

ارزیابی شاخص مکانیکی لایه‌های کانید شکافت هیدرولیکی با استفاده از فیزیک سنگ

صبا خوشکلام^{۱*}، مرتضی آزادپور^۲

۱- گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

۲- کارشناس ژئومکانیک، مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز، ایران

Saba Khoshkalam^{1*}, Morteza Azadpour²

1. Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2. Geomechanics expert, National Iranian South Oil Company (NISOC), Ahvaz, Iran

چکیده

ارزیابی خواص مکانیکی سنگ‌های مخزن معیار بسیار مهمی در تعیین نقاط مناسب برای اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی است. در این بین، مدول یانگ و نسبت پواسون دو پارامتر مکانیکی هستند که شکنندگی لایه‌های سنگ را کنترل می‌کنند. این دو پارامتر را می‌توان با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های سنگ در شرایط مختلف آزمایشگاهی (روش استاتیک) و یا با استفاده از داده‌های لاگ صوتی و چگالی (روش دینامیک) محاسبه کرد. محاسبه مدول‌های کشسان دینامیک به داده‌های سرعت موج برشی نیاز دارد که علی‌رغم اهمیت زیاد، به دلیل محدودیت و هزینه بالای اندازه‌گیری، صرفاً در تعداد اندکی از چاه‌های میدان اندازه‌گیری می‌شود. در این مطالعه، با توجه به عدم وجود سرعت موج برشی در چاه مورد نظر ابتدا به کمک یک مدل فیزیک سنگ کریناته مدول‌های بالک و برشی سنگ تخمین زده شده و سپس با محاسبه نسبت پواسون و مدول یانگ دینامیک و استفاده از رابطه آزمایشگاهی برای تبدیل این مدول‌ها به حالت استاتیک، شاخص شکنندگی تعیین و با در نظرگیری پارامترهای مخزنی مؤثر، لایه‌های کانید برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی شناسایی و اولویت‌بندی شد.

کلمات کلیدی: فیزیک سنگ، شاخص شکنندگی، شکافت هیدرولیکی، لایه کانید، مدول‌های کشسان.

مقدمه

از دیاد برداشت و بهبود ضریب بازیافت از مخازن با استفاده از عملیات شکافت هیدرولیکی^۱، یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تولید بهینه می‌باشد. کلید موفقیت عملیات شکافت هیدرولیکی به‌طور شاخصی به انتخاب لایه کاندید بستگی دارد. به‌طور کلی هدف از انتخاب لایه کاندید انتخاب یک یا تعدادی از زون‌ها برای عملیات است که بیشترین احتمال موفقیت را دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگر انتخاب لایه کاندید به خوبی انجام شود، می‌توان با شکاف‌زنی هیدرولیکی از مخازن کربناته دارای تراوایی کم به‌صورت اقتصادی تولید کرد. تعیین اولویت لایه‌های کاندید مستلزم شناسایی معیارهای ژئومکانیکی و مخزنی مؤثر با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و نگارهای پتروفیزیکی است [۱]. با توجه به مطالعات قبلی، روش جامع و یکسانی برای انتخاب کاندید وجود ندارد. به علاوه مطالعات گسترده‌ای در این زمینه در ایران صورت نگرفته است. با بررسی مطالعات قبلی انجام شده، مدول یانگ، نسبت پواسون، تنش افقی حداقل، اختلاف تنش‌های افقی در زون هدف، زاویه اصطکاک داخلی، محدودسازی شکاف، چگالی و جهت‌گیری درزه و شکاف‌های طبیعی سنگ، اشباع سیال و پتانسیل هیدروکربنی، میزان دوری از سطح تماس آب - نفت، تخلخل و نوع منافذ، تراوایی، فشار منفذی، لیتولوژی و ضخامت زون به عنوان مهم‌ترین و اثرگذارترین معیارهای ژئومکانیکی و مخزنی در انتخاب لایه‌های کاندید در نظر گرفته می‌شوند [۲-۵].

دانش ژئومکانیک در تصویرسازی روشن‌تر از رفتار مکانیکی سنگ مخزن نقش مهمی دارد و این رو می‌تواند شاخص‌های مکانیکی لایه کاندید را به خوبی ارزیابی کند. از مهم‌ترین خواص مکانیکی سنگ‌ها می‌توان به ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری (خواص

الاستیسیته یا کشسان) سنگ اشاره کرد. در این میان برآورد مدول‌های کشسان^۲، نقش پررنگی دارند و باید توجه کرد که آگاهی از آن‌ها، نخستین اصل محاسبات ژئومکانیک است. دو روش مختلف برای تعیین خواص کشسان سنگ وجود دارد: روش استاتیک و روش دینامیک. روش استاتیک مدول کشسان را با استفاده از آنالیز نمونه سنگ در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌کند. روش دینامیک با ارسال امواج صوتی حاصل از ارتعاش (با ضربه) به درون سنگ و دریافت بازتاب آن در نقطه دیگر، می‌تواند مدول‌های کشسان سنگ را از روابط انتشار امواج صوتی در سنگ تعیین کند [۶]. از این رو مدول‌های کشسان دینامیک می‌توانند راهنمای خوبی برای شناخت رفتار مکانیکی سنگ‌ها باشند.

اولین گام برای تعیین خواص مکانیکی سنگ به روش دینامیکی لزوم وجود نمودار سرعت موج برشی^۳ در چاه‌های مورد مطالعه است تا مدول‌های کشسان سنگ تعیین شود. سرعت موج برشی به دلیل هزینه بالا و مشکلات فنی معمولاً در ۵ درصد چاه‌ها اندازه‌گیری می‌شود و این یکی از مشکلات اصلی در مطالعات ژئومکانیکی است [۷]. به منظور تخمین سرعت موج برشی روابط تجربی متعددی با در نظر گرفتن فرضیاتی به منظور کاربردهای سطحی و عمیق پیشنهاد شده است. هر یک از این روابط دارای محدودیت‌هایی است به طوری که در مخازن هیدروکربوری وقتی با سیال و درز و شکاف‌های مخزن مواجه می‌شوند سبب بروز خطا در محاسبات می‌گردند. بنابراین جهت تخمین دقیق‌تر سرعت موج در دما و فشار مخزن، باید به خواص سنگ و سیال مخزن نیز توجه نمود و آن‌ها را در تخمین لحاظ کرد. از طرف دیگر، تخمین فاکتورهای مؤثر دیگر در شاخص شکاف‌پذیری لایه نیز مستلزم در نظرگیری این خواص می‌باشد. با توجه به این مسئله استفاده از ابزار

¹ Hydraulic Fracturing (HF)

² Elastic modules

³ Shear wave velocity

فیزیک سنگ می‌تواند روش مناسبی برای تعیین مستقیم خواص کشسان دینامیک در شرایط اشباع باشد.

مدل‌سازی فیزیک سنگ^۱ یک سری روابط تجربی را برای نشان دادن تأثیر خواص فیزیکی کانی‌ها و سیالات تحت شرایط مختلف محیطی (دما و فشار) بر خواص کشسان مؤثر در سنگ‌های رسوبی فراهم می‌کند؛ بنابراین این مدل‌ها برای پیش‌بینی مدول‌های کشسان در چاه‌ها با شرایط مخزنی متفاوت و بر اساس ترکیبات کانی‌شناسی، تخلخل، سیال و... عملی هستند. فیزیک سنگ قادر است با توجه به سرعت امواج لرزه‌ای تراکمی^۲ و برشی، مدول‌های کشسان سنگ را از روی نگارهای چاه محاسبه نماید. شو و وایت^۳ (۱۹۹۶) یک رویکرد ترکیبی برای پیش‌بینی سرعت امواج لرزه‌ای با استفاده از محیط مؤثر دیفرانسیلی^۴ (DEM) پیشنهاد کردند. درحالی‌که یورستاد^۵ و همکاران (۱۹۹۹) از DEM و مدل تقریب خودسازگار^۶ (SCA) برای پیش‌بینی سرعت امواج لرزه‌ای در ماسه‌سنگ‌ها استفاده کردند. علاوه بر این وانگ^۷ (۲۰۰۰) استفاده از چگالی حجمی و مدول سیال منفذی یک سنگ اشباع را برای پیش‌بینی سرعت امواج تراکمی و برشی پیشنهاد داد. لی^۸ (۲۰۰۶) یک گام به جلو برداشت و روشی را با معرفی پارامتر یکپارچه کردن سنگ خشک برای پیش‌بینی سرعت تعمیم داد. علاوه بر این شو و پین^۹ (۲۰۰۹) بر روی مخازن کربناته تمرکز کردند.

