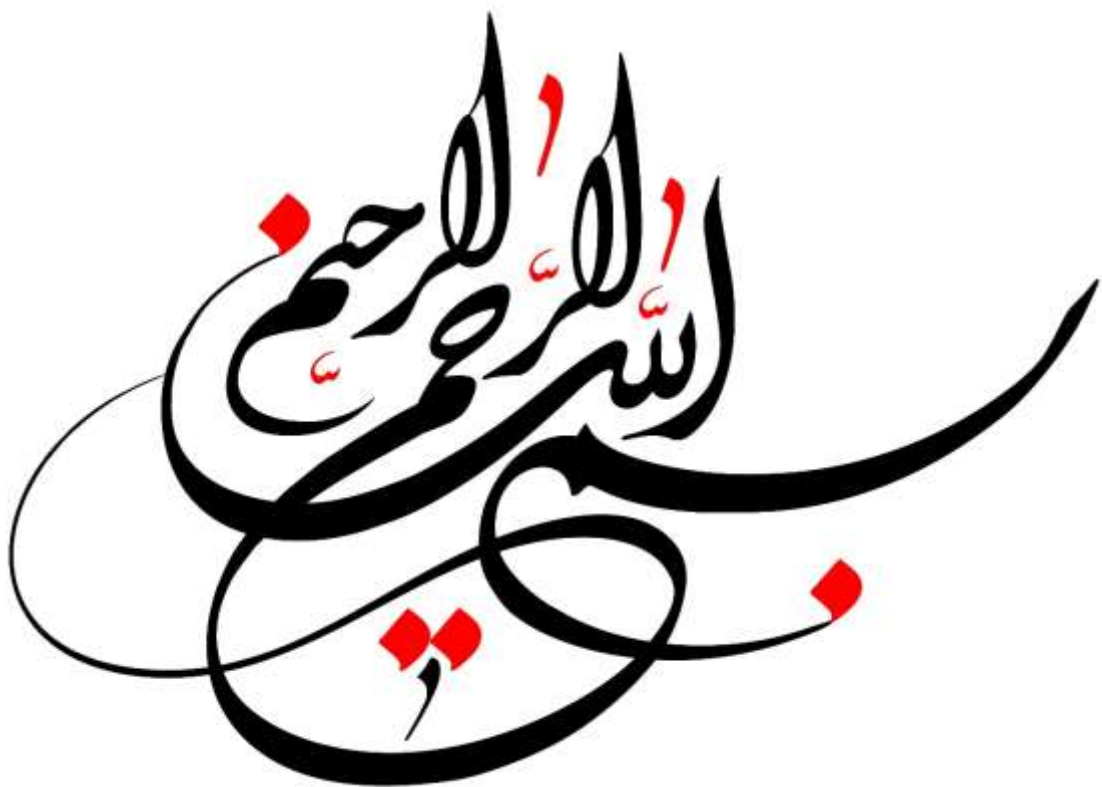






دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف

پیش بینی فشار منفذی در یکی از میدان های هیدروکربنی در

جنوب ایران با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی

نگارنده: یاسر عابدی ساروکلائی

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علیرضا عرب امیری

استاد مشاور

مهندس احسان لرکی

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۶۱۴۰۰/۴۲۰۴۹
تاریخ: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای یاسر عابدی ساروکلانی با شماره دانشجویی ۹۷۱۱۱۴۴ رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف نفت تحت عنوان پیش بینی رفتار متغذی در یکی از میدان های هیدروکربنی در جنوب ایران با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۹
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	احسان لرکی	مربی	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد رداد	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	یوسف شیر	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	محمد رضا صابری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد عطائی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به همسر و دختر عزیزم

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از امنیت و

آرامش و آسایش برای من فراهم آورده اند.

اکنون که با عنایت و یاری خداوند متعال مراحل پژوهش، تدوین و نگارش تحقیق به پایان رسیده است؛ بر خود واجب میدانم از عزیزانی

که طی مراحل مختلف از راهنمایی و یاری آنها بهره بردم سپاسگزاری نمایم.

از اساتید راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی و جناب آقای دکتر علیرضا عرب امیری که با مساعدت بی دریغ

خود مسیر انجام تحقیق را هموار نمودند، کمال تشکر را دارم.

از راهنمایی های ارزشمند جناب آقای مهندس احسان لرکی که مشاوره این تحقیق را به عهده داشتند، نهایت سپاس را دارم.

تعهد نامه

اینجانب یاسر عابدی ساروکلائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه پیش‌بینی فشار منفذی در یکی از میدان‌های هیدروکربنی در جنوب ایران با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و علیرضا عرب امیری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

مهندسان حفاری برای بهینه سازی تصمیمات حفاری مانند طراحی مسیر و موقعیت چاه‌ها، به نحوی که از خطراتی مانند انفجار و گیرکردن لوله جلوگیری شود؛ نیاز به اطلاعات کمی از زون‌های پرفشار در زیرسطح دارند.

فشار منفذی یا فشار سیال درون حفرات سنگ، از کمیت‌های مهم در بحث اکتشاف و حفاری منابع هیدروکربنی می‌باشد. در حفاری چاه‌های نفت و گاز در بسیاری از نقاط دنیا، وجود فشار منفذی بالا گزارش شده است. وجود فشار منفذی بالا باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای از جمله فوران چاه، ناپایدار بودن چاه، گیرکردن لوله حفاری و یا از دست دادن چرخش گل حفاری می‌شود. به همین علت به نظر می‌رسد تخمین عددی فشار منفذی، در سازندهای با فشار بالا، قبل از حفاری امری ضروری برای حفاری ایمن و اقتصادی می‌باشد. همچنین در زمینه اکتشاف می‌توان از مفهوم فشار منفذی در تحلیل و مطالعه مسیرهای مهاجرت هیدروکربن و همچنین در مطالعه کیفیت پوش سنگ استفاده کرد.

در این مطالعه سعی شده تا ابتدا مفاهیم بنیادی مورد استفاده در تخمین فشار منفذی مورد بررسی قرار گیرد و سپس به بررسی روش‌های لرزه‌ای تخمین فشار منفذی که عمدتاً با استفاده از تاثیر فشار بر مقدار سرعت لرزه‌ای می‌باشد پرداخته شود، به دلیل اینکه سرعت‌های بدست آمده از پردازش داده‌های لرزه‌ای معمولاً به علت پایین بودن وضوح و فرض‌های زمین لایه‌ای و برون‌راند هذلولی از دقت کافی در تحلیل فشار برخوردار نیستند. بنابراین در میدان مورد مطالعه به بررسی فشار منفذی با استفاده از مقاومت صوتی پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از نگارهای صوتی و چگالی حاصل از چاه پیمایی و داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، مقاومت صوتی را محاسبه کرده و سپس به تخمین فشار منفذی دست می‌یابیم. در نهایت نتایج حاصل اعتبار سنجی حاکی از مناسب بودن مدل فشار منفذی حاصل از این روش می‌باشد. به طور کلی در این مطالعه سعی شد تا با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی و دیگر داده‌های در دسترس و موجود در میدان مورد مطالعه، فشار منفذی تخمین زده شود. با توجه به این‌که مطالعات فشار در مخازن کربناته دنیا بسیار اندک می‌باشد، با این حال نتایج به دست آمده از این مطالعه تا حد قابل قبولی رضایت بخش می‌باشد.

کلمات کلیدی: فشار منفذی - مقاومت صوتی - فشار روباره - وارون سازی - فشار هیدرواستاتیک

فصل اول.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ فشار بارگذاری.....	۳
۳-۱ فشار هیدرو استاتیکی.....	۳
۴-۱ نیروی تکتونیکی.....	۵
۵-۱ اهداف و ضرورت انجام تحقیق.....	۹
فصل دوم.....	۱۱
۱-۲ مقدمه.....	۱۲
۲-۲ پارامترهای حفاری.....	۱۴
۳-۲ مقایسه‌ی انواع روش‌های محاسبه‌ی فشار منفذی.....	۱۴
۱-۳-۲ محاسبه‌ی فشار منفذی در هنگام حفاری.....	۱۵
۲-۳-۲ آنالیزهای بعد از حفاری چاه.....	۱۵
۳-۳-۲ روش ترشیاری.....	۱۶
۴-۳-۲ روش چالک.....	۱۷
۵-۳-۲ روش تنش موثر.....	۱۷
۶-۳-۲ روش باورز.....	۱۸
۷-۳-۲ تخمین فشار منفذی به روش ایتون در محل چاه‌ها.....	۱۹
فصل سوم.....	۲۳
۱-۳ وارون‌سازی لرزه‌ای.....	۲۴
۱-۱-۳ مبانی وارون‌سازی لرزه‌ای.....	۲۴
۲-۱-۳ اطلاعات ورودی.....	۲۷
۳-۱-۳ روش‌های وارون‌سازی.....	۲۸

۳۰	۴-۱-۳ وارون سازی به روش بازگشتی
۳۶	۵-۱-۳ بررسی روش های بازگشتی
۴۵	۶-۱-۳ فرکانس های پایین از دست رفته
۴۹	۲-۳ معرفی و آماده سازی داده های موجود
۴۹	۱-۲-۳ داده های چاه
۵۱	۳-۳ وارون سازی داده های لرزه ای
۵۱	۱-۳-۳ داده ها در نرم افزار همپسون راسل
۵۱	۱-۱-۳-۳ وارد کردن داده های چاه
۵۳	۲-۱-۳-۳ وارد کردن داده های لرزه ای
۵۵	۴-۳ وارد کردن افق های لرزه ای
۵۸	۵-۳ محاسبه موجک و تهیه ردلرزه مصنوعی
۶۲	۶-۳ ایجاد مدل اولیه
۶۳	۷-۳ وارون سازی
۶۷	۸-۳ تخمین فشار منفذی
۶۹	۹-۳ ساخت مکعب فشار منفذی
۷۱	۱۰-۳ کنترل کیفی نتایج فشار منفذی تخمین زده شده
۷۷	فصل چهارم
۷۸	نتیجه گیری
۸۰	پیشنهادها
۸۱	ضمیمه
۱۰۹	منابع و مراجع

صفحه

فهرست اشکال

شکل ۱-۱.....	۴
شکل ۲-۱.....	۷
شکل ۳-۱.....	۹
شکل ۱-۲.....	۱۶
شکل ۱-۳.....	۲۶
شکل ۲-۳.....	۲۷
شکل ۳-۳.....	۲۹
شکل ۴-۳.....	۳۱
شکل ۵-۳.....	۳۶
شکل ۶-۳.....	۳۷
شکل ۷-۳.....	۳۷
شکل ۸-۳.....	۳۸
شکل ۹-۳.....	۳۸
شکل ۱۰-۳.....	۳۹

۳۹.....	شکل ۱۱-۳
۴۰.....	شکل ۱۲-۳
۴۰.....	شکل ۱۳-۳
۴۱.....	شکل ۱۴-۳
۴۱.....	شکل ۱۵-۳
۴۲.....	شکل ۱۶-۳
۴۲.....	شکل ۱۷-۳
۴۳.....	شکل ۱۸-۳
۴۴.....	شکل ۱۹-۳
۴۴.....	شکل ۲۰-۳
۴۵.....	شکل ۲۱-۳
۴۶.....	شکل ۲۲-۳
۴۷.....	شکل ۲۳-۳
۴۷.....	شکل ۲۴-۳
۴۹.....	شکل ۲۵-۳
۵۰.....	شکل ۲۶-۳
۵۳.....	شکل ۲۷-۳

۵۴.....	شکل ۲۸-۳.....
۵۵.....	شکل ۲۹-۳.....
۵۶.....	شکل ۳۰-۳.....
۵۷.....	شکل ۳۱-۳.....
۵۷.....	شکل ۳۲-۳.....
۵۸.....	شکل ۳۳-۳.....
۶۰.....	شکل ۳۴-۳.....
۶۱.....	شکل ۳۵-۳.....
۶۳.....	شکل ۳۶-۳.....
۶۵.....	شکل ۳۷-۳.....
۶۵.....	شکل ۳۸-۳.....
۶۶.....	شکل ۳۹-۳.....
۶۶.....	شکل ۴۰-۳.....
۶۸.....	شکل ۴۱-۳.....
۷۰.....	شکل ۴۲-۳.....
۷۰.....	شکل ۴۳-۳.....
۷۱.....	شکل ۴۴-۳.....

۷۲.....	شکل ۳-۴۵.....
۷۳.....	شکل ۳-۴۶.....
۷۴.....	شکل ۳-۴۷.....
۷۵.....	شکل ۳-۴۸.....
۷۶.....	شکل ۳-۴۹.....
۸۷.....	شکل ۵-۱.....
۸۷.....	شکل ۵-۲.....
۸۹.....	شکل ۵-۳.....
۹۱.....	شکل ۵-۴.....
۹۲.....	شکل ۵-۵.....
۹۴.....	شکل ۵-۶.....
۹۷.....	شکل ۵-۷.....
۱۰۰.....	شکل ۵-۸.....
۱۰۱.....	شکل ۵-۹.....
۱۰۲.....	شکل ۵-۱۰.....
۱۰۳.....	شکل ۵-۱۱.....
۱۰۴.....	شکل ۵-۱۲.....

شکل ۵-۱۳ ۱۰۵

شکل ۵-۱۴ ۱۰۵

شکل ۵-۱۵ ۱۰۷

شکل ۵-۱۶ ۱۰۸

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

یکی از پارامترهای اساسی در برنامه‌ریزی حفاری منابع هیدروکربنی فشار منفذی می‌باشد. در مناطقی که قبلاً حفاری صورت گرفته است، مجموعه اطلاعات موجود می‌توانند برای تعیین فشار در چاه‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرند. اطلاعات فشار منفذی می‌تواند برای زمین‌شناسان در ارزیابی صحیح روند شکستگی‌ها، گسل‌ها و دینامیک مهاجرت هیدروکربن و برای مهندسان مخزن نیز در طراحی نقاط لوله‌گذاری و انتخاب بهینه‌ی وزن گل حفاری بسیار مفید باشد. با محاسبه صحیح گرادیان فشار می‌توان حفاری چاه‌ها را طراحی و کنترل کرد و از بروز زیان‌های جانی و مالی فراوان مانند هرزروی گل، فوران چاه، تخریب چاه و لوله‌های جداری و مسائل زیست محیطی جلوگیری کرد. در نظر گرفتن وزن گل و گرادیان شکستگی، پارامترهای ضروری برای پایداری دیواره‌ی چاه، جلوگیری از هرزروی گل، تولید ماسه و خسارات وارده به مخزن بشمار می‌رود.

فشار منفذی به فشار سیال درون حفرات سنگ گفته می‌شود. در رسوبات متخلخل، هر نقطه درون حوضه رسوبی دارای یک فشار منفذی مربوط به خود است که فشار آن می‌تواند از نوع هیدرواستاتیک، فشار بالا یا فشار پایین باشد.

بر اساس مطالعات سواربریک و اوسبرن که در سال ۱۹۹۸ انجام شد؛ عوامل ایجاد فشار منفذی بالا بر اساس فرآیندهای ایجادکننده آن به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- بارگذاری

۲- افزایش حجم سیال

۳- حرکت سیال

۲-۱ فشار بارگذاری^۱

این فشارها ناشی از فشار لیتواستاتیک حاصل از وزن ستون سنگی طبقات فوقانی می‌باشد که می‌توان آن را از تراکم سنگ بدست آورد. این فشار تابعی از وزن مخصوص سنگ‌ها و سیالات درون منافذ سنگ‌ها بوده و متناسب با عمق افزایش می‌یابند.

۳-۱ فشار هیدرواستاتیک^۲ (فشار نرمال)

فشار هیدرواستاتیک شامل فشار ایجاد شده ناشی از وزن ستون سیال است این فشار تابع عمق و چگالی ستون سیال است و ابعاد هندسی ستون سیال در فشار هیدرواستاتیک نقشی ندارد. چگالی به نوع سیال، تجمع جامدات حل نشده (نمک و دیگر کانی‌ها)، گازها و وجود آن‌ها در ستون سیال، همچنین دما و فشار سیال بستگی دارد. از طرفی چگالی سیال وابسته به عمق است که ارتفاع ستون سیال، فاصله عمودی نقطه اندازه‌گیری تا ابتدای ستون سیال می‌باشد (عمق عمودی حقیقی).

شکل (۱-۱) نمایش شماتیکی از فشار هیدرواستاتیک برای ستون ۱۰ فوتی آب خالص است. در این شکل خط هیدرواستاتیک نشان دهنده فشار به علت وزن ستون سیال است. شیب این خط برای آب معادل 0.433 psi/ft و برای سیال سازند در حدود $0.465 - 0.45 \text{ psi/ft}$ است. برای یک سنگ متخلخل که فضاهای حفره‌های آن تا سطح به هم مربوط است (سیستم باز) فشار سیال در فضای حفره‌ای فقط

¹ Loading Pressure

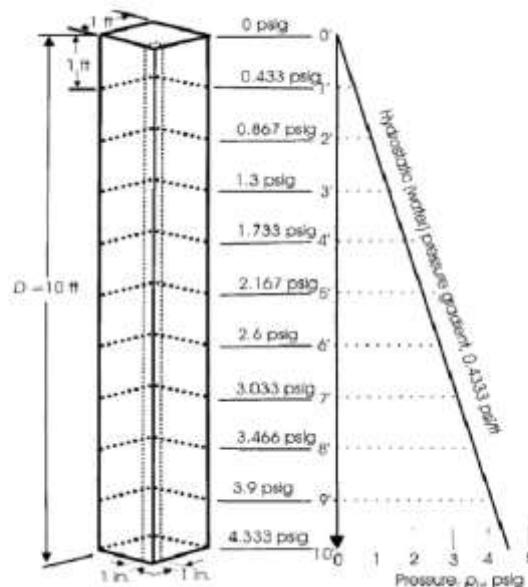
² Hydrostatic pressure

³ Open system

شامل وزن سیالات بالایی است که به آن فشار هیدرواستاتیک و یا نرمال گفته می‌شود. فشار هیدرو استاتیک توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{normal} = g \int_0^h \rho_{fluid}(Z) dz \quad (1-1)$$

که در این رابطه P_{Normal} فشار هیدرواستاتیک بر حسب پاسکال، $\rho_{fluid}(Z)$ چگالی سیال در عمق Z بر حسب Kg/m^3 و g شتاب جاذبه زمین بر حسب m/s^2 و h ارتفاع عمودی ستون سیال بر حسب m است.



شکل (۱-۱): نمایش فشار هیدرواستاتیک در مقابل عمق برای گرادینان 0.433 psi/ft (آب خالص) (براون، ۱۹۶۷).

۴-۱ نیروی تکتونیکی

فشار روباره در عمق مورد نظر عبارت است از فشار اعمال شده توسط وزن رسوبات و سیال درون فضای منفذی سنگ. این مفهوم را می توان با عبارت زیر نشان داد:

$$S = g \int_0^z \rho_b (Z) dz \quad (۱-۲)$$

در اینجا، ρ_b چگالی بالک است و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\rho_b = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_r \quad (۱-۳)$$

در فرمول اخیر ϕ تخلخل است و مقداری بین ۰ و ۱ دارد. ρ_f چگالی سیال سازند برحسب kg/m^3 و g شتاب جاذبه زمین برحسب m/s^2 و h ارتفاع عمودی ستون سیال برحسب متر است.

تخلخل رسوبات در اثر ادامه رسوب گذاری و زیاد شدن عمق دفن کاهش می یابد (عمل تراکم) و این کاهش تخلخل با افزایش فشار روباره متناسب است. در خصوص رس ها این کاهش وابستگی زیادی به وزن رسوبات بالایی دارد. در ماسه ها و کربنات ها این رابطه تابع پارامترهای دیگری بجز تراکم است. از جمله این موارد می توان به تاثیرات دیاژنز^۱، ترکیبات اولیه، جورشدگی و سایر موارد اشاره کرد.

^۱ digenesis effect

۱-۴-۱ انبساط سیال:

فشار منفذی بالا همچنین می‌تواند در اثر افزایش حجم سیال درون منافذ ایجاد شود که این شرایط می‌تواند در مواردی همچون افزایش دما (انبساط دمایی)، تبدیل کانی‌ها، تولید هیدروکربن، شکست نفت به گاز و انبساط گاز با بالا آمدگی ساختاری رخ دهد. فشار اضافی ناشی از افزایش حجم سیال، بیشتر در سنگ‌هایی با تراوایی کم رخ می‌دهد چرا که افزایش حجم سیال منفذی، تخلخل را افزایش نمی‌دهد ولی باعث کاهش فشار موثر می‌شود. در واقع نرخ تغییر حجم سیال منفذی، یک عامل کنترل کننده در میزان ایجاد فشار بالا است.

۱-۴-۲ افزایش دما:

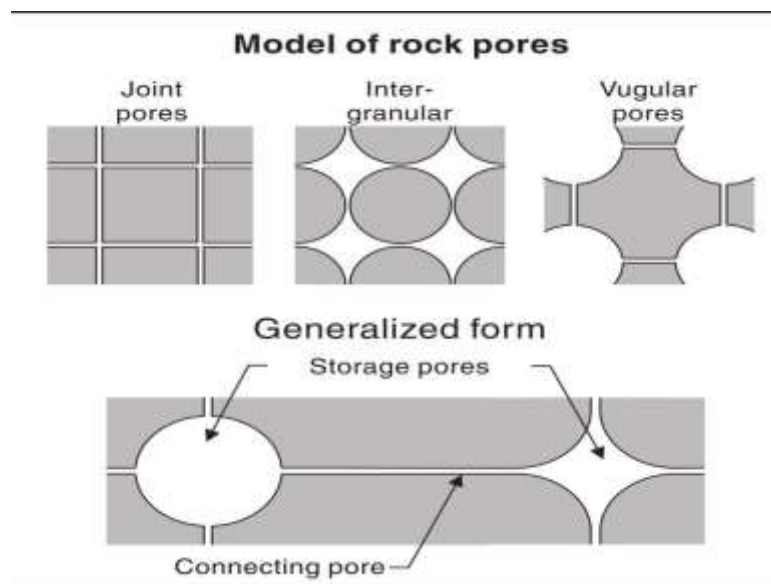
افزایش دما باعث انبساط سیال می‌شود که ناشی از انبساط گرمایی است، مانند انبساط آب زمانی که گرمتر از ۴ درجه سانتیگراد می‌شود.

۱-۴-۳ تبدیل کانی‌ها:

برخی تبدیل‌های کانی شناسی باعث خروج آب در طول واکنش می‌شوند. واکنشهای رایج شامل آبگیری اسمکتایت و تبدیل آن به ایلایت است.

به منظور تشخیص مکانیسم ایجاد فشار بالا از نمودارهای چاه پیمایی در ارتباط با تخلخل شامل لاگ‌های سونیک، مقاومت، نوترون و چگالی استفاده می‌شود. نمودارهای چگالی و نوترون بیانگر خواص توده‌های سنگ و نمودارهای سونیک و مقاومت بیانگر خواص تخلخل سنگ هستند. کتساب و همکارانش، ساختار تخلخل سنگ را ترکیبی از منافذ ارتباطی و منافذ ذخیره می‌دانند. میزان اثر بخشی خواص توده ای سنگ در پاسخ به نمودارهای چگالی و نوترون برای هر دو نوع تخلخل یکسان است.

اما میزان اثر بخشی خواص انتقالی در پاسخ به نمودارهای سونیک و مقاومت برای منافذ ارتباطی بیشتر است.



