

بررسی کیفیت مخزنی سازند غار - آسماری در یکی از میادین هیدروکربنی ایران با استفاده از وارون سازی پیش از برانبارش

نسرین جباری^۱، نوید شاد منامن^{۲*}، علی چهرازی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۲ استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۳ رئیس قسمت زمین شناسی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹)

چکیده

شناسایی محدوده مخزن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای اهمیت فراوانی برای افزایش تولید نفت و گاز در میادین هیدروکربنی دارد. در این پژوهش، از وارون سازی پیش از برانبارش به منظور بررسی نوع سیال و تغییرات خواص مخزنی (مقاومت صوتی، مقاومت برشی و تخلخل) در یکی از میادین نفتی ایران در سازندهای مخزنی غار- آسماری و جهرم استفاده و کیفیت مخزنی سازند غار- آسماری با توجه به تغییرات چگالی و مقاومت‌های تراکمی و برشی تعیین شد. همچنین از روش LithoSI جهت ارزیابی دقیق سنگ‌شناسی‌های احتمالی و کمک به تشخیص چینه‌شناسی و تفسیر بهتر مناطق حاوی سیال و شناسایی محدوده مخزنی در این میدان نفتی استفاده شد. نتایج وارون سازی لرزه‌ای پیش از برانبارش، کاهش چگالی و مقاومت‌های تراکمی و برشی را در ناحیه غار- آسماری نشان می‌دهد. از ناحیه غار- آسماری تا جهرم، چگالی و مقاومت‌های تراکمی و برشی افزایش یافته است. همچنین نتایج نمودارهای مقاومت صوتی برحسب مقاومت برشی براساس تغییرات تخلخل و تغییرات اشباع‌شدگی آب نشان می‌دهد در ناحیه غار- آسماری مقدار تخلخل، زیاد و اشباع‌شدگی از آب، کم است و از ناحیه غار- آسماری تا جهرم، مقدار اشباع‌شدگی آب افزایش و مقدار تخلخل کاهش پیدا کرده است. در روش LithoSI با استفاده از نمودارهای تقاطعی مقاومت صوتی برحسب نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی می‌توان نوع سیال در چاه را تشخیص داد. از آنجایی که مقاومت صوتی حاصل ضرب چگالی در سرعت صوت است، با افزایش تخلخل، چگالی و سرعت صوت کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در سازند غار- آسماری مقدار تخلخل زیاد و مقاومت صوتی کم است. با انجام این روش در چاه و مقایسه آن با نتایج وارون سازی پیش از برانبارش، وجود نفت و گاز در سازند غار- آسماری اثبات شد.

واژه‌های کلیدی: وارون سازی پیش از برانبارش، تخلخل، مقاومت صوتی، مقاومت برشی، اشباع‌شدگی

۱.... مقدمه

یکی از مهم ترین روش ها برای تعیین محدوده مخزن، وارون سازی (مدل سازی معکوس) داده های لرزه ای است. در وارون سازی داده های لرزه ای باید سعی شود از ترکیب داده های لرزه ای با سایر داده های زمین شناسی و داده های حاصل از نمودارهای چاه، اطلاعاتی را برای تخمین آسان ویژگی هایی نظیر نوع سنگ شناسی و تخلخل به دست آورد. ارزیابی خواص سنگ از داده های لرزه ای با دو روش انجام می شود. روش اول، وارون سازی پس از برانبارش است که گودوی و همکاران (۱۹۹۷) آن را مطرح و با استفاده از آن، مقاومت تراکمی را محاسبه کردند. روش دوم را همپسون و همکاران (۲۰۰۵) با نام وارون سازی پیش از برانبارش معرفی کردند (اندرسون، ۲۰۰۹). وارون سازی پس از برانبارش، دامنه های لرزه ای را به مقاومت تراکمی تبدیل می کند که در نتیجه آن، فرکانس های کم به دلیل اعمال پردازش های مختلف از بین می روند که این مسئله باید با نگاره های صوتی فیلتر شده جبران شود؛ بنابراین، وارون سازی پس از برانبارش عدم اطمینان زیادی به همراه دارد و تنها اطلاعات باارزشی که از آن حاصل می شود، مقاومت موج تراکمی است (قتبرزاد و همکاران، ۲۰۱۷). در وارون سازی پیش از برانبارش، می توان مقاومت موج تراکمی، اطلاعات موج برشی، چگالی و نسبت پواسون را نیز از داده های برانبارش نشده استخراج کرد؛ از این رو، وارون سازی پیش از برانبارش، ارزش بیشتری نسبت به وارون سازی پس از برانبارش دارد (موسوی و همکاران، ۲۰۱۶). مالیک (۱۹۹۹) وارون سازی پس از برانبارش و وارون سازی پیش از برانبارش را در یک میدان گازی به- کاربرد و نتیجه گرفت که وارون سازی پیش از برانبارش، جزئیات بیشتری از مخزن را نسبت به وارون سازی پس از برانبارش در اختیار می گذارد. ما (۲۰۰۲) استخراج دامنه برحسب دورافت و وارون سازی مقاومت صوتی را به عنوان یک مسئله بهینه سازی عمودی فرمول بندی کرد (چوپرا و

کاستاگنا، ۲۰۱۴). همپسون و همکاران (۲۰۰۵) با بسط کار بولاند و عمر روش جدیدی را به عنوان وارون سازی پیش از برانبارش جهت به دست آوردن مقاومت تراکمی، برشی و چگالی ارائه دادند. طیبی و همکاران (۱۳۹۱) از وارون-سازی پیش از برانبارش برای تخمین حجم ماسه استفاده کردند. در همه روش های یاد شده، رابطه تخلخل و مقاومت صوتی بیان نشده و تغییرات تخلخل نیز بررسی نشده است. پژوهشگران از روش LithoSI برای تفکیک ناحیه مخزنی استفاده کرده اند.

امروزه، وارون سازی داده های لرزه ای پیش از برانبارش امری متداول است، اما چالش اصلی در این روش، نحوه استفاده از مقادیر کشسانی حاصل از آن در طبقه بندی سنگ شناسی و تفکیک انواع مناطق حاوی سیال و به طور کلی، تفسیر و ارزیابی مخزن است. یکی از راه های تفسیر، تهیه نمودارهای تقاطعی نشان دهنده های حاصل از داده های چاه است؛ برای مثال می توان نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج طولی و موج برشی را برحسب مقاومت صوتی تهیه و محدوده مورد نظر را روی آن مشخص کرد. با این کار، مقادیر حاصل از وارون سازی منطقه مورد نظر تفکیک می-شود و می توان آن را روی مقطع نشان داد. با این حال، داده-های لرزه ای به میزان فراوانی تحت تأثیر ضخامت نواحی هستند و در موارد زیادی نمی توان منطقه را با اطمینان مشخص کرد (مانند وجود منطقه کم ضخامت حاوی گاز)؛ بنابراین، به جای انتخاب مستقیم یک منطقه از روی نمودارهای تقاطعی معین، می توان یک توزیع احتمالی برای منطقه مورد نظر تعریف کرد. این کار که به افزایش دقت در طبقه بندی سنگ شناسی، تفکیک بهتر مناطق حاوی سیال و به طور کلی، پیش بینی بهتر خواص مخزن می انجامد، به کمک الگوریتم LithoSI انجام می شود. این الگوریتم برای پیش بینی سنگ شناسی یا دسته بندی داده های پتروفیزیکی از نشان دهنده های حاصل از وارون سازی پیش از برانبارش بهره می گیرد.

وارون سازی پیش از برانبارش و اعمال آن بر مقطع لرزه‌ای، محدوده مخزنی و غیرمخزنی مشخص شد. شکل ۱ الگوریتم وارون سازی پیش از برانبارش را نشان می‌دهد. تخلخل و تراوایی دو پارامتر پتروفیزیکی مؤثر در ارزیابی مخازن هیدروکربنی هستند. تشخیص و تعیین محدوده شکستگی و نواحی تراوا و جداسازی آن از نواحی ناتراوا با نگاره گاما صورت می‌گیرد. در مرحله بعدی، محاسبه میزان تراوایی با روش‌های آزمایشگاهی و سرچاهی انجام می‌پذیرد. بررسی دامنه استونلی که در مجموعه امواج سطحی طبقه بندی می‌شود، در تعیین پارامتر تراوایی نقش مؤثرتری دارد. موج استونلی روی دیواره چاه حرکت می‌کند و با وارد شدن به نواحی تراوا و شکسته، دامنه آن تقلیل می‌یابد. نسبت دامنه تقلیل یافته به دامنه اولیه معیاری از میزان تراوایی محسوب می‌شود. به علت نبود داده‌های موج استونلی در چاه‌های مذکور، تعیین نواحی شکسته و تراوا میسر نشد.

۲ وارون سازی

پارامترهای وارون سازی عبارت‌اند از:

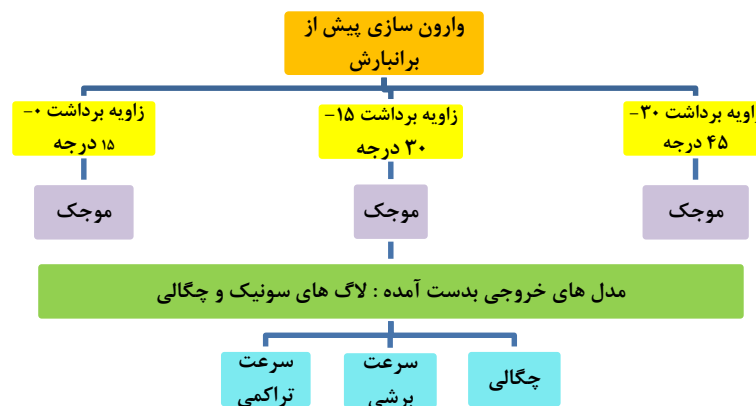
ماتریس داده‌ها؛ d:

ماتریس پارامترهای مدل؛ m:

ماتریس کرنل داده‌ها؛ G:

اگر پارامترهای مدل از داده‌ها جدا باشد (explicit) رابطه $d=Gm$ برقرار است و حالت‌های مختلف زیر رخ می‌دهد:

در این پژوهش، از روش وارون سازی پیش از برانبارش در یکی از میداین هیدروکربنی ایران به منظور بررسی تغییرات اشباع آب، تخلخل، چگالی و مقاومت‌های صوتی و برشی استفاده شده است. به این منظور، سی و پنج موجک در بازه‌های نزدیک، میانه و دور با استفاده از داده‌های چاه ساخته شد و در نهایت، پنج موجک میانگین به دست آمد. سپس مدل‌های فرکانس پایین چگالی، موج تراکمی و برشی به عنوان یکی از ورودی‌های وارون سازی ساخته و در نتیجه، با انجام وارون سازی پیش از برانبارش، مقاومت تراکمی، برشی و چگالی با استفاده از معادلات محاسبه شدند. همچنین نمودارهای تقاطعی مقاومت صوتی بر حسب مقاومت برشی بر اساس تغییرات اشباع آب و تغییرات تخلخل بررسی شدند. با توجه به این نمودارهای تقاطعی، تفکیک سیال به درستی صورت گرفت. از داده‌های چاه برای ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی جهت تطبیق داده‌های لرزه‌ای با داده‌های چاه استفاده شده است. در مرحله آخر، با تبدیل دورافت به زاویه و همچنین استفاده از اطلاعات چاه، به وارون سازی پیش از برانبارش و استخراج پارامترهای پتروفیزیکی پرداخته شده است. برای انجام وارون سازی پیش از برانبارش بر مبنای مدل، مدل‌های اولیه‌ای با استفاده از نگاره‌های چاه و اطلاعات لرزه‌ای استخراج و سپس موجک‌هایی در بازه‌های زاویه‌ای نزدیک، میانی و دور از چاه‌ها ساخته و با انجام دادن



شکل ۱. الگوریتم وارون سازی پیش از برانبارش (شولت و مانثی، ۲۰۱۴).

