



مقاله پژوهشی

تفکیک زون مخزن هیدروکربنی با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی، چاه و پارامترهای ژئومکانیکی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران

یاسر تاراس^۱؛ محمدعلی ریاحی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری؛ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲- استاد؛ موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.348683.1170

واژگان کلیدی	چکیده
ژئومکانیک، مخزن هیدروکربنی، مدول‌های الاستیک، پارامترهای لامه، ضریب شکنندگی مخزن	تفکیک پتانسیل زون‌های مختلف یک مخزن هیدروکربنی یکی از چالش‌های مطرح برای محققین در این حوزه است. تاکنون رهیافت‌های مختلفی در زمینه زون‌بندی مخزن هیدروکربنی ارائه شده است. در این میان سئوالی که مطرح می‌شود این است که آیا با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی می‌توان زون‌های مختلف یک مخزن را به لحاظ پتانسیل هیدروکربنی از یکدیگر تفکیک نمود؟ برای مثال آیا می‌توان در یک مخزن هیدروکربنی ماسه سنگی، زون‌های ماسه‌ای و شیلی را از یکدیگر تفکیک کرد؟ در این تحقیق برای پاسخ به این سؤال برآن شدیم که با محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی درک مناسبی از تفاوت رفتار ژئومکانیکی زون مخزنی و غیرمخزنی را به دست آوریم. به این منظور برای به دست آوردن پارامترهای ژئومکانیکی از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی یکی از میادین نفتی جنوب ایران به همراه داده‌های چهار حلقه چاه موجود استفاده شد. ابتدا وارون‌سازی بر روی داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی پیش از برانبارش انجام شد و سه پارامتر، امپدانس‌های صوتی P ، S و چگالی استخراج گردید. سپس با استفاده از نتایج مرحله وارون‌سازی، پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول‌های الاستیک، ضرایب لامه و ضریب شکنندگی مخزن ^۱ مورد محاسبه قرار گرفت. در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی محاسبه شده، زون مخزنی به خوبی از زون غیرمخزنی به لحاظ پتانسیل هیدروکربنی در مقاطع زمانی تفکیک شد. پارامترهای ژئومکانیکی محاسبه شده با استفاده از نمودارهای نقطه‌ای و مقایسه با نگاره‌های یکی از چاه‌های موجود که از فرایند محاسبات کنار گذاشته شده بود مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در نتیجه مقدار همبستگی برای امپدانس صوتی بیش از ۹۰ درصد به دست آمد.

۱. پیش‌گفتار

اکتشاف مخازن هیدروکربنی به عنوان منابع محدود انرژی، با هزینه، سختی و خطرپذیری زیادی انجام می‌شود. در پیچوئی‌های مخازن هیدروکربنی جدید، به ناچار باید به دنبال مخازنی با پیچیدگی بیشتر و در اعماق بیشتر بود. تلفیق اطلاعات به دست آمده از زمینه‌های مختلف مطالعاتی و تفسیر آن‌ها در کنار یکدیگر می‌تواند این پیچیدگی‌ها را کنترل نموده

و خطرپذیری را به حداقل رساند. با تلفیق داده‌های لرزه‌ای بازتابی و نگاره‌های چاه در تمامی مراحل اکتشاف، حفاری و تولید، امکان تخمین مؤلفه‌های مدل ژئومکانیکی فراهم می‌شود. یک مدل ژئومکانیکی را می‌توان به صورت یک توزیع عددی از وضعیت تنش، ویژگی‌های سنگ همچون مقاومت، چگالی، تخلخل و فشار منفذی در فضای مخزن و یا میدان مورد بررسی، تعریف نمود.

¹ Brittleness

علم ژئومکانیک در واقع شامل تخمین و مدیریت تغییر شکل سنگ‌ها است. بدین ترتیب با استفاده از داده‌های مختلف به دست آمده از لرزه‌نگاری و چاه‌نگاری و آنالیزهای صورت‌گرفته می‌توان به صورت دقیق‌تری در مورد پارامترهای مخزنی اظهار نظر کرد و به تخمین خواص مختلف ژئومکانیکی مخزن پرداخت. بدین منظور تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر از سوی محققین صورت گرفته است. دقت در تخمین پارامترهای ژئومکانیکی به طور خاص در به دست آوردن اطلاعات زیرسطحی و ویژگی‌های ساختاری مخزن و تفسیر داده‌های لرزه‌ای حائز اهمیت می‌باشد [۱، ۲]. عدم توجه به این مهم، موجب ناپایداری چاه و مشکلاتی از قبیل از هم پاشیدگی، افزایش هزینه‌های حفاری، توقف تولید و حتی از بین رفتن چاه می‌گردد [۳]. به عبارت دیگر، تخمین دقیق ویژگی‌های الاستیک و ژئومکانیکی سنگ‌های مخزنی برای بسیاری از طراحی‌ها و پیاده‌سازی‌ها در زمینه‌های متعددی مانند حفاری، انرژی گرمایی و ژئوتکنیک کاربرد دارد [۴].

ناپایداری چاه یکی از مهم‌ترین بحران‌ها در طی عملیات حفاری (تکمیل چاه، ارزیابی پتروفیزیکی و سیمان‌کاری) می‌باشد؛ به طوری که مشکلات ناشی از آن سالانه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیون دلار هزینه به صنعت نفت دنیا تحمیل می‌کند [۴]. لذا فهم و شناخت خطرات ناشی از وضعیت تنش زمین جهت انجام عملیات حفاری ایمن و تکمیل مدل‌های ژئومکانیکی بسیار مهم می‌باشد. در این خصوص، هن و دیگران (۲۰۱۹)، مطالعات تخصصی بر روی پایداری چاه در سنگ‌های گسلش شده را با طراحی روشی سه مرحله‌ای برای اندازه‌گیری پارامترهای الاستیک طراحی نمودند [۶]. باقری و دیگران (۲۰۲۱)، با استفاده از امیدانس صوتی و ضریب بازتاب، یک مدل ژئومکانیکی برای بررسی پایداری چاه را در یک مخزن کربناته طراحی نمودند [۷].

تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طوری که در برخی موارد این تغییر به مراحل اتمام و تکمیل چاه نیز خسارت وارد می‌کند. افزایش فشار بر دیواره چاه باعث ایجاد گسیختگی می‌گردد. این فرآیند در صورت داشتن طرحی برای ایجاد شکستگی‌های هیدرولیکی جهت افزایش نرخ تولید، مفید است. اما در صورتی که باعث هرزروی گل حفاری شود، زیان آور می‌باشد و لذا برای کنترل آن نیاز به داده‌های ژئومکانیکی در خصوص گل حفاری است [۹].

برای تصمیم‌گیری بهینه در مورد حفاری و برنامه ریزی چاه در مناطق تحت فشار غیرطبیعی، انجام پیش‌بینی‌های لازم، قبل از حفاری ضروری است. فشارمنفذی^۲، از جمله کمیت‌های مهم در بحث اکتشاف و حفاری منابع نفت و گاز است. وجود فشار منفذی زیاد باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای از جمله فوران چاه، ناپایدار بودن چاه، گیرکردن لوله حفاری و یا از دست دادن چرخش گل حفاری می‌شود. به همین علت به نظر می‌رسد که پیش‌بینی عددی فشار منفذی، در سازندهای با فشار زیاد، قبل از حفاری امری ضروری برای حفاری ایمن و اقتصادی است. در برخی از تحقیقات، فشار منفذی و شیب شکستگی با استفاده از داده‌ها و روش‌های متنوع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل سازی پارامترهای ژئومکانیکی مخزن با هدف آنالیز استرس برجا و رابطه آن با ویژگی‌های مخزنی مانند تخلیه، تولید و پایداری چاه انجام شده است [۱۰]. شناخت تنش‌های ناحیه‌ای، یک نقطه شروع مناسب برای تخمین میدان تنش در بسیاری از حوضه‌ها می‌باشد. میزان جابجایی در امتداد گسل، تنش محلی و به‌خصوص تنش برشی در سطح گسل را مدل ژئومکانیکی تعیین می‌نماید [۹].