آن‌ها مدل شو و وایت را برای پذیرش انواع مختلف منافذ برای مدل‌سازی سرعت امواج تراکمی و برشی در مخازن کربناته گسترش دادند. ژانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۲) تلاش‌های خود را برای پیش‌بینی سرعت امواج لرزه‌ای در کربناته‌ها ادامه دادند و یک فرمول تجربی را بر اساس مدل بهبودیافته شو و وایت ایجاد کردند. لیو^{۱۱} و سان^{۱۲} (۲۰۱۵) عمدتاً بر روی مخازن ماسه‌سنگی تمرکز کردند. آن‌ها مدلی به نام کاستر - توکسوز تفاضلی^{۱۳} (DKT) برای مشخص کردن انواع منافذ در سنگ مخزن‌های آواری برای پیش‌بینی سرعت امواج لرزه‌ای پیشنهاد کردند. علاوه بر این گو^{۱۴} و لی^{۱۵} (۲۰۱۵) روش SCA فرکانس بالا را که فضاهای منفذی جدا شده را توصیف می‌کند و روش SCA فرکانس پایین را که فضاهای منفذی متصل را توصیف می‌کند برای پیش‌بینی سرعت مقایسه کردند [۷].

این مطالعه با استفاده از فیزیک سنگ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین^{۱۶} در یک میدان کربناته در جنوب غربی ایران، با بهینه‌سازی تخمین سرعت‌های تراکمی و برشی، مدول‌های کشسان بالک^{۱۷} و برشی^{۱۸} سنگ را در شرایط اشباع تخمین می‌زند و در ادامه مدول یانگ^{۱۹} و نسبت پواسون^{۲۰} را برای شناسایی لایه کاندید محاسبه می‌کند. مجموعه داده‌ها شامل اطلاعات چاه‌پیمایی یکی از چاه‌های مخزن بنگستان است که بر اساس روش

¹ Rock Physics Modeling (RPM)

² Compressional velocity

³ Xu & White

⁴ Differential Effective Medium (DEM)

⁵ Jørstad

⁶ Self-Consistent Approximation (SCA)

⁷ Wang

⁸ Lee

⁹ Xu & Payne

¹⁰ Zhang

¹¹ Liu

¹² Sun

¹³ Differential Kuster-Toksoz (DKT)

¹⁴ Guo

¹⁵ Li

¹⁶ Machine learning

¹⁷ Bulk modulus

¹⁸ Shear modulus

¹⁹ Young's modulus

²⁰ Poisson's ratio

فیزیک سنگ آزادپور و همکاران (۲۰۲۰) مدول‌های کشسان سنگ را در حالت اشباع تخمین می‌زند. در این روش مدل تعمیم‌یافته فیزیک سنگ شو و پین (۲۰۰۹) به‌عنوان یک مدل با تخلخل چندگانه استفاده می‌شود. این روش با به‌کارگیری نسخه ساده‌تر از مدل گسمن^۱ (۱۹۵۵)، از پیش‌بینی بهتری برای تعیین سرعت و مدول‌های کشسان سنگ بهره می‌برد [۷]. ما در این مطالعه، این مدل را روی مجموعه داده‌های کربناته خود برای مدول‌های بالک و برشی و در ادامه محاسبه مدول یانگ و نسبت پواسون در چاه مورد مطالعه اعمال کردیم و سپس به محاسبه شاخص شکنندگی^۲ و تحلیل خواص مخزنی لازم برای تعیین لایه مناسب جهت انجام شکافت هیدرولیکی پرداختیم.

زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه

فروافتادگی دزفول^۳ ناحیه‌ای نسبتاً کوچک با گستره‌ای بالغ بر ۶۰/۰۰۰ کیلومتر مربع واقع در جنوب غرب ایران بوده که عمده منابع نفتی کمر بند چین خورده - روراندۀ زاگرس را در خود جای داده است [۸]. ناحیه مذکور توسط گسل‌های بالارود، پیشانی کوهستان و کازرون از نواحی مجاور مجزا شده و به‌وسیله گسل هنديجان - بهرگانسر به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم شده است [۹]. میدان نفتی منصورى به‌عنوان ساختار مورد مطالعه در این پژوهش در فروافتادگی دزفول شمالی و مجاور با ناحیه دشت آبادان قرار گرفته است (شکل ۱). این میدان در فاصله تقریبی ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان اهواز واقع شده و در محدوده طول جغرافیایی ۴۸° ۰۶' تا ۴۴° ۴۱' ۴۱" و عرض جغرافیایی ۱۶° ۰۳' ۴۶" تا ۱۶° ۳۱' ۰۴" قرار دارد. میدان نفتی منصورى در افق بنگستان دارای حدود ۴۳ کیلومتر طول و ۵ تا ۶ کیلومتر عرض بوده و به تبعیت از روند زاگرس در راستای شمال غرب - جنوب شرق گسترش یافته است. از لحاظ ساختمانی، این

میدان به‌عنوان تاقدیسی کشیده با دامنه‌های ملایم و کم شیب در نظر گرفته شده که برخلاف میداین هیدروکربنی حوضه رسوبی زاگرس، شیب یال شمالی آن (۰ تا ۱۲ درجه) بیش از یال جنوبی (۰ تا ۸ درجه) است. میدان نفتی منصورى در سطح دارای رخنمون نبوده و بر اساس نقشه‌های هم‌تراز زیرزمینی^۴ و مقاطع لرزه‌ای، هیچ‌گونه آثاری از گسل خوردگی و یا به‌هم‌خوردگی تکتونیکی در آن مشاهده نمی‌شود [۱۰]. این میدان شامل سه مخزن نفتی آسماری، بنگستان و خامی می‌باشد که در این مطالعه به بررسی مخزن بنگستان که دو سازند ایلام و سروک به‌عنوان سنگ مخزن هستند پرداخته می‌شود. سازند سروک قسمتی از سنگ‌های آهکی کرتاسه میانی است که به نام‌های سنگ‌آهک رودیست‌دار، سنگ‌آهک هیپوریت‌دار و یا سنگ‌آهک بنگستان نامیده شده است [۱۱]. سازند سروک دو رخساره متفاوت دارد. در محل برش الگو و فارس ساحلی، رخساره‌های کم عمق این سازند گسترش دارد. درحالی‌که در ناحیه لرستان می‌توان رخساره‌های عمیق سازند سروک را دید. سازند ایلام به دو رخساره عمیق و کم عمق دیده می‌شود. رخساره‌های کم عمق سازند ایلام در نواحی فارس و خوزستان گسترش دارند که شامل سنگ‌آهک‌های دانه‌درشت به سن سانتونین تا کامپانین است [۱۲]. از آلبین تا کامپانین، یک چرخه رسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگاه و ایلام را می‌توان در زاگرس شناسایی کرد. به مجموعه سازندهای ایلام و سروک گروه بنگستان نام داده شده است که نام آن از کوه بنگستان در شمال بهبهان گرفته شده است [۱۲].