وارون‌سازی پیش از برانبارش برطرف ساخت. وارون‌سازی پیش از برانبارش، نوعی وارون‌سازی AVO است که در آن، مکعب داده‌های لرزه‌ای به مکعب ضرایب بازتاب برای دورافت‌های مختلف تبدیل و نقطه‌های عمقی مشترک محاسبه می‌شود (ویکن، ۲۰۰۶).

روابط ریاضی استفاده‌شده در گودوی و همکاران (۱۹۹۷) در وارون‌سازی پیش از برانبارش، که بر مبنای معادلات آکی-ریچاردز است، به شرح زیر است:

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2}(1 + \tan^2\theta) \right] \times \frac{\Delta I_p}{I_p} + \left[4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right] \times \frac{\Delta I_s}{I_s} - \left[\frac{1}{2} \tan^2\theta - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \sin^2\theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (5)$$

که θ زاویه فرود است و α ، β و ρ به ترتیب سرعت موج طولی، سرعت موج برشی و چگالی هستند. با توجه به چوپرا و کاستاگنا (۲۰۱۴) انتظار می‌رود در زمان نبود پارامترهای پیچیده‌ای مانند هیدروکربن، رابطه بین سرعت موج تراکمی و برشی باید خطی باشد. همچنین انتظار می‌رود رابطه گاردنر، ۱۹۷۴ بین چگالی و سرعت موج تراکمی برقرار باشد که وارون‌سازی پیش از برانبارش، این روابط را بیان می‌کند. در الگوریتم همپسون و همکاران (۲۰۰۵)، هدف از وارون‌سازی پیش از برانبارش، ایجاد ارتباط منطقی بین متغیرها است، به‌ویژه در صورت نامطلوب بودن داده‌ها که می‌تواند ناشی از حساسیت زیاد به نوفه باشد. روابط حاکم بر الگوریتم مذکور به شرح زیر است:

$$R_{pi} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln Z_{pi} = \frac{1}{2} [\ln Z_{pi+1} - \ln Z_{pi}], \quad (6)$$

که Z_p مقاومت صوتی، i شماره فصل مشترک لایه i ام و R ضریب بازتاب است.

بر این اساس، دو رابطه خطی برای وارون‌سازی پیش از برانبارش معرفی می‌شود که رابطه اول با فرض ثابت بودن

۱- اگر تعداد داده‌ها بیشتر از تعداد پارامترهای مدل باشد، حالت فراتخمین (over determined) رخ می‌دهد و پارامترهای مدل با روش کمترین مربعات به دست می‌آیند. جهت یافتن پارامترهای مدل، باید تابع خطا (e) بین داده‌های مشاهده‌شده (d^{obs}) و داده‌های تخمین‌زده‌شده (d^{pre}) را کمینه کرد:

$$e = d^{obs} - d^{pre} \quad (1)$$

$$E = e^T \cdot e \\ E = (d - Gm)^T \cdot (d - Gm) \\ dE/dm = 0 \quad (2)$$

$$m = (G^T G)^{-1} G^T d \quad \text{آنگاه}$$

۲- اگر تعداد داده‌ها برابر با تعداد پارامترهای مدل باشد، در این حالت به علت مربعی بودن ماتریس کرنل داده‌ها، پارامترهای مدل به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$m = G^{-1} d \quad (3)$$

۳- اگر تعداد پارامترهای مدل بیش از تعداد داده‌ها باشد، حالت فروتخمین (under determined) رخ می‌دهد و مقدار پارامتر مدل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d m = G^T (G G^T)^{-1} \quad (4)$$

۳ وارون‌سازی پیش از برانبارش

روش وارون‌سازی پیش از برانبارش، بر این فرض استوار است که ضریب بازتاب (R)، تابعی از زاویه تابش است و می‌تواند با معادلات آکی و ریچاردز (۱۹۸۰) بیان شود. هدف از وارون‌سازی پیش از برانبارش، به دست آوردن تخمین‌های مطمئن از سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی است که با استفاده از آنها خصوصیات سنگ‌شناسی و سیال زیرسطحی تعیین می‌شود (ما، ۲۰۰۲). وارون‌سازی پس از برانبارش، روش قدرتمندی است اما اطلاعات مقاومت صوتی حاصل از آن بین اثرهای ناشی از سنگ‌شناسی، تخلخل و وجود سیالات تفاوتی قائل نمی‌شود؛ بنابراین این محدودیت‌ها را می‌توان با استفاده از

۶- محاسبه k_c ، k ، m_c و m با استفاده از نمودارهای تقاطعی نگاره‌های چاه؛

۷- انجام وارون‌سازی پیش از برانبارش و به‌دست آوردن مقاومت تراکمی و برشی، نسبت مقاومت تراکمی به مقاومت برشی و چگالی.

۴ صحت‌سنجی نتایج و داده‌های مورد نیاز برای

انجام وارون‌سازی پیش از برانبارش

در این پژوهش، از روش وارون‌سازی پیش از برانبارش در یکی از میداین هیدروکربنی ایران استفاده شده است. معیار اصلی صحت‌سنجی نتایج، داده‌های تصحیح‌شده نگاره‌های چاه هستند. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات و گزارش‌های زمین‌شناسی، موقعیت چاه‌ها و و سرسازندها برای هفت چاه، اطلاعات چاه‌پیمایی از قبیل نگاره‌های چگالی و صوتی، داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش و افق-های لرزه‌ای و همچنین داده‌های چشمه‌کنترلی به‌منظور کالیبراسیون داده‌های چاه‌پیمایی و داده‌های لرزه‌ای در محل هفت چاه هستند. از داده‌های چشمه‌کنترلی اغلب برای هم‌حوزه کردن داده‌های چاه‌پیمایی و داده‌های لرزه‌ای و کالیبراسیون نگاره‌های صوتی استفاده می‌شود. تصحیح چکش‌شات در این میدان در عمق ۲۲۸۴ تا ۲۴۹۰ متری صورت گرفته است. اولین گام این است که داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش از حوزه زمان-دورافت به حوزه زمان-زاویه انتقال یابند. یک فرض مهم برای این پردازش، داشتن تابع سرعت در محیط لرزه‌ای است که برای تبدیل از دورافت به زاویه از آن استفاده می‌شود. برخی مراحل پردازشی جهت آماده‌سازی داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش، برای بهینه‌سازی نتایج به کار برده شده است. یکی از این مراحل شامل تشکیل آبر دسته (super gather) جهت کاهش نوفه‌های تصادفی و همچنین تصحیح استاتیکی باقیمانده رویدادهای به‌خط‌نشده یا کاهش اعوجاج‌های نامطلوب است. در به کارگیری آبر دسته، عمل

نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی به‌دست می‌آید. رابطه (۷) ارتباط میان مقاومت تراکمی و برشی را بیان می‌کند:

$$\ln(z_s) = k \ln(z_p) + k_c + \Delta I_s \quad (7)$$

که k شیب و k_c عرض از مبدأ خطی است که از اطلاعات نگاره‌های چاه به‌دست می‌آید. ΔI_s اثری است برای حالتی که سیال سنگ هیدروکربن باشد و اثری از آب نباشد. این مقدار در سنگ خیس برابر صفر است

دومین رابطه از معادله گاردنر و همکاران (۱۹۷۴) به‌دست می‌آید که رابطه بین چگالی و مقاومت صوتی را بیان می‌کند:

$$\ln \rho = m \ln(z_p) + m_c + \Delta I_D \quad (8)$$

که m شیب و m_c عرض از مبدأ خطی است که از اطلاعات نگاره‌های چاه به‌دست می‌آید. ΔI_D تأثیر عاملی است که ناشی از وجود هیدروکربن است و در صورت نبود هیدروکربن یا وجود آب، مقدار آن صفر است.

به‌طور کلی فرض بر این است که روند خطی، ناشی از نبود هیدروکربن و روند غیرخطی نشان‌دهنده وجود هیدروکربن است. در عمل، سه موجک برای زوایای نزدیک، میانی و دور استخراج و مدل‌های اولیه برای مقاومت تراکمی، مقاومت برشی و چگالی انتخاب می‌شود. سپس مقادیر k_c ، k ، m_c و m با استفاده از نگاره‌ها محاسبه می‌شوند و مقادیر مقاومت تراکمی، برشی و چگالی با استفاده معادلات به‌دست می‌آیند.