بررسی وضعیت زمین شناسی و تشخیص سیال درون مخازن پیش از انجام حفاری بسیار مهم می‌باشد. تلاش‌های زیادی برای این منظور در طی سال‌های اخیر از سوی محققین انجام یافته است [۱۱]. برخی از محققین، پارامترهای ژئومکانیکی را برای تحقیق در خصوص اثر تخلیه و تزریق سیال در مخازن ماسه سنگی محاسبه نمودند [۱۲]. محاسبه مقدار پارامترهای ژئومکانیکی می‌تواند با استفاده از آزمایش بر روی نمونه‌های درون چاهی انجام پذیرد. با این وجود، این روش بسیار گران قیمت و زمان‌بر می‌باشد. از سوی دیگر

عملیات حفاری و مدیریت برخی از میدان‌ها چه از نظر تکنیکی و چه از نظر اقتصادی به دلیل پیچیدگی‌های موجود از قبیل فشار منفذی بالا، ناپایداری دیواره چاه، تراکم مخزن، آسیب لوله جداری، ماسه‌زایی، فرونشست سطحی، عملکرد مجدد گسل‌های موجود در میدان و ... یک چالش بزرگ می‌باشد و ژئومکانیک در ارزیابی تمامی این پارامترها دخیل است [۸]. فعالیت‌های حفاری و بهره‌برداری، تنش محلی را

² Pore Pressure

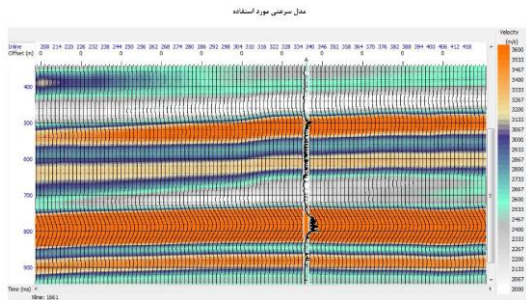
با در دست داشتن امیدانس موج P ، امیدانس موج S و چگالی، که به عنوان خروجی‌های پایه در نظر گرفته می‌شوند، پارامترهای ژئومکانیکی مخزن مورد محاسبه قرار گرفت. این پارامترهای ژئومکانیکی شامل نسبت پواسن و ترکیبی از مدول یانگ می‌باشند.

محاسبه این پارامترها بر مبنای امیدانس‌های صوتی نسبت به محاسبه آن‌ها بر مبنای سرعت دارای دقت بالاتر و اولویت می‌باشد، لذا در این تحقیق از امیدانس‌های صوتی در محاسبات استفاده شد. در نهایت با در دست داشتن مدول‌های الاستیک، پارامترهای لامه و ضریب شکنندگی مخزن مورد محاسبه و تحلیل قرار گرفت. برای صحت سنجی پارامترهای خروجی، از دو روش استفاده گردید. روش اول محاسبه میزان همبستگی میان ردلرزه حاصل از داده‌های لرزه‌ای و ردلرزه مصنوعی تولید شده برای وارون‌سازی می‌باشد. این همبستگی بیش از ۹۰ درصد می‌باشد که مقدار قابل قبولی است. روش دوم استفاده از داده‌های چاه می‌باشد. بدین ترتیب که امیدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی همزمان، با امیدانس صوتی حاصل از یکی از چاه‌های محدوده (چاه C)، در محل چاه و در یک نمودار نقطه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. با ترسیم خط رگرسیون میان این دو پارامتر (امیدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی و نگاره امیدانس صوتی چاه C)، می‌توان میزان همبستگی را در این حالت محاسبه نمود. در اینجا نیز همبستگی بیش از ۹۰ درصد بوده و لذا قابل قبول می‌باشد. این همبستگی برای یکی از پارامترهای ژئومکانیکی نیز مورد محاسبه قرار گرفت. این پارامتر شکنندگی مخزن می‌باشد. از آنجایی که شکنندگی مخزن خود حاصل از دو پارامتر ژئومکانیکی دیگر (مدول یانگ و نسبت پواسن) می‌باشد، همبستگی مناسب میان شکنندگی مخزن و شکنندگی حاصل از نگاره‌ها در محل چاه C می‌تواند تأییدی بر صحت و دقت تمامی نتایج به دست آمده در این تحقیق باشد. همبستگی برای ضریب شکنندگی مخزن (به عنوان خروجی نهایی) بیش از ۷۴ درصد می‌باشد که نشانگر صحت مراحل تحقیق است. جزئیات روش مورد استفاده و توضیحات مربوط به داده‌های ورودی و پارامترهای خروجی مورد نظر، در بخش روش‌شناسی آورده شده است.

نمونه‌های درون چاهی در تمامی چاه‌ها و برای تمامی اعماق در دسترس نمی‌باشد [۱۳]. استفاده از نگاره‌های چاه، روشی سریع‌تر و ارزان‌تر برای محاسبه پارامترهای الاستیک سنگ می‌باشد [۷]. در نتیجه پارامترهای ژئومکانیکی معمولاً غیرمستقیم محاسبه می‌گردند. لذا با استفاده از امواج لرزه‌ای و معادلات مازول‌های الاستیک، پارامترهای متعددی به صورت غیرمستقیم به دست می‌آیند. در برخی از تحقیقات، ترکیب نمودارهای سرعت امواج با نمودار چگالی امکان محاسبه پارامترهای الاستیک را فراهم می‌کند و از این ویژگی‌های ژئومکانیکی در ارزیابی چاه استفاده می‌گردد [۱۴]. حسین پور و ریاحی (۲۰۲۱) از نمودار سرعت امواج فشاری برای تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی و از نمودار صوتی برای محاسبه سرعت امواج P و S استفاده نمودند [۱۵]. در بسیاری از این تلاش‌ها از داده‌های VSP (*VERTICAL SEISMIC PROFILE*) استفاده شده است. با به کارگیری داده‌های VSP تغییرات اشباع و نوع سیال در منافذ سنگ می‌تواند با استفاده از ضریب کیفیت (Q) به دست آید [۱۶]. داده‌های VSP همچنین برای تعیین سرعت امواج در لایه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند و با نگاره‌های صوتی مقایسه می‌گردند [۱۷]. با توجه به برخی تحقیقات، داده‌های VSP می‌تواند برای پیش‌بینی مدول یانگ و نسبت پواسن به کار گرفته شود [۱۸]. با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، مدول یانگ و نسبت پواسن می‌توانند نوسانات را در شکنندگی‌های مرتبط با پایداری چاه و زون‌های شکسته شده نمایش دهند [۱۹]. با وجود تمامی پیشرفت‌های صورت گرفته، کماکان محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های زیادی در روش‌های مرسوم فعلی برای ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی وجود دارد [۲۰].

با توجه به توضیحات فوق، انجام مطالعات بر مبنای داده‌های VSP و نمونه‌گیری‌های درون چاهی، محدود به مناطق خاص یا چاه‌هایی مشخص می‌باشد. در این تحقیق به دنبال روشی هستیم که بتواند دامنه وسیع‌تری از محدوده مطالعاتی (وسیع‌تر از محدوده یک چاه) را پوشش دهد. لذا برای تخمین پارامترهای ژئومکانیکی، از اطلاعات حاصل از لرزه نگاری و همچنین نگاره‌های ۴ حلقه چاه موجود در منطقه استفاده گردید. بدین منظور ابتدا وارون‌سازی بر روی داده‌های لرزه‌ای انجام گرفت. خروجی‌های حاصل از وارون‌سازی شامل امیدانس موج P ، امیدانس موج S و همچنین چگالی می‌باشد.