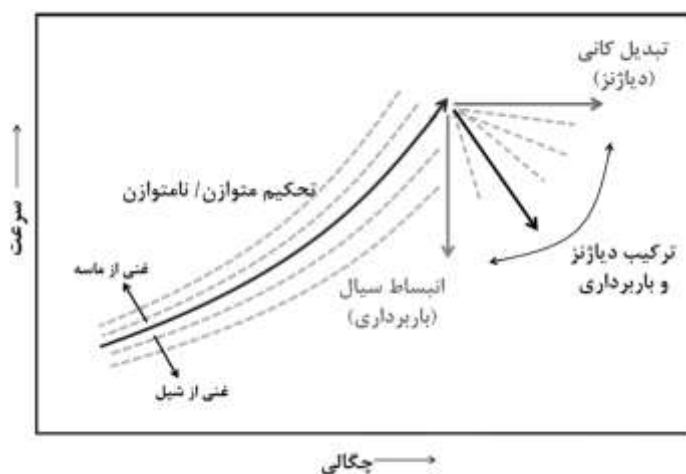
شکل ۱-۲ مدل سازی فشار منفذی درون سنگ

باورز و کتساب، از اختلاف بین خواص عبوری و خواص توده‌ای سنگ به منظور توصیف فشار بالا استفاده کردند. در سنگ‌های با تحکیم متوازن و فشار منفذی نرمال کاهش تخلخل بر حسب عمق در طول خط روند تراکم پذیری نرمال رخ می‌دهد اما زمانی که فشار بالا در اثر تحکیم نامتوازن ایجاد شده باشد، باعث کاهش یا توقف روند تراکم پذیری می‌شود ولی تنش مؤثر (نیروی وارده به ماتریکس سنگ) کاهش نمی‌یابد. تحکیم نامتوازن اثر یکسانی بر روی هر دو نوع تخلخل سنگ (تخلخل اولیه و تخلخل ثانویه) و در نتیجه هر دو نوع خاصیت توده‌ای و عبوری سنگ می‌گذارد. از این رو نمودار چگالی و سونیک یا مقاومت روند مشابهی خواهند داشت.

در جایی که تحکیم نامتوازن تنها عامل ایجاد فشار بالا باشد، رسوبات در بیشترین تنش مؤثر هستند و جایی که انبساط سیال عامل ایجاد فشار بالا باشد، رسوبات بالاتر دارای تنش مؤثر بیشتری هستند. بر

اساس مطالعات باورز و کتساب، منافذ ارتباطی سنگ دارای خاصیت ارتجاعی بیشتری هستند. بنابراین زمانی که تنش مؤثر در اثر تغییر حجم ناشی از انبساط سیال رو به کاهش می‌رود، منافذ ارتباطی با توجه به خاصیت انعطاف پذیری خود، عریض‌تر شده ولی منافذ ذخیره ثابت باقی می‌مانند. از این رو خواص عبوری سنگ (سونیک و مقاومت) نسبت به این عریض‌شدگی پاسخ داده ولی خواص توده‌ای سنگ (چگالی و نوترون) بدون تغییر باقی می‌ماند. از این رو، می‌توان از عدم تطابق بین روند نمودار سونیک و چگالی به عنوان نشانگر مکانیسم انبساط سیال استفاده کرد. برخی تبدیل‌های کانی‌شناسی باعث خروج آب در طول واکنش می‌شوند. واکنشهای رایج شامل آبگیری اسمکتایت و تبدیل آن به ایلایت است.

آبگیری کانی‌ها باعث برهم خوردن تعادل بین تخلخل و تنش مؤثر شده که مستلزم خروج آب اضافی جهت رسیدن به تعادل است. زمانی که آب اضافی نتواند به طور کامل خارج شود، باعث ایجاد فشار اضافی شده که شبیه مکانیسم انبساط سیال است اما آبدهی سنگ، مقداری افزایش چگالی را نیز به همراه دارد که آن را از مکانیسم انبساط سیال متمایز می‌کند. شکل ۱-۳ مکانیسم‌های مختلف ایجاد فشار بالا را برای نمودار سرعت در مقابل چگالی نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳ مکانیسم‌های مختلف ایجاد فشار بالا

روش‌های زیادی در زمینه پیش‌بینی فشار منفذی ارائه شده است. در هر یک از این روش‌ها، مکانیسم خاصی به عنوان عامل اصلی ایجاد فشار بالا در نظر گرفته شده است. ایتون در روش خود تحکیم نامتوازن را به عنوان عامل اصلی ایجاد فشار بالا در نظر گرفت. از دیگر روش‌های تخمین فشار منفذی می‌توان به روش باورز اشاره کرد.

روش باورز بر پایه تنش مؤثر می‌باشد که با اندازه‌گیری فشار مؤثر و فشار ناشی از طبقات بالایی می‌توان مقدار فشار منفذی را تعیین کرد. در این روش دو مکانیسم باربرداری و فرآیند عدم تحکیم لحاظ شده است. روش باورز از سرعت موج سونیک و پارامترهای تجربی تعیین شده برای تعیین تنش مؤثر عمودی استفاده می‌کند که با کسر آن از تنش روباره، فشار منفذی را می‌دهد.

۱-۵ اهداف و ضرورت انجام تحقیق

در این تحقیق سعی می‌شود با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی مربوط به چندین چاه در یکی از مناطق جنوب غربی ایران و تحلیل و مدل‌سازی این داده‌ها در نرم افزار Petrel نسبت به تخمین فشار منفذی سازند مخزنی به روش‌های مختلف در میدان مورد مطالعه و طراحی مکعب فشار سازند اقدام گردد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی فشار منفذی به کمک لاگ چاه موجود انجام گرفته و در این زمینه، مشابه با کار تانکو و همکاران (۲۰۱۹)، می‌توان یک مدل مناسب برای تخمین فشار منفذی در میدان یا مخزن مورد مطالعه بدست آورد یا حتی توسعه داد، مخصوصاً این که عمده میدان‌ها و مخازن هیدروکربونی ایران از نوع کربناته بوده و تخمین فشار منفذی در مخازن کربناته با استفاده از روش‌های موجود و معادلات مرتبط معمولاً نتایج رضایت بخشی بدنبال ندارد و باید سعی در بهبود نتایج در این مخازن با توسعه یک مدل مناسب برای تخمین فشار منفذی با استفاده از داده‌های مربوط به چاه‌های مورد مطالعه نمود.

همچنین انجام مدل‌سازی‌های پیش‌بینی^۱ فشار منفذی برای رسیدن به پاسخ صحیح و دقیق فشار منفذی ضروری است. لازم به ذکر است که برای تخمین فشار منفذی مبتنی بر نگارهای پتروفیزیکی درون چاهی، از نگارهای مقاومت ویژه، صوتی، چگالی، تخلخل و سایر نگارهای پتروفیزیکی قابل استفاده (در صورت موجود) استفاده می‌شود.

¹ Predictive modeling

فصل دوم

مروری بر مفهوم فشار منفذی و روش‌های محاسبه

۲-۱ مقدمه

اکثر مطالعات نشان داده که روش‌های پتروفیزیکی در پیش‌بینی فشار منفذی کار آمد هستند. یکی از اولین مطالعات در سال ۱۹۶۸ توسط پنه باکر انجام شد. در ادامه انجمن ژئوفیزیک‌دانان اکتشافی در سال ۱۹۸۷ مقاله‌ای تحت عنوان فشار غیر عادی که در آن به بررسی روش‌های ژئوفیزیکی تخمین فشار بالا پرداخته شده بود، منتشر کرد. علاوه بر این، ایتون (۱۹۷۲) یکی از رایج‌ترین روش‌ها در تعیین فشار منفذی را ارائه داد. در یکی از روش‌های تخمین فشار منفذی، ابتدا پارامترهای مختلف پتروفیزیکی وابسته به تخلخل مانند زمان گذر صوت درشیل یا لایه‌های شیلی بررسی شده و سپس روند طبیعی بر اساس این لایه‌ها تعیین می‌شود. ژانگ (۲۰۱۱) نشان داد که معادلات تجربی استفاده شده در داده‌های چاه پیمایی به منظور انجام محاسبات، در بیشتر موارد دقیق نبوده و باعث افزایش عدم قطعیت در مدل نهایی خواهند شد. به همین دلیل معادله ایتون و تعدادی دیگر از معادلات تعیین فشار از روی داده‌های چاه پیمایی را بهبود بخشید و نشان داد که با در نظر گرفتن شرایط حوزه و اعمال ضرایب لازم، از معادلات بهبود یافته می‌توان در انواع حوزه‌ها برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده کرد. آزادپور و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه‌هایی را برای تعیین فشار منفذی با استفاده از داده‌های نگار چاه در یکی از میداین‌گازی ایران انجام دادند. برای این منظور آنها از سه روش مختلف ایتون، باورز و روش تراکم‌پذیری بهره بردند. نتایج این مطالعه نشان که همبستگی خوبی بین داده‌های فشار منفذی اندازه‌گیری شده و ایتون اصلاح شده وجود دارد. از این رو برای تولید مدل فشار منفذی سه بعدی، فشار منفذی تخمینی از نگار چاه با رابطه ایتون درشت مقیاس و سپس در سرتاسر ساختار سه بعدی با روش‌های زمین آمار توزیع شد. مدل سه بعدی فشار منفذی مطابقت خوبی با فشار منفذی تخمینی براساس نگار چاه و همچنین اندازه‌گیری شده با آزمایشگر مدول دینامیکی سازند نشان داد. احمد و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه‌ای را به منظور پیش‌بینی فشار منفذی براساس دو دسته داده، پارامترهای حفاری و نگارهای پتروفیزیکی، شامل وزن روی مته،

سرعت دوران، نرخ حفاری، وزن گل، چگالی سنگ، تخلخل و زمان سیر موج فشاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب اطلاعات حفاری و نگاره‌های پتروفیزیکی برای پیش‌بینی فشار منفذی با دقت بالا بسیار مهم است. به کارگیری مدل تجربی حاصل از شبکه عصبی بهینه‌سازی شده نشان داد که می‌توان فشار منفذی را با دقت بالایی تخمین زد. این در حالی است که این روش برخلاف سایر مدل‌های تجربی منتشر شده قبلی، نیازمند داشتن روند فشار منفذی قبلی (مانند فشارهای نرمال و غیرنرمال) برای انجام پیش‌بینی نیست. تانکو و همکاران (۲۰۱۹) به توسعه یک مدل مناسب برای تخمین فشار منفذی با استفاده از داده‌ها و نگاره‌های چاه در یکی از میداین هیدروکربنی واقع در دلتای نیجر پرداختند. آن‌ها به جای استفاده از مدل‌های موجود برای تخمین فشار منفذی که با استفاده از داده‌های میدان‌هایی خارج از دلتای نیجر بدست آمده‌اند و در نتیجه، استفاده از این مدل‌ها، پاسخ نادرستی از فشار منفذی در میدان مورد مطالعه در دلتای نیجر ارائه می‌دادند، روش یا مدل مناسبی برای تخمین فشار منفذی با استفاده از داده‌ها و نگاره‌های چاه بدست آمده از چاه‌های حفر شده در دلتای نیجر ارائه دادند.

روش‌های تخمین فشار منفذی هر یک به نحوی دارای مزایا و معایبی هستند. در روش‌های اندازه‌گیری مستقیم فشار منفذی استفاده از نگاره‌های چاه مستلزم حفر چاه بوده و فقط در ناحیه‌ی اطراف چاه دقت بالایی دارند. استفاده از داده‌های لرزه‌ای که عموماً دارای وضوح پایین‌تری نسبت به نگاره‌های درون چاهی می‌باشند روش دیگری در بدست آوردن فشار منفذی است و با توجه به دقت لازم در تعیین محل حضور فشار غیر نرمال، استفاده از داده‌های لرزه‌ای جهت محاسبه فشار غیر نرمال دقت خوبی ندارد.

۲-۲ پارامترهای حفاری

داده‌های حفاری از سه منبع نمودارگیری گل، داده‌های حین حفاری^۱ و حفار به دست می‌آید. داده‌های حاصل از نمودارگیری گل به دو دسته‌ی داده‌های واقعی با زمان و داده‌های با تاخیر تقسیم‌بندی می‌گردد. داده‌های به دست آمده از داده‌های حین حفاری^۱ با استفاده از سنسورهایی که نزدیک مته بسته می‌شوند به دست می‌آید. این داده‌ها با استفاده از پالس‌های سیگنالی توسط گل به سطح انتقال می‌یابد. داده‌های به دست آمده توسط حفار نیز جز داده‌های واقعی با زمان می‌باشد.

پارامترهای که در محاسبه‌ی فشار منفذی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱- داده‌های واقعی با زمان

۲- گشتاور

۳- انواع مته

۴- داده‌های با تاخیر

۲-۳ مقایسه‌ی انواع روش‌های محاسبه‌ی فشار منفذی

معادلات و روش‌های مختلف که برای محاسبه‌ی فشار منفذی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در شرایط دمایی و فشاری مختلف مورد آزمون قرار گرفته است. در این بخش روش‌های مختلف محاسبه‌ی فشار منفذی که شامل موارد محاسبه‌ی فشار منفذی در هنگام حفاری، آنالیزهای بعد از حفاری چاه، روش ترشیاری، روش

¹ Measurement While Drilling(MWD)

چالک، روش جوراسیک، روش بر مبنای نمودارهای درون چاهی می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲-۳-۱ محاسبه‌ی فشار منفذی در هنگام حفاری

نشانه‌های اولیه در فشار منفذی در هنگام حفاری پارامترهای اکسپوننت دی، گاز گل و میزان حفره می‌باشد. در این حالت در نظر گرفته می‌شود که حفره‌ی بالایی فشار منفذی هیدرواستاتیک دارد. همچنین با رسم دی اکسپوننت در مقابل عمق چاه می‌توان به ترند نرمالی دست یافت.

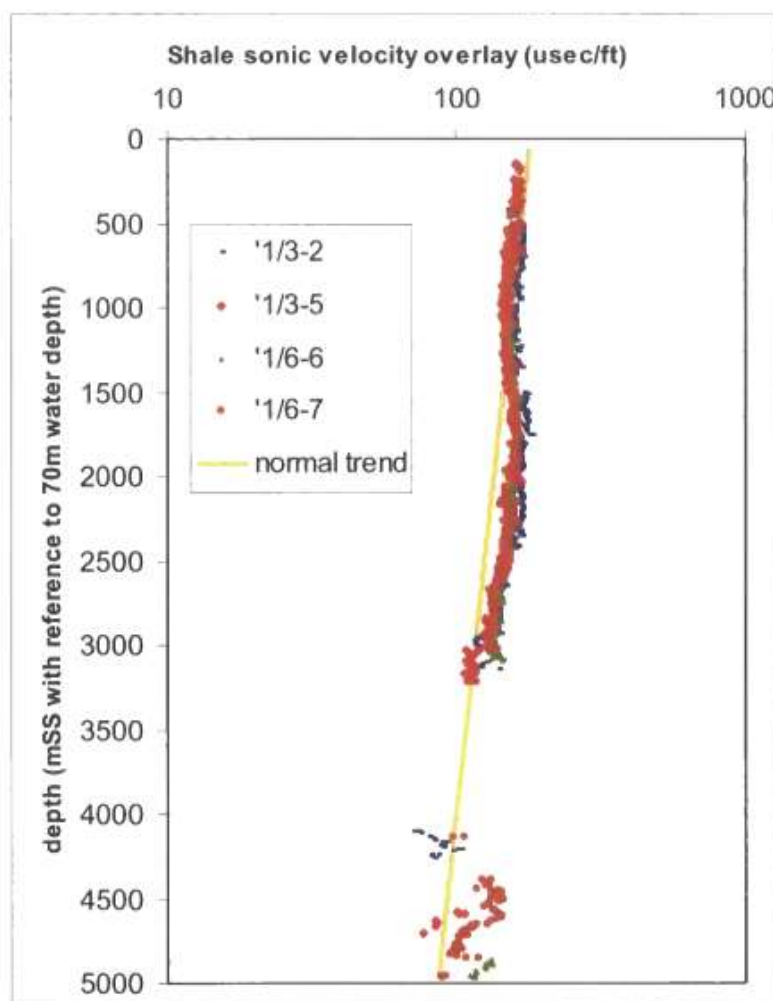
۲-۳-۲ آنالیزهای بعد از حفاری چاه

برای محاسبه به روش آنالیزهای بعد از حفاری چاه، داده‌های وایرلاین بیشترین رزولوشن را ارائه می‌دهند. این داده‌ها دقیقاً نشان می‌دهند که تغییر فشار در چه نقاطی اتفاق می‌افتد. در این روش محاسبات بر مبنای عمق معادل انجام می‌گیرد. داده‌های ورودی نمودارهای سونیک و دانسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات استفاده شده به شرح زیر می‌باشد:

$$t = t_0 e^{(-c \times z)} \quad (1-2)$$

$$Z_e = \frac{\left[\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \right]}{c} \quad (2-2)$$

همچنین در این روش از نمودار زیر که رسم داده‌های سونیک بر اساس عمق چاه می‌باشد استفاده می‌گردد.



شکل ۱-۲ نمونه‌ای از داده‌های سونیک بر مبنای عمق چاه

۳-۳-۲ روش ترشیاری

بررسی‌های پارامترهای حفاری نشان می‌دهد که فشار منفذی در حدود ۱۰۰۰ متری شروع می‌شود. داده‌های سونیک پیشنهاد می‌دهد که این عمق می‌تواند ۱۳۰۰ متری باشد. مشخص کردن این عمق بدون استفاده از داده‌ها وایرلاین بسیار مشکل است. فشار منفذی احتمالاً در عمق بالاتر از ۱۸۰۰ متری از فشار گل بالاتر خواهد رفت. بعد از ۲۵۰۰ متری و به سمت عمق‌های بیشتر هیچ تغییری در گرادیان فشار منفذی

مشاهده نشده و این مشاهده بر مبنای پارامترهای حفاری می‌باشد. به صورت کلی این نوع محاسبه بر مبنای داده‌های سونیک می‌باشد.

۲-۳-۴ روش چالک

داده‌های مورد استفاده در این روش از روش‌های اندازه‌گیری RFT و DST به دست می‌آیند. برای مثال در عمق ۳۵۳۴ متری، ۴ بشکه هرزروی داشته و وزن گل از ۱۳/۵ به ۱۲/۵ پوند در گالن کاهش یافت. و این فرایند سبب افزایش گاز درون گل نشد. این پدیده نشانگر پایین بودن فشار منفذی نسبت به فشار گل می‌باشد.

۲-۳-۵ روش تنش موثر

پیش فرض اصلی این نوع مطالعات اصول تنش موثر می‌باشد که برای اولین بار توسط ترزاقی (1943 Terzaghi) فرمول بندی شده است. ترزاقی آزمایشی را برای توصیف تراکم سنگ نسبت به فشار روباره طراحی کرد و نشان داد که فشار روباره در لایه‌های زیرسطحی بوسیله فشار منفذی و تنش موثر قائم خنثی می‌شود.

رابطه زیر را بین فشار روباره، تنش موثر و فشار منفذی ارائه می‌کند:

$$p_p = \frac{(p_0 - \sigma_e)}{\sigma} \quad (2-3)$$

α تنش موثر و σ_e ، فشار روباره P_0 ، فشار منفذی P_p

۲-۳-۶ روش باورز

باورز در سال ۱۹۹۵ معادله ترزاقی را برای پیش بینی فشار منفذی بکار گرفت. روش او نیز مبتنی بر تنش موثر بوده و مکانیزم‌های اصلی ایجاد فشارهای غیرعادی را دو عامل تراکم نامتوازن و مکانیزم باربرداری حاصل از انبساط سیال در نظر می‌گیرد. باورز برای رسوباتی که شرایط تراکم نامتوازن را تجربه کردند رابطه را بین تنش موثر و سرعت صوت ارائه نمودند:

$$V = V_0 + A(\sigma_e)^B \quad (۴-۲)$$

V که در آن سرعت موج تراکمی در عمق داده شده V_0 سرعت صوت در سطح زمین که معمولا ۱۵۰ در نظر گرفته می‌شود.

σ_e تنش موثر قائم

A , B پارامترهای موثر حاصل از کالیبراسیون

$$P_p = P_0 - \left[\frac{V_p - V_0}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (۵-۲)$$

در رابطه فوق P_p فشار منفذی در حالت بارگذاری ، P_0 تنش روباره ، V_0 , V_p به ترتیب سرعت صوت در سطح و عمق زمین، A و B پارامترهای مربوط به کالیبراسیون می‌باشند.

باورز از نمودار سرعت در مقابل چگالی به منظور تشخیص فشار بالا ناشی از تحکیم نامتوازن و مکانیسم باربرداری استفاده کرد. در شرایط تحکیم نامتوازن، روند افزایش نمودار سرعت در مقابل چگالی بر روی روند تحکیم نرمال متوقف شده ولی در شرایط باربرداری یک روند برگشتی در زیر نمودار ایجاد می‌شود.

۷-۳-۲ تخمین فشار منفذی به روش ایتون در محل چاه ها

محاسبه مقدار کمی فشار منفذی به روش ایتون پرکاربردترین رابطه در طبیعی، Δt_n نمودار صوتی محاسبه فشار منفذی است.

$$P_p = OB - (OB - P_n) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^x \quad (۶-۲)$$

که در این رابطه OB فشار روباره، P فشار منفذی بر روی خط روند بر روی خط روند طبیعی، Δt نگار صوتی و X ضریب نمایی رابطه ایتون است. برای تعیین مقدار فشار منفذی به فشار روباره، فشار هیدرواستاتیک و سرعت به دست آمده از نگار چاه و سرعت بر خط روند طبیعی نمودار نیاز است. فشار روباره در محل چاهها با توجه به نگار چگالی به دست می‌آید. آنگاه برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک از گرادیان فشار هیدرو استاتیک معرفی شده برای منطقه خاورمیانه و خصوصاً ایران استفاده شد (آزادپور و همکاران ۲۰۱۵) بر این اساس گرادیان فشار هیدرواستاتیک برابر 0.464 psi/ft فرض می شود. مقدار Δt را می توان از نگار صوتی موجود در چاهها به دست آورد. برای به دست آوردن Δt_n که نمودار صوتی بر روی خط روند طبیعی است؛ از رابطه ژانگ استفاده می شود.

$$\Delta t_n = \Delta t_m + (\Delta t_{ml} - \Delta t_m) e^{-ez} \quad (۷-۲)$$

که در این رابطه Δt_m کندی در سازند، Δt_{ml} کندی در خط گلی، C ضریب نمایی رابطه ژانگ و Z عمق است. مقدار Δt_{ml} با توجه به لیتولوژی ناحیه و روابط تجربی موجود به طور میانگین برابر $56 \mu\text{s/ft}$ فرض می شود. سپس مقدار Δt_{ml} با توجه به داده های سرعت برانبارش و لیتولوژی منطقه معادل $169,38$ در نظر گرفته می شود. برای محاسبه مقدار C، مقدار Δt_n را در عمقی که فشار نرمال باشد

(در عمقی که نگار CGR کمتر از ۲۰ و عدم افزایش در نگار صوتی باشد؛ در غیر اینصورت نشانگر مناطق آلوده شیلی و فشار بالا است)، از روی نگار صوتی چاه (Δt) قرائت می‌شود.

آنگاه با استفاده از رابطه (۶-۲) در عمق مورد نظر مقدار پارامتر C به دست می‌آید. جدول مقدار پارامتر C را در چاه‌های مختلف نمایش داده می‌شود. در نتیجه روند طبیعی مقدار نگار صوتی در اعماق مختلف چاه‌ها به دست می‌آید.

برای مدلسازی سرعت صوتی و چگالی در مخزن به کمک روش کوکریجینگ، باید پارامتر دیگری علاوه بر مقدار سرعت صوتی و چگالی انتخاب شده و در محاسبات وارد شود. این پارامتر باید به صورت جانبی پیوستگی خوبی داشته باشد. پارامتر ثانویه استفاده شده در این روش، امپدانس صوتی حاصل از وارون سازی لرزه‌ای است. نحوه انتخاب پارامتر ثانویه بدین صورت است که میزان همبستگی بین نگار صوتی و امپدانس صوتی حاصل از وارون سازی و همچنین بین نگار چگالی و امپدانس صوتی محاسبه شود. هر چه میزان همبستگی بین دو متغیر بیشتر باشد، تأثیر پارامتر ثانویه (امپدانس صوتی حاصل از وارون سازی لرزه‌ای) در مدل سازی بیشتر می‌شود و مدل حاصل از کوکریجینگ صحیح تر و خطای تخمین کمتر خواهد بود.

