



ارزیابی و مقایسه مدل‌سازی فیزیک سنگ کاستر-توکسوز و شو-پاین در یکی از مخازن هیدروکربوری کربناته ایران

حمید صیفی^{۱*}، بهزاد تخم‌چی^۲ و علی مرادزاده^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

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

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

*نویسنده مسئول مکاتبات: hm.seifi@

چکیده

واژگان کلیدی

تحلیل داده‌های پتروفیزیکی و لرزه‌ای در تمامی مراحل اکتشاف تا توسعه و تولید مخازن هیدروکربوری جایگاه مهمی دارد؛ بنابراین بررسی ارتباط میان پارامترهای کشسانی با خصوصیات مخزن، اهمیت دارد؛ که این موضوع با استفاده از مدل‌های فیزیک سنگ انجام می‌شود. بیشتر مدل‌های فیزیک سنگ برای مخازن هیدروکربوری ماسه سنگی کاربرد دارند. از آنجا که این مدل‌ها تفاوت‌های قابل توجهی با مدل‌های فیزیک سنگ برای مخازن کربناته دارند، لذا انتخاب صحیح مدل مناسب فیزیک سنگ بسیار مهم است. برای این منظور، دو مدل فیزیک سنگی کاستر-توکسوز و شو-پاین که مربوط به مدل‌های میان‌باری هستند؛ در دو چاه هدف واقع در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران ارزیابی شدند. مقایسه دو مدل مذکور و همچنین برآورد درصد نوع حفرات در مخزن مورد مطالعه و از طرفی بررسی حساسیت پارامترهای هر مدل از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد. مدل‌های مذکور با استفاده از دانش ارزیابی سازندهای زمین-شناسی در مقیاس چاه و اطلاعات اشباع سیال و سنگ مخزن ساخته شده است و به منظور تعیین پارامترهای این مدل‌ها از فرآیند وارون‌سازی استفاده شد. به این ترتیب که سرعت‌های موج تراکمی و برشی حاصل از مدل‌سازی با اطلاعات سرعتی موج تراکمی و برشی اندازه‌گیری شده در چاهها، مقایسه شدند. نتایج حاصل از بررسی حاکی از آن است که استفاده از مدل شو-پاین کارایی بالاتری در تخمین پارامترهای کشسانی داشته است. همچنین با توجه این که مدل کاستر-توکسوز یک مدل پایه با فرکانس بالا است و برای مطالعات فراصوتی (اولتراسونیک) مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لذا نتایج مطالعه نشانگر آن است که مدل شو-پاین قادر است با اضافه کردن معادله گسمن، مدل کاستر-توکسوز را برای استفاده در فرکانس‌های پایین، نظیر داده‌های نگار چاه، بهبود بخشد. همچنین به نظر می‌رسد که بتوان با استفاده از فرآیند وارون‌سازی در تعیین درصد نوع حفرات، کارایی مدل‌های فیزیک سنگ مخازن کربناته را بهبود بخشید.

مخازن کربناته، فیزیک سنگ، سیستم حفرات، سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی

با توجه به کاهش کشف مخازن بزرگ هیدروکربوری و روند رو به کاهش تولید میادین نفتی بزرگ ایران در طول زمان، به منظور حفظ نرخ تولید میادین هیدروکربوری و افزایش ضریب بازیافت، استفاده از روش‌های مطالعه و فناوری‌های نوین ژئوفیزیکی مخازن نفت و گاز به منظور پایش مؤثر مخزن ضروری است. در مطالعات ژئوفیزیکی مخازن، هدف اصلی بررسی کمی، توصیف بهتر و شناسایی مؤثرتر منابع هیدروکربوری در کنار انتخاب بهینه موقعیت‌های جدید برای بهبود برداشت نفت است (Avseth et al., 2010). برای دستیابی به این هدف، افق‌های جدیدی برای انجام توصیف خصوصیات لرزه‌ای مخزن که شامل شناخت خواص سنگ، شناسایی نوع سیالات و میزان اشباع آنها و فشار منفذی هستند؛ توسعه یافته است (Lumley, 2001). توصیف و پایش لرزه‌ای مخازن نیازمند داشتن علم و دانش ارتباط مابین پارامترهای ژئوفیزیکی (لرزه‌ای) و خواص فیزیکی سنگ‌هاست. در واقع برای توصیف لرزه‌ای مخزن سؤال کلیدی این است که چگونه می‌توان خصوصیات سنگ مخزن را با خواص لرزه‌ای (سرعت‌های لرزه‌ای) محیط ارتباط داد. پاسخ این سؤال توسط مدل‌های فیزیک سنگ ارائه می‌شود؛ که می‌تواند بینش بیشتری را در این روابط ایجاد کند. بنابراین کسب اطلاعات مناسب خواص مخزنی از داده‌های لرزه‌ای منوط به وجود یک مدل معتبر از خصوصیات فیزیکی سنگ است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت علم فیزیک سنگ پلی برای ارتباط پارامترهای لرزه‌ای (مانند سرعت و چگالی) با خواص مخزنی (مانند تخلخل و اشباع سیال) است. این مساله اهمیت مدل‌ها و روابط فیزیک سنگی و توسعه آنها را نشان می‌دهد. در واقع هرچه مدل‌ها صحیح‌تر و دقیق‌تر باشند؛ نتایج مطالعات مخزنی دقیق‌تر و واقعی‌تر خواهند بود. لذا وجود مناسبترین مدل فیزیک سنگ خاص هر مخزن، از اهمیت بسیاری برخوردار است (Yusoff et al., 2014).

در تحقیقات متعددی کاربرد مدل‌های مختلف فیزیک سنگ انجام شده است. برای مثال صابری برخی از مهم‌ترین مدل‌های فیزیک سنگ را مورد بررسی قرار داده و کاربرد آنها در زمینه اکتشاف لرزه‌ای را ارائه کرده است. ایشان تلاش کرد تا درک بهتری از مدل‌های فیزیک سنگ ایجاد شود و روش‌های فیزیک سنگی به صورت طبقه‌بندی شده، با استفاده از مراجع مختلف، معرفی شود (Saberi, 2017).

مدل‌های فیزیک سنگی به دو دسته روابط تجربی و مدل‌های عددی (نظری) تقسیم می‌شوند. مدل‌های تجربی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر روی یک یا چند سری داده از مخازن مختلف بدست می‌آیند و مدل‌های نظری براساس علم فیزیک و شرایط ریز ساختارهای رسوبی توسعه یافته‌اند. مدل‌های میان‌باری و مدل‌های جایگزینی از انواع مدل‌های نظری هستند؛ که در این مطالعه از آنها استفاده شده است.

از جمله مدل‌های میان‌باری مورد استفاده در فیزیک سنگ، مدل ارائه شده به وسیله کاستر-توکسوز است. این مدل، از زمره مدل‌های محیط مؤثر است که با استفاده از تئوری پراکندگی مرتبه اول (طول موج طولی)،

مقادیر سرعت‌های موج تراکمی و برشی را ارائه می‌دهد (Mavko et al., 2009). تئوری گسمن^۱ که معمولاً در مطالعات فیزیک سنگی مخازن نفتی به منظور جایگزینی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد نیز، از مدل‌های جایگزینی بوده و برای سنگ‌هایی با منافذ کروی و متصل شده در فرکانس‌های پایین مناسب است.

توسعه مدل‌های فیزیک سنگ و تخمین سرعت برشی برای مخازن ماسه سنگی پیشرفت بالایی داشته؛ اما در خصوص مخازن کربناته به دلیل وجود ناهمگنی‌ها و پیچیدگی‌های ذاتی این گونه نبوده است. با توجه به شرایط و ماهیت متفاوت مخازن کربناته و ماسه سنگی از نظر پارامترهای مخزنی، باید در نظر داشت که مدل فیزیک سنگی که در یک مخزن ماسه سنگی استفاده می‌شود، ممکن است به طور قابل توجهی متفاوت از مدل مخزن کربناته باشد. در حقیقت نمی‌توان مدل توسعه یافته شده برای مخزن ماسه‌سنگی را برای هر نوع مخازن کربناته استفاده کرد. شو و وایت نشان دادند که می‌توان مدل فیزیک سنگ برای ماسه-سنگ‌های شیل‌دار را به طور محدود برای سنگ‌های کربناته استفاده کرد (Xu and White, 1995). البته شو و پاین با ارائه مدل فیزیک سنگی توانستند علاوه بر ماسه سنگ‌های شیلی، مدل جدیدی را برای سنگ‌های کربناته گسترش دهند (Xu and Payne, 2009). در سنگ‌های کربناته شکل و ساختار حفرات اهمیت بسزائی در پاسخ لرزه‌ای دارند؛ لذا در مطالعات فیزیک سنگی و لرزه‌ای لازم است نوع، شکل، ساختار آنها و همچنین اثر حفرات در نظر گرفته شود (Grana et al., 2017; Reine, 2015). لایبیس و هاریس بیان کردند که مدل فیزیک سنگی که با توجه به ساختارهای سنگ کربناته توسعه یافته، می‌تواند در تفسیر لرزه‌ای کمی مربوط به کربنات‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Lubis and Harith, 2014).

