



مدل سازی فیزیک سنگی در مخازن کربناته - مروری بر مدل های نظری و یک مطالعه موردی

فریبا مهماندوست^۱، محمد امامی نیری^{۲*}، سهیلا اصلانی^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف نفت؛ دانشکده فنی، دانشگاه تهران
۲. استادیار؛ انستیتو مهندسی نفت، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
۳. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۸/۰۸/۰۲ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2020.205710.1111

واژگان کلیدی	چکیده
مدل سازی فیزیک سنگی، مخازن کربناته، مدل های میانباری، خواص کشسانی، سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی،	طیف گسترده ای از مدل های محیط مؤثر شامل مدل های تماسی (محیط دانه ای) و مدل های میانباری برای توصیف نظری ویژگی های کشسانی مؤثر سنگ های رسوبی معرفی شده است. با توجه به ساختار پیچیده تر فضای حفره ای در سنگ های کربناته نسبت به آواری ها، توسعه مدل فیزیک سنگی در مخازن کربناته همواره با چالش های بیشتری روبرو بوده است. با در نظر گرفتن فرضیات و فیزیک مورد استفاده در توسعه مدل های میانباری، استفاده از این نوع مدل ها برای تعیین خواص کشسانی کربنات ها از توجه بیشتری برخوردار است. در این مقاله، ابتدا مبانی نظری، الگوریتم و روش اعمال چهار مدل فیزیک سنگی کاستر- تک سوز، تقریب خودسازگار، محیط مؤثر دیفرانسیلی و ژو-پین از گروه مدل های میانباری که برای مدل سازی فیزیک سنگی مخازن کربناته قابل استفاده هستند تشریح می شود. در ادامه، تجزیه و تحلیل و مدل سازی فیزیک سنگی با استفاده از مدل های مذکور در چهار چاه هدف از یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران انجام گرفته است. سرعت های امواج تراکمی و برشی در محدوده عمقی سازند کربناته در مخزن مورد مطالعه با استفاده از هر چهار مدل مذکور تخمین زده شده و با داده های اندازه گیری شده در محل چاه ها به صورت کیفی و کمی مقایسه شده است. با توجه به فرضیات و چهار چوب مورداستفاده در این مطالعه، مدل ژو-پین نسبت به دیگر مدل های فیزیک سنگی مورد استفاده در این پژوهش، در پیش بینی سرعت امواج تراکمی و برشی کارآیی و تطابق بهتری با داده های اندازه گیری شده (ضریب همبستگی بالاتر و میانگین خطای مطلق کمتر) نشان داد که نمایانگر اهمیت استفاده از چندین نوع تخلخل با نسبت ابعاد مختلف در سنگ کربناته مورد مطالعه است.

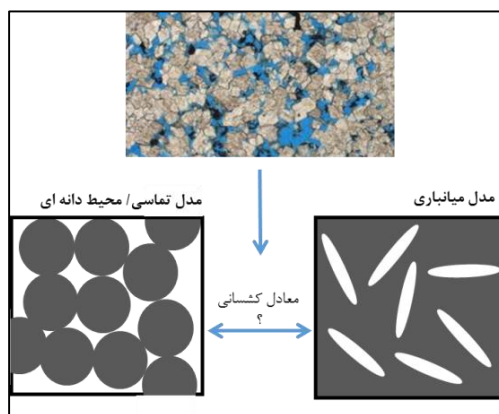
۱. پیش گفتار

در کلیه مراحل چرخه حیات میدین نفت و گاز، تجزیه و تحلیل داده های لرزه ای، نگارهای پتروفیزیکی و اندازه گیری های آزمایشگاهی بر روی مغزه از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. در این بین، مطالعه و درک ارتباط بین خواص پتروفیزیکی/زمین شناسی مخزن و رفتار کشسانی و لرزه ای آن ها بسیار مهم است که به طور معمول با تحلیل و مدل سازی فیزیک سنگی انجام می گیرد. نتایج مطالعات فیزیک سنگ به طور عمده در تفسیر کمی داده های لرزه ای

دوبعدی و سه بعدی، سرشت نمایی لرزه ای مخزن و پایش لرزه ای مخزن به کمک داده های لرزه ای چهاربعدی استفاده می شود. نوع سنگ مخزن بخش قابل توجهی از ذخایر هیدروکربوری اثبات شده جهان، کربناته است. کربنات ها به دلیل تفاوت قابل توجه در شرایط محیط رسوبی و فعالیت های دیاژنتیکی در طول تاریخ دفن، کاملاً متفاوت از سنگ های مخزن آواری (ماسه سنگی) می باشند. مخازن آواری اغلب دارای شبکه منافذ منفرد و نسبتاً ساده هستند؛ اما فرآیندهای پیچیده دیاژنتیکی معمولاً بافت و وضعیت کانی شناسی سنگ های کربناته را تغییر داده و باعث تنوع گسترده در منافذ

فیزیک سنگی، مدل‌های محاسباتی، جایگزینی‌ها، مدل‌های تماسی (محیط دانه‌ای) و مدل‌های میانباری طبقه‌بندی نمود (Avseth et al., 2009; Mavko et al., 2009) مدل‌های محاسباتی، ریز ساختار و وضعیت هندسی قرارگیری دانه و حفره نسبت به هم توسط تصویربرداری سی‌تی اسکن یا مقاطع نازک تعیین می‌گردد. حدود فیزیک‌سنگی، حد بالایی و حد پائینی مقادیر پارامترهای کشسانی سنگ را، بدون هیچ‌گونه فرضی در مورد وضعیت هندسی دانه‌ها و فضاهای خالی، به دست می‌دهد. جایگزینی‌ها شامل مدل‌هایی مانند مدل گاسمن برای جایگزینی سیال در فضای حفره‌ای سنگ است که معمولاً عاری از هرگونه فرضی در مورد بافت هندسی سنگ است. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است در توسعه مدل‌های محیط دانه‌ای، سنگ متخلخل یک آرایش تصادفی از دانه‌های کروی فرض می‌شود، به نحوی که دانه‌های سنگ در تماس با یکدیگر هستند. در توسعه مدل‌های میانباری فرض بر این است که سنگ با جای گرفتن میانبارها (به عنوان مثال حفره‌ها) در ماتریکس جامد سنگ تشکیل شده است (امامی‌نیری، ۱۳۹۶). مدل‌های تماسی اغلب برای مدل‌سازی مدول‌های کشسانی ماسه‌سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، درحالی‌که استفاده از مدل‌های میانباری برای تعیین خواص کشسانی کرنات‌ها از توجه بیشتری برخوردار است.

حفره‌ای آن‌ها می‌شود (Fabricius et al., 2010; Li and Zhang, 2018). ساختار پیچیده‌تر فضای حفره‌ای کرنات‌ها، منجر به چالش‌های بیشتری در فرآیندهای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی فیزیک سنگی نیز می‌شود (Anselmetti and Eberli, 1993; Lucia, 1993; Dou et al., 2009). به‌طور خاص، میزان بالایی از پراکندگی در رابطه بین تخلخل - سرعت برای کرنات‌ها گزارش شده است (Eberli, 1997; Assefa et al., 2003; Eberli et al., 2003; Sayers, 2008; Fabricius et al., 2010). دلیل اصلی ایجاد چنین پراکندگی زیاد در ارتباط سرعت - تخلخل در سنگ‌های کرنات‌ه، وجود انواع مختلف منافذ و شبکه منافذ پیچیده است. به عنوان مثال، Sun (۲۰۰۰) نشان داده است که در داده‌های به‌دست آمده از یک مخزن کرنات‌ه واقع در خاورمیانه، در یک شرایط یکسان از منظر میزان تخلخل و کانی‌شناسی، پراکندگی در سرعت موج تراکمی (Vp) تا ۲۵۰۰ متر بر ثانیه و حتی بیشتر وجود دارد که عمدتاً حاصل تفاوت زیاد در نوع منافذ حفره‌ای سنگ است. شایان ذکر است که منافذ قالبی و حفره‌ای (با نسبت ابعاد بالا) باعث سخت‌تر شدن سنگ شده و کمتر تحت تأثیر امواج لرزه‌ای قرار می‌گیرند؛ اما سنگ‌هایی با منافذ حفره‌ای از نوع درون‌دانه‌ای (با نسبت ابعاد متوسط) و شکاف‌ها (با نسبت ابعاد پایین) سختی کمتری داشته و در نتیجه به انتشار امواج لرزه‌ای حساس‌تر هستند. مدل‌های نظری فیزیک سنگی را می‌توان به پنج گروه عمده حدود



شکل ۱. مدل‌های محیط مؤثر برای توصیف نظری ویژگی‌های کشسانی سنگ‌های رسوبی. در مدل‌های تماسی / محیط دانه‌ای، یک سنگ متخلخل به صورت یک آرایش تصادفی از دانه‌های کروی که در تماس با یکدیگر هستند فرض می‌شود. در مدل‌های میانباری، سنگ متخلخل با جای دادن میانبارها (حفره‌ها) در یک ماتریکس جامد مدل‌سازی می‌شود.

۲. مدل‌سازی فیزیک سنگی در مخازن کربناته

همان‌گونه که اشاره گردید در مدل‌سازی فیزیک‌سنگ مخازن کربناته، مدل‌های میانباری دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. از جمله مهم‌ترین مدل‌های میانباری می‌توان به مدل کاستر-تکسوز^۱ (Kuster and Toksöz, 1974)، تقریب خودسازگار (SC)^۲ (Berryman, 1980)، مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی (DEM)^۳ (Cleary et al., 1980; Norris, 1985)، مدل ژو-پین^۴ (Xu and Payne, 2009)، مدل هودسون^۵ برای محیط‌های شکاف‌دار (Hudson, 1980)، مدل اشلیبی-چنگ^۶ برای محیط‌های شکاف‌دار غیر همسانگرد (Cheng, 1993) و مدل تی-ماتریس^۷ (Jakobsen et al., 2003) اشاره نمود. هر یک از این مدل‌ها بر فرضیاتی استوار بوده که بر اساس آن خواص کشسانی اجزای تشکیل دهنده سنگ و در نهایت خواص کشسانی کل سنگ محاسبه می‌شود.

