

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

مریم السادات میرکمالی^۱، عبدالرحیم جواهریان^{۲*}، حسین حسینی^۳، محمدرضا صابری^۴، سید ابوالفضل حسینی^۵ و سجاد ذبیحی ثارالله^۶

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱- استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- مدیر توسعه و تحقیق نرم افزارهای فیزیک سنگ؛ شرکت Geosoft

۵- شرکت انرژی دانا

۶- مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت

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

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

چکیده

فرآیندهای پیچیده رسوبی و دیاژنتیکی در سنگ های کربناته منجر به تنوع زیادی در انواع منافذ می شود. بررسی توزیع انواع منافذ به عنوان 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 بخش های غربی، مرکزی و شرقی در یکی از میادین دشت آبادان بر اساس وارون سازی انواع منافذ با استفاده از مدل سازی فیزیک سنگی به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام مدل سازی، 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 وارون سازی انواع منافذ تخمین زده شده است. در ادامه، از نتایج حاصل از مدل 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 سنگ شناسی، رخساره ای و دیاژنتی موجب شده است تا توزیع انواع منافذ در راستای جانبی (در امتداد چاه های مورد مطالعه) و قائم (در امتداد هر چاه) بسیار متنوع باشد. به طور کلی دو نوع منافذ مرجع (بین-دانه ای و بین-کریستالی) و منافذ با سفتی بالا (قالبی و حفره ای) به عنوان منافذ اصلی سازند کربناته فهلیان شناسایی شده که توسط نگاره Formation micro imager و اطلاعات مغزه نیز تأیید شده اند. همچنین توزیع منافذ در فهلیان پایینی (بخش مخزنی سازند فهلیان) از چاه واقع در بخش غربی میدان در مقایسه با چاه های واقع در بخش های مرکزی و شرقی، متفاوت است. به طور کلی میزان منافذ با سفتی بالا در لایه ۳ در چاه واقع در بخش غربی میدان به سمت چاه واقع در بخش شرقی کاهش یافته است.

واژگان کلیدی

سنگ های مخزنی کربناته
مدل سازی 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 مقیاس منفذی معمولاً به فرایندهای دیاژنتیکی آن‌ها مانند انحلال، دولومیتی شدن و سیمانی شدن نسبت داده می‌شود که می‌تواند شکل و تخلخل منافذ اولیه آن‌ها را افزایش داده یا از بین ببرد (Zhao et al., 2013). محیط‌های رسوبی مختلف و فرایندهای 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 مقاطع 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 به‌طور موفقیت‌آمیزی برای توصیف مشخصات لرزه‌ای سنگ مخزن استفاده می‌شوند. در این راستا، مدل‌های مبتنی بر گنجایش مانند Kuster and Toksöz (1974) برای ترکیب اثرات ساختار منافذ متغیر در مدل‌سازی مناسب‌تر به نظر می‌رسند. این مدل‌ها سنگ را به‌عنوان یک ماتریکس کشسان با تعدادی منافذ بیضوی ایده‌آل (یا گنجایش‌ها) با نسبت ابعادی^۱ مختلف (نشان‌دهنده سفتی^۲ منافذ با استفاده از نظریه پراکندگی) تخمین می‌زنند. مهمترین محدودیت مدل‌های مبتنی بر گنجایش این است که تعامل بین منافذ مختلف را در نظر نمی‌گیرد و مقدار ناچیزی از گنجایش‌ها را فرض می‌کنند (Kuster and Toksöz, 1974). این تعاملات بین منافذ مختلف در مسائل با مؤلفه-های پراکندگی درجه دوم یا بالاتر مانند محیط مؤثر دیفرانسیلی^۳، تقریب

خودسازگار یا تی-ماتریکس در نظر گرفته می‌شوند (Zhao et al., 2009; Mavko et al., 2016). این مدل‌های 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 خودسازگار فرض می‌کنند 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. به همین 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 می‌توان 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 می‌شود. علاوه بر این، درصدهای نسبی نوع منافذ مختلف نیز باید در مدل‌سازی محیط مؤثر دیفرانسیلی در نظر 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 (۱۳۹۸ و ۲۰۲۰) بر اساس پتروفیزیک لرزه‌ای و با استفاده از مدل‌سازی فیزیک سنگی به کمی‌سازی انواع منافذ در یک مخزن نفتی کربناته پرداختند (Mirkamali et al., 2020).

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

^۱ Aspect ratio^۲ Stiffness^۳ Differential effective medium (DEM)

۲- فیزیک سنگ در سنگ‌های کربناته

۲-۱- انواع منافذ

منافذ موجود در سنگ‌های کربناته را می‌توان بر اساس اندازه، قابلیت دیدن و پیچیدگی دیاژنتیکی و هندسی طبقه‌بندی کرد (Lucia, 1999). علیرغم این‌که همه این طبقه‌بندی‌ها برای توصیف خواص پتروفیزیکی مفید هستند، ارتباط این توصیف‌ها با پاسخ ژئوفیزیکی بسیار چالش‌برانگیز است. این بدان دلیل است که طول موج لرزه‌ای اغلب بسیار بزرگ‌تر از اندازه ریز ساختارها است، بنابراین موج می‌تواند فقط میانگین خواص مؤثر ساختارهای منافذ پیچیده را ببیند و منافذ و ریز ترک‌های مجزا را نمی‌بیند. 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 می‌شوند: (۱) منافذ مرجع که غالب‌ترین نوع منافذ در سنگ‌های کربناته هستند و به‌عنوان روند پس‌زمینه عمل می‌کنند. این نوع منافذ عمدتاً از منافذ بین دانه‌ای و بین کریستالی تشکیل شده و به‌عنوان منافذ غالب در سنگ‌های کربناته در نظر گرفته می‌شوند. به‌طور کلی، این منافذ نسبت به تنش حساس نیستند و هیچ جهت‌گیری ترجیحی ندارند. (۲) منافذ کروی یا سفت با نسبت‌های ابعادی بالا، که نشان‌دهنده منافذ قالبی و حفره‌ای گرد شده هستند و معمولاً در نتیجه دانه‌های حل‌شده و حفره‌های فسیلی شکل می‌گیرند. 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 می‌توانند به‌دلیل 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 می‌تواند بسیار قوی-تر از سنگی باشد که دارای منافذ قالبی و حفره‌ای است (Xu and Payne, 2009; Lucia, 1999). جزئیات این طبقه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. این سه نوع منافذ می‌توانند در فضای منافذ همزمان وجود داشته باشند اما نگره چاه و پاسخ لرزه‌ای به‌طور کلی توسط نوع منافذ غالب کنترل می‌شوند. به این ترتیب سیستم-های منافذ کربناته را می‌توان به‌شکل 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 می‌شود (Anselmetti and Eberli, 1999; Lucia, 1999). همچنین همان‌طور که بیان شد در سنگ‌های کربناته شکل منافذ تقریباً به اندازه تخلخل در رفتار کشسانی و در نتیجه سرعت امواج حائز اهمیت هستند. با توجه به محدودیت مغزه‌گیری در چاه‌ها تعیین نوع منافذ و سایر ویژگی‌های آن معمولاً با مشکلاتی مواجه بوده است. بنابراین، پیش‌بینی 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 پرداخته‌اند. البته تعیین میزان کمی انواع منافذ با استفاده از این روش امکان‌پذیر 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 میداین 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 می‌شود، در نتیجه اهمیت مطالعه نوع منافذ به‌منظور 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 وارون‌سازی انواع منافذ در بخش مخزنی فهلیان شامل سه لایه مخزن اصلی در چاه‌های مختلف میدان به‌طور کمی برآورد شده است. در این الگوریتم نسبت‌های ابعادی منافذ و درصد نسبی متناظرشان با استفاده از داده‌های تخلخل کل (ϕ_T) و سرعت موج تراکمی (V_p) اندازه‌گیری 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. به‌طور کلی منافذ مرجع (بین‌دانه‌ای و بین کریستالی) و منافذ با سفتی بالا (قالبی و حفره‌ای) به‌عنوان منافذ اصلی سازند کربناته فهلیان شناسایی شده‌اند و ریز ترک‌ها 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 لیتولوژیکی، رخساره‌ای و دیاژنزی موجب شده تا توزیع منافذ مختلف در راستای جانبی (در امتداد چاه‌های مورد مطالعه) و قائم (در امتداد هر چاه) در لایه‌های مخزنی بسیار متنوع باشد.

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):

$$\phi_{clay} = V_{sh} \phi_T \quad (۴)$$

که V_{sh} حجم شیل است که توسط حجم کل ماتریکس دانه‌ای نرمال-سازی^۴ می‌شود.

