

تخمین تخلخل با استفاده از روش وارون سازی لرزه‌ای پس از برانبارش در بخشی از سازند قم در تاقدیس آران، ایران مرکزی

نوشین شریفی، سید جمال الدین شیخ زکریایی*

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده نفت و مهندسی شیمی،

رضا حیدری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده علوم پایه

مرضیه میرزاخانیان، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

پذیرش ۹۹/۱۰/۰۲

دریافت ۹۸/۰۳/۱۲

چکیده

ویژگی‌های پتروفیزیکی مخزن (از جمله تخلخل، تراوایی و میزان اشباع آب) از مهم‌ترین خصوصیات مخازن هیدروکربنی به‌شمار می‌روند که در ارزیابی اقتصادی، برنامه‌ریزی برای تولید و مدیریت توسعه آن‌ها استفاده می‌شود. اندازه‌گیری دقیق این ویژگی‌ها، تنها با حفر چاه و یا بررسی مغزه‌های حفاری امکان‌پذیر است ولی می‌توان با بررسی داده‌های زیرسطحی (شامل نگاره‌های پتروفیزیکی چاه‌های حفاری شده و اطلاعات لرزه‌نگاری بازتابی) روابطی را پیدا کرد که بر پایه آن‌ها در نقاط دور از چاه نیز به برآورد این ویژگی‌های مخزنی دست یافت. در پژوهش حاضر، میزان تخلخل در بخش مخزنی لایه f تا لایه C4 سازند قم در تاقدیس زیرسطحی آران در پهنه ساختاری ایران مرکزی با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی و نگاره‌های تخلخل^۱، چگالی^۲ و سرعت موج تراکمی^۳ در سه چاه اکتشافی و بهره‌گیری از روش وارون‌سازی لرزه‌ای پس از برانبارش بر پایه مدل^۴ و استفاده از چند نشانگر^۵ تخمین زده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که نشانگر مقاومت صوتی^۶ در بین پنج نشانگر استفاده شده، دارای کم‌ترین خطا بوده است. افزون بر این، میزان تخلخل در بخش مخزنی نامبرده از چاه A-01 به سمت چاه A-02 بیش‌تر از این چاه به سمت چاه A-03 است.

واژه‌های کلیدی: تفسیر لرزه‌ای، وارون‌سازی لرزه‌ای پس از برانبارش، تخمین تخلخل، وارون‌سازی بر پایه مدل، مقاومت صوتی

مقدمه

به‌دلیل هزینه‌های بالای حفر چاه برای دستیابی مستقیم به اطلاعات مربوط به خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن، داشتن روش جای‌گزین اهمیت خاصی دارد. وارون‌سازی لرزه‌ای^۷ یکی از متداول‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که بر پایه آن به تخمین ویژگی‌های کمی خواص سنگ مخزن پرداخته می‌شود. وارون‌سازی اطلاعات لرزه‌ای به روش‌های گوناگون پیش یا پس از برانبارش^۸، قطعی^۹، تصادفی^{۱۰} یا زمین‌آمار^{۱۱} انجام می‌شود [۱]، [۲]، [۳]. اهمیت و اعتبار روش وارون‌سازی به‌سبب استفاده تلفیقی از داده‌های مختلف لرزه‌ای و نگاره‌های پتروفیزیکی چاه‌ها و هم‌چنین در

*نویسنده مسئول j.sheikhzakaria@gmail.com

1. Porosity log
2. Density log
3. P-wave Sonic log
4. Model based post-stack seismic inversion
5. Multi-attribute
6. Acoustic Impedance
7. Seismic Inversion
8. Pre- or Post-stack
9. Deterministic
10. Random
11. Geostatistical

برخی از موارد مغزه‌های حفاری است [۴]، [۵]، [۶] که بر پایه آن‌ها، ویژگی‌های کمی خواص سنگ مخزن با قدرت تفکیک و صحت بالایی تخمین زده می‌شوند. اساس کار وارون‌سازی لرزه ای، به دست آوردن مدل مقاومت صوتی زمین با استفاده از داده‌های لرزه‌ای است. پارامتر مقاومت صوتی، حاصل ضرب چگالی یک لایه در سرعت موج در آن لایه است که می‌تواند در تشخیص سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی سازند نقش مهمی ایفا کند. این پارامتر، هم‌چنین به طور مستقیم از خصوصیات سنگ‌شناختی یا مخزنی مانند تخلخل و ویژگی‌های شاره پرکننده خلل و فرج سنگ‌ها تأثیر می‌پذیرد. در داده‌های لرزه‌نگاری، رد لرزه‌های در دسترس حاصل هم‌میخت موجک فرستاده شده به داخل زمین و پاسخ زمین است. از این رو، این رد لرزه‌ها با نوفه‌های گوناگونی که در مسیر راه خود با آن‌ها مواجه می‌شوند، همراه شده و به گیرنده‌های موج لرزه‌ای می‌رسند [۷]، [۸]:

$$T(i) = \sum_j r(j) \cdot w(i - j + 1) + n(i) \quad (1)$$

که در این رابطه، $r(j)$ پاسخ زمین، $w(j)$ موجک فرستاده شده به درون زمین و $n(i)$ نوفه‌های موجود است. وارون‌سازی لرزه‌ای، روشی است که در آن مقاومت صوتی از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شوند و بدین منظور، ابتدا پاسخ زمین از داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شود و سپس مقاومت صوتی محاسبه می‌شود. رابطه بین پاسخ زمین (یا همان ضریب بازتاب) و مقاومت صوتی بدین صورت است:

$$r(j) = \frac{I(j) - I(j-1)}{I(j) + I(j-1)} \quad (2)$$

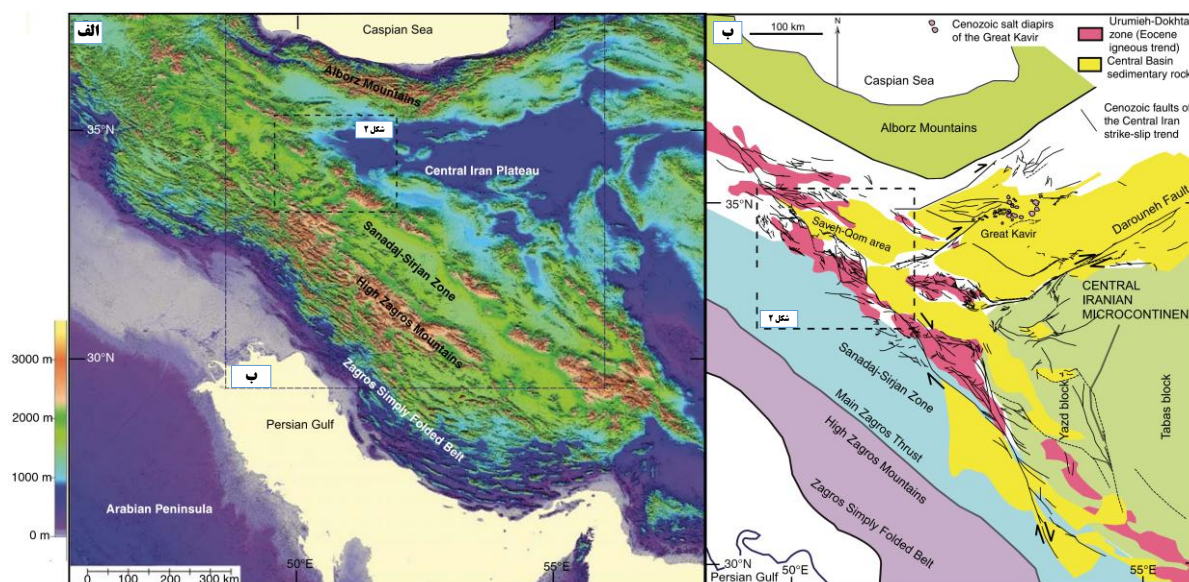
که در این رابطه، $I(j)$ مقاومت صوتی است که برابرست با حاصل ضرب سرعت در چگالی هر لایه و $r(j)$ ضریب بازتاب موج لرزه‌ای در سطح بین دو لایه متوالی است. در وارون‌سازی تلاش می‌شود که $I(j)$ لایه‌های گوناگون زمین به دست آید [۹]، [۱۰].