در این پژوهش، مبانی نظری چهار مدل متداول کاستر-تکسوز، تقریب خودسازگار، محیط مؤثر دیفرانسیلی و مدل ژو-پین که به‌طور معمول برای مدل‌سازی فیزیک سنگی مخازن کربناته قابل استفاده هستند تشریح می‌شود، سپس الگوریتم و روش اعمال مدل‌های مذکور معرفی شده و نتایج اعمال مدل‌ها و مقایسه کمی آن‌ها در یکی از مخازن کربناته ایران ارائه می‌گردد. دیگر مدل‌های میانباری (هودسون، مدل اشلیبی-چنگ و تی-ماتریس و ...) به دلیل این‌که برای شرایط خاصی از سنگ‌ها از قبیل شکاف‌دار بودن، ناهمسانگردی و ... توسعه داده‌اند، و اینکه اعمال آن‌ها معمولاً دارای محدودیت و پیچیدگی‌های خاصی است در این مقاله مورد بحث قرار نمی‌گیرند.

نکته مهم این‌که در هر چهار مدل مورد استفاده در این پژوهش فرض بر این است که حفره‌ها نسبت به جریان سیال ایزوله است. بنابراین مدل، رفتار سنگ اشباع را در شرایط

فرکانس بالا شبیه‌سازی می‌کند که مناسب شرایط آزمایشگاهی اولتراسونیک است. برای کاربرد این مدل‌ها در شرایط فرکانس پایین (داده‌های چاه و لرزه)، بایستی ابتدا مدول‌های کشسانی مؤثر سنگ در حالت خشک توسط مدل مورد نظر محاسبه گردد و سپس با استفاده از روابط گاسمن (Gassmann, 1951)، فرآیند جایگزینی سیال برای اشباع سیال مورد نظر انجام پذیرد.

۱.۲ مدل کاستر-تکسوز

مدل کاستر-تکسوز بر اساس تئوری توزیع یا پخش‌شدگی امواج کشسانی مرتبه اول با طول موج بلند تعریف شده است؛ به‌گونه‌ای که در این مدل فرض بر این است که یک سنگ به دو قسمت ماتریکس و میانبار تقسیم شده است. در این مدل، اثر متقابل بین حفره‌ها در نظر گرفته نمی‌شود و شکل فضاهای خالی تأثیر زیادی روی مدول‌های کشسانی و در نتیجه، روی سرعت امواج کشسانی می‌گذارد. فرم کلی مدل کاستر-تکسوز جهت محاسبه مدول‌های حجمی و برشی مؤثر (μ_{KT}^* و K_{KT}^*) برای انواع مختلفی از اشکال میانبارها به‌صورت معادلات زیر نوشته می‌شوند (Kuster and Toksöz, 1974; Berryman, 1980):

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

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

^۱ Kuster and Toksoz

^۲ Self-Consistent approximation (SC)

^۳ Differential effective medium (DEM)

^۴ Xu and Payne model

^۵ Hudson's model

^۶ Eshelby-Cheng model

^۷ T-matrix

به دست می‌دهد. قبل از استفاده از رابطه وود، خواص کشسانی هر کدام از سیالات موجود در فضای حفره‌ای سنگ برای شرایط دمایی و فشاری مخزن، با استفاده از روابط بتزل و ونگ (Batzle and Wang, 1992) محاسبه می‌شود.

(۶) اضافه کردن سیال حفره‌ای با استفاده از معادلات گاسمن و محاسبه مدول‌های کشسانی سنگ در حالت اشباع (۷) محاسبه سرعت امواج تراکمی و برشی

(۸) مقایسه سرعت امواج تراکمی و برشی به دست آمده از روش کاستر-تکسوز با داده‌های اندازه‌گیری شده (۹) تکرار مراحل ۳ تا ۸ برای تعیین نسبت ابعاد مناسب و رسیدن به بهترین تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده.

۲.۲ مدل تقریب خودسازگار

یکی از روش‌هایی که توانسته است مشکل وجود میانباری‌های زیاد و تأثیر کشسانی آن‌ها بر یکدیگر را حل کند، روش تقریب خودسازگار است (Budiansky, 1965; Hill, 1965; Wu, 1966). در این روش ابتدا از راه‌حل‌های ریاضی برای توصیف تغییر شکل میانبارهای مجزا و ایزوله شده در زمینه استفاده می‌شود؛ اما برای تخمین تأثیر متقابل میانباری‌ها بر یکدیگر، خصوصیات کشسانی محیط زمینه با خصوصیات کشسانی مؤثر که از قبل تعیین شده است، در روابط اولیه به دست آمده، جایگزین می‌شود (O'Connell and Budiansky, 1976; Mavko et al., 2009). فرم کلی مدل تقریب خودسازگار برای مدول‌های حجمی و برشی مؤثر (μ_{sc}^* و K_{sc}^*) برای یک ترکیب N فازی به صورت معادلات زیر نوشته می‌شوند (Berryman, 1980):

$$\sum_{i=1}^N x_i (K_i - K_{sc}^*) P^{*i} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (\mu_i - \mu_{sc}^*) Q^{*i} = 0 \quad (4)$$

که در این معادلات، x_i درصد حجمی i امین ماده است. این معادلات به صورت جفتی بوده و به صورت هم‌زمان در یک پروسه تکرار می‌بایستی حل شوند. شروع این پروسه با یک حدس اولیه از مقادیر μ_{sc}^* و K_{sc}^* آغاز می‌شود. میانگین ویت می‌تواند تخمین خوبی برای شروع باشد. سپس در معادلات مربوط به P^{*i} و Q^{*i} (پیوست ۱) بجای مقادیر K_m و μ_m ، به

که در روابط فوق K_m و μ_m به ترتیب مدول حجمی و مدول برشی ماتریکس سنگ، N تعداد کل میانبارها، K_i و μ_i به ترتیب مدول حجمی و مدول برشی میانبار i ام، x_i درصد حجمی میانبار i ام، و $\zeta_m = \frac{\mu_m(9K_m+8\mu_m)}{6(K_m+2\mu_m)}$ است. همچنین ضرایب Q^{mi} و P^{mi} تأثیر میانباری ماده i ام در محیط زمینه m را نشان می‌دهند. مقادیر فاکتورهای هندسی P و Q برای برخی از اشکال میانباری مشخص از قبیل کروی، سوزنی، دیسکی و شکستگی سکه‌ای کم ضخامت توسط Berryman (1995) ارائه شده است. همچنین، نحوه محاسبه مقادیر P و Q برای میانبارهای بیضوی با نسبت ابعاد دلخواه و اختیاری، در پیوست ۱ مقاله آورده شده است (Berryman, 1980).

محدودیت اصلی مدل کاستر-تکسوز این است که در آن مقدار تخلخل بخش بر نسبت ابعاد بایستی کوچک‌تر یا مساوی با یک باشد ($1 \leq \frac{\phi}{\alpha}$). این بدین معنی است که برای فضای حفره‌ای از نوع شکاف و درز با نسبت ابعاد حدود ۰/۰۱، این تئوری فقط می‌تواند خواص محیط مؤثر را در تخلخل‌های پائین (حداکثر تا تخلخل برابر با ۱ درصد) محاسبه کند (Zhao, et al., 2013). در این پژوهش، برای اعمال مدل کاستر-تکسوز بر روی داده‌های مخزن مورد مطالعه، الگوریتم زیر تعیین و کد نویسی شده است:

(۱) تعیین پارامترهای ورودی (چگالی و مدول‌های کشسانی کانی‌های تشکیل‌دهنده ماتریکس سنگ و مدول‌های کشسانی سیالات و تخلخل)
(۲) محاسبه مدول کشسانی ماتریکس سنگ با استفاده از رابطه ویت-رویس-هیل (Voigt, 1907; Ruess, 1929; Hill, 1952)

(۳) تعیین مقادیر نسبت ابعاد و محاسبه مقادیر P^{mi} و Q^{mi} (با استفاده از روابط ارائه شده در پیوست ۱)

(۴) محاسبه مدول‌های حجمی و برشی مؤثر سنگ در حالت خشک با استفاده از معادلات کاستر-تکسوز (معادلات ۱ و ۲)

(۵) محاسبه مدول کشسانی مؤثر سیالات حفره‌ای با استفاده از رابطه وود (Wood, 1955)

رابطه وود در واقع یک میانگین‌گیری هارمونیک مابین مدول‌های کشسانی سیالات موجود در فضای حفره‌ای است و معمولاً جواب نزدیک به واقعیت برای حالت ترکیب همگن سیالات

