

بررسی توزیع انواع منافذ در راستای قائم و جانبی با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی در یکی از مخازن کربناته ایران

۱- مريم السادات ميركمالى^۱، عبدالرحيم جواهريان^{°۲}، حسين حسنی^۳، محمدرضا صابری^۴، سيد ابوالفضل حسينی⁴ و سجاد ذبيحی ثارالله[°]

۱ - دانشجوی دکتری،دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲ - استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳ - دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴ - مدیر توسعه و تحقیق نرم افزارهای فیزیک سنگ؛ شرکت Geosoftware
۹ - مدیر توسعه و مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵؛ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

* نویسنده مسئول مکاتبات: javaherian@aut.ac.ir

چکیدہ	واژگان کلیدی
چکیده فرآیندهای پیچیده رسوبی و دیاژنتیکی در سنگهای کربناته منجر به تنوع زیادی در انواع منافذ میشود. بررسی توزیع انواع منافذ بهعنوان یکی از عوامل اصلی کنترل کننده توزیع سیال در مخازن کربناته ضروری است. در این مقاله، توزیع انواع منافذ سازند کربناته فهلیان در سه چاه واقع در بخشهای غربی، مرکزی و شرقی در یکی از میادین دشت آبادان بر اساس وارونسازی انواع منافذ با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی بهصورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام مدلسازی، با در نظر گرفتن اثر شکل منافذ در تخمین مدول مؤثر، از تئوری محیط مؤثر دیفرانسیلی برای محاسبه مشخصه هندسی منافذ (نسبت ابعادی منافذ مختلف و درصد نسبی آنها) استفاده شده است. بدین منظور، در ابتدا نسبت ابعادی منافذ و درصد نسبی آنها با استفاده از الگوریتم وارونسازی انواع منافذ تخمین زده شده است. در ادامه، از نتایج می محمد که در سازی فیزیک سنگی استفاده شده و سرعت موج تراکمی در سه چاه برآورد شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که در سازند کربناته فهلیان تنوع سنگشناسی، رخسارهای و دیاژنزی موجب شده است. نتایج این مطالعه نشان راستای جانبی (در امتداد چاههای مورد مطالعه) و قائم (در امتداد هر چاه) بسیار متنوع باشد. معورکلی دو نوع منافذ در بین-دانهای و بین-کریستالی) و منافذ با سفتی بالا (قالبی و حفرها) بهعنوان منافذ اصلی سازند کربناته فهلیان شناسایی شده که توسط نگاره Poraiton micro image و واطلاعات مغزه نیز تأیید شدهاند. همچنین توزیع منافذ در فی اینی پایینی (بخش مخزنی سازند فهلیان) از چاه واقع در بخش غربی میدان در مقایسه با چاههای واقع در بخشهای مرکزی و شرقی، متفاوت است. بهطور کلی میزان منافذ با سفتی بالا در لایه ۳ در چاه واقع در بخش غربی میدان به سمت چاه شرقی، متفاوت است. بهطور کلی میزان منافذ با سفتی بالا در اینه ۳ در چاه واقع در بخش غربی میدان به سمت چاه مرقی در بخش غربی میدان بافته است.	واژگان کلیدی سنگهای مخزنی کربناته مدلسازی فیزیک سنگی انواع منافذ سرعت امواج تراکمی و برشی

۱– مقدمه

سنگهای کربناته بهعنوان یکی از سنگهای میزبان اولیه برای ذخایر هیدروکربنی در نظر گرفته میشوند و بخش قابل توجهی از تولید هیدروکربنهای ایران را تشکیل میدهند. این نوع مخازن بهدلیل ناهمگنی در مقیاس منافذ بهطورکلی پیچیده هستند. این ناهمگنی در مقياس منفذى معمولاً به فرآيندهاى دياژنتيكي آنها مانند انحلال، دولومیتی شدن و سیمانی شدن نسبت داده می شود که می تواند شکل و تخلخل منافذ اوليه آنها را افزايش داده يا از بين ببرد (Zhao et al., 2013). محیطهای رسوبی مختلف و فرآیندهای دیاژنتیکی بعدی آنها معمولاً منجر به تشکیل بافتهای مختلف سنگ با ساختار منافذ پیچیده در سنگهای کربناته شده و بهطور معمول بهعنوان ناهمگنی ذاتی در سنگهای کربناته تفسیر میشود که منبعی برای رفتار کشسانی پیچیده آنها میباشد. مطالعات قبلی در مورد چنین رفتار کشسانی پیچیده در سنگهای کربناته نشان داده است که شکل منافذ عامل اصلی این پیچیدگی است (Anselmetti and Eberli, 1993; 1999). سنگهای کربناته تنوع زیادی در شکل منافذ نشان میدهند که شامل منافذ بین دانهای، بین کریستالی، قالبی یا شبه کروی، حفرهای و ریز ترکها هستند. این شکلهای منفذی متغیر به همراه نوع سیال منفذی میتواند پراکندگی دادهها را در ترسیم متقاطع سرعت موج تراکمی در مقابل تخلخل افزایش دهد. این موضوع توسط مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونههای مختلف کربناته تأیید شده است (Anselmetti and Eberli, 1993; 1999). به بیان دیگر، وجود منافذ غیرمرتبط از نوع شبه کروی یا نزدیک به کروی همراه با ریز تخلخلها باعث تغییر خواص کشسانی مؤثر قالب سنگ میشوند و هندسه منافذ را به پارامتر مهمی تبدیل میکنند که باید برای تخمین مدولهای کشسانی مؤثر در نظر گرفته شوند (Xu .(and Payne, 2009

مدلهای فیزیک سنگی با ارائه روابط کمی دقیق بین مشاهدات ژئوفیزیکی و خواص مخزن به طور موفقیت آمیزی برای توصیف مشخصات لرزهای سنگ مخزن استفاده می شوند. در این راستا، مدل های مبتنی بر گنجایش مانند (Kuster and Toksöz (1974) برای ترکیب اثرات ساختار منافذ متغیر در مدل سازی مناسب تر به نظر می رسند. این مدل ها سنگ را به عنوان یک ماتریکس کشسان با تعدادی منافذ بیضوی ایده آل (یا گنجایشها) با نسبت ابعادی^۱ مختلف (نشان دهنده سفتی^۲ منافذ با استفاده از نظریه پراکندگی) تخمین میزنند. مهمترین محدودیت مدل-های مبتنی بر گنجایش این است که تعامل بین منافذ مختلف را در نظر Kuster and را فرض می کنند (Toksöz, 1974 های پراکندگی درجه دوم یا بالاتر مانند محیط مؤثر دیفرانسیلی^۲، تقریب

خودسازگار یا تی- ماتریکس در نظر گرفته می شوند (Zhao et al., 2016; Mavko et al., 2009). این مدل های مبتنی بر گنجایش، برای در نظر گرفتن تعامل مکانیکی بین منافذ مختلف، شکل منافذ را در مراحل مختلف مدلسازی اعمال کردهاند (Berryman, 1992; Mavko et al., 2009). روشهای محیط مؤثر دیفرانسیلی و تقریب خود سازگار فرض می کنند که سنگ متخلخل یک جامد کشسان، خطی و همسانگرد است که مقداری اشکال منافذ بیضوی در آن وجود دارد (Mavko et al., 2009). انتظار میرود مدل خودسازگار نتایج دقیقتری را در ماسه-سنگها نسبت به سنگهای کربناته ارائه کند زیرا مفروضات این مدل با این نوع سنگها سازگارتر است (Misaghi et al., 2010). با توجه به پیچیدگی کلی روابط بین خواص سنگهای کربناته، به نظر میرسد درک چگونگی تأثیر شکل منافذ همراه با سایر خواص فیزیکی سنگ بر سرعت موج در آنها، چالش برانگیز است. بههمین دلیل است که روش تی-ماتریکس نیز برای سنگهای کربناته مناسب بهنظر نمیرسد (Vanorio et al., 2008). بر اساس این توضیحات، سنگهای کربناته متراکم و کم تخلخل (با تخلخل دوگانه) را می توان با دقت بیشتری با استفاده از نظریه محیط مؤثر دیفرانسیلی مدلسازی کرد زیرا چنین سنگهایی از یک ماتریکس پیوسته (منافذ اولیه) و گنجایشهای مجزا (منافذ ثانویه) تشکیل شدهاند (Markov et al., 2005). در اینجا، نسبت ابعادی منافذ (نسبت طول محور کوتاهتر به محور بلندتر) سفتی یا نرمی سیستم منافذ کربناته را در تخمین خواص کشسانی آنها تعیین میکند و بهعنوان یکی از چالش برانگیزترین پارامترهای تعریف شده در نظر گرفته می شود. علاوه بر این، درصدهای نسبی نوع منافذ مختلف نیز باید در مدل-سازی محیط مؤثر دیفرانسیلی درنظر گرفته شوند. برای بهدست آوردن نسبتهای ابعادی منافذ مختلف و درصدهای نسبی آنها در سنگهای کربناته کومار و هان (۲۰۰۵) الگوریتمی را برای وارونسازی انواع منافذ ارائه کردند ((Kumar and Han (2005)). شو و پین (۲۰۰۹) بر اساس وارونسازی انواع منافذ، با تقسیم فضای منافذ به چهار نوع، منافذ مرتبط با رس را به مدل معرفی کردهاند (Xu and Payne, 2009). از نتایج وارونسازی انواع منافذ میتوان در مدلسازی فیزیک سنگی بر اساس روش شو- پین برای تخمین سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی استفاده کرد (Zhao et al., 2013). میرکمالی و همکاران (۱۳۹۸و ۲۰۲۰) بر اساس پتروفیزیک لرزهای و با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی به کمی سازی انواع منافذ در یک مخزن نفتی کربناته پرداختند .(Mirkamali et al., 2020)