محدوده در دسترس قرار داشت، داده‌های چاه‌های A ، B و D برای استخراج مدل سرعتی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مدل سرعتی حاصل از داده‌های چاه D برای استخراج مدل سرعتی، انتخاب گردید. نمونه‌ای از مدل سرعتی مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- مدل سرعتی مورد استفاده در وارون‌سازی

این مدل برای کراس لاین شماره ۱۶۶۱ ارائه شده است. برای تهیه مدل سرعتی از داده‌های هر چهار حلقه چاه موجود استفاده شد. در هر مورد، تطبیق مدل سرعتی به دست آمده با سایر چاه‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت. آن چنان که در مدل سرعتی نهایی ملاحظه می‌شود، با آنکه این مدل بر مبنای داده‌های چاه D استخراج شده است اما دارای تطبیق خوبی با نگاره چاه A می‌باشد. به طوری که در فاصله زمانی ۷۵۰ تا ۸۵۰ میلی ثانیه، با افزایش سرعت در نگاره چاه A در مدل سرعتی نیز رنگ مقطع به نارنجی تیره (بیشترین سرعت) تغییر می‌یابد و دلالت بر صحت مدل سرعتی انتخاب شده دارد.

ب- ساخت دسته زاویه‌ای

در ادامه، داده‌های لرزه‌ای که نمونه‌ای از آن‌ها در شکل ۲ دیده می‌شود را به صورت دسته زاویه‌ای در می‌آوریم. برای این منظور حداکثر زاویه را برابر با ۴۰ درجه در نظر می‌گیریم. لازم به ذکر است از مدل سرعتی مرحله قبل، در استخراج دسته زاویه‌ای استفاده می‌گردد. نمونه‌ای از نتایج حاصل، در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد.

مجموع داده‌ها شامل ۲۸۰ اینلاین و ۳۰۰ کراس لاین می‌باشد. داده‌ها از نوع سه‌بعدی و پیش از برنابارش بوده و این

۲. داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی یکی از میادین ماسه سنگی جنوب ایران و از نوع پیش از برنابارش می‌باشد. به علاوه نگاره ۴ حلقه چاه موجود در محدوده مطالعاتی به انضمام داده‌های شات کنترلی^۳ نیز به کار گرفته شد. داده‌های چاه‌ها شامل نگاره‌های امیدانس‌های صوتی و چگالی می‌باشد.

۱.۲. روش شناسی

در اولین مرحله برای استخراج امیدانس‌های صوتی و چگالی از وارون‌سازی همزمان استفاده می‌کنیم. مطابق با یافته‌های آکی و ریچاردز [۲۱] این وارون‌سازی بر مبنای معادله زوپریتس^۴ انجام می‌گردد. این معادله به صورت ذیل می‌باشد [۲۱]:

$$R(\theta) = A + B \times \sin^2(\theta) + C \times \sin^2(\theta) \times \tan^2(\theta) \quad (1)$$

در این رابطه $R(\theta)$ ضریب بازتاب در زاویه θ ، θ میانگین زوایای تابش و بازتابش در صفحه سطح مشترک منعکس کننده، A ضریب بازتابش و B شیب AVO می‌باشد.

با وارون‌سازی همزمان می‌توان در وحله اول امیدانس‌های صوتی و چگالی و در وحله دوم اطلاعاتی از وضعیت زمین شناسی و ژئومکانیکی مخزن به دست آورد [۲۲]. در این تحقیق ابتدا داده‌های لرزه‌ای را به صورت دسته زاویه‌ای^۵ در می‌آوریم. پس از تنظیم مشخصات وارون‌سازی که در بخش بعدی به صورت تفصیلی توضیح داده شده است، همبستگی میان ردلرزه حاصل از داده‌های لرزه‌ای و ردلرزه تولید شده برای وارون‌سازی را محاسبه می‌کنیم. برای اطمینان از دقت وارون‌سازی این همبستگی بهتر است بیش از ۹۰ درصد باشد.

شرح تفصیلی مراحل طی شده برای انجام وارون‌سازی جهت استخراج خروجی‌های اولیه به شرح ذیل است:

الف- ساخت مدل سرعتی

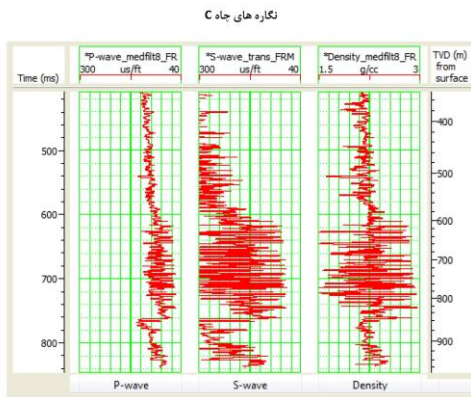
برای ساخت مدل سرعتی مناسب، این مدل هم از طریق داده‌های چاه و هم از طریق داده‌های لرزه‌ای استخراج گردید. با توجه به این که داده‌های ۴ حلقه چاه A ، B ، C و D

⁵ Angel Gather

³ Check shot

⁴ Zooppritz

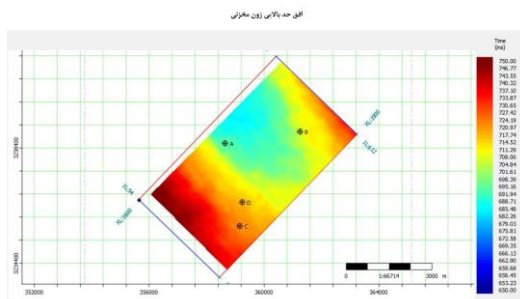
استفاده قرار گرفت.



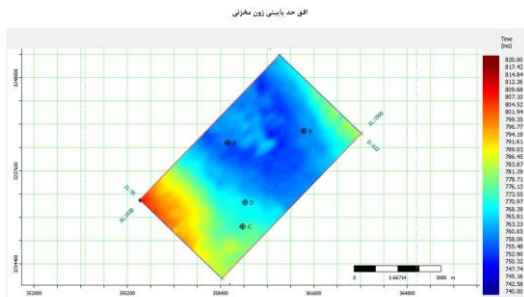
شکل ۴- نگاره‌های چاه C شامل امپدانس‌های صوتی و چگالی.

د- انتخاب افق‌های لرزه‌ای

در این مرحله دو افق لرزه‌ای که شامل حد بالایی و حد پایینی زون مخزنی می‌باشند با استفاده از داده‌های چاه‌ها و با دقت بالا مورد ترسیم قرار گرفت. این افق‌ها در شکل ۵ ("الف" و "ب") ملاحظه می‌گردند. موقعیت چهار حلقه چاه نیز در این شکل مشخص شده است.

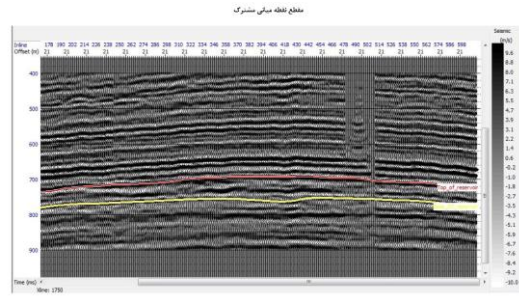


شکل ۵- الف- افق حد بالایی زون مخزنی.

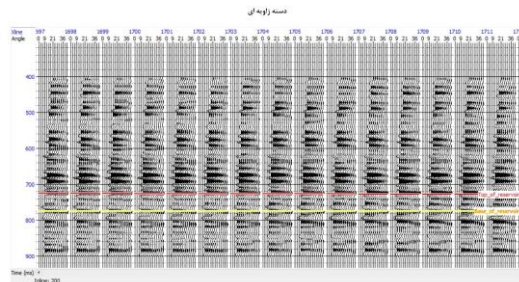


شکل ۵- ب- افق حد پایینی زون مخزنی.

کراس لاین به صورت نمونه انتخاب گردیده است. علاوه بر داده‌های لرزه‌ای، دو افق بالایی (رنگ قرمز) و پایینی (رنگ زرد) زون مخزنی نیز در این شکل مشخص شده است.



