

تخمین ترشوندگی با استفاده از آنالیز NMR مغزه و داده های چاه نگاری در یکی از مخازن جنوب ایران: مطالعه موردی

سجاد پور جهانی^۱؛ احمد واعظیان^{۲*}؛ منصور ضیائی^۳؛ یوسف شبیری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲ و ۴- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳

* نویسنده مسئول مکاتبات: avaezian@yahoo.com

چکیده

واژگان کلیدی

هدف اصلی این تحقیق، بررسی ارتباط و تلفیق بین داده های ترشوندگی و چاه نگاری و تشدید مغناطیسی هسته ای (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) در سازند شعیبا در عمق ۱۷۰۸ تا ۱۸۴۵ در یکی از چاه های واقع در یکی از میادین نفتی خلیج فارس است. داده های مورد استفاده شامل نگار های چاه پیمایی و ۱۰ نمونه داده تشدید مغناطیسی هسته ای مغزه بود که ۵ مورد آن داده های (MICP (Mercury Injection Capillary Pressure, MICP را داشت و ۵ مورد دیگر که به عنوان داده های اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفت و شامل داده های (United States Bureau of Mines, USBM) بودند. در این مطالعه، بر پایه تحلیل داده های آزمایشگاهی MICP و تابع J و استفاده از داده های NMR و چاه نگاری یک روش تلفیقی برای پیش بینی کیفی ترشوندگی مخزن استفاده شد. هر چند مطالعات مختلفی را می توان در این زمینه یافت با این وجود مطالعه حاضر با هدف توسعه و استفاده موثر از داده های محدود موجود و پیش بینی ترشوندگی در چاه های اطراف انجام شده است تا با استفاده از روش های تحلیلی و تلفیقی، اطلاعات مفیدی در سطح وسیع استخراج کرد. محدودیت داده شامل نمودار های مرسوم چاه نگاری، MICP، USBM و NMR تنها در ۵ نقطه از چاه بود تا با استفاده از این داده ها بتوان روش های نوین ارائه شده در مطالعات پیشین را صحت سنجی و قابل تعمیم کرد. ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی MICP روابطی برای میزان فشار موینگی با استفاده از نگار NMR و نگار های تخلخل نوترون و گاما بدست آمد. سپس به منظور اعتبارسنجی روابط بدست آمده، از نتایج آزمایشگاهی USBM استفاده شد. با بررسی نمودار های فشار موینگی، ترشوندگی کیفی سازند مورد مطالعه خنثی به دست آمد که کاملاً منطبق بر نتایج ترشوندگی به دست آمده از آزمایش USBM بود. نتایج نشان داد که ترشوندگی تخمین زده شده در مقیاس انجام شده قابل اعتماد بوده و می توان از این روش در صنعت به منظور تعیین ترشوندگی در شرایطی که اطلاعات آزمایشگاهی محدود بوده و نیاز به تعیین ترشوندگی در نقاط مختلف باشد استفاده کرد. همچنین، استفاده از داده ها و چاه های بیشتر جهت بالا بردن اعتبار این روش توصیه می شود.

ترشوندگی

تشدید مغناطیسی هسته ای

نگار های چاه پیمایی متداول

فشار موینگی

تابع J

۱- مقدمه

با افزایش تقاضا برای شناسایی دقیق مخازن در اکتشاف و توسعه نفت و گاز، ترشوندگی نقش مهمی را ایفا می کند، زیرا بر توزیع نفت و آب تأثیر می گذارد. ترشوندگی به عنوان یکی از ویژگی های سطح جامد و سیال، تأثیر بسزایی بر ویژگی های مخزنی مانند تراوایی نسبی، فشار موینگی، اشباع نفت باقیمانده و اشباع آب غیر قابل تحرک دارد. ترشوندگی نشان دهنده تمایل یکی از سیالات به پخش شدن یا چسبیدن به سطح سنگ در مقابل سیال دیگر است که این پدیده تأثیر قابل توجهی بر توزیع سیال، فشار موینگی، سیلاب زنی و اشباع باقی مانده دارد. ارزیابی ترشوندگی در مخزن یکی از چالش هایی است که مهندسان با آن رو به رو هستند، زیرا هیچ روشی نمی تواند مستقیماً آن را اندازه گیری کند. در طول دو دهه گذشته، بسیاری از محققان تمایل به پیش بینی ترشوندگی مخزن با داده های *NMR* داشتند. این داده ها برای اندازه گیری حساسیت بر همکنش سطح سیال و جامد و سایر خواص سنگ - سیال مانند تخلخل، توزیع اندازه منافذ، تراوایی نسبی و اشباع سیال استفاده می شوند (Feng et al., 2021). با این حال، هنوز یک روش سیستماتیک برای استفاده از این گزارش ها برای اندازه گیری کمی ترشوندگی به دلیل روابط پیچیده و غیرخطی بین نگارهای متداول و ترشوندگی ایجاد نشده است (Otcchere et al., 2022).

مفهوم ترشوندگی در سیستم های مختلفی مانند سیستم های سنگ و سیالات، به میزان چسبندگی سطح جامد به دو سیال مختلف اشاره دارد و توسط زاویه تماس سیالات با سطح جامد مسطح یا لوله موین بیان می شود. در سیستم های متخلخل که دارای دو یا بیشتر مایع غیر قابل ترکیب هستند، ترشوندگی نشان دهنده تمایل یکی از مایعات به پخش شدن یا چسبیدن به سطح در مقابل دیگری است (Armstrong et al., 2021). این ویژگی تأثیر بسزایی بر ویژگی های مخزنی مانند تراوایی نسبی، فشار موینگی، اشباع نفت باقیمانده و اشباع آب غیر قابل تحرک دارد. به عنوان مثال، سیالات با خاصیت ترشوندگی بالا، تمایل کمتری به جریان دارند و در اشباع غیر قابل تحرک تر واقع می شوند. به عبارت دیگر، سیال فاز تر کمتر به جریان می افتد و در حفره های ریز سنگ می ماند، در حالی که سیال فاز غیر تر به دلیل نیروهای دافعه، بیشتر به جریان می افتد و بزرگترین حفره های موجود در محیط متخلخل را اشغال می کند (Guan et al., 2002). با این حال، اندازه گیری و پیش بینی انواع مختلف ترشوندگی پیچیده و چالش برانگیز است. بسیاری از محققان به طور مداوم ایده ها و روش های جدیدی را در این زمینه امتحان کرده اند. در طول دو دهه گذشته، بسیاری از محققان به تخمین خصوصیات پتروفیزیکی با استفاده از داده های *NMR* پرداخته اند. به عنوان مثال، شعبانی و همکاران به تخمین و ارزیابی تخلخل، تراوایی و توزیع اندازه و گلوگاه حفرات با استفاده از داده های *NMR* پرداختند که نتایج گواه بر دقت بالای تخمین آنها بود (Shabani et al., 2021). این مطالعه نشان داد که استفاده از داده های *NMR* کیفیت مناسبی برای تخمین خصوصیات پتروفیزیکی دارند و می توان از این داده ها برای اندازه گیری خصوصیات که مرتبط با بر همکنش سطح سیال و جامد هستند استفاده کرد. نگار *NMR* برای ارزیابی ترشوندگی حاصل از نگارهای متداول