روش وارون‌سازی لرزه‌ای از اوایل دهه ۸۰ میلادی مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفت [۱۱]، [۱۲]، [۱۳] و از حدود یک دهه قبل از آن، نسل اول نشان‌گرهای لرزه‌ای ارائه شده بودند [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. نشان‌گرهای لرزه‌ای برای توصیف مشخصه‌های فیزیکی و زمین‌شناختی لایه‌های زیرسطحی به کار می‌روند [۱۷]، [۱۸]، [۱۹] و بیش‌تر آن‌ها مشتقات غیرخطی از رد لرزه‌ها هستند. ویژگی غیرخطی بودن سبب می‌شود که آن دسته از خصوصیات مخزنی و زمین‌شناسی که در داده‌های لرزه‌ای خام مشخص نمی‌شوند، به وسیله نشان‌گرهای لرزه‌ای معین و قابل تشخیص شوند [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]. ترکیب نشان‌گرهای لرزه‌ای (و از مهم‌ترین آن‌ها مقاومت صوتی) با سایر داده‌های موجود مانند اطلاعات زمین‌شناسی بزرگ مقیاس و داده‌های حاصل از نگاره‌های چاه‌ها می‌تواند اطلاعاتی را ارائه کند که با اطمینان می‌توان آن‌ها را به خصوصیات مانده نوع سنگ، میزان تخلخل، میزان هیدروکربور و موارد نظیر آن نسبت داد. در این تحقیق، تغییرات تخلخل در بخش مخزنی لایه f تا لایه c4 سازند قم در تاق‌دیس زیرسطحی آران در پهنه ساختاری ایران مرکزی با استفاده از نگاره‌های درون چاهی (چگالی و صوتی) و داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی با روش وارون‌سازی لرزه‌ای پس از برانبارش بر پایه مدل تخمین زده شده است [۲]، [۲۵].

زمین‌شناسی منطقه بررسی شده

تاق‌دیس زیرسطحی آران از ساختارهای پهنه ایران مرکزی است که سازند قم آن دارای نفت غیراقتصادی بوده است. پهنه مثلثی شکل ایران مرکزی، وسیع‌ترین ایالت ساختاری-رسوبی ایران است که ضلع غربی آن به پهنه سنج-سیرجان، ضلع شرقی آن به بلوک لوت و ضلع شمالی آن به کوه‌های البرز محدود می‌شود (شکل ۱). در پهنه ایران

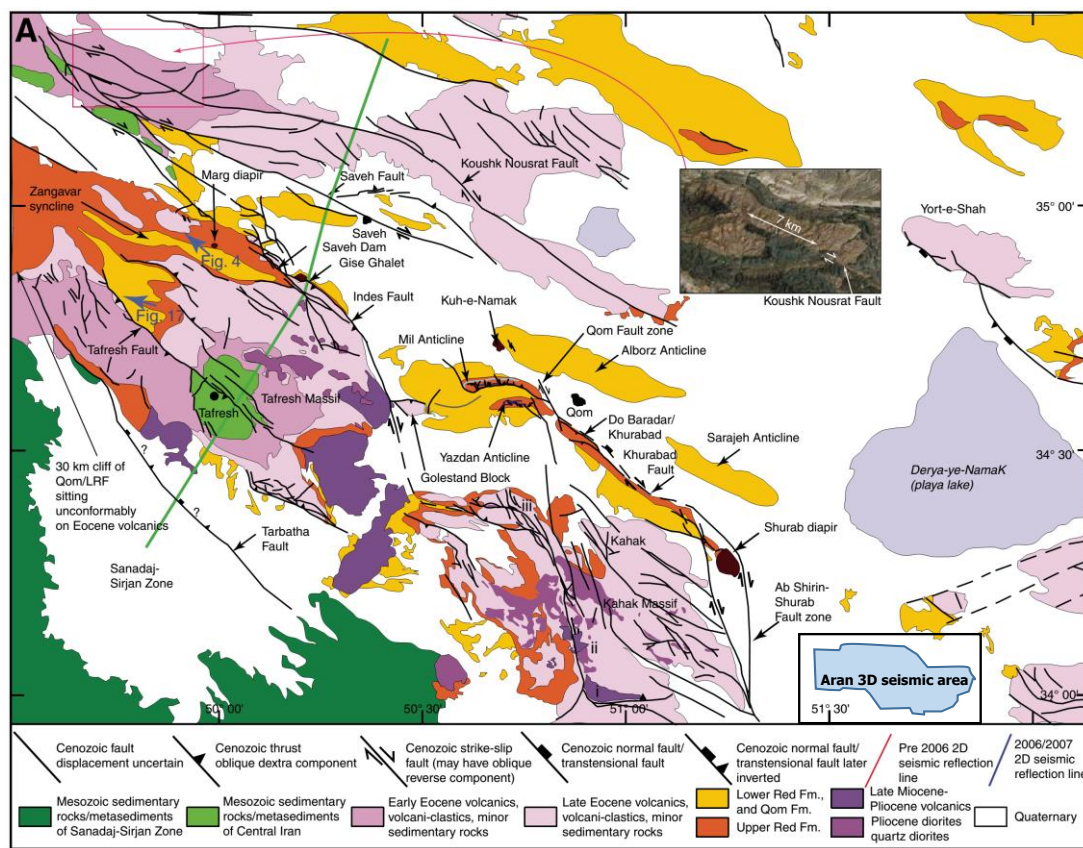
مرکزی به دلیل فاز کوه‌زایی اواخر کرتاسه، رسوبات ترشیری به‌صورت دگرشیب روی رسوبات قدیمی‌تر کرتاسه قرار می‌گیرند. آغاز رسوب‌گذاری ترشیری در پهنه ایران مرکزی با یک قاعده کنگلومرایی یا ماسه سنگی است که به‌وسیله مقداری مواد ولکانیکی دنبال می‌شود. از اواخر ائوسن، کم‌کم دریا از ناحیه البرز به سمت ایران مرکزی (حوضه قم) عقب‌نشینی کرده است و در نتیجه رسوبات دریایی سازند قم در این گستره نهشته شده‌اند (شکل ۲). در شکل ۳، ستون چینه‌شناسی رسوبات الیگوسن تا پلیوسن پهنه ایران مرکزی همراه با ۷ بخش تفکیکی سازند قم نشان داده شده است [۲۶]، [۲۷]. سازند قم با رسوبات غالباً آهکی و با سن اولیگومیوسن مهم‌ترین مخزن پهنه ایران مرکزی است. تاکنون سه چاه اکتشافی در تاق‌دیس آران حفر شده است (جدول ۱) که در یکی از آنها، جریان نفت از افق C4 سازند قم ثبت شده است. در شکل ۴، نقشه‌های زمانی راس بخش‌های f و C4 تاق‌دیس آران همراه با موقعیت چاه‌های اکتشافی آن نمایش داده شده است [۲۸]، [۲۹].



شکل ۱. موقعیت زمین‌شناسی و سن رخنمون‌ها در پهنه ساختاری-رسوبی ایران مرکزی [۳۰]

جدول ۱. مشخصات چاه‌های حفاری شده

نام چاه	سال حفاری	عمق نهایی حفاری (m)	بخش‌های مخزنی سازند قم در هر چاه
A-01	۲۰۰۳	۳۹۶۱	C4-f
A-02	۲۰۰۵	۳۸۰۱	C4-f
A-03	۲۰۰۵	۳۴۰۸	C4-f



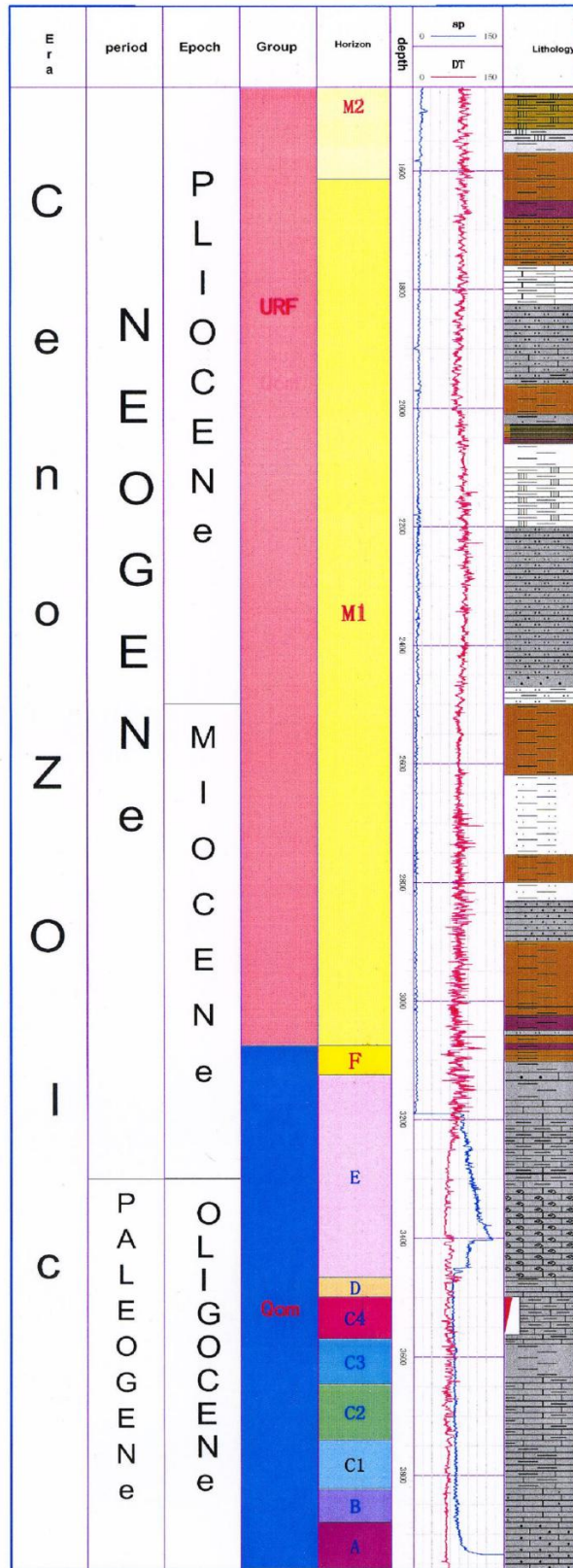
شکل ۲. نقشه ساختاری و رسوبی محدوده بررسی شده و مناطق پیرامون آن به همراه داده‌های لرزه‌ای سه بعدی تاقدیس آران [۳۰]

