

استفاده از روش DRP در محاسبه‌ی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن

علی دهقان ابنوی^{۱*}، دانشگاه شیراز^۲، جلیل اسدی ساغندی^۱، دانشگاه صنعتی سهند تبریز^۳، کیومرث حسینی^۲، دانشگاه شیراز

چکیده

مطالعه‌ی خواص سنگ مخزن یکی از موضوعات مهم کنونی در ارزیابی نهایی مخازن هیدروکربنی است. تعیین نواحی با کیفیت مخزنی مناسب می‌تواند نقش به‌سزایی در مباحث تولید از مخازن هیدروکربنی و توسعه‌ی میادین داشته باشد؛ بنابراین مطالعه‌ی خواص پتروفیزیکی مخزن مانند تخلخل، نفوذپذیری، اشباع و روش سریع تجزیه و تحلیل این خواص بسیار مهم است. از روش‌های بررسی خواص مخزن، نمونه‌گیری از سنگ مخزن و انجام آزمایش‌های متعدد روی آنست. هدف این متن بررسی روشکافانه‌ی آزمایش‌های مربوط نمونه‌ی مغزه‌گیری شده و معرفی روش جدید آزمایشگاهی آنالیز مغزه، روش مغزنگاری کامپیوتری^۱ و مقایسه‌ی روش‌های سنتی و جدید است. روش (DRP) ابزاری سریع و در حال تحول برای توصیف خواص سنگ است که پتانسیل کاهش زمان تجزیه و تحلیل خواص پتروفیزیکی و همچنین افزایش دقت در ارائه‌ی نتایج مبتنی بر روش آزمایشگاهی نسبت به روش‌های سنتی را دارد. تا کنون این روش در حوزه‌هایی مانند کانی‌شناسی، توزیع سیالات، آسیب سازند در اثر آسفالتین، اشباع سیالات، بررسی شکاف‌های باز و بسته، بررسی اسیدکاری و عملیات اسیدکاری، خواص PVT، مطالعات پوش سنگ، آنالیز آزمایشگاهی مغزه، تهاجم گل حفاری، هدایت حرارتی (جهت مدل‌سازی) و خواص مخازن کربناته پیچیده (از جمله مخازن عظیم کربناته خاورمیانه) و ازدیاد برداشت کاربرد داشته است.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۷/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۱۰/۳۰

واژگان کلیدی:

خواص سنگ، روش DRP، روش آزمایشگاهی

مقدمه

■ **خرده‌های حفاری:** تمامی قطعات خرده شده توسط مته‌ی حفاری که توسط گل حفاری به سطح می‌رسد.
 ■ **نمونه‌ی مغزه:** نمونه‌ای استوانه‌ای شکل که در اندازه‌های مختلف از سنگ مخزن در عمق زمین به‌وسیله‌ی ادواتی خاص گرفته می‌شود. در این متن نمونه‌ی مغزه که طی فرآیند مغزه‌گیری توسط ادواتی خاص از عمق مشخصی از مخزن مورد مطالعه اخذ می‌گردد بررسی خواهد شد.

۱- مغزه

مغزه نمونه‌ای کوچک از سنگ مخزن است که طی فرآیند مغزه‌گیری به‌دست می‌آید. هدف از انجام هر عملیات مغزه‌گیری، جمع‌آوری اطلاعاتی است که منجر به شناخت بهتر میدان و تولید بهینه‌ی نفت و گاز می‌گردد. اهداف جزئی مغزه‌گیری هرچه باشد منجر به اقتصادی شدن هر پروژه‌ی اکتشافی یا توسعه‌ی میدان هیدروکربنی می‌شود. از مغزه‌گیری اطلاعات مهمی از قبیل تجزیه و تحلیل سنگ مخزن، آگاهی از وجود نفت و گاز، تخلخل و نفوذپذیری سنگ مخزن، درصد اشباع سیالات، اطلاع از وجود شکستگی طبیعی در لایه‌های سنگی، مقدار بهره‌وری مخزن ... به‌دست می‌آید. مهم‌ترین قسمت در آنالیز مغزه، به‌دست آوردن خواص درجای سنگ مخزن است [۱ و ۲]. در شکل ۱- شمای کلی انواع روش‌های مغزه‌گیری در صنعت نشان داده شده است.