مراحلی که در وارون‌سازی پیش از برانبارش طی می‌شود به‌صورت کلی شامل مراحل زیر است:

- ۱- کالیبره کردن داده‌های چاه‌پیمایی و لرزه‌ای با استفاده از داده‌های چشمه‌کنترلی؛
- ۲- مقایسه هر ردلرزه واقعی با ردلرزه مصنوعی؛
- ۳- تولید دسته‌های زوایای نزدیک، میانی و دور؛
- ۴- استخراج سه موجک با زوایای نزدیک، میانی و دور؛
- ۵- ساخت مدل اولیه از داده‌های چاه؛

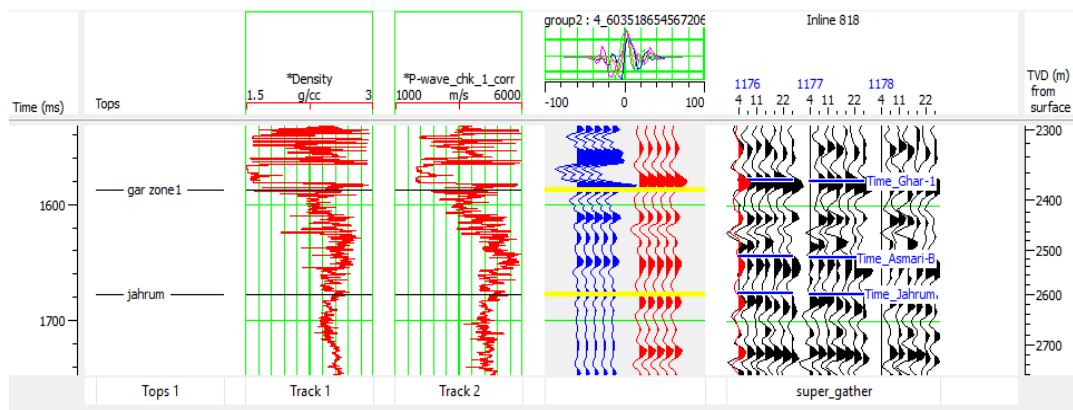
و با بهره‌گیری از داده‌های چاه استخراج می‌شوند. داده‌های چاه می‌تواند اطلاعات صحیحی را از فاز موجک لرزه‌ای در اختیار قرار دهد. موجک‌های میانگین به‌دست آمده در بازه‌های زاویه‌ای ۵ تا ۹ درجه، ۹ تا ۱۳ درجه، ۱۳ تا ۱۷ درجه، ۱۷ تا ۲۱ درجه و ۲۱ تا ۲۵ درجه از هفت چاه در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ۳، موجک‌های با زاویه کم، محتوای فرکانسی بالایی دارند و موجک‌های با زاویه دور محتوای فرکانسی پایین تری دارند. پدیده جذب وابسته به فرکانس و کشیدگی برون‌راند نرمال اغلب باعث می‌شوند که موجک دورتر فرکانس پایین تری نسبت به موجک نزدیک تر داشته باشد.

میانگین حاصل از پنج موجک میانگین در بازه‌های زاویه‌ای نزدیک، دور و میانه در بازه‌های ۵ تا ۹ درجه، ۹ تا ۱۳ درجه، ۱۳ تا ۱۷ درجه، ۱۷ تا ۲۱ درجه و ۲۱ تا ۲۵ درجه از هفت چاه در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از استخراج موجک، مدل‌های فرکانس پایین چگالی، موج تراکمی و موج برشی به‌عنوان یکی از ورودی‌های وارون‌سازی ساخته شدند. در شکل ۵ مدل اولیه برای مقاومت صوتی با استفاده از نگاره‌های چگالی، سرعت موج تراکمی و برشی حاصل از چاه ۷ و افق‌های لرزه‌ای غار-آسماری و جهرم و حجم لرزه‌ای پیش از برانبارش در راستای مقطع مدنظر ساخته شد.

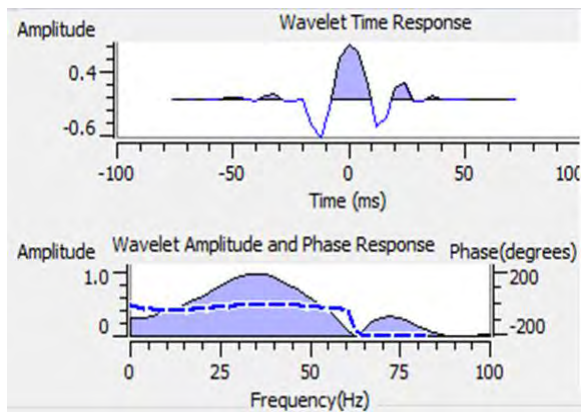
میانگین‌گیری از هفت نقطه میانی مشترک صورت گرفته است. در ادامه کار، باید انطباق خوبی بین لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از نگاره‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش ایجاد کرد. برای همبستگی بین داده‌های لرزه‌ای و داده‌های عمقی چاه از لرزه نگاشت مصنوعی (synthetic seismogram) استفاده می‌شود.

شکل همبستگی بین داده‌های حاصل از چاه و داده‌های لرزه‌ای را با استفاده از موجک‌های بهینه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که این همبستگی به انتخاب موجک وابسته است و هرچه موجک انتخاب شده بهتر باشد، همبستگی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد.

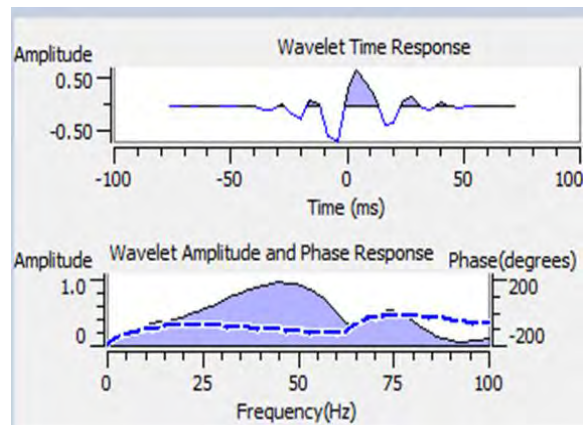
جهت اجرای وارون‌سازی پیش از برانبارش، برای هر مجموعه ردلرزه در بازه‌های زاویه‌ای موجود باید یک موجک اختصاص داده شود. وارون‌سازی پیش از برانبارش این امکان را میسر می‌سازد که از موجک‌های متفاوت برای هر زاویه استفاده شود که از مزیت‌های این روش است. اغلب پدیده جذب وابسته به فرکانس باعث می‌شود که موجک در دورافت‌های دورتر فرکانس کمتری نسبت به موجک در دورافت‌های نزدیک تر داشته باشد. در این پژوهش، موجک‌های لرزه‌ای با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش در محدوده زمانی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی ثانیه



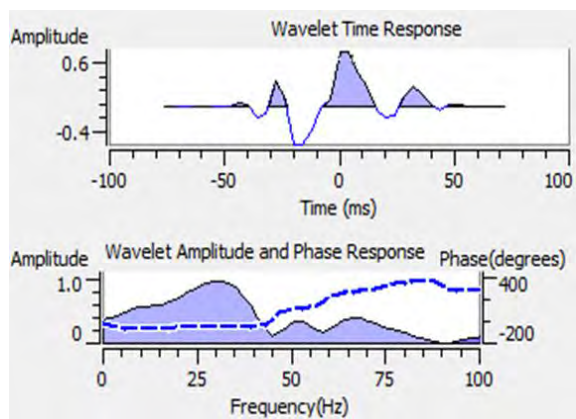
شکل ۲. انطباق بین داده‌های حاصل از نگاره‌های چاه و داده‌های متناظر با آن در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از موجک‌های میانگین بهینه به‌دست آمده از چاه‌ها.



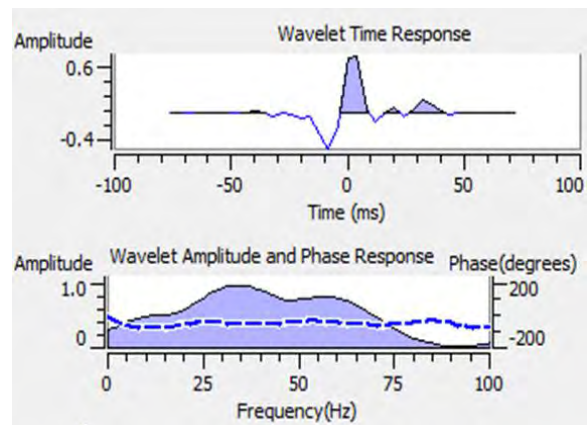
(ب)



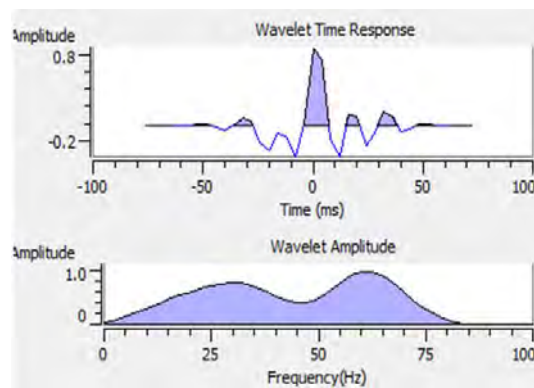
(الف)



(د)

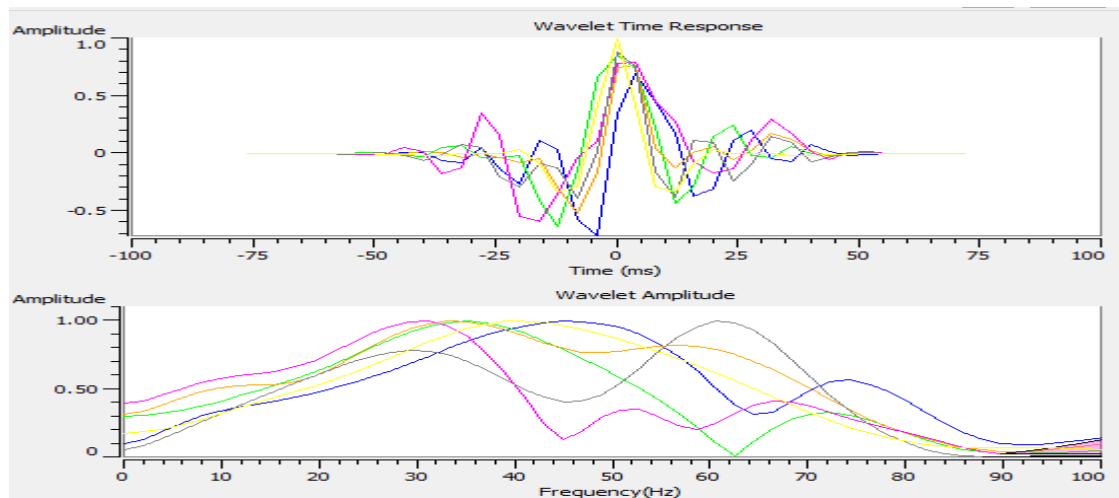


(ج)



(ه)

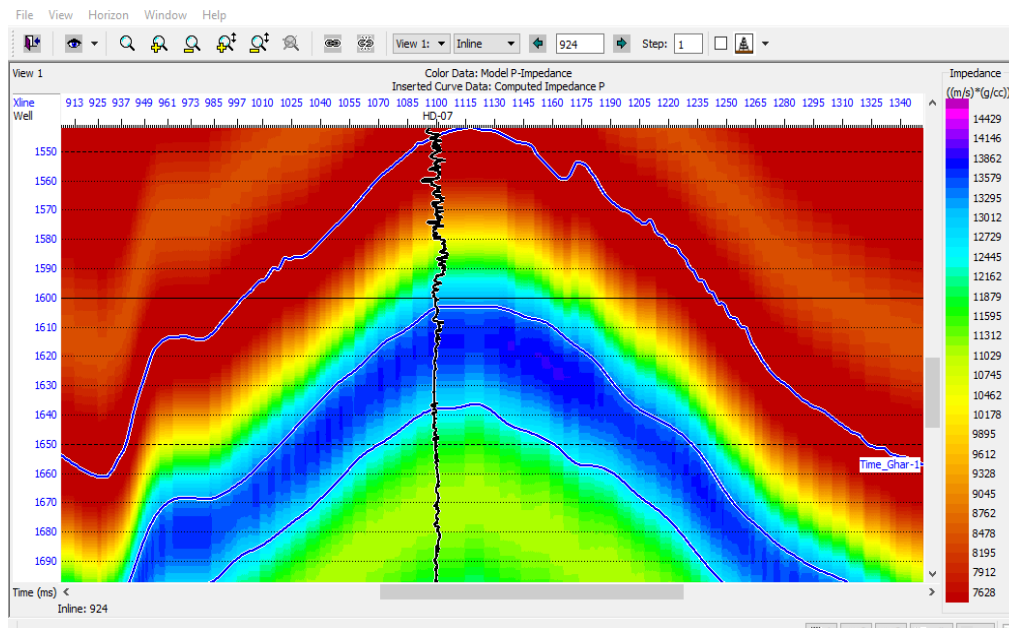
شکل ۳. نمودار زمانی و طیف دامنه موجک های میانگین استخراج شده از هفت چاه (الف) موجک میانگین استخراج شده در بازه ۵ تا ۹ درجه (ب) موجک میانگین استخراج شده در بازه زاویه ای ۹ تا ۱۳ درجه (ج) موجک میانگین استخراج شده در بازه ۱۳ تا ۱۷ درجه (د) موجک میانگین استخراج شده در بازه ۱۷ تا ۲۱ درجه (ه) موجک میانگین استخراج شده در بازه ۲۱ تا ۲۵ درجه.



