

بهبود روش‌های تعیین پارامترهای محاسبه تراوایی مخازن کربناته با استفاده از امواج استونلی

کیوان خیر،^۱ علی مرادزاده^{۲*} و بهزاد تخم‌چی^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۶

چکیده

آزمایش مغزه دقیق‌ترین و البته پرهزینه‌ترین روش اندازه‌گیری تراوایی است و برای ارایه روش‌های جایگزین تخمین تراوایی بسیار تلاش شده است. یکی از روش‌های تخمین غیرمستقیم تراوایی استفاده از امواج استونلی است. مزیت اصلی استفاده از این امواج در تخمین تراوایی آن است که با ثبت خاصیت ذاتی موج، که متأثر از تراوایی است، و کمی کردن رابطه پارامترهای فیزیکی این موج و تراوایی، می‌توان یک نگار پیوسته از تغییرات تراوایی در سرتاسر چاه تهیه کرد. در محاسبه تراوایی از این طریق، پارامترهای بسیاری از جمله تخلخل، لیتولوژی، دقت تراوایی اندازه‌گیری شده به کمک مغزه یا ابزار MDT و مقدار کندشدگی استونلی محاسبه شده در زمینه سنگ تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامترهای گفته شده در محاسبه کمی تراوایی پرداخته شده است. براساس نتایج می‌توان دریافت 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. علاوه بر این، وقتی پارامتر تخلخل در محاسبه تراوایی تأثیر داده شده، نتایج تطابق بیشتری با مقادیر تراوایی حاصل از ابزار MDT دارند.

کلمات کلیدی: نگارهای پتروفیزیکی، تراوایی، موج استونلی، ابزار MDT، تخلخل.

مقدمه

دهه ۱۹۷۰ لبرتون بحث استفاده از امواج آکوستیک در محاسبه تراوایی را مطرح کرد [۲]. بری و همکارانش رابطه‌ای را ارایه کردند 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 [۳].

تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن نفتی است که در بسیاری از محاسبات و مدل‌سازی‌های مخزن نقشی موثر ایفا می‌کند [۱]. محاسبه تراوایی با کمک امواج استونلی یکی از روش‌های اندازه‌گیری پیوسته در سرتاسر گمانه اکتشافی بدون استفاده از ضرایب تجربی است. در

حرکت سیال داخل سازند، با واحد میلی‌داری بر سانتی‌پواز، است. بنابراین در صورت در اختیار بودن ویسکوزیته سیال داخل سنگ و مقادیر موج استونلی که ابزار DSI ثبت می‌کند، می‌توان مقدار تراوایی را به صورت کمی محاسبه کرد. از عوامل تاثیرگذار بر کندشدگی موج استونلی منتشرشده در داخل سازند می‌توان به سنگ‌شناسی، تاثیر اندود گل ایجادشده روی دیواره چاه در مقابل زون تراوا و نوع سیال داخل سازند اشاره کرد [۷].

به کمک رابطه زیر که برای کمی کردن تراوایی با استفاده از کندشدگی موج استونلی استفاده می‌شود، مقدار تغییرات تراوایی به صورت کمی محاسبه و در قالب یک نگار پیوسته در مقابل مخزن رسم می‌شود [۴]:

$$K = \frac{DT_{st} - DT_{st np}}{\sum_{i=1}^n m_i v_i} \quad (1)$$

DT_{st} ، مقدار کندشدگی کلی موج استونلی؛ $DT_{st np}$ ، کندشدگی موج استونلی در زون ناتراوا؛ m_i ، فاکتور تطابق موج استونلی و هر نوع لیتولوژی موجود در سازند و V_i ، حجم هر نوع از لیتولوژی‌های موجود است [۸]. با توجه به رابطه (۱)، تا به این جا عوامل تاثیرگذار بر محاسبه تراوایی فاکتور تطابق موج استونلی با تراوایی سازند و مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ هستند. تعیین درست فاکتور تطابق به دقت آزمایش‌های مغزه انجام‌شده، تراوایی به دست‌آمده از ابزار MDT و محاسبه دقیق درصد حضور هر مولفه تشکیل‌دهنده سازند وابسته است. مقدار $DT_{st np}$ را می‌توان با استفاده از دو روش متفاوت محاسبه کرد. در روش اول با رسم نمودار متقاطع تخلخل نوترونی - کندشدگی موج استونلی و تعیین عرض از مبدا بهترین خط برازش شده به داده‌های رسم‌شده در یکی از زون‌های ناتراوای سنگ، مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ به صورت یک عدد ثابت محاسبه می‌شود. در روش دوم، مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ به صورت نگاری پیوسته به شرح زیر به دست می‌آید [۹].