پس از نمونه‌گیری از مخزن نوبت به آنالیز مغزه می‌رسد. آنالیز مغزه

روش‌های معمول آزمایشگاهی در محاسبه‌ی خواص پتروفیزیکی اگرچه برای مطالعات معمول مخازن کافی به‌نظر می‌رسد اما در ارزیابی دقیق و مؤثر در مشخصه‌سازی مخزن نواقصی دارد که این نواقص باعث کاهش دقت ارزیابی می‌شوند. از این‌رو برخی از محققان تلاش کرده‌اند تا بدون استفاده از روش‌های معمول و زمان‌بر پتروفیزیکی و به‌کمک دستگاه پرتونگاری تی‌اسکن^۴ و نرم‌افزار، خواص پتروفیزیکی را بررسی کردند. حاصل این کارها امروزه بل عنوان تجزیه و تحلیل دیجیتال سنگ مطرح است. اگرچه در اصل این فن‌آوری برای اهداف پزشکی طراحی شده، اما در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل مغزه‌ی حاصل از سنگ مخزن نیز به‌کار می‌رود که علاوه بر صرفه‌جویی در وقت و هزینه، دقت زیادی نسبت به روش‌های معمول آزمایشگاهی دارد. [۱]

DRP یک روش تصویربرداری رادیولوژی است که چگالی و ترکیب اتمی داخل اشیاء را اندازه‌گیری می‌کند. سی‌تی‌اسکن در اوایل دهه‌ی ۷۰ توسط هانس فیلد و کورماک که در ۱۹۷۹ جایزه نوبل را گرفتند توسعه داده شد.

به‌طورمعمول سه روش ارزیابی و پی بردن به اطلاعات پتروفیزیکی وجود دارد:

■ **چاه‌پیمایی:** چاه‌پیمایی شامل فرآیندی از ثبت پیوسته‌ی داده‌های پتروفیزیکی مختلف مثل تخلخل، اشباع سیال، خواص الکتریکی یا خواص دیگر از مخلوط سنگ یا سیال نسبت به عمق است و توسط ابزارهایی خاص در چاه از ناحیه‌ی مخزنی گرفته می‌شود.

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (a.dehghan@shirazu.ac.ir)

پایه و اساسی تناوبی برای بررسی و کاوش خواص پتروفیزیکی سنگ و مقایسه‌ی آن با آزمایش‌های آزمایشگاهی سنتی است. در این روش امکان محاسبه‌ی خواص پتروفیزیکی و بررسی جریان چندفازی از تصاویر سه‌بعدی حاصل از مغزه‌های سنگ مخزن فراهم است. همچنین تخمین واقعی از هندسه‌ی سنگ و فضای متخلخل فراهم می‌کند. در واقع این روش قادر به اسکن و به‌دست آوردن مدل‌های سه‌بعدی از میکروساختار پیچیده‌ی نمونه سنگ است که می‌تواند درک عمیقی از هندسه‌ی منافذ و فضای متخلخل، خواص الاستیک و الکتریکی سنگ فراهم کند. تصاویر سه‌بعدی از نمونه‌ی سنگ را می‌توان با استفاده از انواع پویش‌گرها^۶ (چاپگرها) مانند مغزه‌ی نگار کامپیوتری توموگرافی^۷، میکروتوموگرافی^۸ و روش (FIB-SEM)^۹ به‌دست آورد. در این روش با استفاده از اشعه‌ی ایکس تصاویری دقیق از ساختار درون مغزه تشکیل می‌شود. نتایج این روش‌های تصویربرداری می‌تواند با استفاده از پردازش تصویر و نرم‌افزار شبیه‌ساز برای درک فاز انواع مواد، ساختار دانه‌ها و شبکه‌های متخلخل بدون نیاز به انجام آزمایش‌های مخرب و خرد کردن مغزه که تاکنون انجام می‌شد جایگزین گردد [۲].