شکل ۲- مقطع نقطه میانی مشترک داده‌های لرزه‌ای برای کراس لاین شماره ۱۷۵۰.



شکل ۳- دسته زاویه‌ای حاصل از داده‌های لرزه‌ای (اینلاین ۲۰۰).

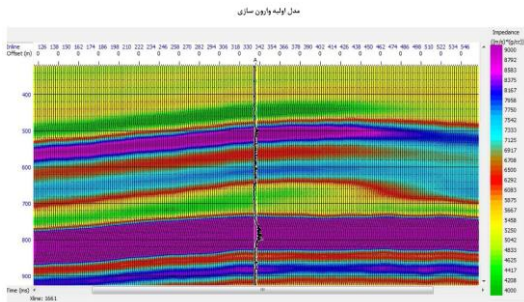
در این دسته زاویه‌ای از زوایای ۰ تا ۴۰ درجه استفاده شده و مدل سرعتی به دست آمده در شکل ۱، در استخراج آن به کار گرفته شده است.

ج- انتخاب چاه‌های وارون‌سازی

آنچنان که ذکر شد؛ داده‌های چهار حلقه چاه در محدوده در دسترس می‌باشد. از این میان داده‌های سه حلقه چاه A، B و D در وارون‌سازی به کار گرفته شد. شایان ذکر است داده‌های چاه C نیز در مراحل بعدی و جهت صحت سنجی وارون‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نظر به اهمیت چاه C در این مطالعات به عنوان مرجع صحت سنجی، نمونه‌ای از داده‌های این چاه در شکل ۴ به نمایش درآمده است.

این نگاره‌ها در فاصله زمانی ۴۰۰ تا ۹۰۰ میلی ثانیه که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، دارای داده می‌باشند و لذا این چاه برای بررسی صحت سنجی نتایج مورد

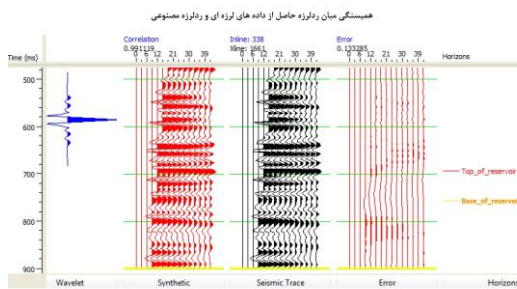
آمد. آن چنان که ملاحظه می‌شود با افزایش امیدانس صوتی در نگاره چاه A در محدوده زمانی متوسط ۸۰۰ میلی ثانیه، رنگ مقطع نیز به رنگ بنفش تغییر می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش میزان امیدانس صوتی در مدل اولیه در این محدوده زمانی است و اثباتی بر صحت مدل می‌باشد.



شکل ۷- مدل اولیه وارون‌سازی در کراس لاین ۱۶۶۱.

ز- کنترل کیفیت وارون‌سازی

پیش از انجام وارون‌سازی، همبستگی میان ردلرزه حاصل از داده‌های لرزه‌ای و ردلرزه تولید شده برای وارون‌سازی را محاسبه می‌کنیم. در صورتی که میزان این همبستگی بیش از ۹۰٪ باشد، می‌توان نتیجه گرفت وارون‌سازی با کیفیت مناسبی انجام می‌گردد. آن چنان که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد، میزان همبستگی در این حالت برابر با ۰٫۹۹۱۱۱۹ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت مراحل وارون‌سازی با دقت مناسب انجام گرفته‌اند.



شکل ۸- همبستگی میان ردلرزه حاصل از داده‌های لرزه‌ای و ردلرزه مصنوعی.

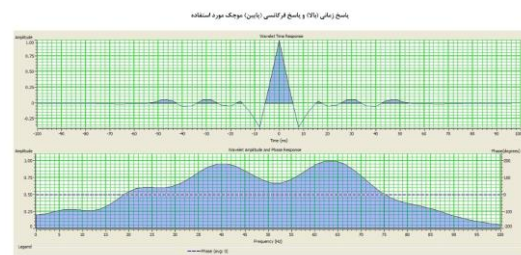
میزان همبستگی برابر با ۰٫۹۹۱۱۱۹ و میزان خطای وارون‌سازی برابر با ۰٫۱۳۳۲۸۵ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت، وارون‌سازی با دقت مناسب انجام شده است. با طی مراحل فوق، وارون‌سازی صورت پذیرفت.

برای ترسیم این افق‌ها از داده‌های چاه‌های موجود استفاده شده است. این افق منطبق بر حد بالایی زون مخزنی می‌باشد.

موقعیت چهار حلقه چاه موجود در محدوده نیز بر روی افق‌ها مشخص شده است. موقعیت چاه‌ها دارای توزیع خوبی در محدوده مورد مطالعه بوده به طوری که می‌توان از نگاره‌های چاه در نقاط مختلف محدوده استفاده کرد.

ه- استخراج موجک آماری

این یکی از مهم‌ترین مراحل وارون‌سازی می‌باشد. بدین منظور موجک‌های متعدد با دو روش آماری و استفاده از داده‌های چاه، مورد استخراج قرار گرفت. در نهایت مناسب‌ترین موجک که به صورت آماری استخراج شده بود جهت طی مراحل بعدی انتخاب گردید. پاسخ‌های زمانی و فرکانسی این موجک در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۶- پاسخ زمانی (بالا) و پاسخ فرکانسی (پایین) موجک مورد استفاده در وارون‌سازی.

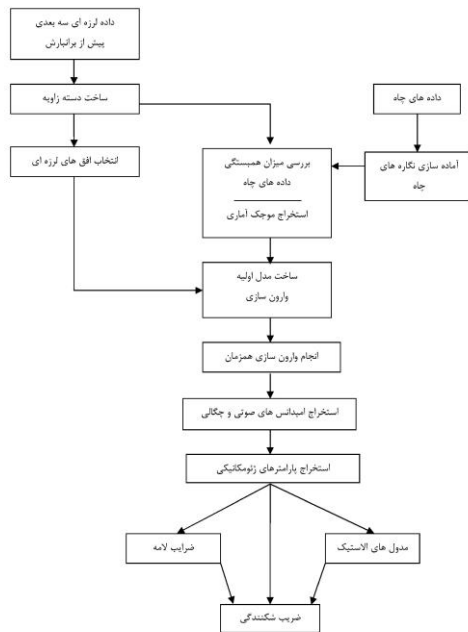
استخراج موجک به دو صورت استفاده از داده‌های چاه و همچنین به روش آماری صورت گرفت. در هر مورد میزان خطای وارون‌سازی با توجه به نوع موجک مورد استفاده، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت این موجک که از نوع آماری می‌باشد، به عنوان بهترین موجک با کمترین خطای وارون‌سازی، انتخاب شد.

و- ساخت مدل اولیه

با استفاده از پارامترهای به دست آمده در مراحل الف تا ه، مدل اولیه برای انجام وارون‌سازی ساخته شد. یک مقطع از این مدل در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد. با استفاده از دسته زاویه‌ای استخراج شده، داده‌های چاه‌های موجود و موجک استخراج شده، مدل اولیه به دست

۱۰ آورده شده است.

فلوچارت مراحل تحقیق



شکل ۱۰- فلوچارت نشان دهنده خلاصه مراحل تحقیق.

با توجه به این فلوچارت، برای انجام تحقیق، ابتدا وارون سازی همزمان صورت می پذیرد، سپس با استفاده از وارون سازی امپدانس های صوتی و چگالی استخراج می شوند. با در دست داشتن این نتایج پایه، پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول های الاستیک، ضرایب لانه و ضریب شکنندگی مخزن به دست می آیند.