یکی از چالشهای اصلی در تعیین مشخصه کمی مخازن در سنگ-های کربناته، شناسایی ذخایر قابل تولید و اقتصادی و تمایز آنها از ذخایر کم بازده است. آگاهی نسبت به تولیدپذیری را می توان از پیش-بینی نفوذپذیری بهدست آورد، که به شدت به ساختارهای منافذ پیچیده مرتبط می شود. توزیع انواع منافذ یکی از عوامل اصلی کنترل-کننده توزیع سیال قبل از تولید در مخزن کربناته و همچنین مقدار

Aspect ratio

Stiffness

[°] Differential effective medium (DEM)

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره۷، شماره ۴، ۱۴۰۰. ۲- فیزیک سنگ در سنگهای کربناته

۲-۱- انواع منافذ

منافذ موجود در سنگهای کربناته را میتوان بر اساس اندازه، قابلیت ديدن و پيچيدگي دياژنتيکي و هندسي طبقهبندي کرد (Lucia, 1999). عليرغم اين كه همه اين طبقهبندىها براى توصيف خواص پتروفيزيكى مفيد هستند، ارتباط اين توصيفها با پاسخ ژئوفيزيكي بسيار چالشبرانگیز است. این بدان دلیل است که طول موج لرزهای اغلب بسیار بزرگتر از اندازه ریز ساختارها است، بنابراین موج می تواند فقط میانگین خواص مؤثر ساختارهای منافذ پیچیده را ببیند و منافذ و ریز ترکهای مجزا را نمی بیند. شو و پین (۲۰۰۹) شبکه منافذ پیچیده را به سه نوع منافذ ساده کردهاند تا پاسخ صوتی و فشار سنگهای مخزنی کربناته را بهطور معقولی نشان دهند. این نوع منافذ به شرح زیر طبقهبندی می-شوند: (۱) منافذ مرجع که غالبترین نوع منافذ در سنگهای كربناته هستند و بهعنوان روند پسرزمينه عمل مىكنند. اين نوع منافذ عمدتاً از منافذ بین دانهای و بین کریستالی تشکیل شده و به-عنوان منافذ غالب در سنگهای کربناته در نظر گرفته میشوند. به-طورکلی، این منافذ نسبت به تنش حساس نیستند و هیچ جهت گیری ترجیحی ندارند. (۲) منافذ کروی یا سفت با نسبتهای ابعادی بالا، که نشان دهنده منافذ قالبی و حفرهای گرد شده هستند و معمولاً در نتیجه دانههای حلشده و حفرههای فسیلی شکل می گیرند. این نوع منافذ تمایل به گرد شدگی دارند و سفتی سنگ کشسان را افزایش میدهند (۳) ریز ترکها با نسبت ابعادی کمتر، که نشاندهنده شکستگیهای ریز و ریز-منافذ هستند. این نوع منافذ می توانند به دلیل فشردگی متفاوت، گسل خوردگی و فروپاشی انحلالی در سنگهای کربناته رخ دهند. این نوع منافذ تمایل به تخت شدگی دارند و سفتی سنگ کشسان را کاهش میدهند. ریز ترکها سازگارترین جز لاینفک در سنگها، چه در آواری-ها و چه کربناتهها، هستند که به شدت نسبت به تنش حساس هستند. در نتیجه، اثرات سیال منفذی و تغییر فشار ناشی از انتشار امواج لرزهای در سنگهای دارای ریز منافذ و ریز ترکها می تواند بسیار قوی-تر از سنگی باشد که دارای منافذ قالبی و حفرهای است (Xu and Payne, 2009; Lucia, 1999). جزئيات اين طبقهبندي در شكل ۱ نشان داده شده است. این سه نوع منافذ می توانند در فضای منافذ همزمان وجود داشته باشند اما نگاره چاه و پاسخ لرزهای به-طوركلى توسط نوع منافذ غالب كنترل مى شوند. به اين ترتيب سيستم-های منافذ کربناته را میتوان به شکل منافذ مرجع همراه با منافذ کروی با سفتی بالا و منافذ مرجع دارای ریز ترک طبقهبندی کرد (Xu .(and Payne, 2009

۲-۲- مدلسازی فیزیک سنگی در سنگهای کربناته در مدلسازی سرعت سنگهای کربناته بهطور معمول نظریههای فیزیک سنگی مبتنی بر گنجایش (که امکان ترکیب انواع منافذ مختلف را فراهم میکنند) دارای ارجحیت هستند. یکی از روشهای پرکاربرد مبتنی بر هیدروکربن باقی مانده پس از اولین برداشت در این نوع مخازن است. شناسایی و درک توزیع انواع منافذ باعث ارزیابی صحیح در کیفیت مخزن، پیشبینی اشباعشدگی سیال مخزنی، عمق سطح تماس آب و نفت، ضخامت زون تدریجی و ظرفیت نفوذپذیری می شود (Anselmetti and Eberli, 1999; Lucia, 1999). همچنين همان طور که بیان شد در سنگهای کربناته شکل منافذ تقریباً به اندازه تخلخل در رفتار كشساني و در نتيجه سرعت اموج حائز اهميت هستند. با توجه به محدودیت مغزه گیری در چاهها تعیین نوع منافذ و سایر ویژگیهای آن معمولاً با مشكلاتی مواجه بوده است. بنابراین، پیش بینی توزیع انواع منافذ از نگارههای چاه برای ترسیم ساختار و ویژگیهای جریان مخزن ضروری است. قره چلو (۱۳۹۴) و ملاجان و معماریان (۲۰۱۶) با استفاده از نگاره انحراف سرعت به تعیین انواع منافذ در مخزن آسماری پرداخته اند. البته تعیین میزان کمی انواع منافذ با استفاده از این روش امکان پذیر نیست. چنین برآورد کمی اغلب با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی مبتنی بر گنجایش بهدست میآید. در این مقاله، توزیع انواع منافذ سازند کربناته فهلیان در سه چاه واقع در قسمتهای مختلف یکی از میادین نفتی دشت آبادان با استفاده از وارونسازی انواع منافذ مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که تنوع در سنگشناسی و دیاژنز باعث تنوع در نوع منافذ می شود، در نتیجه اهمیت مطالعه نوع منافذ به منظور درک صحیحتر از ناهمگنی مخزن کربناته فهلیان در این میدان ضروری است. بدین منظور، در ابتدا مشخصه هندسی منافذ شامل نسبت ابعادی منافذ و درصد نسبی آنها با استفاده از الگوریتم وارون سازی انواع منافذ در بخش مخزنی فهلیان شامل سه لایه مخزن اصلی در چاههای مختلف میدان به-طور كمي برآورد شده است. در اين الگوريتم نسبتهاي ابعادي منافذ و درصد نسبی متناظرشان با استفاده از دادههای تخلخل کل (ϕ_T) و سرعت موج تراکمی (V_p) اندازه گیری شده و با کدنویسی در نرمافزار متلب تخمین زده شده است. این تخمین منجر به نگارههای مشخصه هندسی منافذ مختلف (منافذ مرجع، منافذ سفت با نسبتهای ابعادی بالا و ریز ترکها با نسبت ابعادی کمتر) شده است که با عمق تغییر میکنند. در ادامه، از نتایج حاصل در مدلسازی فیزیک سنگی با استفاده روش شو- پین استفاده شده و سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی برآورد شده است. بهطورکلی منافذ مرجع (بیندانهای و بین کریستالی) و منافذ با سفتی بالا (قالبی و حفرهای) به عنوان منافذ اصلی سازند کربناته فهلیان شناسایی شدهاند و ریزترکها دارای توزیع پراکنده هستند که توسط نگاره (Formation micro imager (FMI و اطلاعات مغزه نیز تأیید شده است. نتایج این مطالعه نشان میدهد که در سازند کربناته فهلیان تنوع ليتولوژيكي، رخسارهاى و دياژنزى موجب شده تا توزيع منافذ مختلف در راستای جانبی (در امتداد چاههای مورد مطالعه) و قائم (در امتداد هر چاه) در لایههای مخزنی بسیار متنوع باشد.

تئوری گنجایش، روش محیط مؤثر تفاضلی است که دارای قابلیتهای متعددی در تخمین روندهای تقریبی اثرات تخلخل، شکل منافذ و کانی شناسی در خواص کشسانی سنگ است. در روش محیط مؤثر تفاضلی برای شبیه سازی تخلخل ها در یک سیستم دو فازی (فاز ۱: ماتریکس و فاز ۲: منافذ)، یک قسمت از منافذ به صورت تدریجی به ماتریکس افزوده می شوند (Berryman, 1992). سیستم مزدوج معادلات دیفرانسیل معمولی به صورت زیر ارائه می شود (Mavkoet al., 2009):

$$(1-\varphi) \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\varphi} [\mathrm{K}^{*}(\varphi)] = \left(K_{2}^{*}-\mathrm{K}^{*}\right) \mathrm{P}^{\binom{*2}{2}}(\varphi) \quad (1)$$

$$(1-\varphi) \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\varphi} [\mu^*(\varphi)] = \left(\mu_2 - \mu^*\right) Q^{(*2)}(\varphi) \quad (\gamma)$$

با شرایط اولیه $K^{*}(0) = \mu_{1}$ و $K^{*}(0) = K_{1}$ که ϕ تخلخل و $\mu^{*}(0) = \mu_{1}$ و $K^{*}(0) = K_{1}$ مدول حجمی مؤثر و μ^{*} مدول بنی مؤثر و K^{*} مدول برشی مؤثر، K^{*} و مدول برشی مؤثر، K_{1} و K_{1} مدول برشی مؤثر، ماتریکس، مدول برشی مؤثر، و K_{2} مدول های حجمی و برشی فاز گنجایش هستند Ψ_{2} و Q^{*} (Mavko et al., 2009; Berryman, 1992).