محاسبه تخلخل سنگ‌های کربناته به دلیل پیچیدگی خاص آنها نسبت به سنگ‌های رسوبی آواری بسیار دشوار است. به بیان دیگر به دلیل این که سنگ‌های کربناته دارای انواع مختلفی از منافذ و تخلخل بوده و این نوع منافذ و تخلخل به شدت بر روابط فیزیک سنگی کربنات‌ها تأثیرگذار هستند. بنابراین مدل‌سازی تخلخل سنگ‌های رسوبی کربناته نسبت به سنگ‌های رسوبی آواری پیچیده‌تر است (Huang et al., 2017; Wang et al., 2017; Saenger, 2016; Eberli et al., 2003). آزمایش‌های گگن‌هابر و پاپوس نیز موید دشوار بودن مدل‌سازی در سنگ‌های کربناته است (Gegenhuber and Pupos, 2015). همچنین گزارش شده که علاوه بر فاکتورهای ذکر شده، نفوذپذیری، اثر متقابل تغییرات در رخساره‌های رسوب گذاری و تغییرات دیاژنتیک نیز نقش اصلی در مدل‌های فیزیک سنگ کربناته دارند (Bashah and Pierson, 2011).

ارزیابی و مقایسه مدل‌های مختلف فیزیک سنگ با استفاده از عوامل تأثیر گذار بر آن مدل‌ها، به وسیله محققین مختلف انجام شده است. به طور مثال آرتولا و همکاران در مطالعه‌ای یک مخزن کربناته را در خلیج

$$(\mu_{KT}^* - \mu_m) \frac{(\mu_m + \zeta_m)}{(\mu_{KT}^* + \zeta_m)} = \sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_m) Q^{mi} \quad (2)$$

که در این روابط K_{KT}^* و μ_{KT}^* به ترتیب مدول های حجمی و ب رشی مؤثر با شکل فضاهای خالی، K_m و μ_m مدول های کشسان خمیره (زمینه) سنگ، K_i مدول حجمی محیط i ام درون فضای خالی، x_i حجم تمرکز، و $\zeta = \frac{\mu(9K+8\mu)}{6(K+2\mu)}$ می باشد. همچنین ضرایب P^{mi} و Q^{mi} تأثیر میانباره ماده i ام در محیط زمینه m را نشان می دهند که در جدول ۱ قابل مشاهده است. در جدول ۱، اندیس های i و m به ترتیب مواد تشکیل دهنده میانباره و خمیره (زمینه) می باشند. همچنین در این جدول پارامترهای بکار رفته طبق رابطه ۳ در نظر گرفته می شود

$$\beta = \mu \frac{(3K + \mu)}{(3K + 4\mu)} \quad (3)$$

$$\gamma = \mu \frac{(3K + \mu)}{(3K + 7\mu)}$$

$$\zeta = \frac{\mu(9K + 8\mu)}{6(K + 2\mu)}$$

همچنین در جدول ۱، α نسبت ابعادی شکستگی است (یک صفحه دیسکی که در واقع یک شکستگی با ضخامت صفر است).

۲-۲- مدل شو-پاین

این مدل، مدل توسعه داده شده شو- وایت است؛ با این تفاوت که در این مدل حجم حفرات یا تخلخل کل به چهار نوع تقسیم می شود: الف- تخلخل وابسته به کانی رس ب- تخلخل وابسته به حفرات بین ذره ای^۱ ج- ریزترک ها د- حفرات سخت^۲

همان گونه که ذکر شد، در مدل شو-پاین تخلخل کل (ϕ_T) بصورت رابطه ۴ تعریف شده است (Xu and Payne, 2009):

$$\phi_T = \phi_{Clay} + \phi_{IP} + \phi_{Crack} + \phi_{Stiff} \quad (4)$$

که در این رابطه ϕ_{IP} تخلخل بین ذره ای، ϕ_{Clay} تخلخل وابسته به رس، ϕ_{Stiff} تخلخل حفرات سخت، ϕ_{Crack} تخلخل ناشی از ریز ترک هاست. فضای حفرات مشابه به مدل شو- وایت به حفرات رسی و غیر رسی طبق رابطه زیر تقسیم می شود.

$$\phi_{Clay} = V_{sh} \phi_T \quad (5)$$

که در آن V_{sh} حجم شیل با توجه به دانه بندی زمینه نرمال می شود. شکستگی ها یکی از مهم ترین مؤلفه های سنگ های کربناته است؛ که به شدت به تنش ها و فشارهای محیطی حساس است. به این منظور از رابطه زیر استفاده می شود.

مکزیک با استفاده از سه روش مختلف فیزیک سنگ شامل روش انحراف سرعتی (روش قدیمی و کیفی)، روش شو-کی و روش توسعه یافته بایوت مورد بررسی قرار دادند (Artola et al., 2013).

با توجه به این که در کشور ایران بیش از نیمی از مخازن هیدروکربوری ایران از نوع کربناته می باشند؛ لذا مطالعات فیزیک سنگی مخازن کربناته اهمیت زیادی پیدا می کند. ارزیابی و مقایسه مدل های فیزیک سنگ کربناته در ایران کمتر انجام شده است. در مطالعه حاضر دو مدل کاستر-توکسوز و شو-پاین مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. از طرفی برتری این تحقیق نسبت به سایر مطالعات مشابه، استفاده از مقادیر تخمین زده شده برای نسبت ابعادی^۱ و به تبع آن درصد نسبی نوع حفرات در مخزن مورد مطالعه با روش وارون سازی است. بنابراین هدف این تحقیق، تعیین نسبت حفرات در مخزن مورد بررسی با استفاده از روش وارون سازی و در انتها معرفی بهترین مدل سازگار با مخزن کربناته مورد مطالعه است.

۲- روش شناسی و مدل سازی

در این مطالعه دو مدل فیزیک سنگ برای تعیین خصوصیات مخزن لرزه ای در کربنات ها استفاده شده است. در ادامه مدل های مورد استفاده و کاربرد آنها مورد بحث قرار گرفته است. در واقع در این تحقیق، مطالعه و مقایسه خواص کشسانی فیزیک سنگ بر روی سنگ کربناته از طریق مدل های فیزیک سنگی کاستر-توکسوز و شو-پاین انجام شده است؛ که دو مدل مذکور دارای دو مزیت عمده سهولت محاسبه و انعطاف پذیری کاربرد برای کربنات ها هستند. در این مطالعه برای انجام مدل سازی از کدنویسی در نرم افزار متلب استفاده شده است.

۲-۱- مدل کاستر-توکسوز

مدل کاستر-توکسوز براساس تئوری توزیع یا پخش شدگی امواج کشسانی در محیط دو فازی با طول موج بلند تعریف شده است. در این مدل فرض بر این است که محیط به دو قسمت خمیره (زمینه) و میانباره تقسیم شده است. همچنین در مدل مذکور، اثر متقابل بین حفره ها در نظر گرفته نمی شود و شکل فضاهای خالی تأثیر زیادی روی مدول های کشسان و در نتیجه روی سرعت امواج می گذارد. مدل عمومی که کاستر و توکسوز برای محاسبه مدول های کشسان مؤثر برای شکل های مختلف میانباره تعریف کردند به صورت رابطه ۱ و ۲ است (Kuster and Toksöz, 1974).

$$(K_{KT}^* - K_m) \frac{\left(K_m + \frac{4}{3}\mu_m\right)}{\left(K_{KT}^* + \frac{4}{3}\mu_m\right)} = \sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_m) P^{mi} \quad (1)$$

صیفی و همکاران، ارزیابی و مقایسه مدل سازی فیزیک سنگی کاستر-توکسوز و شو-پاین در یکی از مخازن هیدروکربوری گرناتنه ایران، صفحات ۱۶۷-۱۸۰.

$$\phi_{Crack} = \phi_{Init} e^{-\beta \sigma_e} \quad (6)$$

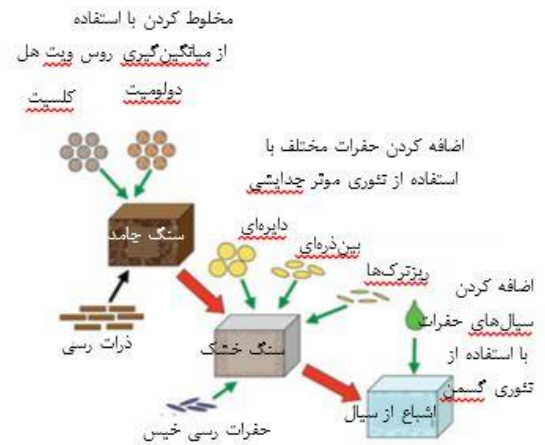
الف. کانی‌های موجود در سنگ با قانون مخلوط شدگی باهم ترکیب می‌شوند (مثل قانون میانگین‌گیری روس-هیل-ویت)
ب. مرحله دوم شامل دو قسمت زیر است:

- حفرات کوچک با لایه پوشیده شده از آب (مثل حفرات رس) به زمینه افزوده می‌شود، با استفاده از فرآیند محیط مؤثر جدایشی یا DEM، شو-وایت و تئوری کاستر-توکسوز برای محاسبه واکنش‌های بین حفرات که خواص مدول‌های کشسانی مؤثر مثل مدول حجمی که بعداً به‌عنوان خواص قسمت جامد برای جانشینی سیال استفاده می‌شود.
- برگشت به مرحله قبل، تمامی حفرات کوچک آب دوست و خالی یا حفرات غیر آبدوست با استفاده از تئوری محیط مؤثر به سیستم افزوده می‌شود؛ تا خواص کشسانی مؤثر اسکلت سنگ خشک، محاسبه شود.

ج. آب باقیمانده که به حفرات چسبیده نیست، با استفاده از قوانین ترکیب سیال از جمله مدل تعلیقی وود با هیدروکربور مخلوط می‌شود.
د. معادلات گسمن استفاده می‌شود؛ تا مخلوط سیال را در سیستم حفرات به منظور بدست آوردن خواص کشسانی مؤثر سنگ اشباع محاسبه کند.

که ϕ_{Init} تخلخل حاصل از شکستگی اولیه در فشار روباره صفر، β و σ_0 ثابت است.