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

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

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 می‌شوند 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 (به عنوان مثال، مدول حجمی قالب سنگ خشک) اضافه می‌شوند.

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 می‌شود تا مدول کشسانی مؤثر سیال منفذی را محاسبه کنند (Wood, 1955).

۴- برای به دست آوردن مدول کشسانی مؤثر نهایی برای سنگ اشباع، سیال مؤثر با استفاده از معادلات گسمن به سیستم منافذ خشک اضافه می‌شود (Xu and Payne, 2009). این روش فرض می‌کند که منافذ بزرگ (به عنوان مثال، بین دانه‌ای) به خوبی به هم متصل هستند و تراوایی مؤثر آن‌ها به اندازه کافی بالا است به طوری 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، به دلیل اندازه بسیار کوچک آنها، به صورت جدا از یکدیگر عمل می‌کنند و منجر به پاسخ لرزه‌ای فرکانس بالا می‌شود (Xu and Payne, 2009).

نسبت ابعادی منافذ یکی از اصلی‌ترین متغیرهای هندسی با استفاده از

تئوری گنجایش، روش محیط مؤثر تفاضلی است که دارای قابلیت‌های متعددی در تخمین روندهای تقریبی اثرات تخلخل، شکل منافذ و کانی‌شناسی در خواص کشسانی سنگ است. در روش محیط مؤثر تفاضلی برای شبیه‌سازی تخلخل‌ها در یک سیستم دو فازی (فاز ۱: ماتریکس و فاز ۲: منافذ)، یک قسمت از منافذ به صورت تدریجی به ماتریکس افزوده می‌شوند (Berryman, 1992). سیستم مزدوج معادلات دیفرانسیل معمولی به صورت زیر ارائه می‌شود (Mavko et al., 2009):

$$(1-\phi) \frac{d}{d\phi} [K^*(\phi)] = (K_2 - K^*) P^{(2)*}(\phi) \quad (۱)$$

$$(1-\phi) \frac{d}{d\phi} [\mu^*(\phi)] = (\mu_2 - \mu^*) Q^{(2)*}(\phi) \quad (۲)$$

با شرایط اولیه $K^*(0) = K_1$ و $\mu^*(0) = \mu_1$ که ϕ تخلخل و $d\phi$ تغییر تدریجی در تخلخل هستند، K^* مدول حجمی مؤثر و μ^* مدول برشی مؤثر، K_1 و μ_1 مدول‌های حجمی و برشی ماتریکس، K_2 و μ_2 مدول‌های حجمی و برشی فاز گنجایش هستند P^* و Q^* دو فاکتور هندسی وابسته به نسبت‌های ابعادی گنجایش‌های بیضوی هستند (Mavko et al., 2009; Berryman, 1992).

روش محیط مؤثر تفاضلی فرض می‌کند که منافذ با توجه به جریان سیال مجزا هستند و در پاسخ، یک پاسخ فرکانس بالا را برای یک سنگ اشباع شبیه‌سازی می‌کند. 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 (Mavko et al., 2009). در اینجا، فضای منافذ به عنوان منافذ بیضوی ایده‌آل (یا گنجایش‌ها) در نظر گرفته می‌شوند که با نسبت ابعادی آنها مشخص شده‌اند. همان‌طور که در قبل بیان شد کومار و هان (۲۰۰۵) یک روش تکراری را با استفاده از وارون‌سازی انواع منافذ برای به دست آوردن نسبت‌های ابعادی منافذ مختلف و درصد‌های نسبی آن‌ها در سنگ‌های کربناته ارائه کرده‌اند. علاوه بر این، می‌توان از نتایج آن‌ها در مدل‌سازی شو-پین برای پیش‌بینی سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی استفاده کرد. در این مدل، حجم منافذ کلی (ϕ_T) به چهار نوع منفذ تقسیم می‌شود: (۱) منافذ مرتبط با رس، (۲) منافذ بین دانه‌ای، (۳) منافذ با سفتی بالا و (۴) ریز ترک‌ها (Xu and Payne, 2009):

$$\phi_T = \phi_{clay} + \phi_{reference} + \phi_{stiff} + \phi_{crack} \quad (۳)$$

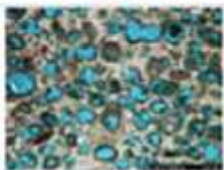
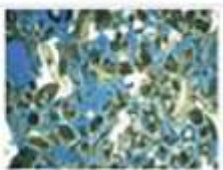
که ϕ_{clay} فضای منافذ مربوط به کانی‌های رسی، $\phi_{reference}$ منافذ مرجع، ϕ_{stiff} منافذ با سفتی بالا، ϕ_{crack} نشان‌دهنده ریز ترک‌ها است. علیرغم این واقعیت که سنگ‌های کربناته به طور کلی تمیز هستند.

^۴ Normalized

کردند (Kumar and Han 2005). ماوکو 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 به‌عنوان یک پارامتر مناسب در نظر گرفته می‌شود و برای بهینه‌سازی مدل بر اساس سرعت‌های اندازه‌گیری شده، صرف نظر از زمین شناسی واقعی، به‌روز می‌شود (Sabeti, 2017).

مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که سنگ‌های کربناته، که فقط با تخلخل بین دانه‌ای و بین کریستالی (تخلخل اولیه) مشخص می‌شوند، سرعت موج تراکمی آن‌ها از معادله میانگین-زمانی وایلی هیچ یا انحراف کمی را نشان می‌دهند (Anselmetti and Eberli, 1999).

مدل‌های مبتنی بر گنجایش است که بر سرعت موج تراکمی تأثیر می‌گذارد. ساده‌ترین روش برای تعیین نسبت ابعادی منافذ، اندازه‌گیری 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 (Pan et al., 2015) مقاطع نازک و نمونه‌های مغزه کار کرده‌اند. این روش‌های مستقیم عمده‌تاً برای تخمین کیفی مناسب هستند. با این حال، روش‌های غیرمستقیم برای تعیین نسبت ابعادی منافذ کاربردهای عملی‌تری دارند. مبنای این روش‌ها برای به‌دست آوردن نسبت‌های ابعادی منافذ بر اساس بهترین انطباق بین سرعت‌های اندازه‌گیری 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

Pore types			
Petrophysical	Vuggy(Moldic)	Interparticle(Inter-crystal)	Microcracks
Geophysical	Stiff	Reference	Cracks
Aspect Ratio	0.7-0.8	0.12-0.15	0.01-0.02
Image			
Pore systems			

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).