(Looyestijn and Hofman, 2006)، و شاخص مقاومت الکتریکی (Feng et al., 2021)، ارائه شاخص ترشوندگی در مخازن (Tandon et al., 2020)، تخمین ترشوندگی (Liang et al., 2023)، ساخت منحنی فشار موینگی (Feng et al., 2016; Xiao et al., 2012) استفاده شده است. در مطالعه اوتچره و همکاران در سال ۲۰۲۲، یک مدل ریاضی جدید برای اندازه گیری ترشوندگی مخازن نفتی بر اساس همبستگی بین ترشوندگی *Amott-USBM* و سیگنال *NMR* ارائه شد. آن ها شرایط آب دوست و نفت دوست را بر اساس روند سیگنال *NMR* شناسایی کردند. با استفاده از میانگین سیگنال *NMR* و معادله ریاضی پیشنهادی، شرایط مختلف ترشوندگی به صورت کمی اندازه گیری شد (Otcchere et al., 2022). در سال ۲۰۲۳ لیانگ و همکاران (Liang et al., 2023) یک شاخص دقیق ترشوندگی با استفاده از داده های *NMR* معرفی کردند که نتایج آن با نتایج ترشوندگی *Ammot* تطابق داشت. این مطالعات نشان دادند که نگار *NMR* می تواند مطابق با شرایط ترشوندگی در داخل چاه تغییر کند، اما به دلیل شرایط اقتصادی نمی توان آن را در همه چاه ها اجرا کرد. اما نگارهای متداول اطلاعات ضروری در مورد خصوصیات سازندها در لایه های زیرسطحی، از جمله خواص فیزیکی، کانی شناسی و مورفولوژیکی را ارائه می دهند. اطلاعات ارائه شده در نگارهای مرسوم و کمیاب می تواند به طور مستقیم یا غیرمستقیم با ترشوندگی مرتبط باشد که ضرورت مطالعه حاضر را نشان می دهد.

هدف از این تحقیق بررسی ترشوندگی با استفاده از داده های نگارهای تخلخل نوترون و گاما، داده های آزمایشگاهی *MICP*، *USBM* و *NMR* می باشد. بدین منظور ابتدا با مقایسه داده های *NMR* و *MICP*، مقدار فشار موینگی حاصل از *NMR* را به دست آمد. سپس مقدار فشار موینگی حاصل از نگارهای متداول را با استفاده از نگار گاما و تخلخل نوترون و *USBM* به دست آمد. در نهایت با مقایسه دو نمودار فشار موینگی به دست آمده به ارزیابی ترشوندگی تخمینی پرداخته شد.

۲- روش شناسی و داده ها

۱-۲- داده ها و آنالیزها

میدان مورد مطالعه، یکی از میادین نفتی واقع در خلیج فارس است (شکل ۱). این میدان در ناحیه زاگرس واقع شده و دارای یک مخزن گازی نیز می باشد. از نظر جغرافیایی، در نزدیکی مرز آبی بین ایران و امارات متحده عربی قرار دارد (Ghazban, 2007). مخازن این میدان، دارای نفت و گاز متنوعی هستند که از دوره های مختلف زمانی، از جمله پرمین تا ژوراسیک، مواد هیدروکربنی را در خود ذخیره کرده اند.



شکل ۲: دستگاه آنالایزر NMR مدل PROTON-20M

۲-۲- تخمین فشار مویینگی NMR با استفاده از MICP

هی و همکاران (۲۰۰۵) روش بهبود یافته‌ای را برای ساخت منحنی‌های فشار مویینگی از داده‌های NMR را به صورت زیر پیشنهاد کردند (He et al., 2005).

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} - \rho_2 \frac{S}{V}$$

که در آن T_2 زمان آرامش عرضی بر حسب میلی ثانیه است. T_{2B} زمان استراحت حجم مایع بر حسب میلی ثانیه است. ρ_2 زمان استراحت سطح سنگ در میکرومتر بر معکوس ثانیه است. S مساحت سطح منافذ بر حسب سانتی متر مربع و V حجم منافذ بر حسب سانتی متر مکعب است (He et al., 2005).

سطح ویژه منافذ به ساختار منافذ مربوط می‌شود. هنگامی که منافذ و گلوگاه‌ها کروی یا استوانه‌ای فرض می‌شوند، یک رابطه خطی بین سطح ویژه منافذ و شعاع منافذ وجود دارد. با این حال، برای ساختار منافذ پیچیده، آن‌ها یک رابطه غیرخطی را در مخازن با تراوایی پایین نشان می‌دهند (He et al., 2005). علاوه بر این، در $T_2 < T_{2B}$ ، معادله به صورت زیر ساده شده است:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{\rho_2}{f(r_c)}$$

که در آن r_c شعاع منافذ بر حسب میکرومتر است. $f(r_c)$ یک تابع غیرخطی است. بر اساس رابطه بین فشار مویینگی و شعاع منافذ گلوگاه، فشار مویینگی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$p_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_c}$$

که در آن P_c فشار مویینگی بر حسب dyn/cm^2 است. σ کشش سطحی بین دو سیال بر حسب dyn/cm بوده و θ زاویه تماس بر حسب درجه است. با ترکیب معادلات بالا، رابطه بین توزیع T_2 و فشار مویینگی P_c به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p_c = g\left(\frac{1}{T_2}\right)$$

که در آن $g\left(\frac{1}{T_2}\right)$ یک تابع غیر خطی است. هی و همکاران معتقد بودند که $g\left(\frac{1}{T_2}\right)$ باید تابع توان باشد (He et al., 2005). بنابراین، معادله به صورت زیر می‌شود:

$$p_c = m\left(\frac{1}{T_2}\right)^n$$

که در آن m و n پارامترهای مدل هستند و از مقایسه با فشار مویینگی MICP به دست می‌آیند. این زمان‌های اندازه‌گیری T_2 و اندازه منافذ