روش محیط مؤثر تفاضلی فرض می کند که منافذ با توجه به جریان سیال مجزا هستند و در پاسخ، یک پاسخ فرکانس بالا را برای یک سنگ اشباع شبیهسازی می کند. برای استفاده کاربردی از این روش در شرایط فرکانس پایین، باید پاسخ سنگ خشک با استفاده از این روش تخمین زده و سپس معادله گسمن برای جانشینی سیال به کار برده شود ایده آل (یا گنجایشها) در اینجا، فضای منافذ بهعنوان منافذ بیضوی ایده آل (یا گنجایشها) در نظر گرفته میشوند که با نسبت ابعادی آنها مشخص شدهاند. همان طور که در قبل بیان شد کومار و هان (۲۰۰۵) یک روش تکراری را با استفاده از وارون سازی انواع منافذ برای به دست آوردن نسبت های ابعادی منافذ مختلف و درصدهای نسبی آنها در سنگهای کربناته ارائه کردهاند. علاوه بر این، می توان از نتایج آنها در مدل سازی شو-پین برای پیش بینی سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی استفاده کرد. در این مدل، حجم منافذ کلی (ϕ_T) به چهار نوع منفذ تقسیم می شود: (۱) منافذ مرتبط با رس، (۲) منافذ بین دانهای، (۳) منافذ با سفتی بالا و (۴) ریز تر کها (2009)

$$\phi_T = \phi_{clay} + \phi_{reference} + \phi_{stiff} + \phi_{crack}, \qquad (r)$$

که $\phi_{reference}$ فضای منافذ مربوط به کانیهای رسی، $\phi_{reference}$ منافذ مرجع، ϕ_{stiff} فضای منافذ با سفتی بالا، ϕ_{crack} نشان دهنده ریز ترکها است. علیرغم این واقعیت که سنگهای کربناته به طور کلی تمیز هستند.

در این مدل، منافذ رسی معرفی میشوند تا در یک محیط کربناته-آواری قابل کاربرد باشد. فضای منافذ با استفاده از روش پیشنهادی شو- ویت (۱۹۹۵) به منافذ رسی و غیر رسی تقسیم میشود (Xu and Payne, 2009):

$$\varphi_{clay} = V_{Sh} \varphi_T \tag{f}$$

که V_{Sh} حجم شیل است که توسط حجم کل ماتریکس دانهای نرمال- سازی[†] میشود.

مراحل انجام مدلسازی با روش شو-پین در چهار مرحله بهصورت زیر است (Xu and Payne, 2009):

۱- تمام کانیهای موجود در سنگ با استفاده از قانون اختلاط مانند میانگین گیری ویت-روس-هیل مخلوط می شوند و مدول کشسانی مؤثر ماتریکس سنگ جامد محاسبه می شود. بنابراین، مدل با یک ماتریکس سنگ جامد با خواص این مخلوط شروع می شود.

۲- (الف) برای احتساب تعامل مکانیکی بین منافذ، با استفاده از مدلسازی محیط مؤثر تفاضلی، منافذ ریز با آب ذاتی (منافذ مرتبط با رس) به ماتریکس اضافه می شوند تا مدول کشسانی مؤثر ماتریکس سنگ جامد را محاسبه کنند.

۲- (ب) بازگشت به مرحله ۲- (الف). با استفاده از نظریه محیط مؤثر تمام منافذ شامل منافذ ریز با آب غیر ذاتی (یا خشک) مانند منافذ با سفتی بالا، مرجع، و ریز ترکها برای ارائه خواص کشسانی مؤثر به ماتریکس سنگ جامد (بهعنوان مثال، مدول حجمی قالب سنگ خشک) اضافه می شوند.

۳- آب باقیمانده با استفاده از یک قانون اختلاط سیال مانند مدل وود (که به منافذ ریز محدود نشده است) با هیدروکربنها (نفت و/یا گاز) مخلوط می شود تا مدول کشسانی مؤثر سیال منفذی را محاسبه کنند (Wood, 1955).

۴- برای بهدست آوردن مدول کشسانی مؤثر نهایی برای سنگ اشباع، سیال مؤثر با استفاده از معادلات گسمن به سیستم منافذ خشک اضافه می شود (Xu and Payne, 2009). این روش فرض می کند که منافذ بزرگ (بهعنوان مثال، بین دانهای) بهخوبی به هم متصل هستند و تراوایی مؤثر آنها به اندازه کافی بالا است بهطوری که تفاضل-های فشار منافذ بین این منافذ در یک نیمه سیکل از یک موج لرزهای متعادل خواهد شد. از سوی دیگر، ریز ترکهای اشباع از آب، بهدلیل اندازه بسیار کوچک آنها، به صورت جدا از یکدیگر عمل می کنند و منجر به پاسخ لرزهای فرکانس بالا می شود (Xu and Payne, 2009).

نسبت ابعادی منافذ یکی از اصلی ترین متغیرهای هندسی با استفاده از

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۴، ۱۴۰۰.

کردند (۲۰۰۶) نسبتهای العادی منافذ را بهعنوان تابعی از تخلخل و همکاران (۲۰۰۶) نسبتهای ابعادی منافذ را بهعنوان تابعی از تخلخل و مستقل از کانیشناسی آنها در نظر گرفتهاند (Markov et al., 2006). همه روشهای فوق برای تعیین نسبت ابعادی منافذ دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و هیچ یک از آنها را نمیتوان بهعنوان بهترین روش برای تجزیه و تحلیل فضای منافذ در نظر گرفت. مهمترین ملاحظات برای هر یک از این روشها، برازش بیش از حد نسبتهای محاسبه شده است. گاهی نسبت ابعادی محاسبه شده بعنوان یک پارامتر مناسب در نظر گرفته میشود و برای بهینهسازی مدل بر اساس سرعتهای اندازه گیریشده، صرف نظر از زمین شناسی واقعی، بهروز میشود (2017).

مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که سنگهای کربناته، که فقط با تخلخل بین دانه ای و بین کریستالی (تخلخل اولیه) مشخص می-شوند، سرعت موج تراکمی آنها از معادله میانگین-زمانی وایلی هیچ یا انحراف کمی را نشان می دهند (Anselmetti and Eberli, 1999). مدلهای مبتنی بر گنجایش است که بر سرعت موج تراکمی تأثیر می گذارد. سادهترین روش برای تعیین نسبت ابعادی منافذ، اندازه گیری مستقیم تمام منافذ در یک نمونه با میکروسکوپ نوری یا الکترونی است. برای تعیین نسبتهای ابعادی منافذ، محققین مختلفی روی تجزیه و تحلیل سنگشناسی دو بعدی (Gerard et al., 1992)، تجزیه و تحلیل تصویر دیجیتال (Anselmetti et al.,1998) و اسکن میکرو توموگرافی (Anselmetti et al.,1998) مقاطع نازک و نمونههای مغزه کار توموگرافی (Pan et al., 2015) مقاطع نازک و نمونههای مغزه کار با این حال، روشهای مستقیم عمدتاً برای تخمین کیفی مناسب هستند. کاربردهای عملیتری دارند. مبنای این روشها برای بهدست آوردن نسبتهای ابعادی منافذ بر اساس بهترین انطباق بین سرعتهای اندازه-گیری شده و مدلسازی شده با استفاده از مدلهای فیزیک سنگی هستند. کومار و هان (۲۰۰۵) برای تعیین نسبت ابعادی، انواع مختلف منافذ را در سنگهای کربناته از نظریه محیط مؤثر تفاضلی استفاده



شکل ۱: طبقهبندی انواع منافذ ژئوفیزیکی. منافذ قرمز با نسبت ابعادی بالاتر نشاندهنده منافذ سفت گردشده است (منافذ قالبی و حفرهای)، منافذ سیاه با نسبت ابعادی متوسط نشاندهنده منافذ مرجع (تخلخل بین دانهای) و منافذ بنفش با نسبت ابعادی پایین ریز ترکها را نشان میدهد (Xu and Payne, 2009).

منافذ قالبی شکل مانند فضاه ای قالبی و حفرهای می توانند باعث انحراف مثبت شوند (سرعتهای بالاتر از سرعتهای محاسبه شده توسط معادله میانگین-زمانی وایلی). ریز ترکها می توانند منجر به انحراف منفی شوند (سرعتهای کمتری نسبت به سرعتهای محاسبه شده توسط معادله میانگین-زمانی وایلی). مدل فیزیک سنگی محیط مؤثر تفاضلی مدول کشسانی را برای تخلخل بین دانه ای نزدیک به آنچه که توسط معادله میانگین-زمانی وایلی (برای نسبت ابعادی تقریباً برابر با ۱/۰) معادله میانگین-زمانی وایلی (برای نسبت ابعادی تقریباً برابر با ۱/۰) تقریباً برابر با ۱) محیط مؤثر تفاضلی تقریباً مرز بالایی هاشین- شتریکمن و برای ریزتر کها (نسبت ابعادی تقریباً برابر با ۱/۰) محیط مؤثر تفاضلی تقریباً مرز پایین هاشین- شتریکمن را تخمین میزند (Han, 2005).