۳- منطقه مورد مطالعه

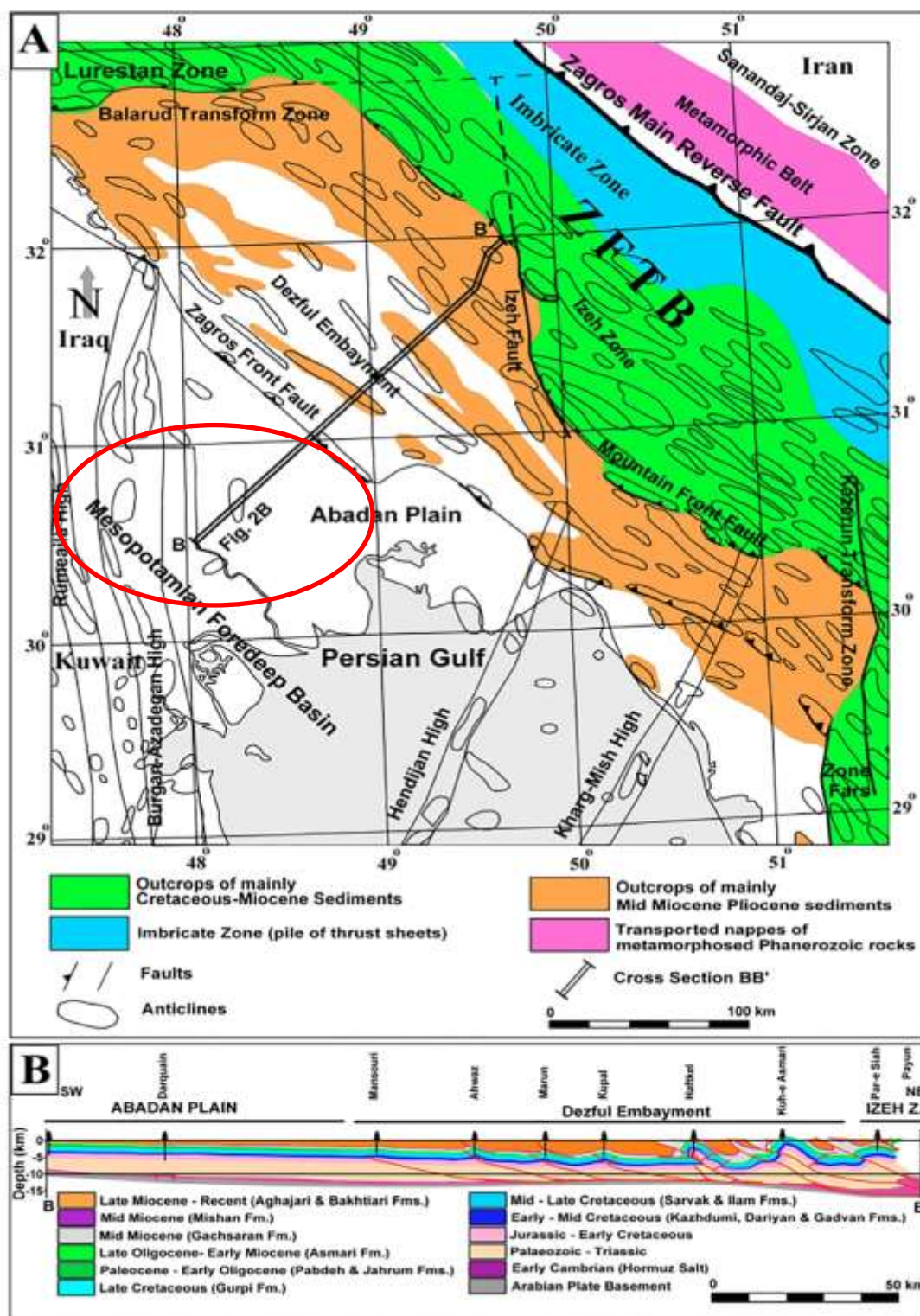
سازند فهلیان شامل چندین لایه نازک کربناته است و توسط لایه‌های شیل که عمدتاً در بخش بالایی مخزن (فهلیان بالایی) وجود دارند، پوشانده شده است. مخزن اصلی (فهلیان پایینی) از هفت لایه اصلی به-عنوان زون‌های متخلخل (رسانا) و چهار بین لایه‌ای به‌عنوان زون‌های متراکم (مقاوم) تشکیل شده است. سازند فهلیان پایینی 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 ۴۰۰ تا ۶۰۰ 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

منافذ قالبی شکل مانند فضاهای قالبی و حفره‌ای می‌توانند باعث انحراف مثبت شوند (سرعت‌های بالاتر از سرعت‌های محاسبه‌شده توسط معادله میانگین-زمانی وایلی). ریز ترک‌ها می‌توانند منجر به انحراف منفی شوند (سرعت‌های کمتری نسبت به سرعت‌های محاسبه‌شده توسط معادله میانگین-زمانی وایلی). مدل فیزیک سنگی محیط مؤثر تفاضلی مدول کشسانی را برای تخلخل بین دانه‌ای نزدیک به آنچه که توسط معادله میانگین-زمانی وایلی (برای نسبت ابعادی تقریباً برابر با ۰/۱) پیش‌بینی شده، تخمین می‌زند. برای منافذ با سفتی بالا (نسبت ابعادی تقریباً برابر با ۱) محیط مؤثر تفاضلی تقریباً مرز بالایی هاشین-شتریکمن و برای ریز ترک‌ها (نسبت ابعادی تقریباً برابر با ۰/۰۱) محیط مؤثر تفاضلی تقریباً مرز پایین هاشین-شتریکمن را تخمین می‌زند (Kumar and Han, 2005).

چاه (به نام های A تا C) با نگاره های مرسوم (نگاره های سرعت موج تراکمی و چگالی) و تفسیر پتروفیزیکی آن ها، چکشات ها 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 فهلپان پایینی را نشان می دهد که موقعیت چاه های مورد مطالعه روی آن مشخص شده است. شکل ۴ اندازه گیری نگاره های لرزه ای همراه با تفسیرهای پتروفیزیکی در چاه A را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود سازند فهلپان بالایی توسط لایه های شیل پوشانده شده است. درحالی که فهلپان پایینی (لایه های ۱ تا ۳) حاوی زون های مخزنی با لایه بندی عمدتاً کربناته است.

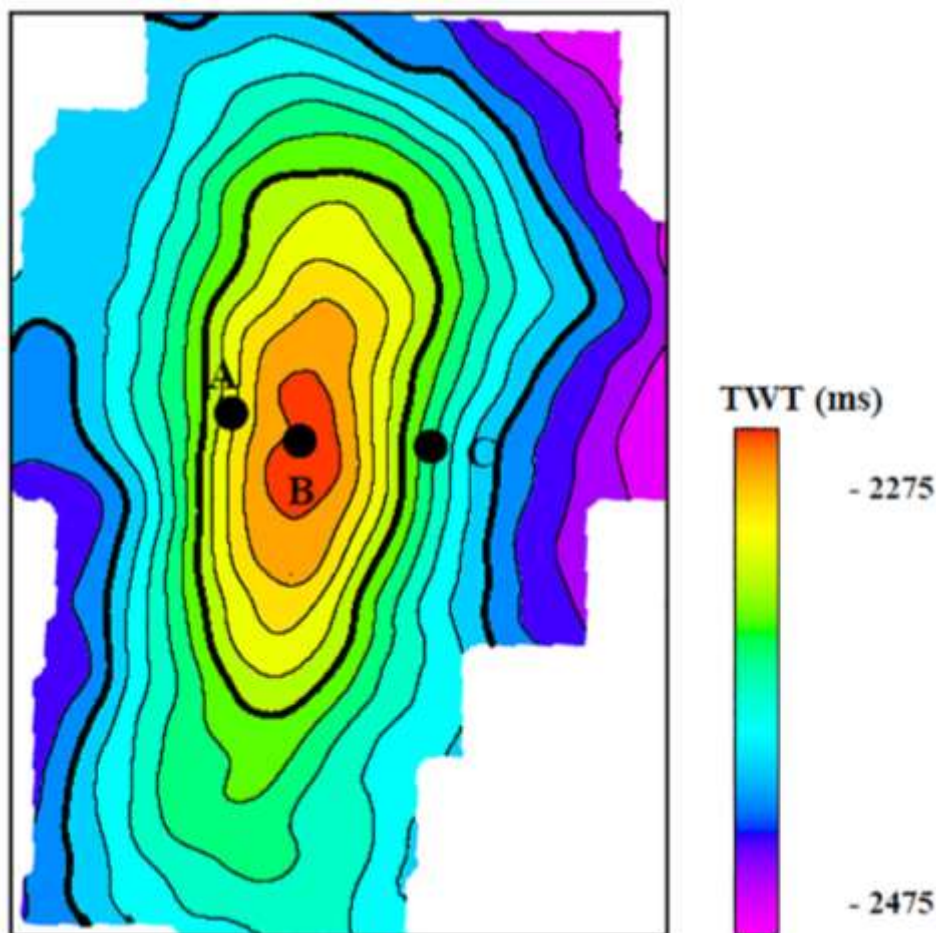
شکل ۵ مغزه های مختلفی از سازند فهلپان در چاه A را نشان می دهد. مشاهده شده است که قسمت بیشتر تخلخل کل در مقیاس مغزه به انواع منافذ ریز تخلخل و بین کریستالی و درصد کمتری به منافذ

قالبی و حفره ای مرتبط می شود. مقادیر کمی ریز ترک هم وجود دارد که احتمالاً می توانند ارتباطات داخلی را بین منافذ حفره ای ایجاد کنند. علاوه بر داده های مغزه، تصاویر نگاره FMI مقادیر مختلف ناهمگنی را به شکل زون های متخلخل و مقاوم در کل بازه نشان می دهند. ناهمگنی های رسانا می توانند به زون های متخلخل (زون هایی با تخلخل های ریز تخلخل و بین کریستالی و تخلخل های قالبی و حفره ای) با اندازه ها، اشکال و رسانایی های مختلف مرتبط باشند. ناهمگنی های مقاوم می توانند مربوط به زون های سیمانی متراکم دارای تخلخل کم یا صفر باشند. شکل ۶ نگاره FMI از سازند فهلپان در چاه A با فواصل مختلف تخلخل های قالبی و حفره ای و ریز ترک ها را نشان می دهد. تمام این تصاویر نشان می دهند که ریز ترک ها به ندرت در فواصل مخزنی گسترش یافته اند. این مشاهدات توسط ترسیم متقاطع نگاره سرعت موج تراکمی در مقابل نگاره تخلخل که در شکل ۷ نشان داده شده، تأیید می شود. در شکل ۷

