

کاربرد پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از وارون سازی داده های لرزه ای پیش از برانبارش برای بهینه سازی حفاری

پیمان عزیزی شوشبلاغ^۱، علی کدخدائی^{۲*}

۱- دانشکده ی علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

peymanazizi456@gmail.com

۲- گروه علوم زمین، دانشکده ی علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

ایمیل: kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

چکیده

با توجه به چالش های موجود در تعیین محل بهینه حفاری در مخازن هیدروکربنی، به ویژه در مناطق پیچیده زمین شناسی، ارزیابی دقیق خصوصیات ژئومکانیکی و کیفیت مخزنی اهمیت بسزایی در کاهش ریسک حفاری و افزایش بهره وری دارد. در این تحقیق، به منظور شناسایی محل بهینه حفاری در سازند نهر عمر و کاهش عدم قطعیت های زمین شناسی، داده های لرزه ای سه بعدی با لاگ های چاه نگاری سه حلقه چاه تلفیق شده و از طریق وارون سازی پیش از برانبارش، پارامترهای ژئومکانیکی استخراج و تحلیل شده اند. در ادامه، این پارامترها با استفاده از فرآیند نرمال سازی min-max و مدل سازی تلفیقی، به شاخص جامعی تحت عنوان نشانگر پتروژئومکانیکی (TPG) تبدیل و نقشه کیفیت مخزنی تهیه شد. به علاوه، شاخصی ترکیبی برای ارزیابی پتانسیل هیدروکربنی تدوین گردید که در کنار نقشه ضخامت مخزن و مدل ساختاری سه بعدی، چهارچوبی جامع برای انتخاب ناحیه حفاری فراهم ساخت. محل نهایی حفاری در تاج یک تاقدیس و در موقعیتی با کیفیت مخزنی بالا، پتانسیل هیدروکربنی مناسب و تعادل مکانیکی قابل قبول شناسایی شد. تحلیل میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در این ناحیه نشان داد که با وجود نسبت پواسون پایین و رفتار نسبتاً شکننده سنگ، پارامترهایی نظیر مدول یانگ بالا، چگالی متوسط و مقاومت فشاری مناسب، پایداری چاه در شرایط حفاری کنترل شده را تضمین می کنند.

کلیدواژه ها: وارون سازی همزمان؛ نشانگر پتروژئومکانیکی؛ ژئومکانیک؛ کیفیت مخزنی؛ بهینه سازی محل حفاری

Application of Geomechanical Parameters from Pre-Stack Seismic Inversion for Drilling Optimization

Abstract

Finding the best locations to drill in hydrocarbon reservoirs is challenging, particularly in areas with complex geology. To reduce drilling risks and improve productivity, it is important to accurately understand the reservoir's quality and geomechanical properties. In this study, 3D seismic data were combined with logs from three wells to reduce uncertainty and identify optimal drilling locations in the Nahr-Umr Formation. Geomechanical properties were calculated using pre-stack inversion and then analyzed. These values were normalized using the min-max method and merged into a single petro-geomechanical index (TPG). This index helped create a map showing reservoir quality. A separate attribute was also developed to estimate hydrocarbon potential. This was combined with a reservoir thickness map and a 3D structural model to build a complete system for choosing drilling locations. The best drilling spot was found at the top of an anticline, where reservoir quality is good, hydrocarbon potential is high, and mechanical conditions are stable. A review of the field's average geomechanical properties showed that, although the Poisson's ratio is low (indicating brittle rock), the high Young's modulus, medium density, and good compressive strength help keep the wellbore stable when proper drilling practices are followed.

Keywords: Simultaneous Inversion; TPG ; Geomechanics ; Reservoir Quality; Drilling location

۱. مقدمه

پارامترهای ژئومکانیکی، شامل ویژگی‌هایی مانند مدول یانگ، ضریب پواسون، چگالی و سرعت امواج الاستیک (V_p و V_s)، نقش بنیادینی در شناخت رفتار مکانیکی سنگ‌ها در برابر تنش‌ها و تغییرات فشار ایفا می‌کنند (Eyinla et al., 2021). در صنعت نفت و گاز، این پارامترها ابزار کلیدی برای طراحی بهینه حفاری، مدیریت شکست هیدرولیکی، ارزیابی پایداری دیواره چاه و پیش‌بینی ریسک‌های ژئوتکنیکی به‌شمار می‌روند. بهره‌گیری از این داده‌ها، به‌ویژه پیش از آغاز عملیات حفاری، به مهندسان کمک می‌کند تا با کاهش احتمال بروز مشکلاتی مانند فروپاشی دیواره چاه، گیر تجهیزات و افت تولید، بهره‌وری عملیات و ایمنی را به‌طور چشمگیری افزایش دهند (Kårstad et al., 2018). در فرآیند اکتشاف و توسعه میادین هیدروکربنی، یکی از چالش‌های اساسی، انتخاب محل بهینه برای حفاری است؛ موضوعی که در مناطق با ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده مانند شمال غرب خلیج فارس، به‌مراتب دشوارتر می‌شود (Saadatinejad et al., 2012). میدان مورد مطالعه، واقع در ۲۷

کیلومتری شهر دیلم (شکل ۱)، از جمله همین میادین پیچیده است که در آن، مخزن نهر عمر به عنوان عمیق ترین واحد تولیدی شناخته می شود. این مخزن که متعلق به دوره کرتاسه پیشین بوده و معادل سازند نهر عمر در بخش جنوبی خلیج فارس است، از نظر لیتولوژیکی شامل سه لایه اصلی است: لایه بالایی متشکل از شیل فشرده و مارن، لایه میانی سنگ آهک، و لایه پایینی ماسه سنگ متخلخل همراه با لایه های نازک شیل (Al-Garbawi & Al-Shahwan, 2019). این ترکیب لیتولوژیکی، منجر به ناهمگنی قابل توجهی در خصوصیات پتروفیزیکی مخزن شده است. وجود گسل ها، چین خوردگی ها و ناپیوستگی های ساختاری مانند گسل امتداد لغز راست گرد هندیجان-بهرگان سر، که تأثیر بسزایی بر ساختار مخزن و ضخامت آن دارد، موجب افزایش عدم قطعیت در تفسیر داده های زیرسطحی شده است (Riahi et al., 2021). فعالیت های تکتونیکی باعث فعال شدن مجدد این گسل و بروز فرسایش موضعی در واحدهای بالادست شده اند، که در نهایت توزیع تنش و رفتار ژئومکانیکی مخزن را به شدت تحت تأثیر قرار داده اند (Noufal, 2020). به همین دلیل، تکیه صرف بر داده های چاه نگاری یا لرزه ای سنتی نمی تواند تصویر دقیق و جامعی از ویژگی های مخزنی ارائه دهد (Chaki et al., 2018). در چنین شرایطی، جایی که تداخل در لایه های بالایی به حدود ۵ درصد و اشباع آب به ۴۰ درصد می رسد، و هیدروکربن عمدتاً در میان لایه های شیل و ماسه سنگ با اشباعی حدود ۲۰ درصد حضور دارد، استفاده از روش های تلفیقی ضروری است. نوح نژاد و همکاران با تمرکز بر تنش های درون زمین و تأثیر آن ها بر طراحی چاه، تأکید کردند که داده های ژئومکانیکی نقشی کلیدی در پیش بینی شکست سنگ و مسیر حفاری ایمن دارند (Noohnejad et al., 2021). قلی یف و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از وارون سازی پیش از برانبارش، توانستند پارامترهایی مانند مدول برشی و نسبت V_p/V_s را استخراج و ارتباط آن ها را با کیفیت مخزنی بررسی کنند (Guliyev & Davis, 2007). آریستیمونو و همکاران (۲۰۲۲) مجموعه داده های مختلف وارون سازی لرزه ای را با یکدیگر مقایسه کرده و تأثیر آن ها را بر برآورد خواص ژئومکانیکی در مخازن غیرمتعارف بررسی نمودند (Aristimuno et al., 2022). همچنین، تلو و همکاران (۲۰۲۰) با ادغام داده های ژئومکانیکی و مدل های ساختاری، چارچوبی مؤثر برای کاهش ریسک حفاری ارائه کردند (Tello et al., 2020). حمید و همکاران (۲۰۲۲) نیز رویکردی یکپارچه با استفاده از داده های میدانی متنوع برای ساخت مدل های ایستای ژئومکانیکی سه بعدی جهت ارزیابی خواص مخزنی و راهنمایی در برنامه ریزی توسعه میدان ارائه دادند (Hamid et al., 2022). اسماعیل پور و ایسپس (۲۰۲۳) روشی را پیشنهاد دادند که در آن وارون سازی لرزه ای با اندازه گیری های درون چاهی ترکیب شده و به پیش بینی تنش های درجا و خواص مکانیکی سنگ ها کمک می کند؛ این روش به ویژه برای بهینه سازی تکمیل چاه و افزایش عملکرد در میادین نفتی اهمیت دارد (Esmaeilpour & Ispas, 2023). عامری و مطهری (۲۰۲۴) در یک مطالعه موردی در میدان نفتی گچساران، با بهره گیری از روابط تجربی و آزمایش های آزمایشگاهی، خواص مکانیکی سنگ از جمله ضریب پواسون را برای تحلیل پایداری چاه در نواحی پرریسک تعیین کردند. این مطالعات به طور کلی اهمیت ضریب پواسون را در درک رفتار سنگ و شناسایی خطرات احتمالی در محیط های زمین شناسی مختلف نشان می دهند (Ameri & Motahari, 2024). با وجود این پیشرفت ها، اکثر پژوهش ها بر سازندهای خاص یا میادینی با ساختارهای زمین شناسی ساده تمرکز داشته اند و مطالعات جامع در میادین پیچیده ای مانند سازند نهر عمر در شمال غرب خلیج فارس همچنان محدود باقی مانده اند. در همین راستا، هدف تحقیق حاضر، تلفیق سیستماتیک داده های

ژئومکانیکی حاصل از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش با اطلاعات ساختاری و زمین‌شناسی به‌منظور شناسایی محل بهینه حفاری در سازند نهر عمر می‌باشد. در این مطالعه، پارامترهایی مانند مدول یانگ، ضریب پواسون، چگالی، و سرعت‌های موجی استخراج و با در نظر گرفتن تأثیر مثبت یا منفی هرکدام بر کیفیت مخزن، به‌صورت نرمال‌سازی‌شده در یک مدل ترکیبی به‌کار گرفته شدند. نتیجه این فرایند، تولید نقشه‌ای تحت عنوان «نقشه کیفیت مخزنی» بود که در کنار مدل ساختاری سه‌بعدی، نقشه ضخامت لایه و نقشه پتانسیل هیدروکربنی، چارچوب جامعی برای انتخاب ناحیه حفاری ارائه داد. نوآوری این پژوهش در ارائه رویکردی یکپارچه برای تعیین محل بهینه حفاری است که بر پایه استخراج پارامترهای ژئومکانیکی از وارون‌سازی پیش‌از‌برانبارش و تجمیع سیستماتیک آن‌ها در قالب یک شاخص پتروژئومکانیکی توسعه یافته است. در این رویکرد، به‌جای اتکا به مدل‌های ژئومکانیکی جامع و داده‌های آزمایشگاهی گسترده، از ترکیب مؤثر امپدانس‌های لرزه‌ای، پارامترهای الاستیک، روندهای مکانیکی، نقشه ضخامت مخزن و شاخص پتانسیل هیدروکربنی بهره‌گیری شده است. این ساختار چندمعیاره، امکان شناسایی ناحیه حفاری را در مراحل اولیه اکتشاف حتی در شرایط محدودیت داده فراهم می‌سازد و نسبت به روش‌های رایج مبتنی بر تحلیل‌های تک‌متغیره یا مدل‌سازی کامل MEM، سرعت، کارایی و قابلیت اتکای بیشتری ایجاد می‌کند. تحلیل نقشه‌های میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در ناحیه منتخب نیز این امکان را به وجود آورد تا یک دید کلی نسبت به پایداری مکانیکی برای حفر چاه در سازند مورد مطالعه به دست آید.