۳- منطقه مورد مطالعه

سازند فهلیان شامل چندین لایه نازک کربناته است و توسط لایههای شیل که عمدتاً در بخش بالایی مخزن (فهلیان بالایی) وجود دارند، پوشانده شده است. مخزن اصلی (فهلیان پایینی) از هفت لایه اصلی به-عنوان زونهای متخلخل (رسانا) و چهار بین لایهای بهعنوان زونهای متراکم (مقاوم) تشکیل شده است. سازند فهلیان پایینی شامل لایه ۱ با دو زون مخزنی اصلی، لایه ۲ با دو زون مخزنی اصلی و لایه ۳ با سه زون مخزنی اصلی است. رخسارههای کربناته پایینی مخزن اصلی نفت با ضخامت متغیر ۲۰۰ تا ۲۰۰ متر در مساحت تقریبی ۲۰۰ کیلومتر مربع گسترده شدهاند. لایههای ۲ و ۳ در فهلیان پایینی از توالی کربناتهای تشکیل شدهاند که از نظر پتانسیل مخزنی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. شکل ۲ محدوده منطقه مورد مطالعه همراه با مقطع عرضی ساختاری-زمینشناسی را نشان میدهد. مجموعه دادهها شامل سه حلقه

چاه (به نامهای A تا C) با نگارههای مرسوم (نگارههای سرعت موج تراکمی و چگالی) و تفسیر پتروفیزیکی آنها، چکشاتها و سرسازندها در دسترس است. علاوه بر این، تصاویر مغزه و همچنین نگاره FMI برای چاه A نیز موجود است. شکل ۳ نقشه تفسیر زمانی رأس سازند فهلیان پایینی را نشان میدهد که موقعیت چاههای مورد مطالعه روی آن مشخص شده است. شکل ۴ اندازهگیری نگارههای لرزهای همراه با تفسیرهای پتروفیزیکی در چاه A را نشان میدهد. همان طور که مشاهده میشود سازند فهلیان بالایی توسط لایههای شیل پوشانده شده است. در حالی که فهلیان پایینی (لایههای ۱ تا ۳) حاوی زونهای مخزنی با لایهبندی عمدتاً کربناته است.

شکل ۵ مغزههای مختلفی از سازند فهلیان در چاه A را نشان میدهد. مشاهده شده است که قسمت بیشتر تخلخل کل در مقیاس مغزه به انواع منافذ ریز تخلخل و بین کریستالی و درصد کمتری به منافذ

قالبی و حفرهای مرتبط میشود. مقادیر کمی ریز ترک هم وجود دارد که احتمالاً میتوانند ارتباطات داخلی را بین منافذ حفرهای ایجاد کنند. علاوه بر دادههای مغزه، تصاویر نگاره FMI مقادیر مختلف ناهمگنی را به شکل زونهای متخلخل و مقاوم در کل بازه نشان میدهند. ناهمگنیهای رسانا میتوانند به زونهای متخلخل (زونهایی با تخلخلهای ریز تخلخل و بین کریستالی و تخلخلهای قالبی و حفرهای) با اندازهها، اشکال و رساناییهای مختلف مرتبط باشند. ناهمگنیهای مقاوم میتوانند مربوط به زونهای سیمانی متراکم دارای تخلخل کم یا صفر باشند. شکل ع نگاره IMI از سازند فهلیان در چاه A با فواصل مختلف تخلخلهای میدهند که ریز ترکها را نشان میدهد. تمام این تصاویر نشان میدهند که ریز ترکها به ندرت در فواصل مخزنی گسترش یافتهاند. این مشاهدات توسط ترسیم متقاطع نگاره سرعت موج تراکمی در مقابل نگاره تخلخل که در شکل ۷ نشان داده شده، تأیید میشود. در شکل ۷



شکل ۲: محدوده منطقه مورد مطالعه در حوضه دشت آبادان (واقع در جنوب غربی ایران) (بیضوی قرمز) همراه با مقطع عرضی ساختاری زمین شناسی (عبدالهی فرد و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۳: نمایش دوبعدی تفسیر زمانی رأس سازند فهلیان پایینی با موقعیت چاههای A تا C .



شکل ۴: نگارههای چاه A. (الف) کالیپر، (ب) سنگشناسی (حجم کلسیت (آبی) و حجم شیل (خاکستری))، (ج) تخلخل کل، (د) اشباع آب، (ه) سرعت موج تراکمی و (و) چگالی.

میرکمالی و همکاران، بررسی توزیع انواع منافذ در راستای قائم و جانبی با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی در یکی از مخازن کربناته ایران، صفحات ۳۸۱-۳۹۹.



شکل ۵: مغزههای مختلف از مخزن کربناته نفتی در سازند فهلیان در چاه A با عمق آنها در متر. برخی فواصل با یک توالی همگنی از انواع منفذی ریز تخلخل و بین کریستالی و منافذ قالبی و حفرهای مشخص میشوند، درحالیکه توزیع بقیه منافذ همگن نیست و ریز ترکها با توزیع پراکنده مشاهده می-



شکل ۶: نگاره FMI از مخزن کربناته نفتی در سازند فهلیان در چاه A. تخلخلهای مرتبط با ریز ترکها (فلشهای آبی) و تخلخلهای مرتبط با منافذ قالبی و حفرهای (فلشهای نارنجی) را نشان میدهند.







شکل ۷: (الف) ترسیم متقاطع نگاره سرعت موج تراکمی در مقابل نگاره تخلخل همراه با اثر نسبتهای ابعادی مؤثر برای سازند فهلیان در چاه A در لایه ۳. نسبتهای ابعادی مؤثر منافذ سفت، منافذ مرجع و ریز ترکها با استفاده از منحنیهای نسبت ابعادی تقریب زده شدهاند. (ب) اثر انواع منافذ در ترسیم متقاطع نگاره سرعت موج تراکمی در مقابل نگاره تخلخل برای سازند فهلیان در چاه A. انواع منافذ غالب در مخزن کربناته فهلیان مربوط به منافذ مرجع و با درصدی کمتری از منافذ سفت .

را برای یک تخلخل معین تغییر دهند. رسوبات با تخلخل قالبی بیشتر در بالای منحنی مرجع قرار دارند در حالیکه با افزودن ریز ترکها به سیستم منافذ، سرعت به زیر منحنی مرجع کاهش مییابد. بهعنوان مثال، دادههای که روی خط منافذ با سفتی بالا ۲۰٪ قرار دارند، به تخلخل ۲۰٪ سخت و ۸۰٪ مرجع اشاره دارند. میتوانیم ببینیم که بیشتر دادهها بین خط منافذ ۱۰۰٪ منافذ و ۱۰۰٪ منافذ مرجع قرار دارند. این ترسیم، مشاهدات مغزه را تأیید میکند که نوع منافذ غالب در مخزن مربوط به (الف) نسبتهای ابعادی منافذ با سفتی بالا، منافذ مرجع و ریز ترکها با استفاده از مدل فیزیک سنگی محیط مؤثر تفاضلی با نسبت ابعادی متغیر روی چاه A تقریب زده شدهاند و بهعنوان یک الگو در نظر گرفته میشود. این الگو نشان میدهد که منافذ قالبی با سفتی بالا، منافذ مرجع و ریز ترکها بهترتیب با نسبتهای ابعادی ثابت برابر با ۵۰/۹۰ ۱۱/۰ و ۱۰/۰۱ مطابقت دارند. شکل ۷ (ب) نشان میدهد که چگونه درصدهای نسبی این نسبتهای ابعادی مختلف میتوانند سرعت **میرکمالی و همکاران، بررسی توزیع انواع منافذ در راستای قائم و جانبی با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی در یکی از مخازن کربناته ایران، صفحات ۳۸۱-۳۹۹.**

منافذ مرجع با درصدی از منافذ قالبی با سفتی بالا است.

۴- روش کار

به منظور بررسی توزیع انواع منافذ در ابتدا نسبت ابعادی منافذ و درصد نسبی آنها با استفاده از الگوریتم وارون سازی انواع منافذ در موقعیت چاهها و با استفاده از کدنویسی در نرمافزار متلب تخمین زده شده است. نسبتهای ابعادی منافذ و درصد نسبی متناظرشان با استفاده از داده-های اندازه گیری تخلخل کل (ϕ_T) و سرعت موج تراکمی (V_p) مطابق مراحل زیر تعیین شده است:

برای منافذ مرجع ($V_{P_{\scriptscriptstyle Calculated}}$) برای منافذ مرجع (۱) محاسبه سرعت موج تراکمی (ϕ_{T} با استفاده از معادله میانگین-زمان وایلی با

(۲) محاسبه سرعت موج تراکمی ($V_{P_{Calculated}}$) مربوط به منافذ با سفتی بالا و ریز ترکها بهترتیب با استفاده از مرزهای بالایی و پایینی هاشین-شتریکمن با ϕ_T ؛

(۳) فرض نسبتهای ابعادی اولیه مربوط به منافذ با سفتی بالا، $\alpha_{refrence} = 0.1$ ، $\alpha_{stiff} = 1$ و منافذ مرجع و ریز ترکها بهترتیب $\alpha_{stiff} = 1$ ، $\alpha_{stiff} = 0.01$ و محاسبه سرعت موج تراکمی ($V_{P_{Modelled}}$) با DEM با Φ_r استفاده از DEM با Φ_r

(۴) مقایسه سرعتهای محاسبه شده و مدل شده برای انواع منافذ. اگر $((\alpha))^2 > \varepsilon$ سپس اعمال نموهای $(\nabla_{P_{Calculated}} - \nabla_{P_{Modelled}}(\alpha))^2 > \varepsilon$ تا $\alpha = \alpha \pm \delta \alpha$ به طوری که $\alpha = \alpha \pm \delta \alpha$ تا $\delta \alpha$ به طوری که $\alpha = \alpha \pm \delta \alpha$ تا $\delta \alpha$ به طوری که $(\alpha)^2 = \varepsilon$ تا $\delta \alpha$ به موری که $(\alpha)^2 = \varepsilon$ تا $\delta \alpha$ می تواند برای انواع منافذ متناظر اختصاص یابد. در اینجا، δ خطای محاسبه است.