پس از حصول اطمینان از صحت مدل ساخته شده برای سرعت و چگالی، با توجه به روابط موجود باید اقدام به ایجاد مکعب فشار روباره و تنش مؤثر در محدوده مخزنی نمود. لذا از مکعب چگالی جهت ایجاد مکعب فشار روباره استفاده می‌شود. مکعب فشار روباره با توجه به مکعب چگالی و ارتفاع سلول‌ها به دست می‌آید. در این بخش به منظور محاسبه فشار مؤثر در محدوده مخزن با استفاده از رابطه باورز، ابتدا باید ضرایب رابطه را به دست آورد. بدین ترتیب با توجه به اطلاعات فشار منفذی نقاطی از تعداد محدودی چاه‌ها همچنین مکعب فشار روباره ایجاد شده در بخش قبل می‌توان تنش مؤثر را در نقاطی از این چاه‌ها

محاسبه نمود. همچنین مقادیر سرعت صوتی در محل چاه‌ها را با استفاده از نگار صوتی موجود به دست آورد.

پس از تولید مکعب فشار روباره و تنش مؤثر مخزن، در تمام نقاط مخزن می‌توان با استفاده از رابطه ترازقی (تفاضل فشار روباره و تنش مؤثر) مقدار فشار منفذی را تخمین زد.

فصل سوم

تجزیه و تحلیل

۳-۱ واریون سازی لرزه‌ای

واریون سازی لرزه‌ای مدت‌ها است در صنعت نفت برای مقاصد اکتشافی و تولیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طول این مدت، روش‌های واریون سازی از حالت‌های ابتدایی، مثل روش‌های واریون سازی بازگشتی، به روش‌های متعدد و پیشرفته امروزی متحول شده است و نرم‌افزارهای مختلفی برای انجام این کار در اختیار است. در واریون سازی، یک ردلرزه با باند محدود به یک شبه ردلرزه (شبه نگار) مقاومت صوتی تبدیل می‌شود. کاربرد داده‌های مقاومت صوتی نیز از ارزیابی کیفی اهداف، به توصیف کمی خصوصیات مخزنی، که برای مدل سازی مخزن ضروری هستند، ارتقا یافته است.

۳-۱-۱ مبانی واریون سازی لرزه‌ای

هدف از واریون سازی لرزه‌ای، تبدیل داده‌های لرزه‌ای باند محدود به شبه نگارهای مقاومت صوتی باند پهن در هر برداشت نقطه عمقی مشترک^۱ یا نقطه میانی مشترک^۲ می‌باشد. (همسون و راسل، ۱۹۹۹)

این فرآیند شامل حذف تاثیر فیلتر میان‌گذری است که در هنگام عملیات و پردازش بر روی داده‌ها اعمال شده است. چاه‌ها به عنوان داده‌های کنترلی برای کالیبره کردن و تصحیح موجک بین مقطع لرزه‌ای و نگارهای چاهی به کار برده می‌شوند. بنابراین واریون سازی لرزه‌ای مرحله‌ای است که در آن کوشش می‌شود تا براساس مدل‌های لرزه‌ای اولیه و موجک‌های تخمین زده شده مدل مقاومت صوتی نزدیک به مدل واقعی زمین را تخمین زده شود.

^۱ Common depth point

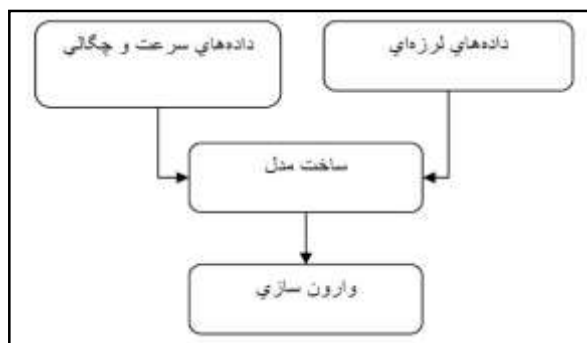
^۲ Common midpoint

در وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای سعی می‌شود، با ترکیب داده‌های لرزه‌ای با سایر داده‌های موجود (مانند داده‌های زمین‌شناسی بزرگ مقیاس و داده‌های حاصل از نگارهای چاه)، اطلاعاتی به دست آید که بتوان با اطمینان آنها را به خصوصیات نظیر نوع سنگ، میزان تخلخل، میزان هیدروکربن و موارد نظیر آن مرتبط ساخت. مقاومت صوتی یکی از این اطلاعات است، یعنی با مشاهده تغییرات مقاومت صوتی در داخل یک لایه با ویژگی سنگ شناسی مشخص (مثلاً ماسه سنگ) می‌توان به تغییرات رخساره سنگی در داخل لایه پی‌برد. برخی از مزایای برگردان لرزه‌ای به طور مختصر بیان می‌شود:

- (۱) تصحیح و کاهش اثرات هم کوکی موجک^۱
- (۲) تبدیل مقاطع لرزه‌ای از افق‌های بازتابی به لایه‌هایی که به زمین‌شناسی نزدیکتر باشند.
- (۳) مکان ترکیب اطلاعات معلوم فرکانس پایین ژئوفیزیکی و اطلاعات زمین‌شناسی بزرگ مقیاس، با داده‌های لرزه‌ای.
- (۴) مدل‌سازی و استفاده از اطلاعات چینه‌شناسی لایه‌ها.
- (۵) افزایش قابلیت تفسیر افق‌های لرزه‌ای.
- (۶) نتایج حاصل از برگردان (در صورت استفاده از روش تلفیق)، پهنای باند بیشتری نسبت به داده‌های لرزه‌ای خواهند داشت.
- (۷) تضعیف نوفه‌های تصادفی.
- (۸) تخمین تخلخل و محاسبه میزان ذخیره.
- (۹) کالیبره شدن داده‌ها با داده‌های نگار چاه‌ها.

برای انجام وارون‌سازی لازم است از نرم‌افزارهای مربوط به این کار استفاده شود. مرحله‌ای که در نرم‌افزار انجام می‌شود در شکل دیده می‌شود.

¹ Wavelet tuning



شکل (۳-۱) نمای کلی مراحل که در نرم افزار برای وارون سازی انجام می شود (همسون و راسل، ۱۹۹۹)

داده‌هایی از دو مجرا، یکی داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده و دیگری داده‌های سرعت و چگالی (به شکل نگاره ای چاه یا سرعت rms) برای تهیه یک مدل اولیه سرعت لایه‌های زیرزمین، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس این مدل در وارون‌سازی کامل داده‌های لرزه‌ای به کار می‌رود. علیرغم سادگی این هدف، پیچیدگی‌های بسیاری در رسیدن به آن وجود دارد. بنابراین الگوریتم‌های مختلفی برای انجام موارد زیر در نظر گرفته شده است:

(۱) تولید و تهیه ردلرزه مصنوعی

(۲) کشیدن و فشردن نگارها با توجه به داده‌های لرزه‌ای

(۳) به دست آوردن موجک

(۴) پردازش داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده

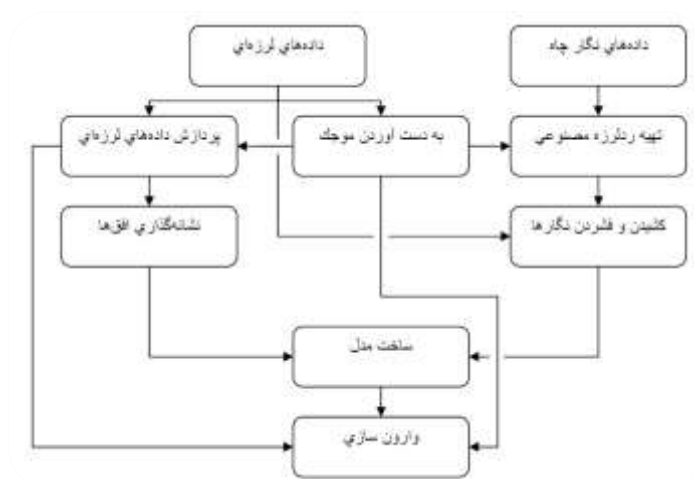
(۵) انتخاب و نشانه گذاری افق‌ها

(۶) ساخت مدل با در نظر داشتن تداوم جانبی و عمودی

(۷) وارون‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های مختلف

¹ Root mean square

روابط بین قسمت‌های مختلف نرم‌افزار و نمودار کلی الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای در شکل (۲-۳) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۳) نمودار کلی الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای (همسون و راسل، ۱۹۹۹)

۳-۱-۲ اطلاعات ورودی

اطلاعات اساسی ورودی به مرحله وارون‌سازی لرزه‌ای شامل سه بخش می‌باشند:

(۱) اطلاعات لرزه‌ای:

اطلاعات لرزه‌ای ممکن است به صورت دوبعدی یعنی یک خط لرزه‌ای و یا به صورت سه بعدی یعنی حجمی از اطلاعات لرزه‌ای و یا مجموع‌های از چند خط لرزه‌نگاری باشد.

(۲) اطلاعات نگارهای چاه:

اطلاعات نگارهای چاه برای صحت وارون‌سازی مورد نیاز می‌باشند. مهمترین نگارهایی که برای مرحله وارون‌سازی استفاده می‌شوند، نگارهای صوتی و چگالی هستند.

۳) قیدها:

قیدها کلیه اطلاعات غیر لرزه‌ای هستند که علاوه بر چاه‌ها وارد مرحله وارون‌سازی شده و با محدود کردن عملکرد آن، در به دست آوردن نتایج دقیق‌تر کمک می‌کند. مهم‌ترین قیدها نتایج حاصل از تفسیر لرزه‌ای (افق نشانه گذاری شده) است. همچنین نتایج به دست آمده از مغزه، آزمایشات تولید چاه‌ها و فشار مخزن و بسیاری موارد دیگر نیز، در صورت وجود، می‌توانند به عنوان قید مورد استفاده قرار گیرند و عملیات وارون‌سازی را کنترل و محدود نمایند.

۳-۱-۳ روش‌های وارون‌سازی

وارون‌سازی داده‌ها روی دو نوع داده می‌تواند انجام شود که شامل دو دسته زیر است (همسون و راسل، ۲۰۰۶):

(۱) پس از برانبارش^۲

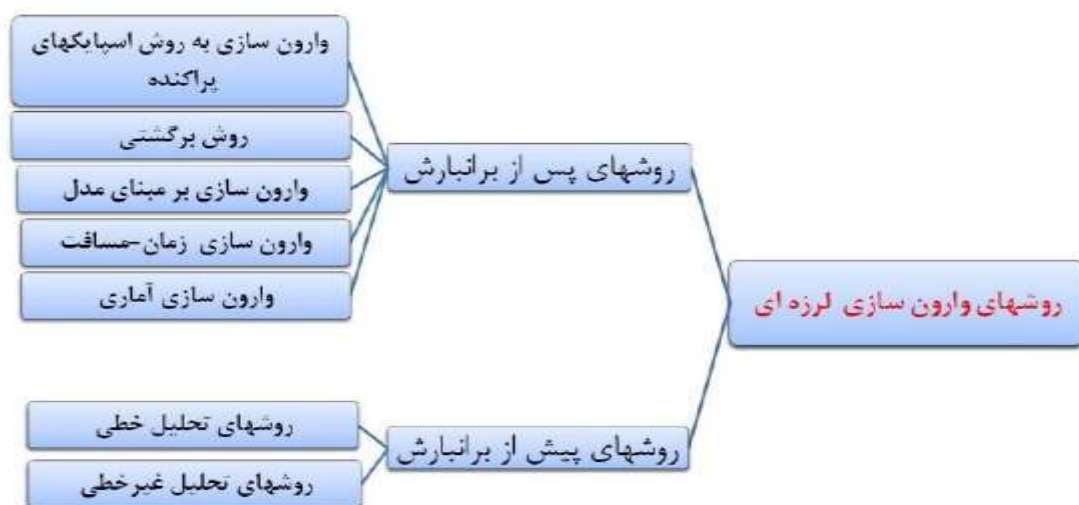
(۲) قبل از برانبارش^۳

تغییرات در مقاومت صوتی می‌تواند در اثر عوامل مختلفی باشد مانند تغییرات لیتولوژی در سیال، درجه شوری سیال، تخلخل و... .

¹ Constraint

² Post stack

³ Pre stack



شکل (۳-۳) روش‌های مختلف وارون‌سازی (همسون و راسل، ۱۹۸۵).

وارون‌سازی داده‌ها قبل از برانبارش داده‌های لرزه‌ای کمک زیادی در رفع این ابهام می‌کند. این روش نه تنها اطلاعات فشاری سنگ بلکه اطلاعات برشی سنگ را نیز در اختیار قرار می‌دهد.

استفاده عمده از وارون‌سازی لرزه‌ای داده‌های قبل از برانبارش، در تشخیص لیتولوژی، سیال درون خلل و فرج، خصوصیات پواسن، پارامترهای سرعت امواج بازتابی (تراکمی و برشی)، امواج بازتابی و... است.

روش‌های قبل از برانبارش شامل آنالیزهای خطی و غیرخطی دامنه موج (AVO) می‌باشد. اما روش‌های معمول بعد از برانبارش شامل روش‌های زیر است (همسون و راسل، ۱۹۸۵).

¹ Compressional

² Shear

(۱) روش بازگشتی

(۲) روش وارون سازی بر مبنای مدل

(۳) وارون سازی به روش اسپایک های پراکنده

(۴) روش آماری

(۵) زمان-مسافت

در توموگرافی بازسازی مسیر موج و زمان رسید موج جهت بررسی مدل زمین استفاده می گردد به همین دلیل به آن وارون سازی زمان-سیر^۱ گفته می شود. در روش های آماری نیز اطلاعات چاه و زمین شناسی، مبنا و اساس مدل سازی می باشد.

در این فصل با توجه به کاربرد، سه روش از روش های وارون سازی بعد از برانبارش توضیح داده می شود.

۳-۱-۴ وارون سازی به روش بازگشتی

روش برگشتی اولین روش از سه روش موجود برای تبدیل یک ردلرزه پس از برانبارش به مقاومت صوتی می باشد. اکثرا این روش را مجموع متحرک^۲ می نامند زیرا این روش، یک روش جمع بندی در حال حرکت است. (استفان هیل، ۲۰۰۹)

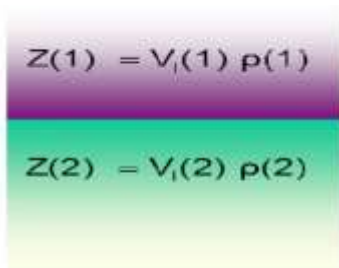
^۱ Run-sum

^۲ Travel Time Inversion

مقاومت صوتی Z_i ، حاصل ضرب سرعت V_i و چگالی ρ_i در لایه i ام می باشد (معادله ۳-۱). با توجه به شکل (۳-۴)، معادله ۲-۴ میزان ضریب بازتاب را در سطح جدایی محیط ۱ از ۲ نشان می دهد:

$$Z_{(i)} = V_i(i) \rho_{(i)} \quad (3-1)$$

$$R_{(1,2)} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3-2)$$



شکل (۳-۴) سطح مشترک صوتی برای مدل دولایه

برای بدست آوردن مقاومت از ردلرزه، ابتدا فرض می شود که سری ضرایب بازتابی معلوم است. در واقع تمام اطلاعات در دست، ردلرزه ای است. در این بخش، هدف بدست آوردن مقادیر مقاومت از معادله ۲-۳ است.

ریاضیات زیر استنتاج می کند که مقادیر مقاومت جمع ضرایب بازتاب است. این منطقی است زیرا ضرایب بازتاب، در واقع اختلاف در مقاومت ها هستند در نتیجه جمع آنها با مقاومت ها برابر خواهد شد.

معادله زیر یک نوآرایی از معادله ضریب بازتاب فوق می باشد:

$$R_{(1,2)}(Z_2 + Z_1) = Z_2 - Z_1 \quad (3-3)$$

با حل معادله برای مقاومت در لایه پایین تر داریم:

$$Z_2 = R_{(1,2)}(Z_2 + Z_1) + Z_1 \quad (4-3)$$

با یک ساده‌سازی، فرض می‌کنیم که مقدار میانگین مقاومت ثابت است:

$$C \equiv (Z_2 + Z_1) \approx \text{const} \quad (5-3)$$

با این فرض، می‌بینیم که تعداد مقاومت در لایه دوم یک جمع‌بندی وزنی از مقدار مقاومت در لایه اول و مقدار ضریب بازتاب در سطح جدایی دو محیط می‌باشد.

$$Z_2 = C.R_{(1,2)} + Z_1 \quad (6-3)$$

با تعمیم این نتیجه به عنوان یک رابطه بازگشتی مقدار مقاومت هر لایه برحسب یک جمع‌بندی وزنی از مقاومت و ضریب بازتاب لایه کم عمق‌تر بدست می‌آید.

$$Z_{(i+1)} \approx C.R_{(i,i+1)} + Z_{(i)} \quad (7-3)$$

ما می‌توانیم با در نظر گرفتن لایه اتمسفر به عنوان اولین لایه و در نظر گرفتن مقاومت صفر برای آن، حل بازگشتی را آغاز کنیم.

$$Z_{(0)} = 0 \quad (8-3)$$

در این صورت، اولین لایه زمین مقاومتی به صورت زیر خواهد داشت:

$$Z_{(1)} \approx C.R_{(0,1)} \quad (9-3)$$

برای لایه دوم زمین خواهیم داشت:

$$Z_{(2)} \approx C.R_{(1,2)} + Z_{(1)} = C.R_{(1,2)} + C.R_{(0,1)} = C.(R_{(1,2)} + R_{(0,1)}) \quad (10-3)$$

در حالت کلی، مقدار مقاومت لایه i ام یک جمع‌بندی وزنی از ضرایب بازتاب همه لایه‌های کم عمق‌تر از آن لایه است. که این، اساس روش مجموع متحرک است.

$$Z_{(i)} \approx C \sum_{j=0}^i R_j \quad (11-3)$$

متاسفانه، ما ضرایب بازتاب را نمی دانیم تا در معادله (۱۱-۴) از آنها استفاده کنیم. اطلاعات معلوم فقط ردلرزه‌ای است.

در حالت مطلوب که نویز وجود نداشته باشد می توان نوشت:

$$T = W * R \quad (12-3)$$

با هم‌میخت دو طرف معادله (۱۱-۳) با موجک W ، داریم:

$$Z_{Seismic} \equiv W * Z_{(i)} \approx C \sum_{j=0}^i W * R_{(j)} = C \sum_{j=0}^i T_{(j)} \quad (13-3)$$

این فرمول، مقاومت تغییر یافته به موجک ($Z_{Seismic}$) را از جمع‌بندی ردلرزه‌ها ایجاد می‌کند. (زیرنویس seismic، این مقاومت را از مقاومت واقعی زمین متمایز می‌کند) اگر موجک در داده اصلی، با فاز صفر باشد، در این صورت ($Z_{Seismic}$)، مقدار مقاومتی است که از نظر فرکانسی فیلتر شده است. این مقاومت به وسیله طیف دامنه موجک، فیلتر فرکانسی شده است. بنابراین، از آنجا که موجک‌هایی که داده لرزه‌ای را تشکیل می‌دهند در فرکانس‌های بالا و پایین ناقص هستند، در نتیجه مقدار ($Z_{Seismic}$)، به صورت فیلتر شده خواهد بود.

معادله ۳-۴ این فرض را بیان می‌کند که میانگین مقاومت‌ها یک مقدار ثابت است. همانطور که در بخش زیر نشان داده خواهد شد، باقی کار نیازی به این فرض ندارد.

مجدداً با شروع از ضرایب بازتاب می‌توان نوشت:

$$R_{(1,2)} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (14-3)$$

با اضافه و کسر کردن ضریب بازتاب از ۱، دو معادله زیر بدست می‌آیند:

$$1 + R_{(1,2)} = \frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 + Z_1} + \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (15-3)$$

$$1 - R_{(1,2)} = \frac{Z_2 + Z_1}{Z_2 + Z_1} - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

با تقسیم این دو معادله برهم داریم:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1 + R_{(1,2)}}{1 - R_{(1,2)}} \quad (16-3)$$

در حالت کلی، ما رابطه بازگشتی خواهیم داشت:

$$Z_{(i+1)} = Z_{(i)} \frac{1 + R_{(i,i+1)}}{1 - R_{(i,i+1)}} \quad (17-3)$$

این رابطه بازگشتی، دلالت بر این دارد که تعداد مقاومت برای هر لایه نتیجه ضرب نسبت ضرایب بازتاب در لایه‌های کم عمق‌تر است.

$$Z_{(n)} = Z_{(0)} \prod_{i=0}^n \frac{1 + R_{(i,i+1)}}{1 - R_{(i,i+1)}} \quad (18-3)$$

معادله (۱۸-۳) یک نسخه دقیق‌تر از معادله (۱۱-۳)، برای لایه‌ها با مقاومت جدا می‌باشد.

بقیه روش‌های وارون سازی انتگرال گیری، با در نظر گرفتن بازتاب $R(t)$ به صورت یک تابع پیوسته از زمان (یا عمق)، شروع می‌شوند.

معادله اصلی برای مقدار ضریب بازتاب به این صورت است:

$$R_{(1,2)} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (19-3)$$

که با تعریف بازتاب، $R(t)$ ، به عنوان یک نظیر پیوسته با ضریب بازتاب گسسته به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$R_{(t)} \partial t = \frac{1}{2} \frac{\partial Z_{(t)}}{Z} \quad (20-3)$$

در این تقریب، (∂t) نرخ نمونه برداری است. جواب معادله ۲۰-۵ به صورت زیر است:

$$Z_{(t)} = Z_{(0)} e^{2 \int_0^t R_{(t)} \partial t} \quad (21-3)$$

مجدداً می‌بینیم که مقدار مقاومت با جمع بندی (انتگرال گیری) مقادیر ضرایب بازتاب برای بازتابنده‌های کم عمق‌تر متناسب است.

مقادیر منفرد ضرایب بازتاب محدود به $[-1]$ و $[1]$ هستند و در این محدوده نوسان می‌کنند. بنابراین، انتگرال در توان کوچکتر از ۱ است. به همین دلیل می‌توان، توان را به صورت زیر تخمین زد:

$$Z_{(t)} = Z_{(0)} (1 + 2 \int_0^t R_{(t)} \partial t) \quad (22-3)$$

تحت همان فرض کوچک بودن مقادیر ضرایب بازتاب، معادله (۲۲-۳) با معادله (۱۹-۳) هم‌ارز خواهد شد. بنابراین، همه راه‌حل‌ها به صورت زیر خواهند شد:

$$Z_{(t)} \approx Z_{(0)} (1 + 2 \sum_{j=0}^i R_{(j)}) \quad (23-3)$$

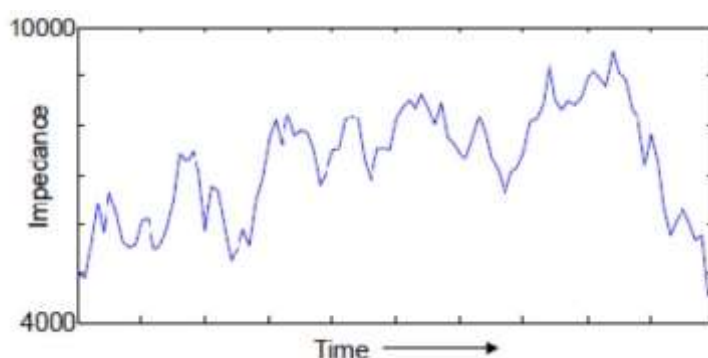
با توجه به چشم‌پوشی ما از سری ضرایب بازتابی، یک تقریب خوب برای همه راه‌حل‌ها به صورت زیر است:

$$Z_{Seismic} \equiv W * Z_{(t)} \approx C \sum_{j=0}^i T_{(i)} \quad (24-3)$$

بنابراین، در همه موارد، ما می‌توانیم فقط یک مقدار مقاومت با باند محدود را داشته باشیم. در نرم‌افزار همسون راسل^۱، این روش بازگشتی^۲ نام دارد.

۳-۱-۵ بررسی روش های بازگشتی

شکل (۳-۵) یک مدل مقاومت که بصورت مصنوعی تولید شده را نشان می‌دهد.