ال‌آدانی و براتی تاثیرات 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 [۴]. آنها با استفاده از تفکیک این دو موج بر اساس روابط، فاکتوری را ارایه و با استفاده از آن و لحاظ کردن تغییرات لیتولوژی در سرتاسر گمانه مقدار تراوایی را در کل گمانه به صورت پیوسته محاسبه کردند. اصغری و همکارانش مزیت استفاده از امواج استونلی به دست‌آمده از سوند DSI به دیگر روش‌های محاسبه تراوایی را دینامیک بودن این روش اعلام کردند [۵]. در ادامه همچنین گوان و همکارانش تغییرات موج استونلی را در سنگ مخزن با منافذ اشباع کامل از آب بررسی و با استفاده از مدل‌سازی معکوس مقدار تراوایی را به صورت کمی محاسبه کردند و نموداری پیوسته از تراوایی را در مخزن کربناته مطالعه‌شده به دست آوردند [۶]. در این تحقیق جهت تخمین تراوایی به کمک موج استونلی، با توجه به این که تغییرات کندشدگی موج استونلی به‌طور کیفی نشانگر تغییرات تراوایی هستند، کندشدگی موج استونلی به دست‌آمده از ابزار DSI با اطلاعات موجود از ابزار MDT کالیبره و رابطه کیفی آنها به صورت کمی ارایه می‌شود و در ادامه پارامترهای موثر بر مقادیر تراوایی به دست آمده سنگ مخزن کربناته شناسایی خواهند شد.

روش‌شناسی تحقیق

امواج استونلی در فرکانس‌های پایین همانند یک موج لوله‌ای در درون چاه منتشر می‌شوند. زمانی که موج استونلی از قسمت تراوا و یا دارای شکستگی عبور می‌کند، مقداری از انرژی موج کاهش می‌یابد که نتیجه آن میرایی موج استونلی و بالا رفتن مقدار کندشدگی است. شکستگی‌ها و نواحی تراوا تاثیر متفاوت بر موج استونلی دارند. باید توجه داشت که پارامتر اندازه‌گیری‌شده با موج استونلی دقیقاً تراوایی نیست، بلکه بیش‌تر نشان‌دهنده قابلیت

آبادان، در انتهای جنوب غرب ایران، است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی جنوب غرب ایران را نشان می‌دهد که منطقه مطالعه‌شده با دایره آبی‌رنگ در آن مشخص شده است. در این میدان زون‌هایی از سازندهای سرگلو و گرو، از لحاظ ضخامت و مقدار ماده آلی کل، اصلی‌ترین زون‌های سنگ منشا هستند و زون‌هایی از سازندهای کژدمی و نیریز را می‌توان به‌عنوان زون‌های فرعی سنگ منشا در نظر گرفت. در چاه مطالعه‌شده، سازند فهلیان سنگ مخزن اصلی است که با مرز تدریجی روی سازند گرو و با مرز ناپیوسته در زیر سازند گدوان جای دارد. نگارهای استفاده‌شده شامل نگارهای قطرسنجی، چگالی، مقاومت ویژه، گاما، نوترون، صوتی و نگار تصویری موج برشی (DSI) هستند. مطابق ارزیابی پتروفیزیکی در یک کار تحقیقی جداگانه، لیتولوژی غالب در چاه مطالعه‌شده سنگ‌آهک است و در بعضی از نقاط میان‌لایه‌هایی از ایلیت نیز مشاهده می‌شود. مقدار متوسط تخلخل در میدان مطالعه‌شده حدود ۱۸٪ و میانگین درصد اشباع هیدروکربور در زون مخزنی آن در حدود ۸۳٪ است.

نتایج و بحث

در این مطالعه از مقادیر تراوایی به‌دست‌آمده از ابزار MDT برای تعیین فاکتور تطابق و مقایسه نتایج نهایی با مقادیر واقعی تراوایی سازند استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد یکی از عوامل تاثیرگذار بر محاسبه تراوایی با استفاده از امواج استونلی مقدار فاکتور تطابق محاسبه‌شده است که دقت محاسبه آن به دقت مقادیر تراوایی حاصل از MDT و یا آزمایش‌های مغزه بستگی دارد؛ بنابراین قبل از استفاده از مقادیر تراوایی MDT باید از صحت آنها مطمئن شد. به‌عبارتی نقاطی که آزمون MDT برای آنها انجام شده نباید نقاط پرفشار^۱ و یا در زون‌های ریزشی چاه باشند.

زمان گذر موج استونلی از داخل دیواره چاه را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$S^2 = S_e^2 + S_p^2 \quad (2)$$

S ، زمان گذر کلی موج استونلی در دیواره چاه؛ S_e ، زمان گذر موج استونلی در ناحیه نفوذناپذیر و تراوایی نزدیک به صفر و S_p ، زمان گذر افزوده‌شده به زمان گذر کلی موج استونلی در اثر تراوایی سازند برحسب میکروثانیه بر فوت است. در رابطه (۲) مقدار S_e^2 را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