۳. نتایج

۳.۱. نسبت پواسن

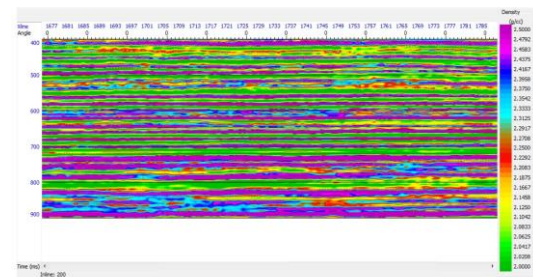
این نسبت در تشخیص شکنندگی مخزن، تفکیک شیل از ماسه سنگ و سیال درون مخزن اثرگذار می باشد. در این تحقیق برای محاسبه دقیق تر نسبت پواسن، از تفکیک سرعت و چگالی جلوگیری نموده و مستقیماً آن را از روی امپدانس های صوتی محاسبه می نماییم. رابطه به کار رفته در این حالت به شکل ذیل است [۲۳].

$$Poisson\ Ratio = (Ip^2 - 2Is^2) / (2Ip^2 - Is^2) \quad (2)$$

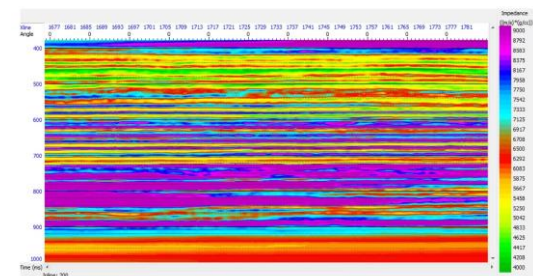
در این رابطه Ip و Is به ترتیب نمایانگر امپدانس امواج P و

خروجی های به دست آمده شامل امپدانس موج P ، امپدانس موج S و چگالی می باشد. این خروجی ها به ترتیب در شکل ۹ به نمایش در آمده اند. با استفاده از این خروجی ها به محاسبه مدول های الاستیک و سایر پارامترهای ژئومکانیکی به شرح مراحل بعدی می پردازیم.

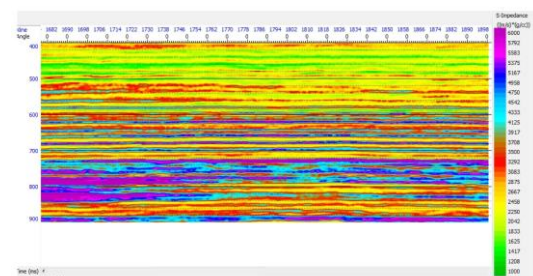
نتایج حاصل از وارون سازی - چگالی



نتایج حاصل از وارون سازی - امپدانس موج P



نتایج حاصل از وارون سازی - امپدانس موج S



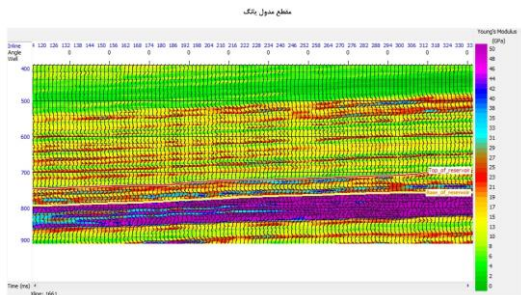
شکل ۹- نتایج حاصل از انجام وارون سازی.

در این شکل ها امپدانس موج P (بالا)، امپدانس موج S (وسط) و چگالی (پایین) به نمایش در آمده است. تمامی پارامترهای ژئومکانیکی بر مبنای این پارامترها قابل محاسبه هستند و از آنجایی که این نتایج، پایه محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی می باشند، آن ها را نتایج پایه نامیدیم. وارون سازی برای تمامی داده های موجود شامل ۲۸۰ اینلاین و ۳۰۰ کراس لاین انجام شد. در این شکل نمونه ای از خروجی های پایه برای اینلاین شماره ۲۰۰ به نمایش در آمده است.

خلاصه مراحل طی شده به صورت فلوچارت در شکل

$$Young's Modulus = \rho V_s^2 \times ((3Vp^2 - 4Vs^2) / (Vp^2 - Vs^2)) \quad (3)$$

در این رابطه Vp و Vs به ترتیب سرعت امواج P و S بوده و ρ معادل چگالی می‌باشد. مدول یانگ بر مبنای این رابطه محاسبه شده و در شکل ۱۲ آورده شده است.

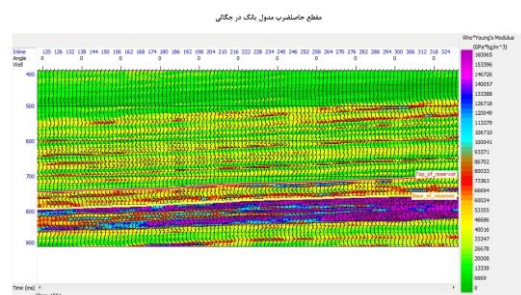


شکل ۱۲- مقطع مدول یانگ

در این مقطع حد پایینی زون مخزنی به خوبی از زون زیرین با رنگ بنفش جدا شده است. این نشان از توانایی مدول یانگ در تفکیک زون مخزنی از سایر زون‌ها دارد. مطابق با این رابطه محاسبه مدول یانگ مستلزم محاسبه چگالی و همچنین سرعت امواج لرزه‌ای می‌باشد. محاسبه چگالی مستلزم داشتن داده‌ای با دورافت طولانی است و این مهم همواره در دسترس نمی‌باشد. بدین منظور در این تحقیق به محاسبه حاصل ضرب چگالی در مدول یانگ و ترسیم مقطع آن می‌پردازیم. رابطه مورد استفاده به شکل رابطه ۳ می‌باشد [۲۳].

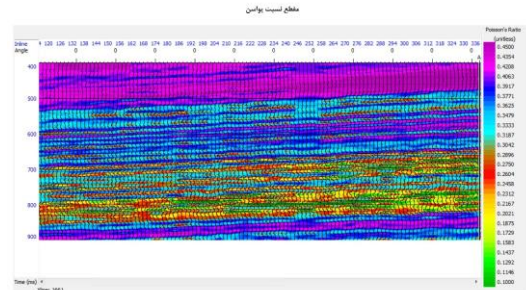
$$Young's Modulus \times \rho = Is^2 \times ((3Ip^2 - 4Is^2) / (Ip^2 - Is^2)) \quad (4)$$

مقطع ترسیمی از حاصل ضرب چگالی در مدول یانگ بر مبنای رابطه ۴ در شکل ۱۳ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۱۳- مقطع حاصلضرب پارامتر مدول یانگ در چگالی

S می‌باشد. نمونه‌ای از نتایج به دست آمده برای محاسبه نسبت پوآسن در شکل ۱۱ آورده شده است.



شکل ۱۱- مقطع نسبت پوآسن.

نسبت پوآسن برای کل مخزن محاسبه شده ولی در این مقطع برای کراس لاین ۱۶۶۱ به نمایش در آمده است. یادآور می‌شود زون مخزنی در فاصله زمانی تقریبی ۷۵۰ تا ۸۰۰ میلی ثانیه قرار دارد. ملاحظه می‌گردد در این محدوده، رنگ مقطع از رنگ غالب آبی به طیف سبز تا قرمز تغییر می‌یابد. این تغییر نشانگر کاهش میزان نسبت پوآسن بوده و این مهم حاصل از افزایش میزان ماسه سنگ و کاهش شیل می‌باشد که نشانه‌ای برای تأیید وجود زون مخزنی در این محدوده زمانی است.

آنچنان که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد در فاصله زمانی تقریبی ۷۵۰ تا ۸۰۰ میلی ثانیه، رنگ مقطع از رنگ غالب آبی به طیف سبز تا قرمز تغییر می‌یابد. این تغییر رنگ با توجه به راهنمای رنگ، نشانگر کاهش میزان نسبت پوآسن می‌باشد. از طرفی با فرض این مهم که کاهش میزان نسبت پوآسن می‌تواند نشانگر افزایش میزان ماسه سنگ باشد و افزایش این نسبت به معنی افزایش میزان شیل است، می‌توان وجود زون مخزنی ماسه سنگی در محدوده زمانی ۷۵۰ تا ۸۰۰ میلی ثانیه را مورد تأیید قرار داد. این نتیجه دارای تطبیق با داده‌های حاصل از چاه‌ها و افق‌های لرزه‌ای ترسیم شده نیز می‌باشد.