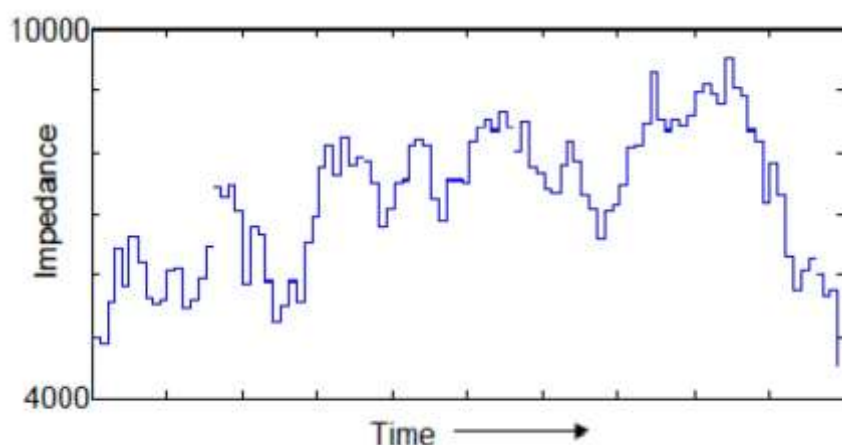


شکل (۳-۵) مدل مقاومت مصنوعی اولیه (استفان هیل، ۲۰۰۹).

شکل (۳-۶) دقیقاً همان مقاومت مدل‌سازی شده را نمایش می‌دهد اما به شکل پله‌ای. این نمودار پله‌ای، این واقعیت را مشخص می‌کند که این منحنی، یک منحنی مقاومت است که مقادیر مقاومت در بازه‌های زمانی، بدون تغییر هستند. با مقایسه این دو شکل اهمیت شکل نمایش داده‌ها در به اشتباه افتادن در مورد محتوای فرکانسی آنها مشخص می‌شود.

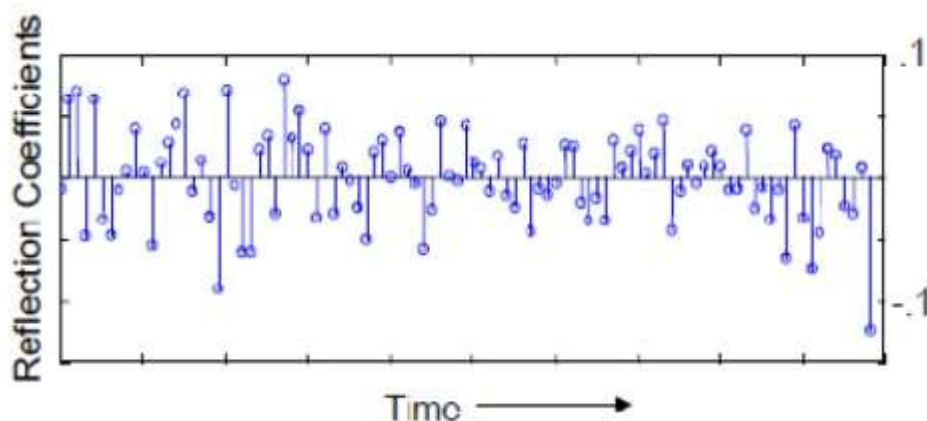
^۱ Hampson-Russell

^۲ Recursive



شکل (۶-۳) مدل مقاومت اولیه که به شکل پله ای نمایش داده شده (استفان هیل، ۲۰۰۹).

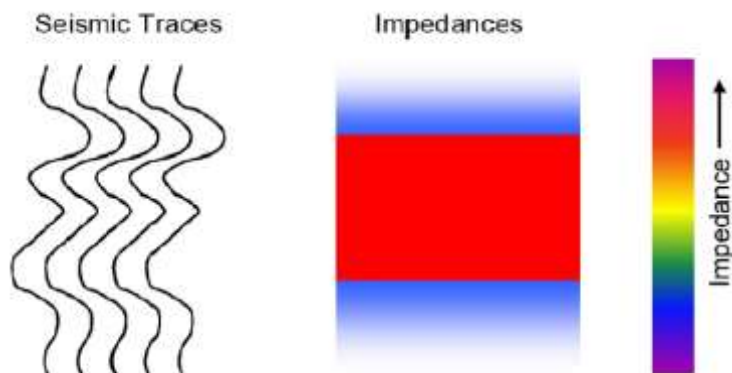
شکل (۷-۳) سری ضرایب بازتابی ناشی از منحنی مقاومت بالا را نشان می‌دهد. روند ناچیز در کاهش مقادیر ضریب بازتابی با افزایش زمان دیده می‌شود. باید به یادداشت که ضرایب بازتابی اختلاف بین مقاومت‌ها هستند که بر جمع مقاومت‌ها تقسیم شده‌اند. مناطق با مقاومت بالاتر مقادیر کوچک‌تری از ضرایب بازتاب را برای همان تضاد مقاومتی ایجاد می‌کنند.



شکل (۷-۳) سری ضرایب بازتاب که برای تولید اشکال (۸-۳) و (۷-۳) مورد استفاده قرار گرفته است.

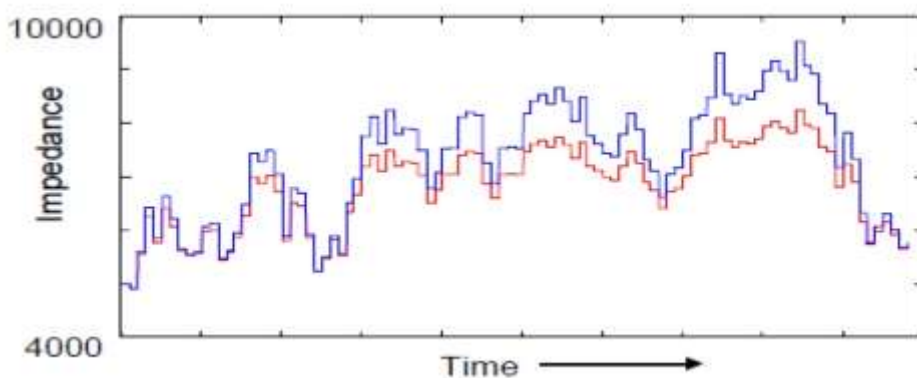
در حالت ایده آل، وارون سازی با سری ضریب بازتابی شروع می‌شود و مقاومت را بدست می‌آورد.

هدف این است که شکل (۷-۳) را به شکل (۸-۳) تبدیل کنیم



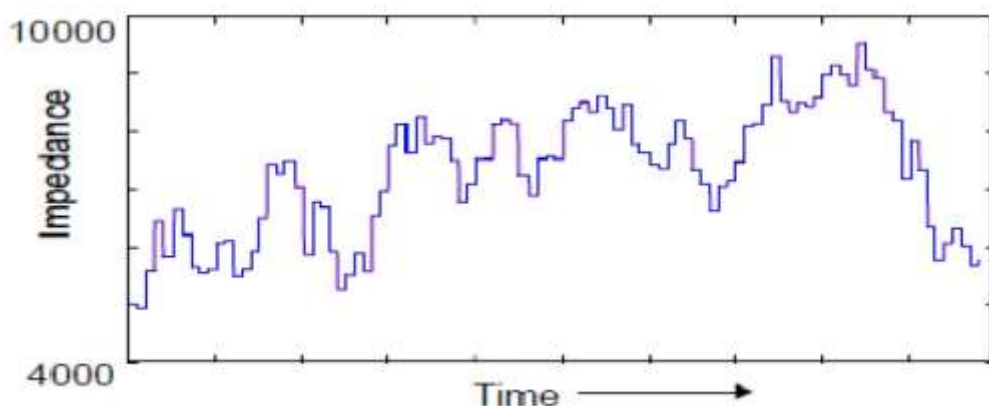
شکل (۸-۳) هدف نهایی در وارون سازی بعد از برانبارش تولید مقاومت لرزه‌ای از لرزه نگاشت ورودی است.

شکل (۹-۳)، میزان موفقیت در رسیدن به این هدف را با در نظر گرفتن تقریب معادله ۳-۲۵ روشن می‌سازد. منحنی بالایی، منحنی مقاومت اصلی است (منحنی آبی). منحنی پایینی (قرمز) منحنی مقاومت بدست آمده از معادله ۳-۲۳ است. این جمع‌بندی متحرک سری ضرایب بازتابی اصلی است که یک مقدار ثابت به آن اضافه شده است. این مقدار ثابت، مقدار مقاومت در زمان صفر است.



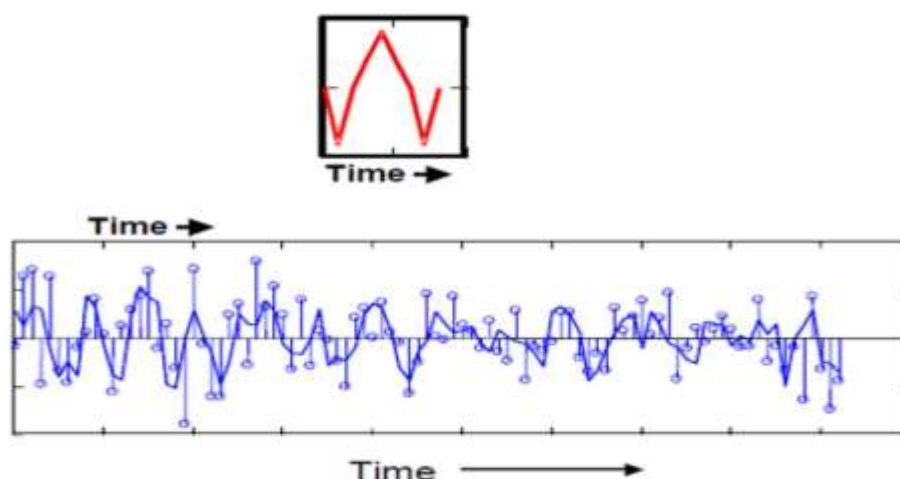
شکل (۹-۳) مقاومت اصلی (آبی)، مقاومت حاصل از وارون سازی (قرمز) (استفان هیل، ۲۰۰۹).

شکل (۱۰-۳) مشابه شکل (۹-۳) است. به هر حال، با استفاده از فرمول دقیق معادله ۳-۲۱، مقاومت را از سری ضرایب بازتابی بدست می‌آورد و همپوشانی دو منحنی نشان‌دهنده دقت معادله ۳-۲۱ است.



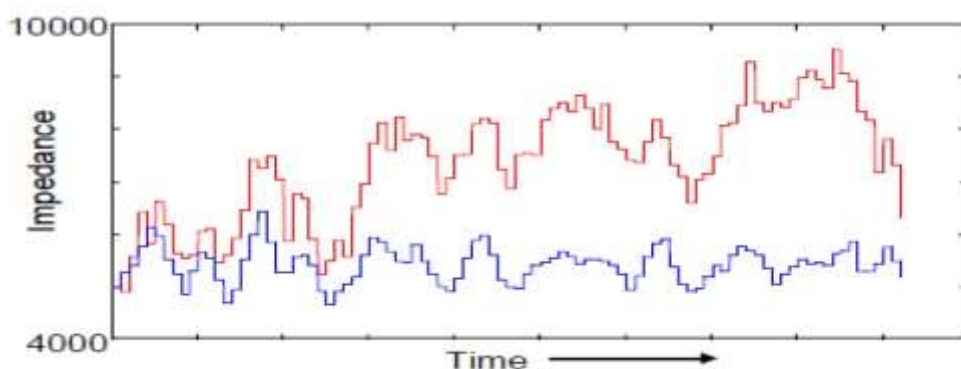
شکل (۱۰-۳) مقاومت اصلی (آبی)، مقاومت حاصل از وارون سازی (قرمز) (استفان هیل، ۲۰۰۹).

متاسفانه اطلاعات سری ضرایب بازتابی در دسترس نیست و فقط ردلرزه ثبت شده موجود است. در بهترین شرایط، ردلرزه همامیخت سری ضرایب بازتابی با یک موجک است. در شکل (۱۱-۳)، همامیخت سری ضرایب بازتابی شکل (۷-۳) با موجک فاز صفر نشان داده شده که حاصل آن تولید ردلرزه در شکل (۱۱-۳) است. همامیخت با موجک، سری ضرایب بازتابی اصلی را هموار کرده است. این موجک، هم فرکانس های بالا و هم فرکانس پایینی که در سری ضرایب بازتابی اصلی وجود دارند را تضعیف کرده است.



شکل (۱۱-۳) موجک فاز صفر استفاده شده (بالا) در تولید لرزه نگاشت (پایین)

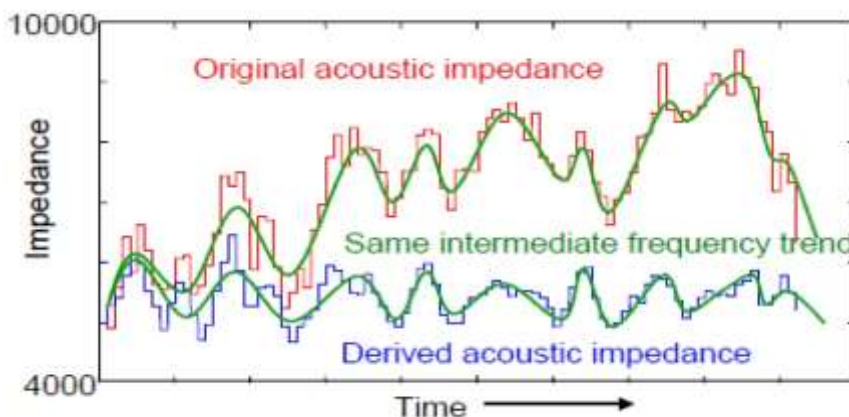
در شکل (۳-۱۲)، مقاومت اصلی (منحنی بالایی) و منحنی مقاومت به دست آمده از وارون سازی ردلرزه نشان داده شده در شکل (۳-۱۱) را نمایش می دهد. از آنجایی که، ردلرزه در فرکانس های پایین و بالا ناقص است، ردلرزه وارون سازی در همان فرکانس ها ناقص است. کمبود در فرکانس های پایین، به عنوان یک خطا، خودش را در افزایش مقاومت با عمق نشان می دهد.



شکل (۳-۱۲) مقاومت (منحنی بالایی)، مقاومت حاصل از وارون سازی (منحنی پایین).

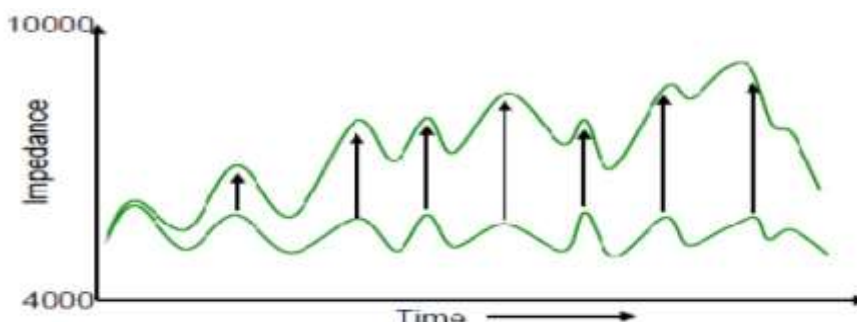
فقدان در فرکانس های بالا نیز؛ خودش را به عنوان یک خطا، در جزئیات سری مقاومت حقیقی نشان می دهد.

همانطور که در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده، یک مطابقت در روند فرکانس های متوسط وجود دارد. در این مورد خاص، معادله دقیق (۳-۲۱) سری مقاومت صوتی را بدست می دهد

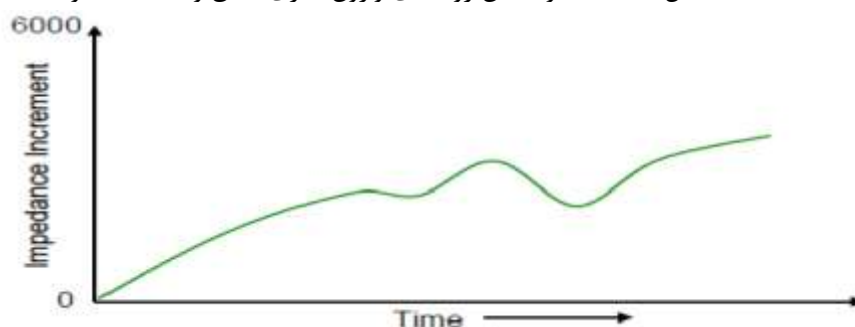


شکل (۳-۱۳) تناظر روند فرکانس میانی (استفان هیل، ۲۰۰۹).

شکل (۳-۱۴) تفاوت بین روندهای وارون سازی دقیق و با باند محدود را به تصویر کشیده است. این اختلاف مربوط به یک روند کم فرکانس است که در شکل (۳-۱۵) دیده می شود. سرعت های برانبارش می توانند محتوای فرکانسی از دست رفته را بدست آورند.

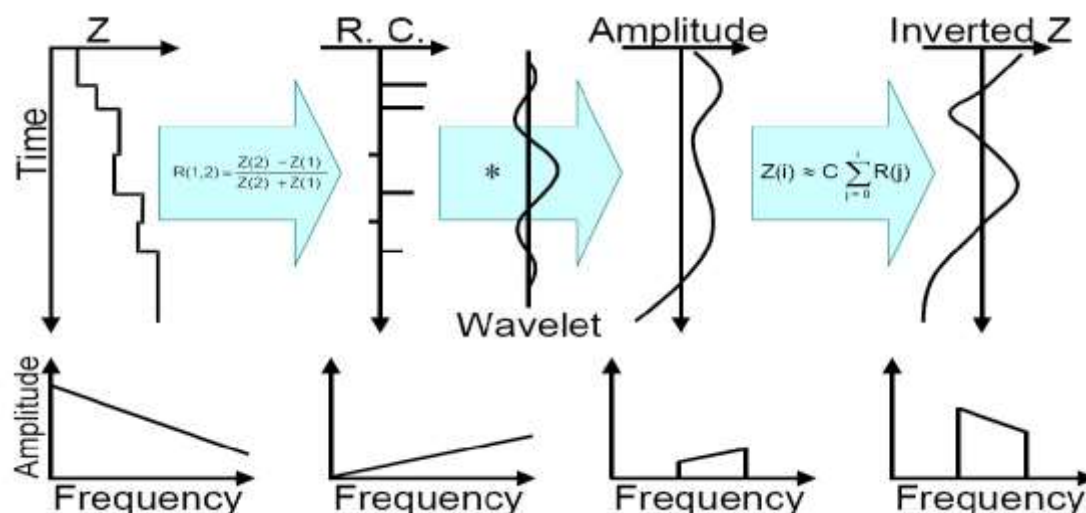


شکل (۳-۱۴) تفاوت بین روندهای وارون سازی دقیق و با باند محدود



شکل (۳-۱۵) قسمت مقاومت فرکانس پایین .

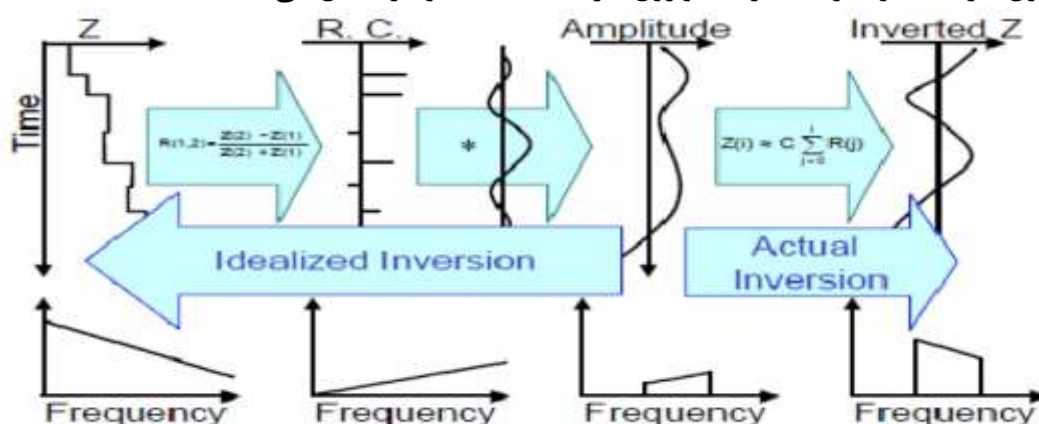
در شکل (۳-۱۶)، مراحل وارون سازی بطور خلاصه نمایش داده شده است. بخش سمت چپ، سری مقاومت صوتی را به صورت تابعی از زمان نشان می دهد. طیف دامنه در زیر نمودار مقاومت قرار گرفته است. مقاومت های بلوکی شکل با استفاده از معادله ۳-۲۲ در هر سطح مشترک، به سری ضرایب بازتابی تبدیل می شوند. طیف سری ضرایب بازتابی در زیر نمودار سری ضرایب بازتابی قرار دارد. سری ضرایب بازتابی با اختلاف در مقاومت ها متناسب است. عمل بدست آوردن این اختلاف ها، طیف دامنه را با تقویت فرکانس های بالا، همانطور که در طیف دامنه مربوطه دیده می شود، تغییر می دهد. در یک حالت مطلوب، دامنه های لرزه ای مشاهده شده، نتیجه هم آمیخت سری ضرایب بازتابی با یک موجک لرزه ای هستند.



شکل (۳-۱۶) مراحل وارون سازی بطور خلاصه نمایش داده شده است. بخش سمت چپ، سری مقاومت صوتی را به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد. طیف دامنه در زیر نمودار مقاومت قرار گرفته است.

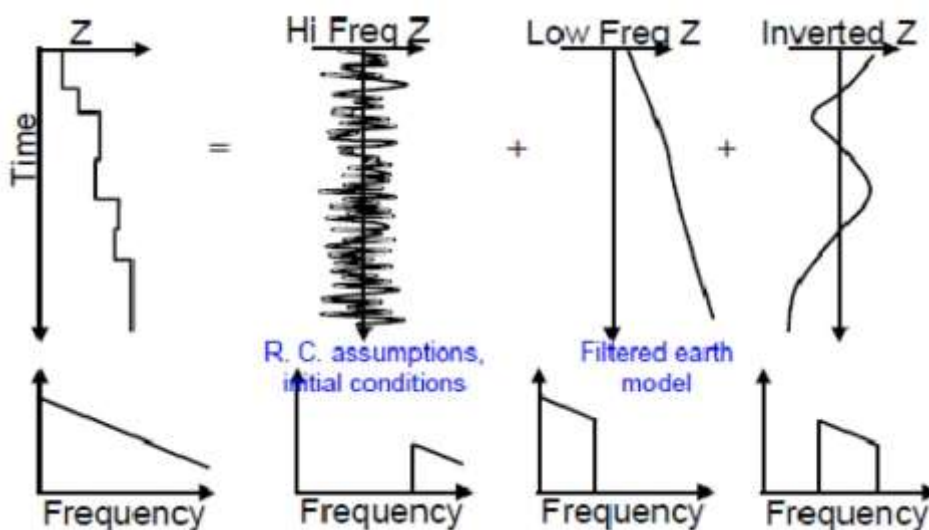
همامیخت سری ضرایب بازتابی با یک موجک با باند محدود، فرکانس‌های پایین و بالا را حذف می‌کند. جمع بندی مقادیر مشاهده شده دامنه برحسب زمان، یک تخمین از مقاومت یعنی مقاومت وارون را بدست می‌دهد. جمع بندی طیف دامنه را به شیب اصلی‌اش بر می‌گرداند. اما نمی‌تواند فرکانس‌های پایین و بالای از دست رفته را برگرداند.

مقاومت وارون یک نسخه با باند محدود از سری مقاومت اصلی است. شکل (۳-۱۷)، جهت یک فرآیند وارون سازی مطلوب و یک فرآیند وارون سازی با باند محدود را نشان می‌دهد.