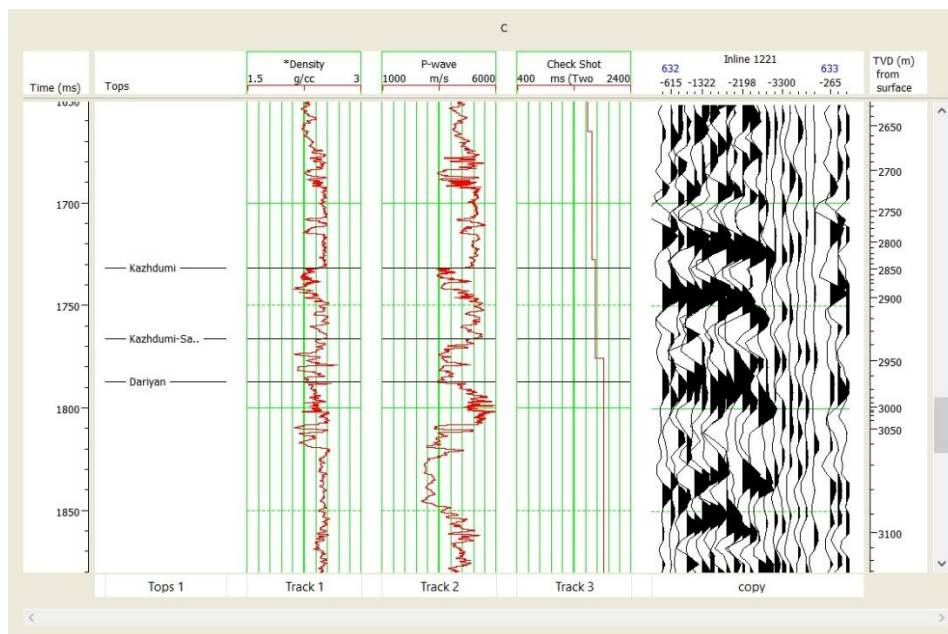
شکل ۱ موقعیت تقریبی میدان نفتی مورد نظر .

روش شناسی

جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها

در این مطالعه از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی و اطلاعات چاه‌نگاری سه حلقه چاه در محدوده میدان مورد بررسی استفاده شده است. داده لرزه‌ای مورد استفاده، یک برداشت سه‌بعدی با گستره‌ای شامل اینلاین‌های ۶۸۶ تا ۱۷۰۰ و کراس‌لاین‌های ۱۹۶ تا

۹۶۶ می‌باشد. این داده دارای آزیموتی برابر با ۰.۵۷ رادیان نسبت به محور کراس‌لاین‌ها بوده و کیفیت و وضوح مناسبی برای انجام فرآیند وارون‌سازی فراهم می‌آورد. در محدوده تحت بررسی، سه حلقه چاه A، B و C قرار دارد که هر یک دارای مجموعه‌ای متنوع از لاگ‌های چاه‌نگاری هستند (شکل ۲).



شکل ۲ داده‌های مربوط به چاه C برای عمق مورد نظر جهت انجام وارون‌سازی لرزه‌ای و داده‌ای لرزه‌ای متناظر به موقعیت چاه در این پژوهش، از لاگ چگالی و لاگ صوتی برای استخراج پارامترهای الاستیک و انجام وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. در جدول ۱، مشخصات فنی داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش به همراه مختصات جغرافیایی چاه‌های مورد استفاده، ارائه شده است. برای کالیبراسیون داده‌های چاه‌نگاری با داده‌های لرزه‌ای و برقراری تطابق دقیق بین عمق و زمان، از اطلاعات سرعتی ثبت‌شده در هر چاه (check-shot surveys) استفاده گردید. استفاده از چک‌شات‌ها در این فرآیند نسبت به روش تولید رد لرزه مصنوعی مبتنی بر لاگ صوتی، از دقت بالاتری برخوردار است؛ چرا که اولاً اطلاعات سرعتی مستقیماً از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شوند و ثانیاً، لاگ‌های صوتی به دلیل محدودیت‌های ابزار اندازه‌گیری معمولاً دارای دقت کمتری هستند. علاوه بر این، برای بهبود دقت تطابق زمان-عمق، از موقعیت عمقی سرسازنده‌ها و افق‌های لرزه‌ای متناظر با سازند نهر عمر نیز استفاده شده است. بر اساس این تطابق، مخزن نهر عمر در محدوده زمانی ۱۶۵۲ تا ۲۲۲۰ میلی‌ثانیه شناسایی شده و این بازه به عنوان ناحیه هدف در تحلیل‌های بعدی در نظر گرفته شده است. از آنجا که بخش قابل‌توجهی از داده‌های مربوط به فشار منفذی، چگالی سیال و اشباع سیالات در سازند نهر عمر در دسترس نبود، امکان محاسبه دقیق فشار مؤثر و به‌کارگیری آن در تحلیل‌ها فراهم نشد. این توضیح از آن جهت اهمیت دارد که نشان می‌دهد چرا تمرکز مدل‌سازی در این مرحله صرفاً بر پارامترهای لرزه‌ای و ژئومکانیکی مبتنی بر وارون‌سازی قرار گرفته است. بدیهی است که تکمیل اطلاعات مذکور در مراحل بعدی توسعه میدان، امکان انجام تحلیل تنش-فشار و ارزیابی جامع‌تر پایداری چاه را فراهم خواهد کرد.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به داده‌های لرزه‌ای و موقعیت مکانی چاه‌ها

خط برداشتی	خط اغارین	خط پایانی	تعداد خطوط	میانگین فاصله بین خطوط	آزیموت خطوط برداشتی	چاه A	چاه B	چاه C
اینلاین	۶۸۶	۱۷۰۰	۱۰۱۵	۲۵	۵۷/۲۴۴	۱۲۸۱	۱۲۱۳	۱۲۲۱
کراس لاین	۱۹۶	۹۶۶	۸۰۱	۲۴/۹۹	۱۴۷/۲۴۴	۷۴۴	۷۳۴	۶۳۲

وارون سازی پیش از برانبارش

در وارون سازی لرزه‌ای پیش از برانبارش، با فرض اینکه ضریب بازتاب $R(\theta)$ تابعی از زاویه تابش باشد، از معادلات آکی و ریچاردز برای مدل سازی پاسخ زاویه‌ای بهره گرفته می‌شود (Richards & Aki, 1980). این مدل امکان تحلیل تأثیر تغییرات پارامترهای زیرسطحی مانند سرعت موج تراکمی (α)، سرعت موج برشی (β) و چگالی (ρ) را فراهم می‌سازد (Ivanov et al., 2009). شکل کلی این معادله به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود: (۱)

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta) \right] \times \frac{\Delta I_p}{I_p} + \left[4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right] \times \frac{\Delta I_s}{I_s} - \left[\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1)$$

در این معادله، $\alpha \times \rho = I_p$ و $\beta \times \rho = I_s$ به ترتیب امپدانس تراکمی و برشی هستند. اختلاف مقادیر (Δ) نیز مربوط به تغییر پارامتر در مرز بین دو لایه زمین شناسی متوالی است. این مدل نشان می‌دهد که ضریب بازتاب نه تنها به تفاوت در پارامترهای فیزیکی بین لایه‌ها بستگی دارد بلکه تابع زاویه تابش نیز هست، که اساس وارون سازی زاویه‌مند را شکل می‌دهد. در نبود سیالات پیچیده مانند هیدروکربن‌ها، روابط بین این پارامترها اغلب خطی فرض می‌شوند. در این شرایط، از روابط لگاریتمی برای ارتباط بین پارامترهای پتروفیزیکی استفاده می‌شود (Chopra & Castagna, 2014). به عنوان نمونه، مقاومت صوتی برشی Z_s از روی مقاومت صوتی تراکمی Z_p از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\ln(Z_s) = k \ln(Z_p) + k_c + \Delta l_s \quad (2)$$

و برای چگالی رابطه ی ۳ را داریم:

$$\ln \rho = m \ln(Z_p) + m_c + \Delta l_D \quad (3)$$

که در این معادلات، k و m به ترتیب بیان گر شیب‌های خطی رابطه برشی-تراکمی و چگالی-تراکمی هستند، در حالی که k_c و m_c عرض از مبدأ این روابط هستند (Gardner et al., 1974). مقادیر Δl_s و Δl_D تأثیر احتمالی وجود سیال مانند هیدروکربن را در لایه‌ها نشان می‌دهند و در شرایط سنگ خیس برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند. برای ساده سازی بیشتر، در الگوریتم همپسون و همکاران (۲۰۰۵)، رابطه بین بازتاب و امپدانس تراکمی به شکل لگاریتمی ساده در معادله ی ۴ تقریبی سازی می‌شود:

$$R_{pi} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln Z_{pi} = \frac{1}{2} [\ln Z_{pi+1} - \ln Z_{pi}] \quad (4)$$

برای انجام فرآیند وارون‌سازی پیش‌ازبرانبارش، داده‌های لرزه‌ای از حوزه زمان-آفست به حوزه زمان-زاویه تبدیل شدند تا پاسخ لرزه‌ای بر اساس زاویه تابش امواج قابل تحلیل باشد. شکل ۳ نمونه‌ای از داده‌های لرزه‌ای پس از تبدیل به حوزه زمان-زاویه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه زاویه‌ای داده‌های موجود تنها تا حدود ۳۰ درجه گسترش دارد و هیچ بازتابی با زاویه‌های بالاتر از این مقدار در داده‌ها حضور ندارد.

از آنجا که معادلات آکی-ریچاردز در زاویه‌های کوچک تا متوسط (کمتر از حدود ۳۵ درجه) دارای اعتبار و پایداری محاسباتی هستند، وجود دامنه زاویه‌ای ۰ تا ۳۰ درجه در داده‌ها تضمین می‌کند که وارون‌سازی پیش‌ازبرانبارش در محدوده معتبر این معادلات انجام شده است. بدین ترتیب، تمام نتایج حاصل از امپدانس‌های تراکمی و برشی و چگالی بر اساس زاویه‌های فیزیکی و قابل قبول استخراج شده‌اند و هیچ داده زاویه‌بالا وارد فرآیند وارون‌سازی نشده است (شکل ۳). این تبدیل با کمک تابع سرعت به‌دست‌آمده از مدل‌سازی چاه و تحلیل زمان حرکت امواج انجام می‌گیرد. برای کاهش نویز و بهبود کیفیت داده‌های پیش‌ازبرانبارش پیش از انجام وارون‌سازی، از مجموعه‌ای از روش‌های متداول پیش‌پردازش لرزه‌ای شامل فیلترهای زمان-مکان، کنترل کیفیت داده‌های زاویه‌ای و تطبیق دقیق ردلرزه‌ها با ردلرزه مصنوعی استفاده شد. سپس، همبستگی دقیق بین لرزه‌نگاشت مصنوعی حاصل از نگاره‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای برقرار می‌شود تا موجب بهینه‌سازی استخراج شود.



