

بررسی کیفی تخلخل نمونه‌های مغزه با استفاده از تصاویر ام‌آرآی (یکی از مخازن کربناته جنوب ایران)

عزت‌اله کاظم‌زاده^{۱*}، امیر صالحی^۲، سید جمال شیخ ذکریایی^۳ و آرمین افروغ^۴

^۱ استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

^۳ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

^۴ پژوهنده، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۹۱/۷/۲۴، پذیرش نهایی: ۹۲/۱۱/۱۵)

چکیده

بررسی کیفی تخلخل سنگ مخزن همچنان یکی از مسائل مهم مورد بحث در آزمایشگاه‌های تحلیل مغزه است. این اطلاعات در پیش‌بینی عواملی مانند حجم هیدروکربن ذخیره شده، جریان شاره و نیز شبیه‌سازی رفتار مخزن، نقش مهمی ایفا می‌کند. قابلیت زیاد تفکیک‌پذیری در تصویبرداری ام‌آرآی آن را به روشی مناسب در تصویبرداری از شاره‌ها در محیط متخلخل سنگ، با دقتی در مقیاس میلی‌متر تبدیل می‌کند. در طول دو دهه اخیر تلاش‌های قابل توجهی صورت گرفته است تا تصاویری با کیفیت عالی و با قابلیت عرضه اطلاعاتی با جزئیات بیشتر به دست آید. این جزئیات درک و فهم روشن‌تری از کیفیت تخلخل مغزه به دست می‌دهد. در این تحقیق، نمونه‌های مورد آزمایش متعلق به یکی از مخازن کربناته جنوب ایران هستند. اهداف عمده این تحقیق بررسی کیفی انواع تخلخل موجود در نمونه مغزه، توزیع و فراوانی حفره‌ها، اندازه‌گیری میزان تخلخل مؤثر و عرضه مدل‌های سه بُعدی از نمونه و مقایسه این روش در تحلیل و اندازه‌گیری تخلخل با سایر روش‌های مرسوم است. در این تحقیق داده‌های به دست آمده از روش ام‌آرآی با نتایج روش‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. این بررسی، قابلیت زیاد روش تصویبرداری ام‌آرآی در بررسی کیفی تخلخل سنگ مخزن را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، تشدید مغناطیسی، تصویبرداری، مغزه

Qualitative characterization of core samples porosity using (MRI) image (a carbonate reservoir in southern Iran)

Kazemzadeh, E.¹, Salehi, A.², Sheikhzakariai, S. J.³ and Afrough, A.⁴

¹Assistant Professor, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

²Masters Student, Islamic Azad University - Science and Research Branch, Tehran, Iran

³Assistant Professor, Islamic Azad University - Science and Research Branch, Tehran, Iran

⁴Research Assistant, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

(Received: 15 Oct 2012, Accepted: 04 Feb 2014)

Summary

Qualitative analysis of petroleum reservoir rocks is still one of the most important topics of core laboratories and directly affects hydrocarbon-in-place, fluid flow, and prediction of field performance. Magnetic Resonance Imaging (MRI) as a non-invasive, millimeter resolution technique which only images fluids in porous media fits this purpose perfectly. Magnetic resonance is a radio frequency spectrometry, based on excitation of nucleus energy levels which can exploit a wide range of information on the saturation fluid,

geometry of pores, and diffusion. Using magnetic gradients and signal encoding, this can be used as a tomography technique. Determining porosity regardless of rock lithology, reservoir rock quality, bound and free water (which presents production potential) and potential permeable tight beds are applications of this method, from among many others. Recent advances in imaging techniques along with new software and processing methods has resulted in exploiting the images containing valuable physical information.

The main aims of this study are qualitative investigation of core sample, determining the number and distribution of vugs, presenting three-dimensional models and comparing this method with other conventional methods. We acquired images of cores adequate for revealing characteristics of matrix, vugs, and other different porosity types in carbonate rocks as well as their interaction. The images in the form of matrices of MR signal were analyzed using both image analysis and physics of MR signal. Studied samples are a selection from one of southern Iranian carbonate reservoirs, cleaned using Soxhlet extraction, dried in oven and saturated with synthetic reservoir brine. Rock type, pore-filling fluid, the MRI imaging hardware and software, pulse sequence, and image processing affect such study results. So, impacts of several items were considered and best available pulse sequence parameters were set. Presence of ferromagnetic minerals adversely affects image quality, so samples bearing these minerals are very difficult to image in high fields and have to be imaged with special pulse sequences and systems. Samples without ferromagnetic minerals, as in most carbonate rocks, can be imaged in high fields, so because of the superior quality of high field imaging, this method is used in our carbonate samples.

Validity of MRI images was verified using histogram analysis of water, rock and air segments of the images subsequent to acquisition. Reference fluids, brine (the pore-filling fluid) and air, helped us in matching and comparing histograms and check the validity of signal from porous sample. In image analysis we utilized histogram, field of view, and segmentation techniques. Results of this analysis after using physical models of MRI signal in porous media led to numerical and visual models of rock samples. In addition to visual models of porosity, we prepared visual models of mean-T2 of invaluable to quantitative and qualitative study of porosity, ultimately resulting in determining fraction of vuggy, moldic, and inter-particle porosity. This model was constructed by superposition of image slices.