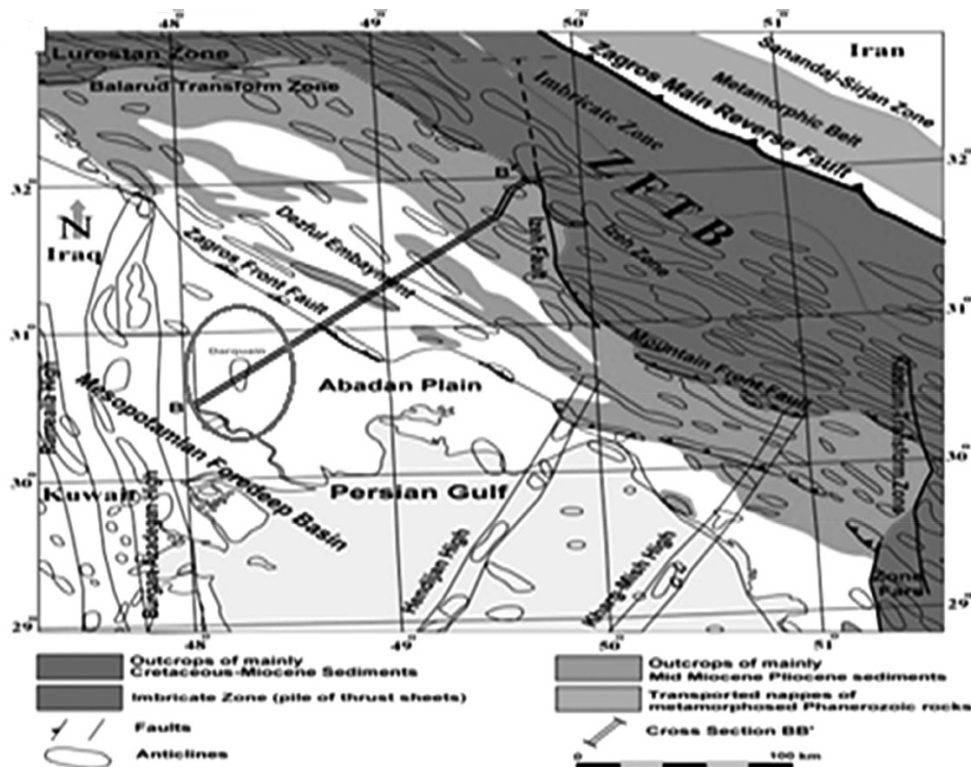
$$S_e^2 = \frac{\rho_f}{\rho_b} (S_s)^2 + S_f^2 \quad (3)$$

S_s ، زمان گذر موج برشی اندازه‌گیری‌شده با ابزار برحسب میکروثانیه بر فوت؛ S_f ، زمان گذر موج استونلی در سیال داخل سازند؛ ρ_f ، چگالی سیال داخل سازند و ρ_b ، چگالی کل سازند است. بنابراین با رسم مقاطع S_e^2 در مقابل S_s^2/ρ_b ، شیب خط در طول نقاط با تراوایی صفر برابر با ρ_f و عرض از مبدا S_f^2 است. با به دست آوردن مقدار S_f^2 می‌توان مقدار S_e^2 را با استفاده از رابطه ۳ در سرتاسر چاه محاسبه و در نهایت مقدار حاصل را از S^2 موجود در رابطه ۲ کسر کرد که نتیجه آن بیان‌گر مقدار زمان گذر موج استونلی در ناحیه تراواست. با گذاردن دو مقدار فاکتور تطابق کندشدگی موج استونلی با تراوایی سازند و مقدار کندشدگی موج استونلی محاسبه‌شده در زمینه سنگ در رابطه ۱، مقدار تراوایی به‌صورت نگار پیوسته محاسبه می‌شود.

در این تحقیق مقدار تراوایی براساس رابطه ۱ و روش‌های موجود برای تعیین پارامترهای این رابطه به‌صورت کمی و پیوسته محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند.

داده‌ها

مخازن اصلی مطالعه‌شده سازندهای ایلام، سروک و فهلیان در میدان دارخوین هستند. میدان نفتی دارخوین تاقدیسی با روند شمالی- جنوبی در دشت



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی مربوط به جنوب غرب ایران؛ بیضی منحنی شده، محدوده مخزن دارخوین است [۹].

n ، تعداد مولفه‌های تشکیل‌دهنده سازند و m_1 ، ضریب تطابق برای حجم هر مولفه لیتولوژی (V_i) است. همان‌طور که در تفسیر پتروفیزیکی سازند فهلیان مشاهده شد، این سازند از سنگ‌آهک و مقداری ایلیت تشکیل شده است؛ لذا رابطه ۴ برای این سازند به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$M = \sum_{i=1}^2 m_i V_i = m_{\text{lime}} V_{\text{lime}} + m_{\text{ill}} V_{\text{ill}} \quad (5)$$

در این رابطه مقصود از m_{lime} و m_{ill} به ترتیب ضریب تطابق کندشدگی موج استونلی با هر یک از مولفه‌های آهک و ایلیت است و V_{ill} و V_{lime} نیز به ترتیب میانگین حجم آهک و ایلیت هستند. برای محاسبه تراوایی در سرتاسر سازند فهلیان با استفاده از امواج استونلی، محاسبه هر یک از ضرایب تطابق آهک و ایلیت ضروری است. اما به دلیل حضور دو مجهول در رابطه ۵، دستگاه معادلاتی باید مطابق دستگاه معادلات ارایه‌شده در رابطه ۶ تشکیل و با استفاده از آن مقدار مجهولات مسئله تعیین شود:

بنابراین باید نقاط برداشت‌شده را با نگار قطرسنجی تطبیق داد و نقاطی را که در زون‌های ریزشی چاه قرار دارند حذف کرد. علاوه بر این، چون در نقاط پر فشار، فشار سازند بیش از فشار واقعی آن است، کافی است نقاط MDT براساس فشار این نقاط رسم و نقاطی که از روند معمول پیروی نمی‌کنند حذف شوند.

