



تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از امواج استونلی (FZI - استونلی)

عطا موحد^۱، مجید نبی‌بیدهندی^{۲*}، محسن مسیحی^۳، ابوالقاسم امامزاده^۴

۱. دانش آموخته دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی - مدل‌سازی انرژی؛ گروه مهندسی انرژی و اقتصاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۲. استاد؛ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
۳. استاد؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف
۴. دانشیار؛ دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2020.206616.1112

واژگان کلیدی	چکیده
تراوایی، نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای، FZI - استونلی، واحدهای جریان هیدرولیکی، گروه‌های آرامش	تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخزنی برای توسعه و گسترش مخزن است که نشان‌دهنده قابلیت سنگ مخزن در انتقال سیال‌هاست. به علت ناهمگن بودن مخزن، تخمین تراوایی همیشه با خطای زیادی همراه است. برای محاسبه تراوایی، این مقاله به دو بخش کلی تقسیم شده است. در بخش اول، با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) گروه‌های آرامش معادل واحدهای جریان هیدرولیکی یا (HFU) تعیین شدند. مزیت این روش، حل مشکل خاصیت ناهمگن بودن مخزن است. در ادامه، تراوایی برای هر یک از گروه‌های آرامش با استفاده از شاخص منطقه جریان (FZI) از طریق داده‌های استونلی به دست آمد. بدین صورت که در ابتدا تفسیر پتروفیزیکی توسط نگارهای پتروفیزیکی صورت گرفت و میزان سرعت موج استونلی در ماتریکس سنگ با استفاده از نمودار متقاطع (عرضی) و روابط ریاضی تعیین شد. سپس با استفاده از داده‌های مغزه و خروجی ارزیابی پتروفیزیکی، فاکتور شاخص تطابق (IMF) برای کانی‌های مختلف هر گروه آرامش محاسبه گردید و در نهایت با استفاده از روابط ریاضی، مقدار کمی تراوایی با کمک مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی به طور پیوسته برای هر یک از گروه‌های آرامش محاسبه شد. در این مطالعه برای هر کانی چند فاکتور شاخص تطابق مشخص شده است، به این صورت که ابتدا رخساره‌ها (واحدهای جریان هیدرولیکی) را مشخص نموده و بر اساس واحدهای جریان هیدرولیکی برای هر کانی IMF‌های مختلف به دست آمده است. مزیت اصلی روش فوق این است که با ثبت خاصیت ذاتی موج استونلی که متأثر از تراوایی است، می‌توان یک نگار پیوسته از تغییرات تراوایی در سرتاسر چاه تهیه کرد که خاصیت ناهمگن بودن مخزن را نیز در نظر می‌گیرد.

۱. مقدمه
تولید و بازیافت از مخازن طی مراحل مختلف برداشت، مطالعات و شبیه‌سازی مخزن، تخمین تولید و توسعه مخزن اهمیت بالایی دارد. تراوایی عمدتاً از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از مغزه یا داده‌های چاه آزمایی به دست می‌آید. با این حال، به دلیل هزینه زیاد و فراوانی کم این نوع از داده‌ها، پیش‌بینی تراوایی با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (عزیزی و شادمنام، ۱۳۹۶). تخمین پارامترهای پتروفیزیکی در مخازن کربناته، به دلیل

تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری است که در بسیاری از محاسبات و مدل‌سازی‌های مخزن نقشی مؤثر ایفا می‌نماید. محاسبه دقیق این متغیر در طراحی عملیات بهره‌برداری و ازدیاد برداشت بهینه ضروری است (Kharat and Nazari, 2010). تراوایی یکی از ویژگی‌های مهم در ارزیابی مخازن هیدروکربوری است؛ به طوری که آگاهی از چگونگی تغییرات آن در پیش‌بینی نرخ

بار در سال ۲۰۰۳ میلادی در ایران رانده شد و از آن پس برای شناسایی ویژگی‌های مخازن در میدان‌های جنوبی همچون سازند کنگان در میدان پارس جنوبی و ... به کار رفته است. تخلخل مستقل از لیتولوژی، تراوایی، توزیع اندازه حفرات، گرانیوی سیال، حجم سیال آزاد و مرزی از پارامترهایی هستند که می‌توان مقادیر آن‌ها را توسط نگار *NMR* به دست آورد. اکثر سازندهای کربناته دارای تغییرات گسترده‌ای در خواص پتروفیزیکی از جمله ناهمگنی و اندازه حفرات هستند. به همین دلیل تخمین تراوایی در این نوع مخازن کاری بسیار پیچیده و دشوار به حساب می‌آید. لذا برای آن که مهندسين مخزن بتوانند مدل مناسبی از مخزن طراحی کنند، نیازمند داشتن ابزاری مستقل از لیتولوژی همچون *NMR* هستند تا با بهره‌گیری از آن، خواص سنگ‌های کربناته را با دقت بالا ارزیابی نمایند (کارگر و همکاران، ۱۹۹۹).

محاسبه تراوایی با کمک امواج استونلی یکی از روش‌های اندازه‌گیری پیوسته در سرتاسر گمانه اکتشافی بدون استفاده از ضرایب تجربی است. در دهه ۱۹۷۰ لبرتون بحث استفاده از امواج آکوستیک در محاسبه تراوایی را مطرح کرد (Kumar et al., 2008). بری و همکارانش (۲۰۰۰) رابطه‌ای معرفی نمودند که با استفاده از آن می‌توان مقدار کندشدگی موج استونلی را در قسمت‌های ناتراوای سنگ محاسبه کرد و پس از آن، با استفاده از مقدار کندشدگی استونلی کل به دست آمده، مقدار کندشدگی استونلی را، که در اثر تراوایی موجود است، در قسمت تراوای سازند به دست آورد (Brie et al., 2000). ال ادانی و براتی (۲۰۰۰) تأثیرات تراوایی بر کندشدگی موج استونلی را نشان دادند. به گفته آن‌ها کندشدگی موج استونلی در سرتاسر گمانه اکتشافی به یک کندشدگی زمینه، مربوط به یک ناحیه ناتراوا در گمانه و یک کندشدگی مربوط به ناحیه تراوای سازند تقسیم می‌شود (Al Adani and Barati, 2000). آن‌ها با استفاده از تفکیک این دو موج بر اساس روابطی، فاکتوری را معرفی و با

سیستم منافذ ناهمگن، پیچیده و دشوار می‌باشد (Lucia, 2007; Ahr, 2008; Moore and Wade, 2013). تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخزنی در تعیین ظرفیت جریان هیدروکربور در مخزن می‌باشد که توسط پارامترهای مختلف مرتبط با سیستم منافذ از قبیل نوع، اندازه، ارتباط، شعاع گلوگاه و جورشدگی منافذ کنترل می‌شود (Rezaee et al., 2006). در مخازن کربناته مشاهده نمونه‌هایی با تخلخل یکسان و مقادیر تراوایی متفاوت ناشی از پیچیدگی و تنوع سیستم منافذ یک سنگ مخزن رایج است. روش‌های مختلفی به منظور تخمین تراوایی استفاده می‌شود که هر کدام از آن‌ها دارای مزایا و بعضاً محدودیت‌هایی می‌باشند. روش‌های مبتنی بر مدل‌های تجربی و تئوری، روش‌های هوشمند و گروه‌بندی مخزن بر مبنای ویژگی‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی، با توجه به داده‌های در دسترس و میزان دقت و صحت در تخمین تراوایی استفاده می‌شوند (Chehrizi and Rezaee, 2012). استفاده از فرمول‌های تجربی برای تخمین تراوایی، با توجه به مبانی ریاضی و تئوری می‌تواند بکار گرفته شوند. با این وجود، یک رابطه ساده تجربی برای تخمین تراوایی در یک مخزن کربناته ناهمگن نمی‌تواند نتایج قابل قبولی فراهم آورد. با توجه به اینکه در مقادیر یکسان تخلخل، انواع مختلف منافذ، تراوایی متفاوتی نشان می‌دهند، ارائه فرمول‌های تجربی در هر گروه پتروفیزیکی بر مبنای نوع سیستم منافذ، برای تخمین تراوایی کاربردی است (هنرمند و اسعدی، ۱۳۹۵).

روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR^1) از همان ابتدای ارائه در سال ۱۹۴۶، تبدیل به ابزاری قدرتمند و ارزشمند در فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی و پزشکی شده است، به طوری که امروزه در صنعت نفت از *NMR* برای تعیین ویژگی‌های پتروفیزیکی مخازن در آزمایشگاه و چاه‌های نفت و گاز استفاده می‌گردد. نگاربرداری تشدید مغناطیسی هسته‌ای در سال ۱۹۹۱ معرفی شد. نگار *NMR* برای اولین

¹ Nuclear Magnetic Resonance

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

محاسبه شده است. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از تخلخل حاصل از NMR در کنار سایر نگارهای مرسوم، در حکم ورودی شبکه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در همبستگی به وجود می‌آید و بنابراین می‌توان از شبکه عصبی به منظور روشی قابل اطمینان در برآورد کمی تراوایی در سازند سروک بالایی استفاده نمود (روستایی و همکاران، ۱۳۸۹). مجرد و کارگر (۱۳۹۳) با استفاده از حضور هسته هیدروژن در سیالات مخزن و با بهره‌گیری از مزیت روش NMR در تعیین اندازه حفره‌ها، در ابتدا به دو شیوه، حجم آب ناحیه مرزی و حجم سیال آزاد چاهی کربناته در جنوب غربی ایران را تعیین نموده و سپس تراوایی NMR را با استفاده از دو مدل SDR^f و $Coates$ توسط نرم‌افزار ژئولاگ محاسبه کردند. نتایج یکسان حاصل از دو شیوه NMR برای تعیین حجم سیالات مرزی، با ضریب همبستگی ۰/۹ نشان داد که روش $CBFI^g$ برای چاه مورد بررسی معتبر است و ضریب همبستگی ۰/۷ که از مقایسه نتایج مغزه و NMR برای نفوذپذیری حاصل شد، بیانگر این موضوع است که روش NMR می‌تواند مقادیر نفوذپذیری را به درستی پیش‌بینی نموده و جایگزین روش‌های قدیمی و پرهزینه گردد (مجرد و کارگر، ۱۳۹۳).

رستگاریا و کدخدائی ایلخچی (۲۰۱۳)، با استفاده هم‌زمان داده‌های سرعت موج استونلی و شبکه‌های عصبی ماشین بردار پشتیبان در میدان چشمه خوش جنوب ایران به تخمین تراوایی پرداختند. به این منظور، رهیافتی چهار مرحله‌ای برای تخمین تراوایی از داده‌های صوتی پیشنهاد شده است. این مراحل به قرار زیرند: تخمین کندی موج استونلی از نمودارهای مرسوم چاه با استفاده از شبکه عصبی بردار پشتیبان، تخمین کندی موج استونلی در مناطق ناتراوا، تخمین شاخص تراوایی استونلی و محاسبه تراوایی استونلی با استفاده از فاکتور تطابق شاخص. در نهایت مقایسه‌ای بین تراوایی استونلی با تراوایی به دست آمده از داده‌های CMR^7 و آنالیز مغزه صورت گرفته است. نتایج این مطالعه نشان داد

استفاده از آن و لحاظ کردن تغییرات لیتولوژی در سرتاسر گمانه مقدار تراوایی را در کل گمانه به صورت پیوسته محاسبه کردند. هداوند و مرادزاده (۱۳۸۵) تراوایی مخازن نفتی را از طریق بررسی امواج استونلی حاصل از سوندهای تصویرگر موج برشی دو قطبی (DSI^2) تخمین زدند. بدین منظور آن‌ها کندی موج استونلی به دست آمده از ابزار DSI را با اطلاعات موجود از ابزار MDT^3 کالیبره کرده و رابطه کیفی به دست آمده را کمی نمودند. نتایج مقایسه داده‌های تراوایی محاسباتی با داده‌های تراوایی اندازه‌گیری شده و روند تغییرات نگار تراوایی به دست آمده با سایر نگارهای چاه پیمایی مورد استفاده در ارزیابی پتروفیزیکی همخوانی خوبی را بین داده‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که این مؤید صحت رابطه به دست آمده می‌باشد (هداوند و همکاران، ۱۳۸۵). اصغری و همکاران (۱۳۹۱) مزیت استفاده از امواج استونلی به دست آمده از سوند DSI نسبت به دیگر روش‌های محاسبه تراوایی را دینامیک بودن این روش اعلام کردند (اصغری و همکاران، ۱۳۹۱). در ادامه همچنین گوان و همکارانش تغییرات موج استونلی را در سنگ مخزن با منافذ اشباع کامل از آب، بررسی و با استفاده از مدل سازی معکوس مقدار تراوایی را به صورت کمی محاسبه کردند و نموداری پیوسته از تراوایی را در مخزن کربناته مطالعه شده به دست آوردند (Guan et al., 2013). روستایی و همکاران (۱۳۸۹) به منظور محاسبه دقیق تراوایی در یکی از مخازن نفت سنگین در سازند سروک بالایی، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی با دو مجموعه ورودی متفاوت استفاده نمودند. در مجموعه اول از داده‌های تخلخل به دست آمده از نگار NMR به منزله یکی از ورودی‌ها و در مجموعه دوم از تخلخل حاصل از نگار نوترون در حکم ورودی استفاده شده است. دو دسته تراوایی به دست آمده از شبکه عصبی با هر دو مجموعه ورودی نیز، با نتایج حاصل از مغزه، مقایسه و ضرایب همبستگی

² Dipole Shear Sonic Imager

³ Modular Dynamics Formation Tester

⁴ Schlumberger Doll Research

⁵ Cutoff Bound Fluid Volume

⁶ Combinable Magnetic Resonance

(۱۳۹۸) کاربرد نگار DSI در ارزیابی ژئومکانیکی و پتروفیزیکی مخازن کربناته در یکی از میدان‌های جنوب غرب ایران را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از داده‌های نگار DSI در یکی از چاه‌های مخزن کربناته سروک، مشخص شد که حالت تنش به صورت امتداد لغز عادی بوده و فشار منفذی به فشار هیدروستاتیکی نزدیک است. در پژوهش ایشان عوامل مؤثر بر بازتاب امواج استونلی و ایجاد الگوهای جناغی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این خصوص، ریزش دیواره چاه مهم‌ترین عامل اثرگذار بر روی ایجاد الگوهای جناغی است. تفاوت تراوایی‌های استونلی و مغزه مربوط به تفاوت در ماهیت اندازه‌گیری تراوایی با این دو روش است (عزتی و همکاران، ۱۳۹۸). در روش NMR با استفاده از روابط تجربی موجود بین تخلخل محاسبه شده و مقدار میانگین برای زمان‌های آرامش T_2 ، تراوایی سنگ محاسبه می‌شود. این روابط در آزمایشگاه و با استفاده از مغزه‌های سنگی محاسبه شده‌اند. رابطه ۱ یکی از فرمول‌هایی است که توسط شرکت SDR توسعه یافته است (Kenyon et al., 1995; Serra, 2008; Al-Mahrooqi et al., 2003).

$$K_{NMR} = C(\Phi_{NMR})^4(T_{2(LM)})^2 \quad (1)$$

در این فرمول C ضریب متناسب با نوع لیتولوژی سنگ (برای ماسه‌سنگ‌ها ۴ و برای سنگ‌های آهکی ۰/۱)، Φ تخلخل اندازه‌گیری شده به روش NMR و T_{2LM} میانگین لگاریتمی توزیع زمان آرامش T_2 است. روش دیگر برای محاسبه تراوایی سنگ، استفاده از فرمول $Timur-Coates$ است (رابطه ۲) که متناسب با نسبت تخلخل آب قابل تولید (Φ_{FF}) به آب محصور در حفرات ریز (Φ_{BF}) به دلیل وجود فشار مؤئینه زیاد است. این فرمول به مقدار نفت موجود در سنگ حساس است. از بین روابط ۱ و ۲ برای محاسبه تخلخل سنگ، فرمول SDR معتبر است و نتایج قابل قبولی هم برای ماسه‌سنگ‌ها و هم برای سنگ‌های آهکی داشته است (Kenyon et al., 1995; Serra, 2008; Al-Mahrooqi et al., 2003).

که روش صوتی در کنار شبکه‌های عصبی SVM^7 قدرتمند ابزاری دقیق برای تخمین تراوایی در مخازن مختلط آواری-کربناته با سامانه پیچیده حفرها محسوب می‌شود (رستگرنیا و کدخدائی ایلخچی، ۲۰۱۳). خیر و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از امواج استونلی به بهبود روش‌های تعیین پارامترهای محاسبه کمی تراوایی مخازن کربناته پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق، مشخص شد که پارامترهای تخلخل و کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ بیشترین تأثیر را در تعیین دقیق تراوایی دارند، به طوری که در صورت عدم محاسبه صحیح مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ، در بعضی نقاط مقدار تراوایی منفی خواهد بود؛ همچنین وقتی پارامتر تخلخل در محاسبه تراوایی تأثیر داده شده، نتایج تطابق بیشتری با مقادیر تراوایی حاصل از ابزار MDT دارند. اعتمادی کرمانی و آبدیده (۱۳۹۵) با استفاده از داده‌های موج استونلی و داده‌های مغزه به محاسبه تراوایی پرداختند. در ابتدای این مطالعه با استفاده از داده‌های نگار DSI و به کمک نرم‌افزار ژئولاگ امواج استونلی و برشی را پردازش کرده و نهایتاً گندی این امواج را محاسبه نموده که این قسمت برای داده‌های چاه انجام شد و با استفاده از آن‌ها مدلی جدید برای تخمین تراوایی در چاه مورد نظر به دست آمد. این مدل نشأت گرفته از روش تخمین تراوایی به کمک کالیبراسیون FZI^8 - استونلی می‌باشد (اعتمادی کرمانی و آبدیده، ۱۳۹۵). اسدی مهماندوستی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای و داده‌های مغزه در یکی از میدان‌های نفتی دشت آبادان به تعیین پارامترهای مهم مخزنی پرداختند. تطابق نتایج پتروفیزیکی حاصل از روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای با داده‌های مغزه و مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی، نشان دهنده کارآمد بودن این روش در تعیین پارامترهای مهم مخزنی است. علاوه بر این، نتایج ارزیابی سازند کربناته ایلام با روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای نشان می‌دهد که مخزن مورد مطالعه در اعماق ۲۸۴۶ تا ۲۸۹۰ متری در میدان نفتی مورد بررسی در دشت آبادان کیفیت مخزنی مناسب برای ذخیره هیدروکربور دارد (اسدی مهماندوستی و همکاران، ۱۳۹۶). عزتی و همکاران

⁷ Support Vector Machine

⁸ Flow Zone Indicator

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

$$K_{NMR} = 1000 \left(\frac{\emptyset \emptyset_{FF}}{\emptyset \emptyset_{BF}} \right)^2 \emptyset^4 \quad (2)$$

۲. شرح و بحث

این قسمت از مطالعه به دو بخش کلی تقسیم شده است. در بخش اول گروه‌های آرامش با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) محاسبه شد. در واقع این گروه‌های آرامش معادل واحدهای جریان هیدرولیکی هستند. در بخش دوم تراوایی با استفاده از موج استونلی با استفاده از روش FZI - استونلی برای هر یک از گروه‌های آرامش محاسبه شد.