شکل ۳ داده‌های لرزه‌ای در حوزه زمان-زاویه

پس از آماده‌سازی موجک، مدل‌های اولیه فرکانس پایین برای پارامترهای Z_p ، Z_s و ρ از داده‌های چاه ساخته می‌شوند. سپس با استفاده از ضرایب حاصل از نمودارهای تقاطعی چاه، مقادیر k_c ، k ، m و m_c استخراج می‌شوند (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر k_c ، k ، m و m_c

k	k_c	m	m_c
۰/۹۹۲۹	-۰/۳۲۸۷۰۳	۰/۲۶۰۹۳	-۱/۵۱۹۷۵

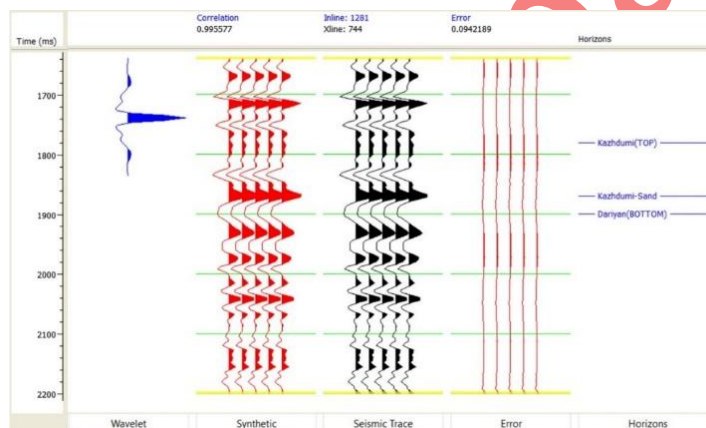
در نهایت با در اختیار داشتن این ضرایب، می‌توان پارامترهای پتروفیزیکی را طبق روابط ۵ و ۶ محاسبه نمود:

$$\rho = (ml_p + m_c + \Delta l_d) \quad (5)$$

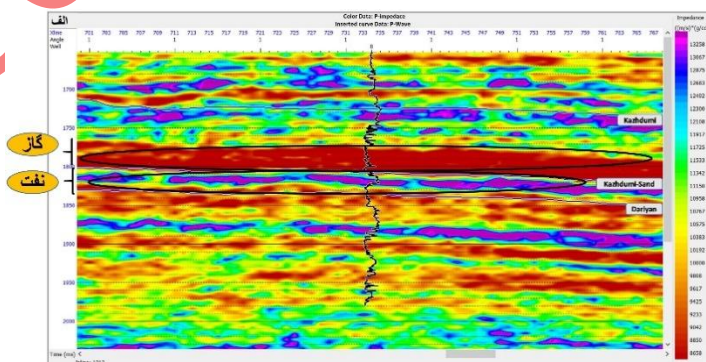
$$Z_s = \exp(kl_p + k_c + \Delta l_s) \quad (6)$$

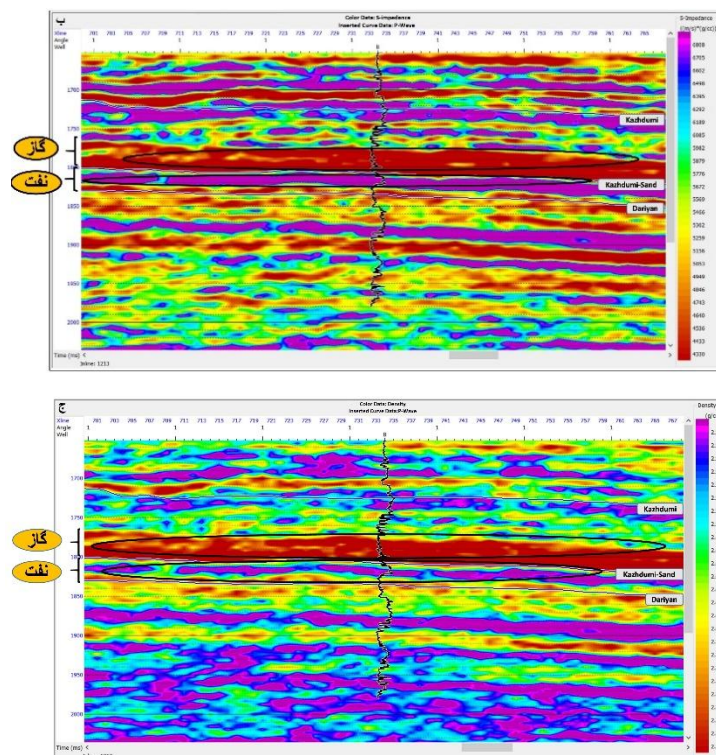
$$Z_p = \exp(l_p) \quad (7)$$

پیش از انجام فرآیند وارون سازی، برای اطمینان از دقت روش، تطابق بین ردلرزه‌ای و ردلرزه‌ای مصنوعی بررسی شد که همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی ۰.۹۹ به دست آمد و نشان دهنده دقت بالای این فرآیند است؛ بر اساس این محاسبات، خروجی نهایی وارون سازی شامل سه مکعب حجمی از امپدانس تراکمی، امپدانس برشی و چگالی خواهد بود که پایه‌ای برای تفسیر زمین‌شناسی، تحلیل کیفی سیالات مخزن و مطالعات ژئومکانیکی فراهم می‌سازد (شکل ۵). همان طور که مشاهده می‌شود، در ناحیه مخزن، مقادیر مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهند که این کاهش به طور عمده ناشی از حضور گاز در منافذ سنگ مخزن است. گاز نسبت به مایعات دارای چگالی و مدول حجمی بسیار پایین‌تری است، که در نتیجه آن، امپدانس آکوستیک محیط کاهش می‌یابد. در ادامه، با ورود به بخش‌هایی از مخزن که حاوی نفت هستند، افزایش محسوس در مقاومت‌های صوتی و چگالی مشاهده می‌شود. این افزایش به دلیل چگالی و مدول بالاتر نفت نسبت به گاز بوده و نشان دهنده تغییر نوع سیال درون خلل و فرج سنگ مخزن است.



شکل ۴ بیانگر همبستگی بسیار بالای ۰/۹۰ میان ردلرزه‌های واقعی و مصنوعی است که با خطای بسیار ناچیز ۰/۰۹۴۲۱۸۹ همراه بوده است. در سمت چپ تصویر، موجک به کاررفته در فرآیند وارون سازی نمایش داده شده است، و در سمت راست نیز همخوانی دقیق سطوح لرزه‌ای در هر دو ردلرزه به وضوح قابل مشاهده است.





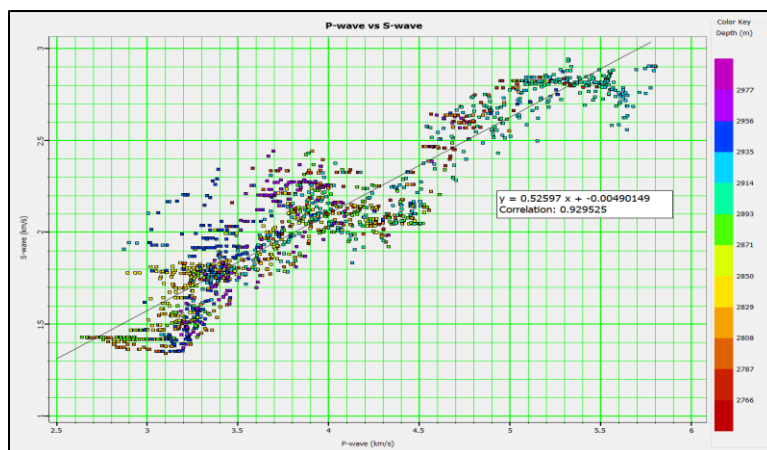
شکل ۵: شامل مقاطع لرزه ای از مقاومت صوتی تراکمی Z_p (۶، الف)، مقاومت صوتی برشی Z_s (۶، ب)، و چگالی (۶، ج) است که از طریق وارون سازی کامل داده های لرزه ای سه بعدی استخراج شده اند.

کالیبراسیون رابطه V_p - V_s (مدل Castagna-Mudrock محلی)

در این مطالعه و به منظور پاسخ به حساسیت روابط وارون سازی نسبت به نوع سیال و اثرات غیرخطی سیالات چندفازی در مخزن گازی نهر عمر، یک کالیبراسیون محلی از نوع Castagna-type برای سرعت های موج تراکمی (V_p) و موج برشی (V_s) انجام شد. هدف از این کالیبراسیون، بررسی انحراف روند محلی نسبت به مدل استاندارد Castagna-Mudrock (Castagna et al., 1985) و تعیین میزان تأثیر حضور گاز بر رفتار الاستیک سنگ بود. مدل استاندارد Castagna برای ماسه سنگ های آب اشباع به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_s = 0.862V_p - 1.172 \quad (8)$$

برای بررسی این موضوع در سازند نهر عمر، داده های لاگ V_p و V_s سه چاه A، B و C استخراج، نقاط پرت حذف، و بازه مخزنی انتخاب شد. سپس یک رگرسیون خطی از نوع Castagna-type بر روی داده ها اعمال گردید (شکل ۶).



شکل ۶- نمودار پراکندگی سرعت موج تراکمی (V_p) در برابر موج برشی (V_s) برای چاه‌های A، B و C در بازه مخزنی. خط سیاه نشان‌دهنده مدل رگرسیون محلی استخراج‌شده از داده‌ها است.

رابطه محلی به‌دست‌آمده به صورت زیر است:

$$V_s = 0.526V_p - 0.004 \quad (9)$$

شیب به‌دست‌آمده (0.526) به‌طور قابل‌توجهی کمتر از شیب مدل استاندارد Castagna است (0.86)، که نشان‌دهنده کاهش شدیدتر سرعت موج تراکمی نسبت به موج برشی در حضور گاز می‌باشد. این رفتار کاملاً مطابق با فیزیک سنگ مخازن گازی است؛ به‌طوری‌که گاز مدول بالک را کاهش می‌دهد و باعث افت محسوس V_p می‌شود، در حالی که V_s تغییر اندکی دارد. این روند کالیبره‌شده در ادامه به‌عنوان مدل سنگ محلی برای ارزیابی حساسیت امپدانس‌های تراکمی (Z_p)، برشی (Z_s) و نسبت Z_s/Z_p به‌ساده‌سازی‌های موجود در وارون‌سازی پیش از برانبارش مورد استفاده قرار گرفت. این کار باعث افزایش دقت تحلیل‌های بعدی و کنترل احتمال بیش‌برآورد شدن کنتراست‌های برشی در نواحی گازدار گردید.