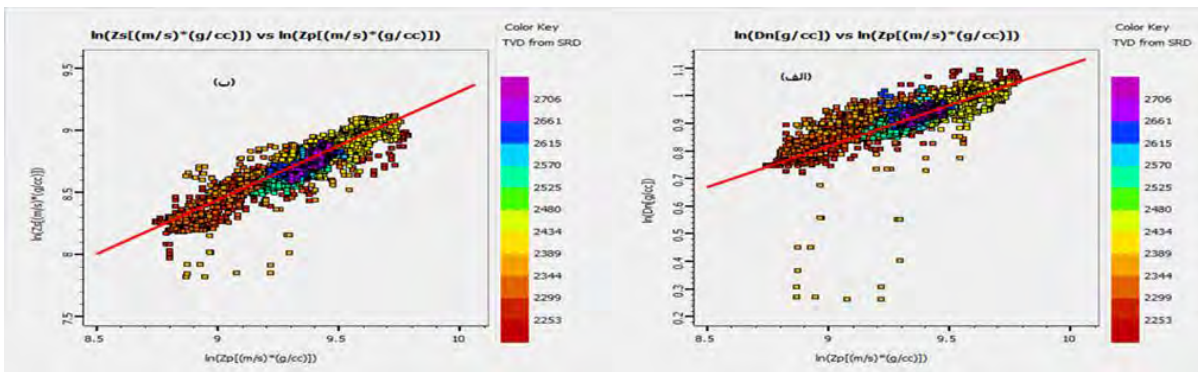
شکل ۴. نمودار زمانی و طیف دامنه و فاز میانگین حاصل از پنج موجک میانگین در بازه‌های زاویه‌ای ۵ تا ۹ درجه، ۹ تا ۱۳ درجه، ۱۳ تا ۱۷ درجه، ۱۷ تا ۲۱ درجه و ۲۱ تا ۲۵ درجه از هفت چاه.

تقاطعی لگاریتم مقاومت برشی برحسب لگاریتم مقاومت صوتی هستند. جدول ۱ مقادیر به دست آمده را نشان می‌دهد. در نهایت، با وارون‌سازی پیش از برانبارش، چگالی، مقاومت برشی و مقاومت تراکمی با استفاده از روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند.

با توجه به شکل ۶، با وارون‌سازی پیش از برانبارش، مقادیر k ، k_c و m_c با استفاده از نگاره‌های چاه محاسبه می‌شوند. این متغیرها به ترتیب نشان‌دهنده شیب خط و عرض از مبدأ نمودار تقاطعی لگاریتم چگالی برحسب لگاریتم مقاومت صوتی، شیب خط و عرض از مبدأ نمودار



شکل ۵. مدل اولیه فرکانس پایین به دست آمده از چاه‌ها و حجم لرزه‌ای پیش از برانبارش برای وارون‌سازی لرزه‌ای پیش از برانبارش.



شکل ۶. نحوه محاسبه مقادیر k , k_c , m و m_c با استفاده از نمودارهای تقاطعی (الف) نمودار تقاطعی چگالی- مقاومت صوتی (ب) نمودار تقاطعی مقاومت برشی - مقاومت صوتی.

(۱۹۹۶) می توان احتمال رخداد یک نوع دسته یا پدیده (مثل ماسه گازدار یا نفت دار، ماسه رسی و ...) را در صورت رخداد یک شرط خاص (مثل رخداد یک نشان- دهنده لرزه ای) با معادله زیر محاسبه کرد:

$$P(c|X) = \frac{P(c) \cdot P(X|c)}{P(X)} \quad (12)$$

که در آن c یک نوع دسته و $P(c)$ درصد احتمال رخداد اولیه آن، X نشان دهنده شرط مورد نظر و $P(X)$ احتمال رخداد آن را نشان می دهد. $P(X|c)$ احتمال وقوع X به شرط رخداد پدیده c است (برای مثال، بازه ای از نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی که می دانیم مربوط به ماسه است).

۶ بحث و نتایج

در این تحقیق، روش وارون سازی لرزه ای پیش از برانبارش با استفاده از داده های لرزه ای سه بعدی پیش از برانبارش برای پیش بینی خواص فیزیکی مانند سنگ شناسی و تخلخل و با هدف محاسبه مقاومت صوتی لرزه ای، مقاومت برشی، چگالی و نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برای پیش بینی و تعیین تغییرات سنگ شناسی و نوع سیال به کار گرفته شده است. کنترل کیفیت و شرایط داده های

جدول ۱. مقادیر k , k_c , m و m_c محاسبه شده.

k	k_c	m	m_c
۰/۸۷۴۱	۰/۵۷۲۱۱۳	۰/۲۹۷۰۴	-۱/۸۵۵۸۵

$$\rho = (m l_p + m_c + \Delta l_d), \quad (9)$$

$$z_s = \exp(k l_p + k_c + \Delta l_s), \quad (10)$$

$$z_p = \exp(l_p), \quad (11)$$

در معادلات بالا، پارامترهای L_D ، L_p ، L_S با روابط $L_D = \ln \rho$ و $L_p = \ln z_p$ ، $L_S = \ln z_s$ تعریف می شوند.

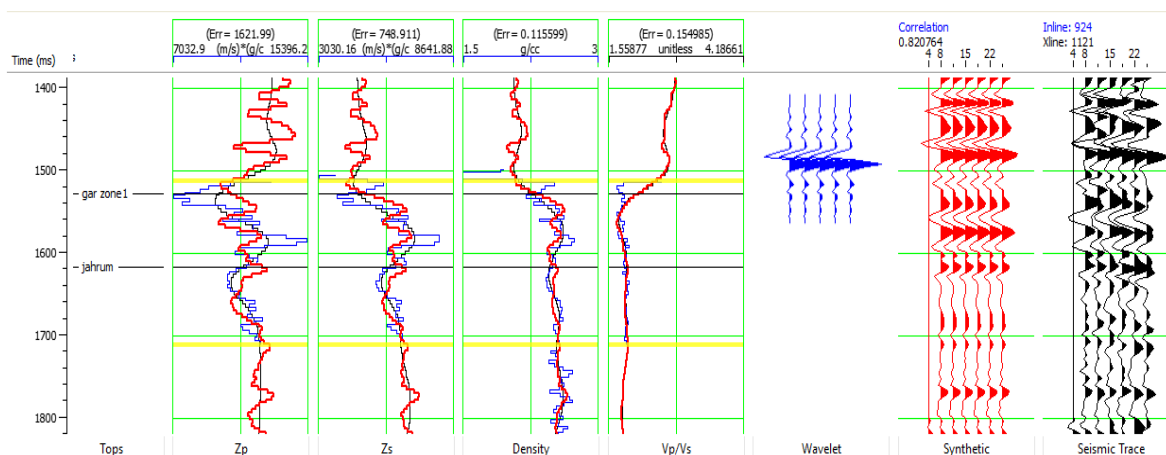
۵ LithoSi

از آنجاکه تفسیرهای حاصل از وارون سازی پیش از برانبارش، ممکن است تحت تأثیر کیفیت و میزان تفکیک پذیری داده های لرزه ای قرار گیرند؛ برای تفسیر بهتر و پیش بینی دقیق تر خصوصیات مخزن می توان از مدل سازی LithoSI استفاده کرد. همان طور که گفته شد، این روش به جای انتخاب مستقیم یک ناحیه از روی نمودار تقاطعی، از یک توزیع احتمالی روی آن ناحیه بهره می گیرد و توزیع احتمالی تعیین شده به کمک طبقه بندی بیز روی مقادیر وارون شده اعمال می شود. برای نمونه، به کمک نظریه

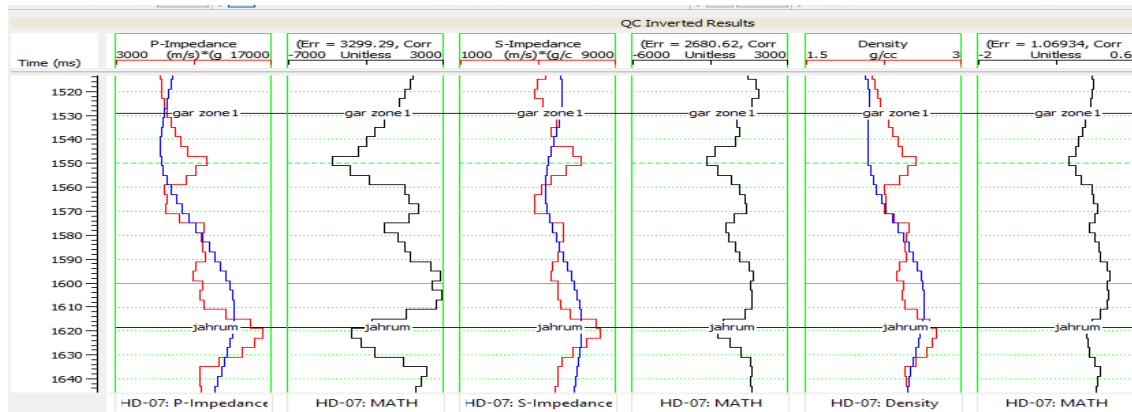
وارون‌سازی روی کل حجم لرزه‌ای، مقاطع مقاومت صوتی و برشی و چگالی به دست می‌آیند. نتایج نشان می‌دهند مقاومت برشی به دست آمده از وارون‌سازی در مقایسه با نتایج مقاومت تراکمی، سازگاری کمتری با داده‌های چاه دارند که علت آن، وابستگی بسیار زیاد مقاومت برشی به اطلاعات دورافت است.