پس از تعیین نقاط پرفشار، نوبت به محاسبه فاکتور تطابق کندشدگی موج استونلی با تراوایی سازند می‌رسد. از آن جایی که کندشدگی موج استونلی و تراوایی مستقیماً از لیتولوژی و ترکیب‌های حجمی مختلف کانی‌ها تأثیر می‌پذیرند، باید ضریب تطابق کندشدگی موج استونلی و تراوایی را تحت تأثیر مولفه‌های تشکیل‌دهنده هر سازند با ترکیب‌های حجمی مربوطه تعیین کرد [۶]. ضریب تطابق این دو پارامتر را می‌توان با رابطه زیر نشان داد:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i V_i \quad (4)$$

در سازند بررسی و در محاسبات لحاظ می‌شود. در شکل ۲ چگونگی تغییرات کندشدگی موج استونلی در برابر تراوایی حاصل از MDT در زون نفتی چاه مذکور نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۲ بهترین خط برازش شده به داده‌ها از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$DT_{st} = 0.75 KMDT + 245 \quad (7)$$

در شکل ۳ نیز تغییرات کندشدگی موج استونلی در برابر تراوایی MDT در زون آبی چاه DQ10 نشان داده شده‌اند. معادله بهترین خط برازش شده به داده‌های نشان داده شده در شکل ۳ مطابق با رابطه زیر است:

$$DT_{st} = 1.18 KMDT + 228 \quad (8)$$

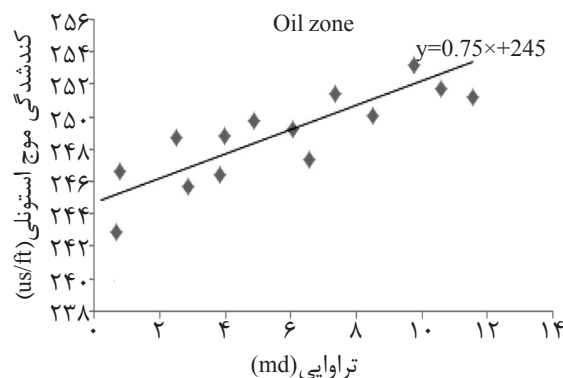
با توجه به معادله بهترین خط برازش شده به داده‌ها در زون آبی، شیب این خط، که برابر با ضریب تطابق بین کندشدگی موج استونلی و تراوایی MDT در زون آبی است، ۱/۱۸ است. چون ضرایب تطابق برای هر مولفه لیتولوژی به نواحی با حجم‌های مختلف سنگ آهک و ایلیت مربوط‌اند، میانگین حجم سنگ آهک و ایلیت در دستگاه معادلات ۶ قرار داده و با حل آن مقادیر ضریب تطابق برای سنگ آهک و ایلیت به ترتیب ۰/۳۵ و ۸۵/۲۲ است. حال نوبت به محاسبه کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ می‌رسد. با تشکیل نمودار متقاطع تخلخل نوترونی- تراوایی مطابق شکل ۴، مقدار کندشدگی موج استونلی ۲۲۱ $\mu\text{s}/\text{ft}$ محاسبه شده است.

$$\begin{cases} m_{oil} V_{oil} + m_{lime} V_{lime} = M \\ m_{oil} V'_{oil} + m_{lime} V'_{lime} = M' \end{cases} \quad (6)$$

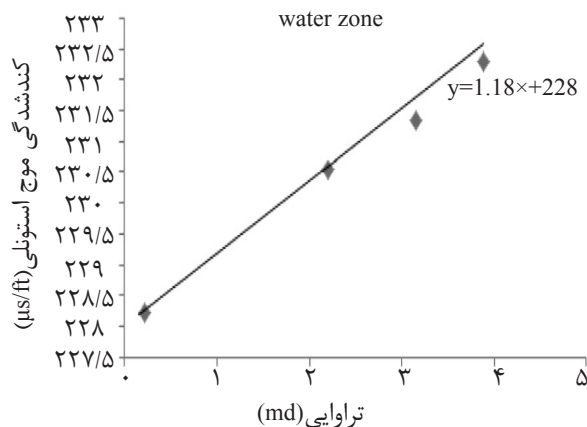
همان‌طور که در این دستگاه معادلات مشاهده می‌شود، رابطه ۵ دو مرتبه تکرار شده با این تفاوت که رابطه اول مربوط به زون نفتی سازند فهلیان و رابطه دوم مربوط به زون آبی این سازند است؛ بنابراین لازم‌ه حل این دستگاه شناسایی زون‌های نفتی و آبی موجود در سازند فهلیان است.