سازندهای مخزنی ایلام و سروک که معمولاً از آهک‌های رسی تشکیل شده‌اند، مشخصه بارز آن‌ها ناهمگن بودن آن‌هاست. با توجه به تراوایی و تخلخل کم این مخازن، انجام شکافت هیدرولیکی در این مخازن جهت تولید

¹ Gassmann model

² Brittleness Index (BI)

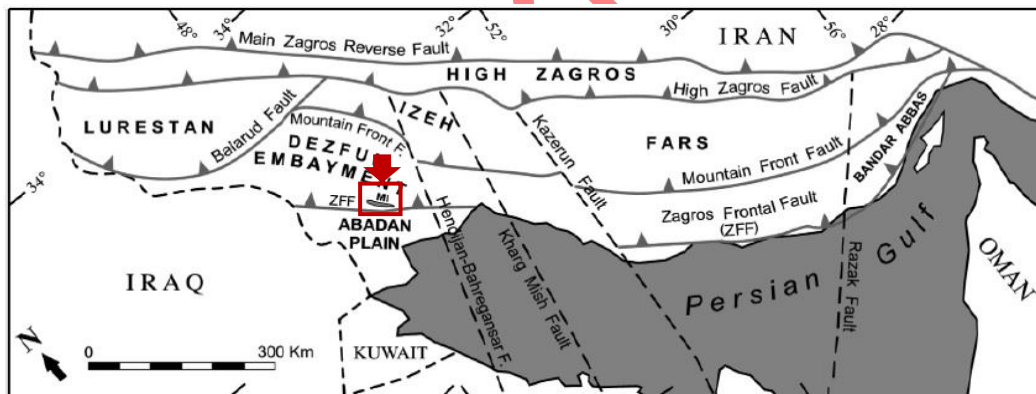
³ Dezful Embayment

⁴ Underground Contour (UGC) map

بهینه از آن‌ها ضروری است. بدین منظور ارزیابی پارامترهای مکانیکی مؤثر برای شناسایی لایه مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی از اهمیت خاصی برخوردار است.

عوامل متعددی در رفتار مکانیکی توده‌های سنگی تأثیر دارند که این پارامترها بر اساس نوع و ماهیتشان شامل (۱) مشخصات توده سنگ و سنگ بکر (نوع سنگ‌ها، ساخت، شکستگی‌ها، ویژگی‌های فیزیکی (تخلخل، چگالی، سرعت امواج لرزه‌ای)، ویژگی‌های مکانیکی (ثابت‌های الاستیک، مقاومت)) (۲) وضعیت تنش‌های درجا (بزرگی و جهت) می‌باشد [۱۳]. مخزن بنگستان در این میدان بر اساس تناوب لایه‌های عمدتاً متخلخل و متراکم به ۹ زون تقسیم‌بندی شده است که زون‌های ۱ تا ۳ در سازند ایلام و بقیه شامل سازند سروک هستند

که در بین آن‌ها زون ۲ سازند ایلام و زون‌های ۴، ۶ و ۸ سازند سروک، زون‌های مخزنی محسوب می‌شوند [۱۴]. زون‌های مخزنی ۲، ۴ و ۶ با توجه به اختلاف بهره‌دهی آن‌ها، به زیر زون‌های کوچک‌تری تقسیم‌بندی شده‌اند. زون ۸ نیز به دلیل واقع شدن در زیر سطح تماس نفت - آب به‌عنوان زون آبدی شناخته می‌شود [۱۳]. شکستگی‌ها یکی از عوامل مهم در ایجاد خصوصیات مخزنی در برخی زون‌های سازند ایلام و سروک در میدان منصوری هستند اما شکستگی‌ها در کل میدان توسعه ندارند و بیشتر به حالت مؤین هستند. بسته بودن شکستگی‌ها و یا پرشدگی نیز از عوامل کاهش‌دهنده تأثیر شکستگی‌ها در افزایش خصوصیات مخزنی این دو سازند هستند [۱۳].



شکل ۱ موقعیت میدان نفتی منصوری [۱۱].

از جمله شکاف، لیتولوژی یا تغییرات کانی، اثرات محیطی دما و فشار و غیره) است. در دهه‌های گذشته مطالعات زیادی در ارتباط با خواص فیزیکی سنگ‌ها، کانی‌ها و ارتباط آن‌ها با مهندسی مخازن هیدروکربنی و ژئوفیزیک اکتشافی صورت گرفته که منجر به ارائه فرضیه‌های مختلف در این زمینه و ایجاد انگیزه پژوهشی برای

روش کار

فیزیک‌سنگ بیانگر ارتباط بین خصوصیات کشسان^۱ (سرعت‌های تراکمی و برشی، چگالی و پارامترهای وابسته از جمله مدول بالک، مدول برشی، مدول یانگ) و خصوصیات ذاتی سنگ (مقدار تخلخل، سیستم تخلخل

^۱ Elastic properties

مطالعات آتی شده است [۱۶]. برخی از نتایج این مطالعات و تئوری‌ها باعث پیشرفت علوم زمین و فناوری‌های اکتشاف میدان‌های نفت و گاز شده است [۱۷]. آوست^۱ و همکاران (۲۰۰۵) مدل‌های فیزیک‌سنگی را به سه دسته کلی مدل‌های نظری^۲، تجربی^۳ و مفهومی^۴ تقسیم‌بندی کردند. با این حال نگاه دقیق‌تر به مدل‌های فیزیک‌سنگی به بهبود این طبقه‌بندی منجر شد؛ طبقه‌بندی بر اساس مراحل ساخت مدل‌های فیزیک‌سنگی تغییر کرد و مدل‌ها به چهار گروه مدل‌های سیال منفذی^۵، مدل‌های تجربی و مفهومی، مدل‌های نظری و مدل‌های ترکیبی^۶ تقسیم شد [۱۷]. به‌طور کلی می‌توان گفت که سنگ مخزن از سه بخش عمده کانی‌های سنگ، حفرات و سیالات داخل این حفرات تشکیل شده است. برای هر کدام از این بخش‌ها از روابط فیزیک‌سنگ متعددی استفاده می‌شود سپس این روابط با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا مدل سنگ مخزن مورد نظر ساخته شود [۱۸]. در ادامه روابط ریاضی مدل‌های استفاده شده و نحوه استفاده از این مدل‌سازی‌ها بیان خواهد شد.

مدل‌سازی فیزیک‌سنگ

فیزیک‌سنگ ابزار مؤثری برای مطالعات مخزن با طرحواره‌های توصیفی کیفی یا کمی می‌باشد. فرض بر این است که سنگ مخزن حاوی دانه‌ها (کانی‌ها) و فضاهای منفذی پر از سیال است؛ بنابراین برای پیش‌بینی پارامترهای کشسان سنگ اشباع باید خواص کشسانی این فازها و نحوه ترکیب آن‌ها مدل‌سازی شود. با این حال مدل‌سازی فیزیک‌سنگ برای سنگ‌های کربناته به دلیل

ناهمگنی و هندسه منافذ بسیار متغیر، چالش برانگیزتر است [۷]. هندسه منافذ سنگ‌های کربناته به‌صورت ترکیبی از انواع مختلف منافذ (ترک‌ها، منافذ بین‌ذره‌ای و منافذ سخت) یا میانباره است که ثابت شده تأثیر زیادی بر روی خواص کشسان و تضعیف امواج لرزه‌ای دارد [۲۰ و ۲۱]؛ بنابراین مدل‌های بر پایه میانباره^۷ مانند محیط مؤثر دیفرانسیلی یا تقریب خودسازگار معمولاً برای گنجاندن اثرات مختلف هندسه منافذ در مدل‌سازی فیزیک‌سنگ کربنات‌ها توصیه می‌شوند. این مدل‌ها سنگ را به‌عنوان یک ماتریکس کشسان با برخی منافذ بیضی شکل ایده آل که با نسبت‌های ابعادی^۸ آن‌ها تعریف می‌شوند، فرض می‌کنند. یک طرح‌واره رایج برای استفاده عملی از مدل بر پایه میانباره برای سنگ‌های کربناته توسط شو و پین (۲۰۰۹) ارائه شده است (شکل ۲). چنین روشی می‌تواند با مدل‌سازی سیالات منفذی با استفاده از روابط تجربی موجود (مانند روابط بتزل و ونگ^۹ (۱۹۹۲)) [۲۲] در شرایط مخزن (دما، فشار، API نفت و شوری آب) شروع شود. سپس برای محاسبه مدول مؤثر، سیالات موجود در مخزن با توجه به مدل‌هایی همچون وود^{۱۰} [۲۳] (۱۹۵۵)، ترکیب می‌شوند. این مدل‌ها زمانی استفاده می‌شوند که سیالات داخل مخزن به‌صورت همگن و یکپارچه در کنار یکدیگر قرار داشته باشند. گام بعدی محاسبه مدول مؤثر کانی‌های موجود با استفاده از برخی مدل‌های میانگین‌گیری مانند وویت - رئوس - هیل^{۱۱} (معادله ۲) است که در گروه مدل‌های