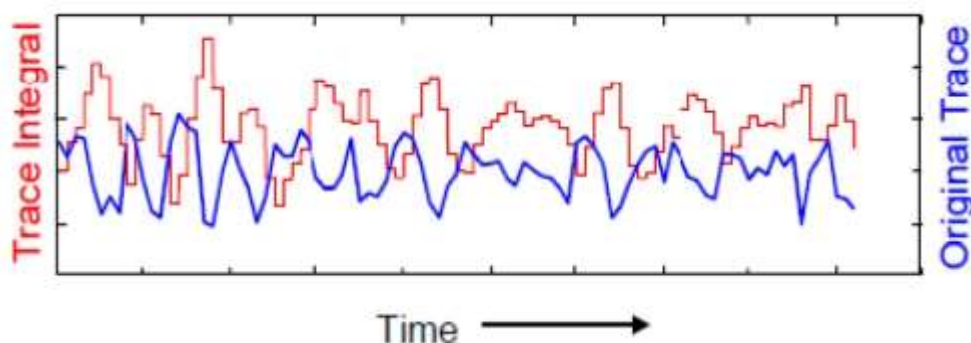
شکل (۳-۱۷) جهت یک فرآیند وارون سازی ایده آل و یک فرآیند وارون سازی عملی (استفان هیل، ۲۰۰۹).

شکل (۳-۱۸) تبدیل فرکانس‌های با باند محدود به سری مقاومت اصلی را نشان می‌دهد. در شکل سمت راست نتایج حوزه زمان و حوزه فرکانس از وارون‌سازی ردلرزه اصلی را نشان می‌دهد. ردلرزه وارون به اضافه سری زمان فرکانس پایین، فرکانس‌های پایین از دست رفته را پر می‌کند. در شرایط عالی، یک مدل زمین فیلتر شده، این بخش کم فرکانس را ایجاد می‌کند. اطلاعات چاه و سرعت برانبارش مدل کم فرکانس را بدست می‌دهد. فرضیه‌ها درباره طبیعت سری‌های ضرایب بازتابی (پراکندگی یا موقعیت سطوح جدایی) می‌تواند اطلاعاتی را در مورد فرکانس‌های پایین و بالای حذف شده ارائه دهد.



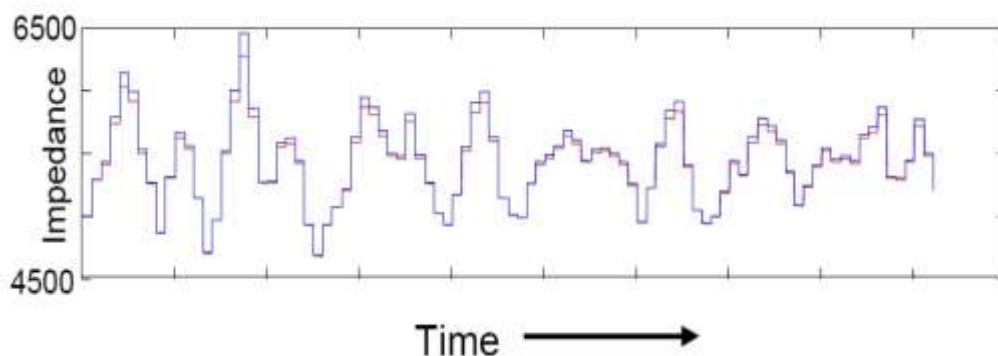
شکل (۳-۱۸) بازسازی فرکانس‌های ازدست رفته در وارون‌سازی داده‌ها (استفان هیل، ۲۰۰۹).

شکل (۳-۱۹) ورودی به معادله مقاومت صحیح را نشان می‌دهد. منحنی هموار ردلرزه ورودی را نمایش می‌دهد و منحنی بلوکی جمع بندی متحرک (انتگرال) همان ردلرزه را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۹) ردلرزه اصلی (قرمز) و ردلرزه جمع بندی متحرک (آبی) (استفان هیل، ۲۰۰۹).

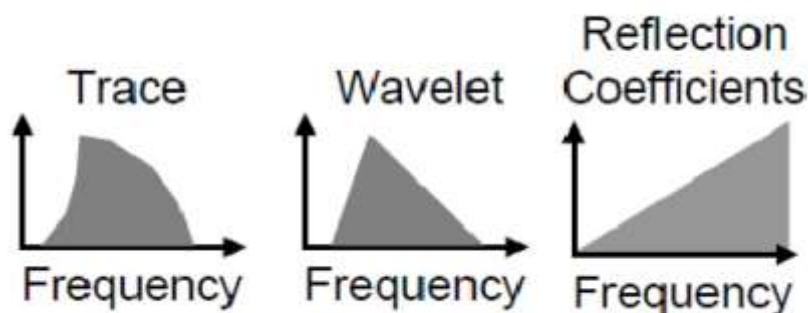
شکل (۳-۲۰) یک مقایسه از حل‌های دقیق و تقریبی را نشان می‌دهد که در آن حل دقیق منحنی بالایی است. مطابقت خیلی خوب این دو منحنی در مقایسه‌های قبلی وجود نداشت. تبدیل سری ضرایب بازتابی به یک ردلرزه، فرکانس‌های پایین را حذف می‌کند. مدل شکل (۳-۲۰) نشان می‌دهد که یک جمع‌بندی متحرک ساده روی ردلرزه، یک فرایند کافی در بدست آوردن مقاومت با باند محدود از داده با باند محدود است.



شکل (۳-۲۰) مقاومت وارون شده بصورت نمایی (آبی) و مقاومت حاصل از وارون سازی جمعی (قرمز) (استفان هیل، ۲۰۰۹).

۳-۱-۶ فرکانس‌های پایین از دست رفته

ردلرزه مشاهده شده را به عنوان هم‌میخت سری ضرایب بازتابی با موجک لرزه ای در نظر گرفته می‌شود. منابع لرزه‌ای اغلب در درست کردن و کوپل کردن انرژی فرکانس پایین بازیبن ناکارآمد هستند. بنابراین داده لرزه‌ای همواره، در فرکانس‌های پایین ناقص است. شکل (۳-۲۱) این توالی را نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۲۱) کمبود فرکانس‌های پایین در موجک و سری‌های ضریب بازتاب (استفان هیل، ۲۰۰۹).

معادله (۳-۲۵)، مقاومت صوتی را به صورت جمع سری ضرایب بازتابی بیان می‌کند. این معادله یک ساده‌سازی از معادله (۴-۲۶) است:

$$Z_{(i)} \approx \sum_{j=0}^i R_{(j)} \quad (۳-۲۵)$$

معادله (۳-۲۶) هم‌میخت مقاومت با موجک لرزه است. این هم‌میخت جمع‌بندی ردلرزه است. این معادله بیان می‌کند که جمع ردلرزه، مقاومت نیست، بلکه مقاومت با باند محدود است. این مقاومت با پهنای باند موجک لرزه ای، محدود می‌شود.

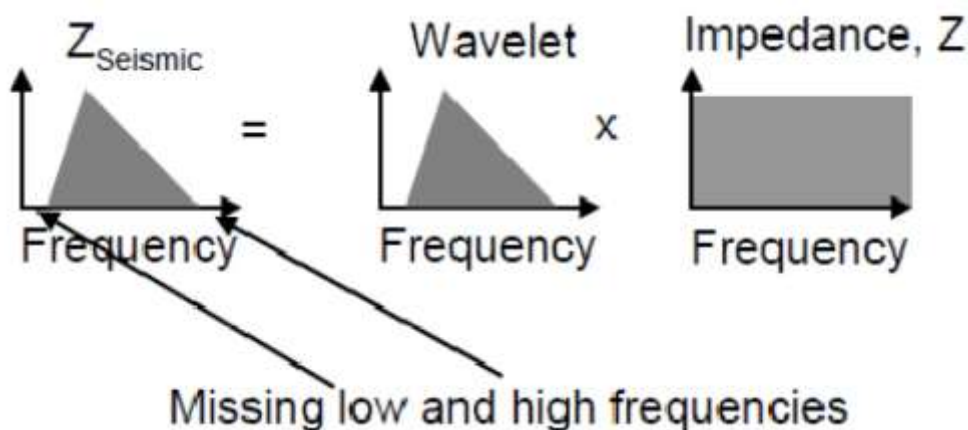
از آنجایی که ما سری ضرایب بازتابی را نمی‌دانیم تا از آن در معادله (۳-۲۵) استفاده نماییم، بهترین کار این است که، از نسخه مقاومت با باند محدود استفاده کنیم:

$$W * Z_{(i)} \approx W * \left(\sum_{j=0}^i R_{(j)} \right) = \sum_{j=0}^i (W * R_{(j)}) \quad (۳-۲۶)$$

معادله ۲۷-۳، این نسخه با باند محدود مقاومت را با $(Z_{Seismic})$ ، به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$Z_{Seismic} \equiv W * Z_{(t)} \approx \sum_{j=0}^i T_{(j)} \quad (27-3)$$

همانطور که معادله بالا نشان می‌دهد، مقاومت با باند محدود، همامیخت موجک با مقاومت است. همامیخت معادل است با ضرب طیف دامنه‌ها، شکل (۲۲-۳) این موضوع را نمایش می‌دهد.



شکل (۲۲-۳) مقاومت با باند محدود حاصل از ضرب طیف‌های دامنه موجک و مقاومت (استفان هیل، ۲۰۰۹).

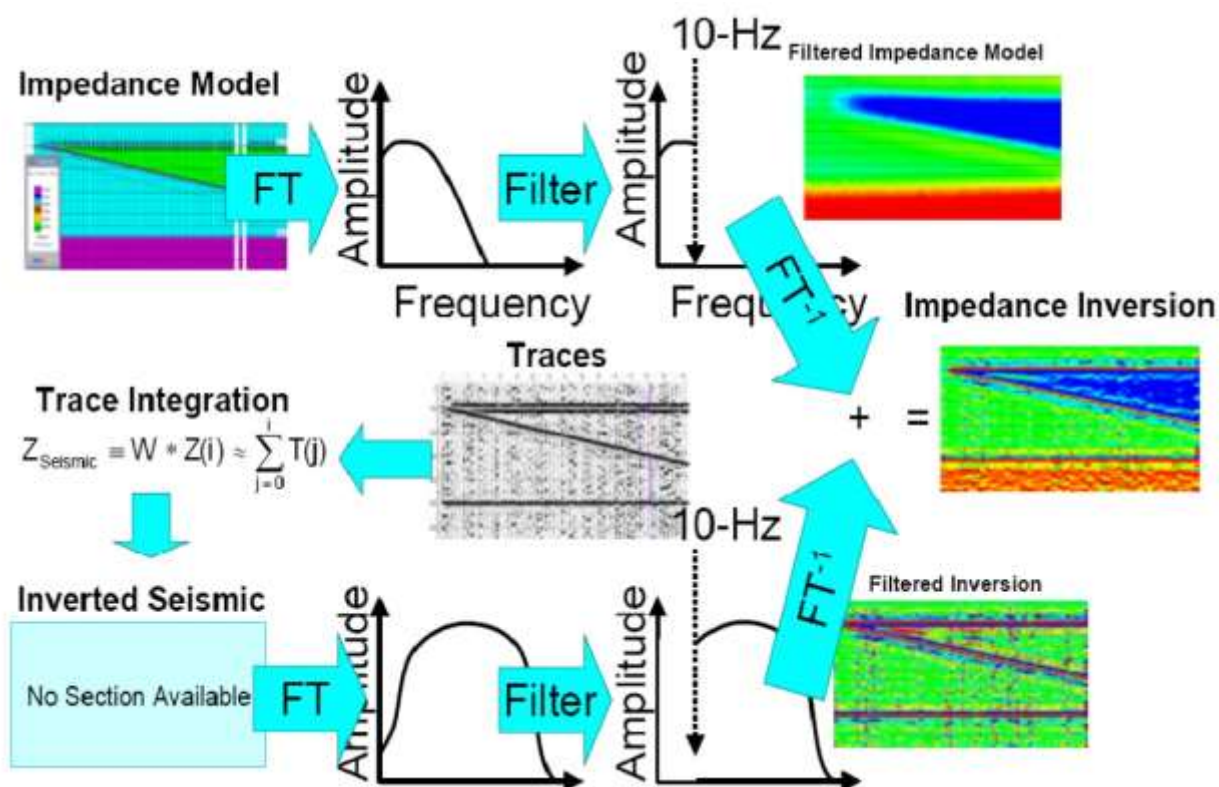
برای فرکانس‌های پایین از دست رفته یک راه حل ساده وجود دارد. برای این کار باید با بهترین حدس از مقاومت‌ها در نظر گرفته شود. سپس با استفاده از یک فیلتر فرکانسی، همه فرکانس‌ها را غیر از فرکانس‌های پایین حذف شود و فرکانس‌های پایین را به $Z_{Seismic}$ ، که از جمع ردلرزه‌ها حاصل شده اضافه کرد. از آنجایی که جمع ردلرزه‌ها ممکن است شامل فرکانس‌های پایین نادرست باشد، آنها را به وسیله یک فیلتر فرکانسی بالاگذر حذف می‌کنیم. شکل (۲۳-۳)، مراحل فوق را نمایش می‌دهد.

شکل (۲۴-۳)، مراحل فیلتر کردن و ترکیب در ساخت محصول وارون‌سازی انتگرال ردلرزه را نشان می‌دهد. دو ورودی وجود دارد، اولین ورودی مجموع ردلرزه هاست و دومین ورودی یک مدل مقاومت است. این مدل فیلتر فرکانسی شده و در نتیجه فقط فرکانس‌های پایین آن باقی مانده است. بنابراین، ممکن است

این مدل دارای اشتباهاتی در محل دقیق سطوح حدفاصل باشد. ردلرزه‌ها، جزئیات بهتری را از موقعیت سطوح حدفاصل بدست می‌دهند. پهنای باند داده لرزه‌ای، دانش ما را در رابطه با سطوح حدفاصل محدود می‌کند.

$$Z_{\text{Pseudo}} \equiv Z_{\text{Seismic}} + Z_{\text{LowFrequency}}$$

شکل (۳-۲۳) مراحل بازسازی فرکانس‌های پایین (استفان هیل، ۲۰۰۹).



شکل (۳-۲۴) کلیه مراحل وارون‌سازی لرزه‌ای را به روش بازگشتی (استفان هیل، ۲۰۰۹).

در بخش‌های قبل به اهمیت تعیین فشار منفذی در میادین نفتی پرداخته شد که می‌تواند نقش مهمی در اکتشاف و تولید منابع هیدروکربنی داشته باشد. همچنین به روش‌های تعیین فشار منفذی نیز پرداخته شد و به نقاط ضعف و قوت هر یک اشاره شد.

تخمین فشار منفذی به صورت مستقیم از روی داده‌های لرزه‌ای بر پایه‌ی مقاومت صوتی علاوه بر کاهش خطای موجود در تبدیل مقاومت صوتی به سرعت و چگالی از این لحاظ نیز دارای مزیت است که با به دست آوردن یک رابطه‌ی ریاضی ساده میان مقاومت صوتی و فشار منفذی موجب سادگی فرایند تخمین فشار منفذی گردد.

با توجه به تئوری این روش که در بخش چهارم به آن اشاره شد مهم‌ترین بخش این کار تعیین مقاومت صوتی از روی داده‌های لرزه‌ای با استفاده از وارون سازی داده‌های لرزه‌ای است که باید بیشترین دقت در تعیین یک مقاومت صوتی صحیح از روی داده‌های لرزه‌ای به کار گرفته شود.

در بخش پنجم به تئوری و روش انجام وارون سازی لرزه‌ای مورد استفاده در این پژوهش پرداخته شد. در این بخش به تخمین فشار منفذی به روش مستقیم از روی مقاومت صوتی بر روی داده‌های لرزه‌ای واقعی در یکی از میادین نفتی ایران پرداخته شده است.

در این بخش در ابتدا، تاریخچه و خصوصیات میدان مورد مطالعه و زمین‌شناسی مخازن موجود در آن شرح داده می‌شود. سپس، داده‌های موجود، آماده سازی و تحلیل آماری داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه این فصل ابتدا به وارون سازی داده‌های لرزه‌ای پرداخته می‌شود که در نهایت مقاومت صوتی از داده‌های لرزه‌ای حاصل از وارون سازی به دست می‌آید. پس از تعیین مقاومت صوتی با استفاده از داده‌های فشار¹ RFT موجود در منطقه رابطه‌ی مابین مقاومت صوتی و فشار محاسبه و کالیبره می‌گردد و در انتها مکعب فشار منفذی در مخزن به دست می‌آید.

¹ Repetitive formation test

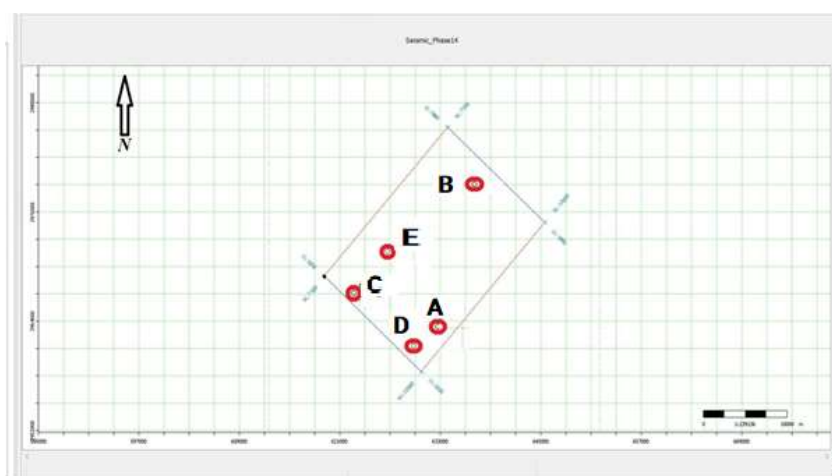
۲-۳ معرفی و آماده سازی داده‌های موجود

۱-۲-۳ داده‌های چاه

در این میدان داده‌های ۵ چاه در دسترس است که از بین این ۵ چاه ۴ چاه برای وارون سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات این چاه‌ها در جدول و همچنین نحوه توزیع این چاه‌ها در جدول ۱-۴ نشان داده شده است.

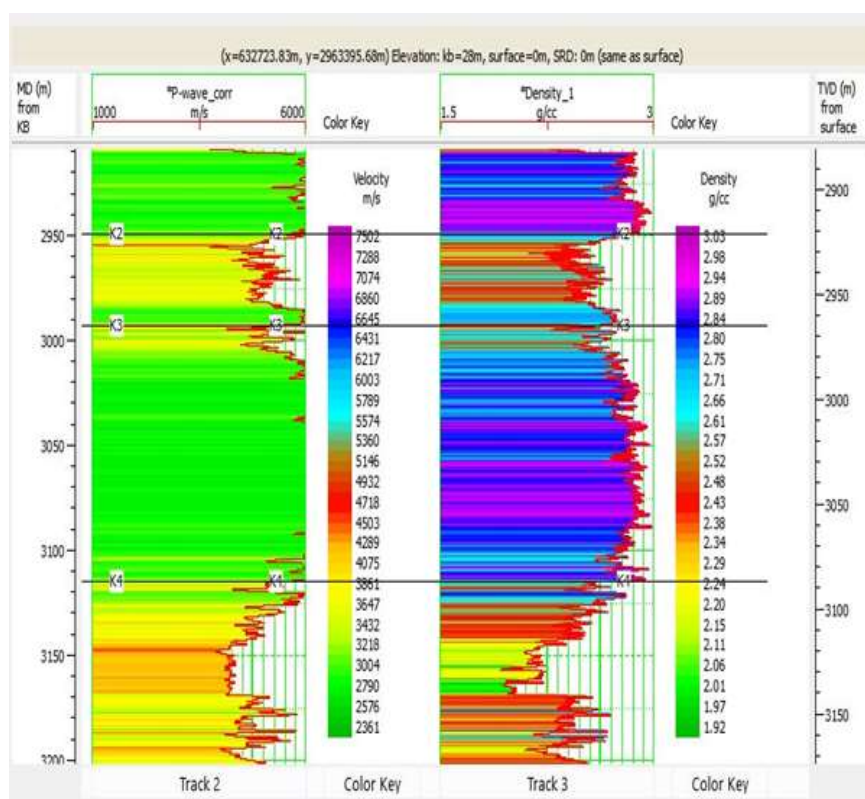
جدول ۱-۳ مشخصات چاه‌های موجود در این مطالعه

Well	Type	X (m)=Easting (UTM)	Y(m)=Northing (UTM)	K.B (m)	TD (MD m)
A	Appraisal	۶۳۲۷۱۶	۲۹۶۳۵۷۷	۱۲	۳۲۸۶
B	Appraisal	۶۳۷۰۹۵	۲۹۷۹۱۹۶	۱۳/۵	۳۳۷۶
C	Appraisal	۶۲۲۶۵۸	۲۹۶۷۲۴۱/۵	۱۲/۳	۳۲۰۹
D	Appraisal	۶۲۹۸۰۰	۲۹۶۱۴۰۰	۱۲/۸۵	۳۲۵۰
E	Appraisal	۶۲۶۷۰۵/۲	۲۹۷۱۶۲۵/۶	۱۴/۲	۳۲۷۰



شکل (۲۵-۳) موقعیت چاه‌های استفاده شده در این مطالعه

در میان این ۵ چاه دو چاه نیز دارای اطلاعات لرزه‌نگاری قائم (VSP) هستند. همچنین داده‌های آزمایش مجدد چاه (RFT) برای ۲ چاه موجود می‌باشد که از آن برای کالیبره کردن رابطه باورز استفاده شده است. علت اصلی انتخاب ۵ چاه از میان ۶ چاه وجود نگرهای سرعت صوتی و چگالی در سازند مورد نظر می‌باشد. در شکل ۳-۲۶ نگرهای صوتی و چگالی برای چاه A نشان داده شده است. همانطور که گفته شد این نگرها کل مسافت سازند مورد مطالعه را پوشش می‌دهند.



شکل (۳-۲۶) نگرهای سرعت صوتی و چگالی برای چاه A. نگرهای این چاه تقریباً کل طول مخزن را پوشش می‌دهند.

¹ Vertical seismic profiling

² Repetitive formation test

۳-۳ وارون سازی داده‌های لرزه‌ای

در این قسمت وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای این منطقه به منظور تعیین مقاومت صوتی از روی داده‌های لرزه‌ای انجام می‌گیرد. در اینجا وارون‌سازی لرزه‌ای که تئوری آن در بخش قبلی بررسی شد با استفاده از نرم‌افزار همپسون راسل انجام می‌شود. مراحل انجام فرایند وارون‌سازی در این نرم‌افزار به صورت زیر می‌باشد.

۳-۳-۱ داده‌ها در نرم‌افزار همپسون راسل

۳-۳-۱-۱ وارد کردن داده‌های چاه

برای تعریف یک پروژه‌ی جدید در نرم‌افزار کاربردی همپسون راسل در اولین مرحله باید داده‌های چاه در این نرم‌افزار فراخوانی شوند. برای وارد کردن یک چاه در ابتدا لازم است که اطلاعات مربوط به مختصات جغرافیایی مکان قرارگیری چاه، هندسه چاه (عمودی و یا انحرافی بودن مسیر چاه)، سطح مبنا و نیز عمق چاه وارد شوند. پس از ایجاد یک چاه با وارد کردن اطلاعات نامبرده، نگارهای مربوط به آن چاه مانند نگارهای صوتی و چگالی باید وارد شوند. داده‌های مربوط به چاه همگی در مقیاس عمقی هستند و از آنجایی که داده‌های لرزه‌ای به صورت زمانی و داده‌های چاه‌ها به صورت عمقی هستند لازم است که برای ترکیب و استفاده‌ی هم زمان از این داده‌ها با یکدیگر، هر دو برحسب یک واحد باشند. برای این کار و تبدیل داده‌های عمقی چاه به داده‌های زمانی نیاز به اطلاعات سرعت لایه‌ها در اطراف چاه داریم که این کار با داده‌های چکش‌شات قابل انجام است.