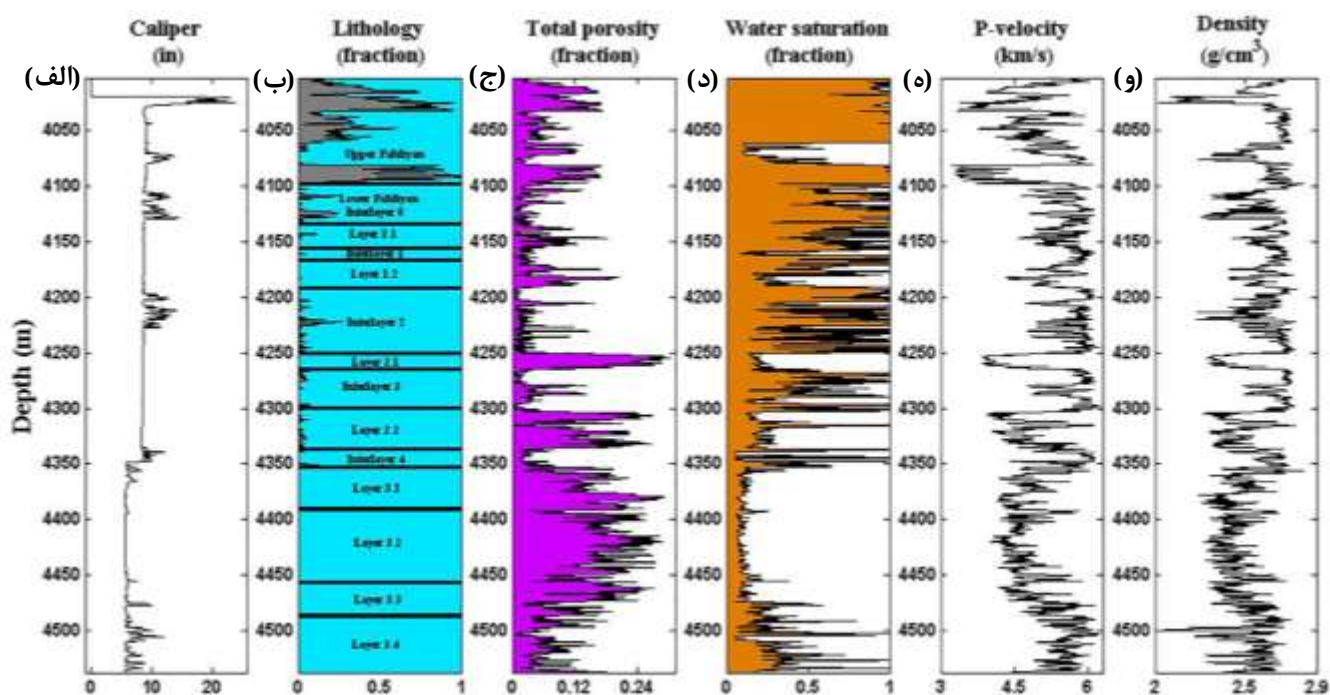


شکل ۲: محدوده منطقه مورد مطالعه در حوضه دشت آبادان (واقع در جنوب غربی ایران) (بیضی قرمز) همراه با مقطع عرضی ساختاری زمین شناسی (عبدالهی فرد و همکاران، ۲۰۰۶).

میرکمالی و همکاران، بررسی توزیع انواع منافذ در راستای قائم و جانبی با استفاده از مدل سازی فیزیک سنگی در یکی از مخازن کربناته ایران، صفحات ۶۳-۸۱.

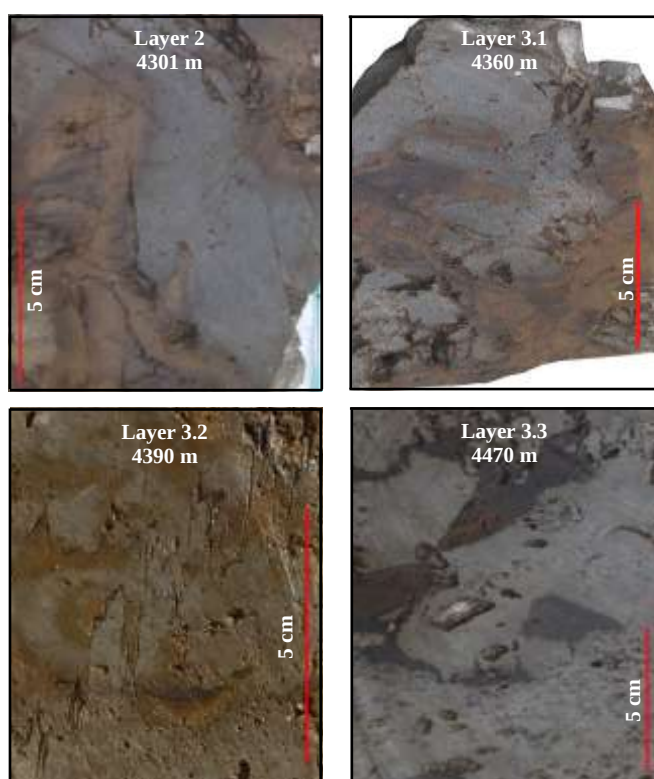


شکل ۳: نمایش دوبعدی تفسیر زمانی رأس سازند فهلان پایینی با موقعیت چاه های A تا C.

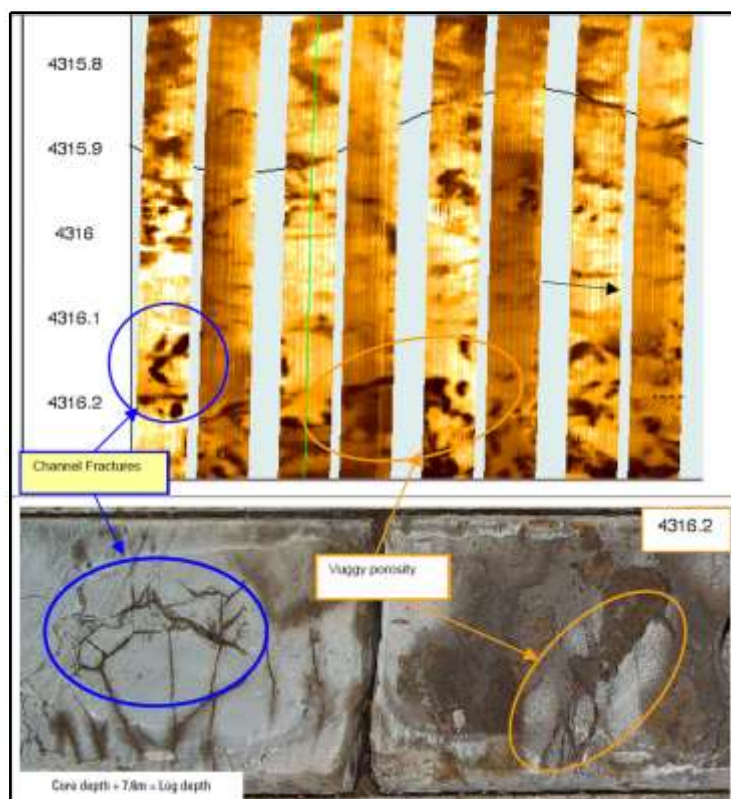


شکل ۴: نگاره های چاه A. (الف) کالیپر، (ب) سنگ شناسی (حجم کلسیت (آبی) و حجم شیل (خاکستری))، (ج) تخلخل کل، (د) اشباع آب، (ه) سرعت

موج تراکمی و (و) چگالی.