¹ Avseth

² Theoretical models

³ Imperical models

⁴ Heuristic models

⁵ Pore fluid models

⁶ Hybrid models

⁴ Inclusion-based model

⁸ Aspect ratios

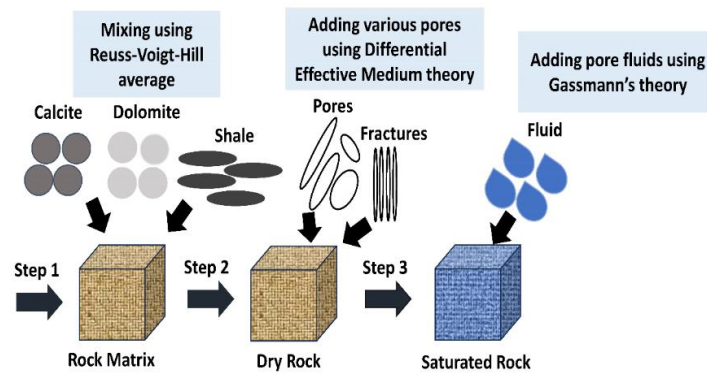
⁶ Batzle & Wang

¹⁰ Wood

¹¹ Voigt-Ruess-Hill (VRH)

مرزی^۱ طبقه‌بندی می‌شود. مرحله بعد با مدل‌سازی اسکلت سنگ خشک با استفاده از تئوری محیط مؤثر دیفرانسیلی (DEM) (معادله ۳) ادامه می‌یابد. این مدل‌ها با فراهم‌سازی امکان حضور انواع مختلف حفرات با نسبت ابعاد مختلف، از کارایی بیشتری در تخمین خواص کشسان سنگ‌های کربنات‌ها برخوردار هستند. در مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی (DEM) مواد تشکیل‌دهنده سنگ به بازه‌های بی‌نهایت کوچک تقسیم می‌شود. به عبارت دیگر بازه‌های کوچکی از میانبار به فاز ماتریکس یا ماده میزبان اضافه می‌شود [۲۴]. آخرین مرحله، اشباع منافذ سنگ خشک با مدول مؤثر سیال با استفاده از روابط جانیشینی سیال (معادله ۴) برای محاسبه خواص سنگ اشباع است [۷]. این روابط ضریب بالک یک محیط متخلخل اشباع از سیال را با استفاده از ضرایب بالک ماتریکس سنگ، چارچوب سنگ و سیال منفذی محاسبه می‌کنند.

مرزی^۱ طبقه‌بندی می‌شود. مرحله بعد با مدل‌سازی اسکلت سنگ خشک با استفاده از تئوری محیط مؤثر دیفرانسیلی (DEM) (معادله ۳) ادامه می‌یابد. این مدل‌ها با فراهم‌سازی امکان حضور انواع مختلف حفرات با نسبت ابعاد مختلف، از کارایی بیشتری در تخمین خواص کشسان سنگ‌های کربنات‌ها برخوردار هستند. در مدل محیط مؤثر دیفرانسیلی (DEM) مواد تشکیل‌دهنده سنگ به بازه‌های بی‌نهایت کوچک تقسیم می‌شود. به عبارت دیگر بازه‌های کوچکی از میانبار به فاز ماتریکس یا ماده میزبان اضافه می‌شود [۲۴]. آخرین مرحله، اشباع منافذ سنگ خشک با مدول مؤثر سیال با استفاده از روابط جانیشینی سیال (معادله ۴) برای محاسبه خواص سنگ اشباع است [۷]. این روابط ضریب بالک یک محیط متخلخل اشباع از سیال را با استفاده از ضرایب بالک ماتریکس سنگ، چارچوب سنگ و سیال منفذی محاسبه می‌کنند.



شکل ۲ طرح‌واره رایج مدل فیزیک سنگ شو - بین [۲۴].

جدول ۱ روابط ریاضی مدل‌های فیزیک سنگ.

$\frac{1}{K_{fl}} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{K_i}$	وود (۱۹۵۵)	(۱)
$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i$	وویت (۱۹۱۰)	(۲)
$\frac{1}{M_R} = \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{M_i}$	رئوس (۱۹۲۹)	
$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2}$	وویت - رئوس - هیل (۱۹۵۲)	(۳)
$(1 - y) \frac{d}{dy} [K^*(y)] = (K_2 - K^*) p^{(*2)}(y)$	معادله محیط مؤثر دیفرانسیلی	
$(1 - y) \frac{d}{dy} [\mu^*(y)] = (\mu_2 - \mu^*) Q^{(*2)}(y)$		

¹ Bound models

$K_{sat} = K_{dry} + \Delta K_{dry}$ $\Delta K_{dry} = \frac{K_m \left[1 - \frac{K_{dry}}{K_m} \right]^2}{1 - \varphi - \frac{K_{dry}}{K_m} + \varphi \frac{K_m}{K_f}} = \frac{\beta^2}{\frac{\varphi}{K_f} + \frac{\beta - \varphi}{K_m}}$	معادله گسمن (۱۹۵۱) (۴)
$\mu_{sat} = \mu_{dry}$	
$\Delta K_{dry} \approx \varphi^c K_f$	شکل ساده شده گسمن [۷]

شاخص شکنندگی

پارامترهای مورد بررسی در انتخاب لایه کاندید شامل میدان تنش‌های برجا در اطراف چاه، شبکه ترک‌های طبیعی سازند، عمق، ضخامت و هندسه لایه‌ها، نفوذپذیری سنگ‌ها، شکنندگی لایه‌ها و ... می‌باشد. پارامتری که در این کار برای انتخاب لایه کاندید در نظر گرفته می‌شود دارای استاندارد خاصی نبوده و با توجه به شرایط خاص و به صورت محلی تعریف می‌شود. در سال‌های اخیر برای انتخاب لایه‌ها و چاه‌های مناسب برای عملیات شکافت هیدرولیکی از شاخص شکنندگی استفاده می‌شود. این پارامتر برای سنگ‌های نرم کاربرد ندارد. در این بخش به توضیح مختصری در رابطه با شاخص شکنندگی پرداخته می‌شود.

طبق تعریف شکنندگی، توانایی یک ماده برای مقاومت دائم (یا غیر کشسان) در مقابل تغییر شکل است. زمانی که یک ماده تحت بارگذاری از مرحله کشسان به مرحله پلاستیک می‌رود، ماده یا در معرض شکست قرار می‌گیرد یا اتساع^۱ در آن رخ می‌دهد. از طرف دیگر سختی^۲، در واقع نشان‌دهنده تنش لازم برای ایجاد کرنش

طبق جدول بالا، در معادله اول K_{f1} مدول بالک سیال منفذی، f_i درصد هر سیال و K_i مدول بالک سیالات موجود در مخزن است. در معادله دوم، M_V و M_R مدول مؤثر کشسان، f_i درصد هر سیال و M_i مدول کشسانی می‌باشد. در معادله سوم K^* و μ^* مدول بالک و برشی مؤثر کل، K_2 و μ_2 مدول بالک و برشی میانباره اضافه شونده (فاز دوم) و γ نسبت حجمی فاز دوم است. در شرایط اضافه کردن سیال یا فضای خالی به عنوان فاز دوم، γ معادل همان تخلخل است. $K^*(\gamma)$ و $\mu^*(\gamma)$ مدول بالک و برشی فاز میزبان بخش γ است. اصطلاحات $p^{(2)}$ و $Q^{(2)}$ فاکتورهای هندسی برای محیط دوم (میانبار) هستند. در معادله چهارم K_{sat} ، K_{dry} ، K_f ، K_m ، φ و β به ترتیب مدول بالک سنگ اشباع، مدول بالک سنگ خشک، مدول بالک سیال، مدول بالک کانی، تخلخل و ضریب بایوت است. μ_{sat} و μ_{dry} به ترتیب مدول برشی حالت اشباع و چارچوب سنگ هستند. ΔK_{dry} مقدار افزایش مدول اشباع به دلیل اشباع سنگ خشک است و C ضریب نمایی معادله ساده‌سازی شده گسمن است [۷].