Inter-particle porosity cannot be determined from sub-millimeter MRI image analysis, so it is calculated from the physics of MR signal. We determined the accuracy of the method in comparison with other conventional experiments such as helium porosimetry and petrographic image analysis which revealed reasonable accuracy of the method in determining porosity types and visualization. Effect of several items in the accuracy of this method is proposed. First, gravimetry porosity is always lower compared to the helium porosimetry, and porosity calculated from MRI imaging only is affected by water saturation of the sample, so MRI porosity should always be compared with gravimetry porosity. Second, MRI images are not only sensitive to water in porous samples, but also sensitive to pore size of the sample. Water in very fine pores is not shown in images unless echo time is set to 1-3ms, not possible in our study because of hardware limits. Third, magnetic field inhomogeneity can account for up to nine percent of signal intensity.

This study obtained a new perspective in using MRI imaging for qualitative study of porosity and determining share of porosity types.

Keywords: Imaging, Magnetic resonance, Core, Porosity

۱ مقدمه

برای مشتریانش عرضه نمی‌کند و تقریباً همه فعالیت‌ها در این زمینه، در ابعاد تحقیقاتی ادامه دارد.

روش ام‌آرآی براساس تحلیل بافت‌نگارهای (histograms) تصاویر مغزه برای تفکیک شاره از سنگ در این تصاویر است. در این مقاله روشی براساس تحلیل خودکار تصویر، پردازش و تفکیک اجزای تصویر عرضه شده است. اولین بار متیلو و همکاران (۱۹۹۷) آزمایش‌هایی را براساس این روش روی مغزه عملی ساختند. اما در بررسی‌های ما سعی شده با بهره‌گیری از امکانات نرم‌افزاری بیشتر، مدل‌هایی کامل و نتایجی دقیق از کیفیت و کمیت تخریل مغزه عرضه شود.

اندازه‌گیری‌های ام‌آرآی در ساختارهای متخلخل تحت‌تأثیر پارامترهایی مانند حجم حفره‌ها، نسبت سطح به حجم، مقدار و ترکیبات شاره هستند. به‌دست‌آوردن تصاویر ام‌آرآی از سنگ‌های کربناته کار ساده‌ای نیست و لازم است این تصاویر قبل از محاسبات عددی و طبقه‌بندی ساختارها، پردازش شوند.

تصویر ام‌آرآی یک طیف‌سنجی بسامد رادیویی (Radio Frequency Spectrometry) براساس تحریک سطوح انرژی هسته به‌ویژه هسته هیدروژن و انتشار آن از راه یک میدان مغناطیسی خارجی است. بعد از خاموش کردن RF (Radio Frequency) و بازگشت این سطوح انرژی به حالت تعادل و هم‌فاز شدن اسپین هسته‌ها، یک سیگنال متناسب با مقدار شاره تولید می‌شود که مدت‌زمان فروافت (decay) آن تحت‌تأثیر دو پارامتر زیر است (برنستین و همکاران، ۲۰۰۴):

۱. زمان آسایش اسپین-شبهه (spin-lattice realxivity)

یا T_1 (time)

۲. زمان آسایش اسپین-اسپین (spin-spin realxivity)

یا T_2 (time)

اثر فیزیکی تشدید مغناطیسی را می‌توان به روش‌های

بررسی کیفی تخریل سنگ مخزن همچنان یکی از مسائل مهم مورد بحث در آزمایشگاه‌های تحلیل مغزه است. این اطلاعات به‌ویژه در ارتباط با سنگ‌های کربناته نقش مهمی در شبیه‌سازی پارامترهای مخزن حول محور حجم هیدروکربن ذخیره شده و دینامیک جریان ایفا می‌کنند. از این روش‌هایی که بررسی توزیع فضایی حفره‌ها در ساختارهای متخلخل را ممکن می‌سازند بیشتر بسیار مهمی را در ارتباط با تحلیل اطلاعات مغزه به‌دست می‌دهند. روش تصویربرداری با تشدید مغناطیسی هسته MRI (Magnetic Resonance Imaging)، ام‌آرآی، یکی از بهترین راه‌های دستیابی به این مهم به‌ویژه در ارتباط با سنگ‌های کربناته است.

شرکت‌های نفتی از اواسط دهه ۸۰ شروع به استفاده از ام‌آرآی کردند. دست‌اندرکاران صنعت نفت از این روش برای توصیف خواص پتروفیزیکی نمونه‌های سنگ مخزن گرفته شده از چاه استفاده می‌کنند. در چند سال گذشته برنامه‌های متعددی در ارتباط با بررسی تخریل مغزه با استفاده از این روش تصویربرداری صورت گرفته و مدل‌های گوناگونی عرضه شده است. چاردریر و روسل (۱۹۹۰) به تصویربرداری از نمونه‌های مغزه با استفاده از دستگاه ام‌آرآی پرداختند. در این تصویربرداری، از سری زمانی (Pulse Sequence) اسپین- وارپ (SPIN-) (WARP) استفاده شد. نتایج این آزمایش دقت زیاد این روش را در سنجش تخریل، در مقایسه با روش‌های مشابه مانند تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی (SEM) و سی تی اسکن (CT X-ray) نشان داد. پس از آن افرادی مانند متیلو و همکاران (۱۹۹۷) و بلنگف و همکاران (۲۰۰۵) نیز با استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر در تصویربرداری مغزه، به نتایج دقیق‌تری دست یافتند. با وجود این هنوز هیچ شرکت عرضه‌کننده آزمایش‌های مغزه، خدمات تصویربرداری ام‌آرآی را به‌صورت تجاری

پیروی می‌کند. (مکروبی و همکاران، ۲۰۰۳؛ کالاقان، ۱۹۹۱).