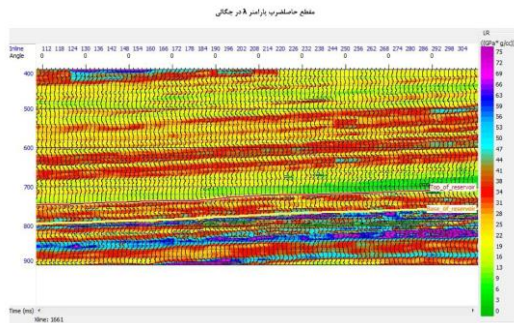
۲.۳. مدول یانگ

مدول یانگ نیز تأثیر بسزایی در تعیین میزان شکنندگی مخزن، زمین‌شناسی و نسبت شیل به ماسه سنگ و مشخص نمودن سیال درون مخزنی دارد. رابطه به کار گرفته شده برای محاسبه مدول یانگ به صورت رابطه ۳ می‌باشد [۲۴].

رابطه ۶ محاسبه می‌گردد [۲۶].

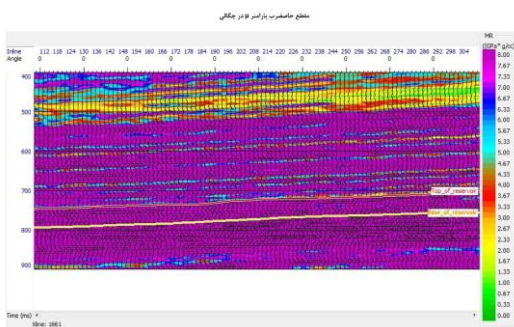
$$\mu\rho \text{ or } Mu\text{-Rho } (MR) = I_2^2 \quad (۶)$$

با توجه به روابط ۵ و ۶ حاصل ضرب ضرایب لامه در چگالی محاسبه گردید و در شکل ۱۴ ("الف" و "ب") ارائه شده است.



شکل ۱۴-الف - مقطع حاصلضرب پارامتر μ در چگالی.

با توجه به اینکه زون مخزنی دربرگیرنده هیدروکربن می‌باشد، بنابراین حاصلضرب پارامتر لامبدا در چگالی در این زون نسبت به زون زیرین دارای مقدار کمتری است. به طوری که زون زیرین دارای رنگ غالب آبی تا بنفش و زون مخزنی دارای رنگ غالب زرد تا قرمز می‌باشد که نشان‌دهنده مقادیر کمتر حاصلضرب پارامتر لامبدا در چگالی در زون مخزنی است.



شکل ۱۴-ب - مقطع حاصلضرب پارامتر λ در چگالی

حاصلضرب پارامتر μ در چگالی مستقل از سیال درون حفرات می‌باشد. لذا چنان که در این شکل نیز ملاحظه می‌شود این پارامتر نمی‌تواند تفکیک مناسبی میان زون مخزنی و سایر زون‌ها ایجاد کند.

مطابق با شکل ۱۴-الف (مقطع حاصلضرب پارامتر μ در چگالی) زون مخزنی با رنگ غالب زرد تا قرمز و زون زیرین با

در این مقطع زون زیرین محدوده مخزنی، به خوبی با رنگ بنفش از زون مخزنی تفکیک شده است. اما در این مقطع تغییرات رنگی بیشتری ملاحظه می‌گردد که نشانگر امکان مشاهده جزئیات بیشتر با استفاده از نشانگر حاصلضرب پارامتر مدول یانگ در چگالی می‌باشد. به طوری که در زون زیرین مخزن، علاوه بر رنگ بنفش، میان لایه‌های دیگری با طیف نارنجی تا آبی قابل تشخیص است.

همانگونه که ملاحظه می‌شود، محدوده‌های دارای زمان بیش از حدود ۸۰۰ میلی ثانیه با رنگ بنفش از افق لرزه‌ای پایینی زون مخزنی تفکیک شده است. با توجه به راهنمای رنگ شکل، رنگ بنفش نشانگر بیشترین میزان مدول یانگ می‌باشد. با فرض این موضوع که کاهش میزان مدول یانگ نشانگر افزایش مقدار ماسه سنگ در مخزن بوده و افزایش آن نشان‌دهنده کاهش میزان ماسه سنگ و لذا خروج از زون مخزنی می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت، زون زیرین مخزن به خوبی با رنگ بنفش از زون مخزنی تفکیک شده است. این مهم منطبق با داده‌های چاه و افق‌های لرزه‌ای ترسیمی نیز می‌باشد. شایان ذکر است تفکیک زون مخزنی در هر دو شکل ۱۲ و ۱۳ به خوبی انجام شده است. لذا هم مدول یانگ و هم حاصل ضرب مدول یانگ در چگالی می‌توانند به خوبی زون مخزنی را از سایر زون‌ها تفکیک نمایند.

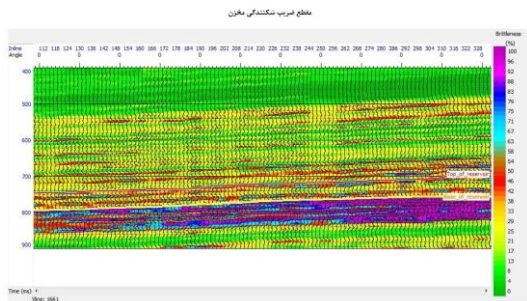
۳.۳. ضرایب لامه ($Mu\text{-Rho}$ & $Lambda\text{-Rho}$)

لامبدا (λ) یا پارامتر اول لامه حاصل از موج P بوده و به عنوان نشانگر تراکم ناپذیری شناخته می‌شود. تغییر در سیال درون مخزن از آب شور به نفت و سپس به گاز موجب کاهش تراکم ناپذیری می‌گردد [۲۵]. بر این مینا با تغییر سیال از آب به گاز میزان لامبدا کاهش خواهد یافت. لذا به محاسبه آن در این تحقیق با رابطه ۵ می‌پردازیم [۲۶].

$$\lambda\rho \text{ or } Lambda\text{-Rho } (LR) = I_2^2 - 2I_1^2 \quad (۵)$$

میو (μ) یا پارامتر دوم لامه حاصل از موج S بوده و نشانگر میزان سختی می‌باشد. لذا انتظار می‌رود دارای مقدار بیشتری برای ماسه سنگ در مقایسه با شیل باشد و از آنجایی که نسبت به سیال درون مخزن حساس نیست، به عنوان نشانگر زمین‌شناسی به کار گرفته می‌شود. این پارامتر با استفاده از

(صد درصد) نزدیک گردد، محیط مستعد مخزن هیدروکربنی نمی‌باشد. دوم اینکه این ضریب می‌تواند به عنوان یک معیار نهایی که هم نسبت پوآسن و هم مدول یانگ را در بر گرفته است، به عنوان نشانگری برای تشخیص زون مخزنی به کار گرفته شود. با استفاده از این رابطه ضریب شکنندگی برای کل مخزن محاسبه شده و در شکل ۱۵ به نمایش در آمده است. در شکل ۱۵ زون زیرین مخزن، به خوبی از زون مخزنی تفکیک شده است. زون زیرین دارای حداکثر ضریب شکنندگی (رنگ بنفش) می‌باشد. اما زون مخزنی دارای رنگ‌های طیف سبز تا زرد (ضریب شکنندگی کمتر) می‌باشد.



شکل ۱۵- مقطع ضریب شکنندگی مخزن.