۱.۲ تعیین گروه‌های آرامش با استفاده از نگار تشدید

مغناطیسی هسته‌ای (NMR)

در این قسمت، برای طبقه‌بندی انواع سنگ‌ها نسبت به خواص جریانی بر پایه واحدهای جریان هیدرولیکی از نمودار تشدید مغناطیسی هسته‌ای استفاده شد تا بتوان بر مشکل ناهمگنی مخزن و عوامل مؤثر دپازن بر روی تراوایی غلبه کرد. بدین صورت که ابتدا با روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) تعداد بهینه گروه‌های آرامش محاسبه شد و در نهایت صحت گروه‌های آرامش حاصل شده با نتایج ارزیابی پتروفیزیکی و داده‌های مغزه مقایسه گردید که تطابق بالایی نشان دادند. در این بخش ابتدا ارتباط بین نگار NMR با شاخص منطقه جریانی (FZI) توضیح داده می‌شود.

۲.۲ ارتباط بین نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای

(NMR) با شاخص منطقه جریانی (FZI)

معادله بنیادی که نرخ آرامش را به فضای متخلخل مرتبط می‌کند از رابطه زیر به دست می‌آید (Freedman, 2006).

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_{2b}} + \rho \frac{S}{V} \quad (3)$$

که در آن

T_{2b} : زمان آرامش عرضی سیال، که تحت تأثیر خواص فیزیکی سیال از قبیل گرانیروی و ترکیب شیمیایی است.

S/V : نسبت سطح حفرات به حجم آن‌ها که در واقع معیاری از اندازه حفرات است.

ρ : استراحت سطحی، که در محل برخورد سیال و جامد (مانند سطح سنگ) رخ می‌دهد.

آرامش سیال در غالب موارد قابل صرف‌نظر کردن است، اما زمانی که آب در فضاهای بزرگ (مانند حفرات موجود در کربنات‌ها) موجود باشد، علی‌رغم اینکه پروتون‌ها به سطح ذرات برخورد نمی‌کنند، ولی آرامش کل سیال حائز اهمیت است. با در نظر گرفتن زمانی که به طور معناداری از زمان آرامش بزرگ‌تر است (در فضاهای متخلخل) معادله بالا به شکل زیر درمی‌آید.

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (4)$$

گورجی^۹ و منجر (۱۹۹۴) ارتباطی بین نسبت سطح به حجم فضای خالی با تخلخل و نسبت سطح ویژه به حجم هر دانه معرفی کردند. این معادله همچنین توسط اوهن و همکاران^{۱۰} (۱۹۹۵) به کار برده شد. بنابراین معادله (۵) می‌تواند به شکل زیر نوشته شود (Georgi and Menger, 1994).

$$\square T_2 = \frac{\emptyset}{[S_{gv} (1 - \emptyset)]} \quad (5)$$

$$\frac{T_2}{\emptyset_z} = \frac{1}{\rho S_{gv}} \quad (6)$$

بنابراین ما می‌توانیم معادله‌ها (۵) و (۶) و (۷) را با تعریف RQI^{11} مرتبط کنیم.

⁹ Georgi and Menger

¹⁰ Ohen

¹¹ Reservoir Quality Index

تفکیک را در رخساره‌ها انجام داده، انتخاب نماید. مزیت‌های این روش عبارت‌اند از: قابلیت شناسایی گروه‌های داده‌های (نمودارهای پتروفیزیکی) مرتبط با رخساره‌های زمین‌شناسی، عدم نیاز به داشتن دانش اولیه از مجموعه داده‌ها، قابلیت کار با مجموعه داده‌های حقیقی متشکل از دسته داده‌های با ترکیب بسیار پیچیده، کم بودن پارامترها و عدم حساسیت به تغییرات آن‌ها، پایدار بودن نتیجه با تغییر مقدار پارامترها، داشتن محدودیت در تعداد ابعاد نقاط و خوشه‌ها و تولید خودکار تعداد بهینه خوشه‌ها بدون دخالت ناظر. الگوریتم روش $MRGC$ با روش‌های هوشمند، تعداد رخساره‌های الکتریکی (خروجی) را با توجه به داده‌های اولیه و محدود (ورودی) در هر چاه بدون دخالت ناظر ارائه می‌کند. این در حالی است که در روش‌های دیگر خوشه‌بندی، کاربر با در نظر گرفتن پارامترهایی از جمله مطالعات پتروگرافی و رخساره‌های رسوبی، تعداد رخساره‌های رسوبی که حدس می‌زند به تعداد واقعی نزدیک باشد، به نرم‌افزار ارائه کرده و سپس نرم‌افزار بر اساس اطلاعات وارد شده، الگوی پیشنهادی را معرفی می‌نماید (ره‌سپار و همکاران، ۱۳۹۳). برای اعتبارسنجی و صحت گروه‌های آرامش حاصل شده با استفاده از روش $MRGC$ از تطابق آن‌ها با رخساره‌های زمین‌شناسی به روش‌های زیر استفاده گردید:

- مقایسه با ارزیابی‌های پتروفیزیکی
 - مقایسه با مغزه‌های گرفته شده از مخزن در فواصل مشخص
 - مقایسه با رخساره‌های تعریف شده با استفاده از اطلاعات مقاطع نازک
- در این مطالعه تعداد بهینه رخساره‌های الکتریکی توسط روش $MRGC$ با استفاده از پارامتر $\frac{1}{(\rho S_{gv})}$ به دست آمده‌اند و نقاطی که توزیع تراوایی و تخلخل مشابه دارند در یک گروه قرار گرفته‌اند. این پارامتر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$RQI = \sqrt{\left(\frac{K}{\phi}\right)} = \frac{\rho T_2}{(\tau \sqrt{F_s})} \quad (7)$$

$$\frac{T_2}{\phi_z} = \frac{1}{\rho S_{gv}} \quad (8)$$

این نشان می‌دهد که RQI با زمان آرامش T_2 و به طور مشابه با گروه تخلخل (ϕ_z) مرتبط شده است. بنابراین با به کار بردن معادلات بالا ما می‌توانیم یک معادله لگاریتمی به ترتیب ذیل بنویسیم:

$$\log T_2 = \log(\phi_z) + \log \left[\frac{1}{(\rho S_{gv})} \right] \quad (9)$$

این معادله تخلخل و زمان آرامش را مرتبط می‌کند و اساس و پایه مفهوم گروه‌های آرامش را تشکیل می‌دهد که با مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی مشابه می‌باشد.

۳.۲ تعداد بهینه گروه‌های آرامش با استفاده از روش تفکیک چندگانه بر پایه گراف ($MRGC^{12}$)

در این مطالعه از روش $MRGC$ برای تعیین تعداد بهینه گروه‌های آرامش استفاده شد که روشی نوین جهت خوشه‌بندی (دسته‌بندی) است. در این روش نیازی نیست که تعداد خوشه‌ها به الگوریتم داده شود بلکه کاربر تنها یک بازه از تعداد بهینه خوشه‌ها را تعیین می‌کند، به این ترتیب که نرم‌افزار تعداد خوشه‌های مشخصی را به عنوان خروجی به ناظر معرفی می‌کند و کاربر با در نظر داشتن پیش زمینه علمی و مطالعاتی در این راستا، بهترین خوشه را شناسایی و انتخاب می‌نماید. در این روش، کاربر هیچ‌گونه دخالتی در نحوه خوشه‌بندی ندارد و معرفی خوشه‌ها توسط نرم‌افزار به صورت هوشمند و با دقت بالا صورت می‌گیرد. بنابراین، کاربر تنها می‌تواند از بین خوشه‌های معرفی شده، خوشه‌ای که بهترین