داده‌ها و روش انجام پژوهش

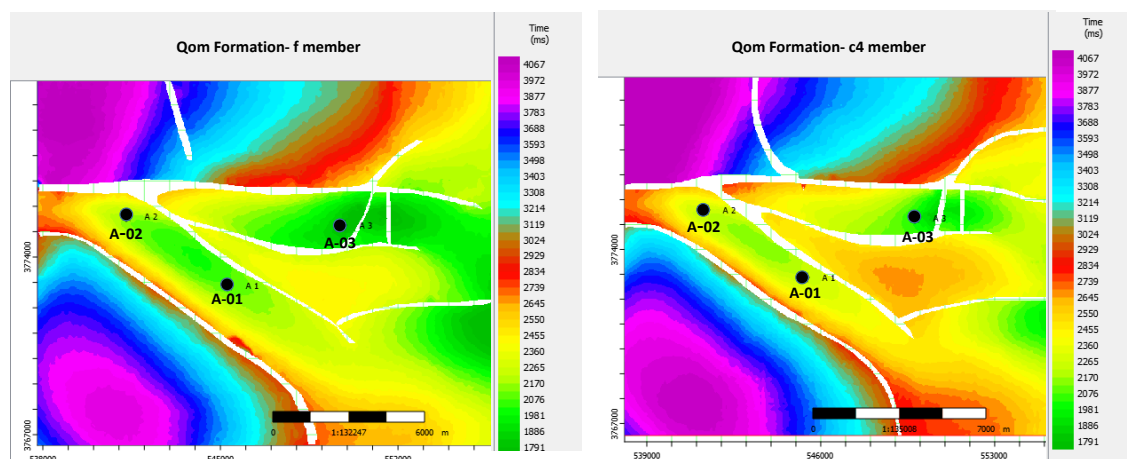
در این پژوهش از اطلاعات لرزه‌ای سه بعدی پس از بر انبارش، نمودارهای صوتی، چگالی و تخلخل هر سه حلقه چاه اکتشافی موجود استفاده شده است. در شکل ۵، نمودارهای استفاده شده در این پژوهش و در شکل ۶، مقطع لرزه‌ای عبوری از چاه‌ها همراه با تفسیر افق‌های استفاده شده، نشان داده شده است. به منظور تخمین تخلخل در مکهب لرزه‌ای گستره بررسی شده، ابتدا فرآیند وارون‌سازی لرزه‌ای انجام شده و سپس از طریق یافتن ارتباط بین مقاومت صوتی (به‌عنوان نشانگر خارجی) و سایر نشان‌گرهای داخلی مرتبط، تخمین تخلخل صورت گرفته است. به‌طور خلاصه، مراحل انجام کار عبارتند از:

وارد کردن داده‌ها و تصحیح آن‌ها

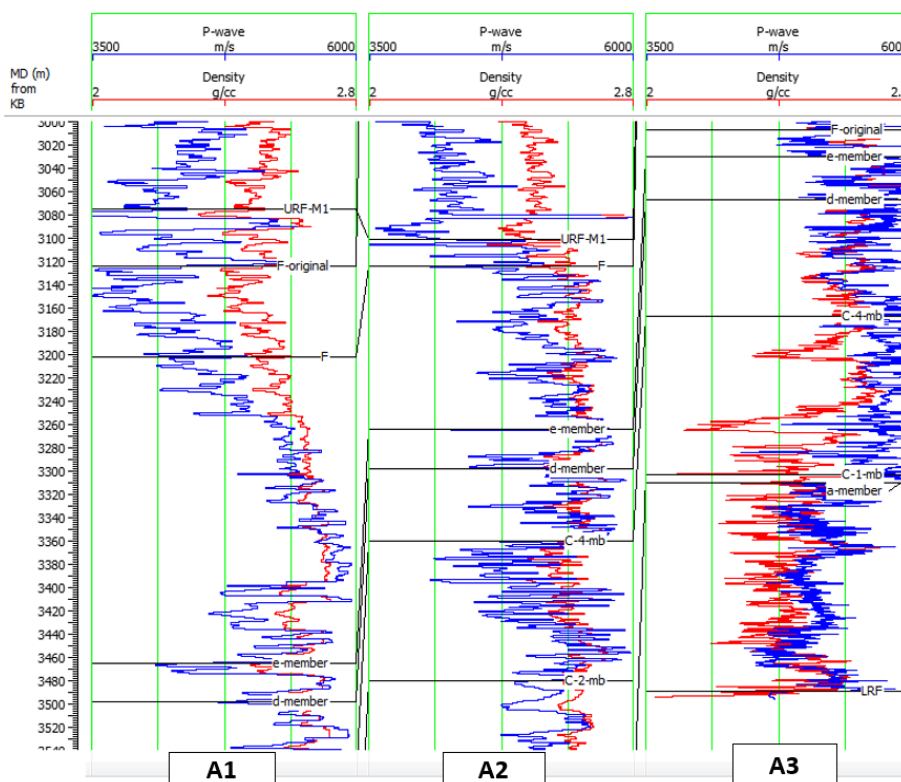
بعد از کنترل کیفی اولیه اطلاعات، داده‌های لرزه‌نگاری و چاه وارد نرم‌افزار Hampson Russell می‌شود و سپس نگاره‌های پتروفیزیکی چگالی، سرعت موج فشاری و تخلخل بارگذاری می‌گردند. بعد از آن، با بارگذاری داده‌های چک‌شات، انطباق بین داده‌های لرزه‌ای در حوزه زمان با داده افق‌های عمقی چاه برقرار می‌شود.



شکل ۳. ستون چینه‌شناسی رسوبات البگوسن تا پلیوسن پهنه ایران مرکزی. سازند قم به ۷ بخش مختلف تفکیک شده است.



شکل ۴. نقشه زمانی راس افق‌های f و c4 (به ترتیب سمت چپ و راست) در تاق‌دیس آران و موقعیت چاه‌های اکتشافی حفاری شده این تاق‌دیس