۵) فرض تشکیل فضای منافذ فقط از منافذ مرجع و سپس (۵) استفاده از مدل *DEM* برای محاسبه $V_{P_{reference}}$

 $V_{P_{refr}}$ ، V_p مقایسه سرعت اندازه گیری شده V_p با $V_{P_{refr}}$ ، $\alpha_2 = \alpha_{st}$ ، $\alpha_1 = \alpha_{refrence}$ میس اعمال $V_P > V_{P_{refrence}}$ $\alpha_2 = \alpha_{st}$ ، $\alpha_1 = \alpha_{refrence}$ میس اعمال $V_P > V_{P_{refrence}}$ $\phi_1 = \phi_1 = \phi_1$ $\phi_1 = \phi_1 - \delta \alpha$ (V) $\phi_1 = \phi_1 - \delta \alpha$ به طوری که $\phi_1 = \phi_1 + \delta \alpha$ $\phi_2 = \phi_2 + \delta \alpha$ $\phi_2 = \phi_2 + \delta \alpha$ $\phi_2 = \phi_2 + \delta \alpha$

 $V_{P_{Modelled}} = DEM(K_0, \mu_0, \alpha_1, \alpha_2, \phi_1, \phi_2)$ برای $(V_P - V_{P_{Modelled}}(\alpha))^2 \le \varepsilon$ برای (۹) تکرار مراحل ۲ و ۸ تا $2 \le \varepsilon$ با سفتی بالا بهصورت بهدست آوردن درصدهای نسبی منافذ مرجع و با سفتی بالا بهصورت

 $\phi_{stiff} = \phi_2 \, \, \phi_{refrence} = \phi_1$ و $\Phi_{refrence} = \phi_1$ با $V_{P_{refrence}}$ (۱۰) مقایسه سرعت اندازه گیری شده V_p با $\alpha_2 = \alpha_{c \ r \ a} \, , \alpha_1 = \alpha_{refrence}$ اندازه گیری شده $V_p < V_{P_{refrence}}$ $\phi_2 = 0 \, \, \phi_1 = \phi_T$ $\phi_2 = 0 \, \, \phi_1 = \phi_T$ $\phi_2 = 0 \, \, \phi_1 = \phi_T$

 $V_{P_{Modelled}} = DEM(K_0, \mu_0, \alpha_1, \alpha_2, \phi_1, \phi_2)$

اگر $\delta^2 > \epsilon$ (۱۲) اگر $(V_P - V_{P_{Modelled}})^2 > \epsilon$ (۱۲) اگر $(1 + \delta \alpha)$ $\phi_1 = \phi_1 - \delta \alpha$ (14) $\phi_2 = \phi_1 + \delta \alpha$ $\phi_2 = \phi_2 + \delta \alpha$

 $(V_P - V_{P_{Modelled}}(\alpha))^2 \le \varepsilon$ ا تا ۲ و ۲ ا مراحل ۱ و ۱۳) تکرار مراحل ۱ و ۲۰ تا ۲ ع برای بهدست آوردن درصدهای نسبی منافذ مرجع و ریز ترکها به-صورت $\phi_{refrence} = \phi_1$ و $\phi_{refrence} = \phi_1$

لازم به ذکر است که با استفاده از طرحواره فوق فقط دو نوع منافذ ب بهصورت همزمان قابل شناسایی است، منافذ مرجع همراه با منافذ با سفتی بالا یا منافذ مرجع همراه با ریز ترکها. این طرحواره به مجموعه دادههای مورد مطالعه از نمونهای به نمونه دیگر، بهطور مستقل از یکدیگر اعمال شده و منجر به نگاره نسبت ابعادی متغیر با عمق شده است. شکل ما نگاره نسبت ابعادی مدل با استفاده از سرعت موج تراکمی را برای انواع مختلف منافذ در چاه A نشان می دهد. به منظور بررسی نحوه توزیع انواع منافذ در راستای جانبی و قائم در چاههای مورد مطالعه در زونهای منختلف مقدار میانگین نسبت ابعادی استخراج شده و در ادامه برای به دست آوردن درصدهای نسبی منافذ به کار برده شده است. درصدهای نسبی منافذ با سفتی بالا (سبز)، منافذ مرجع (زرد) و ریز ترکهای (قرمز) به می منافذ با سفتی بالا (سبز)، منافذ مرجع (زرد) و ریز ترکهای (قرمز) معینی با استفاده از میانگین نسبت ابعادی در زونهای مختلف لایه تخمینی با استفاده از میانگین نسبت ابعادی در زونهای مختلف لایه بدیهی است که در درصدهای نسبی منافذ از نمونهای به نمونه دیگر بدیهی است که در درصدهای نسبی منافذ از نمونهای به نمونه دیگر بدیهی ورد.

در ادامه، از نتایج حاصل از الگوریتم وارونسازی انواع منافذ در مدلسازی فیزیک سنگی شو- پین استفاده شده و سرعت موج تراکمی برآورد شده است. ایـن مدلسازی در چهار گام به شرح زیر انجام شده است: در گام اول، تمام کانیهای تفسیر شده (کلسیت و رس) حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی با استفاده از قانون اختلاط میانگین ویت-روس-هیل برای محاسبه مدولهای کشسانی مؤثر ماتریکس سنگ جامد مخلوط شدند. در گام دوم برای محاسبه مدولهای کشسانی مؤثر ماتریکس سنگ جامد، منافذ مرتبط با رس دارای آب منفذی با استفاده از روش محیط مؤثر تفاضلی به ماتریکس اضافه شدند. در مرحله بعد برای محاسبه مدولهای کشسانی مؤثر سنگ خشک، انواع منافذ (منافذ با سفتی بالا، منافذ مرجع و ریز ترکها) با استفاده از محیط مؤثر تفاضلی به ماتریکس سنگ جامد وارد شدند. نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۴، ۱۴۰۰.



شکل ۸: نگارههای نسبتهای ابعادی مدل با استفاده از سرعت موج تراکمی (الف) منافذ سفت، (ب) منافذ مرجع و (ج) ریز ترکها در چاه A. مشاهده می-شود که نسبتهـای ابعادی از نمونهای به نمونه دیگر تغییر میکنند. محدوده تغییرات نسبت ابعـادی برای منـافذ سفت، منافذ مرجع و ریز ترکها به ترتیب ۸۵/۰۰-۱، ۲۰۱۹– و ۱۰/۰۰-۱۰ ۲۰/۰۰ و ۲۰/۰۰-۱۰، ۱۰/۰۰-۱۰ میکند.

سپس، آب باقیمانده همراه با نفت با استفاده از مدل وود مخلوط شدند تا مدول کشسانی مؤثر سیال منفذی بهدست آید. در نهایت، برای محاسبه مدول کشسانی سنگ اشباع و در ادامه سرعت امواج تراکمی و برشی از مدل گسمن برای معرفی مدول کشسانی مؤثر سیال منفذی به مدولهای کشسانی مؤثر سنگ خشک استفاده شده است. همچنین، نگاره چگالی توسط میانگین گیری از چگالیهای ماتریکس سنگ جامد و سیال منفذی بر اساس نگاره تخلخل مدل شده است (... Mavko et al. سیال منفذی بر اساس نگاره تخلخل مدل شده است (... موادی درک بهتر تفاوت از نظر کمی، اختلاف نسبی مقادیر لرزهای اندازه گیری شده با مدل فیزیک سنگی از نمونهای به نمونه دیگر محاسبه شده و به صورت نگاره خطا ترسیم شده است. شکل ۱۰ نتایج نگارههای اندازه گیری شده و نگارههای خطا برای چاههای A و C را نشان می-اندازه گیری و مدل در هر سه چاه بهدست آمده است.

۵- بحث و نتایج

در این مطالعه وارونسازی انواع منافذ براساس الگوریتم کومار و هان (۲۰۰۵) مبنای بررسی مشخصه هندسی منافذ است. این الگوریتم قادر است بهطور پیوسته انواع منافذ را در امتداد چاه و سازند مورد مطالعه شناسایی کند. پارامتر کلیدی در استفاده از مدلهای مبتنی بر گنجایش در مدلسازی فیزیک سنگی کربناته، نسبت ابعادی و درصد

نسبی متناظرشان است. نسبتهای ابعادی منافذ و درصد نسبی متناظرشان با استفاده از دادههای اندازه گیری تخلخل کل و سرعت موج تراکمی تخمین زده شده است. در نهایت صحت مشخصه هندسی منافذ بعدست آمده با به کارگیری مدل در مدلسازی فیزیک سنگی و محاسبه خطای مدلسازی سرعت تأیید شده است. فرآیند اعمال مدلهای مذکور بدین صورت است که با یک حدس اولیه برای مشخصه هندسی منافذ آغاز شده و طی یک فرآیند تکرار و بهینه سازی، مقدار نهایی مشخصه هندسی منافذ برای هر عمق بعدست آمده است. از آنجا که تنوع در سنگشناسی و دیاژنز باعث تنوع در نوع منافذ می شود، درنتیجه برای مطالعه در زونهای مختلف مقدار میانگین نسبت ابعادی استخراج گردید. علاوه بر این درصدهای نسبی فقط برای دو نوع منافذ مرجع همراه با منافذ با سفتی بالا یا منافذ مرجع همراه با ریز ترکها) به صورت همزمان شناسایی شده است.