طی آزمایش، مغزه‌ی روی یک میز که به دستگاه مغزه‌نگار (سی‌تی‌اسکن) متصل است قرار داده می‌شود. مغزه‌نگار اشعه‌ی ایکس را از طریق منشأ در امتداد نمونه‌ی مورد مطالعه می‌فرستد. هر چرخش منشأ عکسی از یک برش نازک مغزه فراهم می‌کند. سپس تصاویری با وضوح زیاد از فضای خالی و دانه‌های سنگ به‌دست می‌آید که توسط شبیه‌سازی عددی و نرم‌افزارها ارزیابی می‌گردد. تمامی تصاویر به‌عنوان یک گروه در یک کامپیوتر ثبت می‌شوند که قابلیت چاپ آنها نیز وجود دارد. در شکل ۲-نمایی ساده از مکانیزم این فرآیند نشان داده شده است. ابتکارات افزایش برداشت هیدروکربن از میدان‌های نفتی موجود، شامل افزایش سرعت و دقت در انجام شبیه‌سازی مخزن برای افزایش و بهبود روش‌های مختلف برداشت نفت است. در این راستا از روش سی‌تی‌اسکن استفاده‌های زیادی می‌شود. تجزیه و تحلیل مغزه به‌طور سنتی از طریق آزمایش‌های انجام شده روی قطعات مغزه انجام می‌شود که بسته به تعداد متغیرها و خواص مورد نظر، آزمایش‌های تعیین این خواص می‌تواند زمان‌بر باشد. به‌طور کلی روش‌های سنتی می‌توانند نمونه‌هایی با حجم‌های مختلف از جمله ۱۰۰-۴۰ سانتی‌متر مکعب را پوشش دهد. در حالی که در روش جدید نمونه‌هایی کوچک‌تر، در اندازه‌ی ۳ میلی‌متر نیز قابل بررسی و آزمایش است که بر این اساس، مزیت روش جدید بر روش سنتی از نظر دقت و همچنین نتایج قابل‌اعتمادتر، مشخص می‌گردد و باعث بررسی بهتر فضای متخلخل می‌شود.

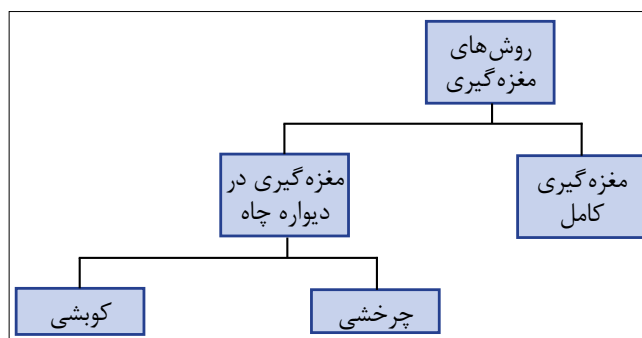
۳- شرح روش کار

اسکنرها انواع مختلفی دارند که یک نمونه از آنها بررسی می‌شود. این اسکنر یک لوله‌ی اشعه‌ی ایکس آند ثابت با منبع تنگستن و تعداد

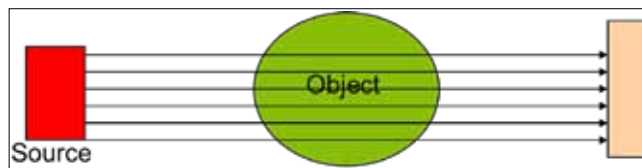
شامل روش معمول آزمایشگاهی و روش آنالیز DRP است که در ادامه روش جدید توضیح داده خواهد شد.