¹² Multi-Regression Graph-based Clustering

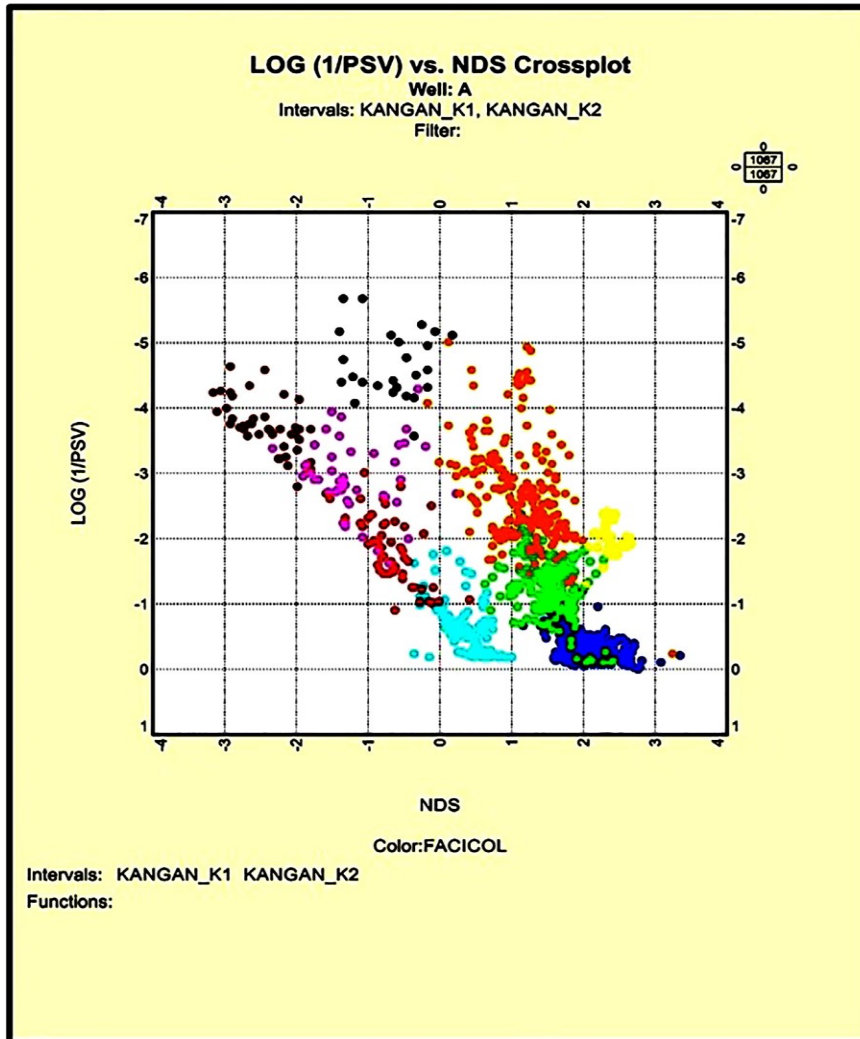
تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

سازند کنگان از روش MRGC را نشان می‌دهد. تغییر زمان آرامش^{۱۴} برای هر واحد جریان خروجی نیز در این شکل نشان داده شده است. خواص مخزنی برای هر گروه آرامش در جدول ۱.۳.۲ آورده شده است.

$$\frac{\log T_2}{\log(\phi_z)} = \frac{1}{(\rho S_{gv})} \quad (10)$$

$$\frac{\log T_2}{\log(\phi_z)} = \frac{1}{(\rho S_{gv})} \quad (11)$$

شکل ۱.۳.۲ کراس پلات $1/\rho S_{gv}$ در مقابل NDS^{13} برای



شکل ۱.۳.۲ نمودار تقاطعی (عرضی) $1/\rho S_{gv}$ در مقابل NDS برای سازند کنگان از روش MRGC و تغییر زمان آرامش (Relaxation time) برای هر واحد جریان خروجی

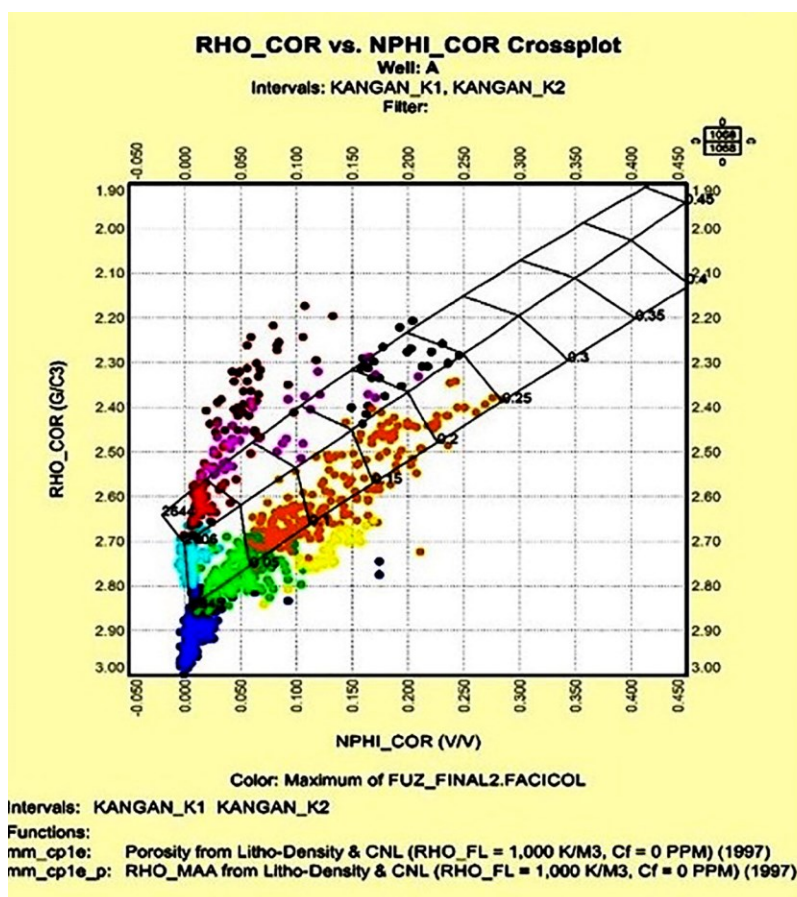
¹³ Neutron Density Separation

¹⁴ Relaxation time

در جدول ۱.۳.۲ میانگین پارامترهای مخزنی برای هر یک از رخساره‌ها در چاه A واقع در سازند کنگان در یکی از مخازن گازی جنوب کشور نشان داده شده است. شکل‌های ۲.۳.۲ و ۳.۳.۲ نمودار تقاطعی (عرضی) را برای نگارهای مختلف نشان می‌دهد. نمودارهای تقاطعی (عرضی) معمولاً برای صحت سنجی مدل استفاده می‌شود.

جدول ۱.۳.۲ میانگین پارامترهای مخزنی برای رخساره‌های به دست آمده از روش MRGC برای چاه A.

Facis No	Color	Phie (v/v)	Perm (mD)	T _{2lm} (mS)	Dominate Lithology
1	Blue	0.003	0	5.79	Anhydrite
2	Green	0.05	0.16	42.25	Anhydrite + Dolomite
3	Yellow	0.085	0.73	111.27	Dolomite
4	Orange	0.117	5	153.53	Dolomite
5	Black	0.225	42	319.12	Dolomite
6	Cyan	0.01	0.1	19.22	Lime
7	Red	0.071	0.76	132.63	Lime
8	Magenta	0.13	1.5	231.28	Lime
9	Brown	0.17	1.5	338.35	Lime

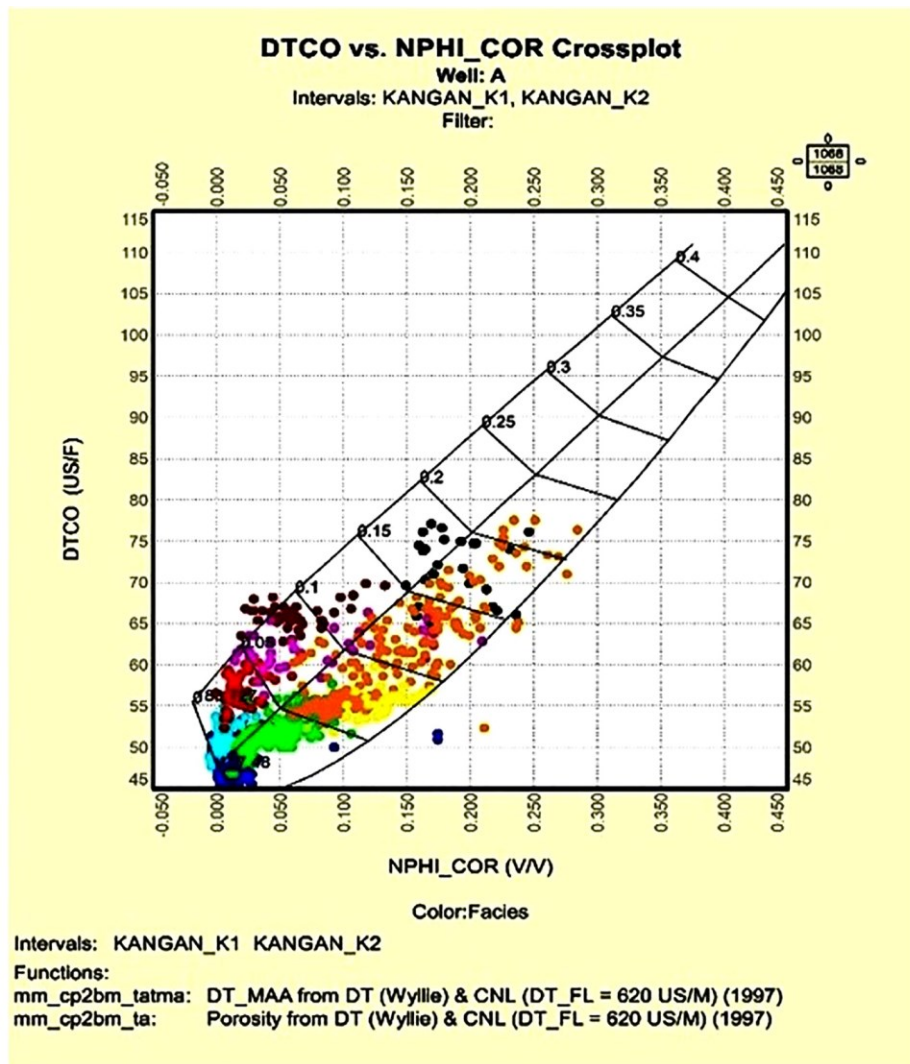


شکل ۲.۳.۲ نمودار تقاطعی (عرضی) نوترون تخلخل و دانسیته نگارهای چاه بر اساس رخساره‌های الکتریکی در چاه مورد مطالعه.