$$M(t) = M_0 \times e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (2)$$

شدت سیگنال ام‌آرآی با تعداد هسته‌های هیدروژن موجود در ناحیه در حال تحلیل متناسب است. بنابراین با فرض ثابت بودن جرم حجمی شاره و رابطه بین حجم و تعداد اتم‌های هیدروژن موجود در یک واحد حجم از شاره می‌توان از رابطه زیر برای محاسبه تخلخل در هر المان حجمی از سنگ استفاده کرد.

$$\phi = \phi_{ref} \times \frac{V_{ref} \times M_{core}}{V_{core} \times M_{ref}} \quad (3)$$

در این رابطه M_{ref} شدت سیگنال برای توده آب مرجع، V_{ref} اندازه المان حجمی یا حجم پیکسل برای این توده، M_{core} شدت سیگنال برای مغزه و V_{core} اندازه المان حجمی در مغزه است.

در این تحقیق یک مرجع ثابت برای تشخیص دامنه تغییرات سیگنال در سنگ و شاره مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی پروتون در این توده مرجع برابر با چگالی پروتون در شاره موجود در سنگ است. بنابراین تخلخل توده مرجع ۱۰۰٪ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت معادله (۳) برای هر پیکسل از تصویر مغزه به کار می‌رود و تخلخل کل به دست آمده محاسبه می‌شود.

نکته دیگری که در اندازه‌گیری‌ها باید مورد توجه قرار بگیرد این است که سیگنال تصویر نه تنها تابعی از میزان شاره موجود در حفره‌ها است، بلکه به زمان T_2 نیز (معادله ۲) بستگی دارد (کوتس و همکاران، ۱۹۹۹). این خاصیت در واقع تعیین کننده هندسه محاطی هر جزء در تصویر خروجی است. در این آزمایش‌ها، به اندازه‌گیری چگالی هیدروژن با استفاده از سکانس تپ سی‌پی‌ام‌جی (CPMG Pulse Sequence) پرداخته شده‌است. در این روش ساختارها را می‌توان هم براساس شکل و هم براساس رفتار T_2 یا چگالی پروتون طبقه‌بندی کرد.

گوناگون در استخراج طیف وسیعی از اطلاعات در مورد شاره اشباع شده در سنگ به کار برد. ام‌آرآی درعین حال یک روش برش‌نگاری (Tomography) است که با استفاده از گرادیان میدان مغناطیسی و رمزنگاری سیگنال‌های دریافتی از نقاط گوناگون نمونه، تصاویری را درحکم خروجی تولید می‌کند. مجموع‌های از گرادیان‌ها که به صورت صحیح جهت داده شده‌اند، در فضایی سه بُعدی تولید مجموع‌های از بسامدهای الکتریکی می‌کنند که از راه پردازش رایانه‌ای، تصاویری از توزیع شاره در داخل سنگ را به وجود می‌آورند. سیگنال‌های به دست آمده که حاصل وزن‌دهی پارامترهایی مانند T_1 ، T_2 و یا چگالی پروتون هستند می‌توانند از راه سکانس تپ (پالس)‌هایی مانند اسپین-اکو (Spin-Echo)، اسپین-اکو سریع، سی‌پی‌ام‌جی (CPMG) (میوم و گیل، ۱۹۵۸)، روش پس افکنش (Back Projection) یا روش اسپریت (Sprite) (بالکوم و همکاران، ۱۹۹۶) تصاویر مورد نظر را تولید کنند.

ماتریکس به منزله فاز جامد فقیر از اتم‌های هیدروژن متحرک، دخالتی در اندازه‌گیری‌های مربوط به شاره، از قبیل زمان آسایش، ضریب انتشار و ترکیبات شیمیایی ندارد. دستگاه ام‌آرآی می‌تواند میزان مغناطش هسته را در المان‌های حجمی در آن دستگاه محاسبه کند. مقدار مغناطش هسته هیدروژن به چگالی پروتون، زمان آسایش اسپین-شبهه، و زمان آسایش اسپین بستگی دارد. مقدار این کمیت به صورت سیگنال در دستگاه ثبت می‌شود. مغناطش هسته در حالت تعادل، M_0 ، با تعداد اتم‌های هیدروژن متحرک موجود در جسم، N ، رابطه خطی دارد که این رابطه از قانون کوری پیروی می‌کند. (استایف و هان، ۲۰۰۶).

$$M_0 = N \frac{\gamma^2 \hbar^2 I(I+1)}{3(4\pi^2) k T} B_0 \quad (1)$$

رابطه بین مقدار مغناطش و زمان آسایش اسپین-اسپین در زمان‌های متفاوت پس از انگیزش نیز از رابطه زیر

اندازه‌گیری تخلخل با استفاده از روش انبساط گاز قرار گرفتند و نتایج ثبت شد. پس از آن، نمونه‌ها به منظور آماده‌سازی برای تصویربرداری، با آب‌نمک اشباع شدند. مشخصات شاره اشباع کننده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

۲-۲ تصویربرداری

برای داشتن وضوح بیشتر در تصویر، نمونه اشباع شده باید درون یک منبع غنی از هیدروژن که یک ظرف محتوی همان شاره اشباع کننده بود قرار گیرد. ظرف در زیر دستگاه، درون کوچک‌ترین سیم‌پیچ موجود قرار گرفت. باید دقت شود که اندازه سیم‌پیچ در تمرکز سیگنال‌های دریافتی از میدان مغناطیسی و وضوح تصویر، بسیار مهم است. از این رو سیم‌پیچ انتخابی باید از نظر اندازه تا حد امکان به اندازه سنگ نزدیک باشد. در ضمن این نکته را نیز نباید فراموش کرد که ظرف در بر گیرنده نمونه به هیچ وجه نباید دارای اجزای فلزی باشد. نمونه‌ها در کنار اجسام فلزی قابل اسکن نیستند.