۲- تئوری

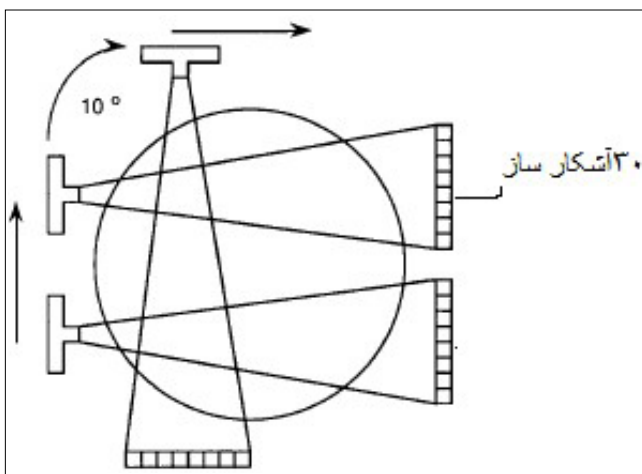
روش DRP شامل بررسی و محاسبه‌ی خواص فیزیکی و جریان سیالات در فضای متخلخل سنگ است. این فن‌آوری روش مناسبی برای شرکت‌هایی است که نیاز به حجم زیادی از نتایج دقیق و سریع برای تجزیه و تحلیل انواع خواص ویژه‌ی سنگ^۵ هستند. این روش می‌تواند برای بهبود پیش‌بینی ذخیره‌ی درجا، نرخ تولید، تعیین سطح تماس و طراحی تکمیل چاه استفاده شود. به‌عنوان مزیت دیگر می‌تواند به صرفه‌جویی اقتصادی این روش نسبت به روش سنتی اشاره کرد. این روش شامل به‌دست آوردن تصاویر مغزه با وضوح زیاد است که



شکل ۱ | روش‌های مغزه‌گیری

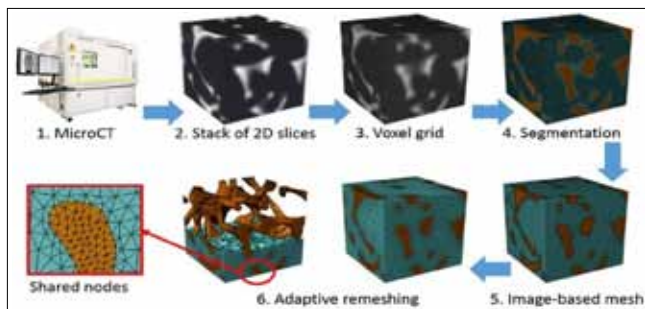


شکل ۲ | شمای ساده‌ای از عملکرد

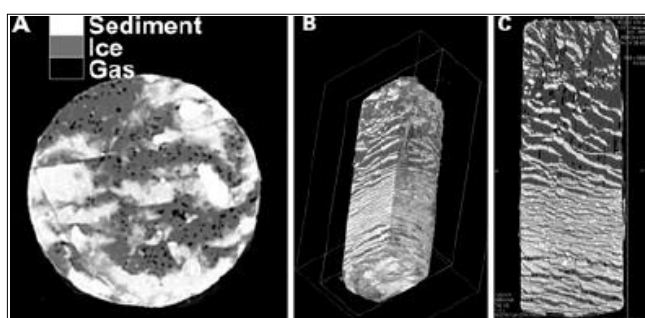


شکل ۳ | شمای نمونه‌ای از یک اسکنر با ۳۰ آشکار ساز [۳]

چگالی مؤثر و عدد اتمی ساختار مغزه است. بازسازی تصویر در این روش نیازمند تعیین ضرایب میرایی خطی برای تمامی حجم مغزه (ساختار تشکیل دهنده، عناصر مغزه) در طول مسیر بین منبع پرتو و آشکارسازها دارد. برای تشکیل تصاویر از نمونه، پردازش گر، تابع حلقوی که از الگوریتم پیروی می کند را به کار می برد. چندین الگوریتم مجزا از بازسازی تصویر به وجود می آید که هر کدام توسط روش های مختلف محاسباتی و تئوری های ریاضی مشخص می شوند. گسترده ترین الگوریتم مورد استفاده، الگوریتم فیلترد بک^{۱۷} است که از حلقه استفاده می کند (نظریه مورگان، ۱۹۸۳). این روش شامل پیدا کردن تابعی حلقوی برای اجرای تبدیل تصاویر دو بعدی به تصاویر سه بعدی است. پس از آماده شدن تصاویر برای شناسایی و تمایز بین انواع فاز مواد موجود در خلل و فرج مغزه، هر گونه تغییر در شفافیت، روشنایی و رنگ و کسل (قسمتهای کوچک تشکیل دهنده جسم) نشان دهنده یک فاز متمایز است. به طوری که وکسل روشن تر با چگالی بیشتر و نشان دهنده فاز جامد و وکسل تیره تر به نمایندگی هوا یا مایع در نمونه است. روش تقسیم بندی تصویر به وکسل توسط ابزار پردازش تصویر پشتیبانی می شود. در این مرحله از کار، جهت افزایش وضوح تصویر، پارازیت های تصویر ایجاد شده حین پویس^{۱۸} برداشته می شود. همچنین همزمان روش تابع حلقوی می تواند منافذ را شناسایی و قسمت های اضافی و عوارض روی نمونه را حذف کند. نمایش گرافیکی تولیدی طبق روش خاص^{۱۹} حاشیه ی پس زمینه را حذف خواهد کرد. به طور معمول مغزه در ابعاد ۱۶/۵-۱۱ سانتی متر در وضوح ۵۰۰ میکرون، پلاگ های مغزه