محاسبه و استخراج پارامترهای ژئومکانیکی

ژئومکانیک شاخه‌ای از علم زمین‌شناسی و مهندسی است که به مطالعه رفتار مکانیکی سنگ‌ها تحت تأثیر تنش‌ها و کرنش‌های وارد شده می‌پردازد. هدف از تحلیل‌های ژئومکانیکی، شناخت دقیق از پایداری سازندها، طراحی بهینه چاه‌ها، جلوگیری از شکست دیواره چاه، کنترل فشارهای زیرسطحی و مدیریت بهتر مخزن است. تغییراتی که بر اثر حفاری، تولید یا تزریق در میدان‌های نفت و گاز رخ می‌دهد، تعادل طبیعی سنگ مخزن را برهم می‌زند (Zoback, 2010). برای درک رفتار سنگ در این شرایط، لازم است مجموعه‌ای از پارامترهای الاستیک و مقاومتی آن با دقت استخراج شود. این پارامترها معمولاً از داده‌های لرزه‌ای، نگارهای صوتی و دانسیته چاه استخراج می‌گردند و شامل نسبت پواسون، مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی،

پارامترهای لامه، و مقاومت فشاری تک محوره (UCS) می باشند. نسبت پواسون بیانگر نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری در یک ماده تحت بارگذاری یکنواخت است. وقتی یک ماده در یک جهت خاص فشرده میشود، عمدتاً تمایل دارد در دو جهت دیگر عمود به جهت اول کشیده شود (Jiang & Park, 2014). این پارامتر را طبق رابطه ی ۱۰ میتوان از مقاومت موج P (Z_p) و مقاومت موج S (Z_s) محاسبه کرد:

$$\sigma = (Z_p^2 - 2Z_s^2)/(2Z_p^2 - 2Z_s^2) \quad (10)$$

مدول یانگ (E) یکی از مهم ترین پارامترهای الاستیک مواد است که نشان دهنده مقاومت یک ماده در برابر تغییر طول (کشش یا فشرده گی) تحت بار محوری است. این پارامتر بیان می کند که ماده تا چه اندازه تحت نیروهای محوری تغییر شکل می دهد و سفتی آن را توصیف می کند (Sharma & Chopra, 2012). برای محاسبه مدول یانگ با استفاده از مقاومت های صوتی، از رابطه ۱۱ استفاده می شود:

$$E \times \rho = Z_s^2 \times ((3Z_p^2 - 4Z_s^2)/(Z_p^2 - Z_s^2)) \quad (11)$$

پارامتر λ_p نمایانگر تأثیر سیالات بر رفتار مکانیکی سنگ و برابر با حاصل ضرب اولین پارامتر لامه (λ) در چگالی است. این پارامتر را می توان با استفاده از مقاومت های صوتی از طریق رابطه ی ۱۲ اندازه گیری کرد:

$$\lambda_p \text{ or } LR = Z_p^2 - 2(Z_p^2/(V_p/V_s))^2 \quad (12)$$

پارامتر μ_p یا Modulus-Rho (MR) از حاصل ضرب مدول برشی در چگالی به دست می آید (Katahara, 2001) و از مقاومت صوت برشی به صورت مستقیم محاسبه می شود. معادله ی ۱۳ نشان دهنده ی این رابطه است:

$$\mu_p \text{ or } MR = Z_s^2 \quad (13)$$

مدول بالک (K) معیاری از مقاومت ماده در برابر تغییر حجم در اثر فشار همه جانبه است. این مدول نشان می دهد که ماده چقدر در برابر فشرده شدن (تغییر حجم بدون تغییر شکل) مقاومت دارد (Angel, 2000). این پارامتر را می توان از طریق معادله ی ۱۴ محاسبه کرد:

$$K = E/(3 \times (1 - 2\sigma)) \quad (14)$$

مدول برشی (G) نشان دهنده مقاومت ماده در برابر تغییر شکل ناشی از تنش برشی است. این پارامتر، سفتی ماده را در برابر خم شدگی یا لغزش لایه ها نسبت به هم تعیین می کند (Chen et al., 2015). برای بدست آوردن مقدار مدول برشی از رابطه ۱۵ استفاده می شود.

$$G = E/(2 \times (1 + \sigma)) \quad (15)$$

UCS مقاومت سنگ در برابر بار فشاری در شرایط بدون محدودیت جانبی است. این پارامتر معیار اصلی برای ارزیابی استحکام سنگ ها در مهندسی ژئومکانیک است. معادلات مورد استفاده برای تخمین این پارامتر، بر اساس عمق هدفی انتخاب شده اند که

تحلیل ژئومکانیکی برای آن انجام شده است. بازه عمقی مورد نظر بین ۱۷۶۴/۴ متر تا ۲۱۵۵/۲۳ متر قرار دارد و لیتولوژی غالب در این بخش، ماسه سنگ است (Chang et al., 2006). برای محاسبه ی UCS از معادلات ۱۷،۱۶ و ۱۸ استفاده می شود که معادلات کاربردی برای ماسه سنگ ها هستند:

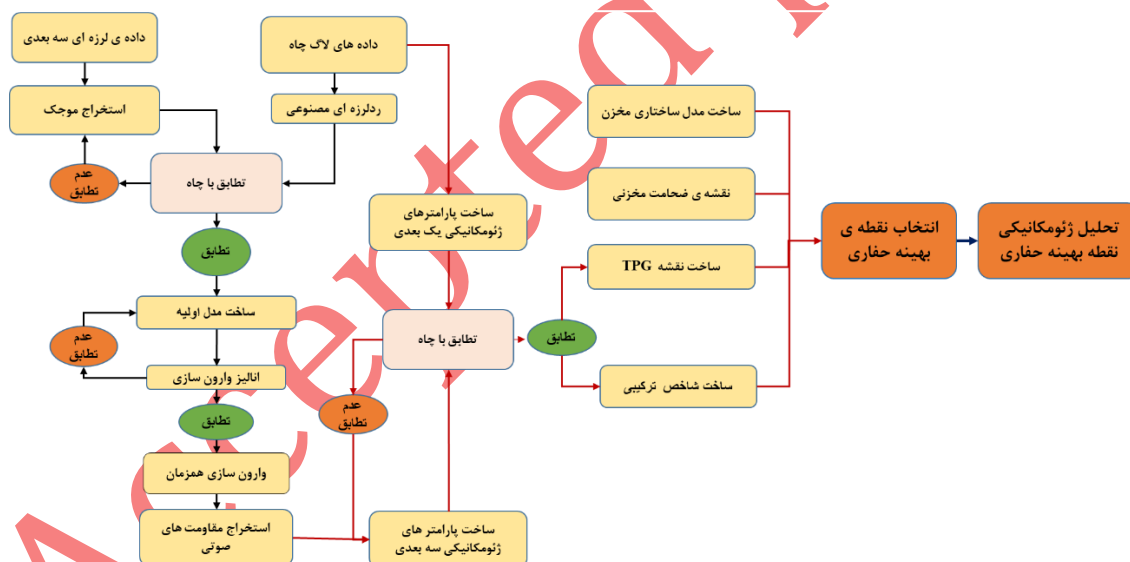
$$UCS = 2.28 + 4.1089E_s \quad (\text{World Wide}) \quad (۱۶)$$

$$UCS = RHOB \times 10^{-6} \times 1.745 \times V_p^2 - 21 \quad (\text{Moos}) \quad (۱۷)$$

$$UCS = 0.035 \times V_p - 31.5 \quad (\text{Freyburg}) \quad (۱۸)$$

انتخاب نقطه بهینه حفاری

در این مطالعه، به منظور انتخاب بهینه ترین نقطه برای حفاری، یک رویکرد چهار مرحله ای توسعه داده شد. در گام نخست، دو نقشه مستقل شامل «نقشه کیفیت مخزنی» و «نقشه پتانسیل مؤثر هیدروکربنی» تهیه گردید. سپس با در نظر گرفتن نقشه ایزوکر مخزن - که توزیع ضخامت مخزن را در نواحی مختلف نمایش می دهد - و مدل ساختاری مخزن این چهار نقشه با یکدیگر موازنه شده و بهترین موقعیت حفاری تعیین شد. برای ارائه دیدی کلی از روند تحلیل، مراحل اصلی کار در قالب نمودار جریان در شکل ۷ نمایش داده شده است.



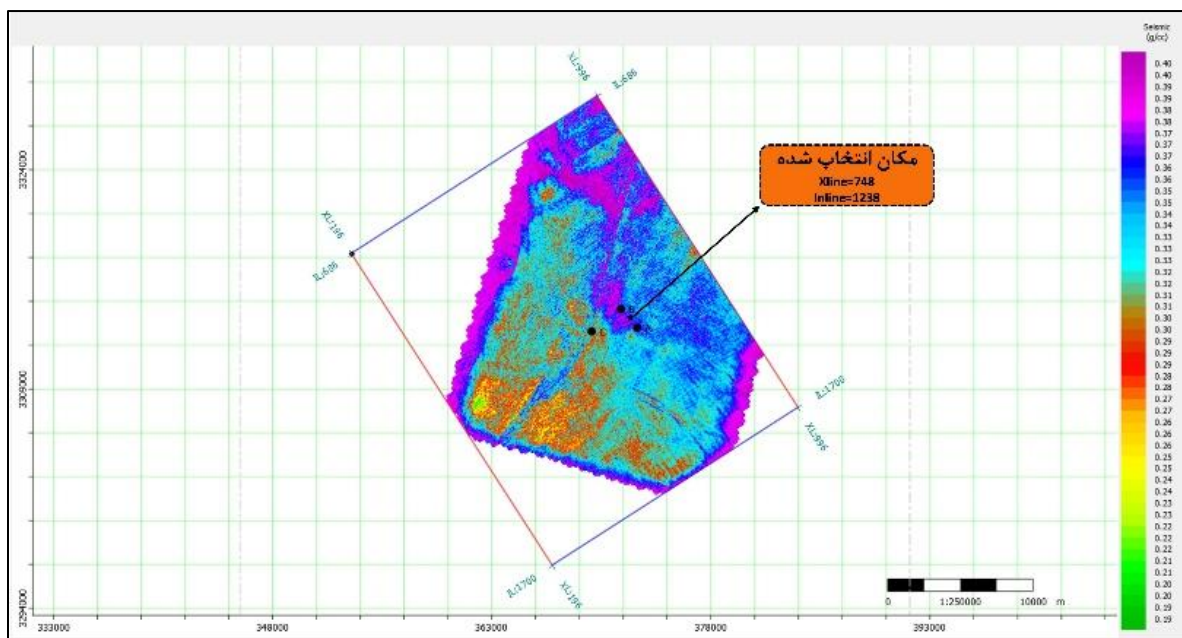
شکل ۷: مراحل یک فرایند ارزیابی چند مرحله ای را نمایش می دهد. در گام نخست، وارون سازی همزمان جهت استخراج مقاومت های صوتی و چگالی انجام می شود. این نتایج به عنوان ورودی برای محاسبه ویژگی های ژئومکانیکی به کار می روند. سپس، بر پایه پارامترهای ژئومکانیکی به دست آمده، شاخص ترکیبی (نقشه ی پتانسیل هیدروکربنی) و یک شاخص TPG (نقشه ی کیفیت مخزنی) تهیه شد که در موازنه با نقشه ی ضخامت مخزنی و مدل ساختاری منجر به انتخاب یک نقطه ی بهینه برای شروع عملیات حفاری شد. در نهایت نقطه ی بهینه ی حفاری بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت تا پایداری آن مشخص شود.