شکل ۸ تحلیل نتایج وارون‌سازی پیش از برانبارش و عدم قطعیت وارون‌سازی پیش از برانبارش را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، نمودارهای قرمز رنگ نتایج وارون‌سازی را نشان می‌دهند و نمودارهای آبی رنگ ردلرزه‌های واقعی را مشخص می‌کنند. نمودار مشکی نشان‌دهنده خطای دو نمودار است. با توجه به این شکل، نمودارهای چگالی و مقاومت صوتی و مقاومت برشی به دست آمده از ردلرزه‌ها (آبی) بر نمودارهای حاصل از وارون‌سازی (قرمز) منطبق شده‌اند. این شکل میزان خطا و همبستگی بین چگالی، مقاومت صوتی و برشی حاصل از چاه را با مقادیر به دست آمده از وارون‌سازی نشان می‌دهد.

ورودی از مراحل مهم در وارون‌سازی هستند. اصولاً نشان‌دهنده‌های پتروفیزیکی را می‌توان هدف نهایی وارون‌سازی پیش از برانبارش دانست. پارامترهای کشسانی به دست آمده از روش وارون‌سازی لرزه‌ای پیش از برانبارش می‌توانند برای پیش‌بینی توانایی مخزن برای ذخیره‌سازی و انتقال هیدروکربن استفاده شوند. برای ارزیابی وارون‌سازی در محل چاه‌ها، ردلرزه واقعی اطراف چاه با ردلرزه مصنوعی ایجاد شده از نتیجه وارون‌سازی با هم مقایسه شده‌اند. انتخاب بهینه موجک وارون‌سازی باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان مقاومت‌های ناشی از نگاره‌های چاه با مقاومت‌های حاصل از وارون‌سازی نهایی منطبق باشند. شکل تطابق کلی ۸۲ درصدی بین مقادیر مقاومت صوتی، مقاومت برشی و چگالی به دست آمده از وارون‌سازی و داده‌های حاصل از چاه را در مرحله تحلیل با استفاده از موجک‌های میانگین در بازه‌های زاویه‌ای دور، نزدیک و میانه نشان می‌دهد. پس از وارون‌سازی در محل چاه‌ها و نهایی کردن پارامترهای وارون‌سازی با آزمایش‌های گسترده و انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترها، می‌توان وارون‌سازی را بر کل مکعب داده‌ها اعمال کرد. با اعمال



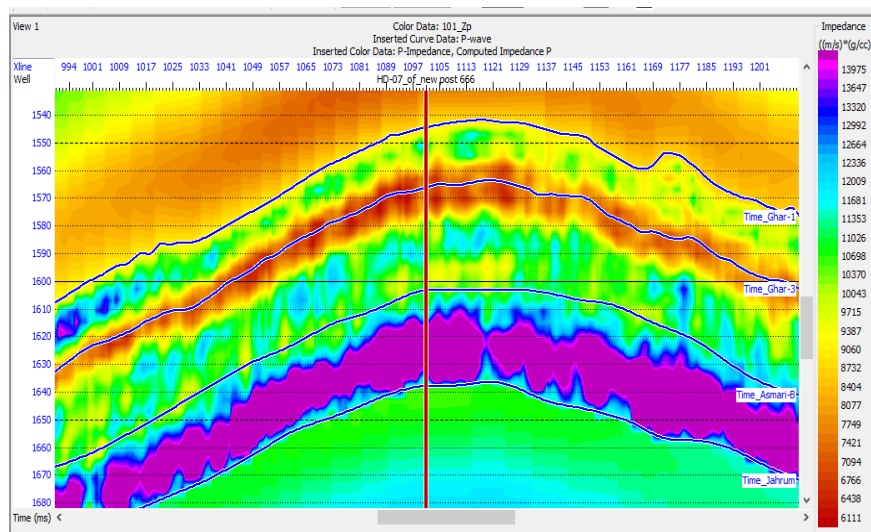
شکل ۷. تحلیل وارون‌سازی در چاه‌ها. سازگاری نگاره‌های حاصل از وارون‌سازی پیش از برانبارش (قرمز رنگ) با نگاره‌های چاه (آبی رنگ).



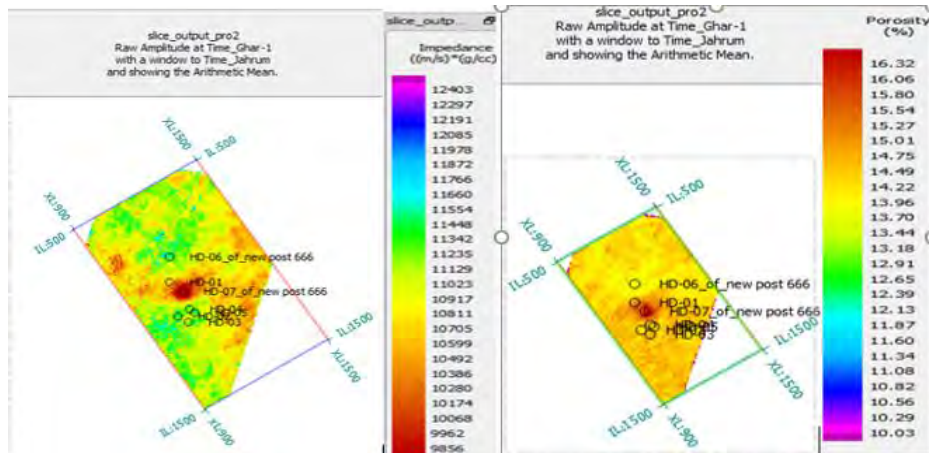
شکل ۸. مقایسه نمودار نگاره‌های حاصل از وارون‌سازی پیش از برانبارش (قرمز) و داده‌های حاصل از چاه (آبی) به همراه خطای عدم برازش (سیاه).

صوتی بسیار کم است، به رنگ سبز تغییر می‌کند که نشان- دهنده مقاومت صوتی بیشتر نسبت به سازند غار- یک است. این افزایش نسبی در مقدار مقاومت صوتی حاکی از وجود نفت در این قسمت است. سرعت صوت و مقاومت صوتی نفت بیشتر از گاز است؛ به همین دلیل، در سازند آسماری- دو، مقاومت صوتی بیشتری نسبت به سازند غار- یک وجود دارد. از سازند آسماری- دو تا جهرم، مقدار مقاومت صوتی از رنگ سبز به رنگ بنفش تغییر پیدا کرده است که نشان- دهنده افزایش زیاد مقاومت صوتی است. وجود آب در این قسمت باعث افزایش سرعت موج P طولی و در پی آن، افزایش مقاومت صوتی شده است.

شکل ۹ مقطع مقاومت صوتی به دست آمده از وارون‌سازی را به همراه چاه ۷ نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، یک لایه با مقاومت صوتی کم با رنگ قرمز در اعماق کم در سازند غار- یک بین دو لایه با مقاومت صوتی زیاد قرار گرفته است که بیانگر کاهش مقاومت صوتی در این قسمت است. وجود گاز در این سازند باعث کاهش شدید سرعت صوت و چگالی و در نتیجه، کاهش مقاومت صوتی در این سازند شده است. با افزایش عمق از سازند غار- یک تا آسماری- دو، مقدار مقاومت صوتی به صورت لایه لایه در چاه ۷ افزایش می‌یابد و رنگ قرمز که نشان‌دهنده مقاومت



شکل ۹. مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پیش از برانبارش به همراه نگاره مقاومت صوتی چاه ۷



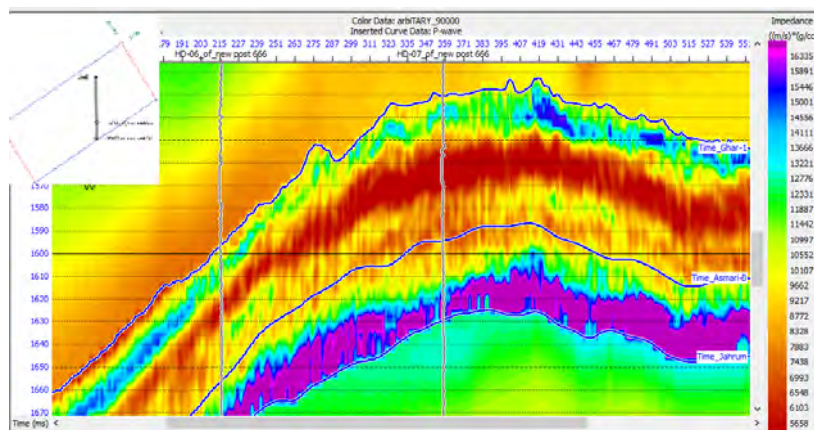
شکل ۱۰. برش مقاومت صوتی و تخلخل میانگین بین افق‌های غار-آسماری تا جهرم.

باکیفیت مخزنی است.

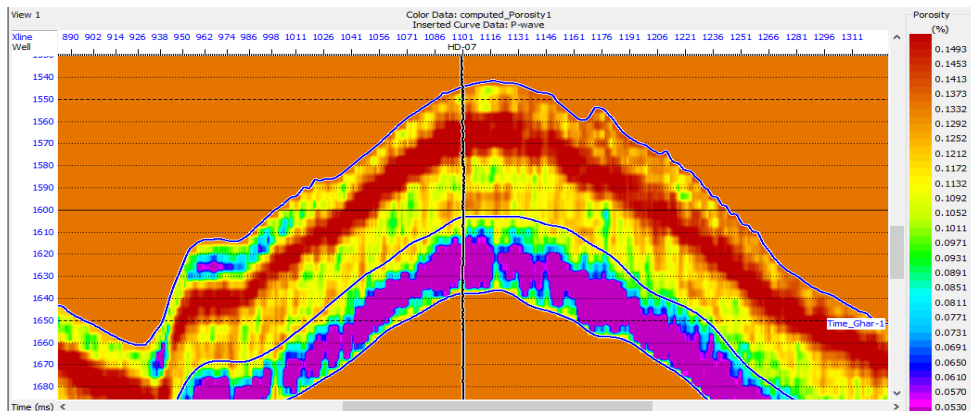
شکل ۱۰، نتایج وارون‌سازی را به صورت برش‌های عمودی از مقاومت صوتی بین دو ناحیه غار-یک و جهرم در راستای خط لرزه‌ای نشان می‌دهد که از محل دو چاه ۶ و ۷ عبور می‌کند. با توجه به این شکل، یک لایه با مقاومت صوتی کم در ناحیه غار-آسماری به رنگ قرمز نشان داده شده است. با حرکت از چاه ۶ به سمت چاه ۷، محدوده لایه با مقاومت صوتی کم (رنگ قرمز) در سازند غار-آسماری افزایش می‌یابد. وجود گاز باعث کاهش شدید مقاومت صوتی در سازند غار-آسماری در چاه ۷ شده است. اشباع گاز در غار-آسماری به سمت چاه ۷ بیشتر شده است و مقاومت صوتی در این قسمت کاهش بیشتری داشته است.