شکل ۱: موقعیت تقریبی میدان مورد مطالعه (Peyravi et al., 2015)
داده‌های نگار مورد استفاده در این پژوهش، داده‌های نگار گاما (GR) و نگار تخلخل نوترون ($PHIE$) می‌باشند. داده‌های آزمایشگاهی NMR شامل توزیع زمان آرامش^(۱) عرضی (T_2) و توزیع اندازه منافذ می‌باشد که برای ۱۰ داده مغزه مختلف موجود است. این داده‌ها که از $A1$ تا $A10$ نام‌گذاری شده‌اند متعلق به سازند شعیبا در بازه عمقی ۱۷۰۸ تا ۱۸۴۵ هستند که در ۴ نوع سنگی متفاوت دسته بندی شده که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: انواع دسته‌بندی نوع سنگ بر اساس متوسط تخلخل نوترون و

تراوایی

متوسط تراوایی (MD)	متوسط تخلخل نوترون (%)	نوع سنگی
۰/۴۹	۱۹/۵۶	نوع اول
۰/۹۳	۱۷/۹۹	نوع دوم
۸/۸۱	۲۷/۱۷	نوع سوم
۰/۳۸	۶/۲۴	نوع چهارم

ده نمونه مغزه پایه روغنی دارای داده‌های آزمایشگاهی NMR و نگارهای متداول بودند. داده‌های آزمایشگاهی MICP مورد استفاده شامل فشار تزریق و اشباع جیوه بوده که برای ۵ نمونه اول از مغزه‌ها در دسترس است. داده‌های شاخص ترشوندگی USBM نیز برای پنج نمونه مغزه دیگر در دسترس بوده که برای اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفتند.

داده‌های آزمایشگاهی NMR موجود، توسط دستگاه آنالایزر PROTON-20M (شکل ۲) به دست آمده است. این دستگاه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های دامنه و آرامش مواد حاوی هیدروژن، سنگ‌های سازند و سیالات طراحی شده است. دو اندازه‌گیری NMR از یک نمونه مغزه انجام می‌شود: اول زمانی که با آب نمک اشباع شده است و دوم زمانی که اشباع زدایی شده است. هنگامی که یک مغزه اشباع می‌شود، سیالات کل فضای منافذ را اشغال می‌کنند، اما هنگامی که اشباع زدایی می‌شوند، آب فقط در فضاهای منافذ کوچک بین دانه‌ها و در خاک رس باقی می‌ماند.

این مدل کلاسیک اشباع تابع J این است که تراوایی را که از تخلخل ناشی می شود را اضافه می کند. برای رفع نقص، استفاده از مدل های پیشرفته تر که قادر به تفکیک تراوایی ناشی از تخلخل و تراوایی ناشی از شکاف ها و ترکها هستند، یک راهکار موثر است. به عبارت دیگر در سنگ ها ناهمگنی پارامتری است که باعث تغییرات اساسی در تراوایی و به تبع آن روی تابع J می گذارد که از نقاط ضعف این روش است. در این مطالعه، از تکنیکهای آزمایشگاهی مانند آزمایش های تراوایی تحت فشار متغیر و استفاده از میکروسکوپ های الکترونی برای مشاهده مستقیم ساختار سنگ و تعیین تراوایی بر اساس مشاهدات میکروسکوپی استفاده شد تا اثر ناهمگنی در نمونه ها وجود نداشته باشد. این روش به ما امکان می دهد تا تأثیر تخلخل بر تراوایی را بهتر درک کنیم و مدل های دقیق تری برای تخمین اشباع آب مخزن ارائه دهیم (Peters, 2012). همچنین، دسته بندی نوع سنگ بر اساس متوسط تخلخل نوترون و تراوایی آنها و استفاده از تابع J برای هر زون باعث شد تا محیط های همگنی برای ارزیابی داشته باشیم و این نقطه ضعف تابع J را کم رنگ کنیم.

۳- نتیجه و بحث

۳-۱- تخمین فشار موئینگی *NMR* با استفاده از *MICP*

با توجه به داده های فشار موئینگی *MICP*، باید فاکتورهای m و n مربوط به معادله (۵) به دست آید تا بتوان فشار موئینگی *NMR* را با رگرسیون خطی بدست آورد.

رگرسیون خطی به این صورت عمل کرده که مختصات فشار موئینگی *MICP* همراه با مقدار T_2 از نگار *NMR*، متناظر با هر اشباع جیوه را گرفته و بهترین خطی که از تمام این نقاط عبور می کند را برازش می دهیم. فشار موئینگی *MICP* برای ۵ نمونه مغزه مورد نظر در شکل ۳ آورده شده است و برای هر کدام از نوع های سنگی فشار موئینگی *NMR* در جدول ۲ آورده شده است.

با استفاده از فرمول های به دست آمده که در جدول ۲ نشان داده شده است، می توان منحنی فشار موئینگی را برای هر نمونه که در هر ۴ نوع سنگی و فقط با استفاده از داده های T_2 به دست آورد.

در شکل ۴ دو نمودار برای مغزه های *A1-A5* رسم شده است. نمودار آبی رنگ که اندازه منافذ بر حسب مقدار T_2 را در حالت اشباع آب نمک نشان داده و نمودار سبز رنگ که همان داده ها را در حالت زهکشی نشان می دهد. برای مغزه *A1* مقدار $T_2 \text{ cutoff}$ ۲۰ میلی ثانیه می باشد. پراکندگی اندازه حفرات در این نمونه به صورت نرمال و متوسط می باشد. برای مغزه *A2* مقدار $T_2 \text{ cutoff}$ برابر با ۶۲ میلی ثانیه می باشد. پراکندگی اندازه حفرات در این نمونه به صورت نرمال و متوسط می باشد. برای مغزه *A3* مقدار $T_2 \text{ cutoff}$ برابر با ۱۱۹ میلی ثانیه می باشد. پراکندگی اندازه حفرات در این نمونه به صورت متقارن و بیشتر حفرات بزرگ می باشند. برای مغزه *A4* مقدار $T_2 \text{ cutoff}$ برابر با ۱۰۵ میلی ثانیه می باشد. پراکندگی اندازه حفرات کم بوده در حالی که میانگین اندازه حفرات بزرگ می باشد. برای مغزه *A5* مقدار $T_2 \text{ cutoff}$ برابر با ۱۰ میلی ثانیه می باشد. پراکندگی اندازه حفرات وسیع بوده و اندازه حفرات کوچک می باشد.