این شاخص‌ها چارچوب اولیه لازم برای انتخاب ناحیه حفاری را فراهم می‌کنند، هرچند باید توجه داشت که در این مرحله به دلیل محدودیت داده‌های بهره‌برداری، پارامترهایی مانند شاخص بهره‌وری (PI)، تراوایی و گرادیان شکست وارد تحلیل نشده‌اند و این موارد به مطالعات تکمیلی موکول می‌شود. لازم به ذکر است که بیشترین ضخامت مخزن لزوماً به معنای بالاترین پتانسیل هیدروکربنی یا بالاترین کیفیت مخزنی نیست؛ از این رو تلفیق تحلیلی این سه معیار برای انتخاب دقیق محل حفاری ضروری است. در مرحله ابتدایی برای ارزیابی کیفیت مخزنی، مجموعه‌ای از پارامترهای ژئومکانیکی شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، چگالی، مدول برشی، مدول حجمی، پارامترهای λ_p و μ_p ، مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و سرعت‌های موجی استخراج گردید. میانگین این پارامترها برای عمق مخزنی مورد نظر محاسبه شد و سپس با توجه به تأثیر مثبت یا منفی هر پارامتر بر کیفیت مخزن، فرایند نرمال‌سازی بر آن‌ها اعمال گردید. برای این منظور، تمام مقادیر پارامترها به روش min-max بین بازه ۰ تا ۱ نرمال‌سازی شدند. جهت لحاظ کردن تأثیر هر پارامتر بر کیفیت مخزنی، تمامی پارامترها به‌جز ضریب پواسون و نسبت V_p/V_s که رابطه مستقیم با کیفیت مخزنی دارد، به‌صورت معکوس نرمال‌سازی شدند (یعنی مقدار نهایی برابر با ۱ منهای مقدار نرمال‌شده در نظر گرفته شد) تا کاهش مقادیر آن‌ها نشان‌دهنده افزایش کیفیت مخزنی باشد. دلیل معکوس‌سازی نرمال‌سازی این است که بسیاری از پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مدول یانگ، مدول برشی، مدول حجمی، چگالی و مقاومت فشاری، در مقدار واقعی خود رابطه‌ای معکوس با کیفیت مخزنی نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که افزایش مقدار این پارامترها لزوماً نشان‌دهنده بهبود کیفیت مخزن نیست و در بسیاری موارد به سخت‌تر شدن سنگ و کاهش تخلخل یا شکنندگی مطلوب منجر می‌شود. بنابراین برای ایجاد یک شاخص یکپارچه که تمام پارامترها در آن به‌صورت هم‌جهت عمل کنند، مقادیر این پارامترها به‌صورت معکوس نرمال‌سازی شدند. در مقابل، ضریب پواسون و نسبت V_p/V_s به دلیل اثر مستقیم و هم‌جهت با کیفیت مخزن، بدون معکوس‌سازی در شاخص لحاظ گردیدند. شاخص TPG با استفاده از معادله ۱۹ محاسبه می‌شود.

(۱۹)

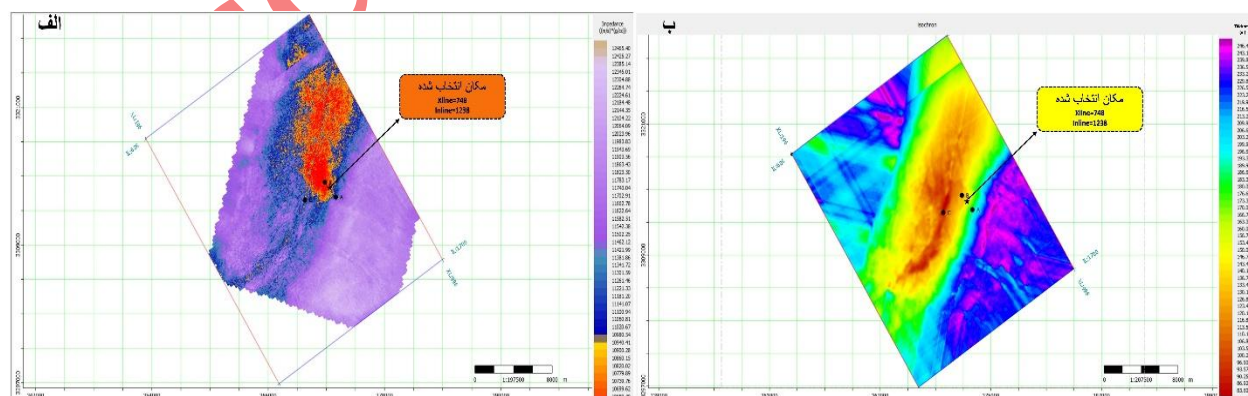
$$TPG = \frac{(PR + V_p / V_s + (1 - LR) + (1 - Z_p) + (1 - Z_s) + (1 - D_n) + (1 - K) + (1 - G) + (1 - E) + (1 - UCS) + (1 - MR))}{11}$$

پس از نرمال‌سازی و یکسان‌سازی جهت اثرگذاری، تمامی پارامترها بدون اعمال وزن خاصی و با فرض هم‌وزن بودن، در قالب یک مدل ترکیبی، تلفیق و میانگین‌گیری شدند. نتیجه این مرحله، تعریف یک نشانگر یکپارچه با عنوان TPG (Total Petro-Geomechanical indicator) بود که مقدار آن برای هر نقطه نشان‌دهنده کیفیت نسبی مخزن در آن موقعیت است؛ به‌طوری‌که مقادیر بالاتر این نشانگر بیانگر کیفیت بهتر مخزن می‌باشد. در نهایت، با استفاده از توزیع فضایی این نشانگر، نقشه‌ای با عنوان «نقشه کیفیت مخزنی» تولید گردید که نواحی با بیشترین مقدار TPG به‌عنوان مناطق با بالاترین پتانسیل کیفیت مخزنی شناخته شدند (شکل ۸).



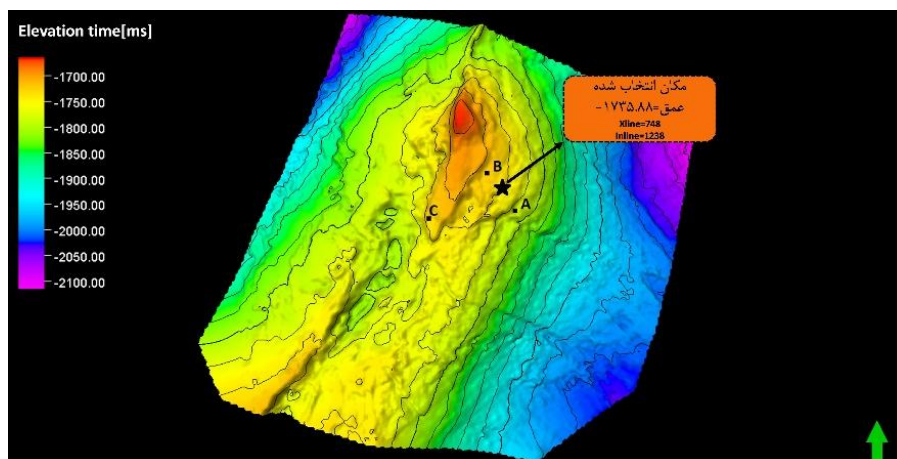
شکل ۸ نقشه کیفیت مخزنی بر اساس شاخص یکپارچه ژئوپترومکانیکی (TPG)

در مرحله دوم، جهت شناسایی زون‌های دارای پتانسیل هیدروکربنی، شاخصی ترکیبی از پنج پارامتر ژئومکانیکی و صوتی با یکدیگر ضرب شده و به‌عنوان یک شاخص مشترک (شاخص مشترک $\sigma \times \mu\text{-rho} \times E \times V_p/V_s \times Z_p =$ معرفی گردید. این شاخص در امتداد لایه مخزنی محاسبه و به‌صورت برش افقی نمایش داده شد؛ به‌گونه‌ای که نواحی با مقادیر کمتر آن معرف زون‌های غنی از هیدروکربن هستند. به‌طور هم‌زمان و در مرحله سوم، از نقشه ایزوکر مخزن که نشان‌دهنده ضخامت افقی مخزن است، استفاده شد. ضخامت مخزن از طریق تفاضل بین عمق افق‌های بالایی و پایینی محاسبه گردید و نقشه‌ای مجزا به‌عنوان «نقشه ضخامت مخزن» ارائه شد. بهترین مکان در مخزن سپس با متعادل‌سازی کمترین مقادیر شاخص مشترک، بیشتر مقدار TPG و بیشترین ضخامت تعیین گردید، با ذکر دوباره این نکته که این سه عامل ممکن است هم‌زمان در یک نقطه از بیشترین سطح نباشند، این مکان در تصاویر ۹ برای تحلیل‌های بعدی مشخص شده است. این روش با ادغام ویژگی‌های ژئومکانیکی و ابعاد فیزیکی مخزن، به‌طور مؤثری نواحی مطلوب هیدروکربنی را شناسایی می‌کند.



شکل ۹ نقشه ترکیبی برش افقی شاخص مشترک ژئومکانیکی-صوتی (الف) و نقشه ضخامت افقی لایه مخزن (ب)؛ نمایش ناحیه منتخب با پتانسیل بالای هیدروکربنی و ضخامت مطلوب برای تعیین موقعیت بهینه حفاری

در مرحله نهایی، با ساخت مدل ساختاری مخزن، بخش‌های مختلف آن از نظر عمق مورد تحلیل قرار گرفتند. ساختارهای زمین‌شناسی نظیر تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌ها شناسایی شدند و محل بهینه حفاری در ناحیه‌ای از مخزن قرار گرفت که در قسمت تاج یک تاق‌دیس واقع شده است. از آنجا که تاق‌دیس‌ها به‌طور طبیعی مکان‌های مناسبی برای تجمع هیدروکربن محسوب می‌شوند، قرارگیری نقطه حفاری در این موقعیت بر اعتبار انتخاب انجام‌شده می‌افزاید (شکل ۱۰).



شکل ۱۰ موقعیت بهینه حفاری در تاج تاق‌دیس؛ تأیید زمین‌شناختی انتخاب محل حفاری. در این مدل، رنگ‌های گرم نشان‌دهنده نواحی تاق‌دیدی و رنگ‌های سرد بیانگر نواحی ناودیدی هستند.