حفره‌های بزرگ‌تر مقادیر T_2 بیشتری نسبت به حفره‌ها کوچک‌تر دارند. به همین علت، T_2 می‌تواند اندازه حفره‌ها را به‌طور مستقیم مشخص کند.

همه این ویژگی‌ها، کاربرد روش ام‌آرآی در تحلیل تخلخل مغزه را افزایش می‌دهد. همچنین این آزمایش، آزمایشی غیر مخرب روی نمونه‌ها است، چنان‌که آزمایش‌ها دیگر مانند جریان شاره در سنگ نیز روی همان نمونه‌ها، پس از تصویربرداری قابل اجرا خواهد بود.

۲ روش تحقیق

۱-۲ آماده‌سازی نمونه‌ها

آزمایش‌ها روی دو نمونه مغزه انتخاب شده از یکی از مخازن کربناته جنوب ایران صورت گرفته است. این مغزه‌ها استوانه‌ای شکل بوده برخی از مشخصات پتروفیزیکی نمونه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

مغزه‌ها پس از شست‌وشو با شاره تولوئن در دستگاه سوکسله (Soxhlet)، در یک کوره مغزه خشک‌کن قرار داده شدند. سپس مغزهای خشک شده تحت آزمایش

جدول ۱. مشخصات پتروفیزیکی نمونه‌ها.

Sample	Diameter cm	Length cm	Dry weight gr	Permeability mD
1	3.76	4.79	122.23	19.57
2	3.84	5.11	127.31	55.91

جدول ۲. مشخصات شاره اشباع کننده.

Composition	H ₂ O, NaCl
Concentration [ppm]	214000
Density [g/cm ³] at 20°C	1.157
Viscosity [cP] at 20°C	1.09

ضخامت ۲ mm و فاصله بین مقاطع ۲/۵ mm گرفته شد. ایجاد فاصله ۰/۵ میلی‌متری بین مقاطع باعث می‌شود از ایجاد خطا در انگیزش هسته اتم‌های هیدروژن در مکان نامناسب جلوگیری شود و ضخامت ۲ میلی‌متری کمترین ضخامت هر مقطع بود که دستگاه قابلیت تصویربرداری از آن را داشت. از این رو بهترین توصیف سه‌بعدی از سنگ به دست خواهد آمد.

پس از پایان یافتن عملیات تصویربرداری و به دست آمدن تصاویر مطلوب، از یکی از نمونه تصاویر، مقطع نازک نیز گرفته شد. این کار برای سنجش دقت این روش در تفکیک انواع تخلخل و ارزیابی توانایی این روش در بررسی کیفی تخلخل مغزه صورت گرفت.

۲-۳ بررسی صحت داده‌های تصویربرداری

همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد، برای بررسی صحت داده‌ها از یک توده آب مرجع، محتوی همان شاره اشباع کننده حفره‌ها نیز تصویربرداری صورت گرفت. پس از به دست آمدن تصاویر، با انطباق منحنی دامنه سیگنال برای هریک از نمونه‌ها روی منحنی تغییرات سیگنال توده آب مرجع نتایج زیر حاصل شد:

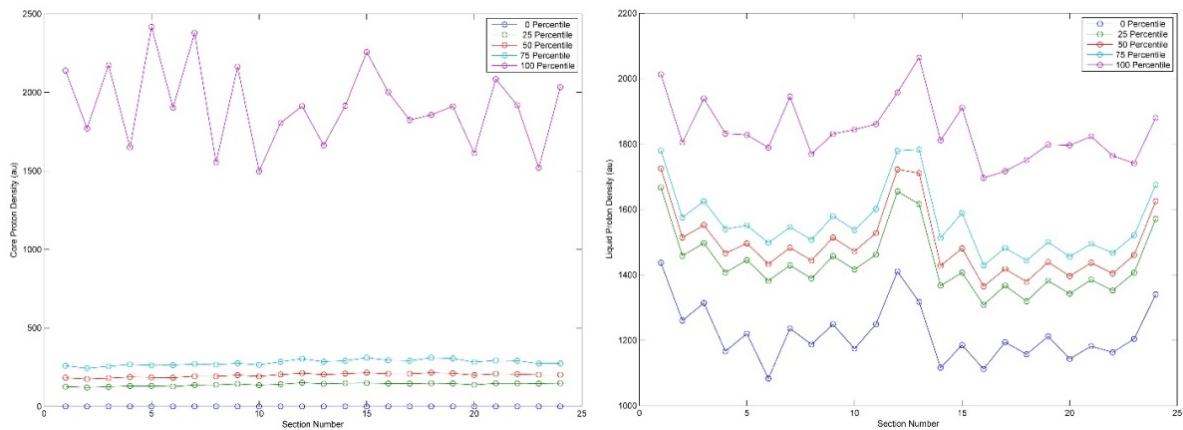
الف) انطباق تقریبی بین میانگین سیگنال برای توده آب مرجع (141 ± 1452) و حداکثر سیگنال برای آب داخل حفره‌ها (۱۹۱۵) (شکل‌های ۱ و ۲)

ب) انطباق بسیار خوب بین میانه سیگنال هر دو تصویربرداری (۲۰۸ و ۱۸۸) (شکل ۱)