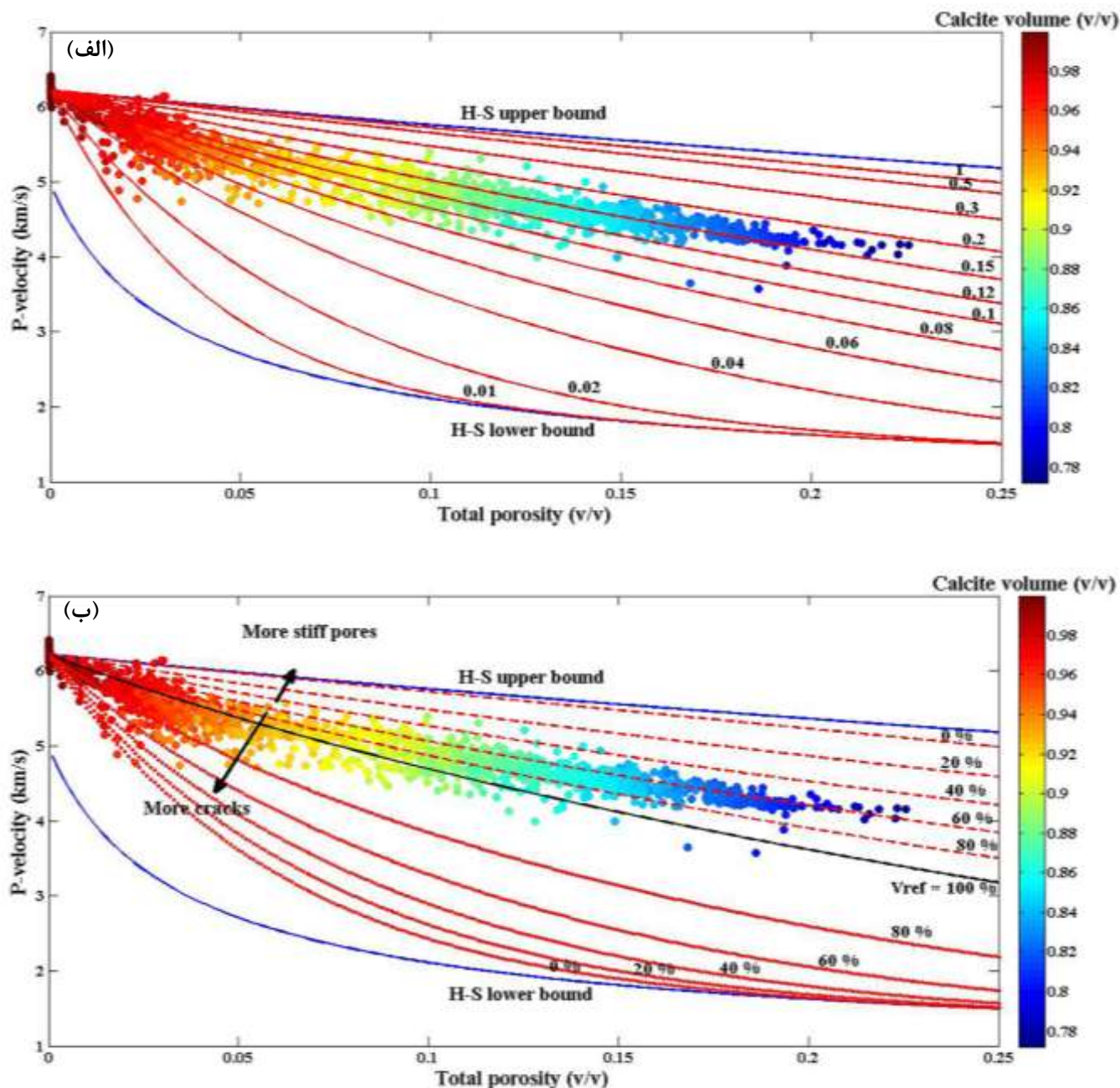


شکل ۵: مغزه‌های مختلف از مخزن کربناته نفتی در سازند فهلیان در چاه A با عمق آن‌ها در متر. برخی فواصل با یک توالی همگنی از انواع منفذی ریز تخلخل و بین کریستالی و منافذ قالبی و حفره‌ای مشخص می‌شوند، درحالی‌که توزیع بقیه منافذ همگن نیست و ریز ترک‌ها با توزیع پراکنده مشاهده می‌شوند.



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 فلهیان 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 فلهیان در چاه A. انواع منافذ غالب در مخزن کربناته فلهیان مربوط به منافذ مرجع و با درصدی کمتری از منافذ سفت است.

۰/۹۵، ۰/۱۱ و ۰/۱۵ مطابقت دارند. شکل ۷ (ب) نشان می‌دهد که چگونه درصدهای نسبی این نسبت‌های ابعادی مختلف می‌توانند سرعت را برای یک تخلخل معین تغییر دهند. رسوبات با تخلخل قالبی بیشتر در بالای منحنی مرجع قرار دارند در حالی که با افزودن ریز ترک‌ها به سیستم منافذ، سرعت به زیر منحنی مرجع کاهش می‌یابد. به عنوان مثال،

(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 به عنوان یک الگو در نظر گرفته می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که منافذ قالبی با سفتی بالا، منافذ مرجع و ریز ترک‌ها به ترتیب با نسبت‌های ابعادی ثابت برابر با

(۹) تکرار مراحل ۷ و ۸ تا $(\alpha)^2 \leq \varepsilon$ برای

به دست آوردن درصدهای نسبی منافذ مرجع و با سفتی بالا به صورت

$$\phi_{reference} = \phi_1 \text{ و } \phi_{stiff} = \phi_2$$

(۱۰) مقایسه سرعت اندازه‌گیری شده V_P با $V_{P_{reference}}$. اگر

$$V_P < V_{P_{reference}} \text{ سپس اعمال } \alpha_1 = \alpha_{reference}, \alpha_2 = \alpha_{critical}$$

$$\phi_1 = \phi_T \text{ و } \phi_2 = 0$$

مجدد محاسبه (۱۱)

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

(۱۲) اگر $(V_P - V_{P_{Modelled}})^2 > \varepsilon$ ، سپس اعمال نموهای

$$\pm \delta\alpha \text{ به } \phi_1 \text{ و } \phi_2 \text{ به طوری که } \phi_1 = \phi_1 - \delta\alpha \text{ و } \phi_2 = \phi_2 + \delta\alpha$$

(۱۳) تکرار مراحل ۱ و ۱۲ تا $(V_P - V_{P_{Modelled}})^2 \leq \varepsilon$

برای به دست آوردن درصدهای نسبی منافذ مرجع و ریز ترک‌ها به-

$$\text{صورت } \phi_{reference} = \phi_1 \text{ و } \phi_{crack} = \phi_2$$

لازم به ذکر است که با استفاده از طرح‌واره فوق فقط دو نوع منافذ

به صورت 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، به طور مستقل از یکدیگر

اعمال شده و منجر به نگاره نسبت ابعادی متغیر با عمق شده است. شکل

۸ نگاره نسبت ابعادی مدل با استفاده از سرعت موج تراکمی را برای انواع

مختلف منافذ در چاه A نشان می‌دهد. به منظور بررسی نحوه توزیع انواع

منافذ در راستای جانبی و قائم در چاه‌های مورد مطالعه در زون‌های

مختلف 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)

تخمینی با استفاده از میانگین نسبت ابعادی در زون‌های مختلف لایه

های ۲ و ۳ برای چاه‌های A، B و C در شکل ۹ نشان داده شده است.

بدیهی است که در درصدهای نسبی منافذ از نمونه‌ای به نمونه دیگر

تغییراتی وجود دارد.

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. این 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

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

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 وارون‌سازی 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 اندازه‌گیری تخلخل کل (ϕ_T) و سرعت موج تراکمی (V_P) مطابق

مراحل زیر تعیین شده است:

(۱) محاسبه سرعت موج تراکمی ($V_{P_{Calculated}}$) برای منافذ مرجع

با استفاده از معادله میانگین-زمان وایلی با ϕ_T ؛

(۲) محاسبه سرعت موج تراکمی ($V_{P_{Calculated}}$) مربوط به منافذ با

سفتی بالا و ریز ترک‌ها به ترتیب با استفاده از مرزهای بالایی و پایینی

هاشین-شتریکمن با ϕ_T ؛

(۳) فرض نسبت‌های ابعادی اولیه مربوط به منافذ با سفتی بالا،

منافذ مرجع و ریز ترک‌ها به ترتیب $\alpha_{stiff} = 1$ ، $\alpha_{reference} = 0.1$ و

$\alpha_{crack} = 0.01$ و محاسبه سرعت موج تراکمی ($V_{P_{Modelled}}$) با

استفاده از DEM با ϕ_T ؛

(۴) مقایسه سرعت‌های محاسبه شده و مدل شده برای انواع منافذ.

اگر $(V_P - V_{P_{Modelled}})^2 > \varepsilon$ ، سپس اعمال نموهای

$\pm \delta\alpha$ روی α به طوری که $\alpha = \alpha \pm \delta\alpha$ تا

$(V_P - V_{P_{Modelled}})^2 \leq \varepsilon$. این نسبت ابعادی اکنون

می‌تواند برای انواع منافذ متناظر اختصاص یابد. در اینجا، ε خطای

محاسبه است.