¹ Dilation

² Stiffness

مطالعه، مدول یانگ دینامیک را به حالت استاتیک آن تبدیل کرد. رابطه (۷) بر اساس ۳۰ نمونه آزمایشگاهی در چاه مرجع مورد مطالعه بدست آمده که دارای دقت ضریب همبستگی $R^2=89$ و $RMSE=5.26$ است.

$$E_{sta} = 1.254 \times E_{dyn} - 23.665 \quad (7)$$

مقادیر نسبت پواسون دینامیک و استاتیک با توجه به لیتولوژی سازند مورد مطالعه که عمدتاً کلسیت می باشد تقریباً یکسان در نظر گرفته می شود. ریکمن و همکاران (۲۰۰۸) رابطه زیر را برای ارزیابی شکنندگی ارائه کردند:

$$BI = \frac{E_{brittleness} + \nu_{brittleness}}{2} \quad (8)$$

که در آن $E_{brittleness}$ و $\nu_{brittleness}$ به ترتیب نسبت پواسون و مدول یانگ استاتیک نرمالیز شده هستند که پس از کنترل داده های پرت (بر اساس توزیع نرمال و شناسایی نقاط خارج از ناحیه سه انحراف استاندارد از میانگین انجام شده است)، از روابط زیر به دست می آیند:

$$E_{brittleness} = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \quad (9)$$

$$\nu_{brittleness} = \frac{\nu_{max} - \nu}{\nu_{max} - \nu_{mix}} \quad (10)$$

زیرنویس های min و max نشان دهنده مقادیر کمترین و بیشترین پارامتر مربوطه می باشد. این رابطه نشان می دهد که سازندهای با مدول یانگ بالاتر و نسبت پواسون کم تر، شکنندگی بیشتری دارند [۲۷]؛ اما رابطه عکس بین مدول یانگ و نسبت پواسون ممکن است در مورد موارد خاصی مناسب باشد و ممکن است چنین رابطه ای مستقیم باشد، بنابراین تعمیم چنین روابطی به هر نوع سازندی می تواند اشتباه باشد [۲۵].

مشخصی در جسم می باشد که از تانژانت زاویه شیب نمودار تنش - کرنش قابل محاسبه است. به عنوان مثال مدول یانگ معیاری از سختی یک ماده کشسان (ماده ای که در مرحله کشسان قرار دارد) است. در مورد شکست شکننده^۱ دوره تغییر شکل پلاستیک کوتاه است و چنانچه دوره تغییر شکل طولانی باشد ماده تحت شکست شکل پذیر^۲ قرار می گیرد. در واقع اختلاف بین مواد شکننده و شکل پذیر مدت زمانی است که این مواد توانایی مقاومت در برابر تغییر شکل قائم را دارند [۲۵]. همان طور که ملاحظه می شود شکنندگی یکی از مهم ترین خواص مکانیکی سنگ است که در اکثر گزارش های پتروفیزیکی به آن اشاره می شود. با این حال به دلیل عدم وجود یک رابطه جهانی و جامع برای شکنندگی، روش های مختلفی برای ارزیابی آن ارائه شده است. ریکمن و همکاران (۲۰۰۸) و گریزر و بری (۲۰۰۷) شاخص شکنندگی را بر اساس ترکیب مدول یانگ و نسبت پواسون تعریف کردند [۲۶ و ۲۷]. مدول یانگ نسبت تنش به کرنش و نسبت پواسون به عنوان نسبت منفی کرنش (عرضی) به محوری (طولی) تعریف می شود. نسبت پواسون و مدول یانگ دینامیک با استفاده از فرمول های زیر از مدول های کشسان بالک و برشی حاصل از مدل سازی فیزیک سنگ محاسبه می شوند:

$$E_{dynamic} = \frac{9k\mu}{3k + \mu} \quad (5)$$

$$\nu_{dynamic} = \frac{3k - 2\mu}{2(3k + \mu)} \quad (6)$$

که E مدول یانگ بر حسب گیگاپاسکال، ν نسبت پواسون، k مدول بالک و μ مدول برشی می باشد. در ادامه لازم است با استفاده از یک رابطه تجربی از نتایج آزمایش های مکانیک سنگ نمونه های منطقه مورد