لایههای اصلی و میان لایههای سازند فهلیان دارای تجمعهای مختلفی از منافذ هستند که توسط چاههای مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به اهمیت بالای لایههای ۲ و ۳ مخزنی و برای بررسی جزئیات بیشتر این لایهها به طور خاص مورد برررسی قرار گرفتهاند. همان طور که مشاهده می شود فهلیان پایینی (بخش مخزنی سازند فهلیان) در چاه A در بخش غربی میدان، دارای توزیع متفاوتی از انواع منافذ در مقایسه با چاه B در بخش مرکزی و چاه C در بخش شرقی است. چاه **میرکمالی و همکاران، بررسی توزیع انواع منافذ در راستای قائم و جانبی با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی در یکی از مخازن کربناته ایران، صفحات ۳۸۱-۳۹۹.**

WELL- A		WELL-B				WELL-C						
;) (ب) (الف)	(د) (ج	Π	(الف)	(ب)	(ج)	(د)			(الف)	(ب)	(ج)	(د)
PORSN PC 0 10 1 VOLCLCN PORRN PC DEPTH 0 10 W/ 10	PRS 7/ 0.5 PRR	DE	VOLCLCN	PORSN PORRN 0 V/V 1	PORS 0 WV 0.5 PORR 0 0.5			DEPTH	VOLCLCN	PORSN C 1 PORRN C 9,9 1	PORS 0 77 0.3 PORR 0 0.5	
i 100 VOLILLN PORCN PC	PRC PHIT V 0.5 0 V ^{II} 0.5		xemes : 100 VOLILLN 0 1	PORCN 0 WV 1	PORC 0 WV 0.5	0 9/9 0.5		vernes : 100	VOLILLN 0 1	PORCN 6 WW 1	PORC 0 V/V 0.5	PHIT 0 V/V 0.5
		<u> </u>		- All	<u>}</u>	_	-				\$	
Int-layer 3	Artes	₄ Int-layer 3∍	1250		Ph A	Mass	Int-layer 3	4400			2	Mary Mary
++ Layer 2.2	And Marked	- Layer 2.2		present for the	when the second	M. W. W.	3 Layer 2.	4450			and and	The second secon
4350		4	1300	M.M.								T T
Layer 3.1	Martin Mar	tayer 3.1 →	4350	All Add	والمستعلي ومولي	and many damage	← Layer 3.1 →	4500		A MALLI MAN	A bere - Alex	Mar Mar
4400 Layer 3.2	A MAY	Layer 3.2 —	1400	Add for a flow a second a second for flood	المحصور والمستعلمة المستعمل المستعمد المستعمل المراجع	Monorana	* Layer 3.2	4550				
4450 Layer 3.3	Sale Hard March	4 →← Layer 3.3 →→	4450	and pulled by the manual	a particular property and	MAN MANY	← Layer 3.3 →	4600		L. Lakutt Allak hts		

A با مقدار قابل توجهی از منافذ با سفتی بالا بهعلاوه

شکل ۹: (الف) نگارههای سنگشناسی به هنجار شده(حجم کلسیت (آبی) و حجم شیل (خاکستری))، (ب) درصدهای نسبی منافذ تخمینی به هنجار شده، (ج) درصدهای نسبی منافذ تخمینی با استفاده از الگوریتم وارونسازی انواع منافذ برای منافذ سفت (سبز)، منافذ مرجع (زرد) و ریز ترکها (قرمز)) (د) تخلخل کل در لایههای ۲ و ۳ در چاههای A، B و C در فهلیان پایینی (بخش مخزنی سازند فهلیان). چاه A واقع در بخش غربی میدان دارای توزیع متفاوتی از انواع منافذ در مقایسه با چاه B در بخش مرکزی و چاه C در بخش شرقی است. چاه A با مقدار قابل توجهی از منافذ مرجع به علاوه درصدی از منافذ سفت مشخص شده، در حالی که ریز ترکها (اجزای بعدی سیستم منفذی) با توزیعی بسیار پراکنده برای لایه اطراف چاه A در فهلیان پایینی منافذ سفت مشخص شده، در حالی که ریز ترکها (اجزای بعدی سیستم منفذی) با توزیعی بسیار پراکنده برای لایه اطراف چاه A

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۴، ۱۴۰۰.

سفت در این چاه کاهش یافته است. همچنین میزان ریز ترکها با توزیعی پراکنده نسبت به چاه A افزایش یافته است. در چاه B واقع در بخش مرکزی میدان مقدار و تراکم منافذ سفت بهطور نسبی در مقایسه با دو چاه دیگر کاهش یافته و توزیع ریز ترکها به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.



شکل ۱۰: (الف)، (ب) و (ج) نگارههای سرعت موج تراکمی مدل شده با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی شو- پین (قرمز) همراه با نگارههای اندازهگیری آنها (آبی) و (د)، (ه) و (و) نگارههای خطا در لایههای ۲ و ۳ (شکل ۹) در چاههای A، B و C مشاهده می شود که انطباق خوبی بین نگارههای لرزهای اندازهگیری شده و مدل برای سرعت موج تراکمی بهدست آمده است و خطاها بهطور قابل توجهی کاهش یافته است.

> توزيع پيوستهاي از منافذ مرجع مشخص شده، درحالي که ريز ترکها اجزای بعدی سیستم منافذ با توزیعی بسیار پراکنده برای لایه اطراف چاه A در فهلیان پایینی هستند. در این چاه لایه ۲ از درصد کمتری از منافذ با سفتی بالا برخوردار است درحالی که در لایه ۳ میزان و پیوستگی این منافذ افزایش یافته است. در مقابل، لایه اطراف چاه C واقع در بخش شرقی همانند چاه A با مقدار قابل توجهی از منافذ مرجع مشخص شده، درحالی که تراکم توزیع منافذ با سفتی بالا در این چاه کاهش یافته است. همچنین میزان ریز ترکها با توزیعی پراکنده نسبت به چاه A افزایش یافته است. در این چاه لایه ۲ از درصد بیشتری از منافذ با سفتی بالا در مقایسه با چاه A برخوردار است درحالی که در لایه ۳ میزان این منافذ به شدت کاهش یافته است. در لایه ۳ منافذ مرجع بخش عمده ای از منافذ را تشکیل میدهند. در چاه B واقع در بخش مرکزی مقدار و تراکم منافذ با سفتی بالا بهطور نسبی در مقایسه با چاه A کاهش یافته و توزیع ریز ترکها به مقدار قابلتوجهی افزایش یافته است. در این چاه لایه ۲ از درصد بسیار کمتری از منافذ با سفتی بالا در مقایسه با چاه A و C برخورار است. در لایه ۳ پیوستگی منافذ با سفتی بالا تقریباً مشابه با چاه

A است درحالی که میزان این منافذ مقداری کاهش یافته است. بهطور کلی میزان منافذ با سفتی بالا در لایه ۳ در چاه A واقع در بخش غربی میدان به سمت چاه C واقع در بخش شرقی کاهش یافته است.

دادههای مغزه و نگارههای FMI در چاه A نتایج بهدست آمده از توزیع انواع منافذ را تأیید میکنند (شکل ۶). فهلیان بالایی بهدلیل وجود رگههای شیل عمدتاً دارای تخلخل مؤثر کم است. این بخش با انواع مختلف منافذ با سفتی بالا، منافذ مرجع و ریز ترکها مشخص میشود. سازند فهلیان پایینی عمدتاً از لایههای متخلخل بهعنوان زونهای نفتی تشکیل شده است. این بخش توسط لایههای متراکم از هم جدا شده است. فواصل متخلخل عمدتاً با مقدار قابلتوجهی از منافذ مرجع بهعلاوه درصدی از منافذ با سفتی بالا مشخص شدهاند. برخی فواصل با یک توالی همگن از منافذ همگن نیست به صورتی که ریز ترکها با توزیع پراکنده قابل مشاهده هستند. همان طورکه در شکل ۶ نشان داده شده منافذ مرجع اجزای غالب فضای منافذ هستند، در حالیکه منافذ با سفتی بالا و ریز

عنوانمثال، نگاره FMI نشان میدهد که منافذ با سفتی بالا را میتوان در عمق حدود ۴۳۱۵ تا ۴۳۱۷ متر پیدا کرد که با نتایج بهدست آمده مطابقت دارد. این همچنین با تصاویر مغزه تأیید می شود که منافذ در این فاصله به شدت گرد شده هستند. علاوه بر این، تعدادی ریز ترک را می-توان در نگاره FMI در فاصله عمقی حدود ۴۳۱۶ متر مشاهده کرد، که باز هم با نتيجه مشخصه نوع منافذ بهدست آمده مطابقت دارد. مطالعات گسترده روی نمونههای مغزه در چاههای مختلف نشان داده است که لایه ۳ سازند فهلیان به شدت تحت تـأثیر انحـلال و یـا بهعبارتی دیگر دیاژنز ثانویه حاصل از تأثیر آبهای متئوریک قرار گرفته و کیفیت مخزنی در اين لايه غالباً تحت تأثير كارستي شدن است. اين روند باعث شده تا فضاهای خالی به یکدیگر متصل شده و به افزایش تراوایی لایه ۳ کمک بهسزایی کند (گزارش چاپ نشده مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت). مطالعات مغزههای در دسترس نشان داده است که روند تغییرات دیاژنز ثانویه یا کارستی شدن رابطه مستقیمی با تخلخل مرتبط با منافذ با سفتی بالا دارد. به این صورت که با کم شدن میزان تخلخل مرتبط با منافذ با سفتی بالا کیفیت مخزنی و تراوایی نیز کاهش می یابد که این خود به صورت بارز نشان دهنده این است که کیفیت مخزنی متأثر از تأثير دياژنز ثانويه در لايه ٣ سازند فهليان است. اين امر باعث انحلال شدید حفرات مجزا مانند تخلخلهای قالبی و حفرهای شده و فضایی تراوا حاصل کرده که باعث حرکت سیال هیدروکربنی می شود. با توجه به نتایج بهدست آمده از توزیع انواع منافذ بخش غربی و مرکزی میدان به واسطه حضور منافذ با سفتى بالاى بيشتر و انحلال مرتبط با آنها داراى تخلخل و تراوایی بهتری در مقایسه با بخش شرقی میدان مورد مطالعه هستند. جدول ۱ میانگین نگارههای تخلخل کل و مؤثر چاه های A، B و C در زونهای مختلف از لایههای ۲ و ۳ را در نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود میانگین مقدار تخلخل از بخش غربی به سمت بخش شرقی میدان کاهش یافته است.