به عنوان معکوس زمان T_2 ترسیم می شوند، دسته بندی از زمان های طولانی به زمان استراحت کوتاه (به ترتیب منافذ بزرگ به منافذ کوچک)، منعکس کننده منحنی های تزریق *MICP* (گلوگاه های منافذ بزرگ به گلوگاه های منافذ کوچک) است (Volokitin et al., 1999).

برای تعیین فشار موئینگی از طریق داده های *NMR*، ابتدا داده های توزیع T_2 از زیاد به کم مرتب شده و سپس مقدار $1/T_2$ را به دست آورده و مقدار توزیع اندازه منافذ تجمعی آن نیز برای داده ها تعیین شد. با رسم مقدار $1/T_2$ بر حسب توزیع تجمعی اندازه منافذ که به درصد تبدیل شده اند، شبه فشار موئینگی *NMR* به دست می آید.

۳-۲- تخمین فشار موئینگی با استفاده از نگارهای متداول و نتایج *MICP*

لورت تابع J را بر اساس آنالیز ابعادی پیشنهاد کرد که برای تعیین فشار موئینگی در اشباع های مختلف استفاده می شود (Leverett, 1941). فرمول به صورت زیر ارائه می شود:

$$J(S_W) = \frac{P_C(S_W)}{\sigma \cos \theta} \sqrt{\frac{K}{\phi}}$$

که در آن S_W اشباع فاز ترکننده تحت فشار متناظر تزریق جیوه به درصد است. K تراوایی بر حسب میلی داریسی است. ϕ تخلخل نوترون بر حسب درصد، σ کشش سطحی و θ زاویه تماس است. فرمول یکنواختی که برای تراوایی هر زون مخزنی قابل استفاده است به صورت معادله زیر بیان می شود که شامل تخلخل نوترون و اندازه میانه است. زون بندی مخزن به منظور عدم ایجاد ناهمگنی در زمان استفاده از تابع J است تا از این طریق بتوان از یک نوع تابع J استفاده کرد.

$$\log(K) = c(i) \times \log(\phi) + d(i) \times \log(Md) + e(i)$$

ارزش نسبی پرتوهای گامای طبیعی را می توان برای محاسبه اندازه میانه به طور پیوسته در معادلات زیر استفاده کرد (Feng et al., 2016).

$$\log(Md) = f(i) \times \Delta GR + g(i)$$

$$\Delta GR = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}}$$

که در آنها Md اندازه متوسط بر حسب میلی متر است. ΔGR مقدار نسبی پرتوهای گامای طبیعی بر حسب اعشار است. GR_{min} ، GR_{max} و GR مقادیر حداکثر، حداقل و واقعی پرتوهای گامای طبیعی بر حسب *API* هستند. c ، d ، e ، f و g پارامترهای مدل هستند. i مربوط به کلاس رخساره های دیاژنتیکی است. یک رابطه تابع بین اشباع فاز تر و تابع J تحت فشار موئینگی معین وجود دارد (Xiao et al., 2012).

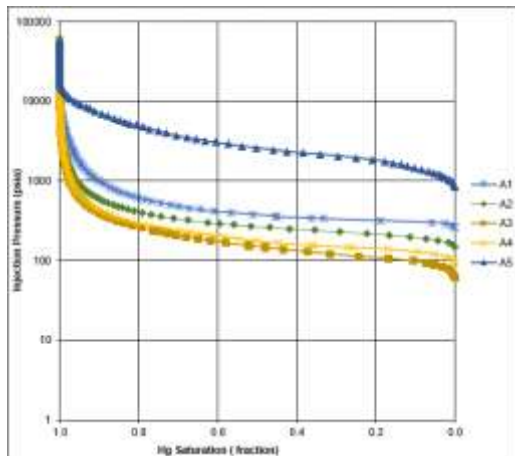
$$S_W = a(i) \times (J(S_W))^{b(i)}$$

که در آن a و b پارامترهای مدل هستند. معادلات (۶) تا (۹) را با معادله (۱۰) جایگزین کرده تا مدل منحنی فشار موئینگی با استفاده از نگارهای متداول به دست آید:

$$\log(100 - S_{Hg}) = A^*(i) \times \log(\phi) + B^*(i) \times \Delta GR + C^*(i)$$

که در آن S_{Hg} اشباع تزریق جیوه تحت فشار تزریق جیوه مربوطه بر حسب درصد است. $A^*(i)$ ، $B^*(i)$ و $C^*(i)$ پارامترهای مدل هستند (Feng et al., 2016).

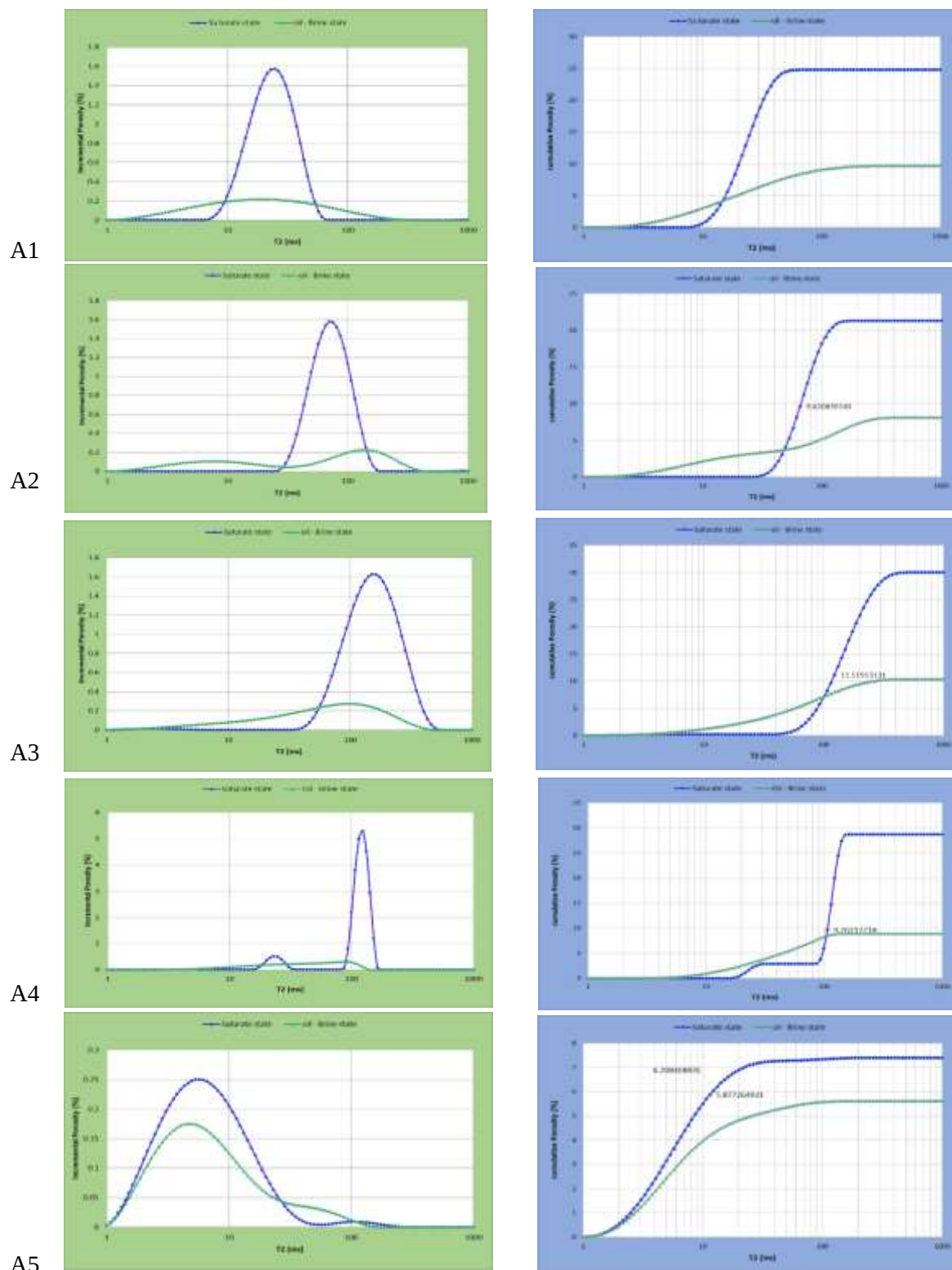
داده های تابع J می تواند به اشباع آب یک مخزن مربوط شود. یک نقص