۴ | مراحل تهیهی تصاویر از نمونه و استفاده از آن



۵ | تصاویر چند نمونه اسکن شده [۶]

۳۰ آشکارساز متشکل از بلورهای سدیم یدید به همراه فتومیلتومترها دارد. وجه تمایز اسکنر نسل دوم نسبت به نسل اول چنین است که یک پرتو برای هر یک از ۳۰ آشکارساز موجود است، در حالی که در نسل اول هر یک از پرتوها برای یک آشکارساز است. این قابلیت اجازه می دهد که از ۳۰ مسیر در امتداد مغزه به طور همزمان تصویربرداری شود. پرتو منشأ ثابت است و آشکارسازها در حال چرخش خطی هستند. هر تصویر نیازمند اشعه ی ایکس و آشکارسازهایی برای ۱۸ بار چرخش با فاصله ی^{۱۰} درجه ای است. تصاویر مقطعی نمونه با استفاده از ضریب میرایی اشعه ی ایکس ساخته می شوند [۳].

۳-۱- نظریه میرایی اشعه ی ایکس

مقدار جزء های تصویری ۱۰ اندازه گیری شده از تصویر اسکن شده ی ضریب میرایی خطی است که قانون بیر نام دارد و طبق رابطه ی-۱ است [۳]

$$I = I_0 \exp(-\mu L) \quad (1)$$

در این رابطه I_0 تابع شدت اشعه ی ایکس و I شدت اشعه ی ایکس بعد از عبور پرتو در امتداد جسمی با طول L است. ضریب میرایی خطی به هر دو چگالی الکترونی (چگالی ظاهری)، ρ عدد اتمی مؤثر (Z_e) که رابطه آن طبق رابطه ی-۲ است بستگی دارد [۳]

$$\mu = \rho(a + bZ_e^{3.8} / E^{3.2}) \quad (2)$$

در این رابطه b ثابت و a ضریب کلاین-نیشینا^{۱۱} و تقریباً مستقل از انرژی است. در رابطه ی-۱ جمله ی اول نشان دهنده ی اثر متقابل پراکندگی کامپتون^{۱۲} اشعه ی ایکس در انرژی های بیشتر از ۱۰۰ کیلوولت^{۱۳} و جمله ی دوم برای احتساب جذب فوتوالکتریک از اشعه ی ایکس است که در انرژی های کمتر از ۱۰۰ کیلوولت قابل توجه تر خواهد بود.

ضریب میرایی خطی معمولاً به عنوان یک عدد اعشاری بیان می شود. جهت سهولت مقایسه ی ضرایب خطی، عدد سی تی^{۱۴} با ارجاع به یک جسم استاندارد تعیین می شود که توسط رابطه ی-۳ تعیین می گردد [۳]:

$$CT \text{ Number} = \frac{\mu_{\text{material}}}{\mu_{\text{standard}}} \times K \quad (3)$$

که در این رابطه معمولاً جسم مینا و استاندارد آب است و k عامل مقیاس^{۱۵} است که در مجموعه ی دوتایی ۵۰۰ یا ۱۰۰۰ (مقیاس قدیمی هونس فیلد) است.

۳-۲- ساخت تصویر از مغزه

پس از قراردادن مغزه در دستگاه و انجام مراحل تصویربرداری تصاویر وارد نرم افزار می شود. مجموعه ای از تصاویر از زوایای مختلف ۳۶۰-۰ درجه از مغزه جمع آوری می شود. در ابتدا این تصاویر به برش دو بعدی مغزه و سپس به تصاویر سه بعدی تبدیل می شوند. حجم هر جزء از این تصاویر سه بعدی مطابق با یک وکسل^{۱۶} است که عمدتاً تابعی از

این تصاویر رسوب به رنگ سفید، یخ به رنگ خاکستری و گاز سیاه رنگ است. به طوری که وکسل روشن تر چگالی بیشتری دارد و نشان دهنده فاز جامد و وکسل تیره تر به نمایندگی هوا یا مایع در نمونه است [۶].