براساس ارزیابی‌های پتروفیزیکی سازند فهلیان، این سازند چهار زون نفتی و پنج زون آبی دارد که از این میان، زون واقع در عمق ۴۴۲۰ تا ۴۵۳۶ m زون نفتی اصلی و زون واقع در عمق ۴۳۵۰ تا ۴۴۱۰ m بزرگ‌ترین زون آبی این سازند است. دیگر زون‌ها ضخامتی کم‌تر از این دو زون دارند. تعیین زون‌های آبی و نفتی در این سازند براساس مقدار حدی اشباع آب ۳۰٪ است. باید گفت که مقدار حدی درصد اشباع آب که مبنای این تقسیم‌بندی قرار گرفته براساس تغییرات درصد اشباع آب در سرتاسر سازند تعیین شده و یک مقدار حدی تجربی است که ممکن است در سازندها و یا در میداین دیگر این مقدار متفاوت باشد.

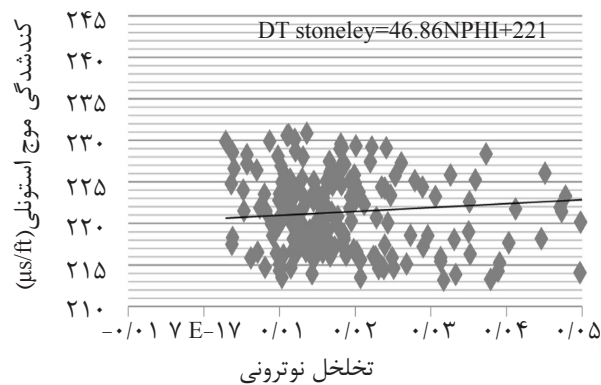
پس از تعیین زون‌های نفتی و آبی، داده‌های مربوط به کندشدگی موج استونلی و تراوایی که از ابزار MDT به دست آمده‌اند در هر یک از زون‌ها جداگانه بررسی می‌شوند و نحوه رفتار تراوایی و موج استونلی و تاثیرپذیری هر کدام از آنها از نوع سیال موجود



شکل ۲ تغییرات کندشدگی موج استونلی در برابر تراوایی به دست آمده از ابزار MDT در زون نفتی در عمق ۴۴۲۰-۴۵۳۶ m سازند فهلیان، چاه DQ10.



شکل ۳ تغییرات کندشدگی موج استونلی در برابر تراوایی MDT در زون آبی در عمق ۴۳۵۰-۴۴۱۰ m سازند فهلیان، چاه DQ10.

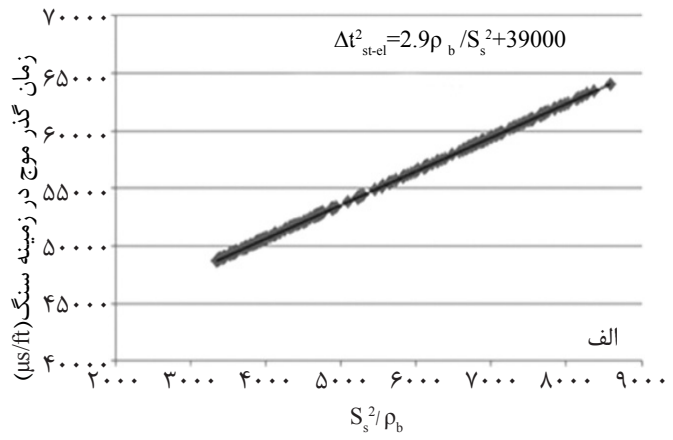


شکل ۴ تعیین کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ با استفاده از نمودار متقاطع تخلخل نوترونی - کندشدگی موج استونلی.

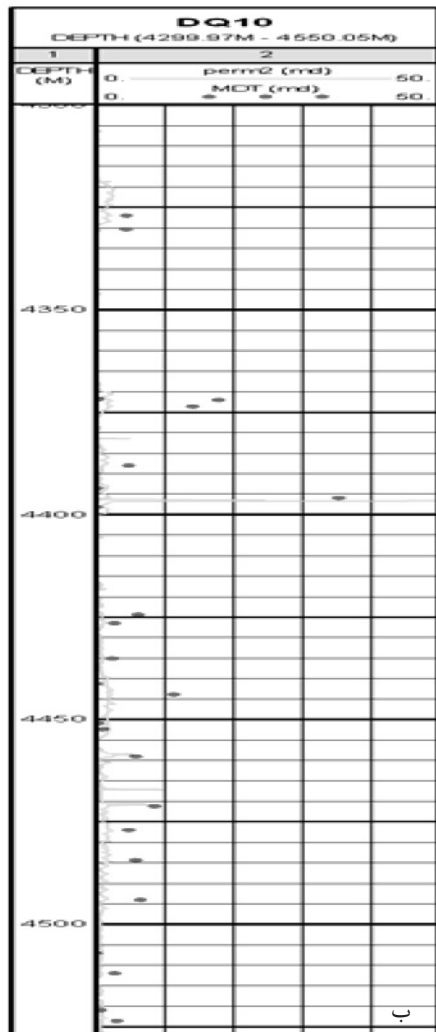
علاوه بر این، با تشکیل نمودار متقاطع S_e^2 در مقابل S_f / ρ_b ، مقدار S_f محاسبه شده است و با استفاده از روابط ۲ و ۳ تغییرات DT_{stnp} به صورت پیوسته محاسبه و در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. شیب خط برازش شده به داده‌ها در نمودار رسم شده در شکل ۶ (مقدار ۰/۷۵) ضریب تطابق کندشدگی موج استونلی و تراوایی MDT در زون نفتی است. حال با استفاده از هر دو مقدار DT_{stnp} محاسبه شده، تراوایی با استفاده از رابطه ۱ تعیین می‌شود. در شکل (۶-الف)، نگار تراوایی محاسبه شده با استفاده از مقدار پیوسته DT_{stnp} است و شکل (۶-ب) نگاری است که در آن مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ به صورت عدد ثابت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، نتایج به دست آمده از حالتی که تراوایی با مقدار پیوسته