تحلیل ژئومکانیکی ناحیه حفاری

به‌منظور ارزیابی پایداری چاه در نقطه بهینه حفاری، برای هر کدام از پارامترهای ژئومکانیکی استخراج شده یک نقشه میانگین حفاری در ناحیه مورد نظر تولید گردید. این نقشه‌ها بر پایه مقادیر میانگین پارامترها در ضخامت مؤثر مخزن ایجاد شده و نمایی کلی از رفتار مکانیکی و ژئوفیزیکی سنگ مخزن در این موقعیت ارائه می‌دهند (شکل ۱۱). مقایسه این مقادیر با سایر نقاط مخزن نشان می‌دهد که در محل بهینه حفاری، مدول بالک نسبتاً کم و مدول یانگ در محدوده متوسط به بالا قرار دارد. مدول برشی و چگالی نیز در محدوده متوسط ارزیابی شده‌اند. نسبت پواسون در این ناحیه مقدار بسیار پایینی دارد، در حالی که مقدار Z_p در محدوده متوسط به پایین، Z_s در محدوده متوسط به بالا، و سایر پارامترها نیز در حدود میانه مخزن هستند. جدول ۳ مقادیر میانگین پارامترهای محاسبه‌شده در نقطه بهینه حفاری و همچنین مقایسه‌ی نسبی این مقادیر با بخش‌های دیگر مخزن را نمایش می‌دهد:

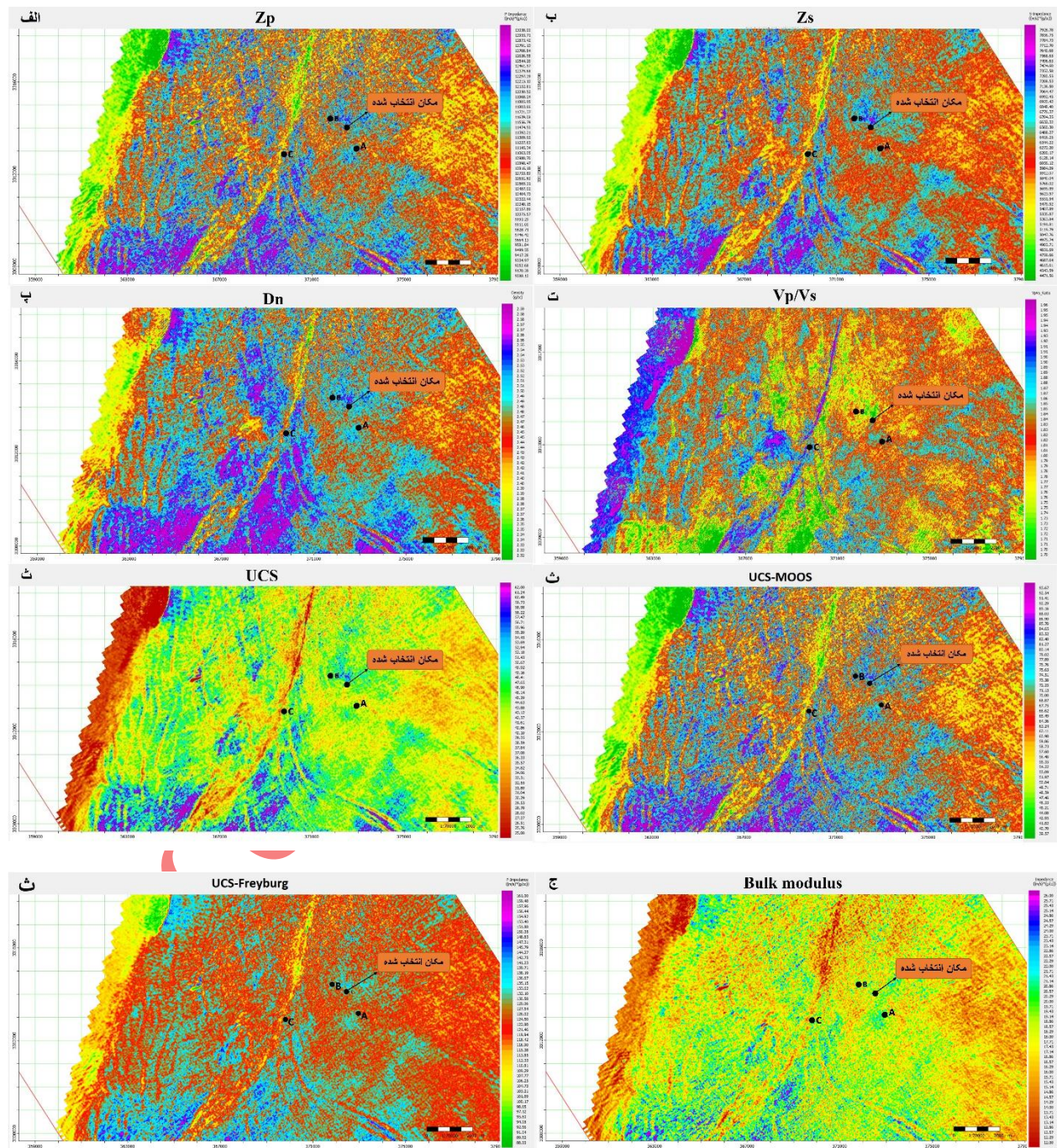
جدول ۳ مقادیر میانگین و ارزیابی نسبی پارامترهای ژئومکانیکی در نقطه بهینه حفاری مخزن

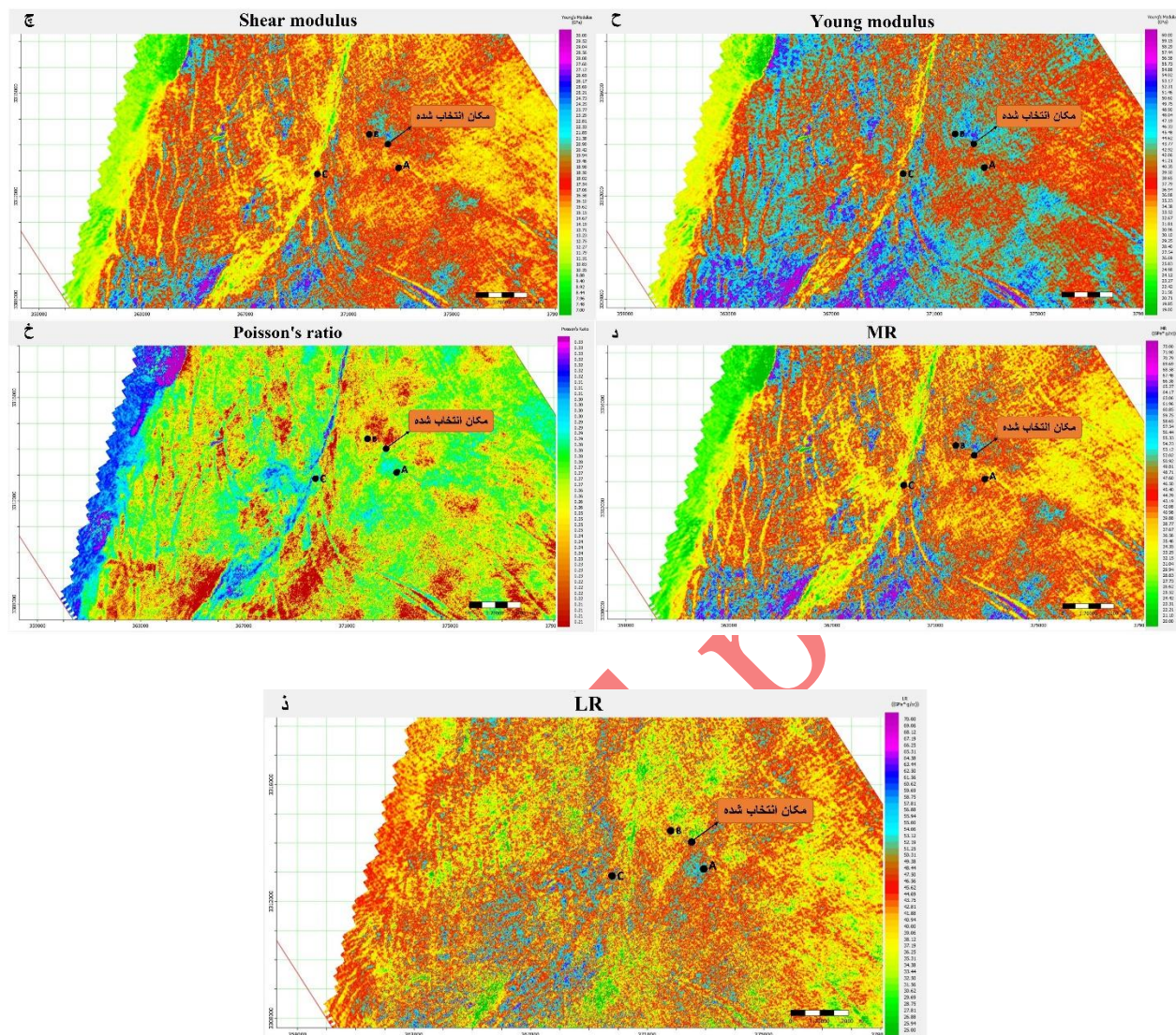
LR	MR	σ	E	G	K	UCS	Vp/Vs	Z_s	Z_p	Density	پارامتر واحد
GPa*	GPa*	unit less	GPa	GPa	GPa	MPa	unit less	((m/s)* (g/cc))	((m/s)* (g/cc))	g/cc	
۳۸/۲۲	۵۶/۲۱	۰/۲۰	۴۸/۰۳	۲۱/۸۳	۱۸/۲۹	۵۳/۳۵ ۸۰/۲۲ ۱۴۵/۳	۱/۷۲	۷۳۲۳/۴۶	۱۲۲۲۲/۳۵	۲/۴۸	مقدار

نسبت	متوسط	نسبت بالا	کم	نسبت بالا	نسبت کم	متوسط	نسبت بالا	بسیار کم	نسبت بالا	نسبت کم
------	-------	-----------	----	-----------	---------	-------	-----------	----------	-----------	---------