در این مقطع زون زیرین مخزن، به خوبی از زون مخزنی تفکیک شده است. زون زیرین دارای حداکثر ضریب شکنندگی می‌باشد. اما زون مخزنی دارای رنگ‌های طیف سبز تا زرد (ضریب شکنندگی کمتر) می‌باشد که نشانگر امکان ذخیره هیدروکربن در این زون است. این مقطع دارای رفتار مشابهی با مقاطع نسبت پوآسن و مدول یانگ است.

۵.۳. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ترسیم نمودار نقطه‌ای

آنچنان که در بخش روش‌شناسی ذکر شد، پارامتر پایه برای محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی، امپدانس صوتی می‌باشد. بر این اساس برای بررسی کیفیت خروجی‌ها، امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی همزمان را با امپدانس صوتی حاصل از نگاره یکی از چاه‌ها (چاه C) مورد مقایسه قرار می‌دهیم. برای این منظور از نمودار نقطه‌ای^۶ استفاده می‌نماییم. نمودار نقطه‌ای یک نمایش گرافیکی از دو پارامتر یا بیشتر می‌باشد

رنگ آبی تفکیک شده‌اند. لذا می‌توان نتیجه گرفت پارامتر اول لامه به خوبی می‌تواند زون مخزنی را جداسازی نماید. اما در شکل ۱۴-ب (مقطع حاصلضرب پارامتر μ در چگالی) آن چنان که انتظار می‌رفت تفکیک خوبی میان زون مخزنی و زون زیرین اتفاق نیفتاده است و هردو به رنگ بنفش دیده می‌شوند. این موضوع حاصل از این واقعیت است که پارامتر دوم لامه به سیال درون مخزن حساس نبوده و لذا نمی‌تواند به خوبی زون مخزنی را تفکیک کند. یافته‌های سایر محققین نیز این موضوع را مورد تأیید قرار می‌دهد [۲۷].

۴.۳. ضریب شکنندگی مخزن

شکنندگی معیاری برای توصیف تغییر شکل سنگ‌های تحت تنش می‌باشد [۲۸]. مدول‌های الاستیک شامل مدول یانگ و نسبت پوآسن دارای رابطه با ضریب شکنندگی مخزن می‌باشند. به طوری که مقادیر کمتر برای مدول یانگ و نسبت پوآسن، محدوده‌ای غنی‌تر از نظر هیدروکربنی را به همراه خواهد داشت [۲۹]. از این رو می‌توان نتیجه گرفت با محاسبه این ضریب، اطلاعات مفیدی در خصوص زمین‌شناسی مخزن به دست می‌آید. در عمل استخراج نمونه‌های متعدد از تمامی چاه‌های محدوده جهت محاسبه این ضریب بسیار پرهزینه می‌باشد [۳۰]. لذا در این تحقیق با استفاده از داده‌های لرزه‌ای اقدام به محاسبه این ضریب برای کل مخزن می‌نماییم. در اینجا از رابطه ۷ برای محاسبه ضریب شکنندگی مخزن استفاده می‌کنیم [۳۱].

$$BRI = 100 * (w * \frac{(PR_{max}-PR)}{PR_{max}-PR_{min}} + (1-w) * \frac{(E-E_{min})}{E_{max}-E_{min}}) \quad (7)$$

در این رابطه BRI ضریب شکنندگی مخزن، PR نسبت پوآسن و E مدول یانگ می‌باشد. w یک ضریب ثابت بوده که معمولاً^۶ برابر با نیم در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه ضریب شکنندگی مخزن حاصل از ترکیب نسبت پوآسن و مدول یانگ می‌باشد، دو موضوع مهم استنتاج می‌گردد. اول اینکه این ضریب دارای رفتار مشابهی با نسبت پوآسن و مدول یانگ در برخورد با زون مخزنی است. به طوری که در محدوده مخزن، مقدار این ضریب کاهش می‌یابد. لذا در صورتی که مقدار ضریب شکنندگی به عدد ۱

⁶ Scatter Diagram

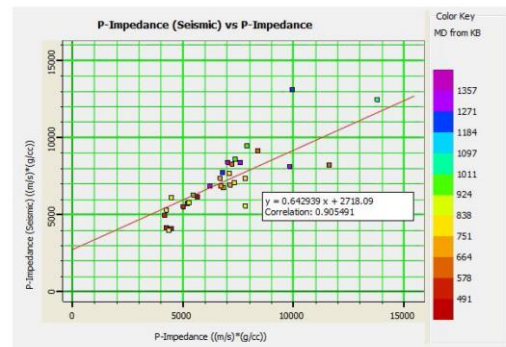
داده‌های حاصل از مقطع لرزه‌ای و داده‌های نگاره چاه C دارای بیش از ۹۰٪ همبستگی می‌باشند که اعتبار نتایج حاصل از وارون‌سازی را مورد تأیید قرار می‌دهد. محور افقی این نمودار شامل داده‌های ضریب شکنندگی محاسبه شده برای چاه C و محور عمودی آن ضریب شکنندگی حاصل از داده‌های لرزه‌ای می‌باشد. میزان همبستگی در این مورد بیش از ۷۴٪ است. با توجه به این که ضریب شکنندگی آخرین خروجی محاسبه شده در این تحقیق است و برای محاسبه آن ابتدا امیدانس‌های صوتی و سپس مدول‌های الاستیک مورد محاسبه قرار گرفته‌اند، این میزان همبستگی مناسب می‌باشد.

۴. نتیجه گیری

با محاسبه و تهیه مقاطع زمانی به دست آمده از پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول یانگ، نسبت پواسن، ضرایب لامه و ضریب شکنندگی مخزن، زون‌های یک مخزن هیدروکربنی از دیدگاه پتانسیل مخزنی مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا مقطع حاصل از مدول یانگ با مقطع حاصل از ضرب مدول یانگ در چگالی مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داده شد که حاصل ضرب مدول یانگ در چگالی، دارای دقت بیشتری در تفکیک زون‌های مخزنی است. نتیجه دیگری که از این تحقیق حاصل شد ضریب شکنندگی مخزن است. از آنجایی که این ضریب، به دست آمده از نسبت پواسن و مدول یانگ است، رفتار مشابهی با این مدول‌های الاستیک (نسبت پواسن و مدول یانگ) را نشان داد و در تفکیک زون مخزنی عملکرد موثری را ارائه نمود. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند مورد استفاده مهندسی نفت در خصوص تعیین محل بهینه حفاری قرار گیرد. تشخیص سیال درون مخزن با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی یکی دیگر از اهداف تحقیق در مطالعات آینده نگارندگان این مقاله است، به طوری که بتوان تفکیک مناسبی میان حضور آب شور و یا هیدروکربن در مخزن را ارائه نمود.

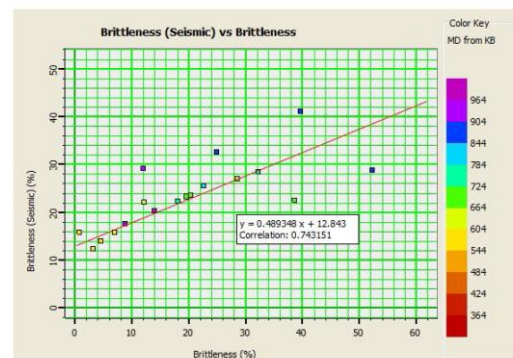
که می‌تواند مفاهیم بیشتری را به آسانی در خصوص ویژگی‌های مخزن ارائه نماید [۳۲]. نتیجه حاصل در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. در این نمودار محور افقی مربوط به داده‌های امیدانس صوتی چاه C و محور عمودی امیدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی می‌باشد. با توجه به خط رگرسیون ترسیمی، همبستگی میان این دو برابر با ۰٫۹۰۵۴۹۱ (بیش از ۹۰ درصد) می‌باشد. بنابراین نتایج قابل اعتماد هستند. آخرین خروجی به دست آمده در این تحقیق، ضریب شکنندگی مخزن می‌باشد. لذا میزان همبستگی ضریب شکنندگی استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای با ضریب شکنندگی حاصل از نگاره‌های چاه، در محل چاه C در یک نمودار نقطه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. میزان همبستگی در این مورد برابر با ۷۴ درصد می‌باشد که مقدار قابل قبولی است.