در چاه‌هایی که فاقد داده‌های چکش‌شات هستند در صورت وجود نگار صوتی سرعت، رابطه زمان-عمق به کمک این نگار تهیه می‌شود. به این صورت که در نگار صوتی در هر عمق Z مقدار سرعت $V(Z)$ در آن

عمق مشخص است؛ بنابراین با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان زمان مربوط به آن عمق $t(z)$ را به دست آورد.

$$t(z) = \int_{z_0}^z \frac{dz}{V(z)} \quad (28-3)$$

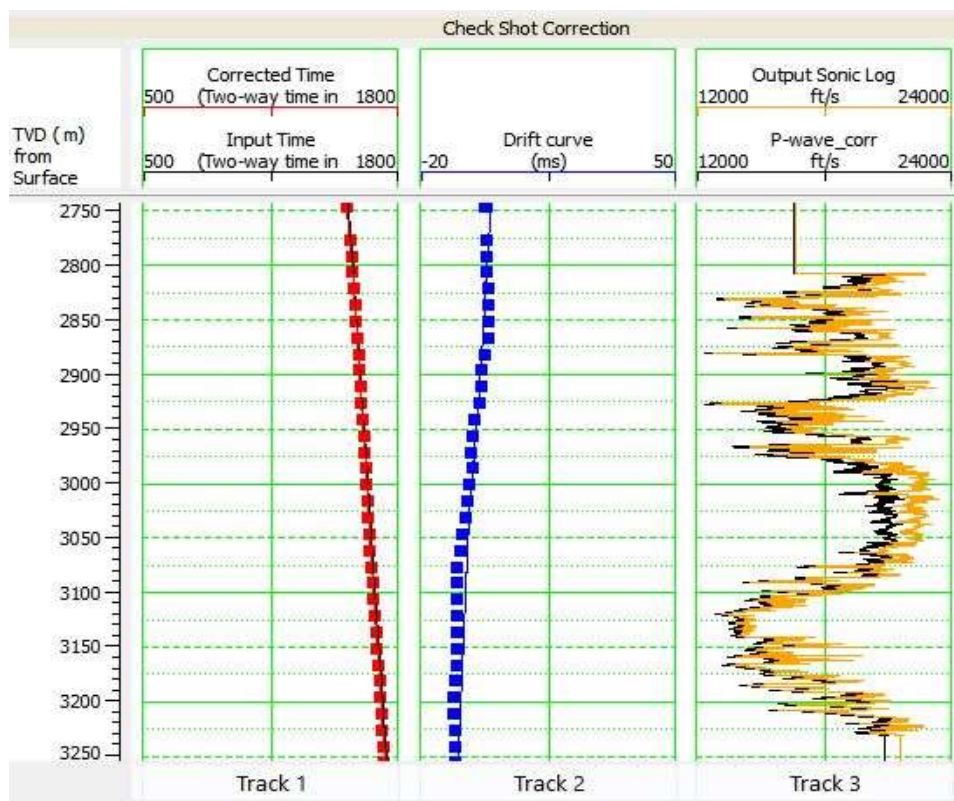
در چاه‌هایی که داده‌های چکش‌ها وجود ندارد، کار تبدیل داده‌های چاه از مقیاس عمق به زمان تمام می‌شود ولی در چاه‌هایی که داده‌ی چکش‌ها وجود دارد می‌توان رابطه زمان-عمق به دست آمده از نگار صوتی را تصحیح نمود.

از آنجایی که داده‌های نگار صوتی سرعت سنگ‌های اطراف چاه را نشان می‌دهند و امواج لرزه‌ای تحت تأثیر جذب و پراکندگی قرار دارند بنابراین با استفاده از داده‌های نگار صوتی به تنهایی نمی‌توان رابطه مناسبی برای تبدیل عمق به زمان به دست آورد. از طرف دیگر داده‌های چکش‌ها که تأثیرات موارد نامبرده را بهتر نمایان می‌سازد و روابط مناسب‌تری برای تبدیل عمق به زمان ارائه می‌دهند نیز از نظر تعداد نقاط اندازه‌گیری محدود هستند و دارای پیوستگی و تعداد موجود در داده‌های نگار صوتی نیستند.

بنابراین بهترین راه برای به دست آوردن رابطه‌ی تبدیل عمق به زمان مناسب این است که از داده‌های نگار صوتی استفاده کرده و به وسیله‌ی چکش‌ها تصحیحات لازم بر روی این روابط به دست آمده انجام گیرد.

در این قسمت با اعمال تصحیحات چکش‌ها بر روی داده‌های نگار صوتی، رابطه‌ی تبدیل زمان به عمق برای هر چاه با استفاده از اعمال چکش‌ها تصحیح گردید که در شکل ۳-۲۷ اعمال چکش‌ها و تصحیح زمان عمق برای چاه A نشان داده شده است.

در نهایت پس از انجام همه‌ی کارهای گفته شده برای هر چاه مورد استفاده در این پژوهش، فراخوانی چاه‌ها در نرم‌افزار به پایان می‌رسد.



شکل (۳-۲۷) نحوه اعمال چک شات و تصحیح تبدیل عمق به زمان برای چاه A

۳-۱-۳-۲ واردکردن داده‌های لرزه‌ای

پس از واردکردن داده‌های چاه در مرحله ی بعد نوبت به فراخوانی داده‌های لرزه‌ای می‌رسد که یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها می‌باشد. به‌طور کلی داده‌های لرزه‌ای این میدان داده‌های لرزه‌ای سه بعدی هستند که در این پژوهش از یک برش در محدوده مخزن استفاده شده است.

داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در این قسمت شامل ۲۲۰۳۳۸۱ ردلرزه با ۸۸۱ inline با فاصله ۲۵ متر و Crossline ۲۵۰۱ با فاصله ۶/۲۵ متر می‌باشد که در شکل ۳-۲۸ اطلاعات مربوط به واردکردن داده‌های لرزه‌ای به طور کامل نشان داده شده است.

Seismic : Seismic

Number of:	Inline:	Cross-lines:
Start Number:		
Increment:		
Spacing:		
Xline Direction:		
Orientation:		
Origin (UTM):	X: 619122.00	Y: 2968960.00

Angles are measured from Map North with clockwise direction being positive.

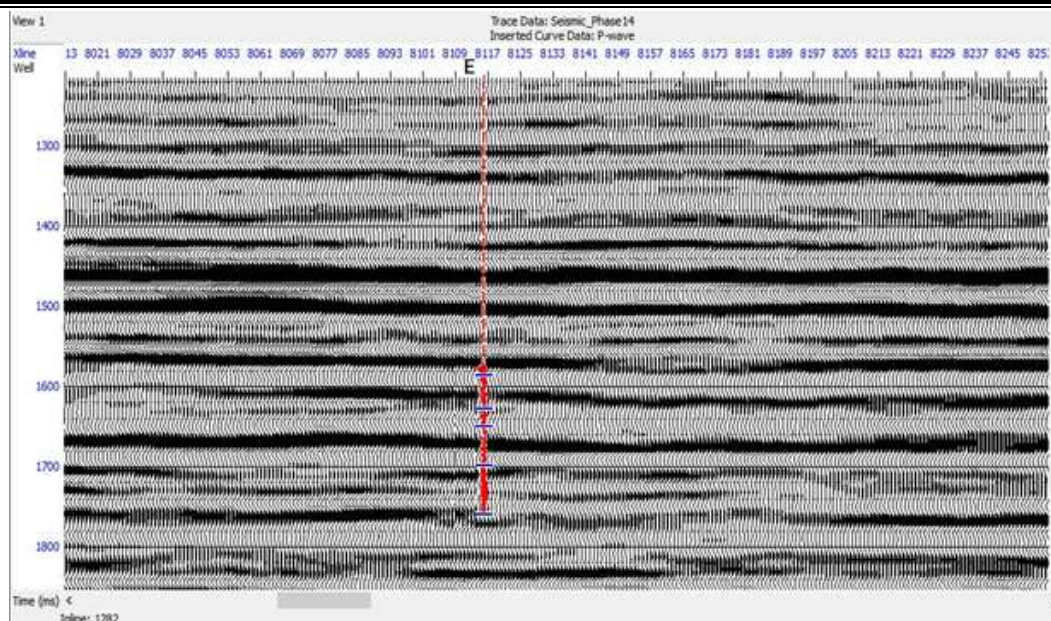
Length Units:

☒ Meters ☐ Feet

شکل (۳-۲۸) نقشه‌ی موقعیت قرارگیری خطوط لرزه‌ای و نیز اطلاعات مربوط به تعداد inline و Crossline

همچنین در شکل (۳-۲۹) یک مقطع طولی نمونه (inline ۱۲۸۲) به همراه چاه E که در این موقعیت قرار گرفته است نشان داده شده است. در این شکل در محل چاه منحنی نگار سرعت صوتی V_p به رنگ قرمز رنگ در میان تریس‌های لرزه‌ای مربوط به inline ۱۲۸۲ نشان داده شده است که پس از اعمال تصحیحات چک شات داده‌های چاه که در مقیاس عمقی بودند در زمان مربوطه خود قرار گرفته‌اند.

¹ inline



شکل (۳-۲۹) تریس‌های لرزه‌ای مربوط به inline ۱۲۸۲ به همراه منحنی نگار صوتی در محل چاه E که سر سازندها نیز مشخص شده‌اند.

۳-۴ وارد کردن افق‌های لرزه‌ای^۱

در مرحله‌ی بعد پس از فراخوانی صحیح داده‌های چاه‌ها و نیز داده‌های لرزه‌ای نوبت به وارد کردن افق‌های لرزه‌ای می‌گردد. همان طور که اشاره شد محدوده‌ی مخزنی این میدان در سازند مورد مطالعه ادامه پیدا کرده است. با استفاده از اطلاعات سر سازندهای موجود در چاه‌ها، می‌توان افق‌های لرزه‌ای مورد نظر را پیک^۲ کرد. البته با توجه به اینکه پیک کردن افق‌های لرزه‌ای در نرم‌افزار همپسون راسل به اندازه‌ی نرم‌افزارهای دیگر مانند پترل و OpendText تخصصی نیست بهتر است که این کار در نرم‌افزارهای

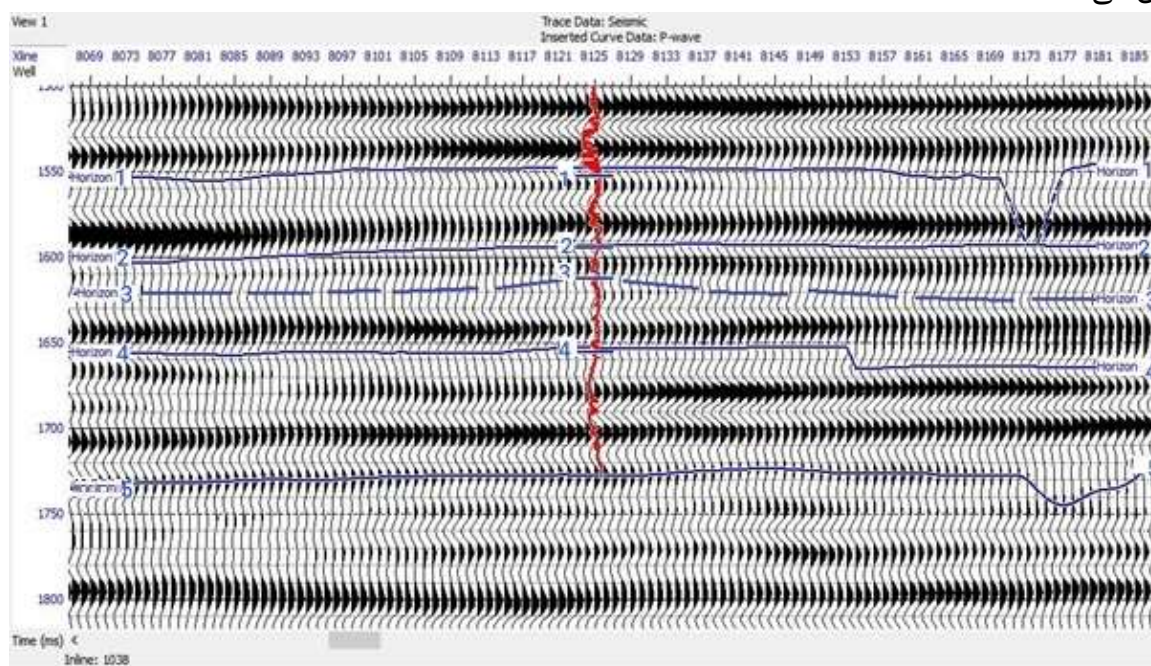
^۱Seismic Horizon

^۲Picking

تخصصی تر برای این منظور انجام گرفته و نتایج که شامل ۵ افق در سازند مورد مطالعه می باشد به عنوان افق نشانه گذاری^۱ شده؛ در نرم افزار همپسون راسل فراخوانی^۲ شود.

شکل ۳-۳۰، پنج افق پیک شده بر روی داده های لرزه ای پس از وارد کردن در نرم افزار همپسون راسل بر روی مقطع طولی نمونه (inline ۱۰۳۸) به همراه چاه C که در این مقطع طولی قرار گرفته شده است،

نشان می دهد.

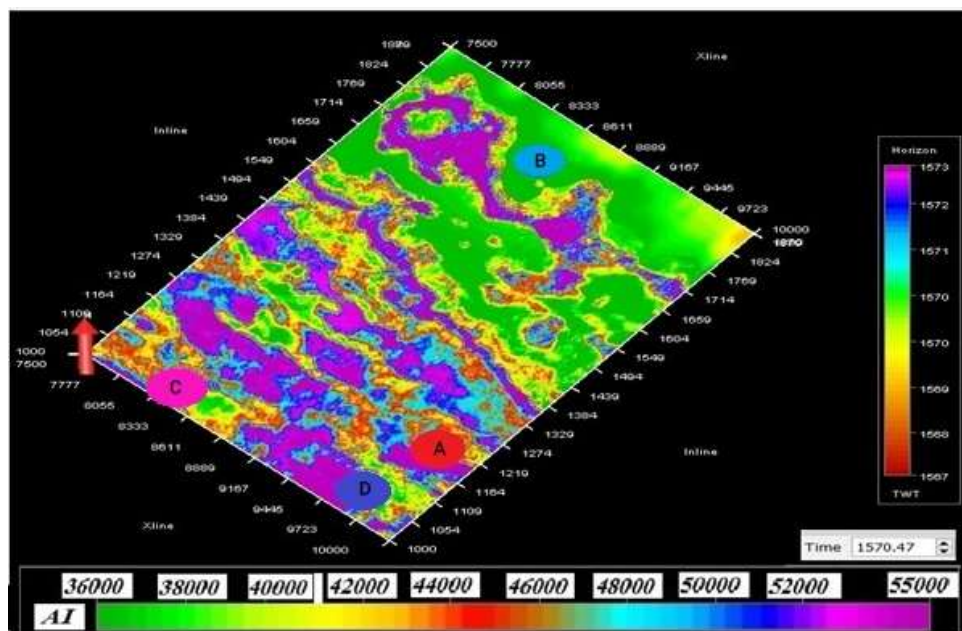


شکل ۳-۳۰) پنج افق پیک شده در سازند مورد مطالعه بر روی مقطع طولی نمونه inline ۱۰۳۸ به همراه منحنی نگار صوتی در محل چاه C.

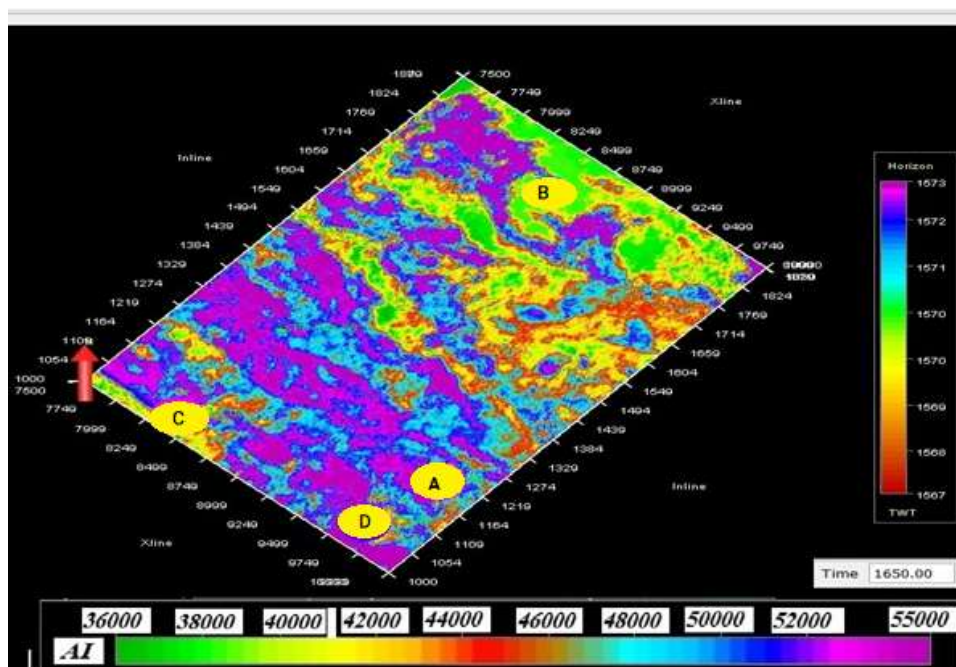
^۱Pick

^۲Load

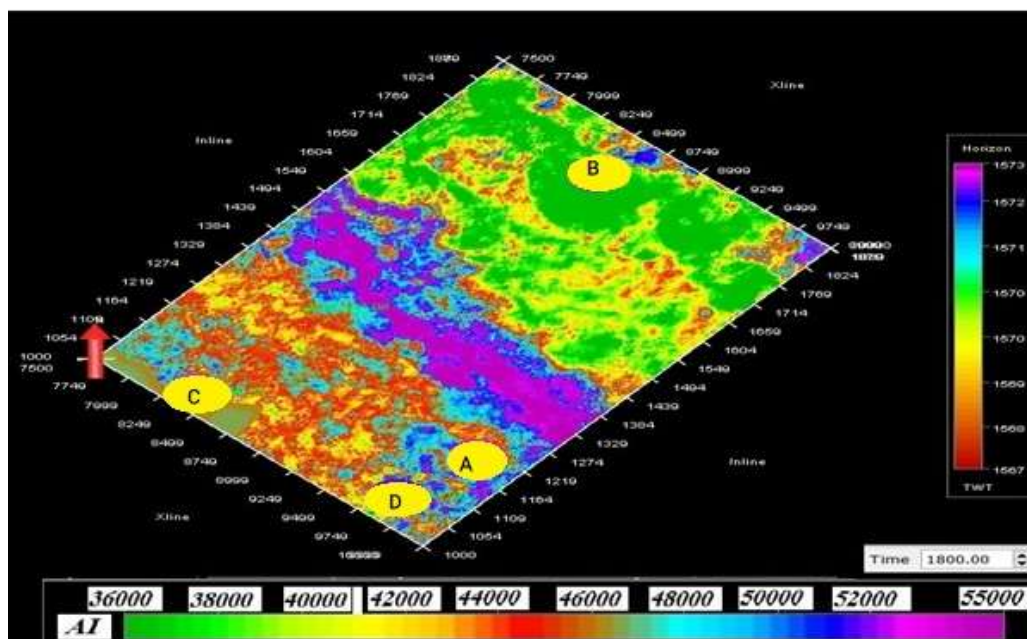
همچنین در اشکال (۳۱-۳) و (۳۲-۳) و (۳۳-۳) افق‌هایی به صورت نقشه عمق زمانی دیده می‌شوند که حائز اهمیت می‌باشد.



شکل (۳۱-۳) نقشه در عمق زمانی ۱۵۷۰ که در محدوده ۱ قرار دارد و دایره‌های رنگی محل قرارگرفتن چاه‌ها را نشان می‌دهند.



شکل (۳۲-۳) نقشه در عمق زمانی ۱۷۰۰ که در محدوده ۴ قرار دارد و دایره‌های رنگی محل قرارگرفتن چاه‌ها را نشان می‌دهند.



شکل (۳-۳) نقشه در عمق زمانی ۱۸۰۰ که در محدوده سازند مورد مطالعه قرار دارد و دایره‌های رنگی محل قرار گرفتن چاه‌ها را نشان می‌دهند.

۳-۵ محاسبه موجک و تهیه ردلرزه مصنوعی

پس از وارد کردن چاه‌ها، داده‌های لرزه‌ای و نیز افق‌های لرزه‌ای مورد نیاز در مرحله‌ی بعد نوبت به استخراج موجک می‌رسد. استخراج موجک یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها می‌باشد که به روش‌های زیادی قابل انجام است و می‌تواند به طور مستقیم بر روی نتایج وارون‌سازی و ردلرزه مصنوعی ایجاد شده تأثیر گذارد.

در این مرحله پس از تعیین هر موجک در نرم‌افزار، ردلرزه مصنوعی مطابق با آن موجک ساخته می‌شود و سپس ضریب تطابق آن با داده‌های لرزه‌ای واقعی محاسبه می‌گردد. به این ترتیب ردلرزه مناسب شناسایی و انتخاب می‌شود. استخراج موجک در این مرحله به صورت خودکار در نرم‌افزار همپسون راسل انجام

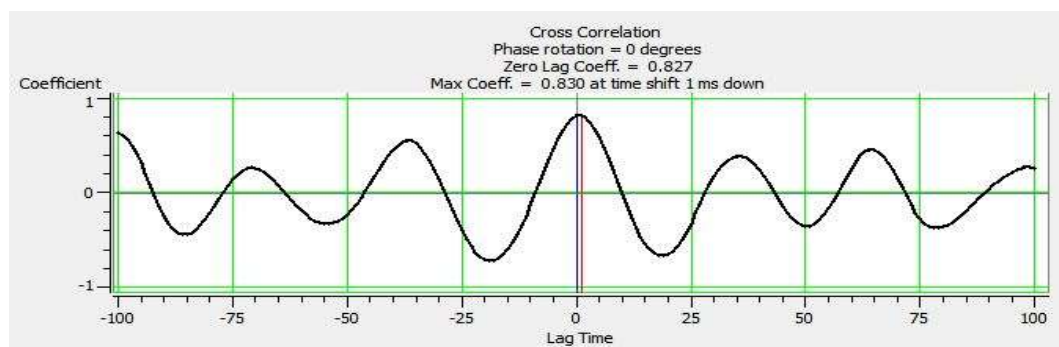
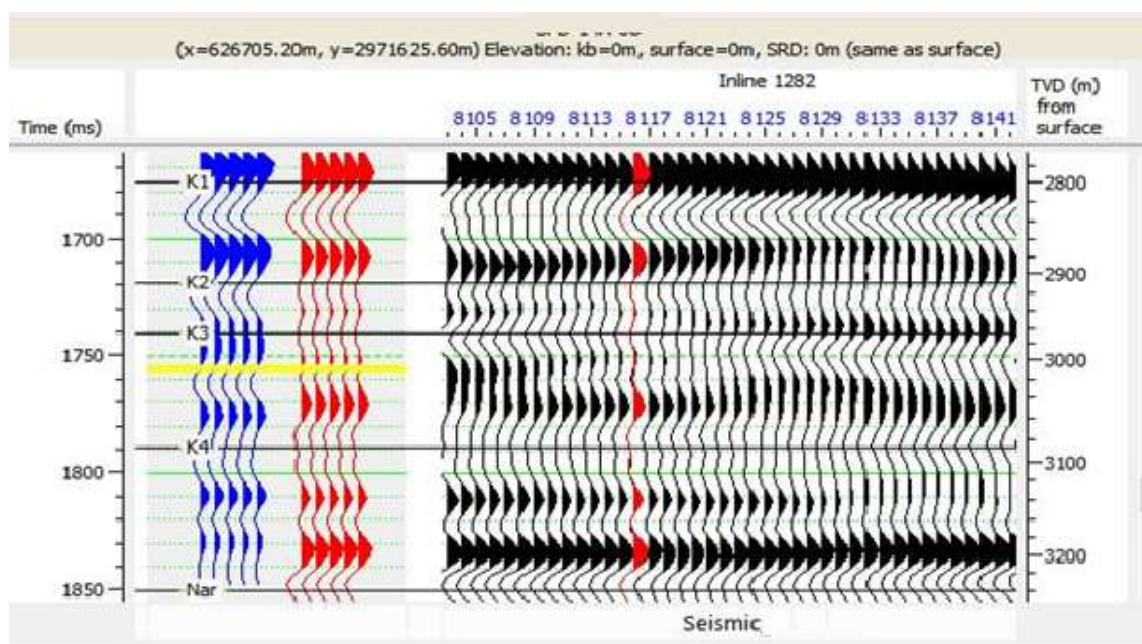
می‌شود، ولی لازم است برای همبستگی بهتر ردلرزه مصنوعی و داده‌های لرزه‌ای واقعی بهترین و مناسب‌ترین موجک انتخاب شود. درواقع با این کار، اثر چشمه لرزه‌ای بازسازی می‌شود.