در شکل ۱ دیاگرام مدل فیزیک سنگ شو-پاین نمایش داده شده است؛ که تمامی مراحل تشکیل مدل به صورت شماتیک قابل مشاهده است.



شکل ۱: دیاگرام مدل فیزیک سنگ شو-پاین (اقتباس از Xu and Payne, 2009)

این مدل شامل چهار مرحله است:

جدول ۱: ضرایب و فاکتورهای P و Q برای شکل‌های متفاوت حفره (Berryman, 1995)

شکل میانباره	p^{mi}	Q^{mi}
کره‌ای ^۱	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_m}{K_i + \frac{4}{3}\mu_m}$	$\frac{\mu_m + \zeta_m}{\mu_i + \zeta_m}$
سوزنی ^۲	$\frac{K_m + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i}{K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i}$	$\frac{1}{5} \left(\frac{4\mu_m}{\mu_m + \mu_i} + 2 \frac{\mu_m + \gamma_m}{\mu_i + \gamma_m} + \frac{K_i + \frac{4}{3}\mu_m}{K_i + \mu_m + \frac{1}{3}\mu_i} \right)$
دیسکی (صفحه‌ای) ^۳	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i}$	$\frac{\mu_m + \zeta_i}{\mu_i + \zeta_i}$
شکستگی سکه‌ای شکل (ضخامت کم) ^۴	$\frac{K_m + \frac{4}{3}\mu_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m}$	$\frac{1}{5} \left(1 + \frac{8\mu_m}{4\mu_i + \pi\alpha(\mu_m + 2\beta_m)} + 2 \frac{K_i + \frac{2}{3}(\mu_i + \mu_m)}{K_i + \frac{4}{3}\mu_i + \pi\alpha\beta_m} \right)$

- 1 Spheres
- 2 Needles
- 3 Disks
- 4 Penny Cracks

۳- یافته‌ها و بحث

با توجه به مدل‌سازی فیزیک سنگ بر روی مخازن کربناته، امکان استفاده درست از مراحل پیشرفته مطالعه کمی لرزه نگاری در سنگ‌های کربناته وجود دارد. عملکرد مدل‌های کاستر-توکسوز، شو-پاین برای سنگ‌های رسوبی ماسه‌ای (آواری) کمی متفاوت از سنگ‌های رسوبی کربناته است. نوع حفره و پارامترهای هندسه منافذ، خواص کشسانی را در کربنات‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهد. این عوامل (نوع حفره و پارامترهای هندسه منافذ) می‌تواند در بدست آوردن نتایج صحیح مانند تخمین سرعت‌های موج تراکمی و موج برشی کمک کنند. بنابراین، داشتن اطلاعات دقیق از شکل منفذ و ویژگی‌های ریز ساختار ضروری است.

۳-۱- انواع تخلخل مورد استفاده در مدل‌سازی فیزیک سنگ

برای ساده‌سازی شبکه حفرات، سه نوع حفره فیزیک سنگی به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

(۱) منافذ مرجع (مبنا) که به عنوان روند پس زمینه مرجع هستند. این نوع حفرات عمدتاً از منافذ بین دانه‌ای و بین کریستال تشکیل شده و به عنوان نوع تخلخل غالب در کربنات‌ها در نظر گرفته می‌شوند. (۲) منافذ سفت با نسبت ابعادی بالا، که منافذ مربوط به حفرات شبه کروی و منفذهای حفره‌ای شکل را تشکیل می‌دهند و معمولاً در نتیجه دانه‌های حل‌شده و محفظه‌های فسیلی شکل می‌گیرند. (۳) شکستگی یا ترک‌های با نسبت ابعادی پایین تر، که نشان دهنده ریز ترک‌ها و شکستگی‌های ریز هستند. این نوع تخلخل می‌تواند به علت اختلاف تنش‌های فشاری، گسل‌ها و یا افتادگی‌های ناشی از انحلال در کربنات‌ها رخ دهد (Zhao et al., 2013; Lucia, 2007).

جدول ۲ سیستم‌های انواع حفرات در فیزیک سنگ و ژئوفیزیک را نشان می‌دهد. شکل دایره‌ای قرمز رنگ با نسبت ابعادی بالاتر نمایانگر منافذ شبه کروی است. شکل بیضی سیاه رنگ با نسبت ابعادی متوسط نشان-دهنده منافذ مرجع (بین دانه‌ای) و شکل بیضی کشیده بنفش رنگ با نسبت ابعادی پایین، نشان‌دهنده شکستگی یا ریز ترک است.

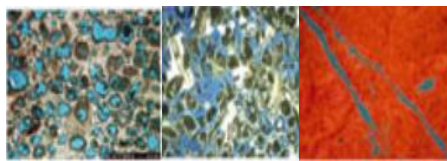
جدول ۲: طبقه بندی فیزیک سنگ انواع حفرات در کربنات‌ها (اقتباس از Zhao et al., 2013)

انواع حفرات			
شکستگی ریز ^۱	بین دانه‌ای ^۲	منفذی ^۳ (شبه کروی)	پتروفیزیکی
شکستگی (ترک)	مرجع (مبنا)	سخت ^۴	ژئوفیزیکی

- 1 Microcracks
- 2 Interspace (Intercrystal)
- 3 Vuggy (Moldic)
- 4 Stiff

نسبت ابعادی ۰/۷ - ۰/۸ ۰/۱۲ - ۰/۱۵ ۰/۰۱ - ۰/۰۲

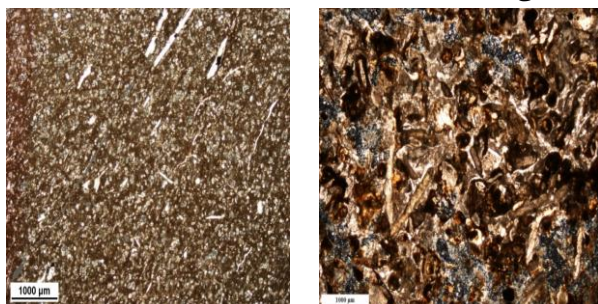
تصویر



سیستم حفرات



در مخزن کربناته مورد بررسی، نوع حفرات که در مدل‌های فیزیکی سنگ تأثیر گذار بوده، در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲-الف مقطع نازک زمین‌شناسی قابل ملاحظه است؛ که حاوی حفرات، به صورت بین دانه‌ای است. این امر نشان دهنده نحوه ارتباط بین فسیل‌ها در زمان تشکیل است و همان گونه که در طبقه‌بندی فیزیک سنگ گفته شد، شکل حفرات از نوع مرجع یا مبنا هستند. شکل ۲-ب نیز گویای مقطع نازک زمین‌شناسی است؛ که حاوی حفرات به صورت شبه کروی و شکستگی است.



ب

الف

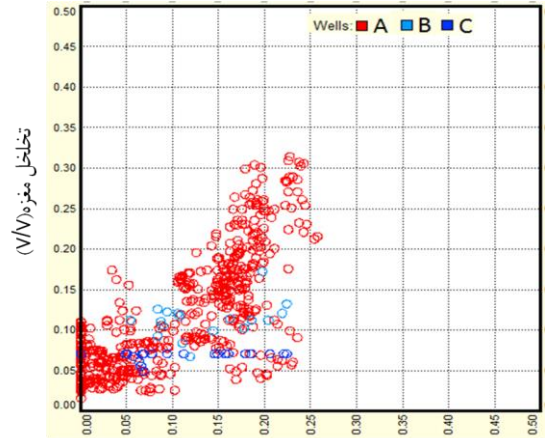
شکل ۲: مقاطع نازک زمین‌شناسی برای تفکیک طبقه‌بندی فیزیک

سنگی انواع حفرات در مخزن کربنات (جنوب ایران)

نگارهای اندازه‌گیری شده (چگالی، نوترون، سونیک و ...) در چاه مورد بررسی تحت تأثیر عواملی مانند ریزش چاه، نفوذ گل حفاری، ترک‌های القایی ایجاد شده حاصل از حفاری، آماس سازندهای شیلی و ... قرار می‌گیرند. به همین دلیل مقادیر عددی بدست آمده در این اندازه‌گیری‌ها نیاز به تصحیح و در نهایت کالیبره کردن با داده‌های آزمایشگاهی دارند. به همین منظور در این مطالعه قبل از استفاده از نمودارها، تصحیحات لازم صورت گرفته و با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره شده اند. شکل ۳ نمودار متقاطع تخلخل حاصل از نگارهای چاهی در سه چاه A، B و C در برابر تخلخل اندازه‌گیری شده بر روی مغزه‌ها در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر نمودار چاهی همخوانی خوبی دارند؛ که بیانگر این است که نمودارهای چاهی با مقادیر آزمایشگاهی کالیبره شده و انطباق خوبی دارند.

داده شده است. در سمت راست این اشکال، نمودارهای متقاطع نگارهای سرعتی برآورد شده در برابر نگارهای اندازه گیری شده نشان داده شده است، نگار قرمز رنگ سرعت برآورد شده و نگار آبی رنگ سرعت موج تراکمی واقعی است.