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

فرض بر این است که مقدار تخلخل با کاهش دانسیته افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، گروه‌های آرامش شماره ۴ (نارنجی) بیشتر پراکنده بود. علت این رفتار، احتمالاً بافت سنگ، دیاژنز و دولومیتی شدن می‌باشد.

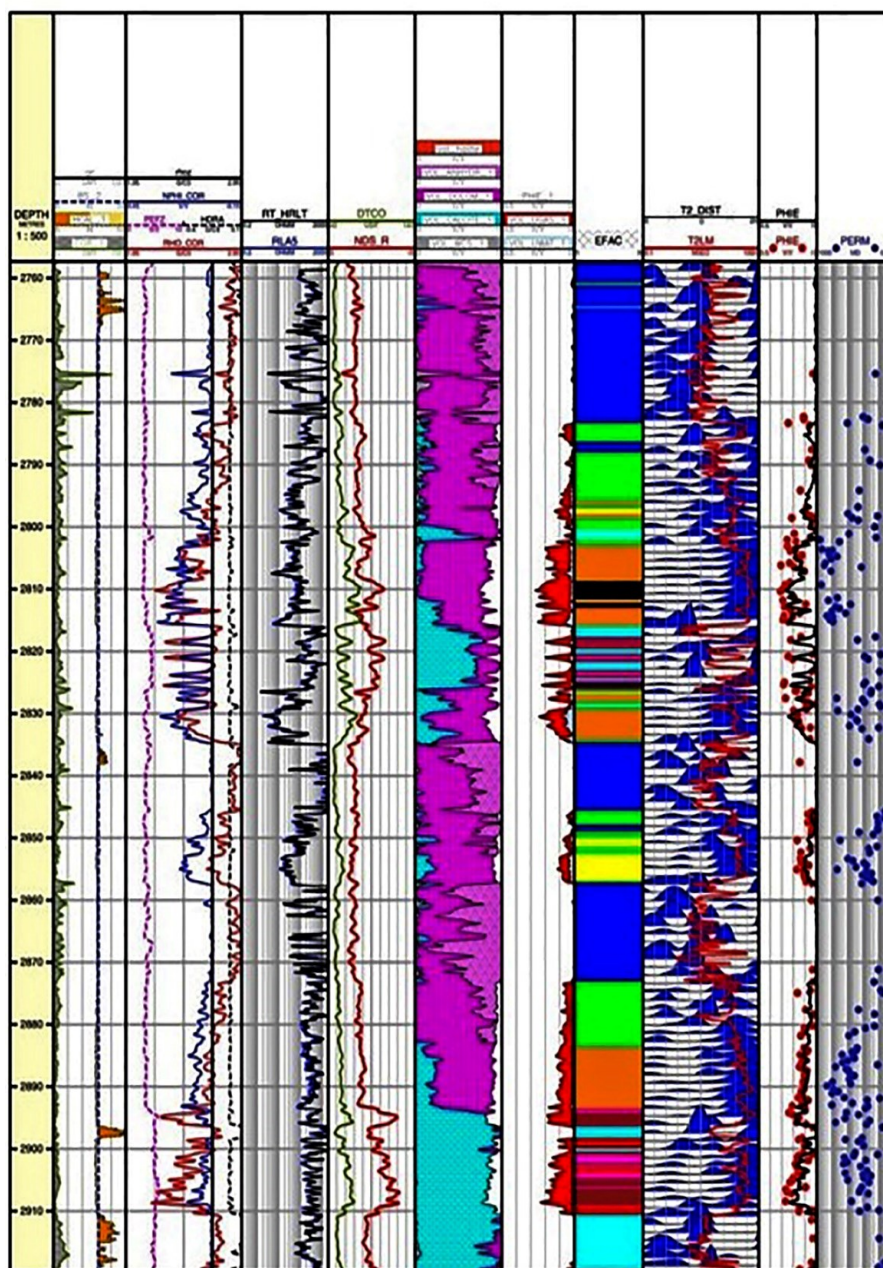
شکل ۳.۳.۲ نمودار تقاطعی (عرضی) بین نگارهای نوترون و دانسیته را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقدار دانسیته برای گروه‌های آرامش مختلف متفاوت است. به عنوان مثال، گروه‌های آرامش شماره ۱ (آبی) دارای دانسیته بالا بودند، بنابراین میزان تخلخل پایین‌تری داشتند. به طور کلی



شکل ۳.۳.۲ نمودار تقاطعی (عرضی) نوترون تخلخل و سونیک (صوتی) نگارهای چاه بر اساس رخساره‌های الکتریکی در چاه مورد مطالعه

از روش تفکیک چندگانه بر پایه گراف (MRGC) برای چاه مورد مطالعه در شکل ۴.۳.۲ نشان داده شده است. همچنین انطباق نتایج بین نفوذپذیری مغزه، محتوای گاز، اشباع آب و T2 نشان دهنده اعتبار روش استفاده شده برای خوشه‌بندی است.

شکل ۳.۳.۲ نگار DT (نمودار صوتی) در مقابل NPHI (نمودار نوترون چگالی) را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که گروه‌های آرامش دولومیتی دارای تخلخل بیشتری نسبت به سایر گروه‌های آرامش بوده است. این واقعیت اعتبار مدل را تأیید می‌کند. گروه‌های آرامش محاسبه شده با استفاده



شکل ۴.۳.۲ رخساره‌های به دست آمده از روش *MRGC* برای چاه مورد مطالعه

گاز و آب را نشان می‌دهد. علاوه بر این، ستون هشتم نتایج گروه‌های آرامش حاصل شده از روش تفکیک چندگانه بر پایه گراف (*MRGC*) می‌باشد، ستون نهم توزیع منحنی T_2 نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای است که T_2LM به معنای مقدار لگاریتمی توزیع T_2 می‌باشد، ستون دهم توزیع تخلخل مؤثر

در شکل ۴.۳.۲ ستون اول عمق‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد، ستون دوم مربوط به نگارهای گاما و کالیپر و اندازه مته است. ستون سوم نشانگر *NPHI* (نمودار نوترون چگالی) و دانسیته است، ستون چهارم نگار مقاومت است، ستون پنجم نمودار صوتی (*DT*) به همراه نمودار جدایش نوترون - دانسیته است، ستون ششم نشانگر لیتولوژی است و ستون هفتم حجم

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریانی حاصل از ...

منطقه ناتراوا رسم کنیم شیب منحنی عبوری از داده‌ها، چگالی ظاهری پالایه گل را نشان می‌دهد. همچنین عرض از مبدأ منحنی مزبور برابر مجذور کندی ظاهری پالایه گل است (Al Adani and Barati, 2003). از آنجا که فضای متخلخل بر روی امواج استونلی اثر می‌گذارد می‌توان شاخص تراوایی را محاسبه نمود. این شاخص از نسبت کندی استونلی اندازه-گیری شده به کندی مدل سازی شده که در واقع همان کندی محاسبه شده در منطقه ناتراوا می‌باشد، به دست می‌آید:

$$KIST = \frac{DTST}{DTSTE} \quad (15)$$

در این رابطه $KIST$ شاخص تراوایی استونلی، $DTST$ کندی موج استونلی در کل سازند و $DTSTE$ کندی موج استونلی در منطقه ناتراوا (الاستیک) است. با توجه به رابطه پیچاپیچی و شاخص منطقه جریان، در نهایت شاخص منطقه جریان استونلی بصورت زیر با FZI متناسب می‌شود.

$$FZI \propto KIST \quad (16)$$

اما از آنجا که در منطقه ناتراوا $KIST$ به سمت یک میل می‌کند فاکتور FZI باید به سمت صفر میل کرده بنابراین تناسب مذکور به شکل زیر برقرار می‌گردد:

$$FZI \propto (KIST - 1) \quad (17)$$

جهت تبدیل این تناسب به تساوی، فاکتوری به نام شاخص تطابق به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$FZI = IMF(KIST - 1) \quad (18)$$

این فاکتور تنها عامل ارتباط بین شاخص تراوایی استونلی، FZI و تراوایی حقیقی جهت کالیبراسیون بوده و توسط رابطه زیر و با توجه به حجم کانی‌های موجود در سازند مورد مطالعه تعیین می‌گردد.

$$IMF = \Sigma(IMF_i V_i) \quad (19)$$

در این رابطه IMF^{15} فاکتور شاخص تطابق، V_i حجم هر کانی، i معرف هر کانی می‌باشد. در نهایت پس از محاسبه مقادیر FZI ، تراوایی استونلی از رابطه زیر به دست می‌آید (خیر و همکاران، ۱۳۹۴):

را نشان می‌دهد که نقاط قرمز مربوط به تخلخل مغزه و در نهایت، ستون یازدهم نفوذپذیری مغزه را نشان می‌دهد.