شکل ۱۰، نقشه‌های برش مقاومت صوتی میانگین و

تخلخل میانگین به دست آمده از افق لرزه‌ای غار-آسماری تا افق لرزه‌ای جهرم را با استفاده از هفت چاه نشان می‌دهد. این نقشه‌ها برای مشخص کردن نواحی باکیفیت مخزنی کاربرد دارد. با توجه به شکل ۱۰، چاه‌های ۱ تا ۵ مقاومت میانگین صوتی زیادی دارند. چاه ۷ مقاومت صوتی میانگین کمی دارد ولی با توجه به نقشه تخلخل میانگین در شکل ۱۰، مقدار تخلخل میانگین زیادی را نشان می‌دهد. مقاومت صوتی چاه ۶ به مقاومت صوتی چاه ۷ نزدیک و به نسبت بیشتر از آن است و با توجه به نقشه تخلخل، میانگین تخلخل کمتری نسبت به چاه ۷ نشان می‌دهد. البته در این چاه هم تخلخل به نسبت خوبی وجود دارد که نشان‌دهنده نواحی



شکل ۱۱. مقطع مقاومت صوتی به دست آمده در راستای مسیر خط نشان داده شده در نقشه مبنا (سمت چپ) بین دو ناحیه غار-یک و جهرم. محل چاه‌ها نیز در شکل مشخص است.

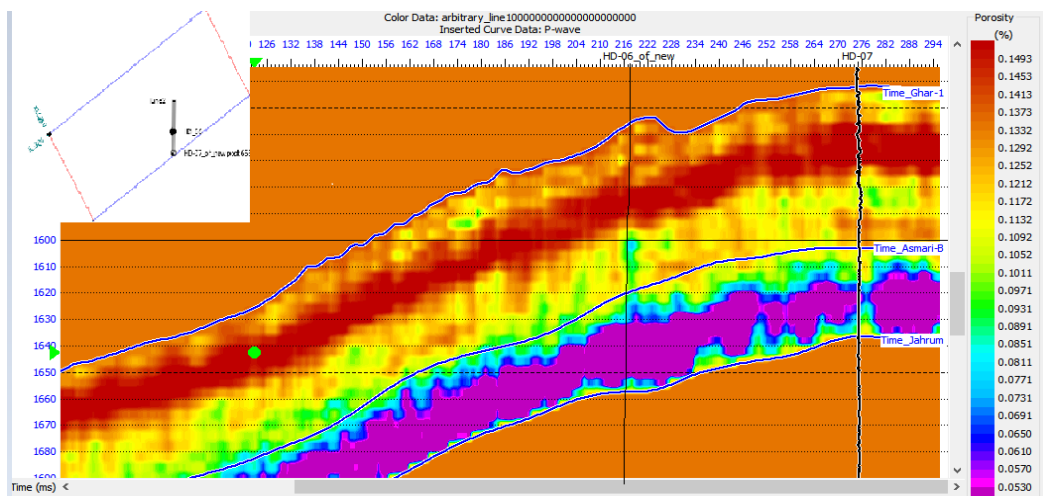


شکل ۱۲. مقطع تخلخل به‌دست‌آمده از مقطع مقاومت صوتی در چاه ۷.

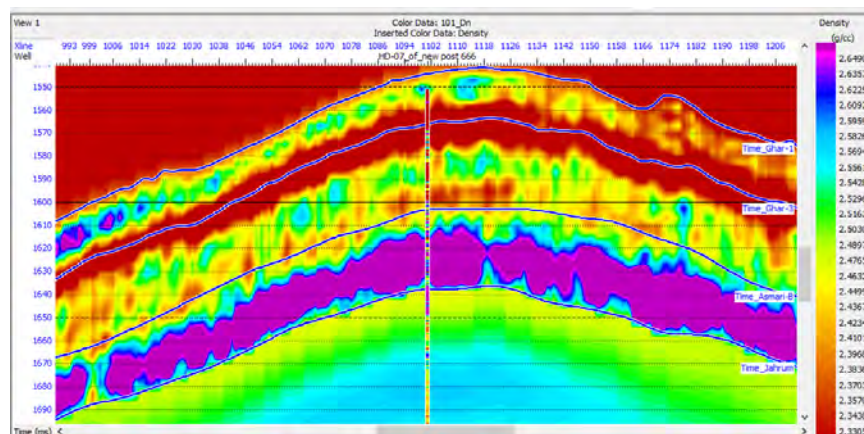
بهتری دارد. وجود نفت در آسماری- دو باعث شده است در این قسمت، چگالی افزایش یابد. از سازند آسماری- دو تا جهرم، چگالی افزایش یافته است. وجود آب در این قسمت سبب افزایش چگالی در سازند جهرم شده است. افزایش چگالی در این قسمت نشان‌دهنده کاهش کیفیت مخزنی سازند جهرم است. شکل ۱۵، مقطع مقاومت برشی حاصل از وارون‌سازی پیش از برانبارش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت برشی در قسمت غار- آسماری نسبت به سازند جهرم کمتر است. قسمت‌هایی که مقاومت برشی کمتری دارند، کیفیت مخزنی (تخلخل) بهتری دارند.

در شکل ۱۳، مقطع تخلخل در راستای مسیر خط مشخص شده است. با توجه به این شکل، در ناحیه غار- آسماری رنگ قرمز که نشان‌دهنده تخلخل زیاد است، با پیشروی از چاه ۶ به سمت چاه ۷ افزایش می‌یابد و رنگ بنفش که نشان‌دهنده تخلخل کم است، با حرکت به سمت چاه ۷ کاهش می‌یابد. هر چه تخلخل افزایش یابد، میزان حجم سیالات مخزن نیز می‌تواند بیشتر باشد.

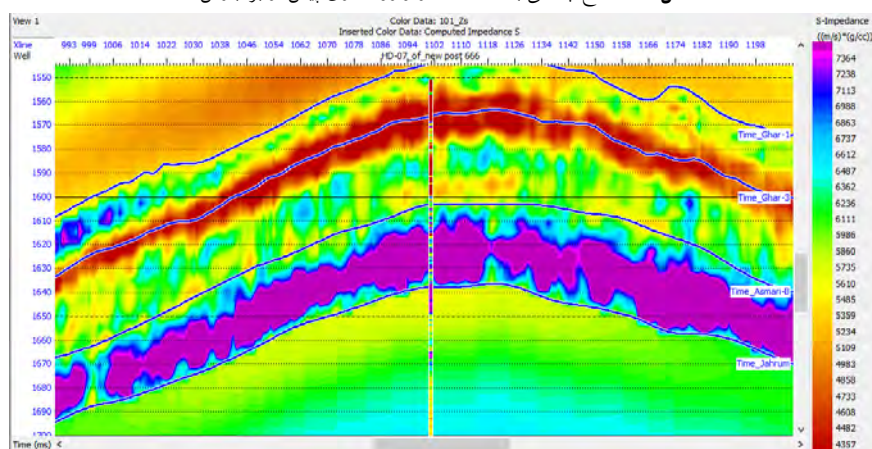
شکل ۱۴، مقطع چگالی به‌دست‌آمده از وارون‌سازی را نشان می‌دهد. از سازند غار- یک تا آسماری- دو چگالی افزایش پیدا کرده است. سازند غار- یک از لحاظ پارامترهای کیفیت مخزنی، مثل تخلخل، خاصیت مخزنی



شکل ۱۳. مقطع تخلخل به‌دست‌آمده در راستای خط نشان داده شده در نقشه مبنا بین دو ناحیه غار- یک و جهرم.



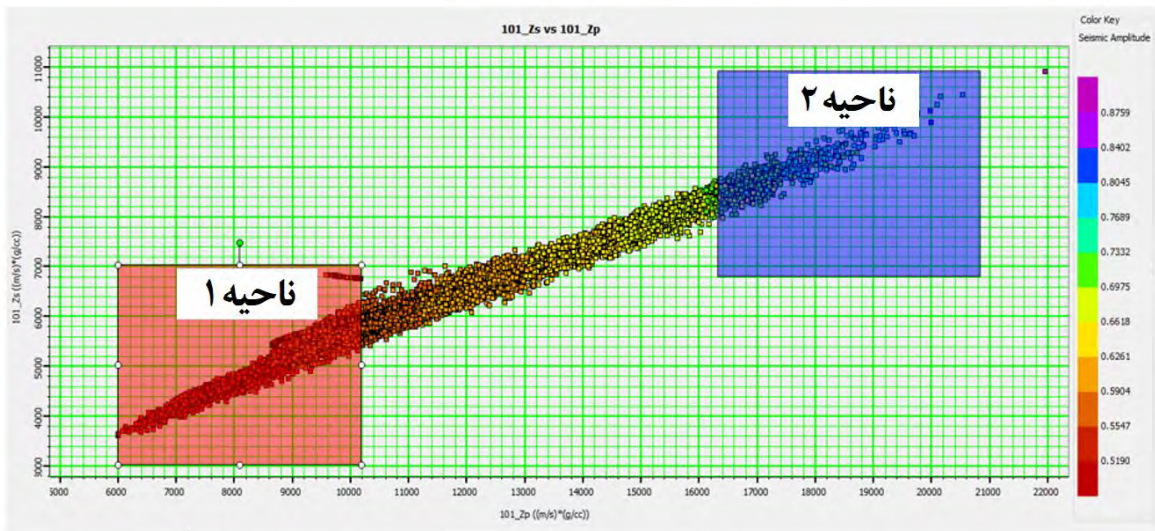
شکل ۱۴. مقطع چگالی به دست آمده از وارون سازی پیش از برآینارش



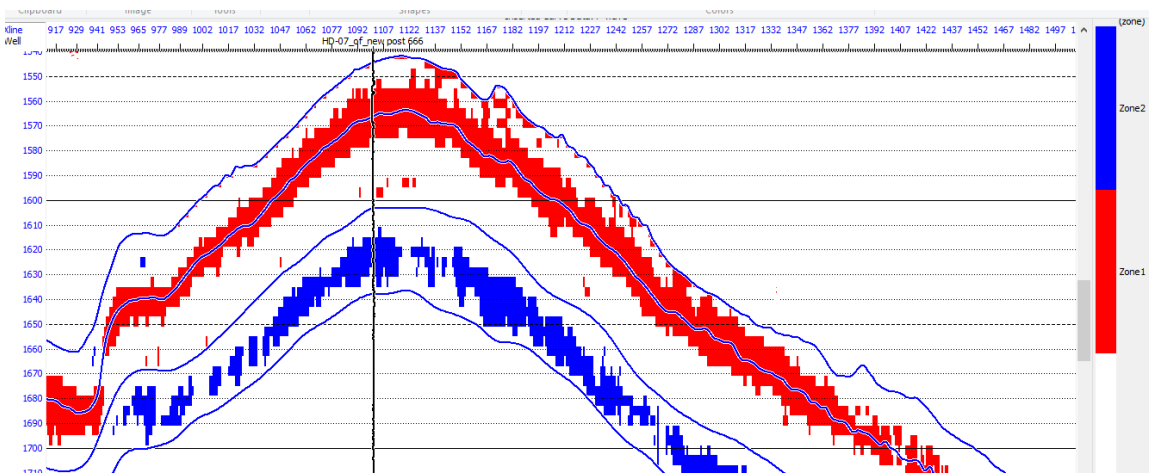
شکل ۱۵. مقطع مقاومت برشی به دست آمده از وارون سازی پیش از برآینارش