همکاران (Cleary et al., 1980)، نوریس (Norris, 1985) و زیمرمن (Zimmerman, 1991) معرفی و توسعه پیدا کرده است، یکی از روش‌های نظری تعیین مدول‌های کشسانی مؤثر سنگ است که در آن یک سنگ متشکل از ماتریس و میانبارها تصور می‌شود. برای به دست آوردن مدول مؤثر ترکیب، فاز میانبار به تدریج به فاز ماتریس اضافه می‌شود و در نهایت مدول مؤثر کل سنگ با اضافه شدن تمام میانبارها به فاز ماتریکس محاسبه می‌گردد (شکل ۲). به عنوان مثال، برای یک ترکیب دو فازی، میانبارها (فاز ۲) به فاز ماتریکس (فاز ۱) به صورت تدریجی افزوده می‌شود. مدل‌سازی با در نظر گرفتن ماتریس سنگ به عنوان فاز ۱ (با میزان کسر حجمی فاز ۲ برابر با صفر) آغاز می‌گردد. فاز ۲ به تدریج به فاز ۱ اضافه می‌گردد و فرآیند تا جایی تکرار می‌گردد که به کسر حجمی مطلوب برای هر کدام از اجزای تشکیل دهنده سنگ دست یابیم. روابط DEM با اجزای تشکیل دهنده سنگ، به شکل متقارن برخورد نمی‌کند، بلکه تأثیر ماده‌ای که به عنوان ماتریس یا میزبان (فاز ۱) در نظر گرفته می‌شود بیشتر از تأثیر مواد دیگر که به عنوان میانبار در نظر گرفته می‌شوند (فاز ۲)، می‌باشد. در واقع مدول‌های کشسانی جزء میزبان، مدول‌های کشسانی مؤثر کل سنگ را که از روش DEM به دست می‌آیند بیشتر تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. در روش DEM، شروع از جزء یک به عنوان ماتریس و اضافه کردن تدریجی جزء ۲، با شروع از جزء ۲ به عنوان ماتریس و اضافه کردن تدریجی جزء ۱، نتیجه‌ای متفاوت در مقدار مدول‌های کشسانی مؤثر سنگ به همراه خواهد داشت. اگر اجزای تشکیل دهنده سنگ، بیشتر از دو ماده باشد یا در زمانی که شکل‌های میانباری متعددی وجود داشته باشد، علاوه بر کسر حجمی هر کدام از اجزای تشکیل دهنده سنگ، ترتیب اضافه شدن اجزاء به ترکیب، طی فرآیند DEM بسیار مهم است و نتایج متفاوتی به همراه خواهد داشت. در مقایسه، روش تقریب خودسازگار، جزء میزبانی را مشخص نمی‌کند و سنگ را به عنوان ترکیب تصادفی از اجزای تشکیل دهنده در نظر می‌گیرد. بنابراین روش SC یک روش متقارن است چرا که وابسته به ترتیب اضافه شدن اجزاء به ترکیب نهایی سنگ نمی‌باشد. نکته مهم دیگر اینکه، سنگ‌های کربناته با نوع تخلخل حفره‌ای یا قالبی (حاصل از فرآیند انحلال)، مناسب مدل‌سازی با روش مدل DEM (در مقایسه با سایر روش‌های محیط مؤثر) در نظر

ترتیب مقادیر K_{SC}^* و μ_{SC}^* گذاشته می‌شود. با حل معادله بالا، مقادیر جدید K_{SC}^* و μ_{SC}^* به دست می‌آید. دوباره در یک پروسه تکراری این مقادیر جدید در معادلات P^{*i} و Q^{*i} ، بجای مقادیر K_m و μ_m قرار گرفته و در نتیجه یک K_{SC}^* و μ_{SC}^* جدید به دست می‌آید. با انجام چند باره این فرآیند، مقادیر K_{SC}^* و μ_{SC}^* به یک مقدار مشخص همگرا می‌شوند که این مقدار همان مقادیر کشسانی مؤثر خودسازگار سنگ است.

در این پژوهش، برای اعمال روش تقریب خودسازگار بر روی داده‌های مخزن مورد مطالعه، الگوریتم زیر تعیین و کد نویسی شده است:

۱) تعیین پارامترهای ورودی (چگالی و مدل‌های کشسانی کانی‌های تشکیل‌دهنده ماتریکس سنگ و مدل‌های کشسانی سیالات و تخلخل)

۲) محاسبه مدول کشسانی ماتریکس سنگ با استفاده از رابطه ویت-رویس-هیل

۳) تعیین مقدار نسبت ابعاد و محاسبه مقادیر P^{*i} و Q^{*i} (با استفاده از روابط ارائه شده در پیوست ۱)

۴) محاسبه مدول کشسانی مؤثر حجمی و برشی سنگ در حالت خشک با استفاده از معادلات تقریب خودسازگار (معادلات ۳ و ۴) طی فرآیند توصیف شده در بالا جهت دستیابی به مقادیر K_{SC}^* و μ_{SC}^*

۵) محاسبه مدول کشسانی مؤثر سیالات حفره‌ای با استفاده از رابطه وود

قبل از استفاده از رابطه وود، خواص کشسانی هر کدام از سیالات موجود در فضای حفره‌ای سنگ برای شرایط دمایی و فشاری مخزن، با استفاده از روابط بتزل و ونگ (Batzle and Wang, 1992) محاسبه می‌شود.

۶) اضافه کردن سیال حفره‌ای با استفاده از معادلات گاسمن و محاسبه مدول‌های کشسانی سنگ در حالت اشباع

۷) محاسبه سرعت موج تراکمی و برشی

۸) مقایسه سرعت موج تراکمی و برشی به دست آمده از روش تقریب خودسازگار با داده‌های اندازه‌گیری شده

۹) تکرار مراحل ۴ تا ۸ برای تعیین نسبت ابعاد مناسب و رسیدن به بهترین تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده.

۳.۲ مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی

روش محیط مؤثر دیفرانسیلی (DEM) که توسط کلیری و

درصد حجمی واقعی میانبارها (تخلخل سنگ) شود با میل دادن dy به صفر ($dy \rightarrow 0$) این فرایند را می توان به صورت معادلات دیفرانسیلی زیر فرمول بندی کرد:

$$(1 - y) \frac{d}{dy} [K^*(y)] = (K_2 - K^*)P^{(*2)}(y) \quad (5)$$

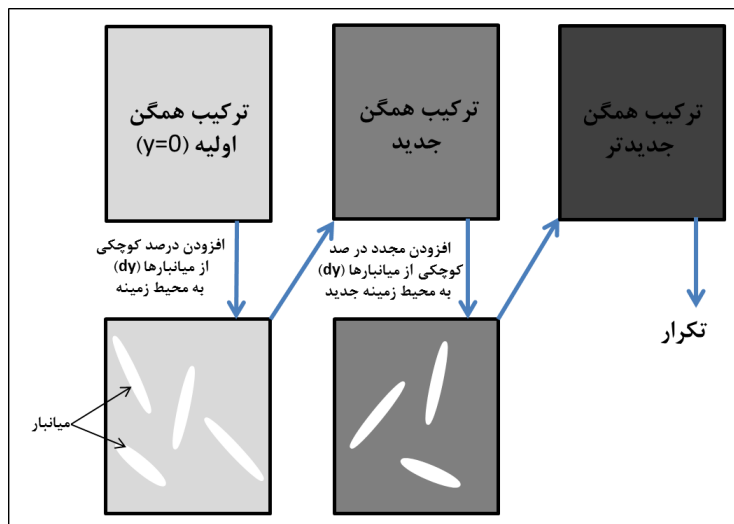
$$(1 - y) \frac{d}{dy} [\mu^*(y)] = (\mu_2 - \mu^*)Q^{(*2)}(y) \quad (6)$$

با شرایط اولیه $K^*(0) = K_1$ و $\mu^*(0) = \mu_1$ که در آن K_1 و μ_1 مدول های حجمی و برشی فاز ماتریس سنگ (فاز ۱) و K_2 و μ_2 مدول های حجمی و برشی فاز میانبارهای افزوده شده (فاز ۲)، و γ کسر حجمی فاز ۲ می باشد. با در نظر گرفتن یک سنگ متخلخل با میزان تخلخل \emptyset و میزان تغییرات تخلخل در هر مرحله برابر با $d\emptyset$ می توان معادلات بالا را به فرم زیر نوشت:

$$(1 - \emptyset) \frac{d}{d\emptyset} [K^*(\emptyset)] = (K_2 - K^*)P^{(*2)}(\emptyset) \quad (7)$$

$$(1 - \emptyset) \frac{d}{d\emptyset} [\mu^*(\emptyset)] = (\mu_2 - \mu^*)Q^{(*2)}(\emptyset) \quad (8)$$

گرفته می شوند (Ruiz, 2009). هر چند فرایند افزودن تدریجی میانبارها (فضای حفره ای) به ماتریس سنگ یک آزمایش استدلالی است و نباید به عنوان یک توصیف واقعی برای نحوه تشکیل و تکامل تخلخل سنگ در طبیعت در نظر گرفته شود. برای توسعه روابط ریاضی مدل DEM، مطابق با شکل ۲، فرض کنید محیطی متشکل از دو ماده وجود داشته باشد، یکی میانبار با درصد حجمی γ و دیگری ماتریکس با درصد حجمی $1 - \gamma$. برای انجام روش محیط مؤثر دیفرانسیلی و به دست آوردن مقادیر مدول حجمی و برشی مؤثر کل ($K^*(y)$ و $\mu^*(y)$)، ابتدا با مقدار مشخص مربوط به زمانی که درصد حجمی میانبار برابر صفر (تخلخل برابر با صفر) است آغاز می کنیم که در این حالت مقادیر مدول های کشسانی مؤثر کل برابر با مدول های کشسانی ماتریکس است (شرایط اولیه). حال طبق فرایند گفته شده به صورت تدریجی میانبارها به اندازه به محیط زمینه اضافه می شوند، یعنی به اندازه dy میانبار به ترکیب اضافه شده و مدول مؤثر ترکیب محاسبه می شود (یعنی $K_{DEM}^*(y + dy)$). سپس آن را به عنوان ترکیب همگن جدید (میزبان) در نظر گرفته و دوباره به اندازه dy میانبار اضافه شده و مدول مؤثر ترکیب اندازه گیری می شود و این فرآیند تا جایی ادامه داده می شود که γ برابر با