در این نرم افزار به دو روش کلی موجک استخراج می‌شود، در روش اول تخمین موجک به روش آماری بدست می‌آید که تنها با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و بدون استفاده از داده‌های چاه (نگارهای صوتی و چگالی)، برای ردلرزه‌های اطراف هر چاه به‌طور جداگانه اقدام به محاسبه موجک می‌شود. برای بالا بردن ضریب انطباق، محاسبه موجک تنها به بخش مخزنی مورد نظر محدود شد. انجام این مرحله، بیشتر برای حصول اطمینان از صحت منحنی‌های عمقی زمانی بود و استفاده خاصی از موجک‌های به دست آمده از این مرحله نشد که در برای تمامی چاه‌های مورد استفاده تطابق بالای ۶۰٪ به دست آمد.

در مرحله بعد به محاسبه موجک با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه برای تک‌تک چاه‌ها اقدام شد. در انتها پس از تعریف موجک در نرم‌افزار ردلرزه مصنوعی مطابق آن در محل چاه‌ها ساخته می‌شود و ضریب همبستگی آن با داده‌های لرزه‌ای واقعی محاسبه می‌گردد. همان‌طور که گفته شد مدل اولیه برای وارون سازی بر اساس ردلرزه مصنوعی ساخته می‌شود، لذا باید رد لرزه مصنوعی با دقت ساخته شود که در این مرحله می‌توان با شیفت دادن، کشیدن و فشردن لرزه نگاشت مصنوعی در محل چاه، ضریب همبستگی بین رد لرزه مصنوعی و داده‌های لرزه‌ای واقعی را افزایش داد.

در شکل ۳-۳۴ لرزه نگاشت مصنوعی ساخته شده با استفاده از موجک محاسبه شده در این مرحله، برای چاه E به‌عنوان نمونه نمایش داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که لرزه نگاشت مصنوعی و حقیقی

دارای انطباق خوبی هستند و به‌طور کلی برای همه چاه‌ها ضریب همبستگی بالای ۸۰٪ به دست آمد.



شکل (۳-۳۴) لرزه نگاشت مصنوعی (آبی) که حاصل هم‌میخت موجک استخراج شده با ضرایب بازتاب ایجاد شده از حاصل

ضرب نگار صوتی در نگار چگالی در محل چاه E می‌باشد. لرزه نگاشت قرمز رنگ داده‌ی لرزه‌ای واقعی در آن محل

می‌باشد. در شکل پایین مقدار همبستگی دو رد لرزه مصنوعی و واقعی نشان داده شده است که ضریب همبستگی ۸۲٪ در

این چاه در لگ صفر به دست آمده است که نشان دهنده انطباق خوبی بین لرزه نگاشت مصنوعی و حقیقی است.

در نهایت موجک منتخب با مشخصات زیر به دست آمد:

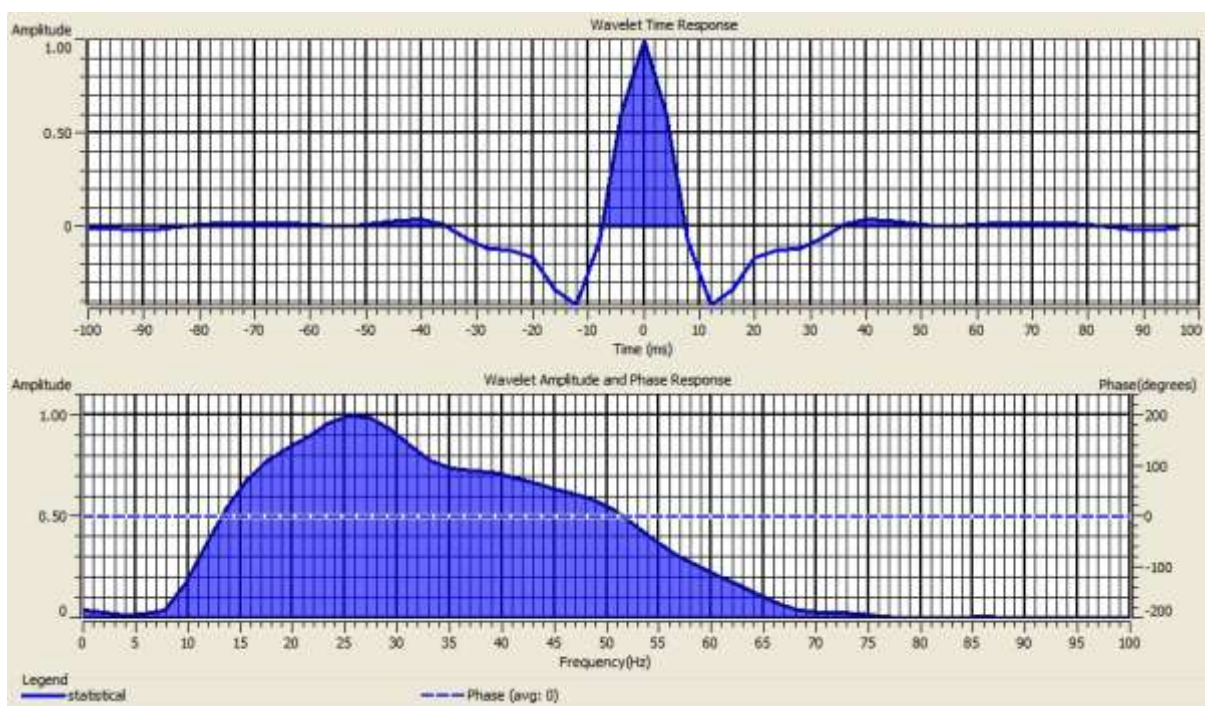
- طول موج: ۲۰۰ میلی ثانیه

- طول باریکه: ۲۵ میلی ثانیه

- فاز میانگین: ۰ درجه

- فرکانس غالب: حدود ۲۶ هرتز

در شکل ۳-۳۵، موجک مناسب و منتخب، در حوزه زمان، حوزه فرکانس و فاز نمایش داده شده است.



شکل (۳-۳۵) نمایش موجک منتخب در حوزه زمان (بالا). نمایش موجک منتخب در حوزه فرکانس و فاز (پایین).

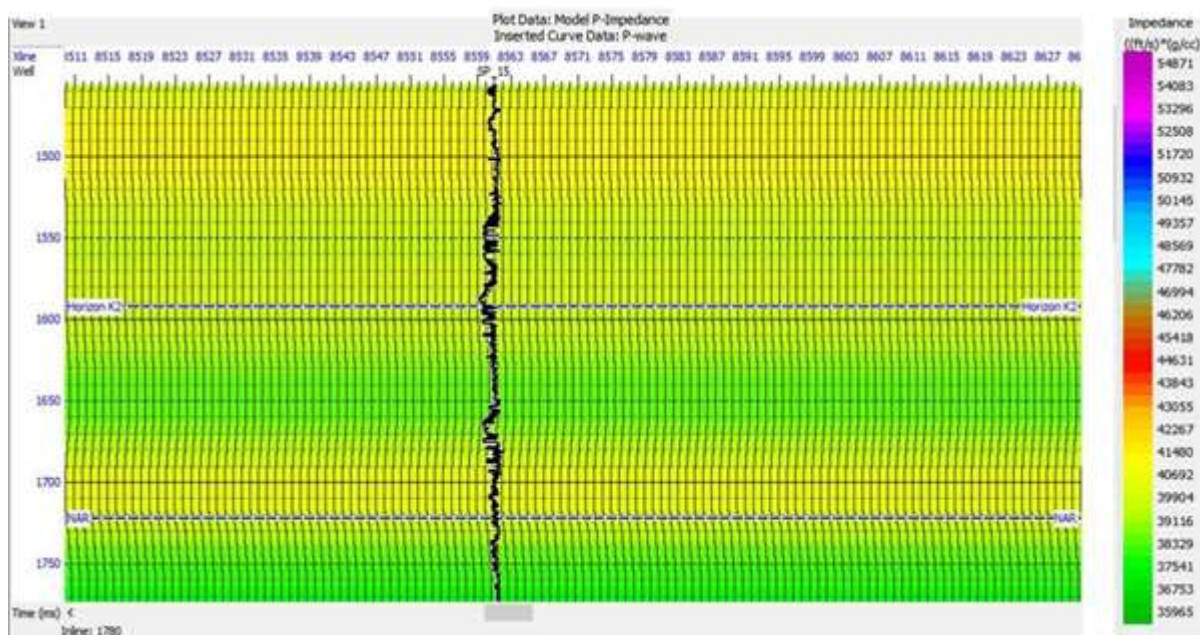
۳-۶ ایجاد مدل اولیه

پس از استخراج یک موجک مناسب در مرحله بعد نوبت به ساختن یک مدل اولیه می‌رسد. برای محاسبه این مدل ابتدا از ترکیب نگارهای چگالی و صوتی یک نگار مقاومت صوتی در محل چاه به دست می‌آید سپس با بررسی رابطه میان این نگار مقاومت صوتی و ردلرزه‌ی هم موقعیت آن در چاه، رابطه‌ای برای ردلرزه و مقاومت صوتی به دست می‌آید.

سپس به کمک درون‌یابی، این رابطه بر روی تمام ردلرزه‌ها اعمال شده و به این ترتیب یک مدل مقاومت صوتی اولیه در محدوده مورد نظر (در اینجا محدوده مخزنی مورد نظر می‌باشد) حاصل می‌گردد.

این مدل اولیه عموماً یک مدل زمین‌شناسی می‌باشد که معمولاً از آن برای ساخت قسمت‌های فرکانس پایین استفاده می‌شود چرا که وارون‌سازی در محدوده فرکانس پایین نتایج مطلوبی نمی‌دهد در نتیجه می‌توان با استفاده از مدل زمین‌شناسی این داده‌ها را جایگزین کرد.

در شکل ۳-۳۶ مدل اولیه ساخته‌شده در این قسمت، در یک مقطع طولی نمونه (inline ۱۷۸۰) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳۶) مدل اولیه ایجادشده با اعمال فیلتر پایین گذر ۱۰ هرتز.

۳-۷ وارون سازی

تا اینجا، یک موجک میانگین مناسب استخراج گردیده و همچنین مدل سه بعدی اولیه مقاومت صوتی نیز تعیین گردید. با ایجاد موجک مناسب و ساخت مدل اولیه تمامی اطلاعات مورد نیاز برای وارون سازی فراهم گردید که شامل نگارهای صوتی، چگالی و افق‌های لرزه‌ای، داده‌های لرزه‌ای و نیز موجک و مدل اولیه می‌باشد. تئوری وارون سازی در بخش اول این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، وارون سازی توسط روش قطعی بر پایه مدل انجام می‌شود.

این روش با الگوریتم وارون سازی خطی عمومی^۱ (GLI) انجام می‌شود که در آن مدل آنقدر تغییر داده می‌شود که ردلرزه‌های مصنوعی به دست آمده توسط آن، همخوانی خوبی با ردلرزه‌های واقعی داشته باشند. البته این تغییرات در محدوده‌ای منطقی که کاربر تعریف می‌کند انجام می‌شود.

^۱ Generalized linear inversion

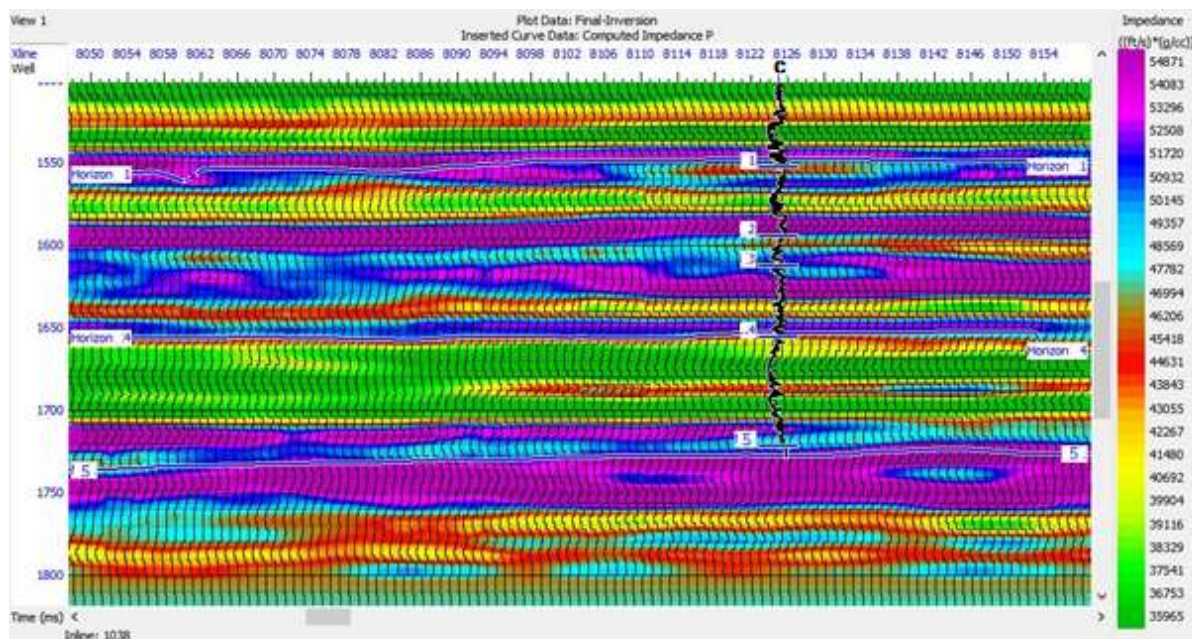
این روش به این صورت انجام می‌شود که با فرض این که موجک لرزه‌ای مشخص است با استفاده از این موجک و مدل اولیه ایجاد شده یک ردلرزه مصنوعی ساخته می‌شود. سپس مدل مقاومت صوتی آنقدر تغییر می‌کند که ردلرزه‌های مصنوعی ایجاد شده توسط این مدل به هم‌خوانی خوبی با ردلرزه‌های واقعی دست یابند. برای اینکه الگوریتم در مسیر نادرستی قرار نگیرد و جلوگیری از نوفه و خطای مدل‌سازی کاربر می‌تواند در این روش محدودیت‌های منطقی ایجاد نماید. محدودیت‌ها و پارامترهایی که برای این روش مورد استفاده قرار گرفته‌اند در جدول ۲-۳ آورده شده‌اند.

جدول ۲-۳ پارامترهای روش مورد استفاده در وارون‌سازی به روش بر پایه مدل

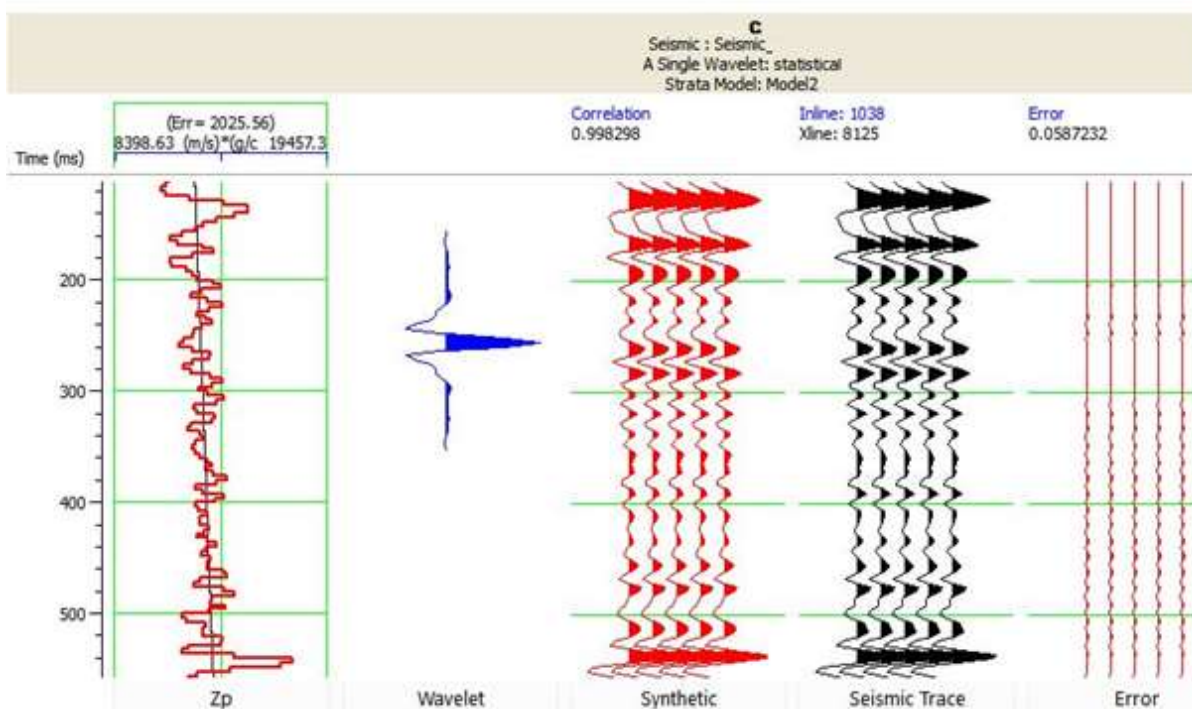
Average block size	4ms
Number of iterations	30
Prewhitening	1%
Processing sample rate	4ms
Constraint	Hard constraint (Lower 100% and Upper 100%)

در نهایت مدل مقاومت صوتی سه بعدی ایجاد می‌شود که در شکل ۳-۳۷ یک مقطع طولی نمونه از مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی برای inline 1038 که از چاه C می‌گذرد، نشان داده شده است.

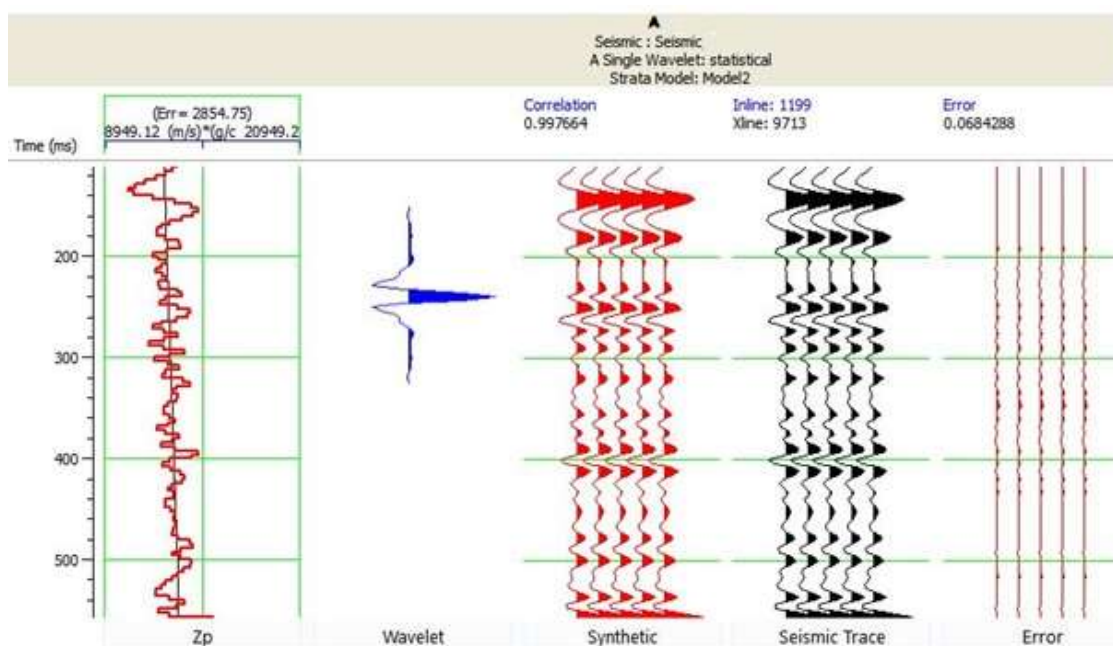
برای بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده در وارون‌سازی انجام گرفته در این مرحله می‌توان نتایج حاصل در محل هر چاه بررسی نموده و در صورت نیاز با تغییر مدل اولیه و یا پارامترهای محدود کننده وارون‌سازی مجدد انجام داده و نتایج را تغییر دهیم. در شکل‌های ۳-۳۸ و ۳-۳۹ نتایج روش وارون‌سازی بر پایه مدل برای چاه شماره A و C نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۷ مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی بر پایه مدل، برای inline 1038 که از چاه شماره C می گذرد.

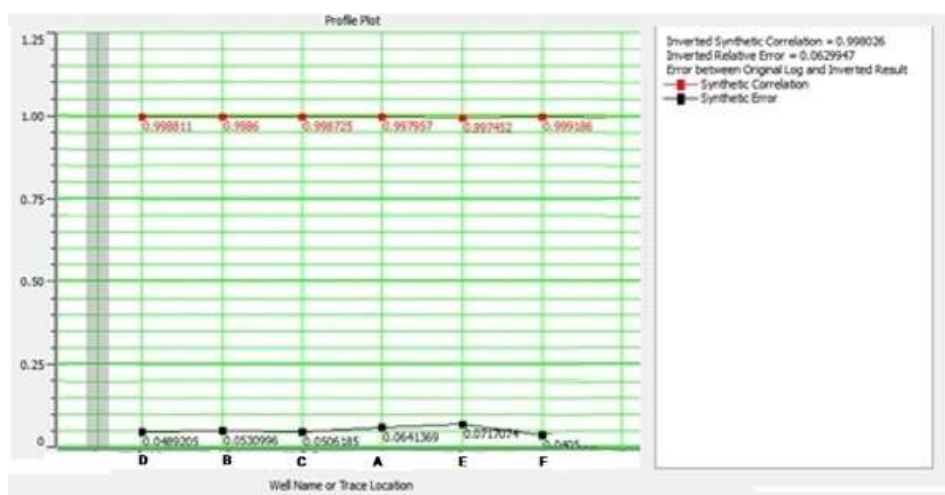


شکل ۳-۳۸ بررسی نتایج حاصل از وارون سازی بر پایه مدل در چاه C.



شکل ۳-۳۹ نتایج حاصل از وارون سازی بر پایه مدل در چاه A.

در نهایت پروفیل همبستگی میان لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از وارون سازی بر پایه مدل و لرزه نگاشت واقعی در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است که نشان می دهد نتایج حاصل از وارون سازی قابل اعتماد بوده و مقاومت صوتی سه بعدی به دست آمده قابل اعتبار می باشد.



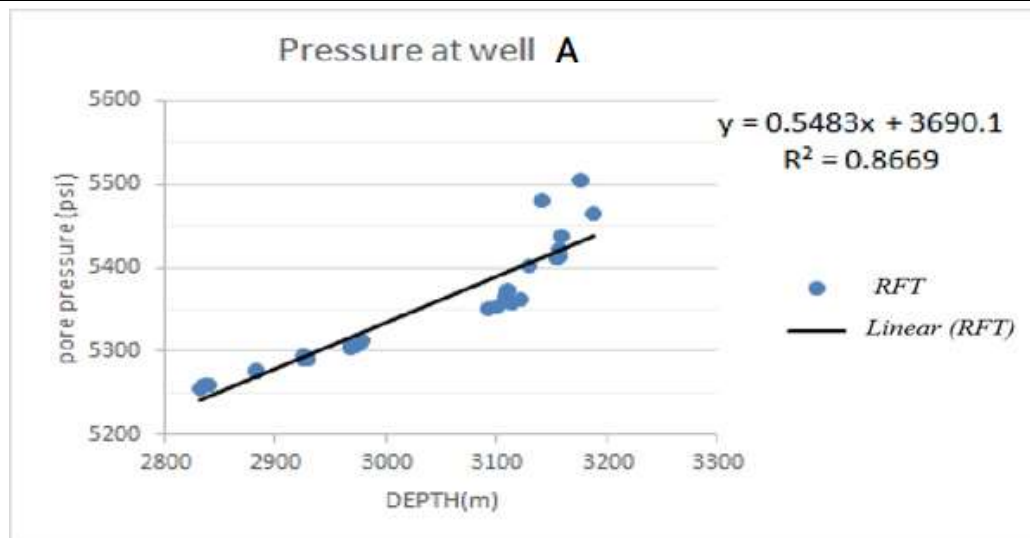
شکل ۳-۴۰ پروفیل همبستگی لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از وارون سازی با لرزه نگاشت واقعی در چاه های مورد استفاده.

