اسکن استفاده شده، توابع جریانی دقیقی را برای نمونه های سنگ کربناته محاسبه نمود (اگرچه اکثر نتایج منتشر شده در

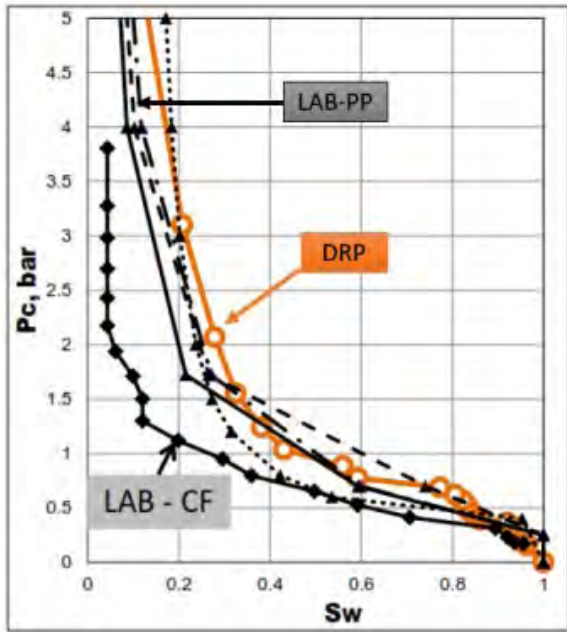
روش از طریق آنالیز خرده های حفاری در منطقه، برای تخمین خواص سنگ در حین حفاری استفاده می شود که سبب بهبود تصمیم گیری در مورد نحوه حفاری، تکمیل چاه و تولید خواهد شد.

این فن آوری به سرعت در حال فراگیر شدن است و پیش بینی می شود به دلیل هزینه کم و زمان کوتاه آن، جایگزین روش های معمول آنالیز مغزه گردد. شرکت های بزرگ نفتی مثل Schlumberger [۱۳]، BP [۱۴] و Qatar Petroleum [۱۵] هزینه ی زیادی برای تحقیق و توسعه در خصوص این فن آوری در نظر گرفته اند.

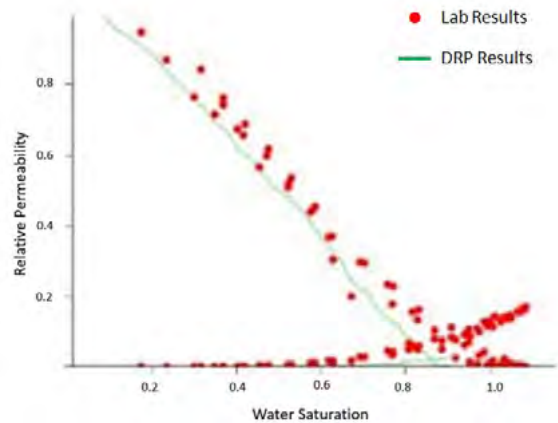
نتیجه گیری

نتایج تحقیقات انجام شده در خصوص آنالیز دیجیتال مغزه نشان می دهد: این فن آوری در مقایسه با آنالیز مرسوم آزمایشگاهی که عموماً در شرایط ناپایا انجام می شود، خواص پتروفیزیکی را دقیق تر، کم هزینه تر و با سازگاری بیشتری با شرایط پایای مخزنی ارائه می دهد.

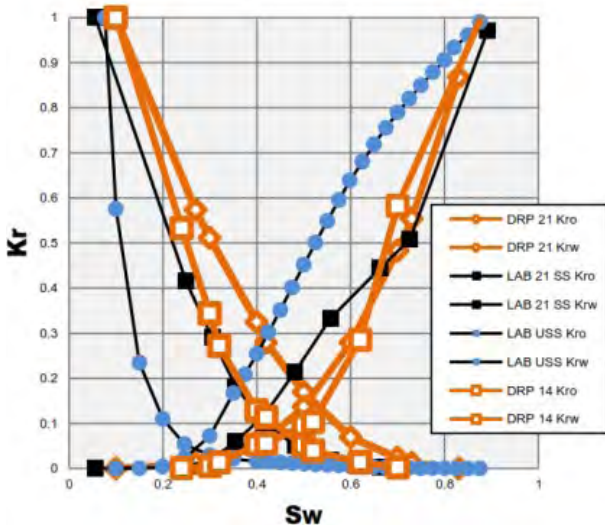
از این فن آوری می توان جهت انجام آنالیز حساسیت روی خواص استاتیک مخزنی از جمله زاویه ی تماس سنگ و کشش سطحی و بررسی توزیع آنها طبق هندسه ی جریانی جهت تخمین دقیق تر خواص



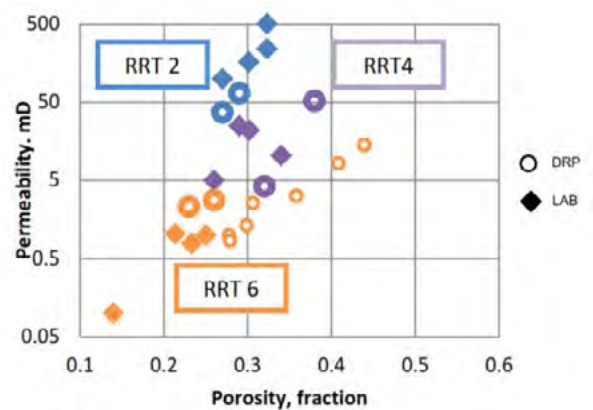
شکل ۱۲ | مقایسه ی نتایج آزمایش های فشار موئینگی تخلیه (ساتریفیوژ و صفحه ی متخلخل) با آنالیز دیجیتال مغزه [۱۲]



شکل ۱۰ | مقایسه ی تراوایی نسبی آزمایشگاهی و تولید شده توسط DRP [۱۱]



شکل ۱۳ | تراوایی نسبی حاصل از آزمایش های پایا و ناپایا و نتایج آنالیز دیجیتال مغزه در مقیاس کارترین [۱۲]



شکل ۱۱ | روند تخلخل-تراوایی [۱۲]

کنونی از این دقت استفاده نکرده‌اند).