شکل ۳: داده‌های فشار موپینگی MICP برای ۵ نمونه مغزه موجود

بررسی همزمان نمودار فشار بر حسب درصد اشباع با استفاده از داده‌های NMR و MICP یکی از ابزار بررسی کیفیت مخزنی می‌باشد که در کنار اعتبار سنجی نتایج NMR می‌توان از چنین مزیتی نیز برخوردار شد (Shabani et al., 2023). در شکل ۵ منحنی فشار موپینگی به دست آمده از NMR در کنار منحنی فشار موپینگی MICP برای مغزه‌های A1-A5 به نمایش درآمده است. برای مغزه‌های A1-A3، هر منحنی ها دارای شکل L هستند که نشان‌دهنده بخش مخزنی با کیفیت خیلی خوب هستند. برای مغزه A4، منحنی فشار موپینگی NMR به دلیل عدم تناسب بین حفره‌های کوچک و بزرگ، یک برآمدگی جزئی به وجود آمده است. برای مغزه A5، این دو منحنی بسیار منطبق بر هم بوده که هر دو منحنی دارای شکل تقریبی L هستند که نشان‌دهنده بخش مخزنی با کیفیت متوسط هستند.

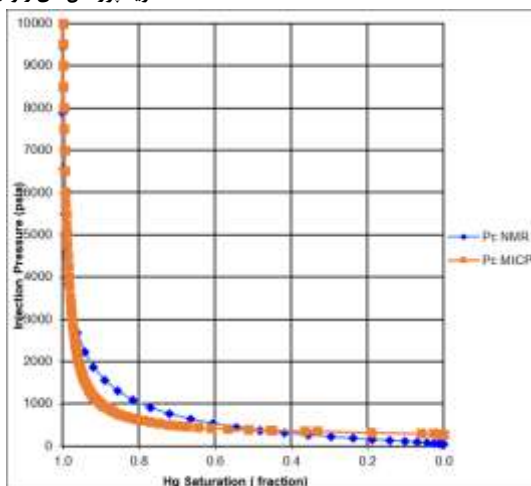
تخمین ترشوندگی با استفاده از آنالیز *NMR* مغزه و داده های چاه نگاری در یکی از مخازن جنوب ایران، پورجهانی و همکاران، صفحات ۲۷-۳۹.



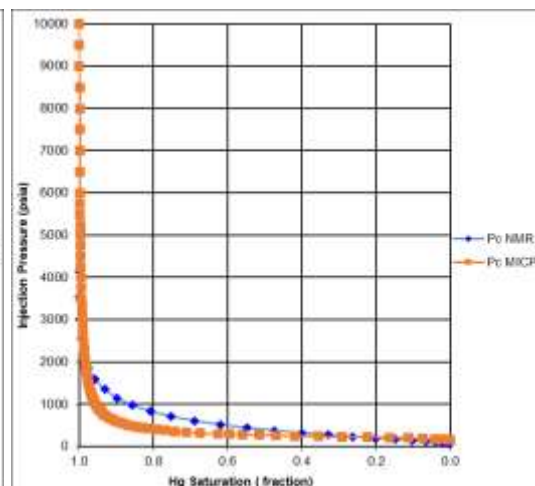
نمودار فراوانی اندازه منافذ بر حسب مقدار T_2

نمودار تجمعی اندازه منافذ بر حسب T_2

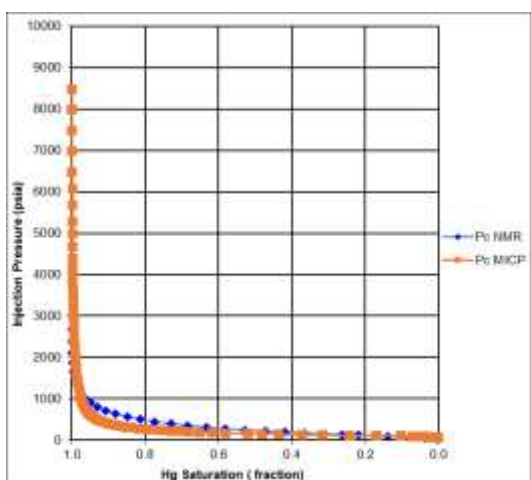
شکل ۴: نمودار اندازه منافذ بر حسب T_2 در سمت چپ و نمودار تجمعی اندازه منافذ بر حسب T_2 در سمت راست برای مغزه های A1 تا A5. نمودار آبی رنگ اندازه منافذ بر حسب مقدار T_2 را در حالت اشباع آب نمک نشان می دهد و نمودار سبز رنگ برای حالت زهکشی است.