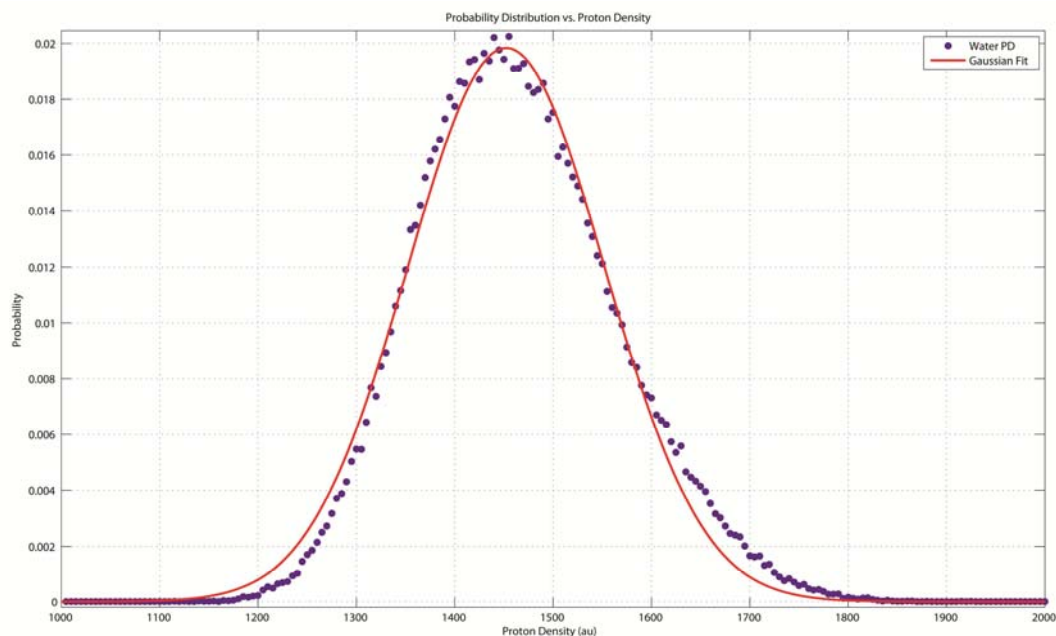
ج) اختلاف بسیار زیاد بین مقادیر سیگنال سنگ و شاره، به طوری که میانگین شدت سیگنال برای آب ۱۴۵۲ و برای سنگ ۲۴۹ است. (شکل ۱)

نتایج «الف» و «ب» ثابت بودن شرایط و پارامترهای تصویربرداری برای هر دو نمونه و نتیجه «ج» صحت تفکیک سنگ و شاره در تصویر را مشخص می‌کند.

سکانس تپ به کار گرفته شده در این آزمایش سی‌پی‌ام‌جی، یکی از انواع تپ سکانس‌های اسپین-اکو است. این سکانس تپ اثر ناشی از دوباره فاز یافتن (dephasing) هسته را که ممکن است به علت تغییرات و ناهمگنی‌های احتمالی در میدان مغناطیسی به وجود آید، از بین می‌برد و دقت اندازه‌گیری T_2 را افزایش می‌دهد (میوم و گیل، ۱۹۵۸). سکانس تپ سی‌پی‌ام‌جی فقط چند ثانیه طول می‌کشد و به این لحاظ هم در چاه‌پیمایی هم در عملیات آزمایشگاهی قابلیت اجرای خوبی دارد (کوتس و همکاران، ۱۹۹۹). انتخاب این سکانس تپ این امکان را می‌دهد که ساختارهای موجود در مغزه براساس T_2 (و در نتیجه اندازه حفره‌ها) و چگالی پروتون دسته‌بندی شوند. برای مشخص کردن دامنه سیگنال‌های ام‌آر‌آی که به منزله تخلخل تعبیر می‌شوند، ابتدا تصویربرداری از یک توده مرجع صورت گرفت. این توده مرجع در واقع مقداری از همان شاره اشباع‌کننده سنگ است، بنابراین چگالی پروتون این توده با چگالی پروتون آب داخل منافذ سنگ برابر است. سکانس‌های اکو با تپ ۱۸۰ انتخابی تولید شده‌اند. زمان اکو، TE باید مقداری ثابت باشد و برای اسکن چگالی پروتون باید تا حد امکان کوتاه باشد. مقدار مناسب برای TE به اندازه سنگ مورد آزمایش، جنس سنگ، و ترکیبات شاره بستگی دارد. برای ثبت سیگنال مایع در حفره‌های ریز باید از TE حدود یک تا سه میلی‌ثانیه استفاده کرد. به دلیل عدم دسترسی به دستگاه‌های ام‌آر‌آی صنعتی، مقدار TE در سری تصاویر چگالی پروتون روی ۳۱/۱۶ میلی‌ثانیه که کوچک‌ترین مقدار قابل تنظیم روی دستگاه بود تنظیم شد. در آزمایش‌ها مقدار TE، ۸۶/۷ ms برای اسکن T_2 و ۳۱/۱۶ ms برای اسکن چگالی پروتون و تاثیرات ناهمگنی میدان مغناطیسی نیز ناچیز در نظر گرفته شده است. برای هر نمونه ۱۵ مقطع تصویر (slice) در جهت بالا به پایین و ۱۱ مقطع تصویر در جهت چپ به راست، هریک با



شکل ۱. انطباق تغییرات دامنه سیگنال برای توده آب مرجع و آب داخل حفره‌ها نمونه ۱ و ۲ (نمونه ۱: تصاویر مقطع ۱ تا ۱۲، و نمونه ۲: تصاویر مقطع ۱۳ تا ۲۴).