(۵) فرض تشکیل فضای منافذ فقط از منافذ مرجع و سپس

استفاده از مدل DEM برای محاسبه $V_{P_{reference}}$ ؛

(۶) مقایسه سرعت اندازه‌گیری شده V_P با $V_{P_{reference}}$. اگر

$V_P > V_{P_{reference}}$ سپس اعمال $\alpha_1 = \alpha_{reference}$ ، $\alpha_2 = \alpha_{stiff}$ ،

$\phi_1 = \phi_T$ و $\phi_2 = 0$ ؛ در غیر این صورت، به مرحله ۱۰ بروید.

(۷) اگر $(V_P - V_{P_{Modelled}})^2 > \varepsilon$ ، سپس اعمال نموهای

$\pm \delta\alpha$ به ϕ_1 و ϕ_2 به طوری که $\phi_1 = \phi_1 - \delta\alpha$ و $\phi_2 = \phi_2 + \delta\alpha$

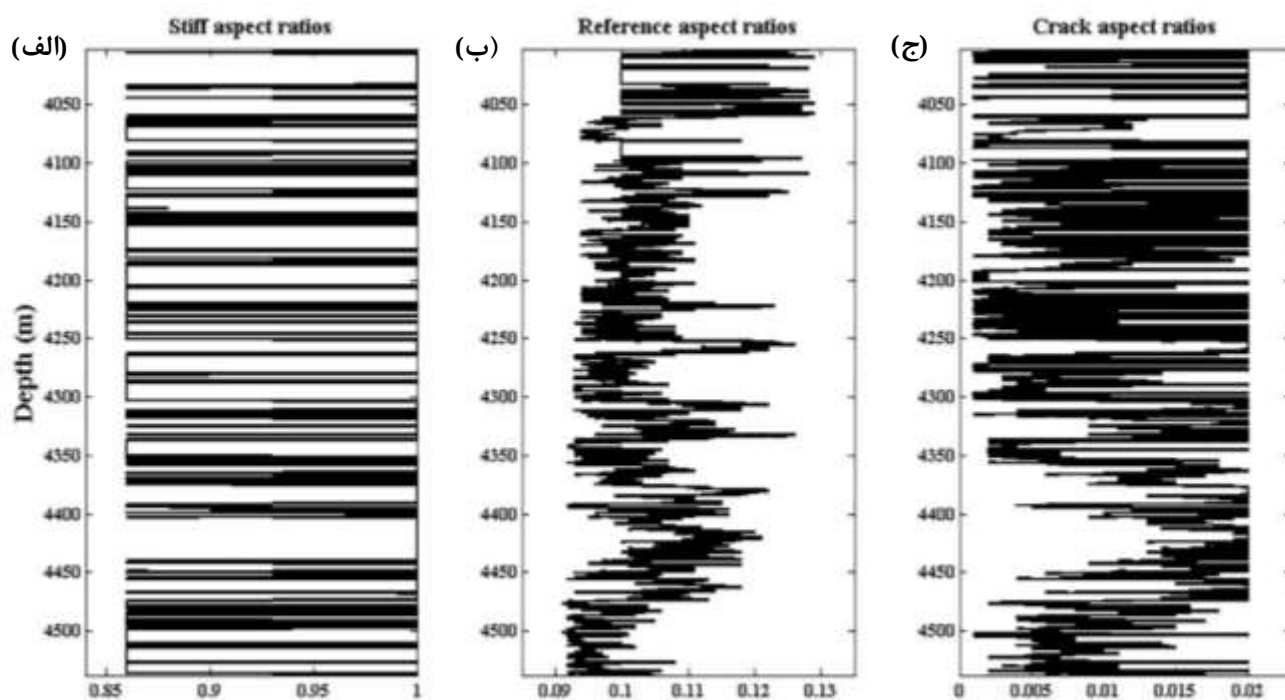
(۸)

محاسبه

مجدد

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

سنگ جامد وارد شدند، سپس، آب باقیمانده



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 می‌شود که نسبت‌های ابعادی از نمونه‌ای به نمونه دیگر تغییر می‌کنند. محدوده تغییرات نسبت ابعادی برای منافذ سفت، منافذ مرجع و ریز ترک‌ها به ترتیب ۰/۸۵-۱، ۰/۹۱-۰/۱۲۹ و ۰/۰۰۴-۰/۰۲ است.

گنجایش در مدل‌سازی فیزیک سنگی کربناته، نسبت ابعادی و درصد نسبی متناظرشان است. نسبت‌های ابعادی منافذ و درصد نسبی متناظرشان با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری تخلخل کل و سرعت موج تراکمی تخمین زده شده است. در نهایت صحت مشخصه هندسی منافذ به‌دست آمده با به‌کارگیری 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 بهینه‌سازی، مقدار نهایی مشخصه هندسی منافذ برای هر عمق به‌دست آمده است. از آنجا که تنوع در سنگ‌شناسی و دیاژنز باعث تنوع در نوع منافذ می‌شود، در نتیجه برای بررسی نحوه توزیع انواع منافذ در راستای جانبی و قائم در چاه‌های مورد مطالعه در زون‌های مختلف مقدار میانگین نسبت ابعادی استخراج گردید. علاوه بر این درصدهای نسبی فقط برای دو نوع منافذ (منافذ مرجع همراه با منافذ با سفتی بالا یا منافذ مرجع همراه با ریز ترک‌ها) به‌صورت همزمان شناسایی شده است.

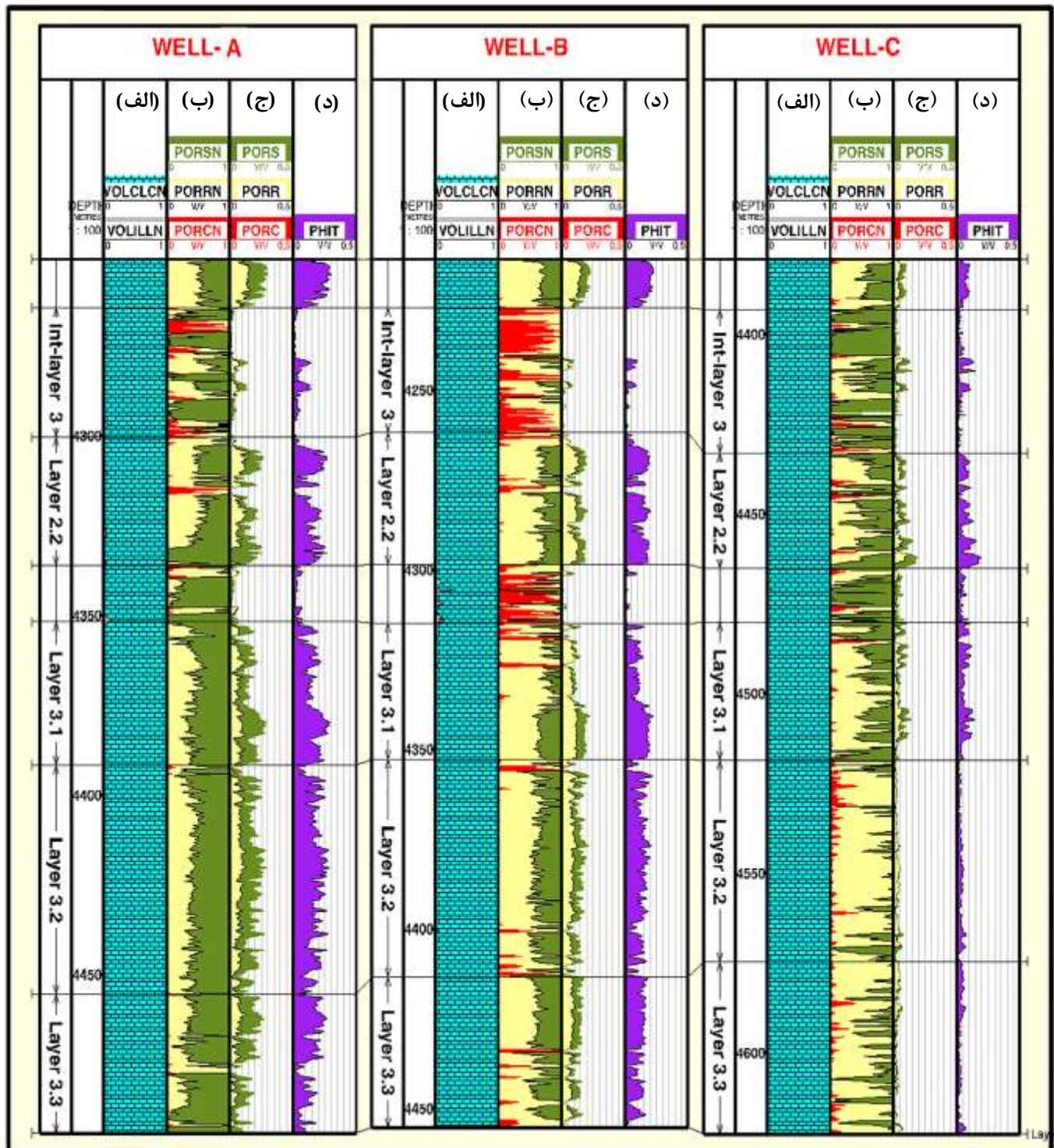
لایه‌های اصلی و میان لایه‌های سازند فهلیان دارای تجمع‌های مختلفی از منافذ هستند که توسط چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به اهمیت بالای لایه‌های ۲ و ۳ مخزنی و برای بررسی جزئیات بیشتر این لایه‌ها به طور خاص مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود فهلیان پایینی (بخش مخزنی سازند فهلیان)