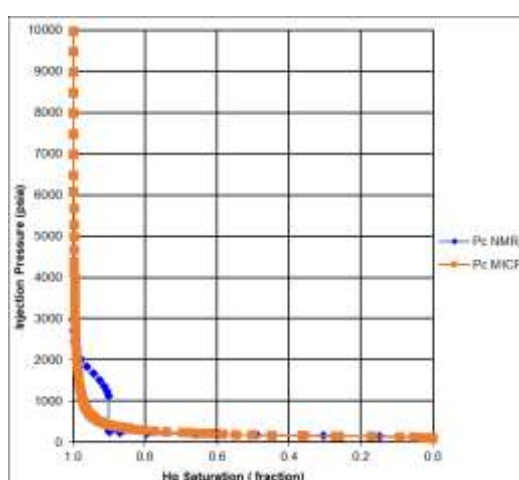
A1



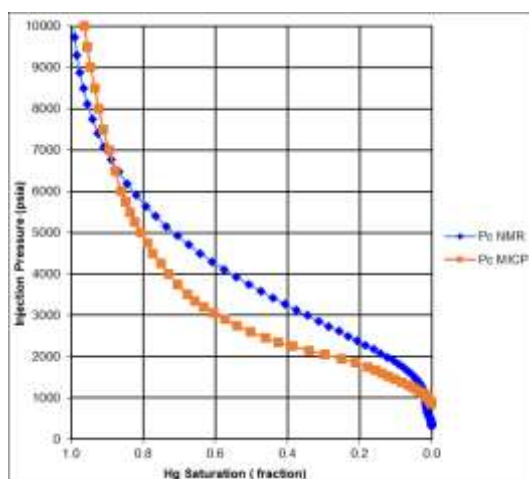
A2



A3



A4



A5

نمودار فراوانی اندازه منافذ بر حسب مقدار T_2

نمودار تجمعی اندازه منافذ بر حسب T_2

شکل ۵: مقایسه بین دو منحنی فشار موئینه به دست آمده از MICP و NMR برای نمونه ای A1 تا A5

جدول ۲: فرمول های تعیین فشار موئینگی *NMR* بر اساس طبقه بندی نوع سنگی

نوع سنگی	فرمول فشار موئینگی <i>NMR</i>	ضریب همبستگی <i>R2</i>
نوع اول	$p_c = 1456818 \left(\frac{1}{T_2}\right)^{2.58}$	۰/۸۴
نوع دوم	$p_c = 7825756.6 \left(\frac{1}{T_2}\right)^{2.30}$	۰/۷۹
نوع سوم	$p_c = 1374481.8 \left(\frac{1}{T_2}\right)^{1.72}$	۰/۸۳
نوع چهارم	$p_c = 12202.61 \left(\frac{1}{T_2}\right)^{0.65}$	۰/۹۰

لذا فقط یک معادله برای هر فشار موئینگی معین برای هر ۴ نوع سنگی به دست آمد (جدول ۴). با استفاده از داده های چاه پیمایی هر نقطه از چاه که مقدار تابع *J* آن برابر با تابع *J* پنج نمونه مغزه *MICP* باشد، می-توان با استفاده از معادله های بالا منحنی فشار موئینگی آن ها را به دست آورد.

جدول ۳: مقدار نگار تخلخل نوترون و دلتای گاما برای مغزه های موجود

نام مغزه	عمق مغزه	مقدار نگار تخلخل نوترون	مقدار دلتای گاما (<i>API</i>)
A1	۱۷۴۲/۹۶	۰/۲۰	۰/۴۸۸
A2	۱۷۶۱/۷۷	۰/۲۳	۰/۱۱۲
A3	۱۷۹۷/۱۵	۰/۲۵	۰/۰۷۶
A4	۱۸۰۱/۶۶	۰/۲۴	۰/۰۷۵
A5	۱۷۷۴/۶۲	۰/۰۸	۰/۳۶۳
A6	۱۷۳۵/۵۸	۰/۱۹	۰/۷۵۵
A7	۱۷۵۵/۳۹	۰/۲۳	۰/۰۷۲
A8	۱۷۶۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۰۸۸
A9	۱۷۸۵/۴۷	۰/۱۷	۰/۰۵۹
A10	۱۷۸۴/۸۲	۰/۱۹	۰/۰۷۵

۲-۳- تخمین فشار موئینگی با استفاده از نگارهای متداول

و نتایج *MICP*

برای تعیین فشار موئینگی با استفاده از نگارهای تخلخل نوترون و گاما، ابتدا فشارهای معینی از فشار موئینگی در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از معادله (۱۱)، به تعیین پارامترهای $A^*(i)$ ، $B^*(i)$ و $C^*(i)$ پرداخته می شود. برای این کار، مقدار نگار تخلخل نوترون و دلتای گاما را برای هر کدام از نمونه های مغزه به دست آورده و در فشار موئینگی معین، اشباع جیوه آن را از داده های *MICP* بررسی کرده و در معادله جای گذاری کرده تا معادله مربوطه برای هر فشار موئینگی معین به دست آید. این فشارهای موئینگی با مقایسه داده های فشاری هر ۵ نمونه مغزه تعیین می گردد.

داده های نگار موجود در چاه مورد مطالعه شامل اطلاعات نگار تخلخل نوترون و نگار گاما مربوط به عمق هر یک از داده های مغزه می باشد. مقدار بیشینه نگار گاما برابر با ۵۷/۵۱ *API* بوده و مقدار کمینه آن نیز ۳/۵۶ *API* می باشد. با توجه به این مقادیر، مقدار دلتای گاما نیز محاسبه شده و در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این که این معادله دارای سه مجهول می باشد، لذا حداقل سه معادله برای حل آن مورد نیاز است. با توجه به کمبود داده های مغزه برای هر نوع سنگی، امکان تعیین این پارامترها برای هر کدام از ۴ نوع سنگی وجود نداشت،

جدول ۴: معادله های مدل ساخت منحنی فشار موئینگی با استفاده از داده های نگارهای متداول