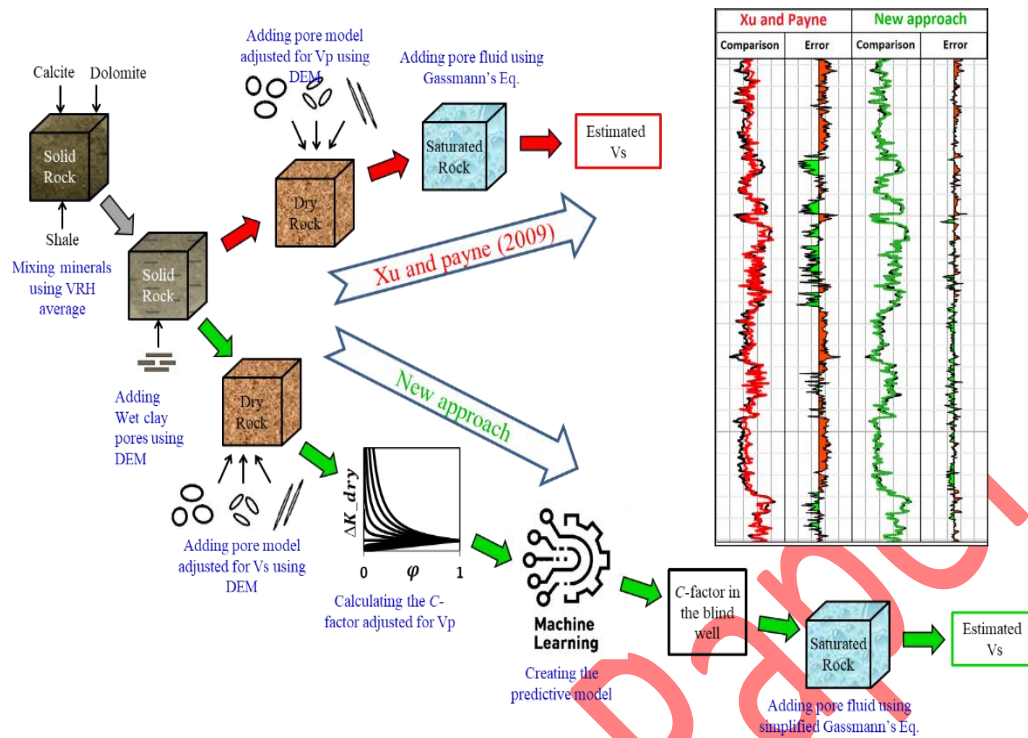
³ Brittle Failure

² Ductile Failure

نتایج کار

همان‌طور که بیان شد محاسبه شاخص شکنندگی برای تعیین لایه‌های کاندید جهت انجام عملیات شکافت هیدرولیکی نیازمند مدول‌های یانگ و نسبت پواسون سنگ می‌باشد که به دلیل عدم وجود سرعت موج برشی در چاه مورد مطالعه، از مدل فیزیک‌سنگ بر پایه میانباره سیال استفاده شد. در مدل‌های میانباره، تعیین صحیح مدل تخلخل (درصد حجمی نوع منافذ) بسیار مهم است و تأثیر زیادی در دقت پیش‌بینی دارد. در این مطالعه برای تخمین مدول‌های بالک و برشی، از مدل فیزیک‌سنگی که توسط آزادپور و همکاران (۲۰۲۰) ارائه شده است استفاده کردیم (شکل ۳). مدل مربوطه ترکیبی از روش فیزیک‌سنگ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین است و عملکرد بهتری نسبت به مدل معروف میانباره فیزیک‌سنگ شو - پین در تعیین سرعت موج برشی مخازن کربناته دارد. در روش شو - پین (مسیر بالا در شکل ۳) کالیبره کردن مدل تخلخل صرفاً بر اساس سرعت موج تراکمی صورت گرفته و از این رو قابلیت تخمین دقیق سرعت موج برشی و دیگر مدول‌ها را نداشته و با مقداری خطا همراه است. آزادپور و همکاران با ارائه یک رویکرد جدید نتایج مدل‌سازی‌های فیزیک‌سنگی را بهبود بخشیدند. بر این اساس یک ضریب نمایی C برای کنترل اثرات شکل منافذ و در ادامه ساده‌سازی مرحله

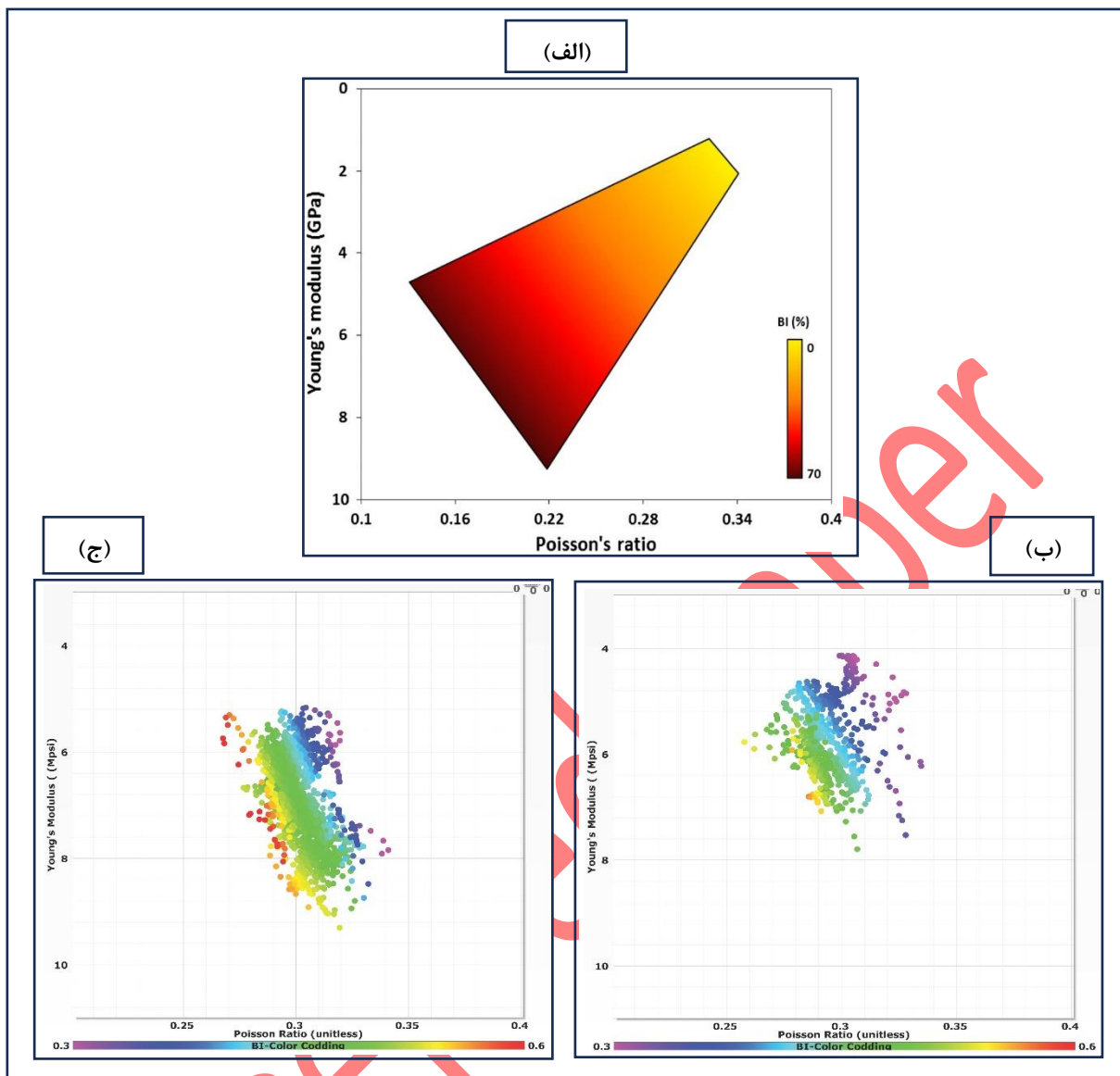
جانشینی سیال گسمن در روش شو - پین ارائه کردند که در قالب طرح‌واره‌ای جدید برای مدل‌سازی فیزیک‌سنگی استفاده شد (مسیر پایین در شکل ۳). پارامتر C یک رفتار غیر خطی دارد که بدست آوردن آن توسط مدل‌های موجود را دشوار می‌کند. روش‌های یادگیری ماشینی ابزار مناسبی برای تعیین آن در تخلخل‌های مختلف به نظر می‌رسند [۷]. در این مطالعه مدل ارائه شده بر اساس چاه مرجع تهیه و اعتبارسنجی شده است و سپس بر روی اطلاعات چاه مورد مطالعه ما (چاه B) که شامل نمودارهای فول ست چاه‌پیمایی به همراه ارزیابی پتروفیزیکی می‌باشد، اعمال شده است. بعد از تخمین مدول‌های بالک و برشی سنگ اشباع، نسبت پواسون و مدول یانگ دینامیک توسط معادلات ۵ و ۶ محاسبه شدند. سپس مدول یانگ استاتیک که برای محاسبه شاخص شکنندگی مد نظر است با توجه به رابطه ۷ بدست آمده است. در ادامه کار، با توجه به رابطه بیان شده بین مدول یانگ استاتیک و نسبت پواسون با شاخص شکنندگی، مقادیر مدول یانگ استاتیک و نسبت پواسون محاسبه شده توسط روابط ۹ و ۱۰ بین مقادیر ۰-۱ نرمالیزه شدند. در نهایت بر اساس رابطه ۸، شاخص شکنندگی از میانگین‌گیری $E_{brittleness}$ و $v_{brittleness}$ محاسبه شد.