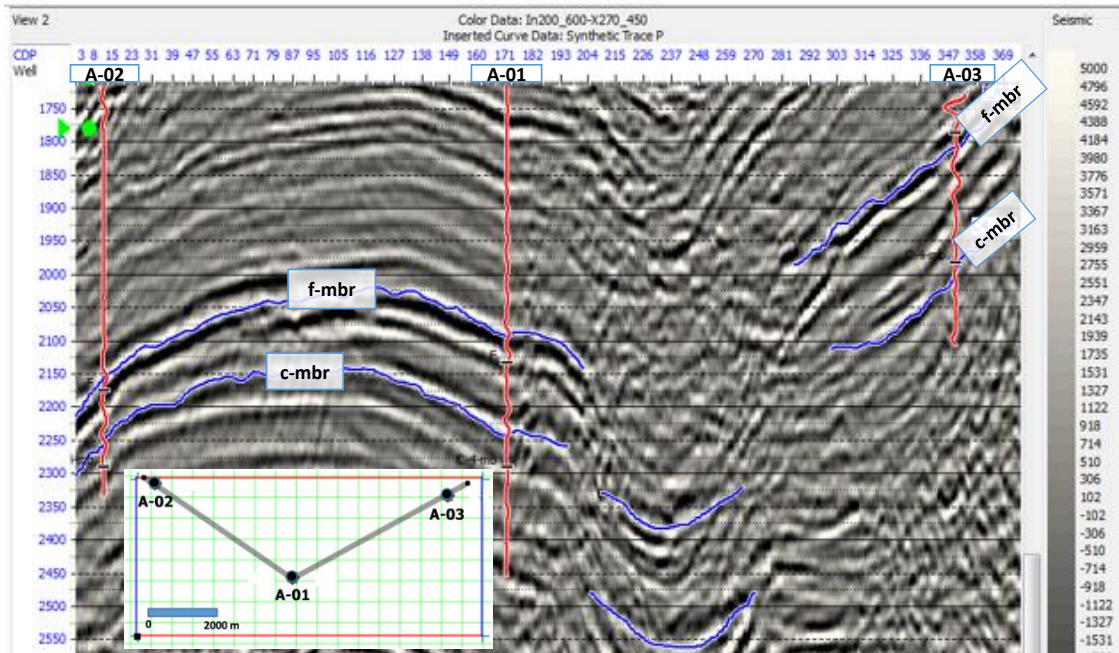


شکل ۵. نمودارهای سرعت موج P و دانسیته استفاده شده در فرایند وارون سازی

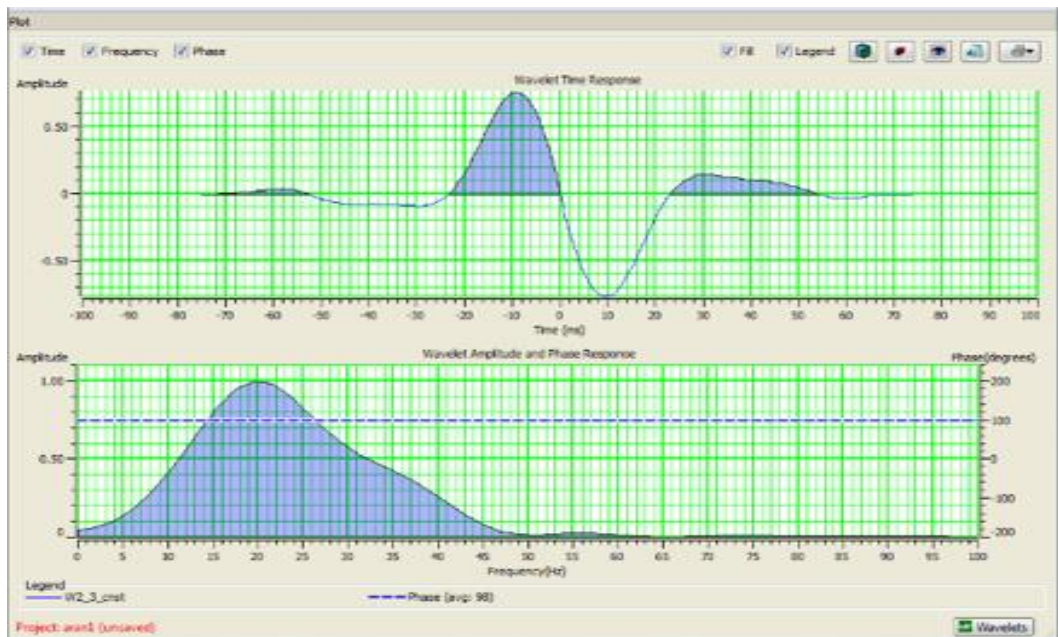
استخراج موجک و ساخت لرزه نگاشت مصنوعی

با استفاده از اطلاعات نگارهای چگالی و سرعت موج تراکمی، مدلی از سری ضرایب بازتاب در محل چاه ساخته می‌شود و با اعمال موجک تخمینی، ردلرزه مصنوعی ایجاد می‌شود که با ردلرزه واقعی در محل چاه مطابقت داده می‌شود. در این مرحله اگر خطا زیاد باشد، باید پارامترهای موجک تخمینی اولیه (شامل طول موجک، فاز، درجه چرخش فاز یا حتی با اعمال جابجایی) میزان خطا کاهش یابد و این عمل تا دستیابی به یک درصد تطابق قابل قبول

ادامه می‌یابد [۳۱]. در نهایت، شکل موجک نهایی به دست می‌آید که در سایر مراحل بعدی وارون سازی استفاده می‌شود (شکل ۷).



شکل ۶. مقطع لرزه‌ای چاه گذر به همراه افق‌های تفسیر شده



شکل ۷. شکل موجک نهایی استخراج شده

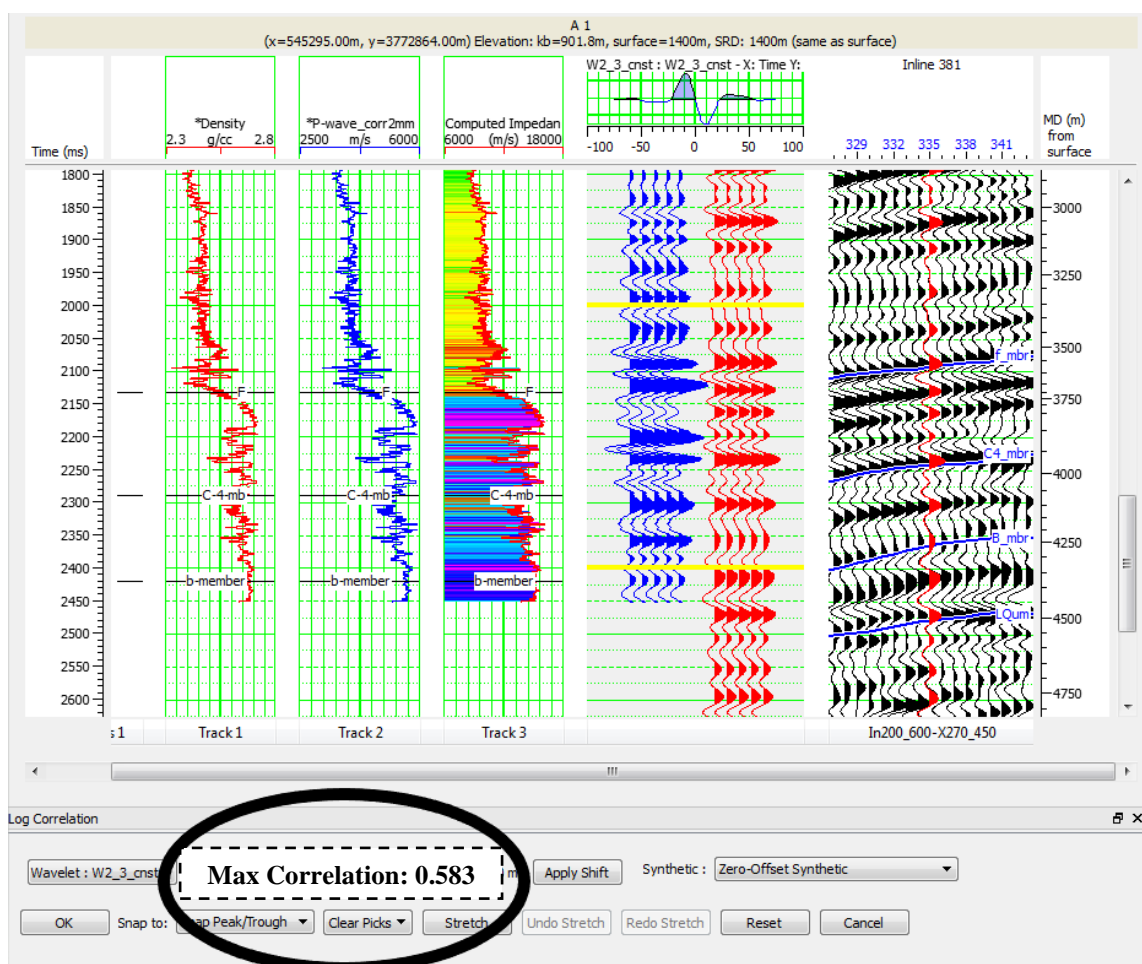
جدول ۲. پارامترهای نهایی موجک نهایی استخراج شده

پارامترهای موجک نهایی	
۱۸۰۰ تا ۱۲۰۰ (m)	فاصله استخراج موجک
۱۵۰ (ms)	طول موجک
۱ (ms)	نرخ نمونه برداری
۲۰ (Hz)	فاز میانگین موجک