یکی از مهمترین مزایای برآورد مشخصه هندسی منافذ، امکان استفاده در مدلسازی فیزیک سنگی شو- پین برای پیش بینی نگاره-های کشسان سرعت امواج تراکمی و برشی است. در این مطالعه از نتایج وارونسازی انواع منافذ در مدلسازی سرعت موج تراکمی استفاده شده و با محاسبه خطا و همبستگی متقابل بین نگارههای سرعت اندازه-گیری شده و مدل به نوعی نتایج وارونسازی انواع منافذ نیز صحتسنجی شده است. همچنین، نگارههای چاه در معرض منابع مختلف خطا هستند، که می تواند از نگارههای خام در هنگام اندازه گیری ها و یا مراحل پردازش و تفسیر آن ها حاصل شود. در مجموعه دادههای مورد مطالعه، فواصلی با نگارههای بی کیفیت (در تمام چاهها) ناشی از دادههای ناموجود (از دست رفته یا بهطور نادرستی درونیابی شده) و مناطق شستهشده زنگارههای چاهی بی کیفیت ارائه شده، این است که برای این بخش از نگارههای چاهی بی کیفیت ارائه شده، این است که از نتایج مدل سازی فیزیک سنگی در طرحواره پتروفیزیک لرزهای بهمنظور برطرف کردن

مشکلات پتروفیزیکی و دستیابی به دادههای سازگار بین حوزههای لرزهای و پتروفیزیکی استفاده گردد. نتایج جایگزینی نگارههای چاهی بی-کیفیت در طرحواره پتروفیزیک لرزهای با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی از طریق افزایش انطباق لرزه با چاه تأیید شده است (Mirkamali et al., 2020).

۶- حساسیتسنجی روش نسبت به خطاهای مشخصه هندسه منفذی

همان طور که بیان شد پارامتر کلیدی در مدل های فیزیک سنگی مبتنی بر گنجایش در سنگهای کربناته، نسبت ابعادی منافذ و درصد نسبی مرتبط با آنها است. یکی از نکات مهمی که در کاربرد مدلهای مبتنی بر گنجایش باید درنظر گرفت این است که در واقعیت، شکل فضای منافذ (یا گنجایشها)، معمولاً به شکل بیضوی ایده آل نبوده و فرضیات به کار رفته در تئوری این مدل ها برای توجیه رفتار و تأثیر منافذ بر روی یکدیگر، راه حلهایی ابتکاری بوده که با واقعیت و طبیعت سنگها ممكن است همخوانى نداشته باشد. آنچه در اين مدلها مهم است رسیدن به مدولهای کشسانی سنگ است به نحویکه این مدولها با مدولهای واقعی سنگ همخوانی داشته باشد که با مدلهای مذکور می-توان به آنها رسید. در واقع پارامتری که روابط ریاضی این مدلها را به روابطی منعطف تبدیل می کند نسبت ابعادی منافذ است. از طرف دیگر، ساختار پیچیده فضای منافذ در سنگهای کربناته، در فرآیندهای تجزیه و تحلیل و مدلسازی فیزیک سنگی مبتنی بر گنجایش بسیار چالش برانگیز است. امروزه نرمافزارهای تجاری موجود در مدلسازی فیزیک سنگی مبتنی بر گنجایش برای سنگهای کربناته شکل منافذ را بهطور مناسبی در نظر نمی گیرند. در این نرمافزارها درصد نسبی مرتبط با شکل منافذ در فواصل مشخص به صورت ثابت در نظر گرفته شده و با تغییر نسبت ابعادی که یک پارامتر تناسبی است میتوان طی فرآیند تکراری، با استفاده از مدلهای مذکور به پاسخی قابل قبول رسید. این در حالی است که شکل منافذ مختلف سنگ (منافذ مرجع، منافذ سفت با نسبت-های ابعادی بالا و ریز ترکها با نسبت ابعادی کمتر) بهطور متغیر با عمق تغییر میکند. جایگزینی این درصدهای نسبی متغیر با عمق با مقادیر ثابت در مدلسازیهای فیزیک سنگی مبتنی بر گنجایش، عدم قطعیتها و خطاهایی را در محاسبات انجامشده وارد میکند. یکی از اهداف این مقاله مشخص كردن اهميت استفاده از چندين نوع منافذ متغير عمق و با نسبت ابعادی صحیح در سنگهای کربناته است. در این مقاله به این دلیل که شکل و درصد نسبی منافذ با استفاده الگوریتم وارونسازی نوع منافذ بهدست آمده، لذا لازم بود ميزان حساسيت مدل به مشخصه هندسه منفذی بررسی شود. به همین منظور مدل سرعت تراکمی مصنوعی با مدلسازی شو- پین ساخته شده و در ادامه با استفاده از الگوريتم وارونسازى انواع منافذ در دو حالت بدون خطا و اضافه كردن خطای تصادفی به مشخصه هندسه منفذی مدل شده است (شکل۱۱).

نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۴، ۱۴۰۰.

منافذ نیز حساسیت نسبت به خطای ریز ترکها بیشتر و نسبت به منافذ سخت کمتر است. انتخاب به خطای نسبت ابعادی همزمان با خطا در درصد نسبی منافذ مرتبط با آنها منجر به کاهش خطای مدلسازی می-شود. همچنین میزان مقادیر کانی شناسی و درصد نسبی منافذ نیز در میزان خطا و انحراف از مقدار مصنوعی تأثیر گذار است. سپس خطای بین نگارههای سرعت تراکمی مصنوعی و مدل محاسبه شده است. مشاهده میشود که این مدل به تغییرات نسبت ابعادی حساسیت بیشتری دارد. به عبارت دیگر حتی مقادیر کم خطا در نسبت ابعادی موجب خطای بزرگ در نتایج این مدل خواهد شد؛ لذا انتخاب و اعمال نسبت ابعادی، به دقت بالاتری نیاز دارد. در مورد درصد نسبی



شکل ۱۱: مدل سرعت تراکمی مصنوعی با استفاده از مدلسازی شو- پین (آبی) و مدلسازی فیزیک سنگی این مدل (قرمز) با استفاده مدلسازی شو- پین و الگوریتم وارونسازی انواع منافذ در دو حالت (الف) بدون خطا و اضافه کردن خطای تصادفی به (ب) نسبتهای ابعادی منافذ، (ج) درصد نسبی منافذ (د) نسبت ابعادی منافذ همراه با درصد نسبی مرتبط با آنها.

ا و ۳.	(یههای ۲	د در ا	کل و مفيا	تخلخل	یانگین	ل ۱: م	عدوا
--------	----------	--------	-----------	-------	--------	--------	------

Zone	P	HIT-Avera	ge	PHIE-Average				
	Well-A	Well-B	Well-C	Well-A	Well-B	Well-C		
Layer 2.1	0.231	0.183	0.071	0.105	0.057	0.025		
Layer 2.2	0.15	0.132	0.081	0.081	0.038	0.04		
Layer 3.1	0.167	0.124	0.067	0.098	0.032	0.025		
Layer 3.2	0.181	0.127	0.033	0.106	0.047	0.004		
Layer 3.3	0.137	0.118	0.032	0.089	0.045	0.005		

۷- نتیجهگیری

در این مطالعه، سازند کربناته فهلیان در یکی از میادین نفتی ایران در دشت آبادان برای توزیع انواع منافذ با استفاده از مدل سازی فیزیک سنگی

مبتنی بر گنجایش مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصه هندسی منافذ با استفاده از وارونسازی انواع منافذ بهطور کمی برآورد شده و در ادامه برای مدلسازی نگاره سرعت موج تراکمی استفاده شدهاند. در تعیین نوع

- Anselmetti, F.S. and Eberli, G.P., 1993, Controls on sonic velocity in carbonate rocks. Pure and Applied Geophysics, 141 (2), 287–323.
- Anselmetti, F.S. and Eberli, G.P., 1999. The Velocitydeviation log: a tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs. AAPG Bulletin, 83, 450– 466.
- Anselmetti, F.S., Luthi, S. and Eberli, G.P., 1998, Quantitative characterization of carbonate core systems by digital image analysis. AAPG Bulletin, 82, 1815–1836.
- Berryman, J.G., 1992, Single scattering approximations for coefficients in Biot's equations of poro elasticity. Journal of the Acoustical Society of America, 91, 551– 571.
- Gerard, R.E., Philipson, C.A., Manni F.M. and Marschall M.D., 1992, Petrographic Image Analysis: An Alternate Method for Determining Petrophysical Properties. Automated Pattern Analysis in Petroleum Exploration, 249-263.
- Kumar, M. and Han, D., 2005, Pore shape effect on elastic properties of carbonate rocks.75th Annual International Meeting. 1477–1480 SEG, Expanded Abstracts.
- Kuster, G.T. and Toksöz, M.N. 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media, Part I: Theoretical formulations. Geophysics, 39, 587–606.
- Lucia, F.J., 1999, Carbonate Reservoir Characterization. New York, Springer-Verlag.
- Markov, M., Levine, V., Mousatov, A. and Kazatchenko E., 2005, Elastic properties of double-porosity rocks using the differential effective medium model. Geophysical Prospecting, 53, 733–754.
- Markov, M., Kazatchenko, E. and Mousatov, A., 2006, Compressional and shear wave velocities in multicomponent carbonate media as porosity functions. SPWLA 47th Annual Logging Symposium, June 4-7.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 2009, The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mirkamali, M. S., Javaherian, A., Hassani, H., Saberi, M.R. and Hosseini, S.A., 2020, Quantitative pore-type characterization from well logs based on the seismic petrophysics in a carbonate reservoir. Geophysical Prospecting, 1-22
- Misaghi, A., Negahban S., Landrø, M. and Javaherian, A., 2010, A comparison of rock physics models for fluid substitution in carbonate rocks. Exploration Geophysics, 41, 146–154.
- Mollajan, A. and Memarian, H., 2016, Rock physics-based carbonate pore type identification using Parzen classifier. Journal of Petroleum Science and Engineering, 145, 205-212
- Pan, J.G., Wang, H.B., Li, C. and Zhao, J.G., 2015, Effect of pore structure on seismic rock-physics characteristics of dense carbonates. Applied Geophysics, 12.