کنترل کیفی نتایج با استفاده از امیدانس موج P.



شکل ۱۶- نمودار نقطه‌ای کنترل کیفی نتایج با استفاده از امیدانس موج P.

کنترل کیفی نتایج با استفاده از شکنندگی مخزن



شکل ۱۷- نمودار نقطه‌ای کنترل کیفی نتایج با استفاده از شکنندگی مخزن

wellbore stability analysis utilizing acoustic impedance and reflection coefficient in a carbonate reservoir. J Pet Explor Prod Technol 11(11):3935–3961

[8] Afsari, M., Ghafoori, M. R., et al. (2009). Mechanical Earth Model (MEM): An Effective Tool for Borehole Stability Analysis and Managed Pressure Drilling (Case Study). Presented at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain.

[9] Akbar Ali, A. H., Brown, T., et al. (2003). Watching Rocks Change Mechanical Earth Modeling Oilfield Review. Vol. 15, P. 22-39.

[10] Radwan AE, Abdelghany WK, Elkhawaga MA. (2021). Present-day insitu stresses in Southern Gulf of Suez, Egypt: insights for stress rotation in an extensional rift basin. J Struct Geol 147:104334

[11] Pelletier H. (2009). AVO Cross plotting II: Examining Vp/Vs behavior: CSPG, CSEG, CWLS Convention, Calgary, Alberta, Canada, 105-110

[12] Kassem AA, Sen S, Radwan AE, Abdelghany WK, Abioui M. (2021). Effect of depletion and fluid injection in the Mesozoic and paleozoic sandstone reservoirs of the October oil field, central Gulf of Suez Basin: implications on drilling, production and reservoir stability. Nat Resour Res 30(3):2587–2606

[13] Kong L, Ostadhassan M, Zamiran S, Bo Liu, Chunxiao Li, Gennaro G. Marino. (2019). Geomechanical upscaling methods: comparison and verification via 3D printing. Energies 12(3):382

[14] Khoshnevis-zadeh R, Soleimani B, Larki E. (2019). Using drilling data to compare geomechanical parameters with porosity (a case study, South Pars gas field, south of Iran). Arab J Geosci 12(20):611

[15] Hoseinpour M., Riahi M.A. (2021). Determination of the mud weight window, optimum drilling trajectory, and wellbore stability using geomechanical parameters in one of the Iranian hydrocarbon reservoirs. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 12(13):1-20

[16] Shahbazi, K., Zarei, A.H., Shahbazi, A., Tanha, A.A. (2020). Investigation of production depletion rate effect on the near-wellbore stresses in the two Iranian southwest oilfields. Petrol. Res. 8, 231e243.

[17] Yang, J., Zong, J., Li, Y., Cheng, A. (2020). Application of Reverse Time Migration with Random Space Shift to Vertical Seismic Profiling (VSP) Data, 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 1e5.

[18] Rutqvist J., Moridis G.J., Grover T., Collett T. (2009). Geomechanical response of permafrost-associated hydrate deposits to depressurization-induced gas production. Journal of Petroleum Science and Engineering. Volume 67, Issues 1–2, Pages 1-12

۵. فهرست نمادها

جدول ۱- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد
امپدانس موج P	$kg/(m^2s)$	I_p
امپدانس موج S	$kg/(m^2s)$	I_s
سرعت موج P	m/s	V_p
سرعت موج S	m/s	V_s
چگالی	Kg/m^3	ρ
پارامتر اول لامه	N/m^2	λ
پارامتر دوم لامه	N/m^2	μ
نسبت پواسن	بدون واحد	PR
مدول یانگ	N/m^2	E
ضریب شکنندگی مخزن	بدون واحد	BRI

۶. فهرست منابع

[1] Guo S, Wang H. (2019). Seismic absolute acoustic impedance inversion with L1 norm reflectivity constraint and combined first and second-order total variation regularizations. J Geophys Eng 16(4):773–788

[2] Mandal A, Ghosh SK. (2020) Estimating broad trend of acoustic impedance profile from observed seismic reflection data using first principles only. J Geophys Eng 17(3):475–483

[3] Das B, Chatterjee R.. (2017) Wellbore stability analysis and prediction of minimum mud weight for few wells in Krishna–Godavari Basin, India. Int J Rock Mech Min Sci 93:30–37

[4] Nakaten N, Schlüter R, Azzam R, Kempka T. (2014). Development of a techno-economic model for dynamic calculation of the cost of electricity, energy demand, and CO2 emissions of an integrated UCG–CCS process. Energy 66:779–790

[5] Chen, Q., and Sidney, S. (1997). Seismic Attribute Technology for Reservoir Forecasting and Monitoring. The Leading Edge, Vol. 16, P. 445–456.

[6] Han Y, Liu C, Phan D, AlRuwaili K, Abousleiman Y. (2019). Advanced wellbore stability analysis for drilling naturally fractured rocks. In: SPE middle east oil and gas show and conference. Society of Petroleum Engineers

[7] Bagheri H, Tanha AA, Doulati Ardejani F, Heydari-Tajareh M, Larki E. (2021). Geomechanical model and

- [31] Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W. V., & Kundert, D. (2008). 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. OnePetro.
- [32] Castagna JP, Swan HW. (1987). Principle of AVO crossposting, Lead Edge 12:337-343
- [19] Das B, Chatterjee R. (2018). Mapping of pore pressure, in-situ stress, and brittleness in unconventional shale reservoir of Krishna-Godavari basin. J Natural Gas Sci Eng 50:74-89
- [20] Wu, X., Willis, M.E., Palacios, W., Ellmuthaler, A., Barrios, O., Shaw, S., Quinn, D. (2017). Compressional and shear-wave studies of distributed acoustic sensing acquired vertical seismic profile data. Lead. Edge 36 (12), 987e993.
- [21] Aki K, Richards PG. (1980). Quantitative seismology. Freeman, W. H. and Co San Francisco, p 557
- [22] Goodway B. (2013). A tutorial on AVO and Lamé constants for rock parameterization and fluid detection. Geophysical Society of Alaska, http://gsa.seg.org/pdf_forms/RecorderJune2001LMRAVO_new2007july.pdf
- [23] Sharma R, Chopra S.; 2012: New attribute for determination of lithology and brittleness. SEG Las Vegas Annual Meeting. Canada, P. 1-5
- [24] Zoback MD (2010) Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, Cambridge
- [25] Ogbamikhumi, A. Igbini, N. S. (2020). Rock physics attribute analysis for hydrocarbon prospectivity in the Eva field onshore Niger Delta Basin. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10:3127-3138.
- [26] Goodway W, Chen T, Downton J. (1997). Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using lame petrophysical parameters. The society of exploration geophysicists; In: 67th annual international meeting, Denver.
- [27] Ujuanbi, O., J.C. Okolie, and S.I. Jegede. (2008). Lambda-Mu-Rho techniques as a viable tool for litho-fluid discrimination- the Niger Delta example: International Journal of Physical Sciences, v. 2/7, p. 173-176.
- [28] Coates, D.F., and R.C. Parsons. (1966). Experimental criteria Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 3, 181-189, DOI: 10.1016/0148-9062 (66)90022-2.
- [29] Perez, R. and Marfurt, K. (2013). "Brittleness estimation from seismic measurements in unconventional reservoirs: Application to the Barnett Shale", ConocoPhillips School of Geology and Geophysics, The University of Oklahoma, SEG Houston Annual Meeting. P. 2258-2263
- [30] Zhang, B. Zhao, T. Jin, X. and Marfur, K.J. (2015). Brittleness evaluation of resource plays by integrating petrophysical and seismic data analysis. Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists Technical paper, Vol. 3, No. 2, P. T81-T92, 13 FIGS.