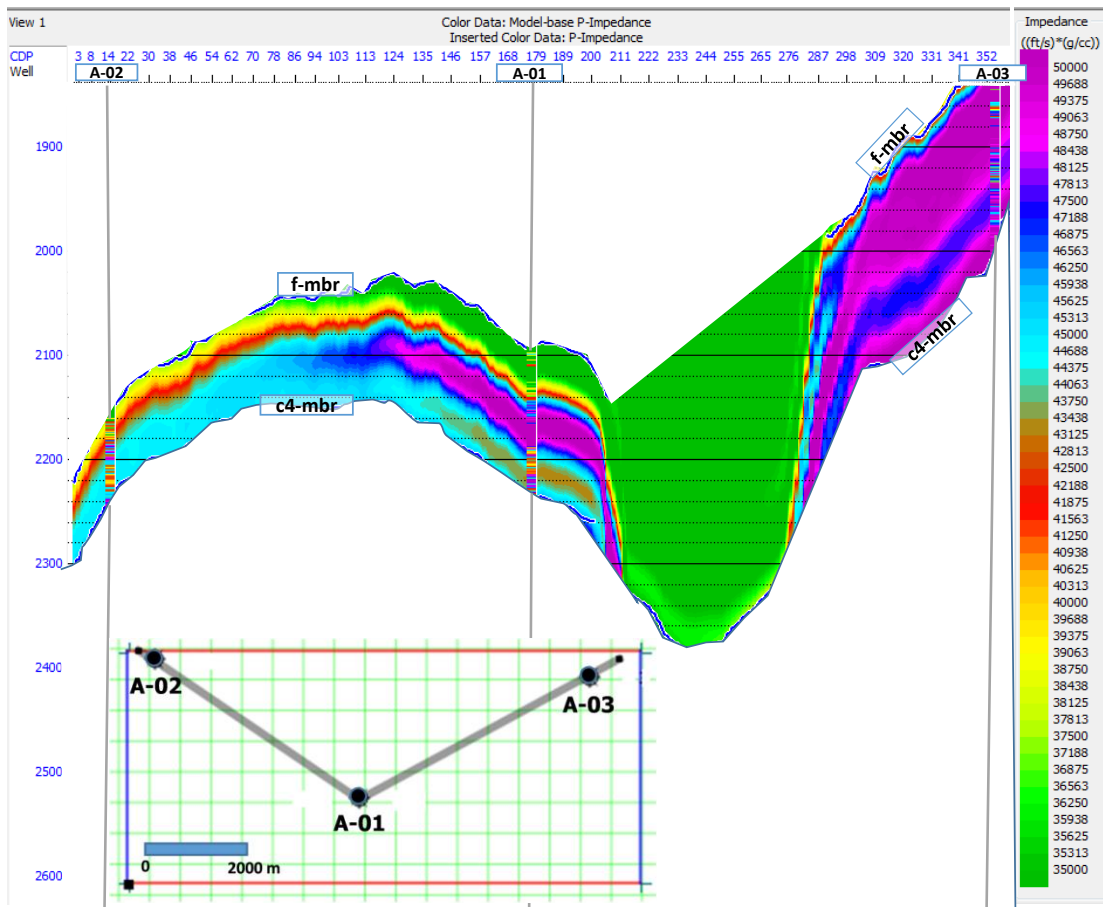
در این پژوهش، بعد از انجام عمل هم‌مییخت، درجه هم‌بستگی ۵۸ درصد به‌دست آمده است که با توجه به کیفیت داده‌های لرزه‌ای و نگاره‌های موجود، قابل قبول ارزیابی شد (شکل ۸).

ساخت مدل اولیه

برای محاسبه این مدل ابتدا رابطه بین نگاره مقاومت صوتی و ردلرزه‌ی هم موقعیت (Justify) با چاه به‌دست می‌آید. سپس به‌کمک درون‌یابی، این رابطه روی تمام ردلرزه‌ها اعمال می‌شود. به این ترتیب، یک مدل مقاومت صوتی اولیه تولید می‌شود که این مدل‌ها معمولاً برای ساخت قسمت‌های با فرکانس‌های پایین استفاده می‌شوند (اگر چه می‌توان اجازه داد که تمام باند فرکانس‌ها در مدل حضور داشته باشند). در شکل ۹، مدل اولیه با فیلتر پایین‌گذر نمایش داده شده است. با توجه به این که این مدل با استفاده از سه چاه ساخته شده است، بنابراین مدل ساخته شده به‌نسبت نرم به‌شمار می‌رود.



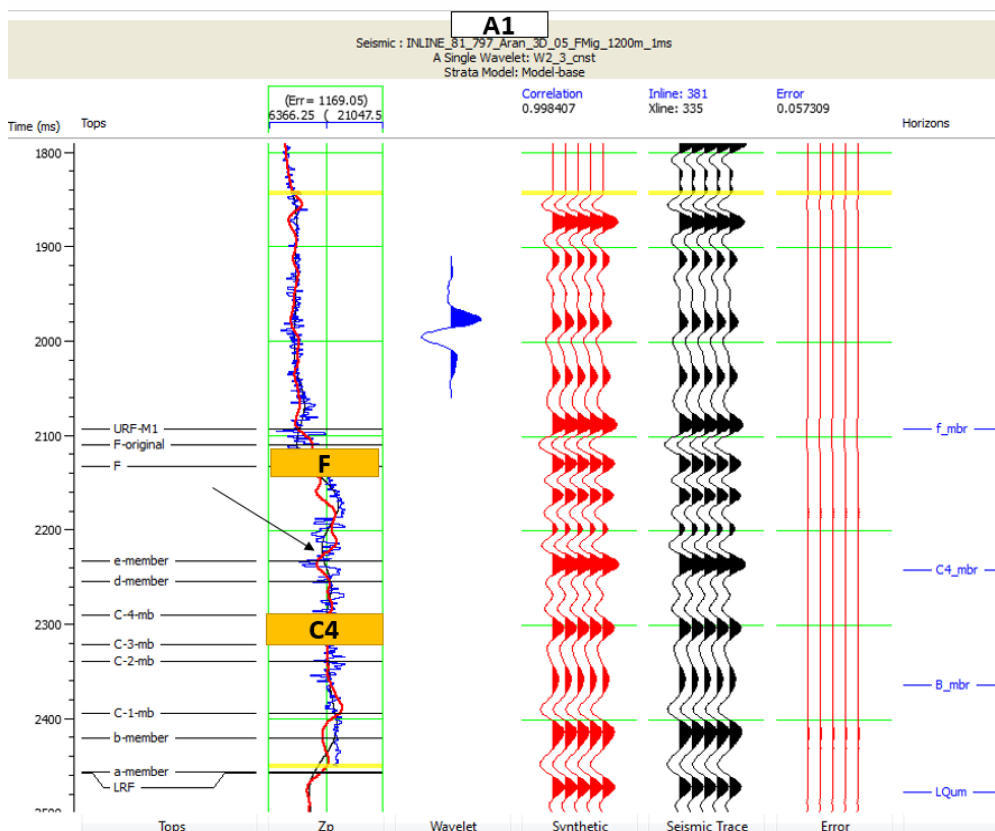
شکل ۸. تطابق اطلاعات لرزه‌ای در محل چاه و لرزه‌نگاشت مصنوعی تولید شده از نگاره‌های درون چاهی



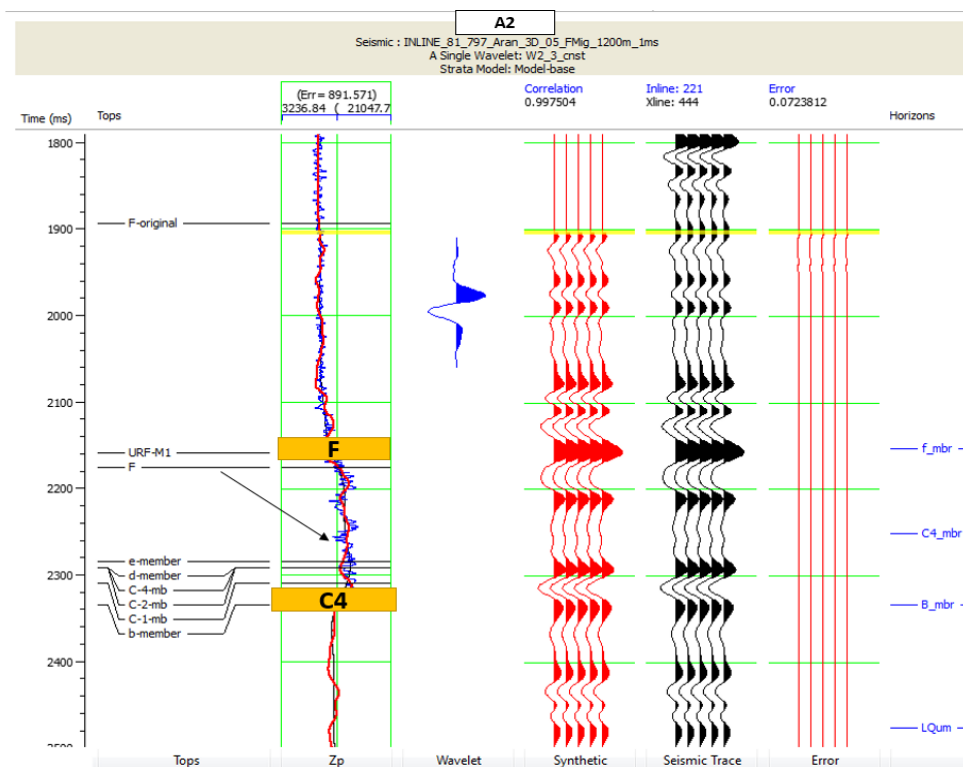
شکل ۹. استخراج مدل اولیه مقاومت صوتی استفاده شده در وارون سازی روی خط عبوری از چاه‌های بررسی شده