مقایسه مقادیر پارامترهای با دیگر قسمت های مخزن و تحلیل این داده ها نشان می دهد که نقطه انتخاب شده برای حفاری، از نظر رفتار مکانیکی سنگ، شرایطی نسبتاً مناسب اما همراه با برخی ویژگی های ویژه و قابل توجه دارد. مقدار چگالی متوسط سنگ در کنار ضریب امپدانس های موجی Z_p و Z_s نسبتاً بالا نشان می دهد که سنگ از استحکام دینامیکی مناسبی برخوردار است و قابلیت انتقال انرژی موجی در آن مطلوب است. این ویژگی معمولاً با سنگ های نسبتاً متراکم و نیمه سفت سازگار است. یکی از پارامترهای مهم، نسبت V_p/V_s نسبتاً کم است. این مقدار کم معمولاً نشانه ای از شکنندگی بالاتر، فشارهای مؤثر بیشتر یا حضور تخلخل های مؤثر در سنگ است. در چنین شرایطی سنگ می تواند در برابر تنش های برشی رفتار شکننده تری نشان دهد؛ رفتاری که بسته به نوع عملیات (حفاری یا شکست هیدرولیکی) می تواند هم مزیت و هم چالش ایجاد کند. مقدار UCS نسبتاً بالا در هر سه معادله ی مربوط به لیتولوژی ماسه سنگی (، $Moos=80.22$ ، $Freburg=145.36$ ، $General=53.35$) نشان دهنده مقاومت فشاری مناسب سنگ است نسبت به بقیه ی قسمت های مخزن است؛ به این معنی که دیواره چاه در برابر تنش های حفاری مقاومت کافی دارد و احتمال ریزش یا گسیختگی ناگهانی کم تر است. با این حال، مدول حجمی K نسبتاً کم نسبت به سایر مدول ها حاکی از آن است که سنگ در برابر تغییرات فشار تخلخل، حساسیت بیشتری داشته و ممکن است تراکم پذیری بیشتری نسبت به سنگ های سخت تر از خود داشته باشد. مدول برشی (G) متوسط و مدول یانگ نسبتاً بالا نیز نمایانگر تعادل مناسبی میان سختی و انعطاف پذیری سنگ است. این مقادیر نشان می دهند که هرچند سنگ در برابر تغییر شکل مکانیکی نسبتاً مقاوم است، اما به دلیل نسبت پواسون بسیار پایین، رفتار الاستیک آن به سمت شکنندگی گرایش دارد. پایین بودن نسبت پواسون بار دیگر این نکته را تقویت می کند که سنگ در برابر تنش های کششی و برشی، مقاومت کمتری نشان می دهد و احتمال شکست های ترد در آن بیشتر است. در چنین شرایطی، مفهوم «شرایط حفاری کنترل شده» اهمیت ویژه پیدا می کند. به دلیل پواسون بسیار پایین، اگر فشار گل کمتر از حد بهینه شود، سنگ به سرعت به سمت شکست و ایجاد ترک های ناخواسته پیش می رود. اما از سوی دیگر، همین خصوصیت باعث می شود که سنگ برای عملیات تکمیلی مانند شکست هیدرولیکی بسیار مستعد و مناسب باشد، چراکه انرژی لازم برای بازکردن یا گسترش ترک ها کمتر خواهد بود. بنابراین، با تنظیم دقیق فشار گل در بازه ای بهینه —بین فشار شکست و فشار سازند— می توان هم پایداری چاه را در هنگام حفاری حفظ کرد و هم در عملیات هدمند، شکست های موردنظر را با کنترل و کارایی بالاتر ایجاد نمود. در مجموع، ترکیب UCS نسبتاً بالا، مدول یانگ قوی، Z_p و Z_s نسبتاً بالا، و V_p/V_s کم، تصویری از سنگی نسبتاً سخت، با رفتار شکننده قابل کنترل و مقاومت فشاری مطمئن را ارائه می دهد. این مجموعه ویژگی ها نشان می دهد که نقطه موردنظر از نظر مکانیکی برای حفاری ایمن و پایدار مناسب بوده و در عین حال ظرفیت بالایی برای عملیات تکمیلی مانند شکست هیدرولیکی دارد. این تحلیل می تواند به عنوان یکی از مراحل نهایی ارزیابی مکانیکی محل حفاری، اطمینان لازم را برای آغاز عملیات فراهم آورد. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر استخراج و تحلیل پارامترهای ژئومکانیکی حاصل از وارون سازی پیش از برانبارش با هدف یک ارزیابی سریع و یکپارچه از پایداری چاه و انتخاب ناحیه بهینه حفاری بوده است. لازم به ذکر است که این مطالعه در چارچوب یک مدل زمین ساختی-مکانیکی کامل (Mechanical Earth Model) توسعه نیافته و به همین دلیل تحلیل تنش های برجا، تنش های افقی غالب (σ_H ، σ_h) و جهت گیری شکست های ساختاری در آن ارائه نشده است. انجام چنین تحلیلی، نیازمند

داده‌های اختصاصی از جمله میکروالاینمنت فناوریانه، داده‌های تصویربرداری چاه، نتایج آزمایش‌های جهت‌سنجی شکست و اطلاعات تنش‌محور از AVO آزمون‌ها با کیفیت بسیار بالا است که بخشی از آن‌ها در مجموعه داده‌های در دسترس محدود بوده‌اند. با وجود این، رویکرد ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان مرحله مقدماتی برای تحلیل تنش‌های برجا و توسعه یک MEM کامل مورد استفاده قرار گیرد و انجام این مرحله در مطالعات توسعه‌ای آینده توصیه می‌شود.

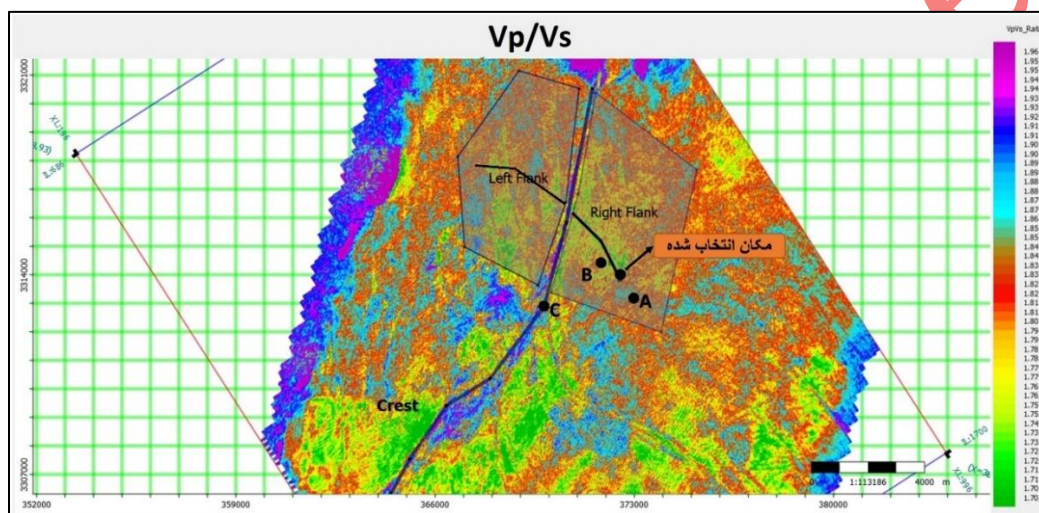




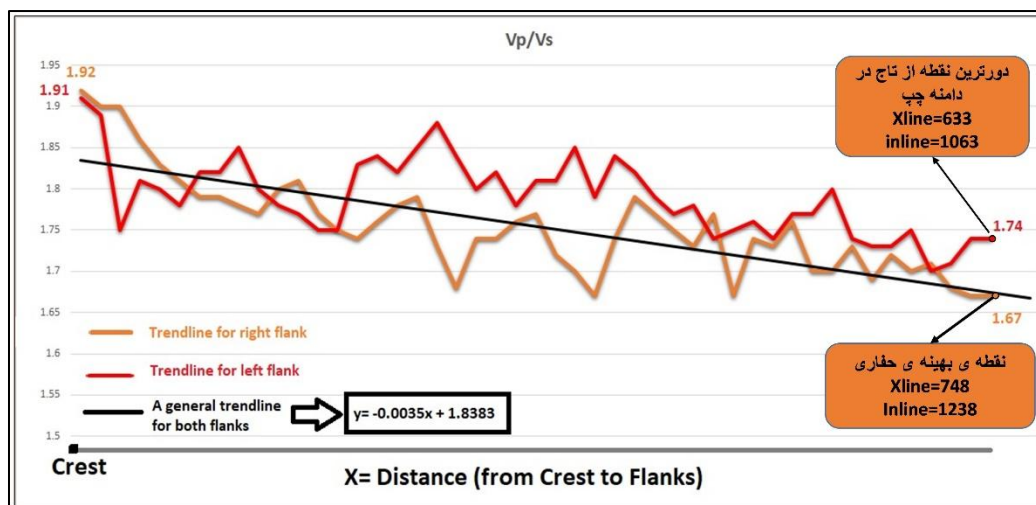
شکل ۱۱ نقشه‌های میانگین پارامترهای ژئومکانیکی در ناحیه مورد مطالعه برای ارزیابی پایداری چاه در نقطه بهینه حفاری؛ شامل: (الف) مقاومت صوتی موج P ، (ب) مقاومت صوتی موج S ، (پ) چگالی، (ت) نسبت موج P به موج S ، (ث) مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، (ج) مدول حجمی، (چ) مدول برشی، (ح) مدول یانگ، (خ) ضریب پواسون، (د) Modulus-Rho، و (ذ) LR

به‌منظور بررسی ناهمگنی مکانی رفتار ژئومکانیکی و تفسیر دقیق‌تر شکنندگی در امتداد ساختار تاقدیسی، روند فضایی نسبت V_p/V_s در محدوده ماسه‌سنگی سازند نهر عمر مورد تحلیل قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا سه ناحیه اصلی شامل تاج تاقدیس، دامنه چپ و دامنه راست بر روی نقشه میانگین V_p/V_s تفکیک گردید (شکل ۱۲). این تقسیم‌بندی امکان ارزیابی تغییرات تدریجی پارامترهای الاستیک از مرکز تاقدیس به سمت دامنه‌های جانبی را فراهم می‌سازد. با استخراج پروفیل‌های خطی از تاج تاقدیس به سمت هر یک از دامنه‌ها، تغییرات نسبت V_p/V_s به‌صورت تابعی از فاصله نمایش داده شد. نتایج هر دو پروفیل نشان می‌دهد که مقدار V_p/V_s در ناحیه تاج بیشترین مقدار را دارد و با افزایش فاصله و حرکت به سمت دامنه‌ها روندی کاهشی به‌خود می‌گیرد. این رفتار در هر دو دامنه چپ و راست مشاهده شده و خط روند کلی پروفیل‌ها نیز این کاهش

تدریجی را تأیید می‌کند. رگرسیون خطی بین مقدار V_p/V_s و فاصله از تاج رابطه‌ای با فرم $y = -0.0035x + 1.83$ ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده افت منظم مقدار نسبت با افزایش فاصله از تاج است (شکل ۱۳). بیشینه بودن V_p/V_s در تاج تاقدیس و کاهش تدریجی آن در جهت دامنه‌ها را می‌توان به تفاوت‌های لیتولوژیکی و میزان فشردگی در دو بخش نسبت داد. ناحیه تاج معمولاً تحت فشردگی بالاتر، سیمانی‌شدن بیشتر و کاهش تخلخل مؤثر قرار دارد؛ بنابراین سنگ سخت‌تر بوده و نسبت V_p/V_s در آن مقدار بیشتری دارد. با دور شدن از تاج و حرکت به سمت دامنه‌ها، کاهش سختی سنگ، افزایش تخلخل و تغییرات ریزساختاری سبب کاهش نسبت V_p/V_s می‌شود. این روند مکانی بیانگر ناهمگنی شکنندگی در امتداد ساختار است؛ به‌گونه‌ای که دامنه‌ها نسبت به تاج رفتار تردتر و شکست‌پذیرتری نشان می‌دهند و این موضوع در طراحی برنامه حفاری و مدیریت پایداری چاه اهمیت دارد.



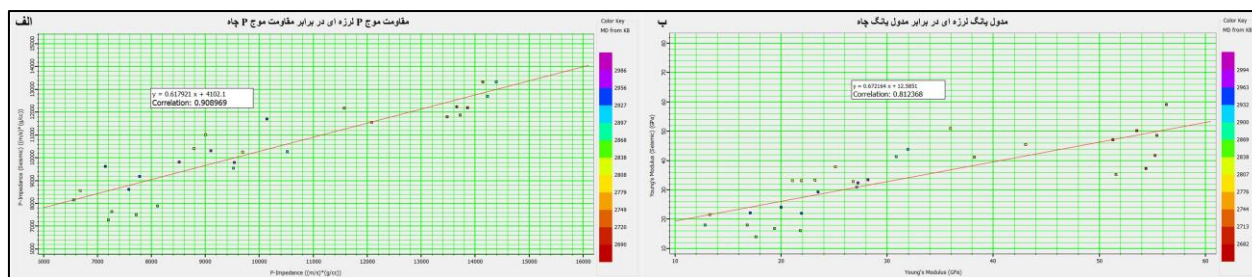
شکل ۱۲. نقشه میانگین نسبت V_p/V_s در ضخامت ماسه‌سنگ سازند نهر عمر. سه ناحیه تاج، دامنه چپ و دامنه راست مشخص شده‌اند. مسیر برداشت پروفیل‌ها نیز بر روی نقشه نشان داده شده است. این مسیرها در دامنه ی راست، قطری‌ترین و طولانی‌ترین گذر از تاج تاقدیس به سمت نقطه ی بهینه حفاری است و در دامنه ی چپ در راستای بیشترین تغییرات ساختاری قرار دارد.