در شکل ۴-الف، مقایسه بین نگار سرعت واقعی و تخمینی حاصل از مدل کاستر-توکسوز در چاه A، نشان دهنده انطباق بالای روند و مقادیر دو نگار سرعت واقعی و تخمینی است. در نمودار متقاطع، بین سرعت موج تراکمی برآورد شده با مدل کاستر-توکسوز و داده‌های واقعی در چاه A همبستگی وجود دارد؛ به طوری که ضریب همبستگی ۷۸ درصد و جذر میانگین مجذور خطاهای سرعت (RMSE) ۳۲۰ متر بر ثانیه و خطای نسبی ۶/۷ درصد بدست آمده است (شکل ۴-ب). همچنین در شکل ۴-ج مقایسه بین نگار سرعت واقعی و تخمینی در چاه B با استفاده از مدل کاستر-توکسوز، بیان کننده روند و مقادیر انطباق خوبی بین نگار سرعت واقعی و تخمینی در چاه B می‌باشد. نمودار متقاطع بین سرعت موج تراکمی برآورد شده با مدل کاستر-توکسوز و داده‌های واقعی در چاه B، همبستگی معناداری را نشان می‌دهد؛ به طوری که ضریب همبستگی ۹۴ درصد و جذرمیانگین مجذور خطاهای سرعت (RMSE) ۲۲۴ متر بر ثانیه و خطای نسبی ۵ درصد بدست آمده است (شکل ۴-د). ارزیابی‌های صورت گرفته در چاه‌ها نشانگر آن است که مقدار رس در چاه A نسبت به چاه B (در محدوده مخزنی مورد مطالعه) بیشتر است؛ به همین دلیل نمودارهای مدل شده در چاه B، با کمک مدل کاستر-توکسوز، همبستگی بهتری نسبت به نمودارهای مدل شده در چاه A نشان می‌دهند. به عبارت دیگر می‌توان گفت در این مدل، هرچه سازند کربناته از نظر وجود رس تمیزتر باشد، پاسخ‌های قابل قبول تری بدست خواهد آمد.

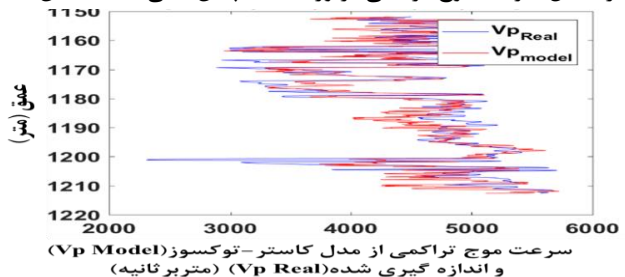


تخلخل حاصل از نگار چاهی (PHIE (V/V))

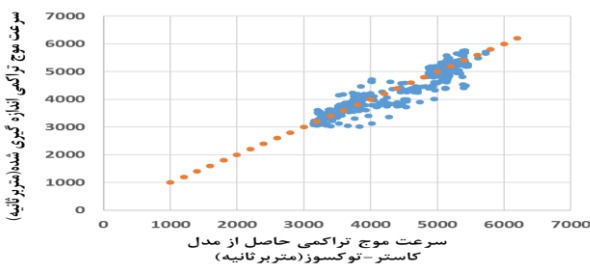
شکل ۳: نمودار متقاطع تخلخل مؤثر حاصل از نگارهای چاهی در برابر تخلخل اندازه‌گیری شده در مغزه در سه چاه به صورت کسری از واحد. نقاط قرمز، آبی کمرنگ و آبی پر رنگ به ترتیب نمونه‌های موجود در چاه-های A، B و C

۲-۳- مقایسه مدل‌های کاستر-توکسوز و شو-پاین

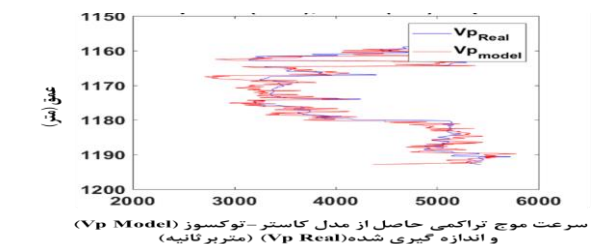
برای مقایسه عملکرد مدل کاستر-توکسوز با مدل شو-پاین در مخزن کربناته مورد مطالعه، پارامترهای لرزه‌ای (الاستیک) در دو چاه (A و B)، با استفاده از مدل مذکور تخمین زده شدند. خواص کشسانی سنگ تخمین زده شده در دو مدل مختلف به طور عمده به شکل بدنه مدل بستگی دارد. شکل ۴ سرعت موج تراکمی تخمین زده شده با کمک مدل کاستر-توکسوز و اندازه‌گیری شده در مخزن کربناته را نشان می‌دهد. در سمت چپ این اشکال، نمودار متقاطع سرعت موج تراکمی واقعی (اندازه‌گیری شده) در مقابل سرعت موج تراکمی برآورد شده (پیش بینی شده) نشان



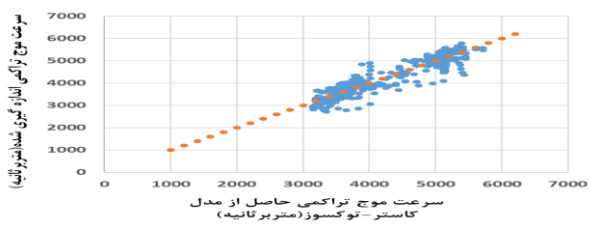
الف- (چاه A)



ب- (چاه B)



ج- (چاه B)

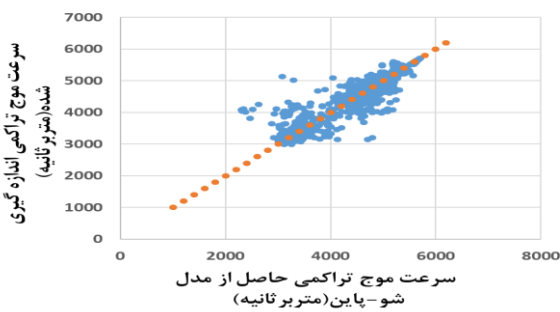


د- (چاه B)

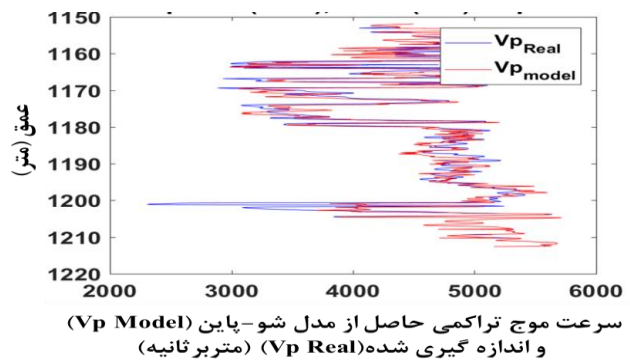
شکل ۴: مقایسه سرعت‌های موج تراکمی برآورد شده با مدل کاستر-توکسوز و اندازه‌گیری شده در دو چاه A و B. در مخزن کربناته

نمودار نشان دهنده انطباق خوب بین دو نمودار است. در نمودار متقاطع نشان داده شده در شکل ۵-د، بین نگار سرعت موج تراکمی تخمینی با استفاده از مدل شو-پاین و داده‌های واقعی در چاه B همبستگی نسبتاً بالایی قابل مشاهده است. این شکل ضریب همبستگی ۹۵ درصد و جذر میانگین مجذور خطاهای سرعتی (RMSE) ۱۷۴ متر بر ثانیه و خطای نسبی ۳/۹ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به این که مقادیر محتوای شیل (رس) در مدل‌سازی‌های روابط شو-پاین لحاظ شده؛ لذا اختلاف ضریب همبستگی (۸ درصد) در دوچاه A و B در مقایسه با مدل کاستر-توکسوز (۱۷ درصد) کمتر است. از مقایسه اختلاف ضرایب همبستگی در دو چاه با مقادیر رس متفاوت حاصل از دو مدل مورد نظر، می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط مخزنی دارای رس، بهتر است از مدل شو-پاین استفاده

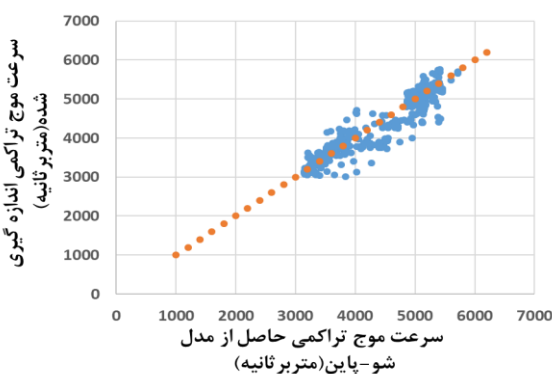
شکل ۵ نتایج سرعت موج تراکمی برآورد شده با استفاده از مدل شو-پاین و اندازه‌گیری شده را به همراه نمودارهای متقاطع نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف، مقایسه بین نگار سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده (واقعی) و پیش‌بینی شده در چاه A با استفاده از مدل شو-پاین نشانگر انطباق بالایی در روند و مقادیر است. در شکل ۵-ب، نمودار متقاطع بین مقادیر سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده و مدل شده را نشان می‌دهد. در این شکل بین سرعت موج تراکمی برآورد شده با مدل شو-پاین و داده‌های واقعی در چاه A همبستگی خوبی (۸۷ درصد) وجود دارد. جذر میانگین مجذور خطاهای سرعتی (RMSE) در این داده‌ها (سرعت موج تراکمی) ۲۰۸ متر بر ثانیه و خطای نسبی ۴/۳ درصد می‌باشد. نمودارهای سرعت واقعی (نگار آبی رنگ) و تخمینی با استفاده از مدل شو-پاین (نگار قرمز رنگ) در چاه B در شکل ۵-ج آمده است. مقایسه کیفی این دو