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 میانگین‌گیری از چگالی‌های ماتریکس سنگ جامد و سیال منفذی بر اساس نگاره تخلخل مدل شده است (Mavko et al., 2009). برای درک بهتر تفاوت از نظر کمی، اختلاف نسبی مقادیر لرزه‌ای اندازه‌گیری شده با مدل فیزیک سنگی از نمونه‌ای به نمونه دیگر محاسبه شده و به‌صورت نگاره خطا ترسیم شده است. شکل ۱۰ نتایج نگاره‌های سرعت موج تراکمی با استفاده از مدل شو-پین همراه با نگاره‌های اندازه‌گیری شده و نگاره‌های خطا برای چاه‌های A، B و C را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انطباق خوب بین نگاره‌های سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری و مدل در هر سه چاه به‌دست آمده است.

۵- بحث و نتایج

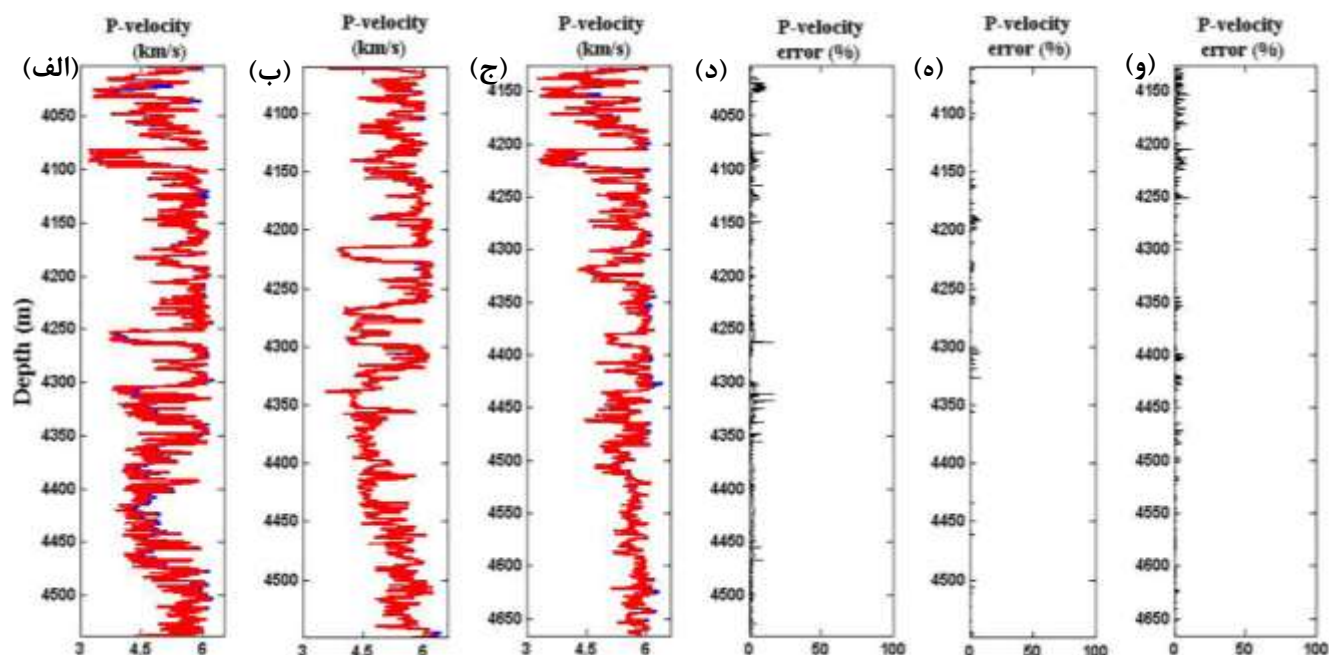
در این مطالعه وارون‌سازی انواع منافذ براساس الگوریتم کومار و هان (۲۰۰۵) مبنای بررسی مشخصه هندسی منافذ است. این الگوریتم قادر است به‌طور پیوسته انواع منافذ را در امتداد چاه و سازند مورد مطالعه شناسایی کند. پارامتر کلیدی در استفاده از مدل‌های مبتنی بر

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 با مقدار قابل توجهی از منافذ با سفتی بالا به علاوه



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 فلهیلان پایینی (بخش مخزنی سازند فلهیلان). 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 فلهیلان پایینی هستند. در مقابل، لایه اطراف چاه C واقع در بخش شرقی همانند چاه A با مقدار قابل توجهی از منافذ مرجع مشخص شده، در حالی که تراکم توزیع منافذ

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



شکل ۱۰: (الف)، (ب) و (ج) نگاره های سرعت موج تراکمی مدل شده با استفاده از مدل سازی فیزیک سنگی شو- پین (قرمز) همراه با نگاره های اندازه گیری آن ها (آبی) و (د)، (ه) و (و) نگاره های خطا در لایه های ۲ و ۳ (شکل ۹) در چاه های A، B و C مشاهده می شود که انطباق خوبی بین نگاره های لرزه ای اندازه گیری شده و مدل برای سرعت موج تراکمی به دست آمده است و خطاها به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

توزیع انواع منافذ را تأیید می کنند (شکل ۶). فلهیان بالایی به دلیل وجود رگه های شیل عمدتاً دارای تخلخل مؤثر کم است. این بخش با انواع مختلف منافذ با سفتی بالا، منافذ مرجع و ریز ترک ها مشخص می شود. سازند فلهیان پایینی عمدتاً از لایه های متخلخل به عنوان زون های نفتی تشکیل شده است. این بخش توسط لایه های متراکم از هم جدا شده است. فواصل متخلخل عمدتاً با مقدار قابل توجهی از منافذ مرجع به علاوه درصدی از منافذ با سفتی بالا مشخص شده اند. برخی فواصل با یک توالی همگن از منافذ مرجع و با سفتی بالا مشخص شده اند، در حالی که توزیع سایر منافذ همگن نیست به صورتی که ریز ترک ها با توزیع پراکنده قابل مشاهده هستند. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده منافذ مرجع اجزای غالب فضای منافذ هستند، در حالیکه منافذ با سفتی بالا و ریز ترک ها اجزای بعدی سیستم منافذ برای لایه اطراف چاه A هستند. به عنوان مثال، نگاره FMI نشان می دهد که منافذ با سفتی بالا را می توان در عمق حدود ۴۳۱۵ تا ۴۳۱۷ متر پیدا کرد که با نتایج به دست 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 نتیجه مشخصه نوع منافذ به دست آمده مطابقت دارد. مطالعات گسترده روی نمونه های مغزه در چاه های مختلف نشان داده است که لایه ۳ سازند فلهیان به شدت تحت تأثیر انحلال و یا به عبارتی دیگر دیاژنز

توزیع پیوسته ای از منافذ مرجع مشخص شده، در حالی که ریز ترک ها اجزای بعدی سیستم منافذ با توزیعی بسیار پراکنده برای لایه اطراف چاه A در فلهیان پایینی هستند. در این چاه لایه ۲ از درصد کمتری از منافذ با سفتی بالا برخوردار است در حالی 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، در حالی که تراکم توزیع منافذ با سفتی بالا در این چاه کاهش یافته است. همچنین میزان ریز ترک ها 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 در حالی که در لایه ۳ میزان این منافذ به شدت کاهش یافته است. در لایه ۳ منافذ مرجع بخش عمده ای از منافذ را تشکیل می دهند. در چاه B واقع در بخش مرکزی مقدار و تراکم منافذ با سفتی بالا به طور نسبی در مقایسه با چاه A کاهش یافته و توزیع ریز ترک ها به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. در این چاه لایه ۲ از درصد بسیار کمتری از منافذ با سفتی بالا در مقایسه با چاه A و C برخوردار است. در لایه ۳ پیوستگی منافذ با سفتی بالا تقریباً مشابه با چاه A است در حالی که میزان این منافذ مقداری کاهش یافته است. به طور 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.