DT_{stnp} محاسبه شده، انطباق بیشتری با مقادیر تراوایی MDT دارد. علاوه بر این، با توجه به نمودارهای متقاطع شکل ۷، مشاهده می‌شود که ضریب هم‌بستگی در حالتی که از مقدار ثابت DT_{stnp} استفاده شده ۰/۴۳ است و در حالتی که از مقدار DT_{stnp} پیوسته استفاده شده به ۰/۷۱ رسیده است، زیرا در حالتی که مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ به صورت یک عدد ثابت در نظر گرفته می‌شود، حساسیت DT_{stnp} نسبت به تغییرات لیتولوژی نادیده گرفته می‌شود، بنابراین در محاسبه تراوایی تاثیر تغییر لیتولوژی تا حدودی کاهش می‌یابد. اما در حالتی که DT_{stnp} پیوسته است، تاثیر تغییر لیتولوژی در محاسبه کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ کامل در نظر گرفته شده، در نتیجه مقادیر محاسبه شده تراوایی به مقادیر واقعی تراوایی سازند نزدیک‌تر است؛ بنابراین بهتر است مقدار DT_{stnp} به صورت پیوسته در رابطه ۱ قرار گیرد.

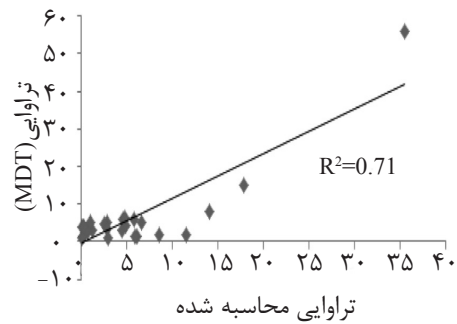
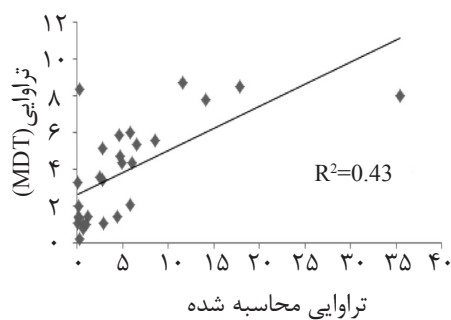
همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، نتایج به دست آمده از حالتی که تراوایی با مقدار پیوسته



شکل ۵ محاسبه تغییرات کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ به صورت پیوسته.



شکل ۶ الف) نگار تراوایی محاسبه‌شده با استفاده از مقدار پیوسته DT_{stnp} و ب) نگار تراوایی که در آن مقدار DT_{stnp} به صورت عدد ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل ۷ مقایسه نتایج تراوایی محاسبه شده با دو مقدار DT_{stnp} ثابت (شکل چپ) و پیوسته (شکل راست).

مستقیم تراوایی در رابطه ۱ توان‌هایی از تخلخل در این رابطه منظور شدند.

با توجه به این که در مخازن کربناته ناهمگنی تقریباً بالاست، اختصاص دادن یک توان‌نمایی به تخلخل و ضرب کردن آن در رابطه ۱ به نتایجی با دقت بالا نمی‌انجامد. به این دلیل، براساس تغییرات خصوصیات سازند مانند تخلخل، وزن مخصوص، مقدار درصد حضور مولفه‌های تشکیل‌دهنده لیتولوژی و تغییرات نگار صوتی، قسمت مطالعه شده سازند فهلیان به پنج بخش تقسیم شد. پس از تقسیم‌بندی براساس خصوصیات ذکر شده، توان‌های نمایی با صحیح و خطا به شکل جدول ۱ تعیین گردید. با توجه به توضیحات بالا رابطه ۱۰ را می‌توان در قالب رابطه ۱۱، که کامل‌تر است، ارایه کرد:

$$K = \frac{DT_{st} - DT_{stnp}}{m_{time}V_{time} + m_{ill}V_{ill}} \times (PIGN)^n \quad (11)$$

شکل ۸ نگار نهایی تغییرات تراوایی محاسبه شده با رابطه ۱۱ را نشان می‌دهد. مقادیر محاسبه شده انطباق بالایی با مقادیر تراوایی حاصل از ابزار MDT دارند و ضریب هم‌بستگی مقادیر محاسبه شده با مقادیر واقعی نیز ۸۹٪ است که مقداری قابل قبول است.