ضریب همبستگی	معادله	فشار موئینگی (پاسکال)
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -4.44 \times \log(\phi) + 7.63 \times \Delta GR - 1.71$	۲۰۰
۰/۸۱	$\log(100 - S_{Hg}) = -8.78 \times \log(\phi) - 0.46 \times \Delta GR - 4.19$	۴۰۰
۰/۹۳	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.32 \times \log(\phi) + 0.61 \times \Delta GR - 1.46$	۸۰۰
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -2.95 \times \log(\phi) + 0.68 \times \Delta GR - 1.37$	۱۰۰۰
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.48 \times \log(\phi) + 0.63 \times \Delta GR - 1.97$	۱۶۰۰
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.59 \times \log(\phi) + 0.68 \times \Delta GR - 2.25$	۲۲۵۰
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.58 \times \log(\phi) + 0.81 \times \Delta GR - 2.51$	۳۲۰۰
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.65 \times \log(\phi) + 0.78 \times \Delta GR - 2.85$	۵۰۰۰
۰/۹۸	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.73 \times \log(\phi) + 0.80 \times \Delta GR - 3.14$	۶۴۰۰
۰/۹۹	$\log(100 - S_{Hg}) = -3.88 \times \log(\phi) + 0.68 \times \Delta GR - 3.61$	۹۰۰۰

برای ۵ نمونه مغزه A6-A10 در کنار یکدیگر ترسیم شده اند و نتایج آزمایشگاهی ترشوندگی USBM آنها در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به اینکه دو نمودار بر روی یکدیگر قرار نگرفتند که نشان می دهد این نمونه ها دارای ترشوندگی خنثی بوده اند و داده‌های آزمایشگاهی USBM نیز دارای مقادیری نزدیک به صفر هستند که بیانگر ترشوندگی خنثی هستند. این ارزیابی نشان می دهد که ترشوندگی بدست آمده با استفاده از NMR تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی USBM دارد و می توان به تخمین زده شده اعتماد کرد.

جدول ۵: مقایسه نتایج ترشوندگی‌های تخمینی با ترشوندگی‌های

آزمایش USBM

نمونه‌های مغزه	A6	A7	A8	A9	A10
ترشوندگی USBM	-۰/۱۷۲	-۰/۲۶۵	-۰/۲۶۵	-۰/۲۱۸	-۰/۲۱۸

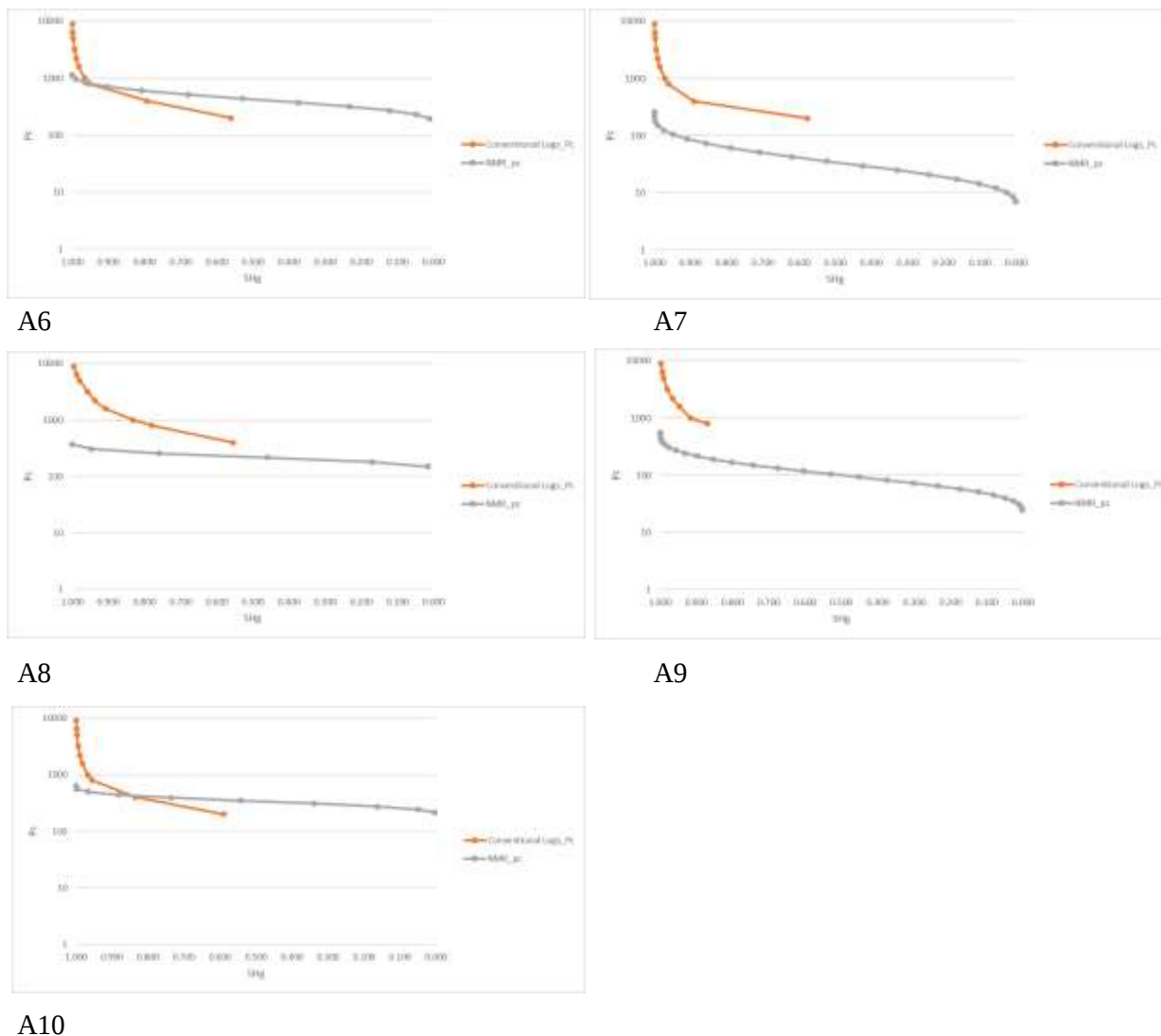
۳-۳- مقایسه ترشوندگی حاصل از NMR و نگارهای مرسوم

با نتایج USBM

هنگامی که مخزن نفت‌دوست باشد، آب منفذی سیال غیر ترکنده بوده و زمان آرامش T_2 بازتاب زمان عمده آرامش آب است. در مقابل، به دلیل اثر آرامش سطح، زمان آرامش T_2 آن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این مسئله نشان‌دهنده این موضوع است که نگار NMR می‌تواند تغییر ترشوندگی را مشخص کند، همان‌طور که منحنی‌های فشار موینگی ساخته‌شده از داده‌های NMR نیز می‌تواند مشخص کند.