(A) برش در طول محوری

(B) ساخت تصاویر سه بُعدی

(C) برش به صورت طولی

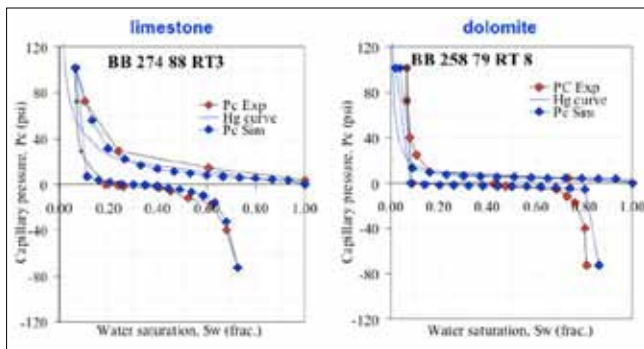
در شکل های ۶ و ۷ نمونه هایی از خروجی اسکنر که توسط نرم افزار مربوط بررسی شده به صورت زیر است. شکل ۶- نمونه ای از یک ماسه سنگ پس از پوشش و فراخوانی در محیط نرم افزار را نشان می دهد. در شکل ۷- پس از پردازش نمونه ی ماسه سنگی جهت محاسبه ی تراوایی، سرعت جریان بررسی می شود. جهت تعیین و مقایسه ی چگالی نمونه های مختلف یک چاه در اعماق مختلف به صورت شکل ۸- با کنار هم قرار دادن مقاطع، می توان وضعیت چگالی را بررسی کرد.

۴- اعتبارسنجی

در این قسمت نتایج آزمایش خواص ویژه ی سنگ برای اعتبارسنجی این روش جدید در جریان چندفازی آورده شده است. مغزه های مورد آزمایش در این بررسی از مخازن کربناته ی خاورمیانه است. شکل ۹- نشان دهنده ی آزمایش خواص ویژه ی سنگ در شرایط دمایی و فشاری مخزن و اعمال فشار طبقات بالایی مخزن است که از صفحات متخلخل برای مقایسه ی فشار موئینگی استفاده شده است. در هر دو نمونه دولومیت و سنگ آهک، تطابق بالایی بین داده های آزمایش آزمایشگاهی با آزمایش DRP وجود دارد [۷].

۵- نرم افزارهای آنالیزگر

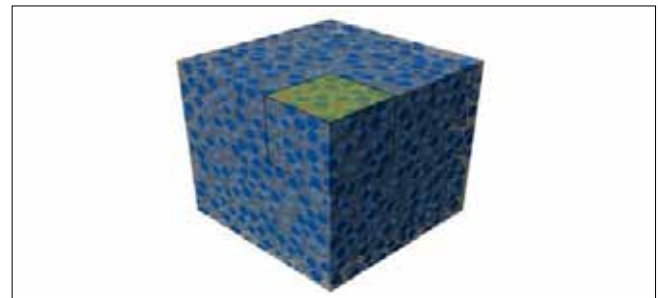
یکی از آخرین نرم افزارهای آنالیز داده های خروجی از دستگاه پوشش گر، نرم افزار بررسی (CorView) است که توسط آزمایشگاه و در فرد ارائه شده است. نرم افزار ابتدا فایلی را که از آزمایشگاه پوشش سنگ دریافت می کند می خواند، سپس با قرار دادن در کنترلر نرم افزار، نتایج را به صورت دو بُعدی یا سه بُعدی آنالیز می کند. این نرم افزار آزمایشگاهی نگاهی جدید