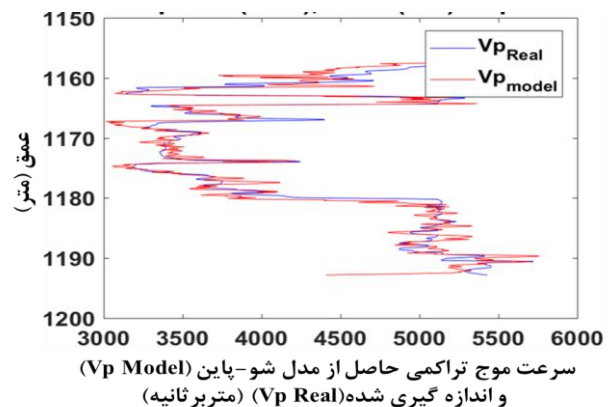
ب- (چاه A)



الف- (چاه A)



د- (چاه B)



ج- (چاه B)

شکل ۵: مقایسه سرعت‌های موج تراکمی برآورد شده با مدل شو-پاین و اندازه‌گیری شده در دو چاه A و B در مخزن کربناته

مدل شو-پاین است. در این چاه خطای سرعت محاسبه شده برای مدل شو-پاین و مدل کاستر-توکسوز به ترتیب ۲۰۸ متر بر ثانیه و ۳۲۰ متر بر ثانیه و خطای نسبی نیز به ترتیب ۴/۳ درصد و ۶/۷ درصد می‌باشد؛ که

در چاه A ضریب همبستگی میان سرعت‌های موج تراکمی برآورد شده با مقادیر واقعی سرعت‌های موج تراکمی، به ترتیب در مدل شو-پاین و مدل کاستر-توکسوز ۸۷ و ۷۸ درصد می‌باشد؛ که نشان دهنده همبستگی بالاتر

مجدداً تأیید بر خطای کمتر مدل شو-پاین دارد.

همان‌گونه که ذکر شد، در چاه B ضریب همبستگی سرعت‌های موج تراکمی برآورد شده به ترتیب در مدل شو-پاین و مدل کاستر-توکسوز ۹۵ و ۹۴ درصد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که ضریب همبستگی مدل شو-پاین نسبت به مدل کاستر-توکسوز در مخزن مورد مطالعه، بالاتر بوده و همچنین در این چاه خطای محاسبه شده سرعت موج تراکمی برای مدل شو-پاین و مدل کاستر-توکسوز به ترتیب ۱۷۴ متر بر ثانیه و ۲۲۴ متر بر ثانیه و خطای نسبی به ترتیب ۳/۹ درصد و ۵ درصد می‌باشد؛ که موید خطای کمتر در مدل شو-پاین است.

به طور کلی با مقایسه ضرایب همبستگی و خطاها، می‌توان نتیجه گرفت که در مخزن کربناته مورد مطالعه، مدل شو-پاین نسبت به مدل کاستر-توکسوز سازگاری بهتری دارد. ریز ساختارها نظیر شکل حفرات و تخلخل بدست آمده از نمودارهای چاهی با اطلاعات مقاطع نازک زمین‌شناسی (شکل ۲) و مغزه‌های موجود اعتبارسنجی شده‌اند. مدل شو-پاین مدل توسعه یافته مدل کاستر-توکسوز است؛ که برای فرکانس‌های چاهی و پائین‌تر کاربرد دارد. به همین دلیل در برآورد سرعت موج تراکمی در محدوده فرکانس نمودارهای چاهی نسبت به مدل کاستر-توکسوز بهتر عمل می‌کند.

۳-۳- پیش‌بینی سرعت برشی با استفاده از مدل‌های

کاستر-توکسوز، شو-پاین و گرینبرگ-کاستاگنا

اندازه‌گیری سرعت موج برشی به دلایل فنی و اقتصادی نسبت به سایر نگارهای چاهی مخصوصاً سرعت موج تراکمی، در چاه‌ها کمتر انجام می‌شود. به همین دلیل تلاش می‌شود که این نگار با کمک روابط تجربی و تئوری از سایر نگارهای اندازه‌گیری شده، تخمین زده شود. تخمین سرعت موج برشی با مدل‌های فیزیک سنگ همیشه راه مقدماتی و اساسی برای انجام وارون‌سازی پیش از برانبارش است.

مدل‌های فیزیک سنگی تجربی از جمله مدل کاستاگنا از روابط بین سرعت برشی و سرعت تراکمی استفاده می‌کند. از این رو به دلیل ساده بودن مدل کاستاگنا معمولاً تخمین تقریبی است. در این تحقیق از مدل‌های فیزیک سنگ کاستر-توکسوز و شو-پاین برای تخمین سرعت برشی استفاده شده، که در مقایسه با روش‌های تجربی دقیق‌تر هستند. این دقت بالا نسبت به سایر روش‌ها، ناشی از اثر تخلخل، نوع حفرات و اطلاعات سنگ و سیال مخزن در مدل‌های مورد استفاده است. در این مقاله سرعت موج برشی با استفاده از مدل‌های فیزیک سنگ کاستر-توکسوز و شو-پاین در کنار مدل گرینبرگ-کاستاگنا تخمین زده شد. از

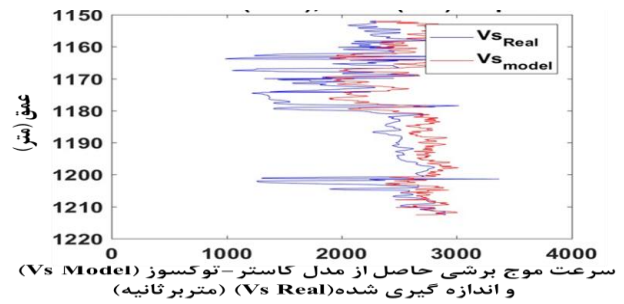
طرفی به منظور بررسی صحت و دقت مدل‌ها و مقایسه آنها با هم از نگارهای *DSI* موجود در چاه A استفاده شده است. نتایج این مدل‌سازی-ها در شکل‌های بعدی آمده است.

شکل ۶ نتایج برآوردهای سرعت موج برشی به همراه سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل‌های مختلف را نشان می‌دهد. در سمت چپ اشکال، نمودار مقاطع سرعت موج برشی واقعی (اندازه‌گیری شده) در مقابل سرعت موج برشی برآورد شده (پیش‌بینی شده) نشان داده شده است. در سمت راست اشکال، نگارهای سرعتی برآورد شده در برابر نگارهای اندازه‌گیری شده نشان داده شده‌اند. در این اشکال، نگار قرمز رنگ، سرعت موج برشی برآورد شده با کمک مدل‌های اشاره شده و نگار آبی رنگ، سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده (واقعی) هستند.

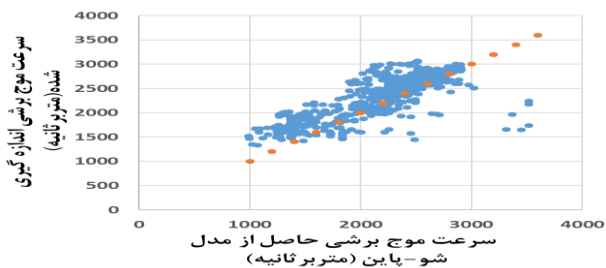
نگار سرعت موج برشی با استفاده از مدل کاستر-توکسوز و نگار واقعی در شکل ۶-الف نشان داده می‌شود. مقایسه بین نگار سرعت واقعی و پیش‌بینی شده در چاه A با استفاده از مدل کاستر-توکسوز، روند و مقادیر انطباق بالایی را نشان می‌دهد. نمودار مقاطع سرعت موج برشی تخمین زده شده با مدل کاستر-توکسوز در برابر سرعت اندازه‌گیری شده در شکل ۶-ب مشاهده می‌شوند. در این نمودار مقاطع، بین سرعت موج برشی برآورد شده با مدل کاستر-توکسوز و داده‌های واقعی در چاه A همبستگی خوبی (ضریب همبستگی ۸۰ درصد) وجود دارد و جذرمیانگین مجذور خطاها سرعت موج برشی (*RMSE*) ۳۴۳ متر بر ثانیه با خطای نسبی ۱۱/۴ درصد است. شکل ۶-ج نگار سرعت واقعی و پیش‌بینی شده در چاه A با استفاده از مدل شو-پاین را نشان می‌دهد. این شکل روند و مقادیر انطباق خوبی را بین سرعت برشی تخمینی و واقعی نمایش می‌دهد. در نمودار مقاطع، بین سرعت موج برشی برآورد شده با مدل شو-پاین و داده‌های واقعی در چاه A همبستگی نسبتاً معنی داری وجود دارد (شکل ۶-د). ضریب همبستگی بین دو نمودار تخمینی و واقعی ۸۲ درصد و جذرمیانگین مجذور خطاهای سرعت (*RMSE*) ۲۰۷ متر بر ثانیه با خطای نسبی ۶/۹ درصد است. شکل ۶-ه نگار سرعت واقعی و پیش‌بینی شده در چاه A با استفاده از مدل گرینبرگ-کاستاگنا را نشان می‌دهد. در این شکل نیز روند و مقادیر انطباق مناسبی بین مقادیر سرعتی واقعی و تخمین زده شده قابل مشاهده است. شکل ۶-و نمودار مقاطع، بین سرعت موج برشی برآورد شده با مدل گرینبرگ-کاستاگنا را نشان می‌دهد. همبستگی بین دو مقدار تخمینی و واقعی برابر ۸۱ درصد بوده و جذرمیانگین مجذور خطاهای سرعتی (*RMSE*) برابر ۲۳۸ متر بر ثانیه و خطای نسبی ۷/۹ درصد است.