از طرف دیگر منحنی‌های فشار موینگی ساخته شده از نگارهای متداول تحت تأثیر این مسئله قرار نمی‌گیرند؛ بنابراین، می‌توان منحنی‌های فشار موینگی به دست آمده از NMR و نگارهای متداول را برای نمونه‌های مغزه با یکدیگر مقایسه کرد، اگر تقریباً یکسان باشند و روی هم قرار بگیرند، مخزن آب‌دوست است. در غیر این صورت، یا مخزن خنثی بوده و یا نفت‌دوست است. با این وجود، این روش قضاوت فقط کیفی بوده و برای دستیابی به روش کمی نیاز به داده‌های آزمایشگاهی زاویه تماس می‌باشد.

در شکل ۶ نمودارهای ترشوندگی حاصل از NMR و نگارهای مرسوم



شکل ۶: مقایسه نمودار فشار موپینگی *NMR* و فشار موپینگی نگارهای متداول برای مغزه A6-A10

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی ارتباط بین ترشوندگی حاصل از داده هاس *NMR* و داده های چاه نگاری متداول در یکی از میداین واقع در خلیج فارس پرداخته شد. خلاصه ای از نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر است:

- با استفاده از داده های آزمایشگاهی *NMR* و *MICP*، روابطی برای تعیین فشار موپینگی با استفاده از T_2 با مقدار ضریب همبستگی ۰/۸۴، ۰/۷۹، ۰/۸۳ و ۰/۹۰ برای ۴ نوع نمونه سنگ مختلف به دست آمد که مقادیر قابل قبولی می باشند.
- با استفاده از داده های نگار تخلخل نوترون و گاما و نتایج آزمایشگاهی *MICP*، روابطی برای تعیین فشار موپینگی با ضریب همبستگی بالای ۰/۸۱ بدست آمد که نشان دهنده انطباق بسیار خوب این روابط با نتایج مشاهده شده می باشد.
- به منظور ارزیابی روابط فشار موپینگی بدست آمده، نمودارهای فشار موپینگی برای نمونه های A6 تا A10 با استفاده از داده های

NMR و نگارهای متداول ترسیم شدند و ترشوندگی کیفی آنها خنثی به دست آمد که کاملاً منطبق بر نتایج به دست آمده از آزمایش *USBM* بود.

- نتایج نشان داد که ترشوندگی تخمین زده شده در مقیاس انجام شده قابل اعتماد بوده و می توان از این روش در صنعت به منظور تعیین ترشوندگی در شرایطی که اطلاعات آزمایشگاهی محدود بوده و نیاز به تعیین ترشوندگی در نقاط مختلف باشد استفاده کرد. همچنین، استفاده از داده ها و چاه های بیشتر جهت بالا بردن اعتبار این روش توصیه می شود.

۵- سپاس گذاری

این تحقیق تحت حمایت پژوهش و فناوری شرکت نفت فلات قاره ایران و مصوبات مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران انجام پذیرفته است. همچنین، از آقایان دکتر توکلی و مهندس سید حامد بلوری نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

- Peters, E.J., 2012. Advanced Petrophysics: Geology, porosity, absolute permeability, heterogeneity, and geostatistics. Greenleaf Book Group.
- Peyravi, M., Rahimpour-Bonab, H., Nader, F.H., Kamali, M.R., 2015. Dolomitization and burial history of lower triassic carbonate reservoir-rocks in the Persian Gulf (Salman offshore field). *Carbonates Evaporites* 30, 25–43.
- Shabani, M., Ghaffary, S., Yarmohammadi, S., 2021. Evaluation of rock properties determined from core and NMR data: A case study on Asmari carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Science and Technology* 11, 2–10. <https://doi.org/10.22078/JPST.2021.4540.1751>
- Shabani, M., Yarmohammadi, S., Ghaffary, S., 2023. Reservoir quality investigation by combination of core measured data and NMR technique analysis: a case study of Asmari carbonate reservoir in Gachsaran field. *Carbonates Evaporites* 38. <https://doi.org/10.1007/s13146-022-00824-y>
- Tandon, S., Newgord, C., Heidari, Z., 2020. Wettability quantification in mixed-wet rocks using a new NMR-based method, in: *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. <https://doi.org/10.2118/191509-PA>
- Volokitin, Y., Looyestijn, W.J., Slijkerman, W.F.J., Hofman, J.P., 1999. A practical approach to obtain 1st drainage capillary pressure curves from NMR core and log data. SCA-9924.
- Xiao, L., Mao, Z., Wang, Z., Jin, Y., 2012. Application of NMR logs in tight gas reservoirs for formation evaluation: A case study of Sichuan basin in China. *J Pet Sci Eng* 81, 182–195.
- Armstrong, R.T., Sun, C., Mostaghimi, P., Berg, S., Rücker, M., Luckham, P., Georgiadis, A., McClure, J.E., 2021. Multiscale Characterization of Wettability in Porous Media. *Transp Porous Media* 140. <https://doi.org/10.1007/s11242-021-01615-0>
- Feng, C., Feng, J., Feng, Z., Zhong, Y., Mao, Z., Ling, K., 2021. Determination of reservoir wettability based on resistivity index prediction from core and log data. *J Pet Sci Eng* 205. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108842>
- Feng, C., Fu, J., Shi, Y., Li, G., Mao, Z., 2016. Predicting reservoir wettability via well logs. *Journal of Geophysics and Engineering* 13, 234–241.
- Ghazban, F., 2007. Petroleum geology of the Persian Gulf. Joint publication.
- Guan, H., Brougham, D., Sorbie, K.S., Packer, K.J., 2002. Wettability effects in a sandstone reservoir and outcrop cores from NMR relaxation time distributions. *J Pet Sci Eng* 34. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(02\)00151-1](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(02)00151-1)
- He, Y.-D., Mao, Z.Q., Xiao, L.Z., Zhang, Y., 2005. A new method to obtain capillary pressure curve using NMR T2 distribution. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* 35, 177–181.
- Leverett, M., 1941. Capillary behavior in porous solids. *Transactions of the AIME* 142, 152–169.
- Liang, C., Jia, Z., Xiao, L., Wang, G., Mao, Y., Ma, X., 2023. A potential NMR-based wettability index using free induction decay for rocks. *Magnetic Resonance Letters*.
- Looyestijn, W.J., Hofman, J.P., 2006. Wettability-index determination by nuclear magnetic resonance. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering* 9. <https://doi.org/10.2118/93624-pa>
- Otchere, D.A., Mohammed, M.A.A., Ganat, T.O.A., Gholami, R., Merican, Z.M.A., 2022. A Novel Empirical and Deep Ensemble Super Learning Approach in Predicting Reservoir Wettability via Well Logs. *Applied Sciences (Switzerland)* 12.