مقاومت صوتی بسیار زیاد و اشباع آب زیادی دارد، در مقطع لرزه‌ای ناحیه جهرم نمایان شد. شکل ۱۷ ناحیه‌های جدا شده در شکل ۱۶ را در مقطع لرزه‌ای نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۷، ناحیه ۱ که اشباع آب و مقاومت صوتی و برشی بسیار کمی دارد، در ناحیه غار-یک قرار می‌گیرد. وجود گاز در سازند غار-یک مبتنی بر صحت انجام تقسیم بندی است. ناحیه ۲ که مقدار اشباع آب و مقدار مقاومت صوتی و برشی بسیار زیادی دارد، در مقطع لرزه‌ای در سازند جهرم به رنگ آبی دیده می‌شود. با توجه به این نتایج، در ناحیه غار-آسماری مقدار اشباع شدگی آب کمی وجود دارد، ولی از ناحیه غار-آسماری تا جهرم مقدار اشباع شدگی آب افزایش یافته است. جدول ۲ مقادیر اشباع آب و تخلخل را در سازندهای غار-آسماری و جهرم نشان می‌دهد.

شکل ۱۶ نمودار تقاطعی مقاومت برشی بر حسب مقاومت صوتی به دست آمده از وارون سازی را بر اساس تغییرات اشباع آب نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۶، رنگ بنفش که نشان دهنده اشباع زیاد آب است، در مقادیر مقاومت صوتی و مقاومت برشی زیاد نمایان شده است. رنگ صورتی که نشان دهنده اشباع آب کم است، در مقادیر کم مقاومت‌های صوتی و برشی نشان داده شده است؛ بنابراین می‌توان با توجه به مقادیر اشباع آب، مقاومت صوتی و مقاومت برشی ناحیه‌ها را جدا و بر حجم لرزه‌ای اعمال کرد. ناحیه‌ها با توجه به تغییرات اشباع آب و مقاومت صوتی و برشی با توجه به مقیاس رنگی ایجاد شده حاصل از اشباع آب تفکیک شدند. با اعمال این ناحیه‌ها بر مقطع لرزه‌ای مشخص شد ناحیه‌ای که اشباع آب و مقاومت صوتی کم دارد، در سازند غار-یک دیده می‌شود. ناحیه‌ای که



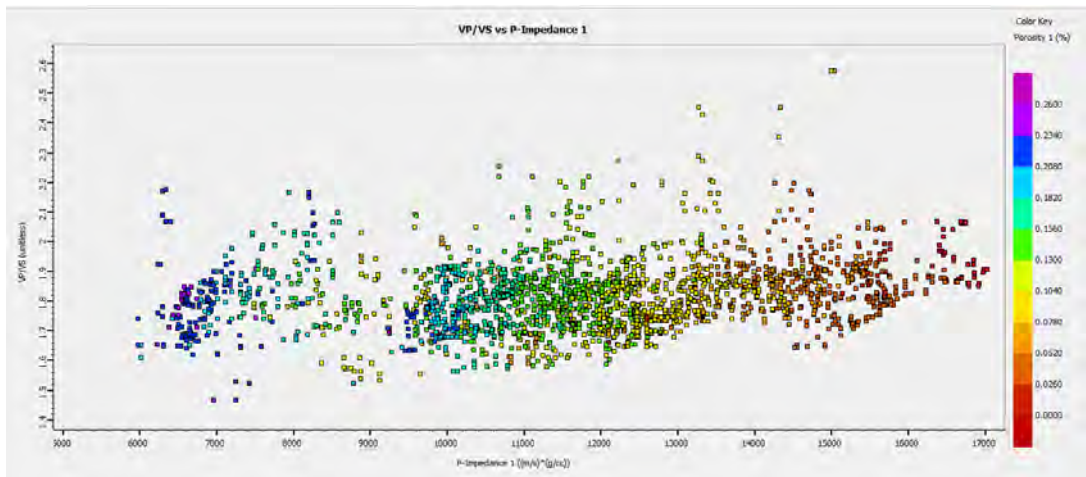
شکل ۱۶. نمودار تقاطعی مقاومت برشی برحسب مقاومت صوتی. در این نمودار تقاطعی با افزایش مقاومت صوتی و برشی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای، مقدار اشباع آب افزایش می‌یابد. ستون رنگی نشان‌دهنده تغییرات اشباع آب است.



شکل ۱۷. ناحیه‌های به‌دست‌آمده از مقطع لرزه‌ای براساس تغییرات اشباع آب.

جدول ۱. مقدار تخلخل، حجم شیل و مقدار اشباع آب در سازندهای غار-یک، آسماری-دو و جهرم.

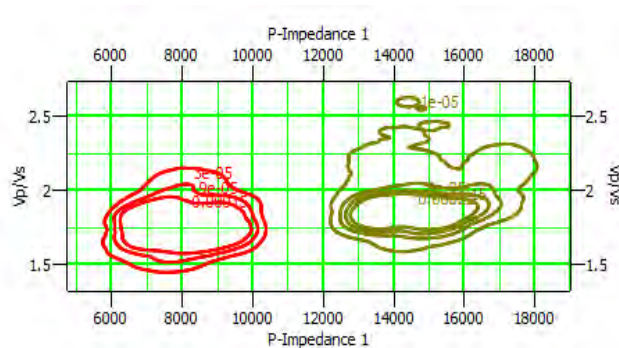
سازندها	تخلخل	اشباع آب
غار-یک	۱۴ درصد	۵۰ درصد
آسماری-دو	۱۱ درصد	۵۸ درصد
جهرم	۵ درصد	۶۹ درصد



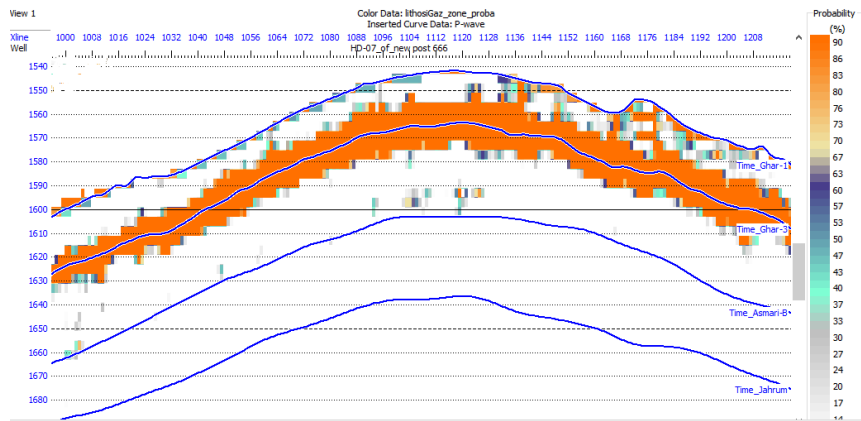
شکل ۱۸. نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برحسب مقاومت صوتی براساس تغییرات تخلخل (ستون رنگی سمت راست)

و آب انتخاب و نوع سیال در میدان تشخیص داده شد. شکل ۱۹، نشان‌دهنده نقشه به‌دست‌آمده از سیال آب (نمودار سبزرنگ) و گاز (نمودار قرمز رنگ) در میدان با استفاده از روش LithoSI است. شکل ۲۰، سیال گازی موجود در غار-یک را نشان می‌دهد که با استفاده از روش LithoSI تعیین شده است. با توجه به این نمودار، رنگ نارنجی نشان‌دهنده احتمال زیاد وجود گاز در میدان است که در قسمت غار-یک به‌خوبی مشهود است. در شکل ۲۱ رنگ نارنجی نشان‌دهنده احتمال زیاد وجود آب است که با توجه به شکل، رنگ نارنجی تنها در قسمت جهرم نمایان شده است و وجود آب در این قسمت را

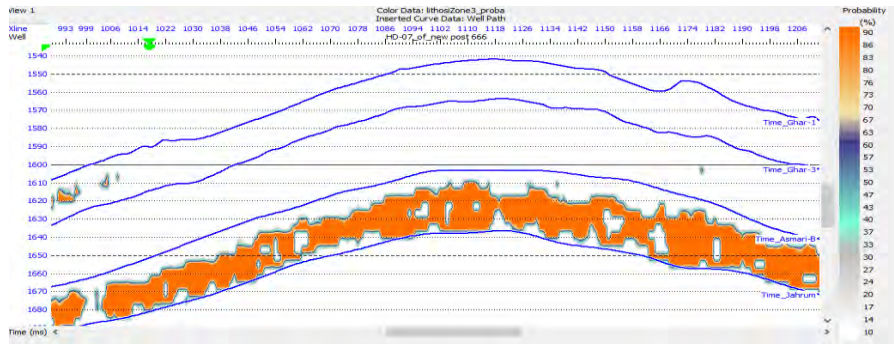
شکل ۱۸ نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برحسب مقاومت صوتی را که در واقع یک الگوی فیزیک سنگی متداول است، براساس تغییرات تخلخل نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت صوتی، مقدار تخلخل با توجه به این نمودار RPT (Rock Physics Template) کاهش می‌یابد. در این شکل، رنگ بنفش که نشان‌دهنده تخلخل زیاد است، در قسمت‌هایی با مقاومت صوتی کم و رنگ قرمز که نشان‌دهنده تخلخل کم است، در قسمت‌هایی با مقاومت صوتی زیاد مشاهده شد. در روش LithoSI ابتدا نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برحسب مقاومت صوتی رسم شد و با توجه به مقدار مقاومت صوتی، دو ناحیه گاز



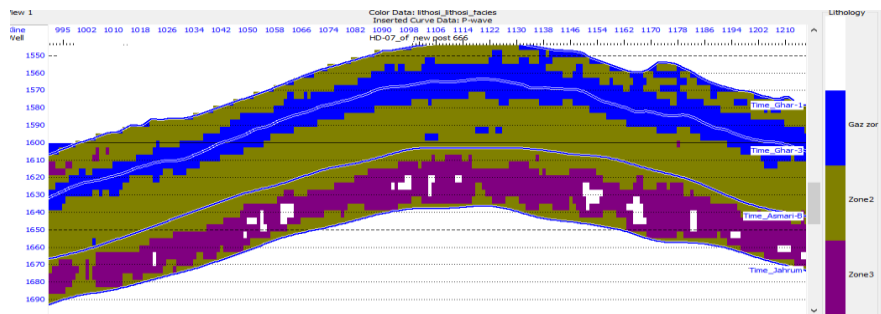
شکل ۱۹. نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برحسب مقاومت صوتی. خطوط تراز سبز نشان‌دهنده آب و خطوط تراز قرمز نشان‌دهنده گاز در میدان مورد مطالعه است.