بنا بر توضیحات ارایه شده و تغییرات نگار تراوایی می‌توان از جمله عوامل اثرگذار بر محاسبه کمی تراوایی از راه امواج استوئی به تخلخل، کندشدگی موج استوئی در زمینه سنگ و حجم لیتولوژی و دقت ابزار MDT اشاره کرد.

با دقت در نمودار رسم شده در شکل (۶-الف)، در بعضی نقاط عدم تطابق مقدار محاسبه شده با مقادیر واقعی سازند مشاهده می‌شود و ضریب هم‌بستگی ۷۱٪ نیز مقداری قابل قبول برای تعمیم نتایج به کل سازند نیست. دلیل این عدم انطباق در بعضی نقاط آن است که در محاسبه تراوایی با استفاده از رابطه ۱، مقدار پیچ و خم مسیرهای جریانی و شکل کانال‌های ارتباطی حفره‌ها، که بر تراوایی تاثیرگذار هستند، در نظر گرفته نشده‌اند. از آن جایی که پارامتر پتروفیزیکی تخلخل در حقیقت نشان‌دهنده فضای خالی موجود در سنگ است که سیال در آن جریان پیدا می‌کند و به شکل و نحوه ارتباط حفرات به یکدیگر نیز وابسته است، بهترین فاکتور برای ورود به معادله ریاضی ارایه شده در رابطه ۱ پارامتر تخلخل است. چون این سازند حاوی نفت است، مقدار تخلخل میانگین در آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$PIGN = \frac{\phi_N + \phi_D}{2} \quad (9)$$

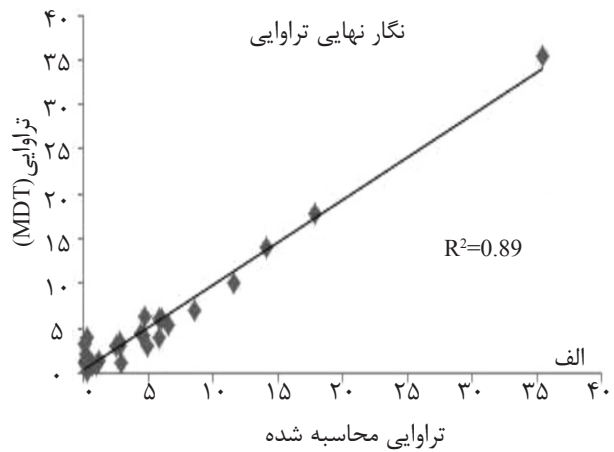
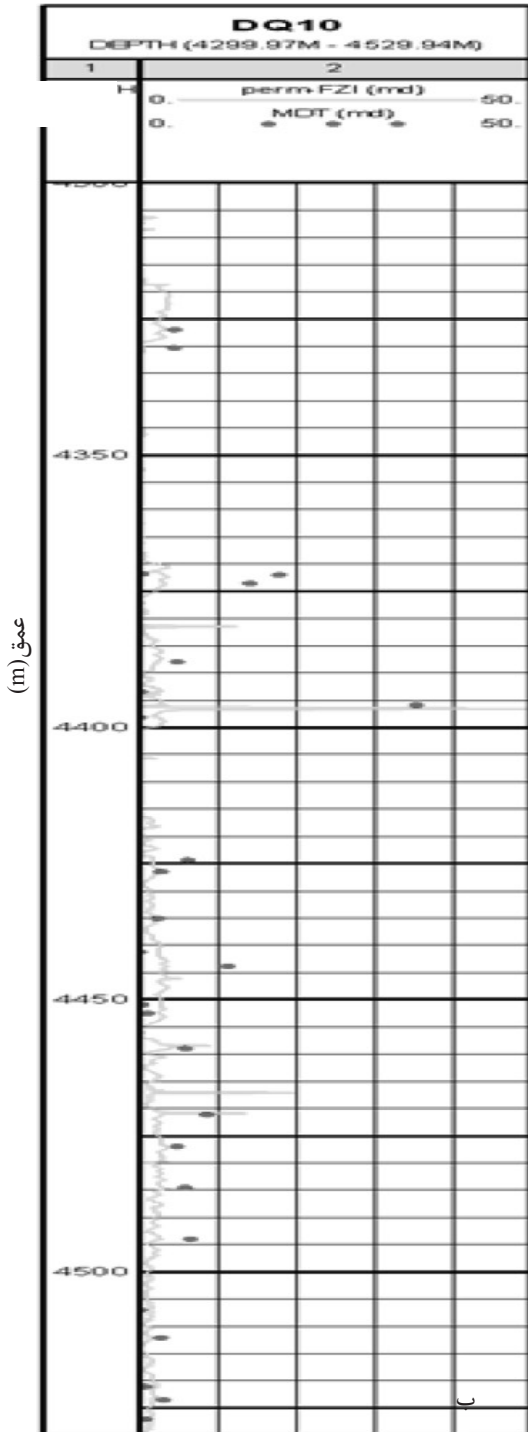
ϕ_N ، تخلخل نوترونی؛ ϕ_D ، تخلخل ناشی از نگار دانسیته و PIGN، تخلخل میانگین است. پس از محاسبه مقدار تخلخل میانگین در سرتاسر سازند، رابطه ۱ به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$K = \frac{DT_{st} - DT_{stnp}}{m_{time}V_{time} + m_{ill}V_{ill}} \times PIGN \quad (10)$$