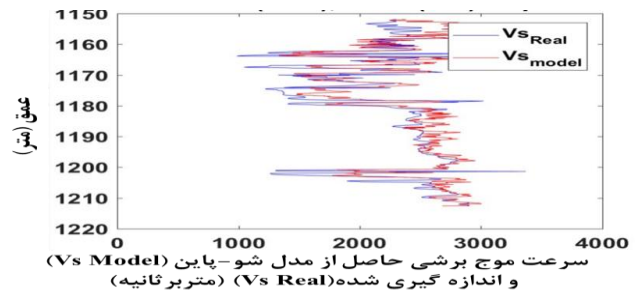
ب



الف



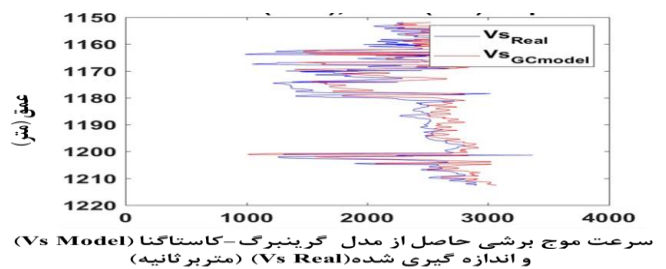
د



ج



و



هـ

شکل ۶: مقایسه سرعت‌های موج برشی برآورد شده با مدل‌های کاستر-توکسوز، شو-پاین و گرینبرگ-کاستاگنا و مقدار سرعت موج برشی اندازه-گیری شده در چاه A، در مخزن کربناته

برآورد شده برای مدل شو-پاین کمتر می‌باشد.

۴-۳- بحث

پس از مقایسه مدل‌های مذکور، پاسخ مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده از همان چاه مقایسه شدند. به این منظور مقادیر ضریب همبستگی و خطای مدل‌سازی شده در هر چاه بدست آمد و با اطلاعات تعدادی مقاطع نازک زمین‌شناسی، مغزه‌ها تأیید اعتبار شد. در نهایت مدل شو-پاین نتایج بهتری را ارائه داد. باتوجه به اینکه شکل فضای حفره‌ای تأثیر زیادی روی مدول‌های کشسان و در نتیجه روی سرعت امواج تراکمی و برشی داشته و این که مدل فیزیک سنگی کاستر-توکسوز اثر متقابل بین حفرات را در نظر نمی‌گیرد. مدل‌سازی با استفاده از روش کاستر-توکسوز نسبت به مدل شو-پاین، ضعیف‌تر می‌باشد. چرا که مدل شو-پاین، اثر

به طور خلاصه، در چاه A ضریب همبستگی سرعت‌های موج برشی برآورد شده به ترتیب در مدل شو-پاین و مدل کاستر-توکسوز و مدل گرینبرگ-کاستاگنا ۸۲، ۸۰ و ۸۱ درصد است؛ که نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول است. هرچند در مدل شو-پاین این مقدار کمی بالاتر از دو مدل دیگر می‌باشد؛ ولی این اختلاف ناچیز است. خطای سرعتی محاسبه شده برای مدل شو-پاین و مدل کاستر-توکسوز و مدل گرینبرگ-کاستاگنا به ترتیب ۲۰۷، ۳۴۳ و ۲۳۸ متر بر ثانیه و خطای نسبی آنها به ترتیب ۶/۹، ۱۱/۴، ۷/۹ درصد می‌باشد. میزان خطا در مدل شو-پاین در مقایسه با سایر روش‌ها خصوصاً مدل کاستر-توکسوز کمتر بوده و این مقدار قابل ملاحظه است. در مقایسه بین نتایج برآورد شده، سرعت موج برشی برآورد شده حاصل از مدل شو-پاین در چاه A ضریب همبستگی بالاتری نسبت به مدل کاستر-توکسوز دارد و همچنین خطای مقادیر

متقابل بین حفرات را در نظر می‌گیرد و چهار نوع تخلخل موجود در سنگ‌های کربناته را لحاظ می‌کند. همچنین از محدودیت‌های مدل کاستر و توکسوز، مناسب بودن این مدل برای تخلخل‌های کم با ارتباط پائین است و به عبارت دیگر فرض می‌کند که تمرکز حفرات در سنگ پائین می‌باشد. بنابراین مدل شو-پاین به طور نسبی دقت تخمینی بالاتری در مخزن کربنات مورد مطالعه نشان می‌دهد. اگر چه در نگاه کلی هر دو مدل به خوبی خواص کشسانی را برآورد کردند. البته به دلیل تغییرات محتوای کانی شناسی، میزان و نوع تخلخل و پیرو آن تغییرات محیط رسوب‌گذاری و فشار مؤثر، در پیش بینی سرعت موج برشی در برخی از بازه‌های عمقی در چاه‌های مورد مطالعه میان مقادیر واقعی و تخمینی اختلاف وجود دارد.

مدل شو-پاین بر این فرض استوار است که حفرات بزرگ با هم ارتباط داشته و نفوذپذیری سنگ بالاست. به این ترتیب که اختلاف فشار منفذی ایجاد شده در حفرات به دلیل عبور موج لرزه‌ای با نصف زمان طول موج لرزه‌ای از بین رفته و در این مدت زمان به حالت تعادل می‌رسد. همچنین اگر در سنگ حفرات بسیار ریز آبدوست وجود داشته باشد، در این صورت این حفرات در شرایط لرزه‌ای فرکانس بالا بصورت ایزوله در نظر گرفته می‌شوند. مطالعات مقاطع نازک و زمین شناسی مرتبط نشان می‌دهد که فرضیات فوق برای سنگ مخزن مورد مطالعه صادق است؛ به عبارت دیگر شرایط حفره‌ای مخزن مورد مطالعه اجازه استفاده از این مدل را برای مدل‌سازی می‌دهد.

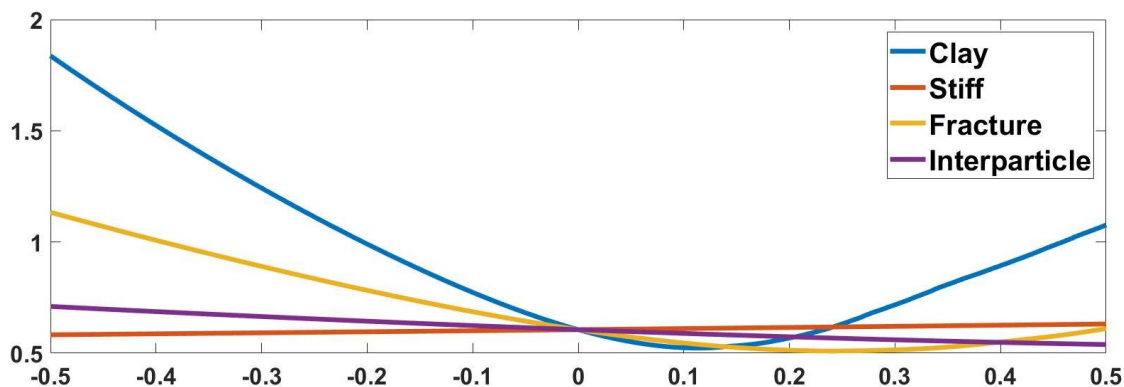
در مخزن کربنات مورد مطالعه، پارامترهای آماری، نظیر خطا بین داده‌های واقعی و مدل در هر چاه استفاده شده و همچنین ضریب همبستگی برای مقایسه محاسبه شده است. با توجه به نتایج بالا، بین نتایج مدل شو-پاین و داده‌های واقعی در بیشتر بخش‌ها همبستگی بیشتری وجود دارد؛ در حالی که در مدل کاستر-توکسوز این همبستگی پایین‌تر است. بررسی این تفاوت‌ها مهم است و اطلاعات مفیدی را ارائه می‌دهد.

ارزیابی مقادیر سرعتی اندازه گیری شده با پیش بینی سرعت مدل شده نشان می‌دهد که دقت مدل‌ها با افزایش محتوای شیل در صورت لحاظ نشدن در مدل کاهش می‌یابد. ذکر این نکته ضروری است که حجم شیل، سرعت و مقدار ضرایب کشسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور مثال سرعت موج در دو نمونه سنگ تمیز و شیلی متفاوت است و وجود رس باعث کاهش سرعت موج می‌شود. این کاهش در مورد ثابت‌های

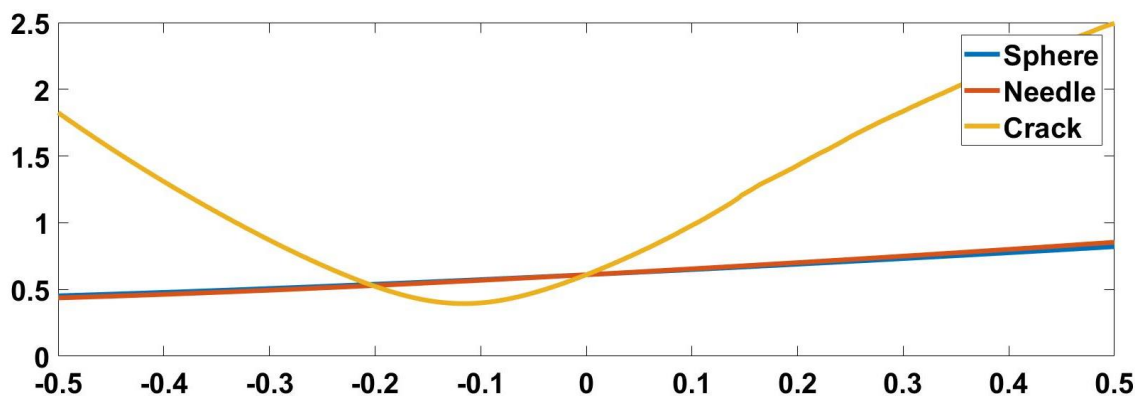
کشسانی هم صادق است. در کل وجود شیل در نمونه‌های سنگی، خمیره (زمینه) سنگها را تغییر داده و بنابراین خصوصیات فیزیکی را نیز تغییر می‌دهند و باعث ایجاد پیچیدگی در روابط می‌شود که این پیچیدگی‌ها در نمونه‌های کربناته مشکلات به مراتب جدی‌تری را ایجاد می‌کند. در این مطالعه تأثیر حجم شیل در مدل‌های استفاده شده به دو صورت رس خشک و رس تر لحاظ شده است. به بیان دیگر، در مدل‌سازی شو-پاین تعیین دقیق محتوای شیل و انواع ریزساختارها و حفرات الزامی است. بنابراین برای ساخت چنین مدلی، باید محتوای شیل به صورت دقیق برآورد شود و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ریزساختارها یکی از عوامل اصلی در ساخت دقیق مدل می‌باشند؛ که کنترل کننده خواص کشسانی سنگ‌هاست. بنابراین قبل از انتخاب مدل، ریز ساختار سنگ و محتوای شیل باید به طور دقیق مورد مطالعه قرار گیرد؛ که در این مطالعه این ملاحظات در نظر گرفته شده است.