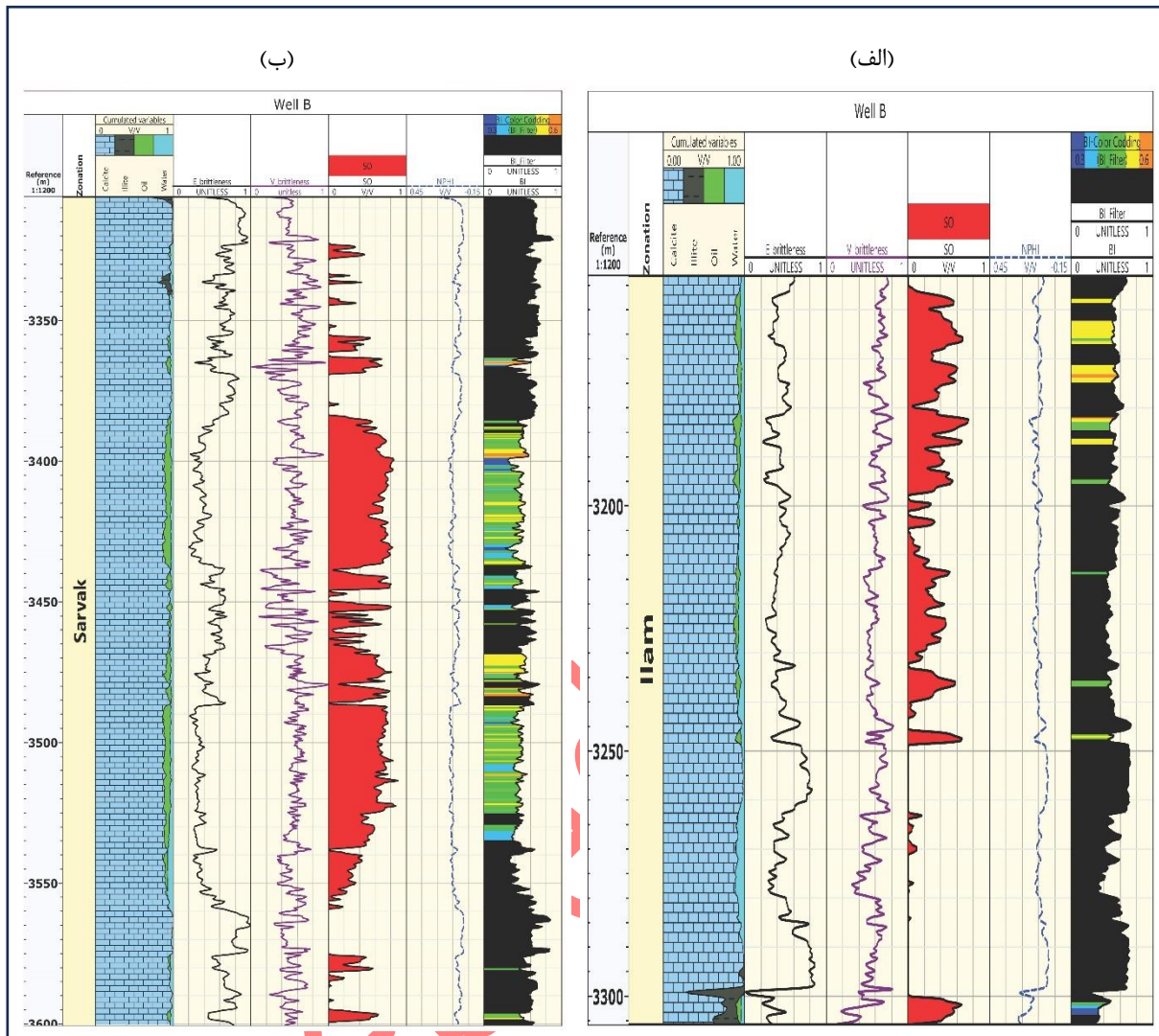
شکل ۳ طرح‌واره مدل فیزیک‌سنگ اصلاح شده شو - بین به همراه نتایج پیش بینی [۷] از سمت چپ: ستون ۱ سرعت موج S اندازه‌گیری شده (سیاه) و تخمین زده شده توسط مدل شو - بین (قرمز)؛ ستون ۲ خطای نسبی سرعت موج S به دست آمده از مدل شو - بین. ستون ۳ سرعت موج S اندازه‌گیری شده (سیاه) و تخمین زده شده با روش آزادپور و همکاران (۲۰۲۰) (سبز). ستون ۴ خطای نسبی سرعت موج S محاسبه شده از روش آزادپور و همکاران (۲۰۲۰).

های سرد) دارای مدول یانگ کمتر و نسبت پواسون بیشتری می‌باشند. همانطور که بیان شد در سنگ مخزن پارامترهای مخزنی مختلفی مانند تخلخل، تراوایی، اشباع‌شدگی نفت و ... بر روی انتخاب محل مناسب تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین لازم است علاوه بر در نظر گرفتن شاخص شکنندگی از دیدگاه ژئومکانیکی، خصوصیات مخزنی را نیز بررسی کرد که با در نظر گرفتن این عوامل در نهایت می‌توان بهترین محل را برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی مشخص کرد. برای انجام این کار با توجه به سوابق مطالعات گذشته شاخص‌های مخزنی اشباع نفت و تخلخل به صورت محلی و نسبی تعیین می‌شوند [۳-۵] که بر این اساس در این مطالعه، ما اشباع نفت بالای ۵۰ درصد و مقدار تخلخل بالای ۵ درصد را شناسایی و فیلتر مربوطه را بر روی مدول‌های کشسان اعمال کردیم (شکل ۵).

در برخی زون‌های سازند ایلام و سروک شکستگی‌ها یکی از عوامل مهم در ایجاد خصوصیات مخزنی بوده و پتانسیل بالایی را برای اجرای موفقیت‌آمیز عملیات شکافت هیدرولیکی و افزایش تولید دارند؛ بنابراین مدول یانگ و نسبت پواسون با هم ترکیب می‌شوند تا انعکاسی از مقاومت سنگ در مقابل تنش (نسبت پواسون) و گسترش شکستگی (مدول یانگ) در آن باشند. با توجه به شکل (۴-الف) لایه‌های شکننده باید نسبت پواسون پایین و مدول یانگ بالا داشته باشند. در شکل (۴-ب) و (۴-ج) تغییرات مدول یانگ در مقابل نسبت پواسون در سازندهای نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است لایه‌هایی با شاخص شکنندگی بالاتر (رنگ‌های گرم) دارای مدول یانگ بالا و نسبت پواسون کم هستند در حالی که لایه‌هایی با شاخص شکنندگی کمتر (رنگ-



شکل ۴ الف) نمودار مدول یانگ در مقابل نسبت پواسون و تغییرات آن‌ها در رابطه با شاخص شکنندگی [۶] ب و ج) تغییرات مدول یانگ در مقابل نسبت پواسون به ترتیب در سازندهای ایلام و سروک.



شکل ۵ نمایش لاگ‌ها و پارامترهای محاسبه شده در سازندهای ایلام و سروک چاه B. از سمت چپ: لیتولوژی، مدول یانگ نرمالایز شده، نسبت پواسون نرمالایز شده، اشباع نفت (حجم بر حجم)، تخلخل نوترون (حجم بر حجم)، شاخص شکنندگی محاسبه شده و شناسایی بهترین نواحی (نواحی رنگی) برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی بر روی آن (ستون‌های آخر). نواحی مشکی رنگ در ستون‌های آخر بیانگر خصوصیات مخزنی فاقد کیفیت لازم برای شکافت هیدرولیکی می‌باشد.

دارای تخلخل بالای ۵ درصد، اشباع نفت بالای ۵۰ درصد می‌باشند. در این ناحیه‌ها مدول یانگ بالا و نسبت پواسون کم، به صورت نسبی نقاط مناسبی را برای عملیات شکافت هیدرولیکی نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از مدل‌سازی فیزیک‌سنگ برای شناسایی خواص کشسان و کمک به تعیین لایه کاندید برای عملیات شکافت هیدرولیکی در مخزن بنگستان میدان

همانگونه که در شکل (۵-الف) و (۵-ب) مشاهده می‌شود، مدول‌های کشسان مورد نظر بر اساس روابط ارائه شده که پیش‌تر توضیح داده شد در سازندهای مورد مطالعه محاسبه و در نهایت شاخص شکنندگی (ستون آخر) به صورت رنگ بندی شده نمایش داده شده‌اند. از دیدگاه مخزنی و ژئومکانیکی بخش‌های مشکی در دو سازند ایلام و سروک از نظر تخلخل، اشباع نفت و شکنندگی در محدوده قابل قبول نبوده و برای انجام عملیات مناسب نیستند در حالیکه بخش‌های رنگی