شکل ۲۰. تفکیک سیال مخزنی گاز با استفاده از روش LithoSI.



شکل ۲۱. تفکیک سیال غیرمخزنی آب با استفاده از روش LithoSI.



شکل ۲۲. تفکیک سازندهای مخزنی و غیرمخزنی با استفاده از روش LithoSI.

۷ نتیجه‌گیری

با استفاده از روش وارون‌سازی پیش از برآیند، می‌توان خروجی‌های الگوریتم وارون‌سازی؛ یعنی سرعت موج‌های طولی و برشی، چگالی و مقاومت صوتی و برشی را در محدوده مخزنی به پارامترهای کاربردی ژئومکانیکی

نشان می‌دهد. شکل ۲۲، تفکیک سیالات با استفاده از این روش را نشان می‌دهد که رنگ آبی نشان‌دهنده سیال گازی و رنگ بنفش نشان‌دهنده آب در این قسمت است؛ در نتیجه، سازند غار و قسمت‌های بالایی سازند آسماری، اشباع از گاز و سازند جهرم اشباع از آب است.

(همانند نسبت پواسون) تبدیل کرد. هدف از این مقاله، استفاده از وارون‌سازی پیش از برانبارش برای بررسی سیالات هیدروکربنی و نیز تغییرات تخلخل و اشباع‌شدگی آب در سازندهای غار-آسماری و جهرم است. در این پژوهش، با استفاده از موجک‌های میانگین در سه بازه زاویه‌ای دور، میانی و نزدیک و بهره‌گیری از اطلاعات مدل‌های اولیه فرکانس پایین، عمل وارون‌سازی پیش از برانبارش انجام گرفت. برای بررسی کارایی وارون‌سازی، ردلرزه‌های مصنوعی به‌دست‌آمده از نتایج وارون‌سازی با ردلرزه‌های واقعی اطراف چاه‌ها مقایسه شدند.

در این مطالعه، با انجام وارون‌سازی پیش از برانبارش و اعمال آن بر کل حجم لرزه‌ای، مقاطع مقاومت صوتی، مقاومت برشی و چگالی به‌دست‌آمد. نتایج وارون‌سازی نشان می‌دهند که در ناحیه غار-یک و آسماری-دو، مقاومت صوتی، مقاومت برشی و چگالی مقادیر کمی دارند. از سازند آسماری-دو تا جهرم مقادیر مقاومت صوتی، مقاومت برشی و چگالی بیشتر شده و سیال از نفت به آب تغییر پیدا کرده است. از آنجا که آب نسبت به نفت، مقاومت صوتی، برشی و چگالی بیشتری دارد، از غار-آسماری تا جهرم، مقاومت‌ها و چگالی افزایش یافت. تصاویر سه‌بعدی تغییرات تخلخل در میدان مورد مطالعه با استفاده از نتایج وارون‌سازی محاسبه شد. همچنین نمودارهای تقاطعی مقاومت برشی برحسب مقاومت صوتی براساس تغییرات اشباع آب و تخلخل ترسیم شد و مناطقی براساس تغییرات مقاومت‌های صوتی و برشی تفکیک شد. با اعمال این نواحی بر مقطع لرزه‌ای در سازند غار-آسماری مقدار تخلخل زیاد و مقدار اشباع‌شدگی آب کم مشاهده شد. با توجه به اینکه سازند غار-آسماری گازی است، مقاومت صوتی کمی در آن مشاهده شد و تخلخل زیادی را نتیجه داد.

مقاومت صوتی با تخلخل ارتباط دارد؛ بنابراین می‌توان مقطع مقاومت صوتی را به تخلخل تبدیل و تغییرات تخلخل

را مشاهده کرد. با استفاده از چاه‌ها و مقطع مقاومت صوتی به‌دست‌آمده از وارون‌سازی، مقطع تخلخل محاسبه شد. سپس با اعمال تخلخل بر کل داده‌های لرزه‌ای، هر ردلرزه به تخلخل تبدیل شد و تخلخل علاوه بر محل چاه‌ها، در قسمت‌های مابین چاه‌ها نیز بررسی شد. تغییرات تخلخل از سازند غار-آسماری تا جهرم نشان می‌دهد که در سازند غار-آسماری مقدار تخلخل زیاد مشاهده شده که این افزایش تخلخل، باعث کاهش چگالی و سرعت صوتی در این ناحیه شده است و از آنجایی که مقاومت صوتی حاصل ضرب سرعت صوتی در چگالی است، مقاومت صوتی کمی در غار-آسماری مشاهده شد. همچنین سیال گازی موجود در سازند غار-آسماری باعث کاهش سرعت صوت و چگالی و کاهش مقاومت صوتی در این قسمت شده است. با توجه به شکل، از سازند غار-آسماری تا جهرم مقدار تخلخل کمی مشاهده شد. کاهش تخلخل در سازند جهرم و سیال آبی موجود در این سازند، باعث افزایش مقاومت صوتی در این سازند شده است. در این پژوهش، تخلخل بیشتر از ۱۵ درصد و اشباع‌شدگی آب کمتر از ۵۰ درصد در سازند غار-آسماری در قسمت‌هایی با مقاومت صوتی کم مشاهده شد.

استفاده از نمودار تقاطعی مقاومت برشی برحسب مقاومت صوتی براساس تغییرات تخلخل نشان داد که در مقادیر کم، مقاومت صوتی و برشی و مقدار تخلخل زیادی نمایان می‌شود که با افزایش تخلخل، مقدار مقاومت‌ها و چگالی کاهش می‌یابد. افزایش تخلخل ناشی از افزایش فضای خالی سنگ و در نتیجه، افزایش پتانسیل سنگ مخزن برای ذخیره سیالات هیدروکربنی است؛ بنابراین، هر چه تخلخل سنگ بیشتر باشد، میزان حجم سیالات مخزن نیز می‌تواند بیشتر شود و کیفیت مخزنی را افزایش دهد. در سازند غار-آسماری تخلخل زیاد و کیفیت مخزنی خوبی وجود دارد.

استفاده از نمودار تقاطعی مقاومت برشی برحسب

- Interpretation Methods Leading to Quantitative Interpretation," csegrecorder, vol. 39 No. 08., pp. pp 18-26., Oct 2014
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density-The diagnostic basics for stratigraphic traps: Geophysics, 39(6), 770-780.
- Sivia, D. S. Data Analysis: A Bayesian Tutorial . oxford university press, oxford , 1996 and Technology, 10(8), 853-862.
- Chopra, S., and Castagna, J. P., 2014, AVO: Society of Exploration Geophysicists.
- Ghanbarnejad, H. M., Riahi, M. A., Bagheri, M., Seyedi, M., 2017, Determining the area of reservoir using simultaneous inversion of seismic data: Iranian Journal of Geophysics, 11(3), 45-56.
- Goodway, B., Chen, T., and Downton, J., 1997, Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petro physical parameters; " $\lambda\rho$ ", " $\mu\rho$ " & " λ/μ fluid stack", from P and S inversions: SEG Technical Program Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 183-186..
- Hampson, D. P., Russell, B. H., and Bankhead, B., 2005, Simultaneous inversion of pre-stack seismic data: SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1633-1637, Society of Exploration Geophysicists
- Ma, X. Q., 2002, Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing: Geophysics, 67(6), 1877-1885.
- Mallick, S., 1999. Some practical aspects of prestack waveform inversion using a genetic algorithm: An example from the east Texas Woodbine gas sand. Geophysics, 64(2), pp.326-336 Woodbine gas sand: Geophysics, 64(2), 326-336.
- Moosavi, N., and Mokhtari, M., 2016, Application of Post-Stack and Pre-Stack seismic inversion for prediction of hydrocarbon reservoirs in a Persian Gulf Gas field: International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering, World Academy of Science, Engineering , 10(8), pp.853-862
- Schulte, B. Wm., and Manthei, D., 2014, Chasing Density- An Introduction to Seismic Acquisition, Processing, and Interpretation Methods Leading to Quantitative Interpretation, csegrecorder, 39(08), 18-26.
- Veeken, P. C., 2006, Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterization: Elsevier, 37.
- مقاومت صوتی براساس تغییرات اشباع آب نشان داد که در این نمودار تقاطعی، با افزایش مقاومت صوتی و برشی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای، مقدار اشباع آب افزایش یافته است. همواره باید توجه داشت که تأثیر تخلخل و رس بر اشباع آب بسیار ناچیز است. با اعمال نتایج وارون‌سازی پیش از برانبارش بر نواحی جداشده براساس تغییرات اشباع آب و مقاومت‌های صوتی و برشی مشخص شد که ناحیه‌ای که مقدار اشباع آب و مقاومت صوتی و برشی بسیار کمی دارد، در مقطع لرزه‌ای در ناحیه غار- یک واقع شده است. نمودار تقاطعی برحسب تغییرات تخلخل نشان داد که با افزایش مقاومت صوتی، مقدار تخلخل با توجه به نمودار RPT کاهش می‌یابد.
- از الگوریتم LithoSI برای شناسایی قسمت‌های شامل نفت و گاز و آب استفاده شد. در روش LithoSI ابتدا نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برحسب مقاومت صوتی رسم و با توجه به مقدار مقاومت صوتی و برشی، دو ناحیه گازی و آبی انتخاب و نوع سیال در میدان تشخیص داده شد. با انجام این روش در چاه و مقایسه آن با نتایج وارون‌سازی پیش از برانبارش وجود نفت و گاز در غار- آسماری اثبات شد.

منابع

- طیبی، م.، نبی بیدهندی، م.، نظری، ب.، ۱۳۹۱، وارون‌سازی پیش از برانبارش بر روی مخزن ماسه سنگی غار در میدان هندجان: ماهنامه اکتشاف و تولید، ۹۷، ۸۶-۹۳.
- A. Buland and H. Omre, "Bayesian linearized AVO inversion," Geophysics, vol. 68. pp. 185-198. 2003.
- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative Seismology: Theory and Methods, W. H. Freeman and Co., Vol. 2.
- P. F. Anderson, "Comparing post-stack AVO inversion to prestack inversion for estimating rock properties," in Fron.+ Innova. CSPG CSEG CWLS Convention, 2۰۰9. pp. 669-672.
- B. W. S. a. D. Manthei, "Chasing Density – An Introduction to Seismic Acquisition, and