شکل ۲. شکل شماتیک فرآیند افزودن تدریجی میانبارها به محیط زمینه در روش DEM

همان طور که در این روابط دیفرانسیلی مشاهده می گردد مدول های کشسانی مؤثر DEM، علاوه بر مدول های ماتریس

۴.۲ ژو-پین

ژو - وایت، یک مدل فیزیک سنگی برای مخلوط رس و ماسه ارائه داده است (Xu and White, 1995). نکته کلیدی مدل ژو - وایت، این فرض است که نسبت ابعاد برای حفره‌های ماسه‌ای بسیار متفاوت با حفره‌های رسی است. بنابراین فضای حفره‌ای کلی سنگ، به دو نوع تداخل با نسبت ابعاد مختلف تقسیم می‌شود. مدل ژو-پین، توسعه داده شده مدل ژو- وایت برای سنگ‌های کربناته است، که در آن، تداخل کل (ϕ_T) به چهار نوع تقسیم می‌شود: تداخل مربوط به رس (ϕ_{Clay})، تداخل مرجع/مربوط به حفرات بین‌دانه‌ای (ϕ_{IP})، شکاف‌ها (ϕ_{Crack}) و حفرات سفت (ϕ_{Stiff}):

$$\phi_T = \phi_{Clay} + \phi_{IP} + \phi_{Crack} + \phi_{Stiff} \quad (9)$$

در این پژوهش، برای اعمال مدل ژو-پین بر روی داده‌های مخزن مورد مطالعه، الگوریتم زیر تعیین و کد نویسی شده است، در شکل ۳ نیز جزئیات مدل فیزیک سنگ ژو-پین به‌طور شماتیک نمایش داده شده است:

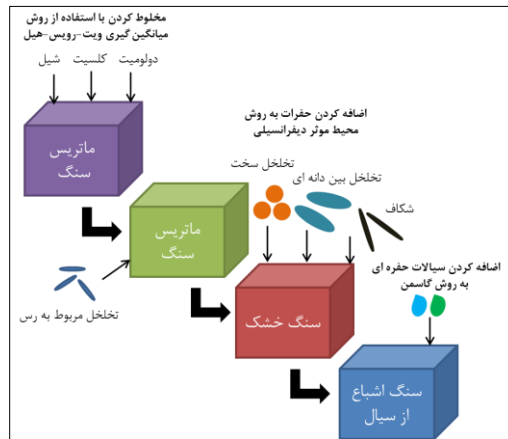
- (۱) تعیین پارامترهای ورودی (چگالی و مدل‌های کشسانی کانی‌های تشکیل‌دهنده ماتریکس سنگ و مدل‌های کشسانی سیالات و تداخل)
- (۲) محاسبه مدول کشسانی ماتریکس سنگ با استفاده از رابطه ویت-رویس-هیل
- (۳) اضافه کردن تداخل وابسته به کانی‌های رس به ماتریکس سنگ با استفاده از روابط DEM
- (۴) تعیین نسبت ابعاد مناسب برای سه نوع حفرات بین‌دانه‌ای، حفرات سخت و شکاف‌ها
- (۵) اضافه کردن سه نوع حفرات بین‌دانه‌ای، شکاف‌ها و حفرات سفت با استفاده از روابط DEM و محاسبه مدول‌های کشسانی سنگ در حالت خشک
- (۶) محاسبه مدول کشسانی مؤثر سیالات حفره‌ای با استفاده از رابطه وود
- قبل از استفاده از رابطه وود، خواص کشسانی هر کدام از سیالات موجود در فضای حفره‌ای سنگ برای شرایط دمایی و فشاری مخزن، با استفاده از روابط بتزل و ونگ (Batzele and Wang, 1992) محاسبه می‌شود.
- (۷) محاسبه سرعت امواج تراکمی و برشی
- (۸) مقایسه سرعت امواج تراکمی و برشی به‌دست‌آمده از روش محیط مؤثر دیفرانسیلی با داده‌های اندازه‌گیری شده
- (۹) تکرار مراحل ۳ تا ۸ برای تعیین نسبت ابعاد مناسب و رسیدن به بهترین تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده.

سنگ و میانبارها به فاکتورهای هندسی P و Q نیز بستگی دارند. به عبارت دیگر، شکل هندسی میانبارها در این روش نیز در مقدار نهایی مدول مؤثر تأثیرگذار است. هرچه سنگ دارای فضای حفره‌ای با شکل کروی با نسبت ابعاد نزدیک به ۱ باشد مقدار مدول‌های مؤثر حاصل از روش DEM بیشتر بوده و در نتیجه سنگ سخت‌تر خواهد بود و بالعکس هر چه نسبت ابعاد کوچک‌تر و فضای حفره‌ای به شکل شکاف‌های باریک باشد مقدار مدول‌های مؤثر حاصل از روش DEM دارای مقدار کمتر و در نتیجه سنگ سست‌تر خواهد بود. در این پژوهش، برای اعمال روش DEM بر روی داده‌های مخزن مورد مطالعه، الگوریتم زیر تعیین و کد نویسی شده است:

- (۱) تعیین پارامترهای ورودی (چگالی و مدل‌های کشسانی کانی‌های تشکیل‌دهنده ماتریکس سنگ و مدل‌های کشسانی سیالات و تداخل)
- (۲) محاسبه مدول کشسانی ماتریکس سنگ با استفاده از رابطه ویت-رویس-هیل
- (۳) تعیین مقدار نسبت ابعاد و محاسبه مقادیر P^* و Q^* (با استفاده از روابط ارائه شده در پیوست ۱)
- (۴) محاسبه مدول‌های حجمی و برشی مؤثر سنگ در حالت خشک با استفاده از معادلات محیط مؤثر دیفرانسیلی طی فرآیند توصیف شده در بالا برای افزودن تدریجی فضای حفره‌ای به ماتریکس سنگ (معادلات ۷ و ۸)
- (۵) محاسبه مدول کشسانی مؤثر سیالات حفره‌ای با استفاده از رابطه وود
- قبل از استفاده از رابطه وود، خواص کشسانی هر کدام از سیالات موجود در فضای حفره‌ای سنگ برای شرایط دمایی و فشاری مخزن، با استفاده از روابط بتزل و ونگ (Batzele and Wang, 1992) محاسبه می‌شود.
- (۶) اضافه کردن سیال حفره‌ای با استفاده از معادلات گاسمن و محاسبه مدول‌های کشسانی سنگ در حالت اشباع
- (۷) محاسبه سرعت امواج تراکمی و برشی
- (۸) مقایسه سرعت امواج تراکمی و برشی به‌دست‌آمده از روش محیط مؤثر دیفرانسیلی با داده‌های اندازه‌گیری شده
- (۹) تکرار مراحل ۳ تا ۸ برای تعیین نسبت ابعاد مناسب و رسیدن به بهترین تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل شده.

روش ژو-پین با داده‌های اندازه‌گیری شده
(۱۰) تکرار مراحل ۳ تا ۹ برای تعیین نسبت ابعاد مناسب
و رسیدن به بهترین تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و
مدل شده

(۷) اضافه کردن سیال حفره‌ای با استفاده از معادلات
گاسمن و محاسبه مدول‌های کشسانی سنگ در حالت اشباع
(۸) محاسبه سرعت امواج تراکمی و برشی
(۹) مقایسه سرعت امواج تراکمی و برشی به دست آمده از



شکل ۳. نمودار شماتیک از مراحل اعمال مدل فیزیک سنگ ژو - پین (Xu and Payne, 1995).

بین‌دانه‌ای و در شکل ۴-ج، حفرات عمدتاً از نوع انحلالی (قالبی) است که با انحلال دانه‌های ماتریس تشکیل شده‌اند. با توجه به وضعیت حفره‌ها و بافت سنگ، می‌توان عنوان کرد که در میدان مورد مطالعه انواع مختلفی از فضای حفره‌ای وجود دارد که بیانگر این مسئله است که تخلخل موجود در سنگ مخزن هم حاصل از شرایط رسوب‌گذاری است و هم اینکه فرآیندهای دیاژنری مانند انحلال و درز و شکاف در تشکیل آن تأثیر گذاشته است.

۳. مطالعه موردی

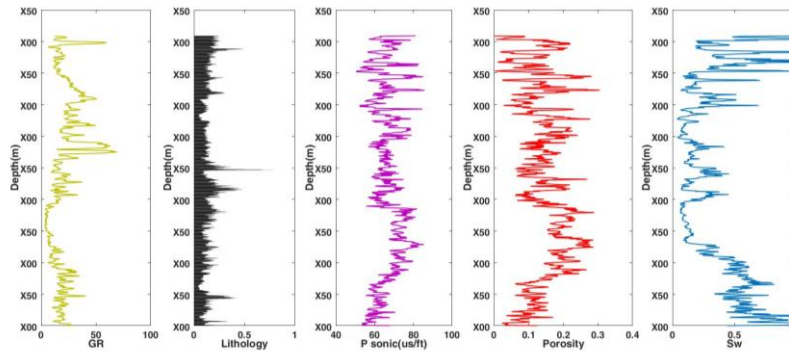
در این پژوهش، از داده‌های مربوط به یک مخزن کربناته واقع در جنوب غرب ایران استفاده شده است. مخزن مورد نظر مربوط به سازند سروک است. در شکل ۴ مقاطع نازک تهیه شده از چندین مغزه از سازند سروک در میدان مورد مطالعه نشان داده شده است. بخش‌های آبی نشان‌دهنده فضای حفره‌ای است. در شکل ۴-الف، عمده فضای متخلخل سنگ را شکاف‌ها تشکیل داده‌اند، در شکل ۴-ب، حفرات از نوع



شکل ۴. مقاطع نازک تهیه شده از سازند سروک در مخزن کربناته واقع در جنوب غرب ایران. بخش‌های آبی نشان‌دهنده فضای خالی است. (الف) شکاف‌ها و شکستگی‌ها. (ب) حفرات بین‌دانه‌ای. (ج) حفرات انحلالی ماتریس.