۴.۲ ارزیابی تراوایی با روش کالیبراسیون FZI - استونلی برای هر یک از گروه‌های آرامش

در این بخش ابتدا نحوه محاسبه تراوایی با استفاده از موج استونلی توضیح داده شده است. در قسمت بعدی تراوایی برای هر یک از گروه‌های آرامش محاسبه شد و با نتایج تراوایی داده‌های مغزه مقایسه گردید.

۱.۴.۲ ارزیابی تراوایی با روش FZI - استونلی

امواج استونلی خاصیت پراکنده شونده داشته و در تماس سیال گمانه و سازند ایجاد می‌شوند. فاکتورهای تأثیرگذار بر روی کندی موج استونلی شامل کبره گل، لیتولوژی و سیال داخل چاه می‌باشد. امواج استونلی در مناطق ناتراوا که خواص مدل الاستیک را دارا می‌باشند، به صورت زیر مدل سازی می‌گردد (خیر و همکاران، ۱۳۹۴):

$$\frac{1}{V_{st}} = \sqrt{\rho_f \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_f} \right)} \quad (12)$$

که در آن V_{st} سرعت موج استونلی، G مدول برشی سنگ، K_f مدول بالک سیال و ρ_f چگالی سیال است. این معادله در سازند با تراوایی صفر صحیح و معتبر است که سرعت موج استونلی تنها تحت تأثیر خواص الاستیکی چاه و سازند است. رابطه بالا با اندکی تغییر به رابطه کاربردی زیر تبدیل می‌شود:

$$DTST^2 = \frac{DTSM^2 RHOM}{RHOB} + DTF^2 \quad (13)$$

$$RHOB = \Sigma(RHO_i V_i) \quad (14)$$

که در آن $DTST$ کندی موج استونلی، $DTSM$ کندی موج برشی، DTF کندی ظاهری پالایه گل، $RHOM$ چگالی ظاهری پالایه گل و $RHOB$ چگالی بالک، RHO چگالی، V حجم احتمالی و i سیال یا کانی می‌باشد. اگر نمودار متقاطع (عرضی) $DTST^2$ در مقابل $\frac{DTSM^2}{RHOB}$ را به صورت خطی در

¹⁵ Index Match Factor

شاخص تطابق هر کانی نیاز می‌باشد. جهت محاسبه کندی موج استونلی منطقه ناتراوا دو روش امکان‌پذیر است:

$$K = 1014 FZI^2 \left[\frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \right] \quad (20)$$

در این رابطه K تراوایی استونلی، ϕ تخلخل مؤثر و FZI شاخص منطقه جریانی می‌باشد.

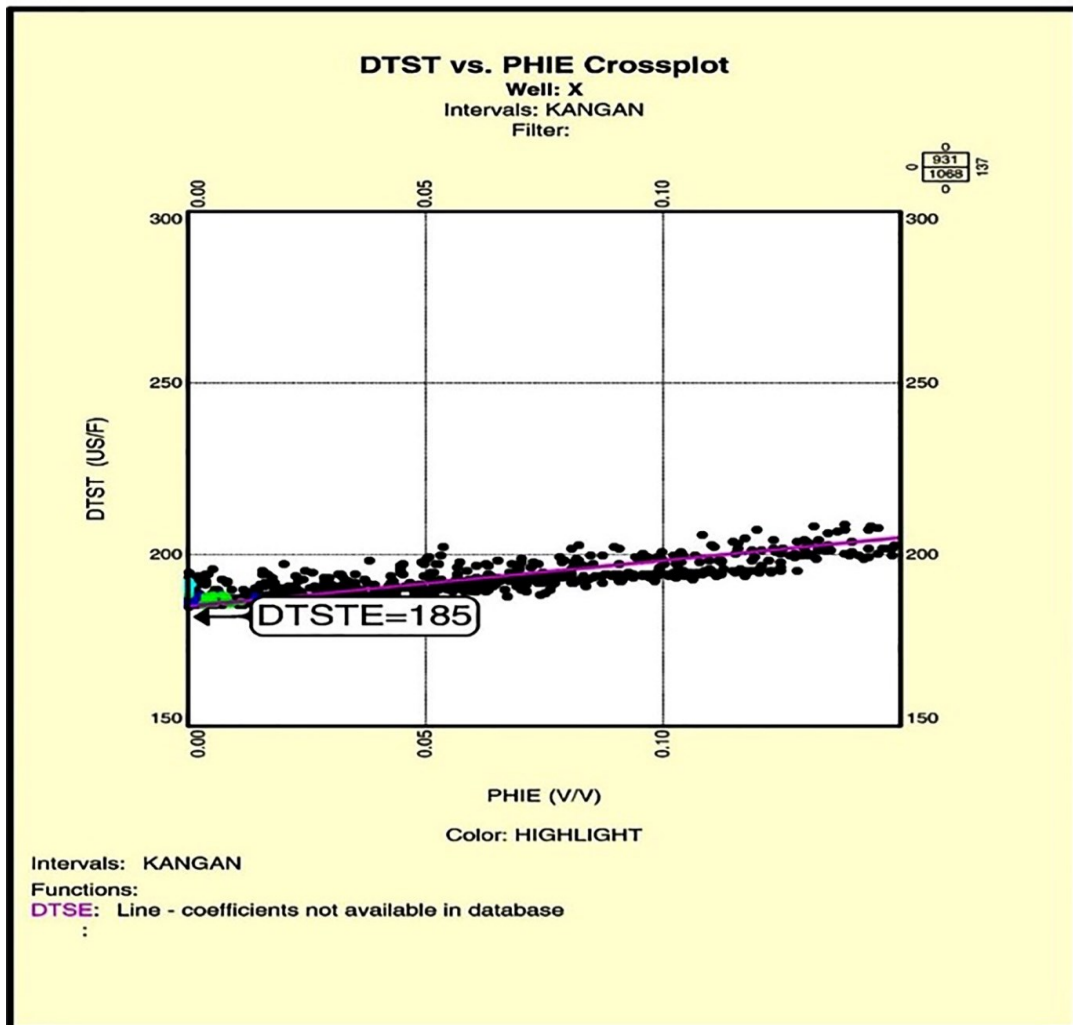
۱- محاسبه میانگین کندی موج استونلی در مناطق ناتراوا، که در این تحقیق مقدار ۱۸۷ میلی ثانیه بر فوت به دست آمد.

۲- با استفاده از نمودار تقاطعی کندی موج استونلی در مقابل تخلخل مؤثر در بازه صفر تا ۰/۰۵.

در این مطالعه با توجه به دقت روش دوم، این روش را ملاک قرار داده و مقدار کندی استونلی منطقه ناتراوا ($DTSTE$) ۱۸۵ میلی ثانیه بر فوت تعیین شد (شکل ۱.۴.۲).

۲.۴.۲ محاسبه تراوایی هر یک از گروه‌های آرامش با استفاده از روش FZI - استونلی

جهت تعیین تراوایی با روش FZI - استونلی به پارامترهای کندی موج برشی، کندی موج استونلی، کندی موج استونلی منطقه ناتراوا، تراوایی مغزه، تخلخل مؤثر و حجم هر کانی (حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی نگارها)، چگالی و فاکتور



شکل ۱.۴.۲ نمودار متقاطع (عرضی) کندی موج استونلی در برابر تخلخل مؤثر

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

برای عمق‌های مختلف به دست می‌آید، به طوری که بهترین تطابق بین تراوایی و شاخص تراوایی برقرار شود. جدول ۱.۴.۲ مقادیر فاکتور شاخص تطابق حاصل شده را برای کانی‌های مختلف برای هر گروه نشان می‌دهد.