به دلیل این که شکل و درصد حفرات به منظور مدل‌سازی پارامترهای الاستیک با کمک دو مدل کاستر-توکسوز و شو-پاین به بصورت دقیق وجود نداشت و با کمک وارون‌سازی بدست آمد؛ لذا لازم بود میزان حساسیت هر مدل به پارامترهای آن بررسی شود. به همین منظور نمودارها و اشکال لازم برای بررسی میزان حساسیت هر مدل به پارامترها با کدنویسی در نرم‌افزار متلب، تهیه گردید. روش بررسی حساسیت که با طیفی از مقادیر درصد حفره‌ها، هر دو مدل اجرا شد و نمودار درصد حفرات در برابر تأثیر آن بر روی درصد خطای تخمین، تهیه گردید و در شکل‌های ۷ و ۸ آورده شده‌اند.

میزان حساسیت مدل شو-پاین با نوع حفرات در شکل ۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این مدل به تخلخل ناشی از رس (محتوای شیل) حساسیت بیشتری دارد. به عبارت دیگر حتی مقادیر کم خطا در اعمال محتوای شیل موجب خطای بزرگ در نتایج این مدل خواهد شد؛ لذا انتخاب و اعمال درصد محتوای شیل، دقت بالاتری نیاز دارد. در مورد سایر حفرات نیز درصد حساسیت از شکستگی‌ها به حفرات بین دانه‌ای کاهش پیدا می‌کند. در خصوص حساسیت مدل کاستر و توکسوز شکل ۸ نشان می‌دهد که حساسیت این مدل به نوع حفرات سخت (کروی و سوزنی شکل‌ها- منحنی‌های آبی و قرمز رنگ) کمتر بوده و نسبت به شکستگی‌ها (منحنی زرد رنگ) بیشتر است. به عبارت دیگر در مدل کاستر-توکسوز تشخیص دقیق درصد شکستگی‌ها در مدل‌سازی و تخمین پارامترهای الاستیکی بسیار اهمیت دارد.



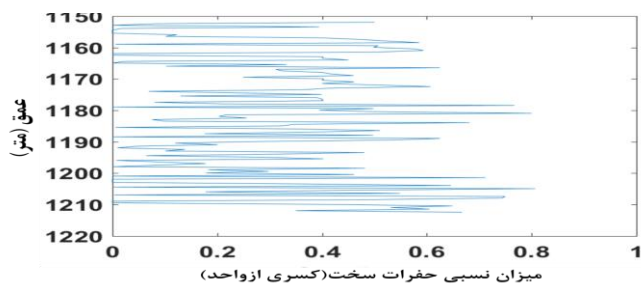
شکل ۷: آنالیز حساسیت مدل شو-پاین، خطا در برابر تغییرات درصد حفرات شامل رس (آبی رنگ)، سخت (قرمز رنگ)، شکستگی (زرد رنگ) و بین دانه‌ای بنفش رنگ



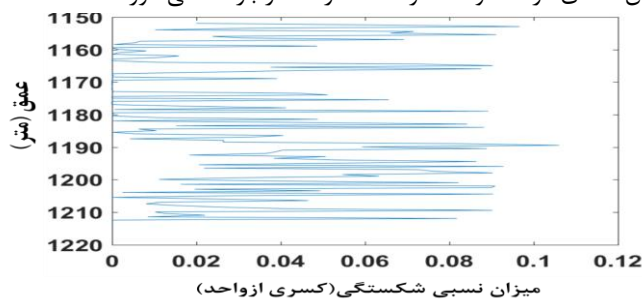
شکل ۸: آنالیز حساسیت مدل کاستر و توکسوز، خطا در برابر تغییرات درصد حفرات شامل کروی (آبی رنگ)، سوزنی (قرمز رنگ) و شکستگی (زرد رنگ)

قرار دارد و در شکل ۹-ج ارائه شده است. میزان نسبی رس در این مطالعه از روی نگارهای چاهی و ارزیابی سازند حاصل از آن محاسبه شد (شکل ۹-د). با بررسی این شکل‌ها می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که حفرات در مخزن مورد مطالعه بیشتر از نوع بین دانه‌ای و سپس از نوع حفرات سخت بوده و همان گونه که انتظار می‌رود درصد حفره از نوع شکستگی وزن کمی را به خود اختصاص داده است. علی‌رغم این که درصد حفرات از نوع شکستگی نسبت به سایر حفرات کمتر است؛ ولی نقش آن از نظر تأثیرگذاری نسبت به دو نوع حفره دیگر بسیار بالا بوده و در این خصوص وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهد.

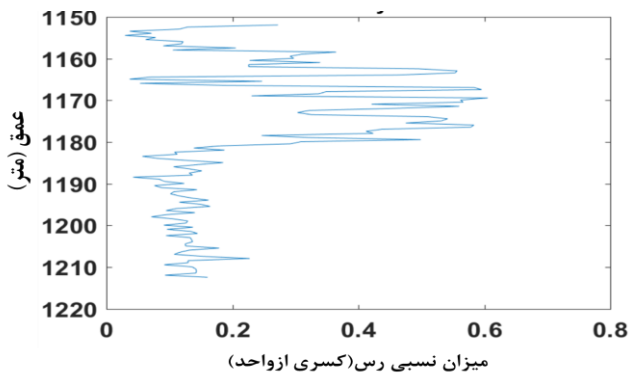
همان‌گونه که اشاره شد، در مدل‌های کاستر-توکسوز و شو-پاین به منظور مدل‌سازی پارامترهای الاستیکی (سرعت‌های لرزه‌ای) نیاز به اطلاعات درباره نوع و درصد حفرات دارد. در این مطالعه از نوع و درصد حفرات بدست آمده از وارون‌سازی در عمق در مدل شو-پاین استفاده شد (شکل ۹). همان‌گونه که در شکل ۹-الف قابل مشاهده است، درصد نسبی شکستگی در هر عمق مشخص شده و محدوده تغییرات درصد این نوع حفره از صفر تا ۱۰ درصد تغییر می‌کند. درصد تغییرات حفره از نوع حفرات سخت در شکل ۹-ب نشان داده شده است، محدوده تغییرات این نوع حفره در محدوده صفر تا ۶۵ درصد می‌باشد. درصد تغییرات حفره از نوع بین دانه‌ای در محدوده صفر تا ۸۰ درصد در بازه عمقی مورد مطالعه



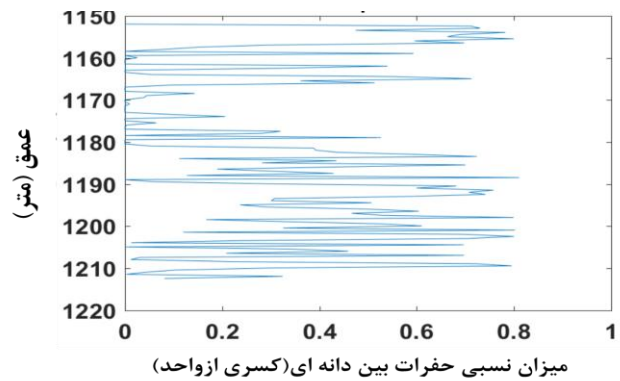
ب



الف



د



ج

شکل ۹: میزان نسبی چهار نوع تخلخل و حفرات در چاه A، در مخزن کربناته

به طور خلاصه، هیچ یک از مدل‌ها را نمی‌توان به عنوان بهترین مدل برای سنگ یا مخزن داده شده به طور عام اعلام کرد. چرا که ریزساختار و نوع حفرات یکی از عوامل اصلی کنترل خواص کشسانی سنگ‌هاست. بنابراین قبل از انتخاب مدل، ریزساختار سنگ باید به طور دقیق مورد مطالعه قرار گیرد. با مقایسه سرعت موج تراکمی اندازه گیری شده با سرعت موج تراکمی حاصل از مدل‌های کاستر-توکسوز و شو-پاین، در مخزن کربنات مورد مطالعه همبستگی‌های خوبی مشاهده شد. پس از بررسی نتایج این دو مدل، مدل شو-پاین تخمین خوبی داشته و نتایج بهتری را ارائه داده است. در واقع مخزن کربناته مورد مطالعه، با مفروضات مدل شو-پاین سازگار است. مدل کاستر-توکسوز به عنوان یک مدل نظری پایه با فرکانس بالا است؛ که برای مطالعات فراصوتی (اولتراسونیک) و برای سنگ‌های با تخلخل کم کارایی دارد. مدل شو-پاین مدل کاستر-توکسوز را برای فرکانس‌های متوسط و پایین نظیر داده‌های نگار چاه بهبود بخشیده؛ که با نتایج تحقیق همخوانی دارد. همچنین نسبت ابعادی و درصد نوع حفرات در مخزن مورد مطالعه با استفاده از روش وارون سازی، محاسبه گردید و میزان حساسیت دو مدل، به نوع حفرات مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این که حساسیت مدل‌ها به محتوی شیل و شکستگی‌ها بیش از سایر عوامل می‌باشد. نتایج این مطالعه را می‌توان در مطالعات امکان‌سنجی برای پروژه‌های لرزه‌ای چهار بعدی و همچنین در فرآیندهای وارون‌سازی پیش و پس از بر انبارش مورد استفاده قرارداد. همچنین لازم به ذکر است که این مدل‌سازی رویکرد عملی دارد و به راحتی قابل تکرار است و می‌توان آن را بر روی تعداد بیشتری از مخازن هیدروکربوری پیاده‌سازی نمود