مدل سازی فیزیک سنگی در مخازن کربناته - مروری بر مدل های نظری و یک مطالعه موردی

در این مطالعه، از داده های مربوط به چهار چاه A1، A2، A3 و A4 از میدان مورد نظر استفاده شده است. در هر چهار چاه مورد استفاده در این مطالعه، نگارهای چاه شامل: پرتو گاما (GR)، سونیک (DT)، چگالی (RHOB)، مقاومت (LLD) و LLS، تخلخل نوترون (NPHI) موجود است. برای مثال نگارهای مربوط به چاه A1 در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵. نگارهای چاه A1، شامل نگارهای اشعه گاما، لیتولوژی (قسمت مشکی بیانگر حجم شیل و مابقی مربوط به کانی کلسیت است)، نگار سونیک، تخلخل و اشباع شدگی.

که فقط یک نوع فضای خالی در هر عمق وجود دارد که حدس اولیه برای ضریب هندسی آن عدد ۰/۱۲ بوده است. اما در روش ژو - پین با توجه به مبانی نظری و روش اجرائی متفاوت این روش در هر عمق دو نوع فضای حفره ای در نظر گرفته شده است، که می تواند فضای حفره ای بین دانه ای و حفرات سخت یا فضای حفره ای بین دانه ای و شکافها باشد. حدس اولیه نسبت ابعاد برای حفرات بین دانه ای، حفرات سخت و شکافها به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۷ و ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. سپس طی یک فرآیند بهینه سازی، مراحل مختلف هر کدام از مدل ها تکرار شده تا نسبت ابعاد بهینه تعیین شده و بهترین تطابق بین داده های اندازه گیری شده و مدل شده به دست آید. مقایسه سرعت موج تراکمی اندازه گیری شده (آبی رنگ) با سرعت موج تراکمی برآورد شده (قرمز رنگ) با استفاده از مدل های الف) کاستر- تکسوز، ب) تئوری تقریب خودسازگار، ج) محیط مؤثر دیفرانسیلی و د) ژو-پین، در محل چاه A1 در محدوده عمقی سازند کربناته سروک از میدان مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

۴. نتایج و بحث

۱.۴ پیش بینی سرعت موج تراکمی با استفاده از

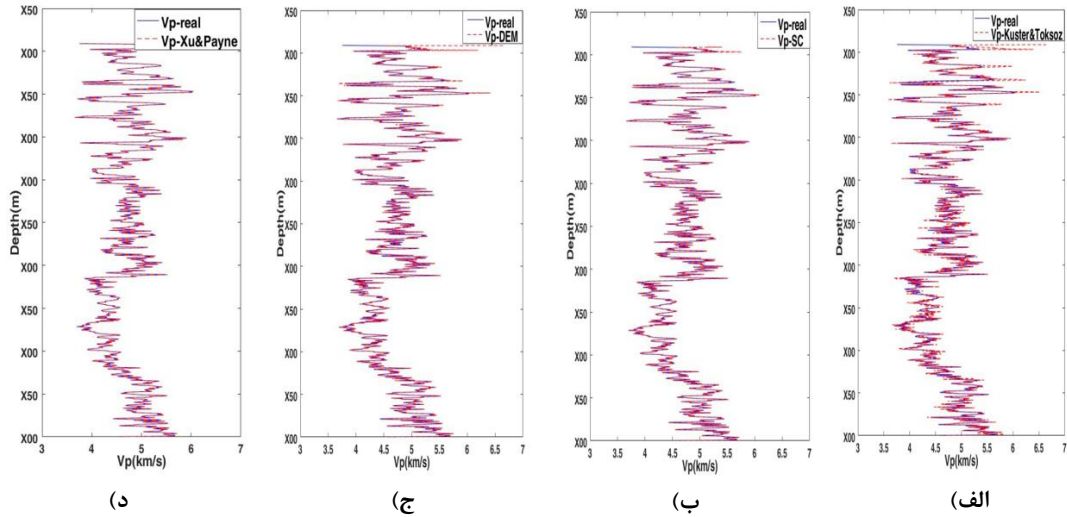
مدل های فیزیک سنگ میانباری

در این پژوهش، برای اعمال مدل های فیزیک سنگی مورد بحث شامل کاستر- تکسوز، تقریب خودسازگار، تئوری محیط مؤثر دیفرانسیلی و ژو-پین بر روی داده های مخزن مورد مطالعه، ابتدا الگوریتم های مربوط به هر کدام از مدل ها تعیین و در نرم افزار MATLAB کد نویسی شده است. سپس با استفاده از الگوریتم های تعیین شده، سرعت موج تراکمی با استفاده از هر کدام از مدل های فیزیک سنگی مذکور تخمین زده شده است. پارامترهای ورودی مشترک در هر چهار مدل فیزیک سنگی شامل چگالی (برحسب گرم بر سانتی متر مکعب) و مدل های کشسانی کانی های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ و مدل های کشسانی سیالات موجود در فضای حفره ای (برحسب گیگا پاسکال) در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، در اعمال سه روش کاستر- تکسوز، تقریب خودسازگار، محیط مؤثر دیفرانسیلی فرض بر این بوده است

جدول ۱. پارامترهای ورودی مشترک در هر چهار مدل فیزیک سنگی (چگالی (برحسب گرم بر سانتی متر مکعب) و مدل های

کشسانی کانی های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ و مدل های کشسانی سیالات موجود در فضای حفره ای (برحسب گیگا پاسکال)).

	کلسیت	رس	آب	نفت
ضریب حجمی	۷۰	۲۲	۲/۷۲	۱/۰۲
ضریب برشی	۲۵	۷	-	-
چگالی	۲/۷۵	۲/۳۱	۱/۰۳	۰/۷۷



شکل ۶. مقایسه سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده (آبی رنگ) با سرعت موج تراکمی برآورد شده (قرمز زنگ) با استفاده از مدل‌های الف) کاستر - تکسوز، ب) تقریب خودسازگار، ج) محیط مؤثر دیفرانسیلی و د) ژو-پین، در محل چاه A1.

در شکل ۶-الف، سرعت موج تراکمی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل کاستر-تکسوز و سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده در محل چاه A1 تطابق خوبی را نشان می‌دهند؛ میانگین خطای مطلق حاصل (MAE) برابر با ۷۹/۹۳ متر بر ثانیه است، و ضریب همبستگی بین دو نگار پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۹۵ است که در مقایسه با سایر مدل‌ها، انطباق کمتری بین مقادیر پیش‌بینی شده با مدل تقریب خودسازگار و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. در شکل ۶-ب، مقایسه سرعت موج تراکمی برآورد شده با استفاده از تئوری تقریب خودسازگار و سرعت موج واقعی اندازه‌گیری شده نشان داده شده است، که در آن میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب همبستگی به ترتیب برابر با

۱۹/۱۴ متر بر ثانیه و ۰/۹۶ است. در شکل ۶-ج، در مقایسه سرعت موج تراکمی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی و سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده میانگین خطای مطلق (MAE) ۱۶/۲۹ متر بر ثانیه و ضریب همبستگی ۰/۹۷ به دست آمده است. در شکل ۶-د، در مقایسه بین نگار سرعت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ژو-پین انطباق بسیار بالایی وجود دارد، که ضریب همبستگی ۰/۹۸ درصد و میانگین خطای مطلق (MAE) ۵/۷ متر بر ثانیه به دست آمده است. خلاصه مقایسه کمی نتایج مدل‌سازی در پیش‌بینی سرعت موج تراکمی برای چاه A1 در جدول ۲ آورده شده است.

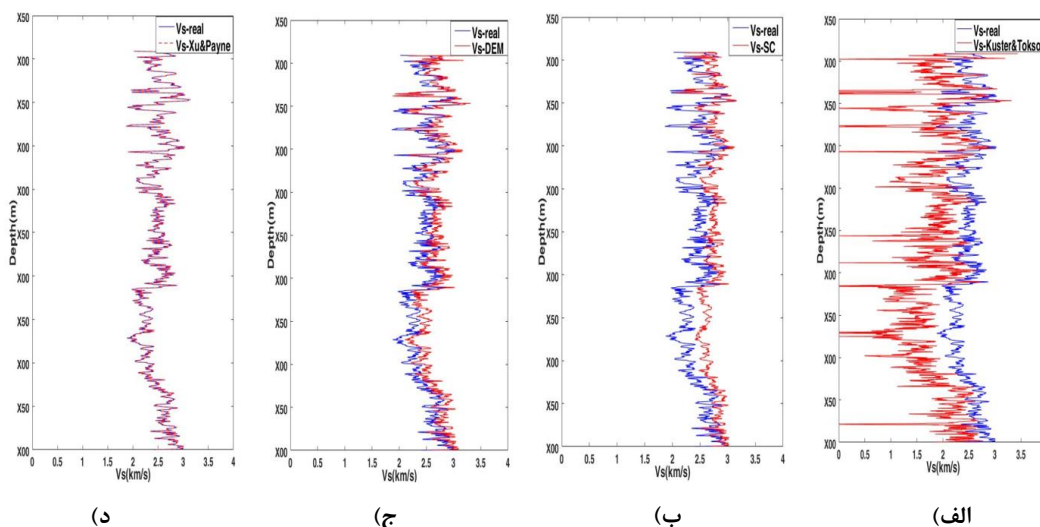
جدول ۲. نتایج مدل‌سازی در پیش‌بینی سرعت موج تراکمی برای چاه A1.