شکل ۲. انطباق تغییرات دامنه سیگنال برای بافت سنگی نمونه ۱ و ۲ و اختلاف فاز این دامنه‌ها با دامنه تغییرات سیگنال آب.

تصویری گرفته شد. این میانگین‌ها با توجه به فراوانی پیکسل برای هر شدت سیگنال محاسبه شده است. عدد به‌دست آمده از میانگین وزنی برای این سیگنال‌ها، یک سیگنال درحکم سیگنال سنگ در نظر گرفته و بر سیگنال توده آب مرجع تقسیم شد. نتیجه این تقسیم مقدار تحلیل حفره‌ای (vuggy) و بین دانه‌ای برای نمونه مغزه بود. محاسبات در این مدل عددی بر پایه معادله (۳) صورت

۴-۲ محاسبه تحلیل با استفاده از مدل عددی

با استفاده از نمودارهای شدت سیگنال برای هر مقطع تصویری، ابتدا یک مقدار میانگین و ضریب پراکندگی برای سیگنال آب اشباع کننده محاسبه شد که از توزیع گاوسی تبعیت می‌کند (شکل ۲). این میانگین در واقع مقدار سیگنال استاندارد توده آب مرجع است. سپس یک میانگین وزنی نیز برای سیگنال سنگ در هر مقطع

کل نتایج را تحت تاثیر قرار دهد. در این آزمایش مشخص شد که این تاثیرات می تواند تا ۹٪ از کل سیگنالها را دربرگیرد. این امر در قسمت های غیرتبخیری می تواند باعث به وجود آمدن تخلخل کاذب و یا نادیده گرفتن تخلخل حفره های بسیار ریز در تصویر شود.

۲-۵ مدل سازی گرافیکی و محاسبات

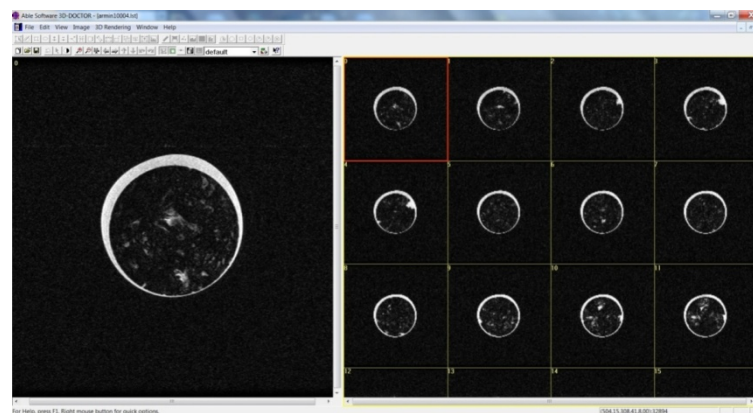
با توجه به قابلیت انطباق دقیق مقاطع تصویری گرفته شده از ام آر آی روی یکدیگر، امکان ساخت مدل های سه بُعدی از نمونه مغزه ها فراهم شد (شکل ۳). همچنین قابلیت ایجاد تفکیک در قسمت های گوناگون تصویر، این امکان را فراهم آورد تا مدل های سه بُعدی از قسمت های گوناگون نمونه اعم از بافت سنگی، توزیع فضاهای خالی و نیز انواع حفره ها ساخته شود (شکل های ۴ و ۵).

گرفت. نتایج این محاسبات و مقایسه آن با نتایج حاصل از آزمایش انبساط گاز در جدول ۳ آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، تخلخل محاسبه شده از این روش کمتر از مقدار به دست آمده از روش آزمایشگاهی است. علت این اختلاف، موارد زیر است:

۱. تخلخل به دست آمده از آزمایش انبساط گاز شامل ساختارهای سطحی اشباع شده در سطح نمونه نیز می شود. اما این ساختارها در تصویربرداری به منزله قسمت های حاوی شاره ثبت نمی شوند.

۲. روش ام آر آی باید در محیطی کاملاً کنترل شده اجرا شود. انحراف های کوچک از شرایط استاندارد آزمایشگاهی باعث ایجاد انحراف های بزرگی در تصاویر به دست آمده می شود.

۳. باید توجه داشت که در تصویربرداری، نوفه زمینه (Background Noise) به طور قابل ملاحظه ای می تواند



شکل ۳. برهم نهادن مقاطع تصویری گرفته شده، اولین مرحله ساخت مدل سه بُعدی.

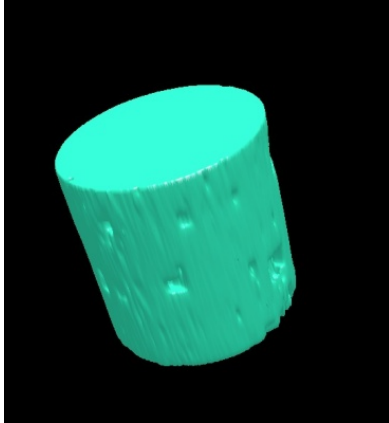
جدول ۳. تخلخل به دست آمده برای نمونه ها از روش های انبساط گاز، طیف سنجی تصاویر و ساخت مدل های سه بُعدی از تصاویر.