پس از محاسبه شاخص تراوایی استونلی از رابطه ۱۵، با استفاده از روابط ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ فاکتور شاخص تطابق (IMF)، برای کانی‌های غالب تشکیل دهنده سازنده صورت زیر تعیین گردید. به این صورت که با قرار دادن تراوایی‌های مغزه در رابطه ۲۰ مقادیر شاخص منطقه جریانی (FZI) محاسبه می‌شوند. سپس به کمک رابطه ۱۸ فاکتور شاخص تطابق کل

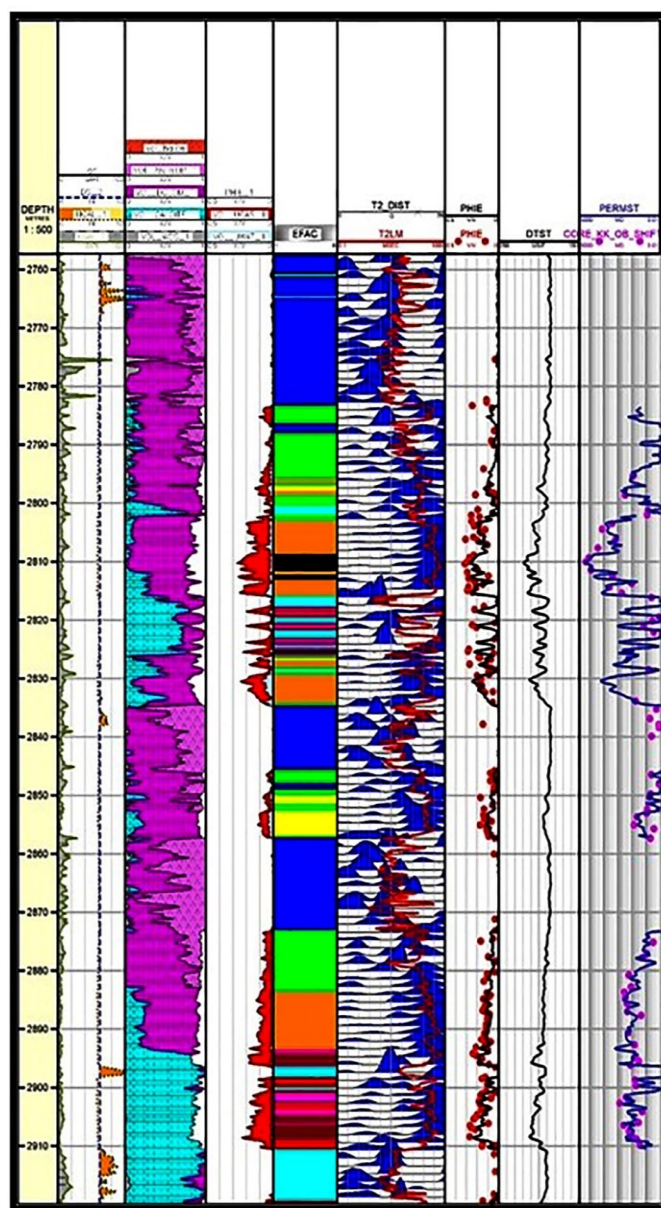
جدول ۱.۴.۲ فاکتور شاخص تطابق محاسبه شده برای هر کانی

فاکتور شاخص تطابق	دولومیت	کلسیت
HFU-4	15	2.9
HFU-5	32	2.9
HFU-6	32	7.52
HFU-7	32	10.49
HFU-8	32	4.2
HFU-9	72	2.9

استونلی به نام $PERM_ST$ در قسمت^{۱۶} اول از سمت راست با رنگ آبی نمایش داده شده است.

برای گروه‌های آرامش ۱ و ۲ و ۳ چون ناتراوا و غیرمخزنی هستند، شاخص فاکتور تطابق محاسبه نشد. از طرفی تراوایی مغزه در این گروه‌های آرامش موجود نیست. شکل ۲.۴.۲ تراوایی محاسبه شده از روش FZI - استونلی را در کنار تراوایی و تخلخل مغزه و همچنین لیتولوژی و سیال سازنده را نشان می‌دهد. در این شکل تراوایی محاسبه شده از روش FZI -

¹⁶ Track



شکل ۲.۴.۲ تراوایی محاسبه شده از روش *FZI*- استونلی در کنار تراوایی و تخلخل مغزه و همچنین لیتولوژی و سیال سازند

۳. بحث و نتیجه‌گیری

نظر گرفت. یکی از عوامل مؤثر بر تعیین تراوایی با استفاده از امواج استونلی مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ است که اگر مقدار آن به درستی انتخاب نشود، مقادیر تراوایی محاسبه شده فاقد دقت کافی خواهند بود. همچنین یکی از روش‌های تعیین غیر مستقیم تراوایی، استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (*NMR*) است. استفاده از این نگار در بررسی خواص سازندهای ماسه‌سنگی بسیار متداول است اما

مزیت اصلی استفاده از امواج استونلی در تخمین تراوایی این است که با ثبت خاصیت ذاتی موج استونلی، که همان تأثیرپذیری از تراوایی است و کمی کردن رابطه پارامترهای فیزیکی این موج و تراوایی، یک نگار پیوسته از تغییرات تراوایی در سرتاسر چاه را تهیه کرد. جهت محاسبه دقیق تراوایی با این روش، تمام عوامل اثرگذار بر محاسبه تراوایی را باید در

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

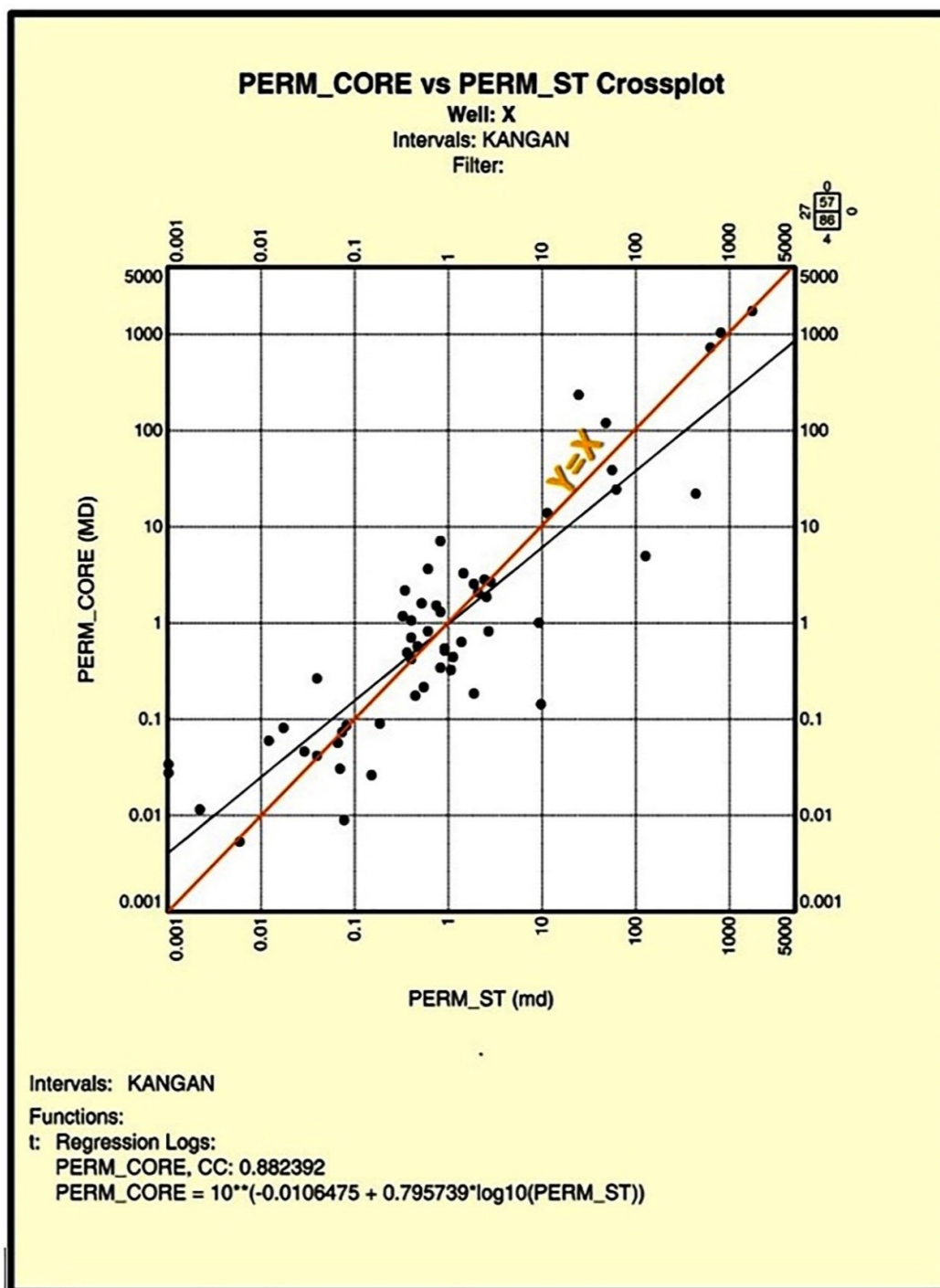
چاه و برداشته شدن فشار لیتواستاتیکی از روی آن، افزایش حجم در نمونه مغزه صورت گرفته، که این افزایش حجم با توجه به تراکم‌پذیری سنگ و سیال، بیشترین تأثیر را بر روی اندازه دهانه حفرات و طبعاً تراوایی دارد. همچنین با حذف فشار، احتمال ایجاد ترک‌های بسیار ریز و متصل شدن حفره-هایی که در شرایط مخزن جزء تخلخل مؤثر محاسبه نمی‌شوند نیز وجود دارد، این امر در مخازن کربناته که عموماً ترک‌ها بستر ایجاد جریان در مخزن هستند، بیشترین تأثیر را بر روی تراوایی می‌گذارد، چرا که افزایش باز شدگی ترک، به شدت روی تراوایی تأثیرگذار است.