چاه A1	مدل کاستر و تکسوز	مدل تقریب خودسازگار	مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی	مدل ژو و پین
میانگین خطای مطلق (MAE)	۷۹/۹۳	۱۹/۱۴	۱۶/۲۹	۵/۷
بر حسب متر بر ثانیه				
ضریب همبستگی	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸

۲.۴ پیش‌بینی سرعت موج برشی با استفاده از مدل‌های فیزیک‌سنگ میانباری

در بخش بعدی این تحقیق از مدل‌های فیزیک‌سنگ کاستر-تکسوز، تئوری تقریب خودسازگار، محیط مؤثر دیفرانسیلی و

ژو-پین برای تخمین سرعت موج برشی در محدوده عمقی سازند کربناته سروک در مخزن مورد مطالعه استفاده شده است که نتایج مدل‌سازی در محل چاه A1 در شکل ۷ آورده شده است. جهت مقایسه، نگار سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده در چاه A1 نیز با رنگ آبی نشان داده شده است.



شکل ۷. مقایسه سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده (آبی رنگ) با سرعت موج برشی برآورد شده (قرمز رنگ) با استفاده از مدل‌های الف) کاستر- تک سوز، ب) تقریب خودسازگار، ج) محیط مؤثر دیفرانسیلی و د) ژو-پین، در محل چاه A1.

انطباق خوبی دارد. در شکل ۷-ج، در مقایسه بین نگار سرعت واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی، میانگین خطای مطلق ۱۷۵ متر بر ثانیه و ضریب همبستگی ۰/۹۰ به دست آمده است. در شکل ۷-د، بهترین انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل شده با استفاده از مدل ژو - پین وجود دارد که دارای میانگین خطای مطلق ۷/۵ متر بر ثانیه و ضریب همبستگی ۰/۹۵ است. خلاصه مقایسه کمی نتایج مدل‌سازی در پیش‌بینی سرعت موج برشی برای چاه A1 در جدول ۳ آورده شده است.

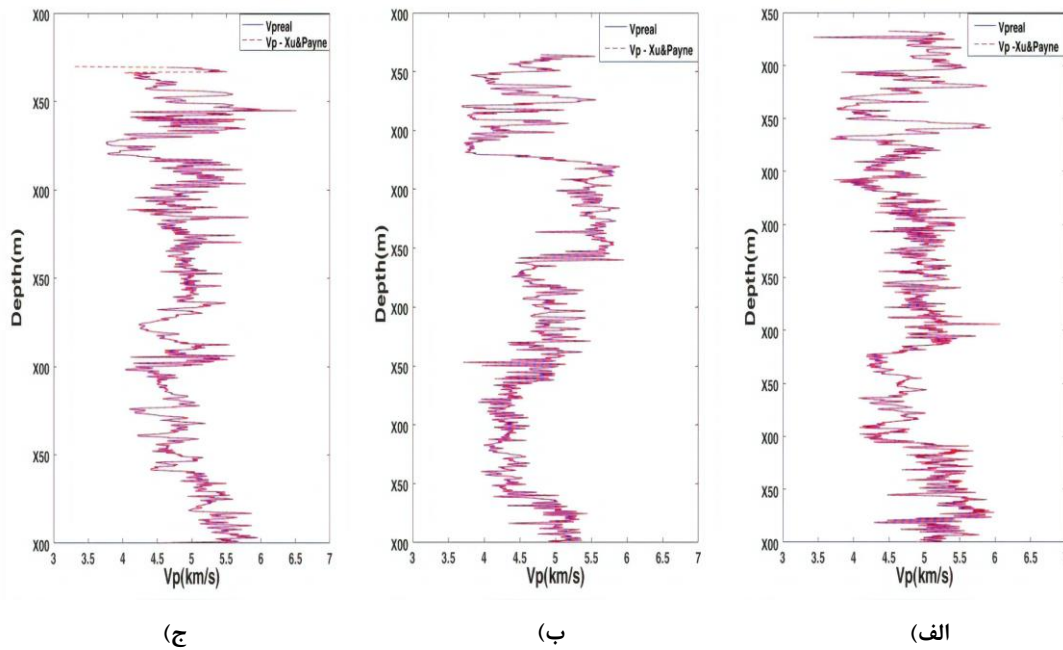
در شکل ۷-الف، در محدوده عمقی سازند سروک در محل چاه A1، سرعت موج برشی برآورد شده با استفاده از مدل کاستر و تکسوز، نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده، میانگین خطای مطلق ۶۵۰ متر بر ثانیه و ضریب همبستگی ۰/۷۰ دارد که کمترین میزان تطابق بین چهار مدل فیزیک سنگی مورد مطالعه است. در شکل ۷-ب، در مقایسه بین سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل تقریب خودسازگار میانگین خطای مطلق ۲۶۰ متر بر ثانیه و ضریب همبستگی ۰/۸۸ به دست آمده است که روند و مقادیر

جدول ۳. مقایسه کمی نتایج مدل‌سازی در پیش‌بینی سرعت موج برشی برای چاه A1.

چاه A1	مدل کاستر = تکسوز	مدل تقریب خودسازگار	مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی	مدل ژو و پین
میانگین خطای مطلق (MAE) بر حسب متر بر ثانیه	۶۵۰	۲۶۰	۱۷۵	۷/۵
ضریب همبستگی	۰/۷۰	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۹۵

به ترتیب در جداول ۴ و ۵ آورده شده است. مقایسه سرعت موج تراکمی و برشی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ژو پین برای چاه‌های A3، A2 و A4 به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است.

فرآیند مدل‌سازی فیزیک سنگی در محدوده عمقی سازند سروک در محل چاه‌های A3، A2 و A4 نیز تکرار شده است و نتایج مشابهی به دست آمده است. خلاصه نتایج مدل‌سازی در پیش‌بینی سرعت موج تراکمی و برشی برای چاه‌های مذکور

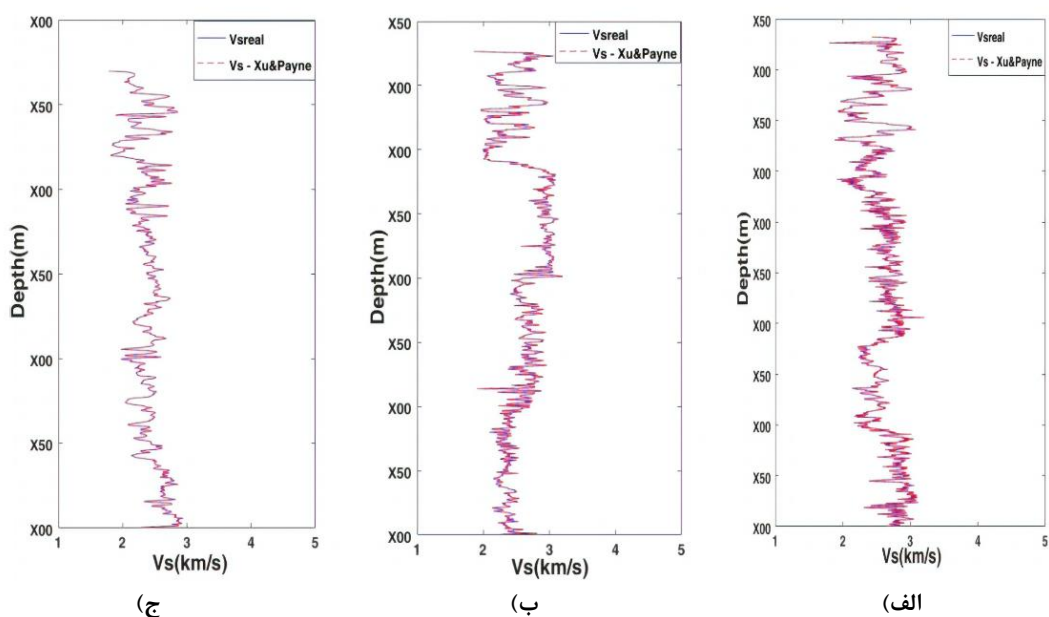


شکل ۸. مقایسه سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل ژو پین در محل (الف) چاه A2 (ب) چاه A3 و (ج) چاه A4.

جدول ۴. نتایج مدل‌سازی در پیش‌بینی سرعت موج تراکمی برای چاه‌های A3، A2 و A4

	مدل کاستر و تکسوز	مدل تقریب خودسازگار	مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی	مدل ژو و پین
میانگین خطای مطلق چاه A2	۱۲۹	۲۹	۶۲	۶
ضریب همبستگی چاه A2	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۹۸
میانگین خطای مطلق چاه A3	۱۳۹	۱۱۸	۳۸	۱۴
ضریب همبستگی چاه A3	۰/۸۵	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۹۷
میانگین خطای مطلق چاه A4	۷۵	۲۳	۳۰	۶
ضریب همبستگی چاه A4	۰/۸۵	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۸

مدل سازی فیزیک سنگی در مخازن کربناته - مروری بر مدل های نظری و یک مطالعه موردی



شکل ۹. مقایسه سرعت موج برشی اندازه گیری شده و پیش بینی شده با استفاده از مدل ژو-پین در محل الف) چاه A2 (ب) چاه A3 و ج) چاه A4.