تحلیل وارون سازی لرزه‌ای

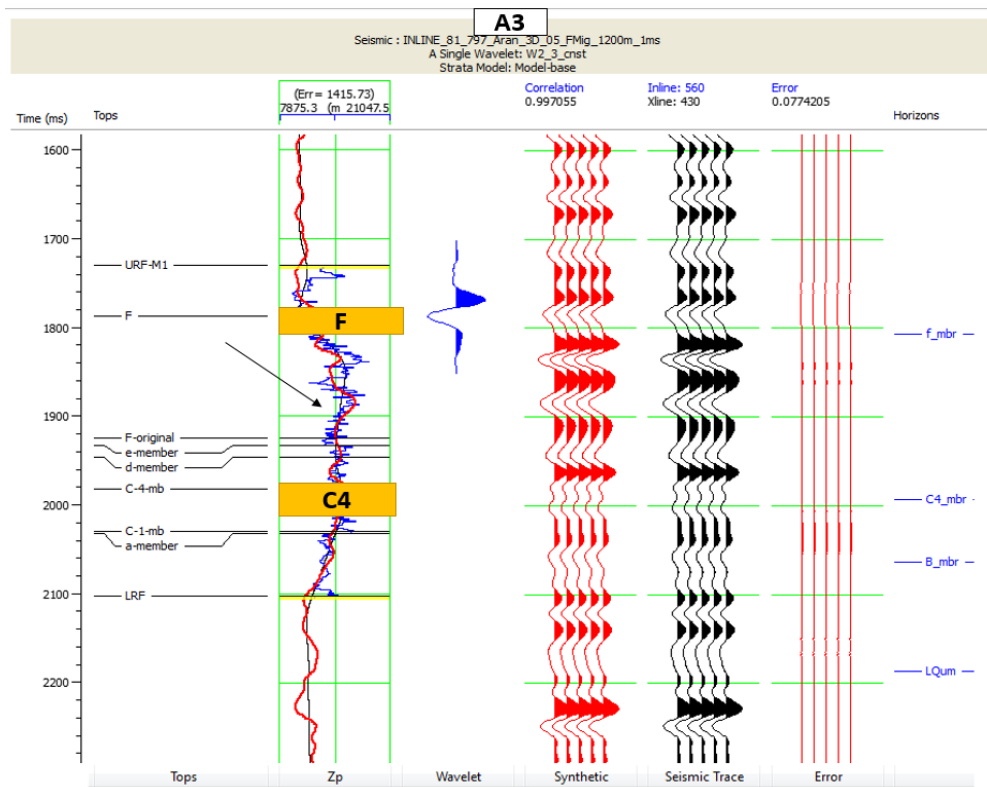
به منظور کنترل کیفیت و تحلیل قابلیت الگوریتم وارون سازی در استخراج مقاومت صوتی در محل چاه‌ها، انطباق نمودار مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی با نمودار مقاومت صوتی اندازه‌گیری شده و با تطابق لرزه‌نگاشت حاصل از وارون سازی با نمودار مقاومت صوتی اندازه‌گیری شده و با تطابق لرزه‌نگاشت حاصل از وارون سازی با تریس لرزه‌ای استفاده می‌شود و بدین ترتیب پارامترهای مناسب وارون سازی نیز تعیین می‌شوند [۳۲]. این کنترل و تحلیل‌ها در محل چاه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. در این شکل‌ها، نمودار قرمز و آبی در پنل اول از سمت چپ به ترتیب مربوط به نتیجه وارون سازی و لاگ مقاومت صوتی اندازه‌گیری شده در محل چاه است. در پنل دوم، تریس لرزه‌ای با رنگ سیاه و لرزه‌نگاشت مصنوعی به رنگ قرمز نشان داده شده و میزان خطا در انطباق آنها نیز در پنل آخر سمت راست نشان داده شده است. شکل ۱۳، تغییرات مقاومت صوتی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار تطابق تقاطعی مقاومت صوتی واقعی و مقاومت صوتی اندازه‌گیری شده در شکل ۱۴ نشان داده شده



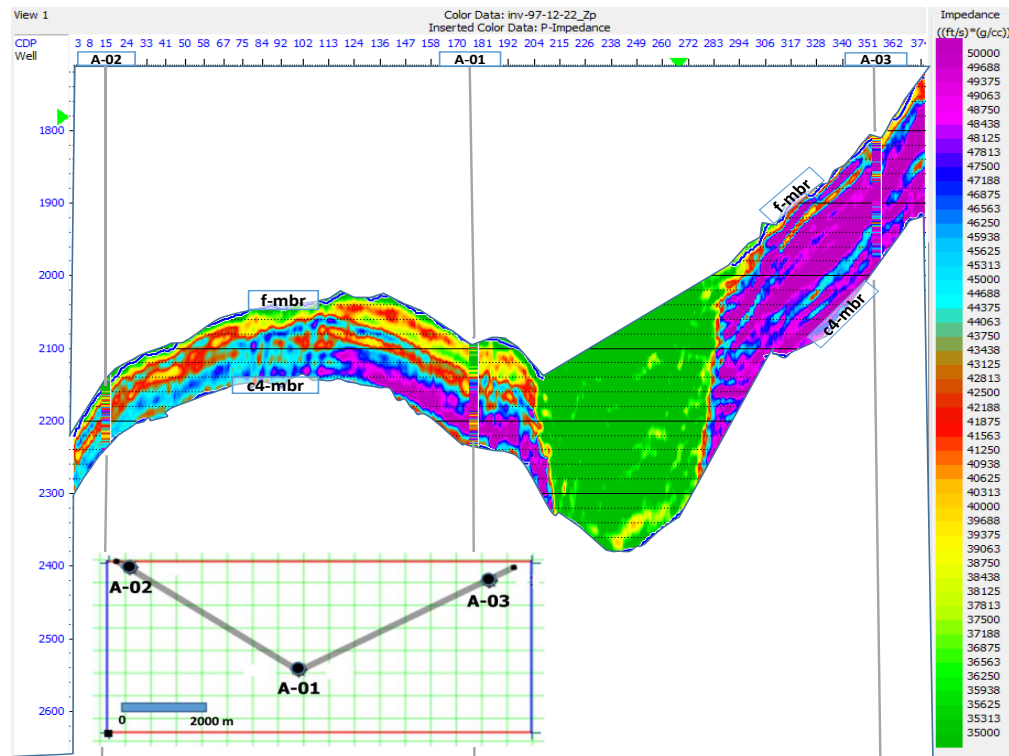
شکل ۱۰. وارون سازی در محل چاه A-۰۱ در پنل قرمز و آبی به ترتیب مربوط به نتیجه وارون سازی و لاگ مقاومت صوتی اندازه گیری شده است. در پنل دوم تریس لرزه ای با رنگ سیاه و لرزه نگاشت مصنوعی به رنگ قرمز است.



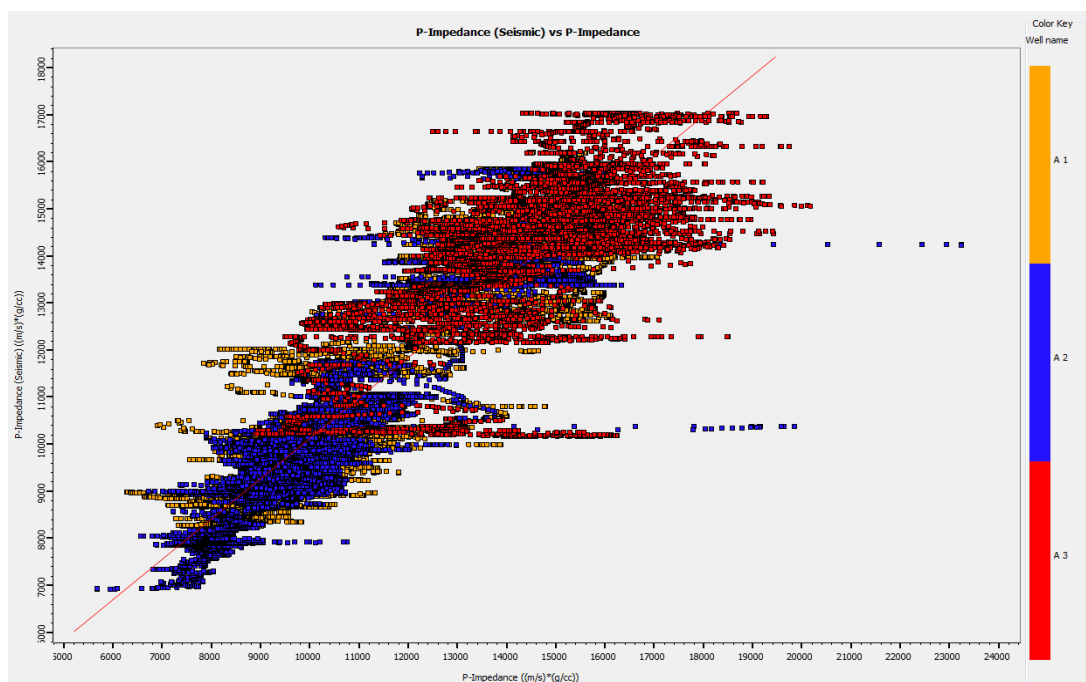
شکل ۱۱. وارون سازی در محل چاه A-۰۲ در پنل قرمز و آبی به ترتیب مربوط به وارون سازی و لاگ مقاومت صوتی اندازه گیری شده است. در پنل دوم تریس لرزه ای با رنگ سیاه و لرزه نگاشت مصنوعی به رنگ قرمز است.