Sample	Lab porosity %	MR porosity %	3D model porosity %	Proton density 3D model porosity %
1	18.284	15.996	12.573	10.796
2	20.353	17.222	14.498	13.159

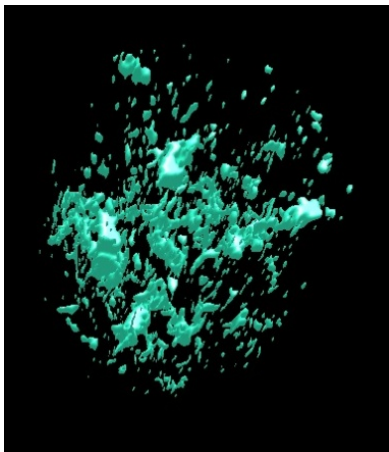
۲. بین‌بلوری

۳. حفره‌ای

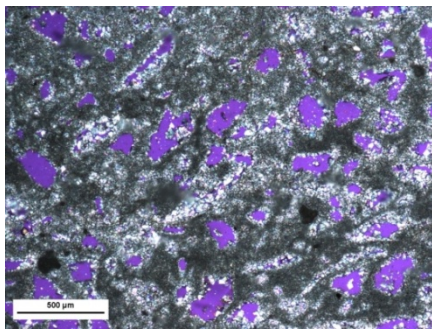
میزان تخلخل قابل رویت به‌طور متوسط : ۲۰٪



شکل ۴. مدل سه‌بُعدی از ماتریکس.



شکل ۵. مدل سه‌بُعدی از پراکندگی فضاهای خالی داخل سنگ.



شکل ۶. تصویر مقطع نازک گرفته شده از نمونه ۱.

از آنجا که در پردازش تصاویر متوجه شدیم توانایی تفکیک و مدل‌سازی حجمی صرفاً در مورد اجزاء با مقیاس بزرگ‌تر از حدوداً ۰/۵ mm در تصویر وجود دارد، این مدل‌ها تنها بیان‌گر تخلخل حفره‌ای در سنگ هستند و فضاهای ریز مانند تخلخل بین دانه‌ای را نمایش نمی‌دهند. این مدل‌ها برای تصویر به‌دست‌آمده از هردو اسکن T_2 و چگالی پروتون ساخته شد. نتایج محاسبه تخلخل در مورد این مدل‌ها در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، مقدار تخلخل محاسبه شده برای مدل‌ها، از تخلخل کل کمتر است. با توجه به اینکه مدل‌سازی فقط برای تخلخل حفره‌ای صورت گرفته است این نتایج طبیعی است. اما چنان‌که مشاهده می‌شود میزان تخلخل برای مدل حجمی T_2 بیشتر از مدل چگالی پروتون است. علت آن، توانایی T_2 در تعیین هندسه محاطی حفره دربرگیرنده شاره، علاوه بر تعیین مقدار شاره است.

اختلاف بین تخلخل به‌دست‌آمده از آزمایش انبساط گاز و تخلخل به‌دست‌آمده از مدل‌های ساخته شده از داده‌های ام‌آرآی، سهم هریک از تخلخل‌های حفره‌ای و بین دانه‌ای را در تخلخل کل مشخص می‌کند. به این ترتیب بررسی کیفی تخلخل مغزه‌های سنگ مخزن با استفاده از این روش امکان‌پذیر است.

تخلخل به‌دست‌آمده از مدل‌های تهیه شده، فقط تخلخل حفره‌ای نیست، بلکه می‌تواند مجموع‌های از تخلخل حفره‌ای، قالبی یا بین‌بلوری باشد. پس از به‌دست‌آوردن تصویر مطلوب از عملیات تصویربرداری، از نمونه شماره ۱ مقطع نازک گرفته شد (شکل ۶). اطلاعات به‌دست‌آمده از مقاطع نازک از این قرار بودند:

جنس نمونه: سنگ آهک به شدت دولومیتی شده
رخساره: وکستون به پکستون با اسکت دولومیتی
نوع تخلخل به ترتیب فراوانی:

۱. قالبی

۲-۶ بررسی کیفی تخلخل

است. اختلاف خیلی کم بین نتیجه پردازش تصاویر مقطع نازک و روش ام آر آی در محاسبه تخلخل بین بلوری، توانایی روش ام آر آی در بررسی فضاهای ریز درون مغزه را نیز نشان می دهد.

تصاویر مقطع نازک با نرم افزار متلب تحت پردازش قرار گرفت. در این روش ابتدا تصاویر به دست آمده تبدیل به مقیاس خاکستری (Gray Scale) شدند که رنگ آنها از سفید تا سیاه بنا به شدت رنگ خاکستری تغییر می کند. از تصویر خاکستری یک تصویر دوتایی (Binary Image) تهیه شد. (شکل ۷) در این تصویر مقادیر ۰ تا ۱۲۷ از تصویر خاکستری در حکم صفر و مقادیر ۱۲۸ تا ۲۵۶ در حکم یک در نظر گرفته می شود. سپس به آسانی زمینه سنگ آشکار و درصد تخلخل و شکل هندسی منافذ تشخیص داده می شود. مقدار تخلخل بین بلوری و مجموع مقدار تخلخل قالبی و حفره ای به دست آمد. برای تفکیک تخلخل حفره ای از تخلخل قالبی، یک مدل سه بُعدی، تنها برای تخلخل حفره ای ساخته شد (شکل ۸). سپس تخلخل قالبی از معادله زیر حساب شد.