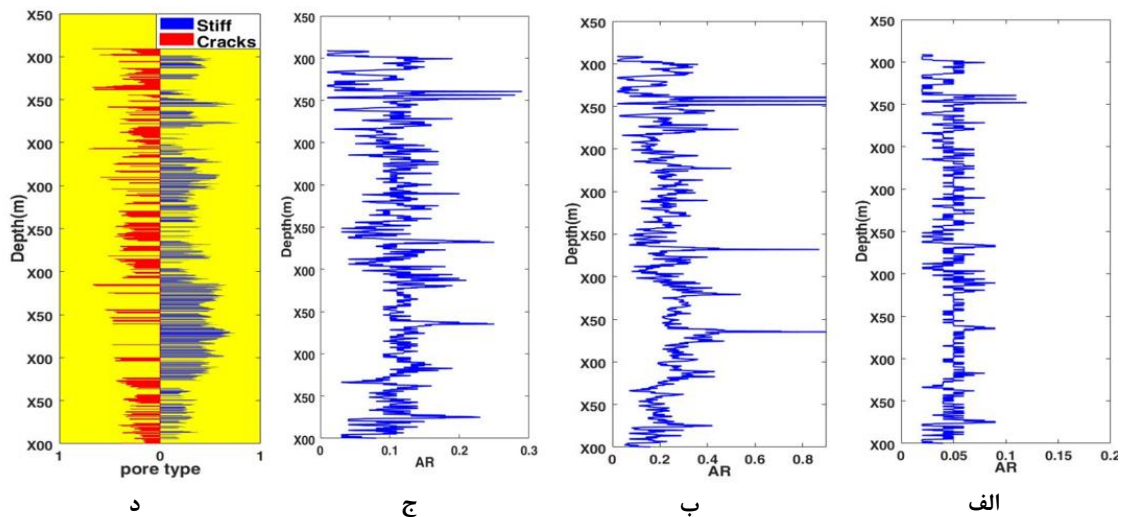
جدول ۵. نتایج مدل سازی در پیش بینی سرعت موج برشی برای چاه های A2، A3 و A4.

	مدل کاستر و تکسوز	مدل تقریب خودسازگار	مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی	مدل ژو و پین
میانگین خطای مطلق چاه A2	۶۲۶	۱۷۵	۱۳۸	۷/۷
ضریب همبستگی چاه A2	۰/۶۹	۰/۸۳	۰/۸۷	۰/۹۶
میانگین خطای مطلق چاه A3	۷۰۰	۱۶۸	۷۸	۷/۵
ضریب همبستگی چاه A3	۰/۶۵	۰/۸۰	۰/۹۰	۰/۹۵
میانگین خطای مطلق چاه A4	۴۸۶	۲۸۱	۳۳۴	۷/۵
ضریب همبستگی چاه A4	۰/۷۰	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۹۴

۳.۴ بحث

پارامتر کلیدی در استفاده از مدل‌های میانباری در مدل‌سازی فیزیک سنگ کربناته، نسبت ابعاد است. اگر تخلخل کل سنگ و سرعت موج تراکمی و اشباع از آب در دسترس باشد، می‌توان تخمینی از نسبت ابعاد متوسط حفرات مختلف و درصد حجمی آن‌ها در سنگ به دست آورد. یکی از نکات مهمی که در بکارگیری مدل‌های میانباری بایستی مدنظر قرار گیرد این نکته است که در واقعیت، شکل فضای حفره‌ای، معمولاً به شکل میانباری‌های بیضوی نبوده و فرضیات بکار رفته در تئوری هر یک از این روش‌ها برای توجیه رفتار و تأثیر میانباری‌ها بر روی یکدیگر، راه‌حلی ابتکاری بوده که با واقعیت و طبیعت سنگ‌ها ممکن است همخوانی نداشته باشد. آنچه در این روش‌ها مهم است رسیدن به مدول‌های کشسانی سنگ است به نحوی که این مدول‌ها با مدول‌های واقعی سنگ همخوانی داشته باشد که با روش‌های مذکور می‌توان به آن رسید. در واقع پارامتری که روابط ریاضی این روش‌ها را به روابطی منعطف تبدیل می‌کند نسبت ابعاد می‌باشد، یعنی با تغییر نسبت ابعاد که یک پارامتر تناسبی است می‌توان طی

فرآیند تکراری، از هر یک از روش‌های مذکور به پاسخی قابل قبول رسید. برای مثال، در شکل ۱۰ نگاره نسبت ابعاد به دست آمده طی الگوریتم‌های تعیین شده برای مدل‌های کاستر-تکسوز، مدل تقریب خودسازگار و مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی برای داده‌های چاه AI نشان داده شده است. قابل ذکر است که در روش تقریب خودسازگار، نسبت ابعاد بزرگ‌تری به دست آمده است. همچنین نسبت ابعاد به دست آمده برای روش محیط مؤثر دیفرانسیلی بزرگ‌تر از نسبت ابعاد مدل کاستر تکسوز است. در شکل ۱۰، توزیع انواع حفرات، برحسب تابعی از عمق برای داده‌های چاه AI که با استفاده از مدل ژو-پین - پین طی یک فرآیند معکوس سازی (طبق روش معرفی شده در (Kumar and Han, 2005; Zhao et al., 2013)) به دست آمده است، نشان داده شده است. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، در اعمال مدل ژو-پین، حجم کلی حفرات به چندین بخش تقسیم شده است، با این توضیح که در هر عمق به‌طور هم‌زمان فقط دو نوع تخلخل را می‌توان شناسایی کرد. حفرات بین‌دانه‌ای و حفرات سفت یا حفرات بین‌دانه‌ای و شکاف.



شکل ۱۰. نگاره نسبت ابعاد به دست‌آمده با استفاده از (الف) مدل کاستر - تکسوز، (ب) مدل تقریب خودسازگار و (ج) مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی برای داده‌های چاه AI. (د) توزیع انواع حفرات در چاه AI. ناحیه‌ی رنگ‌های زرد، آبی (سمت راست نمودار) و قرمز (سمت چپ نمودار) به ترتیب حجم تمرکز حفرات بین‌دانه‌ای (حفرات مرجع)، حفرات قالبی (حفرات سفت) و شکاف‌ها را نشان می‌دهد.

است) و در قالب مقاله مجزایی بدان پرداخته خواهد شد. با این وجود ذکر این نکته ضروری است که مطالعات مربوط به قالب‌های فیزیک‌سنگی و وارون‌سازی برای تعیین انواع فضای حفره‌ای بر روی مخزن مورد مطالعه، تأیید این نکته بوده است که انواع مختلفی از حفره‌ها در سنگ مخزن مورد مطالعه وجود داشته است و استفاده از مدل ژو پین (یا مدل‌های فیزیک‌سنگی دیگر در صورت در نظر گرفتن چندین نوع تخلخل) می‌تواند برای مدل‌سازی فیزیک‌سنگی در مخزن مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

فرآیندهای دیاژنتیکی معمولاً بافت و وضعیت کانی‌شناسی سنگ‌های کربناته را تغییر داده و باعث تنوع گسترده در منافذ حفره‌ای آن‌ها می‌شود. ساختار پیچیده‌تر فضای حفره‌ای کربنات‌ها، منجر به چالش‌های بیشتری در فرآیندهای تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی فیزیک‌سنگی نیز می‌شود. در این مطالعه، مدل‌سازی فیزیک‌سنگی با استفاده از داده‌های چاه-نگاری در یک مخزن کربناته ناهمگن واقع در جنوب غرب ایران انجام گرفته شده است. چهار مدل فیزیک‌سنگی کاستر-توکسوز، تئوری تقریب خودسازگار، مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی و مدل ژو پین مربوط به مدل‌های میانباری در چهار چاه هدف، واقع در یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار گرفتند. اولاً کارایی هر چهار مدل ساخته شده بر روی چاه‌های منتخب مثبت ارزیابی شده است. دوماً در مقایسه کمی نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده، سرعت موج تراکمی و برشی حاصل از مدل ژو پین در هر چهار چاه مورد مطالعه دارای ضریب همبستگی بالاتر و میانگین خطای مطلق کمتر است. به‌طور کلی برای انتخاب روش مناسب جهت تخمین خصوصیات کشسانی، بررسی همخوانی ریزساختارهای موجود در بافت سنگ، با مبانی نظری و فرضیات هر یک از روش‌ها امری ضروری و راهگشا است. با توجه به اینکه در مدل ژو پین، چهار نوع از