شکل ۱۲. وارون‌سازی در محل چاه A-۰۳ در پهنل قرمز و آبی به ترتیب مربوط به وارون‌سازی و لاگ مقاومت صوتی اندازه‌گیری شده است. در پهنل دوم تریس لرزه‌ای با رنگ سیاه و لرزه‌نگاشت مصنوعی به رنگ قرمز است.



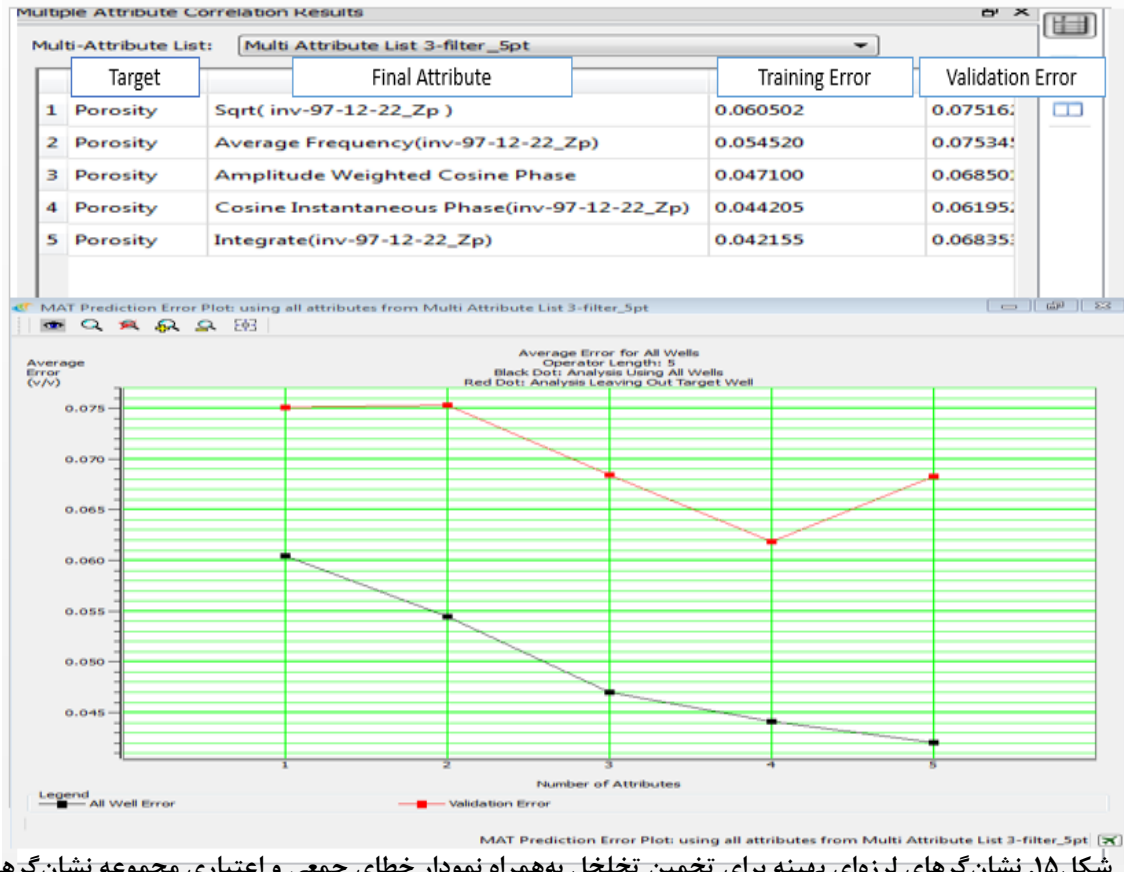
شکل ۱۳. مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی روی خط عبوری از چاه‌های بررسی شده



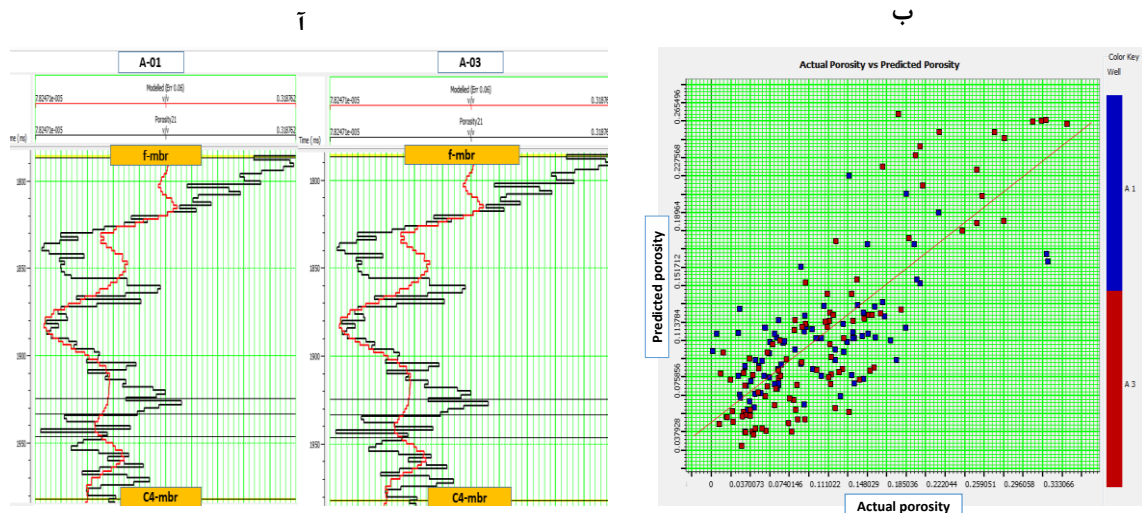
شکل ۱۴. نمودار تطابقی بین مقاومت صوتی داده لرزه‌ای در محل چاه و مقاومت صوتی محاسبه شده از نگاره‌های درون چاهی

تخمین مکعب تخلخل

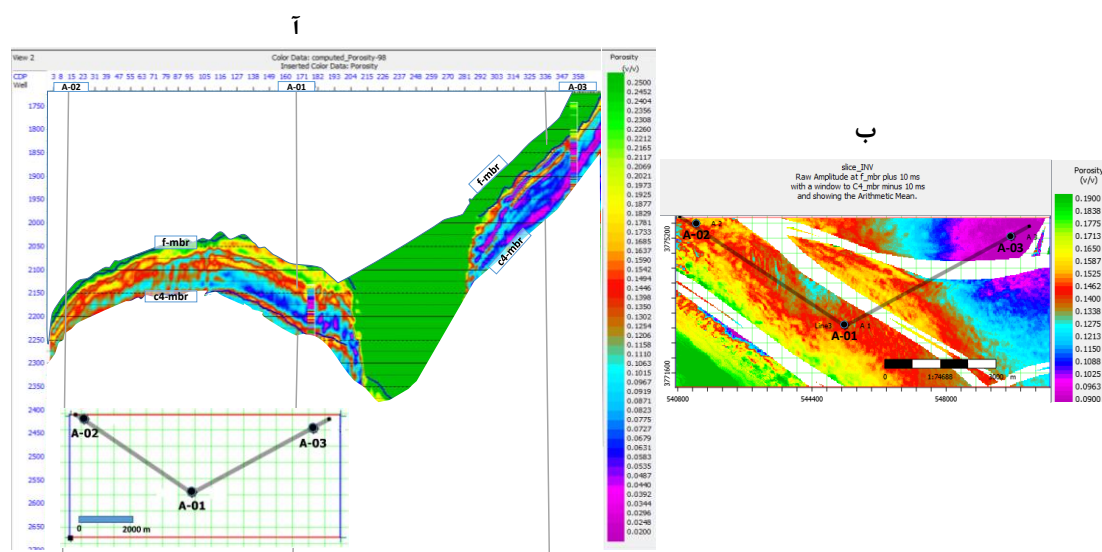
پس از انجام وارون‌سازی، مکعب مقاومت صوتی به‌عنوان یک نشان‌گر خارجی برای استخراج و تخمین تخلخل استفاده می‌شود. در این پژوهش، به‌منظور تخمین تخلخل از روش چندنشان‌گری استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند هنگامی که همه چاه‌ها در بررسی استفاده شوند، میزان خطای پیش‌بینی شده کاهش می‌یابد ولی با افزایش تعداد نشان‌گرها به بیش از چهار نشان‌گر، میزان خطای اعتبارسنجی نیز افزایش یافته است (شکل ۱۵). بنابراین، چهار نشان‌گر لرزه‌ای برای تولید مکعب تخلخل استفاده شده است. در این پژوهش، نگاره‌های تخلخل چاه‌های A-01 و A-03- که کیفیت بیش‌تر داشته‌اند، برای ادامه کار انتخاب و چاه A-02 از محاسبات تخلخل حذف شده است (شکل ۱۶). سپس با تطابق مناسب نمودار پتروفیزیکی تخلخل و نمودار محاسبه شده از طریق وارون‌سازی، مکعب تخلخل تخمین زده شده است با توجه به مکعب تخلخل و نقشه زمانی آن که در شکل ۱۷ نشان داده شده میزان تخلخل A-01 به سمت چاه A-02 بیش‌تر از چاه A-01 به سمت چاه A-03 در لایه f تا لایه c₄ است.