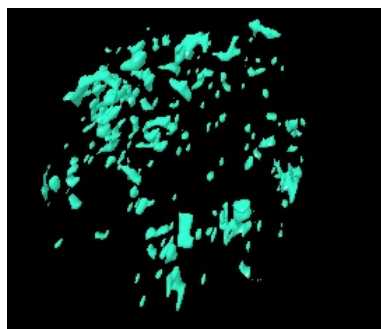
$$\phi_{moldic} = \phi_T - \phi_V \quad (4)$$

در این معادله ϕ_{moldic} تخلخل قالبی ϕ_T مجموع تخلخل حفره ای و قالبی حاصل از پردازش تصاویر مقطع نازک و ϕ_V تخلخل حاصل از مدل سه بُعدی یا همان تخلخل حفره ای است. در جدول (۴) نتایج بررسی کیفی نمونه در این تحقیق نمایش داده شده است.

همان طور که قبلاً ذکر شد، تخلخل به دست آمده از طیف سنجی چگالی پروتون فقط مربوط به تخلخل حفره ای نیست بلکه سایر شکل های تخلخل را از جمله تخلخل قالبی در بر می گیرد. بیشتر بودن این تخلخل به دست آمده از روش ام آر آی، بیشتر بودن دقت این روش را نسبت به روش پردازش تصاویر مقاطع نازک نشان می دهد. هر چند تصاویر مقاطع نازک دارای وضوح بیشتری هستند اما قابلیت تحلیل سه بُعدی را که در روش ام آر آی وجود دارد ندارند. با در نظر گرفتن این نکته، برتری این روش در محاسبه تخلخل حفره ای، قالبی و بین بلوری به صورتی که در جدول آمده است قابل توجه



شکل ۷. پردازش تصویر مقطع نازک و حذف تخلخل بین بلوری از تصویر.



شکل ۸. تصویری از مدل سه بُعدی از تخلخل حفره ای.

جدول ۴. نتایج بررسی کیفی نمونه ۱.

Thin Section Total Porosity %	20.000
Lab Porosity %	18.248
Proton density Porosity %	15.996
Vug 3D-Model porosity %	10.042
MRI Moldic Porosity %	5.423
Thin Section Intra Crystalline porosity %	5.669
MRI Intra Crystalline porosity %	5.627

- sequences, Elsevier, Academic Press.
- Belonogov, A., Marica, F., Lawfield, A., Butler, K., Chen, Q., Gingras, M. and Balcom, B., 2005, Magnetic resonance imaging of porosity heterogeneity in bioturbated sandstone from the white rose reservoir-Atlantic Canada, Department of Geology, University of New Brunswick.
- Coates, G. R., Xiao, L. and Prammer, M. G., 1999, NMR logging principles and applications, Halliburton Energy Services.
- Callaghan, P. T., 1991, Principles of nuclear magnetic resonance microscopy, Clarendon Press, Oxford, England.
- Chardaire, C. and Roussel, J-C., 1990, NMR imaging of fluid saturation distributions in core samples using a high magnetic field, in Worthington, P.F., ed., Advances in core evaluation, accuracy, and precision in reserves estimation [Reviewed proceedings of the first Society of Core Analysts European core analysis symposium, May 21-23, London, UK]; Gordon and Breach Science Publishers, New York, 301-315.
- Mattielo, D., Balzarini, M., Ferraccioli, L. and Brancolini, A., 1997, Calculation of constituent porosity in a dual-porosity matrix--MRI and image analysis integration, paper SCA-9706, in 1997 international symposium proceedings: Society of Professional Well Log Analysts, Society of Core Analysts Chapter-at-Large, 10 pp.
- McRobbie, D., Moore, G. A., Graves, M. J. and Prince, M. R., 2003, MRI, from picture to proton, Cambridge University Press.
- Meiboom, S. and Gill, D., 1958, Modified spinEcho method for measuring nuclear relaxation times, The Review of Scientific Instruments, **29**, 688-691.
- Stapf, S. and Han, S., 2006, NMR imaging in chemical engineering, Wiley-VCH.

۳ نتیجه‌گیری

۱. افزایش شدت میدان مغناطیسی و یا استفاده از دستگاه‌های ام‌آرآی صنعتی برای بالابردن کیفیت داده‌ها و کاهش خطا لازم است.
۲. در مدل گرافیکی T_2 مقدار و شکل تخلخل بهتر از مدل گرافیکی چگالی پروتون نمایش داده شده است. علت آن است که سیگنال T_2 علاوه بر تعیین مقدار شاره، هندسه محاطی حفره دربرگیرنده شاره را نیز مشخص می‌کند.
۳. نسبت تخلخل حفره‌ای محاسبه شده از مدل گرافیکی T_2 به تخلخل محاسبه شده از طیف‌سنجی پروتون کیفیت تخلخل را نشان می‌دهد. بنابراین کیفیت تخلخل نمونه شماره ۲ بیشتر از تخلخل نمونه شماره ۱ است.
۴. تفکیک انواع تخلخل در نمونه‌ها از راه مدل‌سازی ام‌آرآی نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها، تخلخل قالبی از نظر فراوانی بیشترین نوع تخلخل در مغزه است، اما از لحاظ حجمی کمترین مقدار شاره را در خود ذخیره کرده است.

مراجع

- Balcom, B. J., MacGregor, R. P., Beyea, S. D., Green, D. P., Armstrong, R. L. and Bremner, T. W., 1996, Single-point ramped imaging with T1 enhancement (SPRITE), Journal of Magnetic Resonance, Series A, **123**, 131-134
- Bernstein, M. A., King, K. E., Zhou, X. J. and Fong, W., 2004, Handbook of MRI pulse