نفتهی منصوری استفاده شد. با توجه به اینکه محاسبه مدول‌های کشسان نیازمند داده‌های سرعت موج تراکمی، برشی و چگالی است بنابراین به دلیل عدم وجود سرعت موج برشی در چاه مورد مطالعه ابتدا بر اساس مدول فیزیک‌سنگ از پیش تعیین شده توسط آزادپور و همکاران (۲۰۲۰) مدول‌های بالک و برشی در چاه مورد مطالعه تخمین زده شد، سپس مدول‌های یانگ و نسبت پواسون سنگ بر اساس روابط ارائه شده محاسبه شدند. در ادامه شاخص شکنندگی به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای ژئومکانیکی انتخاب لایه کاندید تعیین شد. نتایج این بخش از مطالعه نشان

داد با بکارگیری مدول‌های فیزیک‌سنگ کربناته مانند مدل تعمیم یافته فیزیک‌سنگ شو - پین [۷]، می‌توان خواص کشسان سنگ در چاه‌های فاقد اطلاعات موج برشی را با دقت بالایی تعیین کرد که اهمیت کاربردی بالایی دارد. در انتها، با محاسبه پارامتر ژئومکانیکی شاخص شکنندگی و در نظرگیری ویژگی‌های مخزنی تخلخل و اشباع نفت بر روی مدول‌های کشسان، بهترین محل برای انجام عملیات شکافت هیدرولیکی جهت افزایش تولید شناسایی و اولویت‌بندی شد.

Accepted Paper

مراجع

- [1]. تیموری م. (۱۳۹۶) تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر انرژی ویژه مکانیکی خردایش سنگ در حفاری چاه‌های نفت یکی از میادین جنوب غرب ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [2]. عاصمی ف، زهدی ا، صبورملکی م (۱۴۰۱). مدل‌سازی ژئومکانیکی و انتخاب لایه کاندید شکست هیدرولیکی در یک مخزن فشرده در جنوب غربی ایران - مطالعه موردی. پژوهش نفت، ۳۲ (۱۴۰۱-۶)، ۹۲-۱۰۷.
- [3]. Hashemi A., Shadizadeh S. R. and Ziveidavianpoor M. (2012) "A Local Computerized Multi-screening of Vas Amount of Data to select Hydraulic Fracturing Candidates in Iranian Carbonate Oil Fields", *International Journal of Computer Application.*, 39 (8), 37-45.
- [4]. Heydarabadi F.R., Moghadasi J. and Ashena, R. (2010). "Criteria for Selecting a Candidate Well for Hydraulic Fracturing", the 34th Annual SPE International Conference and Exhibition Held in Tinapa, Calabar, Nigeria, 31 July to 7 August 2010, Paper SPE 136988.
- [5]. Shadizadeh S.R. Habibnia B.A. and Syllabee R. (2009) "Investigation and Selection of Suitable Layers in Bangestan Reservoir for Hydraulic Fracturing Operation", *Scientia Iranica, Transactions C: Chemistry and Chemical Engineering*, 16: 2, 149-160.
- [6]. Labani, M. M., and Rezaee, R. (2015). The importance of geochemical parameters and shale composition on rock mechanical properties of gas shale reservoirs: A case study from the Kockatea Shale and Carynginia Formation from the Perth Basin, Western Australia. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1249-1257.
- [7]. Azadpour, M., Saberi, M. R., Javaherian, A., and Shabani, M. (2020). Rock physics model-based prediction of shear wave velocity utilizing machine learning technique for a carbonate reservoir, southwest Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195, 107864.
- [8]. Bordenave, M. L., and Hegre, J. A. (2010). *Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems*. Geological Society, London, Special Publications, 330 (1), 291-353.
- [9]. Sherkati, S., and Letouzey, J. (2004). Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and petroleum geology*, 21 (5), 535-554.
- [10]. مرادی م، موسوی حرمی س ر، صادقی ق (۱۳۹۴) تهیه مدل ژئواستاتیک مخزن آسماری میدان نفتی منصوری با استفاده از نرم افزار RMS، مجله پژوهش نفت، ۲۵: ۱۷۳-۱۸۵.
- [11]. قنواتی ک، حق پرست ق (۱۳۸۶) مطالعه جامع مخزن بنگستان میدان منصوری - فاز تعیین مشخصات مخزن، گزارش شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب، شماره ۶۰۳۵.
- [12]. امانی پور ح. (۱۳۹۱) تعیین مدل ژئومکانیکی لایه مخزنی بنگستان میدان نفتی منصوری، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [13]. James, G. A., and Wynd, J. G. (1965). Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG bulletin*, 49 (12), 2182-2245.
- [14]. آقانباتی س ع. (۱۳۸۹) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [15]. Haynes, S. J., and McQuillan, H. (1974). Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 85 (5), 739-744.
- [16]. آزادپور م. (۱۴۰۰) مطالعه فیزیک‌سنگی اثر فشار و تخلخل بر سرعت امواج لرزه‌ای در یکی از مخازن کربناته ایران، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [17]. Avseth, P., and Lehocki, I. (2015). Quantitative interpretation of rock stiffness and hydrocarbon softening from seismic inversion data using rock physics templates. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015* (pp. 585-589). Society of Exploration Geophysicists.

- [18]. 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.
- [۱۹]. خادم العموم ب، جواهریان ع، صابری م ر (۱۳۹۸) ادغام وارون سازی داده های لرزه ای و روابط فیزیکی سنگی برای تحلیل و تعیین توزیع انواع شیل در یکی از میادین خلیج فارس، مجله ژئوفیزیک ایران، ۳۲-۵۵.
- [20]. Wang, Z., Hirsche, W. K., and Sedgwick, G. (1991). Seismic velocities in carbonate rocks. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 30 (02).
- [21]. Eberli, G. P., Baechle, G. T., Anselmetti, F. S., and Incze, M. L. (2003). Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks. *The Leading Edge*, 22 (7), 654-660.
- [22]. Batzle, M., and Wang, Z. (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57 (11), 1396-1408.
- [23]. Wood, A. B., and Lindsay, R. B. (1956). *A textbook of sound*.
- [24]. Seifi, H., Tokhmechi, B., and Moradzadeh, A. (2020). Improved estimation of shear-wave velocity by ordered weighted averaging of rock physics models in a carbonate reservoir. *Natural Resources Research*, 29, 2599-2617.
- [25]. Bai, M. (2016). Why are brittleness and fracability not equivalent in designing hydraulic fracturing in tight shale gas reservoirs. *Petroleum*, 2 (1), 1-19.
- [26]. Grieser, B., and Bray, J. (2007). Identification of production potential in unconventional reservoirs. In *SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium/Production and Operations Symposium* (pp. SPE-106623). SPE.
- [27]. Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., Grieser, B., and Kundert, D. (2008). A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (pp. SPE-115258). SPE.

Accepted



Petroleum Research

Petroleum Research 2024 (April -May), Vol. 28, No. 98. 6-9

DOI:

Evaluation of the mechanical index of hydraulic fracturing candidate layers using rock physics

Received: Accepted:

Abstract

Evaluation of the mechanical properties of reservoir rocks is an essential criterion in determining suitable points for hydraulic fracturing operations. Meanwhile, Young's modulus and Poisson's ratio are two mechanical parameters controlling rock layers' brittleness. These two parameters can be calculated by performing tests on rock samples in different laboratory conditions (static method) or using sonic and density log data (dynamic method). The calculation of dynamic elastic moduli requires shear wave velocity data, which, despite its great importance, is only measured in a small number of wells in the field due to the limitation and high cost of measurement. In this study, due to the lack of shear wave velocity in the well in question, the bulk and shear moduli of the rock were estimated with the help of a carbonate rock physics model. Then, by calculating Poisson's ratio and Young's dynamic modulus and using the laboratory relationship to convert these moduli into the static state, the brittleness index was determined, and considering the effective reservoir parameters, the candidate layers for hydraulic fracturing operations were identified and prioritized.

Keywords: Rock physics, Brittleness index, Hydraulic fracturing, Candidate layer, Elastic modules.

Accepted Paper