شکل ۱۵. نشان گرهای لرزه‌ای بهینه برای تخمین تخلخل به همراه نمودار خطای جمعی و اعتباری مجموعه نشان گرها



شکل ۱۶. آ مقایسه نمودار تخلخل درون چاهی (مشکی رنگ) و نمودار تخمین زده شده نمودار قرمز رنگ، (ب) نمودار تطابق تقاطعی از تخلخل واقعی در مقابل تخلخل اندازه گیری شده



شکل ۱۷. آ) مقطع عبوری از روی چاه‌های A-01، A-02 و A-03 (ب) برش زمانی در ۱۰ میلی ثانیه از مقطع آ که نشان می‌دهد ناحیه چاه‌های A-01 و A-02 از تخلخل بالاتری نسبت به منطقه بین چاه‌های A-01 و A-03 برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میزان تغییرات تخلخل بخشی از سازند مخزنی قم در تقادیس آران در پهنه ساختاری ایران مرکزی با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی (نگارهای چگالی، صوتی و تخلخل) و داده‌های لرزه‌ای سب‌بعدی و با بهره‌گیری از روش وارون‌سازی پس از برانبارش بر پایه مدل تخمین زده شده است. به‌طور خلاصه نتایج این پژوهش عبارتند از:

۱. مقاومت صوتی، نشان‌گر کارآمدی در تخمین تخلخل است. بنابراین با وارون‌سازی لرزه‌ای، امکان تخمین تخلخل با دقت مناسب در نقاط دور از چاه‌ها نیز وجود دارد.
۲. استفاده از نشان‌گرهای مختلف تأثیر چشم‌گیری در بهبود تخمین میزان تخلخل دارد.
۳. نتیجه تخمین تخلخل به‌وسیله تک‌نشان‌گری نشان می‌دهد که نشان‌گر مقاومت صوتی، میزان خطای جمعیتی کم‌تری در میان سایر نشان‌گر دارد.

میزان تخلخل لایه f تا لایه c4 در محل چاه A-01 به سمت چاه A-02 بیش‌تر از چاه A-01 به سمت چاه A-03 است. بنابراین در صورتی که قصد حفاری‌های بعدی اکتشافی در این لایه‌ها وجود داشته باشد، محدوده بین دو چاه، چاه A-01 و A-02 دارای اولویت بیش‌تری به لحاظ زون متخلخل مخزنی دارد. بدیهی است که با در نظر گرفتن سایر اطلاعات در ارتباط با سیستم هیدروکربنی منطقه می‌توان از نتایج این پژوهش در کاهش ریسک حفاری‌های آتی استفاده کرد.

سپاسگزاری

از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران به‌دلیل در اختیار گذاشتن اطلاعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی و هم‌چنین اجازه انتشار این مقاله قدردانی می‌کنیم. هم‌چنین از جناب دکتر محمود حاجیان به پاس کمک‌های بی‌دریغ شان سپاسگزاری می‌شود. از داوران محترم که با نظرات سازنده و کاربردی در اصلاح این مقاله کمک کردند سپاسگزاری می‌کنیم.

منابع

1. Lines L. R., Trite, S., "A review of least-squares inversion and its application to geo physical problems", *geophysical prospecting*, 32 (1984) 159-186.
2. Todorove T., Stewart R., Hampson D., Russell B., "Well log prediction using attributes from 3C-3D Seismic data", *SEG LIBRARY*, 17 (1998) 1574-1577.
3. Tonn R., "Neural network Seismic reservoir characterization in a heavy oil reservoir", *The Leading Edge*, 21 (2002) 309-312.
4. Hampson D. P., Schuelke J. S., Quirein J. A., "Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data", *Geophysics*, 66 (2001) 220-236.
5. Batzle M., Wang Z., "Seismic properties of fluids", *Geophysics*, 57 (1992) 1396-1408.
۶. مولودیان الهه، "بررسی روش وارون‌سازی رنگی و مقایسه آن با روش وارون‌سازی خارهای پراکنده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه امیرکبیر (۱۳۹۴).
7. Russell B., et al. "Combining geostatistics and multi-attribute transforms: A channel sand case study, Blackfoot oilfield (Alberta)", *Journal of Petroleum Geology* 25.1 (2002) 97-117.
8. cook D. A., Schneider W. A., "Generalized linear inversion of reflection seismic data", *Geophysics*, 48 (1983) 665-676.
9. Misra s., Chopra s., "Neural network analysis and impedance inversion-case study", *Arcis Corporation, Calgary, Alberta*, (2011).
10. Waldne A. T., Hosken J. W. J., "An investigation of the spectral properties of primary reflection coefficients", *Geophysical prospecting*, 33 (1985).
11. Oldenburg D. W., Scheuer T., Levy S., "Recovery of the acoustic impedance from reflection Seismograms", *Geophysics*, 48 (1983).
12. Russell B., "Introduction to Seismic inversion method: Society of Exploration", *Geophysicists, (Course notes from SEG Continuing Education Course)* (1988).
13. Huss M., Feary D. A., "Seismic inversion for acoustic impedance and porosity of Cenozoic cool-water carbonate on the upper continental slope of the great Australian bight", *Marine Geology*, 215 (2005)123-134.
14. Balch A. H., "Color Sonograms: A new dimension in Seismic data interpretation", *Geophysics*, 36 (1971) 1071-1098.
15. White R. E., "Properties of instantaneous Seismic attributes", *The Leading Edge*, 10 (1991). (Discussion and reply in TLE- 1146-45-8- and TLE-11-10-12-10) (1991).
16. Brown A. R., "Interpretation of three-dimensional seismic data", *AAPG Memoir*, 42 (1996).
17. Partyka G., Gridley J., Lopez J., "Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization", *The Leading Edge*, 18 (1999) 353-360.

18. Taner M. T., koehler F., Sheriff R. E., "Complex Seismic analysis", *Geophysics*, 44 (1979) 1041-1063.
19. Chen Q., Sidney S., "Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring", *The Leading Edge*, 16 (1997) 445-448.
20. Chopra S., Marfurt k. J., "Seismic attributes for reservoir characterization", *SEG*, (2007).
21. Barns A., "Too many Seismic attributes", *CSEG Recorder*, 31 (2006) 40-45.
22. Russell B. H., Hedlin K., Hilterman F., Lines L. R., "Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective", *Geophysics*, 68 (2003).
23. Marroquin I. D", Automated Seismic facies for data integration: an example from Fort Worth Basin", *first break*, 33 (2015).
24. Othman A. A. A., Ewida H. F., Fathi M. M. Ali, Embody M. M. A. A., "Seismic Inversion for Reservoir characterization in Komombo Basin, Upper Egypt, (Case study). *IJISSET*", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2 (2015).
25. Doyen P. M., "porosity from seismic data: A geostatistical approach", *Geophysics*, 53 (1988).
۲۶. خدابخشی پوریا، "بیواستراتیگرافی فرامینفرهای سازند قم در چاه های آران ۳ و فخره ۱"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین شناسی دانشگاه تهران پردیس علوم، (۱۳۹۰).
۲۷. شرکت ملی گاز ایران مدیریت ذخیره سازی گاز طبیعی، "مطالعات ژئوفیزیکی تکمیلی حجم سه بعدی آران و خطوط دو بعدی فاز ۲ و ۴ کاشان"، شرکت فن آوری علوم زمین توس، (۱۳۸۶).
۲۸. واشقانی فرهانی محمدرضا، "تخمین مقاومت ویژه الکتریکی و اشباع آب سازند در یک مخزن هیدروکربنی با استفاده از داده های چاه پیمایی و لرزه ای به کمک شبکه عصبی مصنوعی"، (۱۳۸۸).
29. Yulong H., Zhiyong L., "Interpretation of two-dimensional/ three- dimensional seismic data of Aran structural belt in Kashan block Tehran", *National Iranian oil company (NIOC) K-53* (2005) 30-40.
30. Morley C., Kongwung B., Julapour A. A., Abdolghafourian M., Hajian M., Waples D., Warren J., Otterdoom H., Srisuriyon H., Kazemi H., "Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in Central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh area", *Geosphere*, 5 (2009) 1-38.
31. Hampson D., Galbraith M., "Wavelet extraction by sonic log correlation", *Journal of the CSEG*, 17 (1981) 24-42.
32. Brown R. L., MCELhattan, W., Santiago, D. j., "Wavelet estimation: An interpretive approach *Geophysics*", *The Leading Edge of Exploration*, (1988) 16-19.