در پایان ذکر این نکته ضروری است که در این مقاله هدف نحوه اعمال هر یک از این چهار مدل فیزیک‌سنگی (نه مقایسه صرف نتایج حاصل از اعمال آن‌ها) و همچنین مشخص کردن اهمیت استفاده از چندین نوع تخلخل با نسبت ابعاد مختلف در سنگ کربناته مورد مطالعه است. قابل ذکر است که ورودی‌های هر چهار مدل میانباری مورد استفاده، یکسان در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که در سه مدل کاستر-توکسوز، تقریب خودسازگار و محیط مؤثر دیفرانسیلی فرض بر این شده است که در هر عمق، فقط یک نوع فضای خالی (با یک اندازه نسبت ابعاد) می‌تواند وجود داشته باشد. فرآیند اعمال مدل‌های مذکور بدین صورت بوده است که با یک حدس اولیه برای نسبت ابعاد آغاز شده و طی یک فرآیند تکرار و بهینه‌سازی، مقدار نهایی نسبت ابعاد برای هر عمق به دست آمده است. با این وجود هر سه مدل فیزیک‌سنگی مذکور، توانایی اضافه کردن چندین نوع تخلخل را دارند و فرض اعمال شده فقط جهت آشکارسازی اهمیت در نظر گرفتن چندین تخلخل مختلف برای سنگ‌های کربناته در مطالعاتی است که ریزساختارهای موجود در بافت سنگ نشان دهنده وجود چندین نوع تخلخل باشد. این مسئله در سنگ مخزن کربناته مورد مطالعه در این پژوهش نیز به وضوح قابل تشخیص است؛ چراکه نتایج حاصل از اعمال مدل ژو پین (بخصوص در پیش‌بینی سرعت موج برشی) که بیش از یک نوع تخلخل برای هر عمق را در نظر می‌گیرد، دارای همخوانی بهتری با نگارهای چاه‌ها نسبت به دیگر مدل‌های فیزیک‌سنگی مورد استفاده در این پژوهش (با فرضیات بکار رفته) می‌باشد. همچنین، در این پژوهش، روش‌های مختلفی از قبیل تمپلت یا قالب‌های فیزیک‌سنگی^۱ یا وارون‌سازی نگارهای چاه^۲ برای به دست آوردن درصد حجمی و نسبت ابعاد انواع مختلف فضاهای حفره‌ای در سنگ‌های کربناته مورد استفاده گرفته است که به دلیل حجم بالای مطالب و شکل‌ها، ارائه نتایج آن در این مقاله امکان‌پذیر نبوده (صرفاً یک خروجی وارون‌سازی فضاهای حفره‌ای در شکل ۱۰-د آورده شده

^۱ Rock physics templates

^۲ Pore-type inversion

حفرات موجود در سنگ‌های کربناته در نظر گرفته شده است. سنگ کربناته مورد مطالعه تطابق بهتری دارد. نسبت به مدل‌های دیگر با ریزساختارهای موجود در بافت

پیوست

فاکتورهای هندسی P و Q برای میانبرهای بیضوی با نسبت ابعاد دلخواه و اختیاری با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد (Wit 1966; Berrymann 1980):

$$P = 1/3T_{iijj} \quad (۱)$$

$$Q = 1/5(T_{ijij} - \frac{T_{iijj}}{3}) \quad (۲)$$

$$T_{iijj} = \frac{3F_1}{F_2} \quad (۳)$$

$$T_{ijij} - \frac{T_{iijj}}{3} = \frac{2}{F_3} + \frac{1}{F_4} + \frac{F_4F_5 + F_6F_7 - F_8F_9}{F_2F_4} \quad (۴)$$

که در آن:

$$F_1 = 1 + A[\frac{3}{2}(f + \theta) - R(\frac{3}{2}f + \frac{5}{2}\theta - \frac{4}{3})] \quad (۵)$$

$$F_2 = 1 + A\left[1 + \frac{3}{2}(f + \theta) - \frac{1}{2}R(3f + 5\theta)\right] + B(3 - 4R) + \frac{1}{2}A(A + 3B)(3 - 4R)[f + \theta - R(f - \theta + 2\theta^2)] \quad (۶)$$

$$F_3 = 1 + A\left[1 - \left(f + \frac{3}{2}\theta\right) + R(f + \theta)\right] \quad (۷)$$

$$F_4 = 1 + \frac{1}{4}A[f + 3\theta - R(f - \theta)] \quad (۸)$$

$$F_5 = A\left[-f + R\left(f + \theta - \frac{4}{3}\right)\right] + B\theta(3 - 4R) \quad (۹)$$

$$F_6 = 1 + A[1 + f - R(f + \theta)] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (۱۰)$$

$$F_7 = 2 + \frac{1}{4}A[3f + 9\theta - R(3f + 5\theta) + B\theta(3 - 4R)] \quad (۱۱)$$

$$F_8 = A\left[1 - 2R + \frac{1}{2}f(R - 1) + \frac{1}{2}\theta(5R - 3)\right] + B(1 - \theta)(3 - 4R) \quad (۱۲)$$

$$F_9 = A[(R - 1)f - R\theta] + B\theta(3 - 4R) \quad (۱۳)$$

مقادیر A ، B و R و توابع f و θ با استفاده از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$A = \mu_i / \mu_m - 1 \quad (14)$$

$$B = \frac{1}{3} \left(\frac{K_i}{K_m} - \frac{\mu_i}{\mu_m} \right) \quad (15)$$

$$R = \frac{(1 - 2\nu_m)}{2(1 - \nu_m)} \quad (16)$$

$$f = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} (3\theta - 2) \quad (17)$$

برای میانبارها به شکل بیضوی کشیده^۱:

$$\theta = \frac{\alpha}{(\alpha^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \left[\alpha(\alpha^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \cosh^{-1} \alpha \right] \quad (18)$$

برای میانبارها به شکل بیضوی پهن^۲:

$$\theta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha^2)^{\frac{3}{2}}} \left[\cos^{-1} \alpha - \alpha(1 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (19)$$

توجه شود که برای میانبارها به شکل بیضوی پهن $\alpha > 1$ و برای میانبارها به شکل بیضوی کشیده $\alpha < 1$ است.

۶. مراجع

- Anselmetti, F. S. and Eberli G. P., 1993, Controls on sonic velocity in carbonates: Pure and Applied Geophysics **141**(2-4), 287-323.
- Assefa, S., McCann, C. and Sothcott, J., 2003, Velocities of compressional and shear waves in limestones: Geophysical prospecting **51**(1), 1-13.
- Avseth, P., Mukerji, T. and Mavko, G., 2010, Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk: Cambridge university press.
- Berryman, J. G. 1980, Long-wavelength propagation in composite elastic media II. Ellipsoidal inclusions: The Journal of the Acoustical Society of America **68**(6), 1820-1831.
- Berryman, J.G., 1995. Mixture theories for rock properties. In Rock Physics and Phase Relations: a Handbook of Physical Constants, ed. T.J. Ahrens. Washington, DC: American Geophysical Union, pp. 205-228.
- Budiansky, B., 1965. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. J. Mech. Phys. Solids, 13, 223-227.
- Cheng, C. H., 1993, Crack models for a transversely isotropic medium: Journal of Geophysical Research: Solid Earth **98**(B1), 675-684.

^۱ *prolate spheroids*

^۲ *oblate spheroids*

- Cleary, M. P., Lee, S. M. and Chen, I.W., 1980, Self-consistent techniques for heterogeneous media: Journal of the Engineering Mechanics Division **106**(5), 861-887.
- Dou, Q., Sun, Y. and Sullivan, C., 2009, Rock-physics-based heterogeneity characterization of a carbonate reservoir in the permian basin: SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1945-1949.
- Eberli, G. P. 1997, Sonic velocity in carbonate sediments and rocks: Carbonate seismology **6**, 53.
- 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.
- Fabricius, I. L., Bächle, G.T. and Eberli, G.P., 2010, Elastic moduli of dry and water-saturated carbonates—Effect of depositional texture, porosity, and permeability: Geophysics **75**(3), N65-N78.
- Gassmann, F., 1951, Uber die elastizitat poroser medien. Vier: Natur Gesellschaft, **96**, 1–23.
- Hill, R., 1952, The elastic behavior of crystalline aggregate. Proc. Phys. Soc., London A, 65, 349–354.
- Hill, R., 1965, A self-consistent mechanics of composite materials. J. Mech. Phys. Solids, 13, 213–222.
- Hudson, J., 1980, Overall properties of a cracked solid: Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Cambridge University Press.
- Li, H., and Zhang, J., 2018, Well log and seismic data analysis for complex pore-structure carbonate reservoir using 3D rock physics templates: Journal of Applied Geophysics: **151**, 175-183.
- Jakobsen, M., Hudson, J.A. and Johansen, T. A., 2003, T-matrix approach to shale acoustics: Geophysical Journal International **154**(2), 533-558.
- Kumar, M. and Han D.-h., 2005, Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks: SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005, Society of Exploration Geophysicists, 1477-1480.
- 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.
- Lucia, F. J., 1995, Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization: AAPG bulletin **79**(9), 1275-1300.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 2009, The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media: Cambridge university press.
- Norris, A. 1985, A differential scheme for the effective moduli of composites: Mechanics of materials **4**(1), 1-16.
- O'Connell, R.J. and Budiansky, B., 1974. Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. J. Geophys. Res., 79, 4626–4627.
- Reuss, A., 1929, Berechnung der fließgrenze von mischkristallen auf grund der plastizitätsbedingung für einkristalle. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 9(1), 49-58.

- Ruiz, F.J., 2009. Porous grain model and equivalent elastic medium approach for predicting effective elastic properties of sedimentary rocks (Vol. 70, No. 10).
- Sayers, C. M., 2008, The elastic properties of carbonates: The Leading Edge **27**(8), 1020-1024.
- Sun, Y., 2000, Core-log-seismic integration in hemipelagic marine sediments on the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 168.
- Voigt, W., 1907, Bestimmung der Elastizitätskonstanten von Eisenglanz. Ann. Phys., 24, 129-140.
- Wood, A.W., 1955, A Textbook of Sound. New York: McMillan Co.
- Wu, T.T., 1966. The effect of inclusion shape on the elastic moduli of a two-phase material. Int. J. Solids Structures, 2, 1-8.
- 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.
- 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.
- Zimmerman, R.W., 1991. Compressibility of Sandstones. New York: Elsevier.
- امامی نیری، م. (۱۳۹۶)، مدل سازی فیزیک سنگی در مخازن ماسه سنگی - مروری بر مدل های نظری و یک مثال کاربردی، نشریه علمی پژوهشی ژئومکانیک نفت ۱ (۲)، ۷۴-۸۵.