منافذ، دو نوع منافذ مرجع و منافذ با سفتی بالا به عنوان منافذ اصلی سازند کربناته فهلیان شناسایی شده که توسط نگارههای FMI و اطلاعات مغزه نیز تأیید شدهاند. برای نگارههای چاهی بی کیفیت نتایج فیزیک سنگ راهنمای مناسبی برای مقادیر واقعی پارامترهای چگالی و سرعت بوده و نتایج فیزیک سنگی به جای نگارههای لرزهای اندازه گیری شده مورد استفاده قرارگرفت. فهلیان پایینی (بخش مخزنی سازند فهلیان) در چاه A در بخش غربی میدان، دارای توزیع متفاوتی از انواع منافذ در مقایسه با چاه B در بخش مرکزی و چاه C در بخش شرقی است. چاه A واقع در بخش غربی با مقدار قابل توجهی از منافذ سفتی بالا به علاوه توزيع پيوستهاى از منافذ مرجع مشخص شده، درحالى كه ريز تركها اجزاي بعدي سيستم منافذ با توزيعي بسيار يراكنده براي لايه اطراف چاه A در فهلیان پایینی هستند. در مقابل، لایه اطراف چاه C واقع در بخش شرقی با مقدار قابلتوجهی از منافذ مرجع مشخص شده، درحالیکه توزیع منافذ با سفتی بالا در این چاه کاهش یافته است. همچنین میزان ریز ترکها با توزیعی یراکنده نسبت به چاه A افزایش یافته است. در چاه B واقع در بخش مرکزی مقدار و تراکم منافذ با سفتی بالا بهطور نسبی در مقایسه با چاه A کاهش یافته و توزیع ریز ترکها به مقدار قابلتوجهی افزایش یافته است. با توجه به نتایج بهدست آمده از توزیع انواع منافذ بخش غربی و مرکزی میدان به واسطه حضور منافذ با سفتی بالا بیشتر و انحلال مرتبط با آنها دارای تخلخل و تراوایی بهتری در مقایسه با بخش شرقی میدان مورد مطالعه هستند.

سپاس گزاری

نویسندگان از مسئولین محترم اداره ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت جهت در اختیار قـرار دادن دادهها و همکاریهای لازم در انجام این پروژه کمال تشکر و قدردانی مینمایند.

منابع

- قره چلو، س.، کدخدائی، ع.، امینی، ع. و سهرابی، س.، ۱۳۹۴، تعیین انواع منافذ مخزن آسماری با استفاده از نگار انحراف سرعت و تشدید مغناطیس هسته ای (NMR) در یکی از میادین نفتی جنوب غرب. مجله پژوهش نفت، ۸۲، ۱۵–۳۱. میرکمالی، م، ۱، جواهریان، ع.، حسنی، ح.، صابری، م. ر. و ذبیحی، س.،
- یر کی ۲ (۲۰ ریاف کی ۲۰ می ۲۰ ۲۰ ۲۰ می ۲۰ ۱۳۹۸، تعیین نوع منافذ با استفاده از مدلسازی فیزیک سنگی در یکی از مخازن کربناته ایران. چهارمین سمینار ژئوفیزیک اکتشافی نفت ، اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ تهران.
- Abdollahie Fard, I., Braathen, A., Mokhtari, M. and Alavi, S. A., 2006, Interaction of the Zagros Foldthrust belt and the Arabian type, deep-seated folds in the Abadan Plain and the Dezful Embayment, SW Iran. Petroleum Geoscience, 12, 347–62

نشریه پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، دوره7، شماره ۴، ۱۴۰۰.

Zhao, L., Nasser, M. and Han, D.H., 2013, Quantitative geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs. Geophysical Prospecting, 61, 827–841.

Zhao, L., Yao, Q., Han, D., Yan, F. and Nasser, M.,

2016, Characterizing the effect of elastic interactions on the effective elastic properties of porous, cracked rocks.

Geophysical Prospecting, 64, 157-169.

- Saberi, M.R., 2017, A closer look at rock physics models and their assisted interpretation in seismic exploration. Iranian Journal of Geophysics, 10 (5), 71–84.
- Vanorio, T., Scotellaro C. and Mavko, G., 2008, The effect of chemical and physical processes on the acoustic properties of carbonate rocks. The Leading Edge 27, 1040–1048.

Wood, A.W., 1955, A Textbook of Sound. New York:

McMillan Co.

Xu S.and Payne M.A. 2009. Modeling elastic properties in carbonate rocks. The Leading Edge 28, 66–74.





(JRAG) 2022, VOL 7, No 4

(DOI): 10.22044/JRAG.2022.11407.1324



Investigation of pore types distribution in lateral and vertical directions using rock physics modeling in wells of an Iranian carbonate reservoir

Maryam Sadat Mirkamali¹, Abdolrahim Javaherian^{2*}, Hossein Hassani³, Mohammad Reza Saberi⁴, Seyed Abolfazl Hosseini⁵ and Sajjad Zabihi Sarallah⁶

1- Ph.D. student, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

4- GeoSoftware, The Hague Area, 2591 XR Den Haag, The Netherlands

5- Dana Energy Company, Tehran, Iran

6- Geophysics Department, Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Tehran.

Received: 16 November 2021; Accepted: 14 February 2022

Corresponding author: agholami@ut.ac.ir

Extended abstract

Keywords	
----------	--

Carbonate reservoir Rock physics model Pore types P-and S-wave velocities **Summary** Different depositional environments and their subsequent diagenetic processes usually result in various rock textures with complex pore structure in carbonate rocks. This study considers Fahliyan carbonate formation in an Iranian oil field within the Abadan plain to quantify pore shapes using a rock physics model. In this modeling, the aspect ratios of different pore shapes and their volume fractions are calculated using differential effective medium theory, taking into account the pore shape effect on the elastic moduli estimation. Different pore shapes together with their aspect ratios and volume fractions are quantified using differential effective medium theory, and then, it

is used further to predict elastics logs by Xu-Payne modeling. The results indicate that two pore types of reference pores and stiff pores can be characterized as the main pores in Fahliyan carbonate formation. This conclusion is confirmed by formation micro imager (FMI) log and core information.

Introduction

Carbonate rocks are considered as one of the primary host rocks for the hydrocarbon reserves worldwide and account for a significant portion of the world hydrocarbon production. These reservoirs are generally complex and difficult to model because of their heterogeneity and pore shape variability (Xu and Payne, 2009). Variable pore shapes of given mineral composition and fluid type can cause scattering of the velocity versus porosity cross-plot (Anselmetti and Eberli, 1999), and carbonates exhibit a wide variation in their pore shapes. Rock physics models are successfully used for seismic reservoir characterization by providing accurate quantitative relationships between geophysical observations and reservoir properties. The inclusion-based models incorporate the pore shape into modeling steps using idealized inclusions with different aspect ratios to account for mechanical interaction between the pores (Mavko et al., 2009). Pore spaces are generally characterized by their aspect ratios and corresponding volume fractions. Pore aspect ratio is presented to introduce the stiffness or softness of carbonate pore systems in estimating their elastic properties. Kumar and Han (2005) considered the pore shape effect to estimate the average aspect ratio of the different pore shapes and their volume fractions in carbonate rocks. Following the work of Kumar and Han (2005), Xu and Payne (2009) extended Xu-White (1995) model by introducing four different pore systems. Xu-Payne model divides pore space into clay-related pores, reference pores, micro-cracks, and stiff pores (Xu and Payne, 2009).

Methodology and Approaches

This paper uses a pore-type inversion algorithm to determine the pore aspect ratios and volume fractions based on total porosity and measured velocity. Then, the obtained pore geometries are used in the Xu and Payne (2009) model to predict P-and S-wave velocities. The field data have been taken from an oil carbonate reservoir in the Fahliyan Formation. The procedure is to obtain the best match between the measured and the modeled P-wave velocity using differential effective medium modeling by optimizing the input parameters. This algorithm is applied to our carbonate

2022, VOL 7, No 4

data set from sample to sample, independent of each other, leading to depth varying pore aspect ratios and their volume fractions.

Results and Conclusions

For the given field, we have observed that reference pores are the dominant constituents of the pore spaces, while stiff pores and cracks are the next constituents of the pore system for the layer around both wells in the Fahliyan Formation. The geological reports and core information confirm the results. For the intervals with missing data and washed-out zones, applying the rock physics modeling resulted in a successful replacement of the poor-quality data.