در این مطالعه با استفاده از روش FZI - استونلی و به‌کارگیری واحدهای جریانی حاصل شده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای، بهترین تخمین از تراوایی حاصل گردید و مناطق با تراوایی بالا شناسایی شد تا بتوان مشکل ناهمگنی و عوامل مؤثر بر دیاژنز را در تراوایی تشخیص داد. در نهایت میزان تراوایی با همبستگی $0/88$ با استفاده از روش FZI - استونلی تخمین زده شد.

ارزیابی سازندهای کربناته با این نگار مشکل‌تر است و عوامل NMR مورد استفاده در تعیین تراوایی به صورتی غیرقابل پیش‌بینی تغییر می‌کنند. در این بخش از مطالعه، تراوایی محاسبه شده از روش FZI - استونلی و تراوایی مغزه مقایسه شد (شکل ۳-۱). با توجه به شکل اکثر نقاط روی خط $Y=X$ قرار گرفته‌اند که نشان دهنده ی عملکرد خوب روش FZI - استونلی در تخمین تراوایی می‌باشد.

برای این مطالعه ضریب همبستگی $0/88$ حاصل گردید که نتیجه قابل قبولی می‌باشد. همان‌طور که نشان داده شده است در نواحی با تراوایی بالا و در مناطق مخزنی، مدل ارائه شده تخمین بهتری داشته است، هر چند که در این نواحی، تعداد داده‌های مغزه کم می‌باشد. این اتفاق به این علت است که با تعیین واحدهای جریانی و به دست آوردن شاخص فاکتور تطابق برای هر یک از کانی‌ها بیشتر ویژگی‌های مخزنی، بافت و ناهمگنی‌های مخزن را در بر می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که از میان مناطق مخزنی، گروه ۵ بیشترین مقدار تراوایی و سنگ آهک‌های متراکم (گروه ۶) کمترین مقدار تراوایی را دارا می‌باشند.

اختلاف بین تراوایی داده‌های مغزه و تراوایی حاصل از موج استونلی مشاهده شده در این مطالعه می‌تواند بدین صورت نتیجه‌گیری شود که پس از خارج کردن مغزه از داخل



شکل ۱.۳ تراوایی محاسبه شده از روش *FZI*- استونلی در مقایسه با تراوایی مغزه

تخمین تراوایی مخازن گازی کربناته با استفاده از نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و شاخص منطقه جریان حاصل از ...

مراجع

اسدی مهماندوستی، ا.، عالیوند، ش.، فلاوند، ه. و رستمی، ع. "بررسی پتروفیزیکی مخزن کربناته ایلام با استفاده از روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR) و داده‌های مغزه در یکی از میدان‌ها نفتی دشت آبادان"، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، بهار ۹۷، سال بیست و هفتم، شماره ۱۰۷، صفحات ۲۴۱ تا ۲۵۲.

اعتمادی کرمانی، ب. و آبدیده، م. "تخمین تراوایی در مخازن کربناته توسط نمودار درون چاهی برشی صوتی"، اولین مسابقه کنفرانس بین‌المللی جامع علوم مهندسی در ایران، ۱۳۹۵.

خیر، ک.، مرادزاده، ع. و تخم چی، ب. "بهبود روش‌های تعیین پارامترهای محاسبه تراوایی مخازن کربناته با استفاده از امواج استونلی"، مجله پژوهش نفت، شماره ۸۹، مهر و آبان ۹۴.

رستگاریا، م. و کدخدائی ایلخچی، ع. "تخمین تراوایی با استفاده همزمان داده‌های سرعت موج استونلی و شبکه‌های عصبی ماشین بردار پشتیبان: مطالعه موردی از میدان چشمه خوش، جنوب ایران"، نشریه Geopersia، دوره دوم، سال ۲۰۱۳، صفحات ۸۷ تا ۹۷.

روستایی، م.، نبی بیدهدی، م.، تدینی، م. و ترابی، س. "به کارگیری نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تراوایی یکی از مخازن نفت سنگین در جنوب ایران"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۳، ۱۳۹۰، صفحات ۲۷ تا ۴۵.

ره سپار، ا.، کدخدائی، ع.، نبی بیدهدی، م. "تعیین رخساره‌های الکتریکی مخزنی با استفاده از روش‌های خوشه‌سازی در بخش عرب در چاه 2S-05 میدان نفتی سلمان"، نشریه علمی پژوهشی پژوهش نفت، شماره ۸۷، ۱۳۹۵، صفحات ۱۰۷ تا ۱۱۷.

عزتی، م.، عزیززاده، م.، ریاحی، م.، ع.، فتاح پور، و. و هنرمند، ج. "کاربرد لاگ DSI در ارزیابی ژئومکانیکی و پتروفیزیکی مخازن کربناته: مطالعه موردی در یکی از میدان‌ها جنوب غرب ایران"، نشریه علمی پژوهشی پژوهش نفت، شماره ۱۰۷، مهر و آبان ۱۳۹۸، صفحات ۳۷ تا ۵۰.

عزیزی، ی.، شادمنامن، ن. "پیش‌بینی تراوایی سنگ مخزن کربناته با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان در یکی از مخازن نفتی ایران"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۳، شماره ۲، تابستان ۹۶.

کارگر، ز.، مجرد، ح.، و خوش‌سیما، ف. "چاه‌نگاری به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای اصول و کاربردها"، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۹۰، ۳۶۰ صفحه.

مجرد، ح. و کارگر، ز. "محاسبه حجم سیالات مرزی و آزاد و تعیین نفوذپذیری مخازن هیدروکربنی به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای"، مجله پژوهش نفت، شماره ۷۷، صفحات ۳۴ تا ۴۳، ۱۳۹۳.

هداوند، م. و مرادزاده، ع. "تخمین تراوایی مخازن نفتی از طریق بررسی امواج استونلی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود، ایران، ۱۳۸۵.

هنرمند، ج. و اسعدی، ع. "کاربرد مفهوم رخساره منفذی در تخمین تراوایی مخازن کربناته، مطالعه موردی از سازند سروک در یکی از میدان‌ها نفتی جنوب غرب ایران"، مجله پژوهش نفت، شماره ۹۵، مهر و آبان ۹۶.

Ahr W.M., "Geology of carbonate reservoirs," John Wiley and Sons, Chichester, p.296, 2008.

Al Adani N. and Barati A., "Permeability estimation from stoneley waves," SLB, 2003.

Al-Mahrooqi SH, Grattoni CA, Moss AK, Jing XD. An investigation of the effect of wettability on NMR characteristics of sandstone rock and fluid system. Journal of Petroleum Science and Engineering 2003 Sep 1; 39 (389-398):4

Brie A., Endo T., Johnson D.L. and Pampuri F., "Quantitative formation permeability evaluation from stoneley waves," PE Reservoir Eval & Eng., Vol.3, No.2, 2000.

- Chehrizi A., and Rezaee R., "A systematic method for permeability prediction, a Petro- Facies approach," Journal of Petroleum Science and Engineering Vol. 11, No.3, 99.1-20, 2014.
- Freedman R. Advances in NMR logging. Journal of Petroleum Technology. 2006 Jan 1; 580(01): 60-66.
- Georgi, D. T., and Menger, S.T., "Reservoir quality, porosity and permeability relationship, in Stratigraphie und Lithologie in der geophysikalischen Exploration", edited by L. Dresen, J. Fertig, H. Rüter, and W. Budach, 12th Mintrop Seminar, Münster, 1994.
- Guan W., Hu H. and Wang Z., "Permeability inversion from low frequency seismic logs in fluid saturation porous formation, Geophysical Prospecting, Vol.61, Issue 1, 2013.
- Kharat, R., Nazari, M., "Permeability prediction of uncored interval: a case study of bangestan field," SPE 141122, 2010.
- Kumar A., Klimentons T. and Sakar A., "Permeability from stoneley waves in gas saturated sands," SPWA 49th Annual Logging Symposium, Austin, Texas, 25-28 May, 2008.
- Kenyon B., Kleinberg R., Straley C., Gubelin G., Morriss C. Nuclear Magnetic resonance imaging- technology for 21st century. Oilfield review. 1995; 7(3):19-33.
- Lucia F.J., "Carbonate reservoir characterization," Springer-Verlag Berlin, p.341, 2007.
- Moore C.H. and Wade W.J., "Carbonate reservoir porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework," 2nd ed. Elsevier, Amsterdam, p.444, 2013.
- Ohen, A. H., Ajufo, A., and Curby, F. 1995. "A Hydraulic (Flow) Units Based Model for the Determination of Petrophysical Properties from NMR Relaxation Measurements," paper SPE 30626 presented at the 1995 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, 22-25 October 1995.
- Rezaee M.R., Jafari A., and Kazemzadeh E., "Relationship between permeability, porosity and pore throat size in carbonate rocks using regression analysis and neural networks," Journal of Geophysics and Engineering Vol.3, No.4, pp.370-376, 2006.
- Serra, O., "Well Logging Handbook Editions Technip", 1st ed. Elsevier, Amsterdam, June 2008, 608 Pages.