شکل ۱۳. تغییرات نسبت V_p/V_s در امتداد دو پروفیل ساختاری از تاج تا قدیس به سمت دامنه چپ و راست. خطوط روند نشان دهنده کاهش تدریجی مقدار V_p/V_s با افزایش فاصله از تاج هستند. معادله خط رگرسیون کلی به صورت $y = -0.0035x + 1.83$ ارائه شده است.

اعتبارسنجی

به منظور سنجش میزان دقت نتایج، ابتدا مقاومت موج P به دست آمده از وارون سازی هم زمان با مقادیر لاگ مربوطه در چاه ها به صورت نمودار پراکندگی مقایسه شد. انتخاب این پارامتر برای ارزیابی صحت نتایج، به دلیل نقش کلیدی آن در محاسبه بسیاری از ویژگی های پتروفیزیکی و ژئومکانیکی، کاملاً توجیه پذیر است. همان گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می شود، ضریب همبستگی میان داده های وارون سازی و لاگ های چاه برابر با ۰.۹۰۵۴۹۱ به دست آمد که نشان دهنده دقت بالای مدل سازی است. برای بررسی دقیق تر عملکرد وارون سازی، یکی از پارامترهای مهم ژئومکانیکی یعنی مدول یانگ نیز با استفاده از داده های لرزه ای محاسبه و با مقادیر حاصل از لاگ ها مقایسه گردید. این پارامتر به دلیل ارتباط مستقیم با رفتار مکانیکی سنگ و خواص الاستیک مخزن به عنوان شاخص تکمیلی در فرآیند ارزیابی به کار گرفته شد. مطابق با نتایج شکل ۱۴، ضریب همبستگی این پارامتر ۰.۸۱۲۳۶۸ به دست آمد که با توجه به خطاهای ذاتی موجود در اندازه گیری های چاه و برآوردهای لرزه ای، مقدار قابل قبول و رضایت بخشی محسوب می شود. اگرچه همبستگی مدول یانگ حدود ۱۰ درصد کمتر از همبستگی مقاومت موج P است، این میزان کاهش طبیعی بوده و همچنان دقت مطلوب وارون سازی را نشان می دهد. با وجود عدم دسترسی به مغزه، فرآیند اعتبارسنجی از طریق لاگ های چاه انجام شد. در نبود داده های آزمایشگاهی مستقیم، تطابق قابل توجه نتایج لرزه ای با لاگ ها می تواند به عنوان روشی معتبر و غیرمستقیم برای ارزیابی صحت مدل در نظر گرفته شود. با این حال، پیشنهاد می شود در مطالعات آینده، ترکیب داده های مقاطع نازک یا نتایج چاه آزمایی—در صورت وجود—به منظور بهبود ارزیابی ها مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۴ مقایسه‌ای میان مقاومت صوتی تراکمی (الف) و مدول یانگ (ب) به‌دست‌آمده از وارون‌سازی لرزه‌ای با داده‌های لاگ چاه B می‌کند؛ این مقایسه به منظور ارزیابی میزان دقت نتایج وارون‌سازی انجام شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج کلیدی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در میادینی با ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده همچون سازند نهر عمر، اتکا به روش‌های منفرد لرزه‌ای یا چاه‌نگاری قادر به ارائه تصویری جامع از وضعیت مخزن نیست. ادغام سیستماتیک داده‌های ژئوفیزیکی و ژئومکانیکی، به‌ویژه با بهره‌گیری از وارون‌سازی پیش از برآیند، امکان استخراج دقیق‌تر پارامترهای الاستیک و تولید نشانگرهای یکپارچه‌ای نظیر TPG را فراهم کرد. توسعه شاخص چندمعیاره کیفیت مخزنی و پتانسیل هیدروکربنی از مهم‌ترین دستاوردهای این مطالعه بود که محدودیت تفسیرهای تک‌متغیره را برطرف ساخت. تلفیق این شاخص‌ها با مدل ساختاری و نقشه ضخامت مخزن، مکان بهینه حفاری را در تاج تاقدیس شناسایی کرد و تحلیل ژئومکانیکی نشان داد که این ناحیه با وجود رفتار ترد سنگ، در شرایط حفاری کنترل‌شده از پایداری کافی برخوردار است. مقایسه چارچوب ارائه‌شده با رویکردهای پیشین نشان می‌دهد که، برخلاف روش‌های متداول تعیین محل حفاری که عمدتاً بر پایه مدل‌سازی ژئومکانیکی کامل، داده‌های آزمایشگاهی گسترده و تحلیل‌های چندمرحله‌ای هستند، روش حاضر با اتکا به پارامترهای حاصل از وارون‌سازی پیش از برآیند و توسعه یک شاخص چندمعیاره توانسته است تصویری یکپارچه و کم‌هزینه از کیفیت مخزنی و شرایط مکانیکی ارائه دهد. این مقایسه بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی—به‌ویژه در مراحل اولیه اکتشاف یا در میادین دارای محدودیت داده—می‌تواند نقش جایگزین مؤثری برای فرآیندهای زمان‌بر و داده‌محور داشته و انتخاب محل حفاری را با دقت و سرعت بیشتری ممکن سازد.

کاربردهای عملی

از منظر عملی، این پژوهش رویکردی قابل تعمیم برای سایر میادین دارای ریسک زمین‌شناسی بالا ارائه می‌دهد و می‌تواند در مراحل پیش از توسعه، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های حفاری و افزایش کارایی تصمیم‌گیری ایفا کند. استفاده از شاخص‌های ترکیبی ژئومکانیکی—لرزه‌ای، نه تنها امکان مکان‌یابی دقیق‌تر چاه را فراهم می‌آورد، بلکه در برنامه‌ریزی پایداری چاه، انتخاب وزن گل و حتی طراحی عملیات تکمیلی نظیر شکست هیدرولیکی کاربرد مستقیم دارد. از منظر علمی نیز، نتایج این تحقیق گامی

مؤثر در جهت ارتقای رویکردهای پتروژئومکانیکی یکپارچه و استفاده هدفمند از داده‌های پیش از برانبارش برای بهبود کیفیت تصمیم‌گیری مهندسی است. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که ترکیب تحلیل‌های کمی ژئومکانیکی با داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش می‌تواند ریسک‌های فنی و اقتصادی عملیات حفاری را به شکل معناداری کاهش دهد.

منابع

1. Al-Garbawi, Z. H. A., & Al-Shahwan, M. F. (2019). Petrophysical evaluation for the reservoir units of Nahr-Umr formation in the luhais oil field south of Iraq. *The Iraqi Geological Journal*, 83–100.
2. Ameri, H., & Motahari, M. (2024). An Evaluation of Rock Mechanics Properties in a High-Risk Oil Field: Case Study Review. *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (Including the Workshop Programme)*, 2024(1), 1–5.
3. Angel, R. J. (2000). Equations of state. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 41(1), 35–59.
4. Aristimuno, J., Fernandez-Concheso, J., & Del Moro, Y. (2022). Effect of Simultaneous and Facies-based inversions on Geomechanical properties estimations in an Unconventional Reservoir. *Second EAGE Conference on Seismic Inversion*, 2022(1), 1–5.
5. Castagna, J. P., Batzle, M. L., & Eastwood, R. L. (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 50(4), 571–581.
6. Chaki, S., Routray, A., & Mohanty, W. K. (2018). Well-log and seismic data integration for reservoir characterization: A signal processing and machine-learning perspective. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(2), 72–81.
7. Chang, C., Zoback, M. D., & Khaksar, A. (2006). Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3–4), 223–237.
8. Chen, X., Yi, C., & Ke, C. (2015). Bending stiffness and interlayer shear modulus of few-layer graphene. *Applied Physics Letters*, 106(10).
9. Chopra, S., & Castagna, J. P. (2014). AVO: Society of Exploration Geophysicists. *Investigations in Geophysics*, 16, 304.
10. Esmacilpour, S., & Ispas, I. (2023). 3D In-Situ Stress Characterization Using Seismic Inversion and Downhole Measurements. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, ARMA-2023.
11. Eyinla, D. S., Oladunjoye, M. A., Olayinka, A. I., & Bate, B. B. (2021). Rock physics and geomechanical application in the interpretation of rock property trends for overpressure detection. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 11, 75–95.
12. Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., & Gregory, Ar. (1974). Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6), 770–780.
13. Guliyev, E., & Davis, T. L. (2007). Interpretation of VP/VS velocity ratio for improved tight gas sandstone reservoir characterization, Rulison field, Colorado. *SEG International Exposition and Annual Meeting*, SEG-2007.
14. Hamid, O., Oluyemi, G., & Sanaee, R. (2022). The Critical Roles of Geomechanical Modeling During Exploration Phase. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, D041S134R003.
15. Ivanov, J., Tsoflas, G., Miller, R., & Xia, J. (2009). Practical aspects of MASW inversion using varying density. *22nd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, cp-157.
16. Jiang, J.-W., & Park, H. S. (2014). Negative poisson's ratio in single-layer black phosphorus. *Nature Communications*, 5(1), 4727.
17. Kårstad, E., Zheng, Y., Lukpanov, A., Abzhanov, N., Giesemann, K., & Tyran, S. (2018). Geomechanics: A Key Input for Optimizing Drilling and Hydraulic Fracturing in a Depleted Oil and Gas Field in Kazakhstan. *SPE Annual Caspian Technical Conference*, D013S003R002.
18. Katahara, K. W. (2001). Lamé's parameter as a pore-fluid indicator: a rock-physics perspective. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2001* (pp. 326–328). Society of Exploration Geophysicists.
19. Noohnejad, A., Ahangari, K., & Goshtasbi, K. (2021). Quantitative risk assessment for wellbore stability analysis using different failure criteria. *Geomechanics and Engineering*, 24(3), 281–293.

20. Noufal, A. (2020). Geomechanical Evidences for Conjugate Slip and Block Rotation Along the Strike. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, D021S043R003.
21. Riahi, Z. T., Sarkarinejad, K., Faghih, A., Soleimany, B., & Payrovian, G. R. (2021). Impact of inversion tectonics on the spatial distribution of hydrocarbon traps in the NW Persian Gulf and the southern Dezful Embayment, SW Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 134, 105364.
22. Richards, P. G., & Aki, K. (1980). *Quantitative seismology: theory and methods* (Vol. 859). Freeman San Francisco, CA.
23. Saadatinejad, M. R., Javaherian, A., & Sarkarinejad, K. (2012). Investigation of the various spectral decomposition methods to detect and explore hidden complex reef reservoir structures and their hydrocarbon potentials in northwestern part of the Persian Gulf. *Energy Exploration & Exploitation*, 30(6), 867–887.
24. Sharma, R. K., & Chopra, S. (2012). New attribute for determination of lithology and brittleness. *SEG International Exposition and Annual Meeting*, SEG-2012.
25. Tello, R. H., Wong, G., Ghosh, A., Chatterjee, A., & Santhamoorthy, P. R. (2020). Improving Well Delivery by Integrated Geomechanical Understanding with Robust Well Planning and Execution: A Successful Case Study from a Development Drilling Campaign in Offshore Peninsular Malaysia. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, D033S015R002.
26. Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge university press.