با توجه به ملاحظات اشاره شده مدل‌ها ساخته شدند. همان گونه که ذکر شد، در بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی ها، مدل شو-پاین تخمین بهتری برای سنگ‌های کربناته را در مقایسه با مدل دیگر در مخزن مورد نظر در این مقاله ارائه می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

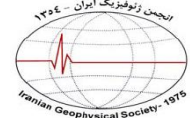
دو مدل فیزیک سنگی کاستر-توکسوز و شو-پاین با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی ارزیابی و مقایسه شدند، با توجه به این که دو مدل فیزیک سنگ مذکور با استفاده از داده‌های فقط دو چاه در یک مخزن کربناته در یک میدان نفتی ایران مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین نمی‌توان تعمیم کلی برای کلیه مخازن کربناته ارائه داد. مشاهدات نشان داد که اگر چه مدل‌های کاستر-توکسوز و شو-پاین برای سنگ‌های رسوبی آواری با فرض محیط‌های مؤثر جدایشی طراحی شده؛ ولی برای یک مخزن کربناته نیز می‌تواند به عنوان یک مدل فیزیک سنگ مناسب معرفی گردد. این بدان معنی است که می‌توان از این مدل‌ها برای مخازن کربناته نیز استفاده کرد. در اینجا، باید ذکر کرد که علی‌رغم این که تعداد محدودی از محققین مدل‌های مختلفی در مورد کاربرد مدل‌های فیزیک سنگ برای پیش‌بینی سرعت برشی سنگ‌های کربناته مطرح کردند؛ اما از میان این مدل‌ها به طور کلی برآورد سرعت برشی با استفاده از مدل‌های کاستر-توکسوز و شو-پاین برای چاه‌های مختلف به خوبی کار می‌کند. در این تحقیق بین این دو مدل با توجه به تخمین سرعت موج برشی اختلاف کوچکی در میزان دقت و صحت وجود داشت؛ اما مدل شو-پاین نتایج نسبی بهتری را نشان داد.

۵- مراجع

elastic properties to relevant characteristics of carbonate reservoir, In 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26-29 August 2013 (1114-1119). Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society.

Artola, F.A.V., Sanz, C., Villalobos, J.H., Castaneda, R., Borderas, M., Ravelo, J., Camacho, R.V., Gonzales, B.V., Olarte, F., Alpines, L.G. and Garrido, A.D., 2013, August. Comparing some rock physics methods that link

- Lucia, F. J., 2007, Carbonate reservoir characterization: An integrated approach: Springer Science and Business Media.
- Lumley, D. E., 2001, Time-lapse seismic reservoir monitoring, *Geophysics*, 66(1), 50-53.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J., 2009, The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media: Cambridge university press.
- Reine, C., 2015, A rock-physics tutorial: Discovering a supermodel.
- Saberi, M.R., 2017, A closer look flatrock physics models and their assisted interpretation in seismic exploration, *Iranian Journal of Geophysics*, 71-84.
- Saenger, E. H., 2016, Digital carbonate rock physics. *Solid Earth*, 7(4), 1185.
- Wang, Z., Schmitt, D. R., Zhou, Y., and Wang, F., 2017, Carbonate rock physics modelling at ultrasonic and seismic frequencies. Paper presented at the 4th International Workshop on Rock Physics, Trondheim, Norway.
- Xu, S., and Payne, M. A. ,2009, Modeling elastic properties in carbonate rocks, *The Leading Edge*, 28(1), 66-74.
- Xu, S., and White, R. E., 1995, A new velocity model for clay-sand mixtures, *Geophysical prospecting*, 43(1), 91-118.
- Yusoff, M., Bazleigh, Y., Radzi, N.A., Khalil, A., Amdan, A., Hong, C.W., Zeb, J. and Ting, J., 2014, December. Rock Physics Modelling in Oil and Gas Field Development, A Methodology for Reservoir Characterisation below Shallow Gas, In *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference.
- Zhao, L., Nasser, M., and Han, D. h., 2013, Quantitative geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs, *Geophysical Prospecting*, 61(4), 827-841.
- Avseth, P., Mukerji, T., and Mavko, G., 2010, Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk: Cambridge university press.
- Bashah, N. S. I., and Pierson, B. J., 2011, Quantification of pore structure in a miocene carbonate build-up of Central Luconia, sarawak and its relationship to sonic velocity, Paper presented at the International Petroleum Technology Conference.
- Berryman, J. G., 1995, Mixture theories for rock properties. *Rock physics and phase relations: A handbook of physical constants*, 205-228.
- Eberli, G. P., Baechle, G. T., Anselmetti, F. S., and Incze, M. L., 2003, Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks, *The Leading Edge*, 22(7), 654-660.
- Gegenhuber, N., and Pupos, J., 2015, Rock physics template from laboratory data for carbonates, *Journal of Applied Geophysics*, 114, 12-18.
- Grana, D., Verma, S., Pafeng, J., Lang, X., Sharma, H., Wu, W., and Alvarado, V. ,2017, A rock physics and seismic reservoir characterization study of the Rock Springs Uplift, a carbon dioxide sequestration site in Southwestern Wyoming, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 63, 296-309.
- Huang, Q., Dou, Q., Jiang, Y., Zhang, Q., and Sun, Y., 2017, An integrated approach to quantify geologic controls on carbonate pore types and permeability, Puguang gas field, China. *Interpretation*, 5(4), T545-T561.
- Kuster, G. T., and Toksöz, M. N., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: Part I. Theoretical formulations, *Geophysics*, 39(5), 587-606.
- Lubis, L., and Harith, Z., 2014, Pore type classification on carbonate reservoir in offshore Sarawak using rock physics model and rock digital images, Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.



Evaluation and comparison of Kuster-Toksoz and Xu-Payne rock physic modeling in an Iranian carbonate reservoir

Hamid. Seifi^{1*}, Behzad. Tokhmechiz and Ali. Moradzadeh³;

1. PhD Student; School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
3. Professor; School of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2 July 2018; Accepted: 9 December 2018

Corresponding author: hm.seifi@gmail.com

Keywords

Carbonate reservoirs
Rock physics
Pore space system
Compressional wave velocity
Shear wave velocity

Extended Abstract

Summary

Most rock physic models are developed for sandstone hydrocarbon reservoirs, which differ significantly from carbonate reservoirs. In this study, two rock physic models, Kuster-Toksoz and Xu-Payne, considering the inclusion models, have been investigated in two wells in one of the carbonate reservoirs in south of Iran. The application of both models has been evaluated as effective considering the results of

shear and compressional wave velocities extracted from the models compared with the same measured logs in the wells. Moreover, the pore percentage and aspect ratio estimations using inversion process have been made as well as sensitivity analysis for models. In general, the Xu-Payne model provides more relevant results, within the framework used in this study. In fact, the Xu-Payne has improved the Kuster-Toksoz model which is basically a high-frequency model for ultrasonic studies. It means that Xu-Payne approach contains a workflow which is designed to improve Kuster-Toksoz model for carbonates, and thus, the model is used in low frequencies domains similar to well log data.

Introduction

Rock physics could be of paramount importance in all stages of development of an oilfield from exploration up to production and optimum seismic reservoir characterization. In this regard, many researchers have discussed methodologies that they have developed and applied on clastic reservoirs and with less attention on carbonate rocks. In the current study, two rock physic models, namely Kuster-Toksoz and Xu-Payne models, have been used to derive elastic properties of a carbonate reservoir.

Methodology and Approaches

The study of the elastic properties of rock physics on carbonate rock has been carried out through Kuster-Toksoz and Xu-Payne rock physic models, two of which have two major advantages of calculation ease and flexibility of application for carbonates. In this research, the required steps of the procedure for rock physic modeling have been carried out. These models have been built and calibrated to well data to derive optimal elastic properties and to obtain reliable estimates of compressional wave velocity, shear wave velocity, and density. These parameters have finally been used for estimation of fluid and lithological properties. The main step consists of modeling each of the seismic rock properties over a specified porosity, clay content, and hydrocarbon type. Another important step in this regard is to classify the pore space system in these inclusion-based models.

Results and Conclusions

Two models of Kuster-Toksoz and Xu-Payne rock physics have been evaluated and compared using petrophysical and geological data, in a carbonate reservoir of an Iranian oil field. Observations have shown that although Kuster-Toksoz and Xu-Payne models are considered for sedimentary rocks with the assumption of differential effective medium, these models are also satisfied for carbonate reservoirs. Furthermore, the studied carbonate reservoir has been compatible with the Xu_Payne workflow assumptions. Therefore, this study shows that the Xu_Payne model is more in line with existing data than the other model. Microstructure and pore type are of the main factors that control the elastic properties of the carbonate rocks, thus, before any model selection, the rock microstructure and pore type must be studied in detail. The results of this study can be used in feasibility studies for time lapse (4D) seismic surveys as well as in the pre-stack inversion process.