داده های مغزه و نگاره های FMI در چاه A نتایج به دست آمده از

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 در نظر گرفت این است که در واقعیت، شکل فضای منافذ (یا گنجایش‌ها)، معمولاً به شکل بیضوی ایده‌آل نبوده و فرضیات به‌کار رفته در تئوری این مدل‌ها برای توجیه رفتار و تأثیر منافذ بر روی یکدیگر، راه‌حلهایی ابتکاری بوده که با واقعیت و طبیعت سنگ‌ها ممکن است همخوانی نداشته باشد. آنچه در این مدل‌ها مهم است رسیدن به مدل‌های کشسانی سنگ است به نحوی که این مدل‌ها با مدل‌های واقعی سنگ همخوانی داشته باشد که با مدل‌های مذکور می‌توان به آن‌ها رسید. در واقع پارامتری که روابط ریاضی این مدل‌ها را به روابطی منعطف تبدیل می‌کند 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 نمی‌گیرند. 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 نسبت‌های 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 کردن اهمیت استفاده از چندین نوع منافذ متغیر 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 میزان حساسیت 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 الگوریتم وارون‌سازی انواع منافذ در دو حالت بدون خطا و اضافه کردن خطای تصادفی به مشخصه هندسه منفذی مدل شده است (شکل ۱۱). 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 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 می‌شود. همچنین میزان مقادیر کانی‌شناسی و درصد نسبی منافذ نیز در میزان خطا و انحراف از مقدار مصنوعی تأثیرگذار است.

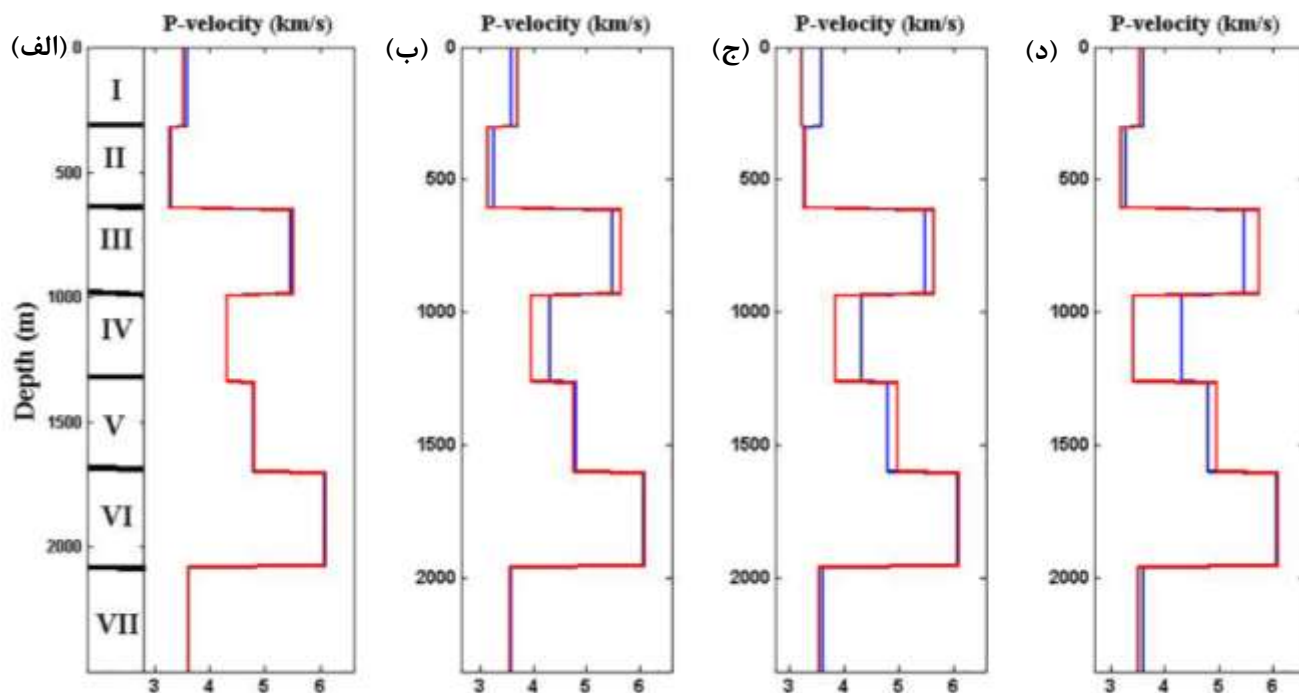
ثانویه حاصل از تأثیر آب‌های متئوریک قرار گرفته و کیفیت مخزنی در این لایه غالباً تحت تأثیر کارستی شدن است. این روند باعث شده تا فضاهای خالی به یکدیگر متصل شده و به افزایش تراوایی لایه ۳ کمک به‌سزایی کند (گزارش چاپ نشده مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت). مطالعات مغزه‌های در دسترس نشان داده است که روند تغییرات 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 می‌یابد که این خود به صورت بارز نشان‌دهنده این است که کیفیت مخزنی متأثر از تأثیر دیاژنز ثانویه در لایه ۳ سازند فلهلیان است. این امر باعث انحلال شدید حفرات مجزا مانند تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای شده و فضایی تراوا حاصل کرده که باعث حرکت سیال هیدروکربنی می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از توزیع انواع منافذ بخش غربی و مرکزی میدان به واسطه حضور منافذ با سفتی بالای بیشتر و انحلال مرتبط با آن‌ها دارای تخلخل و تراوایی بهتری در مقایسه با بخش شرقی میدان مورد مطالعه هستند. جدول ۱ میانگین نگاره‌های تخلخل کل و مؤثر چاه‌های A، B و C در زون‌های مختلف از لایه‌های ۲ و ۳ را در نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود 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 پیش‌بینی نگاره‌های 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 اندازه‌گیری‌شده و مدل به نوعی نتایج وارون‌سازی انواع منافذ نیز صحت‌سنجی شده است. همچنین، نگاره‌های چاه در معرض منابع مختلف خطا هستند، که می‌تواند از نگاره‌های خام در هنگام اندازه‌گیری‌ها و یا مراحل پردازش و تفسیر آن‌ها حاصل شود. در مجموعه داده‌های مورد مطالعه، فواصلی با نگاره‌های بی‌کیفیت (در تمام چاه‌ها) ناشی از داده‌های ناموجود (از دست رفته یا به‌طور نادرستی درون‌یابی شده) و مناطق شسته‌شده (کالیپر مقادیر بالایی است) وجود دارد. راه‌حلی که برای این بخش از نگاره‌های چاهی بی‌کیفیت ارائه شده، این است که از نتایج مدل‌سازی 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

همان‌طور که بیان شد پارامتر کلیدی در مدل‌های فیزیک سنگی مبتنی



شکل ۱۱: مدل سرعت تراکمی مصنوعی با استفاده از مدل‌سازی شو-پین (آبی) و مدل‌سازی فیزیک سنگی این مدل (قرمز) با استفاده از 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.

جدول ۱: میانگین تخلخل کل و مفید در لایه‌های ۲ و ۳.

Zone	PHIT-Average			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

مورد استفاده قرارگرفت. فلهیان پایینی (بخش مخزنی سازند فلهیان) 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 به‌علاوه توزیع پیوسته‌ای از منافذ مرجع مشخص شده، درحالی‌که ریز ترک‌ها اجزای بعدی سیستم منافذ با توزیعی بسیار پراکنده برای لایه اطراف چاه A در فلهیان پایینی هستند. در مقابل، لایه اطراف چاه C واقع در بخش شرقی با مقدار قابل توجهی از منافذ مرجع مشخص شده، درحالی‌که 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 چاه B واقع در بخش مرکزی مقدار و تراکم منافذ با سفتی بالا به‌طور نسبی در

در این مطالعه، سازند کربناته فلهیان در یکی از میادین نفتی ایران در دشت آبادان برای توزیع انواع منافذ با استفاده از مدل‌سازی 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 منافذ، دو نوع منافذ مرجع و منافذ با سفتی بالا به‌عنوان منافذ اصلی سازند کربناته فلهیان 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 اندازه‌گیری شده

- 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.
- 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.
- 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.

مقایسه با چاه A کاهش یافته و توزیع ریز ترک‌ها به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. با توجه به نتایج به دست 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.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از مسئولین محترم اداره ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت جهت در اختیار قرار 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.، ا.، جواهریان، ع.، حسنی، ح.، صابری، م. ر. و ذبیحی، س.، 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
- 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 Velocity-deviation 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*