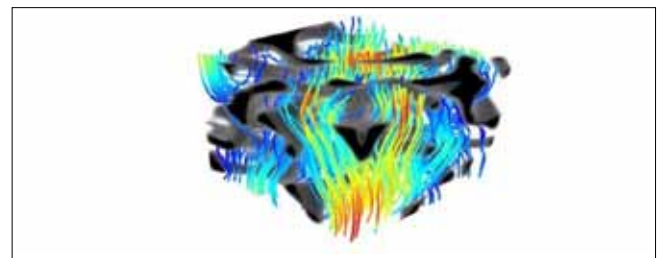
شکل ۹ | مقایسه ی نتایج آزمایش آزمایشگاهی با روش DRP [۷]

در ابعاد ۲-۴ سانتی متر با وضوح ۱۴-۱۲ میکرون، میکروپلاگ ها برای بررسی دقیق تر خواص پتروفیزیکی ابعادی از ۵-۱ میلی متر با وضوح ۵-۳ میکرون و نانو مغزه نگار ۲۰ با ابعاد ۵۰ تا ۳۰۰ میکرون، تصاویری با وضوح ۳۰۰-۵۰ نانومتر تصویر تشکیل می دهند. وقتی مناطق دلخواه از مغزه شناسایی شد ممکن است مغزه برای اطلاعات بیشتر، بازپوشش شود. هنگامی که تقسیم بندی تصویر و پردازش تصویر تکمیل شد مدل را می توان به عنوان یک مش ۲۱ یا گرید ۲۲ برای شبیه سازی عددی استفاده کرد. همچنین می توان از عکس هایی که بر مبنای شبکه بندی ۲۳ است برای تعیین هندسه ی اصلی مغزه پوشش شده استفاده کرد. این روش برای اینکه قادر به مدیریت تمام اجزای مواد مختلف و شبیه سازی راحت تر و نتایج سریع تر باشد طراحی شده است. بنابراین دقت یک مدل تنها به کیفیت تصویر اصلی و چگونگی انتخاب مناطق دلخواه از مغزه توسط کاربر بستگی دارد. همچنین می توان اندازه ی مش ها را بدون از دست دادن هندسه ی اصلی که از عکس ها ریشه می گیرد کاهش داد. مراحل عملکرد به شرح زیر است [۴ و ۵]:

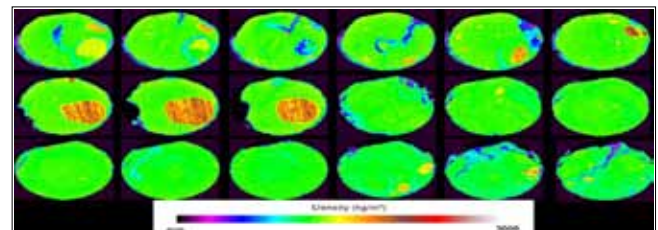
سه تصویر در شکل ۵- نمونه ای از نتایج خروجی اسکنر هستند. در



شکل ۶ | نمونه ی ماسه سنگی [۱]



شکل ۷ | تجسمی از سیال برای محاسبه ی نفوذپذیری [۱]



شکل ۸ | تعیین چگالی نمونه ای خاص [۱]

ج) داده‌های زمین‌شناسی (مثل نتیجه‌ی حاصل از مطالعات چینه‌ای، پتروگرافی، میکروفاسیس، مطالعه‌ی شکستگی و شکاف، SEM، XRD) [۹].

نتیجه‌گیری

■ استفاده از روش آنالیز دیجیتال سنگ باعث افزایش دقت نتایج، کاهش زمان و کاهش هزینه‌ها می‌شود.
 ■ برخلاف روش‌های سنتی نظیر تزریق جیوه و خرد کردن نمونه برای انجام آزمایش‌ها، در این روش نمونه‌ی مغزه هیچ آسیبی نمی‌بیند.
 ■ برنامه‌های آینده برای روش آنالیز دیجیتال، شامل کار با نمونه‌هایی که در آن منافذ با موادی مانند خاک رس پر شده، اضافه کردن جزئیات و گزینه‌های بیشتر برای تجزیه و تحلیل تخلخل و تراوایی، به‌خصوص هنگام مطالعه‌ی مخازن غیرمتعارف ناهمگن، بررسی گل حفاری، ارائه‌ی نرم‌افزار با قابلیت‌های بصری بیشتر و ماژول‌های کاربردی ساده برای زمین‌شناسان و امکان چرخش تصاویر سه‌بعدی در هر زاویه‌ی دلخواه برای بررسی دقیق‌تر نمونه است. ■