است که تاکنون نمونه‌های آزمایشگاهی آن موجود نبوده؛ مثل توزیع
جهت‌دار تراوایی مغزه‌های کاندید. ■

■ از دیگر نکات برجسته‌ی روش دیجیتال مغزه امکان دستیابی به نتایجی

پانویس‌ها

- | | | |
|--|---|---|
| 1. Digital Rock Physics (DRP) | 17. Finite Element | 33. Resolution |
| 2. Reaction Transports | 18. Network Modeling | 34. Pore Size Distribution (PSD) |
| 3. Pore Network Computation and Modeling | 19. RCAL | 35. Mercury Injection Capillary Pressure (MICP) |
| 4. Segmented Image | 20. SCAL | 36. Pore-throat Network |
| 5. Binary File | 21. High Performance Computation (HPC) | 37. Maximal-Ball |
| 6. CT Scan Number | 22. Steady State SCAL Properties | 38. Permeability |
| 7. Spatial filtering | 23. Whole Core | 39. Computational Fluid Dynamics (CFD) |
| 8. Noise and artifact removal | 24. Fitting Functions | 40. Direct Simulation |
| 9. Thresholding | 25. Parallel Processing | 41. Network prediction |
| 10. Morphological operations | 26. Graphics Cards | 42. Lattice-Boltzmann method |
| 11. Clustering analysis | 27. Central Processing Unit (CPU) | 43. Procedure |
| 12. Spectrum Electron Microscope | 28. Multi-threaded CPUs | 44. Nano-CT |
| 13. Direct Methods | 29. Unix | 45. Pore Type |
| 14. Moving Particle Semi implicit | 30. Linux | 46. Topology |
| 15. Smoothed Particle Hydrodynamic | 31. Representative Element Volume (REV) | 47. 3D pore-scale Reservoir Rock-Typing (3DRRT) |
| 16. Lattice Boltzmann Method | 32. Voxel sizes | |

منابع

- [1] Bultreys, T., W. De Boever, and V. Cnudde, Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art. *Earth-Science Reviews*, 2016. 155: p. 93-128.
- [2] Aghaei, A. and M. Piri, Direct pore-to-core up-scaling of displacement processes: Dynamic pore network modeling and experimentation. *Journal of Hydrology*, 2015. 522: p. 488-509.
- [3] Andrä, H., et al., Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation. *Computers & Geosciences*, 2013. 50: p. 25-32.
- [4] Curtis, A.A. Multi-scale Reservoir Characterisation from Pore Scale to Simulation Scale: Concepts and Workflows. in *SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition*. 2015. Society of Petroleum Engineers.
- [5] Andrä, H., et al., Digital rock physics benchmarks—Part II: Computing effective properties. *Computers & Geosciences*, 2013. 50: p. 33-43.
- [6] Andersen, M., Digital core flow simulations accelerate evaluation of multiple recovery scenarios. *World Oil*, 2014: p. 50-56.
- [7] Ovaysi, S. and M. Piri, Multi-GPU acceleration of direct pore-scale modeling of fluid flow in natural porous media. *Computer Physics Communications*, 2012. 183(9): p. 1890-1898.
- [8] Alyafei, N., et al., A sensitivity study of the effect of image resolution on predicted petrophysical properties. *Transport in Porous Media*, 2015. 110(1): p. 157-169.
- [9] Sun, H., S. Vega, and G. Tao, Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. In Press.
- [10] Alyafei, N., T.J. Mckay, and T.I. Solling, Characterization of petrophysical properties using pore-network and lattice-Boltzmann modelling: Choice of method and image sub-volume size. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016. 145: p. 256-265.
- [11] Sok, R., M. Knackstedt, and A. Ghaus. Integrating petrographic, petrophysical, and 3D pore-scale measurements of core material from the Shuaiba Reservoir in AI Shaheen, Qatar. Denver, Colorado: AAPG Annual Convention, 2009: 1-3.
- [12] Grader, A., et al., A comparative study of digital rock physics and laboratory SCAL evaluations of carbonate cores. SCA2010-24. Nova Scotia, 2010.
- [13] Koroteev, D., et al., Direct hydrodynamic simulation of multiphase flow in porous rock. *Petrophysics*, 2014. 55(04): p. 294-303.
- [14] Fredrich, J.T., et al. Digital rocks: developing an emerging technology through to a proven capability deployed in the business. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2014. Society of Petroleum Engineers.
- [15] Maersk Oil Launches Its New Digital Core Laboratory At QSTP. 2014; Available from: <http://www.qf.org.qa/page?a=997&lang=en-CA>.