اما براساس مطالعات انجام شده رابطه تخلخل و تراوایی خطی نیست و نمایی است؛ بنابراین برای رسیدن به یک انطباق قابل قبول بین داده‌های محاسبه و اندازه‌گیری شده، به جای ضرب کردن

جدول ۱ تعیین مقدار توان نمایی تخلخل با استفاده از روش صحیح و خطا در بازه‌های عمقی مختلف مخزن

۴۵۳۰ تا ۴۴۶۹	۴۴۶۹ تا ۴۴۳۸	۴۴۲۹ تا ۴۳۸۹	۴۳۸۹ تا ۴۳۲۹	۴۳۲۹ تا ۴۳۰۵	بازه عمقی (m)
۱	۰/۴	۱/۱	۰/۱	۰/۳	توان



شکل ۸ نگار تراوایی محاسبه‌شده با استفاده از کندشدگی موج استونلی.

نتیجه‌گیری

صورت محاسبه کندشدگی موج استونلی به‌صورت یک نمودار پیوسته دقت تراوایی محاسبه‌شده حدود ۷۱٪ است در حالی که اگر مقدار کندشدگی موج استونلی یک عدد ثابت در نظر گرفته شود، دقت محاسبه تراوایی به ۴۳٪ می‌رسد که اختلافی چشم‌گیر است. تخلخل و چگونگی اعمال اثر آن در محاسبات، توجه به ناهمگنی سنگ مخزن کربناته در تعیین توان نمایی تخلخل و تعیین درست مقدر کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ نیز از دیگر عوامل تاثیرگذار در محاسبه تراوایی هستند، به‌طوری که در نهایت با استفاده از مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ به‌صورت پیوسته و وارد کردن تخلخل با توان نمایی، که براساس ناهمگنی سنگ تعیین شده، تراوایی به‌صورت پیوسته با دقت ۸۹٪ در سرتاسر مخزن محاسبه شد و نگار تغییرات آن به‌دست آمد.

مزیت اصلی استفاده از امواج استونلی در تخمین تراوایی این است که با ثبت خاصیت ذاتی موج استونلی، که همان تاثیرپذیری 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. برای محاسبه دقیق تراوایی با این روش، تمام عوامل اثرگذار بر محاسبه تراوایی را باید در نظر گرفت. نتایج نشان می‌دهند که یکی از عوامل اثرگذار بر تعیین تراوایی با استفاده از امواج استونلی مقدار کندشدگی موج استونلی در زمینه سنگ است که اگر مقدار آن به‌درستی انتخاب نشود، مقادیر تراوایی محاسبه‌شده دقت کافی ندارد. مقدار این پارامتر را هم می‌توان به‌صورت یک عدد ثابت و هم در قالب یک نمودار پیوسته محاسبه کرد. براساس نتایج حاصل از این دو روش، در

مراجع

- [1]. Kharat R. and Nazari M., "Permeability prediction of uncored interval: a case study of bangestan field," SPE 141122, 2010.
- [2]. Kumar A., Klimentos T. and Sakar A., "Permeability from stoneley waves in gas saturated sands," SPWA 49th Annual Logging Symposium, Austin, Texas, 25-28 May, 2008.
- [3]. 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.
- [4]. Al Adani N. and Barati A., "Permeability estimation from stoneley waves," SLB, 2003.
- [۵]. اصغری پ.، نبی بیدهندی م.، ملکی ب. و ثابتی ن. "به‌کارگیری موج استونلی برای تخمین تراوایی سازند در یکی از میادین جنوب غربی ایران"، پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، ۱۳۹۱.
- [6]. Guan W., Hu H. and Wang Z., "Permeability inversion from low frequency siesmoelectric logs in fluid saturation porous formation," Geophysical Prospecting, Vol. 61, Issue 1, 2013.
- [۷]. هداوند م. و مرادزاده ع. "تخمین تراوایی مخازن نفتی از طریق بررسی امواج استونلی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شهروود، ایران، ۱۳۸۵.
- [8]. Gholinejad S. and Masihi M., "A physical-based model of permeability/porosity relationship for rock data of Iran Southern carbonate reservoirs," Iranian Journals of Oil & Gas Science and Technology, Vol. 1, No. 1, 2012.
- [9]. Xiao H., Hengshan H. and Xaiming W., "Finite difference modeling of dipole acoustic logs in a poroelastic formation with anisotropic permeability," Geophysical Journals International, Vol. 192, Issue 1, 2013.