در ذخیره، یکپارچه‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌های بارز مغزه است. ذخیره‌سازی داده‌ها به‌صورت یکپارچه همراه با یک رابط گرافیکی باعث می‌شود این نرم‌افزار برنامه‌های کاربردی برای ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌های آزمایشگاهی شود. در سیستم عامل ویندوز، قابلیت استفاده‌ی طیف گسترده‌ای از کاربران از این نرم‌افزار ایجاد می‌گردد. از جمله:

■ شرکت‌های بین‌المللی نفتی برای مدیریت و یکپارچه‌سازی داده‌های مخزن
 ■ تیم تحلیل‌گران مغزه برای کاربرد در آزمایشگاه تجزیه و تحلیل مغزه
 ■ تیم شبیه‌سازان مخزن برای بررسی داده‌های مغزه جهت مشخصه‌سازی مخزن [۸]

■ در این نرم‌افزار می‌توان مهم‌ترین اطلاعات مغزه از سه منبع مجزا و مشخص را ذخیره و استفاده کرد:

الف) داده‌های آزمایش‌های خواص ویژه سنگ و اطلاعات حاصل از مغزه و خرده‌های حفاری

ب) داده‌های پتروفیزیکی (از جمله نمودارهای چاه پیمایی)

پانویس‌ها

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. J.ASADI@SZOGPC.COM | 13. KVP DIMENSION |
| 2. KIUMARS.HOSEINI@UT.AC.IR | 14. CT NUMBER |
| 3. DIGITAL ROCK PHYSICS | 15. SCALE |
| 4. CT SCAN | 16. VOXEL |
| 5. SCALE | 17. FILTERED BACK-PROJECTION METHOD |
| 6. SCANNERS | 18. SCAN |
| 7. COMPUTED TOMOGRAPHY -CT | 19. BACK-PROJECTION METHOD |
| 8. MICRO-CT | 20. NANO-CT |
| 9. FOCUSED ION BEAM-SCANNING ELECTRON MICROSCOPY | 21. MESHING |
| 10. PIXEL | 22. GRID |
| 11. KLEIN-NISHINA | 23. MESHING |
| 12. COMPTON | |

منابع

- [1] James, G. A. (2015). Simplifying Digital Rock Physics Workflows. Petroleum geoscience. 12.
- [2] American petroleum institute "Recommended Practices for Core Analysis" RECOMMENDED PRACTICE 40, SECOND EDITION, FEBRUARY 1998
- [3] Coles, ME and Muegge, EL and Marek, BF "Use of attenuation standards for CAT scanning applications within oil and gas production research" journal SCA paper 9223, pages 28, 1992
- [4] Schlumberger "microscale scanning, digital rock and fluid analytics services for core sample characterization" 2013
- [5] Sharma, Bakul Chandra and Brigham, William E and Castanier, Louis M "CT imaging techniques for two-phase and three-phase in-situ saturation measurements" Stanford Univ., CA (United States), 1997
- [6] Knackstedt, Mark A and Latham, Shane and Madadi, Mahyar and Sheppard, Adrian and Varslot, Trond and Arns, Christoph "Digital rock physics: 3D imaging of core material and correlations to acoustic and flow properties" The Leading Edge journal, pages: (2833-), Year 2009, Publisher Society of Exploration Geophysicists
- [7] Shauna Cameron "The usefulness of a 320-row CT scanner in the oil industry" "visions214- magazine, 2014, page (9)
- [8] Mohammed Zubair Kalam "Digital Rock Physics for Fast and Accurate Special Core Analysis in Carbonates" New Technologies in the Oil and Gas Industry, 2012, Chapter 9, page 201
- [9] Lab, w. (2016). "2D and 3D CT Scan Visualization." core-scanning process, from www.weatherford.com
- [10] Knackstedt, Mark A., et al. "Digital rock physics: 3D imaging of core material and correlations to acoustic and flow properties." The Leading Edge 28.1 (2009): 2811[33-] Schembre, J. M., and A. R. Kovscek. "A technique for measuring two-phase relative permeability in porous media via X-ray CT measurements." Journal of Petroleum Science and Engineering 39.1174-159:(2003) 2-.