۳-۸ تخمین فشار منفذی

تا اینجا یک مکعب مقاومت صوتی در محدوده‌ی مخزن با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای محاسبه شد. هدف اصلی این پژوهش تخمین فشار منفذی با استفاده از رابطه‌ی مستقیم از روی مقاومت صوتی می‌باشد که به تئوری آن در بخش‌های قبل این پژوهش پرداخته شد. پس با توجه به اینکه مقاومت صوتی در محدوده مورد مطالعه محاسبه گردید در اینجا نیازمند رابطه‌ای میان مقاومت صوتی و فشار منفذی هستیم تا به وسیله آن بتوان مقدار فشار منفذی را محاسبه نمود.

همانطور که قبلاً گفته شد روش‌های زیادی برای تخمین فشار وجود دارد که از پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های ایتون و باورز اشاره نمود که در بخش چهارم این پژوهش روش‌های مختلف تخمین فشار مورد بررسی قرار گرفت. روش تخمین فشار منفذی با استفاده مستقیم از مقاومت صوتی می‌تواند فشار منفذی را تنها بصورت یک معادله‌ی پیوسته تک مجهولی ساده از مقاومت صوتی محاسبه نماید.

همانطور که در فصل‌های گذشته اشاره شد، پس از حفر چاه‌های منطقه، به منظور بدست آوردن مقدار فشار در سازندهای اصلی و تولیدی چاه‌ها، فشار منفذی را با استفاده از آزمایشات فشار همانند RFT و یا DST اندازه‌گیری می‌کنند. در میدان مورد مطالعه نیز نتایج این آزمایشات در ۴ چاه موجود می‌باشد. با مطالعه این داده‌ها مشاهده می‌شود که روند افزایش فشار دارای روندی عادی با شیب ثابت می‌باشد، در شکل ۳-۴۱ نمودار داده‌های فشار در مقابل عمق برای چاه A رسم شده است.



شکل (۳-۴۱) نمودار داده‌های فشار حاصل از آزمایش RFT برحسب psi در مقابل عمق برحسب متر برای چاه A. با استفاده از مکعب مقاومت صوتی محاسبه شده در قسمت قبل و داشتن داده‌های فشار می‌توان فشار موثر را در این چاه‌ها برای چند نقطه محاسبه کرد. برای ایجاد رابطه بین داده‌های سرعت و فشار موثر از رابطه باورز استفاده شده است و در اینجا برای تاکید بیشتر ذکر می‌شود:

$$V = V_0 + AP_{\text{effective}}^B \quad (۳-۲۹)$$

که در این رابطه V_0 سرعت در فشار موثر صفر برحسب ft/s و V سرعت در عمق مورد نظر برحسب ft/s می‌باشد. A و B ثابت‌های رابطه باورز می‌باشند و $P_{\text{effective}}$ فشار موثر در عمق مورد نظر برحسب psi می‌باشد.

با ضرب چگالی در سرعت می‌توان رابطه فوق را به شکل زیر نوشت:

$$AI = AI_0 + aP_{\text{effective}}^b \quad (۳-۳۰)$$

که در این رابطه AI_0 مقاومت صوتی در فشار موثر صفر و AI مقاومت صوتی در عمق مورد نظر برحسب $(\frac{ft}{s} \cdot \frac{gr}{cc})$ می‌باشد. a و b ثابت‌های رابطه باورز می‌باشند و $P_{\text{effective}}$ فشار موثر در عمق مورد نظر برحسب psi می‌باشد.

جهت پردازش منحنی و بدست آوردن ضرایب رابطه باورز، ابتدا باید مقدار AI_0 انتخاب شود. برای این منظور از دوطرف رابطه فوق لگاریتم می‌گیریم تا رابطه به شکل زیر بدست آید:

$$\ln(AI - AI_0) = \ln a + b \ln P_{eff} \quad (3-31)$$

با توجه به داده‌های سرعت و چگالی در میدان مورد مطالعه AI_0 دارای مقادیری بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ بر حسب $(\frac{ft}{s} \cdot \frac{gr}{cc})$ می‌باشد که بطور میانگین برابر ۱۰۵۰۰ در نظر گرفته شده است.

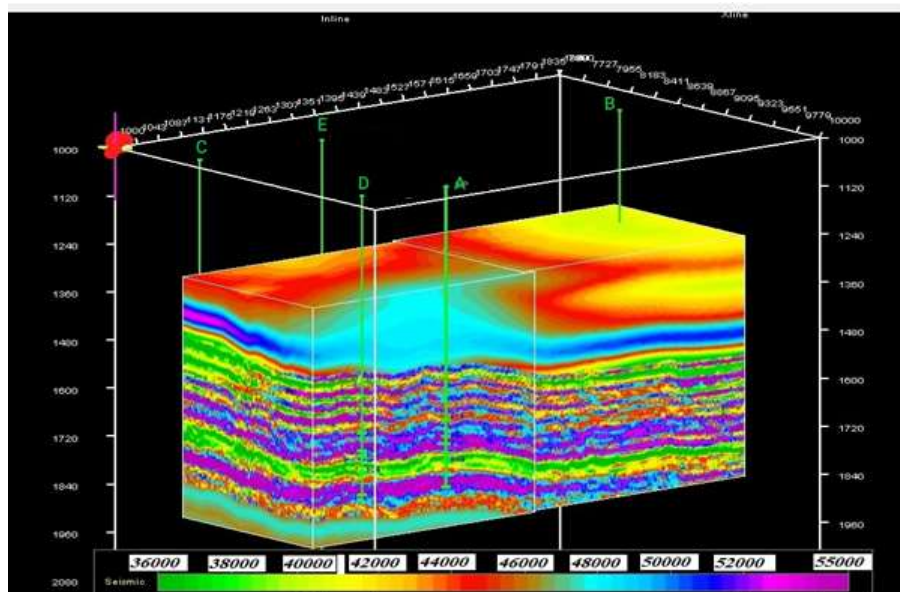
همانطور که از این رابطه مشخص است برای محاسبه فشار منفذی پس از تعیین مقاومت صوتی که در قسمت قبل با استفاده از وارون‌سازی لرزه‌ای محاسبه گردید، تنها کافی است ضرایب ثابت a و b را با کالیبره کردن این رابطه در محل چاه‌هایی که در آن مقادیر فشار و مقاومت معلوم هستند به دست آورد، تا در ادامه با استفاده از رابطه ترزاقی که در زیر نشان داده شده مقدار فشار منفذی در کل محدوده‌ی مورد نظر محاسبه گردد.

$$\sigma = S - P \quad (3-32)$$

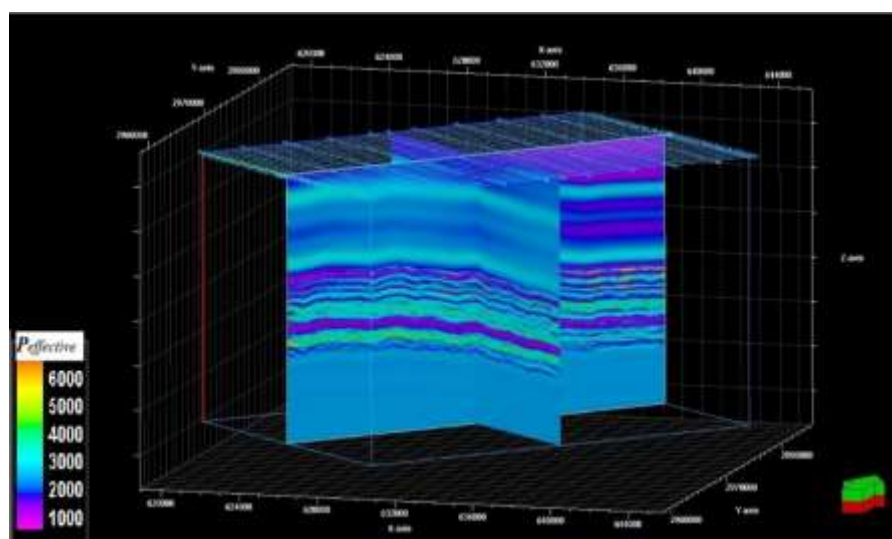
۳-۹ ساخت مکعب فشار منفذی

با استفاده از روابط ۳-۲۹ تا ۳-۳۲ در قسمت قبل و تعیین ضرایب ثابت این معادلات، به رابطه‌ای رسیدیم که با قرار دادن مقدار مقاومت در آن می‌توان مقدار فشار منفذی را در هر نقطه بدست آورد. برای محاسبه مقدار فشار منفذی با استفاده از رابطه بدست آمده در اینجا از نرم افزار پترل استفاده شده است. در قسمت ایجاد نشانگر محاسباتی این نرم‌افزار محاسبه فشار با رابطه مورد نظر از روی مقاومت صوتی امکان‌پذیر است. ابتدا مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای که به منطقه‌ای در اطراف محدوده مخزن محدود شده است و از نرم‌افزار همپسون راسل خروجی گرفته شده است، در نرم‌افزار پترل وارد می‌شود.

شکل ۳-۴۲ مکعب مقاومت صوتی خروجی از فرآیند وارون‌سازی در نرم‌افزار همپسون راسل را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار پترل وارد شده است.

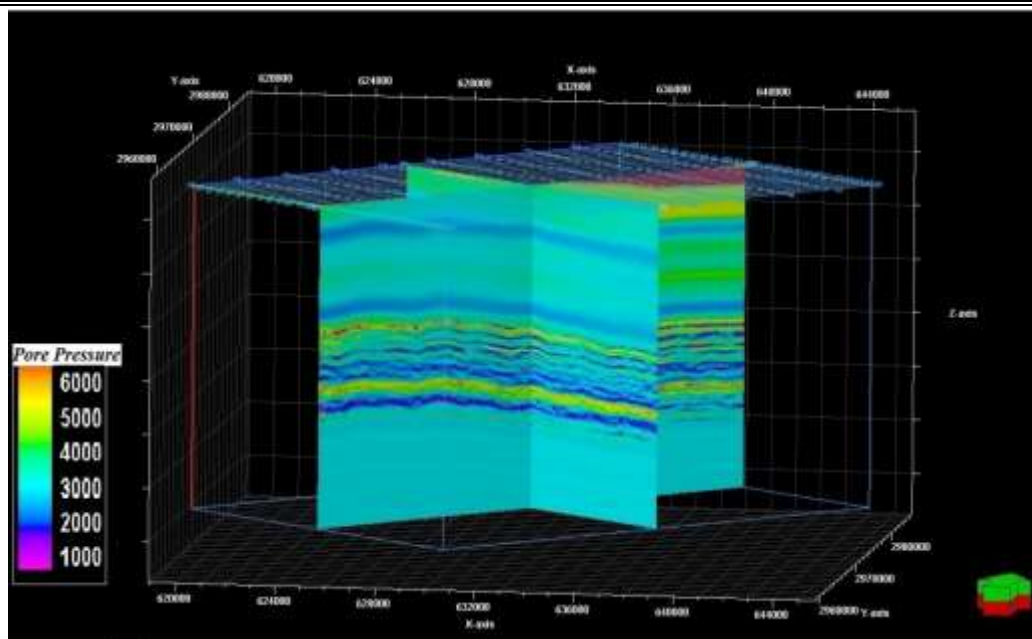


شکل ۳-۴۲ ساخت مکعب مقاومت صوتی برای محدوده مورد مطالعه در نرم افزار همپسون راسل.



شکل (۳-۴۳) مکعب فشار موثر در میدان مورد مطالعه از سازند ۱ تا ۵.

بنابراین با استفاده از رابطه باورز بدست آمده، مکعب فشار موثر ساخته می‌شود (شکل ۳-۴۳) سپس در مرحله بعد و با استفاده از رابطه ترزاقی و مکعب فشار موثر تولید شده، مکعب فشار منفذی حاصل می‌شود (شکل ۴-۴۴).



شکل (۳-۴۴) مکعب فشار منفذی در میدان مورد مطالعه از سازند ۱ تا ۵.

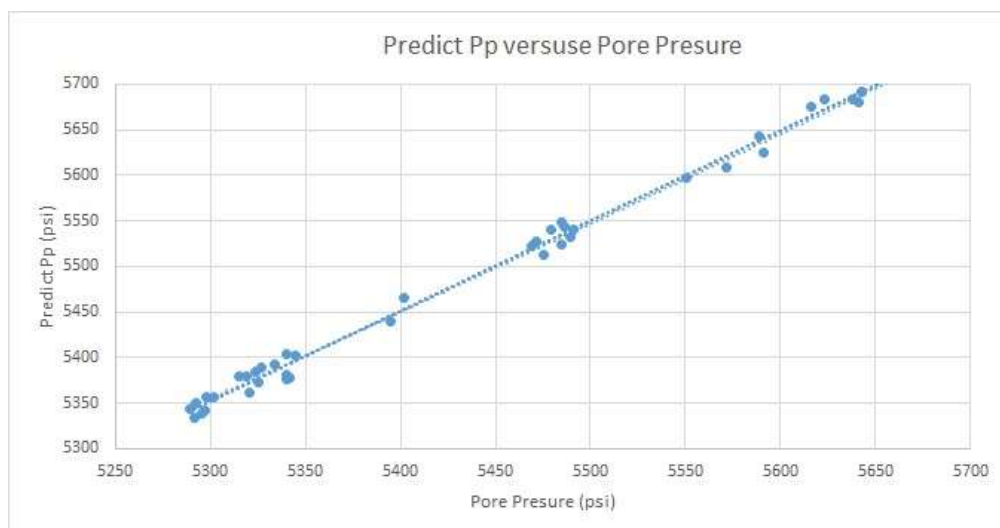
۳-۱۰ کنترل کیفی نتایج فشار منفذی تخمین زده شده

تا به اینجا با کالیبره کردن رابطه بیان شده برای تخمین فشار از روی مقاومت صوتی، مکعب فشار منفذی نهایی در محدوده مخزنی به دست آمد. همانند مراحل که برای وارون سازی وجود داشت و نیز برای همه تخمین هایی که انجام می گیرد، طبیعی است که برای اطمینان از نتایج به دست آمده، باید مکعب فشار منفذی تولید شده کنترل کیفیت شود.

برای این منظور از ابتدای مطالعه داده های چاه شماره E در هیچ یک از مراحل کار (وارون سازی و کالیبره کردن رابطه فشار-مقاومت) مورد استفاده قرار نگرفت تا به عنوان معیاری در تشخیص موفقیت مطالعه تخمین فشار منفذی مورد استفاده قرار گیرند.

برای این کار باید مقادیر فشار منفذی که با استفاده از رابطه کالیبره شده فشار-مقاومت به دست می آید را با مقادیر واقعی فشار اندازه گیری شده در محل این چاه مقایسه کنیم. در شکل ۳-۴۵ نتایج حاصل از مقایسه این داده ها نشان دهنده قابل اطمینان بودن فشار منفذی به دست آمده می باشد. در این شکل

نقاط آبی رنگ مقدار فشار اندازه‌گیری شده واقعی در محل چاه را برحسب عمق نشان می‌دهد و نقاط قرمز رنگ مقادیر به‌دست‌آمده برای فشار منفذی از رابطه مستقیم فشار-مقاومت را برحسب عمق نشان می‌دهد.

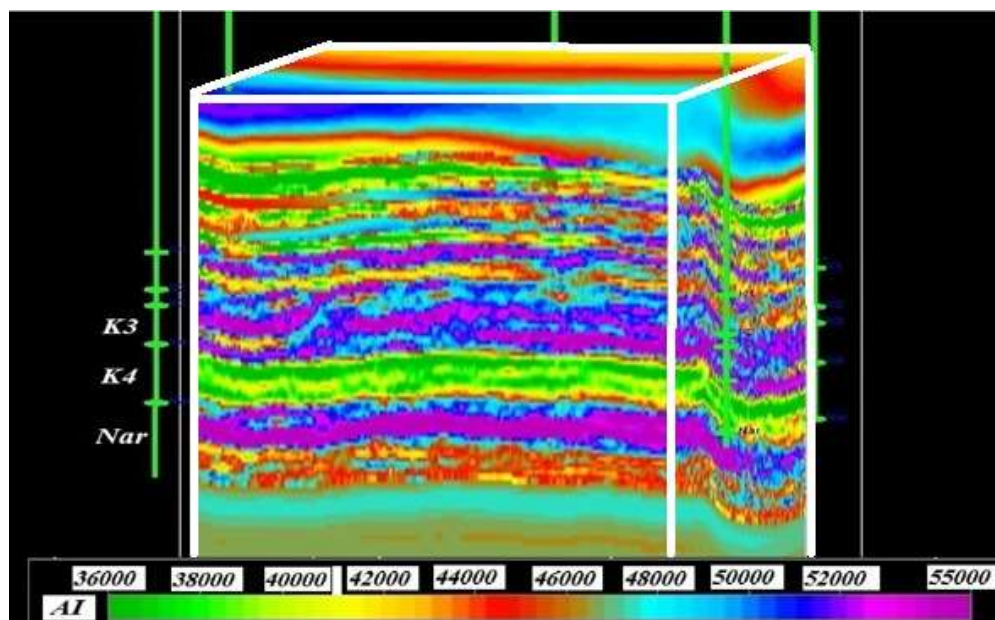


شکل (۳-۴۵) مقایسه مقادیر فشار منفذی تخمین زده شده در محل چاه E.

در کارهای مربوط به تخمین و پیش‌بینی یک پارامتر شاید آزمودن نتایج به تنهایی با داده‌های تست شده کافی به نظر آید. در اینجا نیز با کنار گذاشتن داده‌های فشار مربوط به چاه E از تمامی مراحل انجام این پروژه و مقایسه‌ی نتیجه‌ی به‌دست آمده برای این چاه با مقادیر فشار منفذی به نوعی اعتبار سنجی این تخمین انجام داده شد.

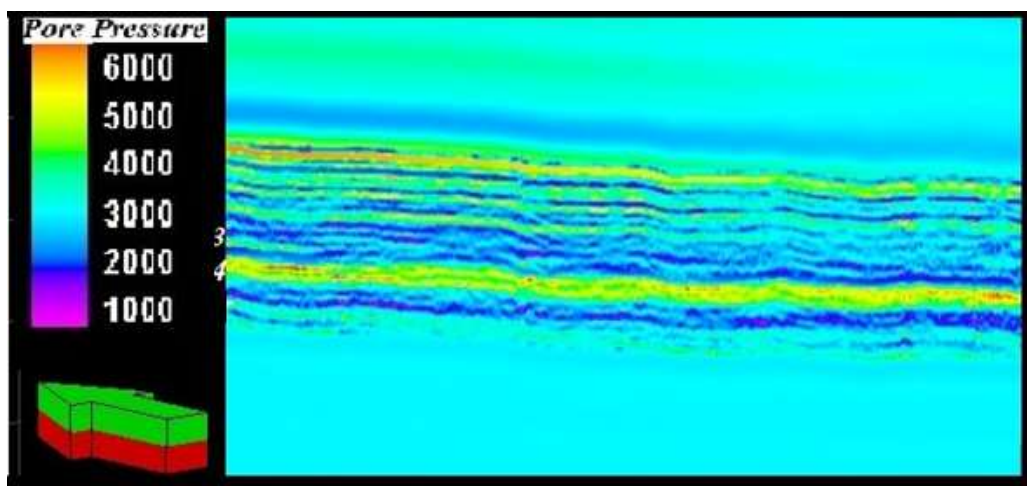
ولی در ژئوفیزیک معمولاً علاوه بر بررسی کمی و تعیین مقدار خطا برای برآورد مقدار دقت یک فرایند بررسی‌های کیفی نیز انجام می‌گیرد و نتایج حاصله باید از نظر تفسیرپذیری نیز مورد ارزیابی قرار گیرند. از آنجایی که در روش مورد بحث در این پژوهش تخمین فشار منفذی مورد نظر است لذا اعتبار سنجی نتایج حاصل از وارون‌سازی و تعیین مقاومت صوتی نیز به نوبه‌ی خود از اهمیت فراوانی برخوردار است. در قسمت مربوط به تعیین مقاومت صوتی از روی وارون‌سازی به بررسی و تحلیل کمی و کیفی نتایج حاصل از وارون‌سازی پرداخته شد. در اینجا نیز نتایج حاصل را از نظر کیفی بررسی خواهیم کرد.

در شکل ۳-۴۶ مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی نشان داده شده است. از نظر تفسیرپذیری و نتایج کیفی انتظار می رود که در بالا و پایین مخزن دو لایه با مقاومت صوتی بالا وجود داشته باشند. با توجه به شکل ۳-۴۷ مشاهده می شود که در محدوده ی مخزن همان گونه که انتظار می رفت مقدار مقاومت صوتی پایین است (لایه ۴ با رنگ سبز) همچنین بالا و پایین مخزن دارای بیشترین مقاومت صوتی در این محدوده (با رنگ بنفش) می باشند که در واقع به نوعی تفسیرپذیری نتایج مقاومت صوتی و درستی وارون سازی را نشان می دهد.



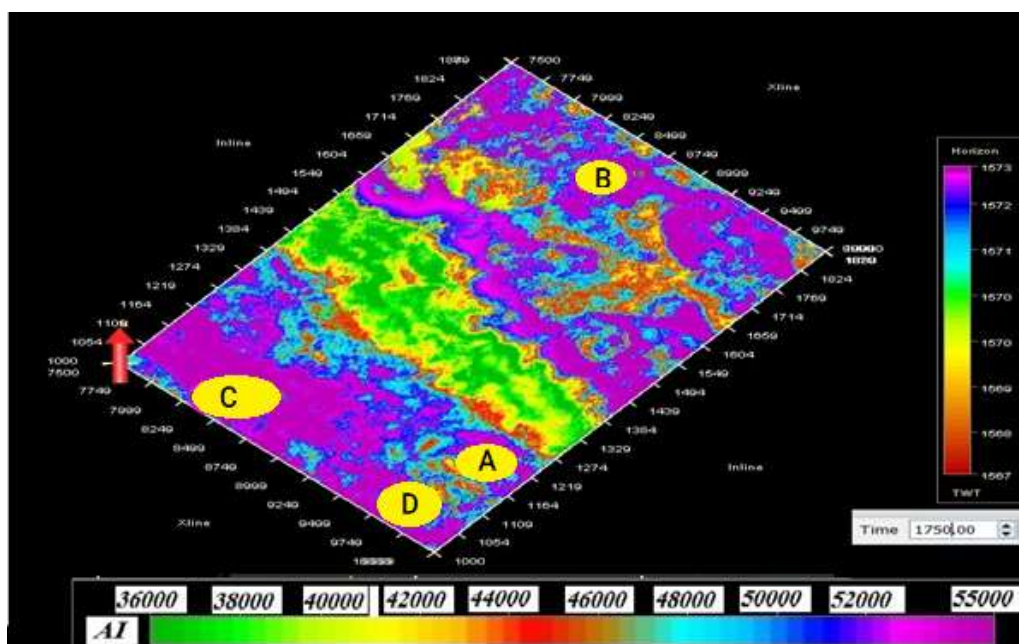
شکل ۴-۴۶ مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی.

در شکل ۳-۴۶ فشار منفذی متناسب با مقطع طولی موردنظر (inline 1440) نشان داده شده است. آنچه برای فشار منفذی انتظار می رود این است که در مخزن افزایش فشار نسبت به نواحی اطراف وجود داشته باشد بنابراین انتظار می رود این منطقه ی با فشار بالا میان دو لایه ی کم فشار محبوس باشد که با توجه به فشار تخمین زده شده در شکل ۴-۴۷ این ویژگی ها قابل مشاهده هستند.



شکل ۳-۴۷ فشار منفذی به دست آمده از مقاومت صوتی در مقطع طولی inline 1440.

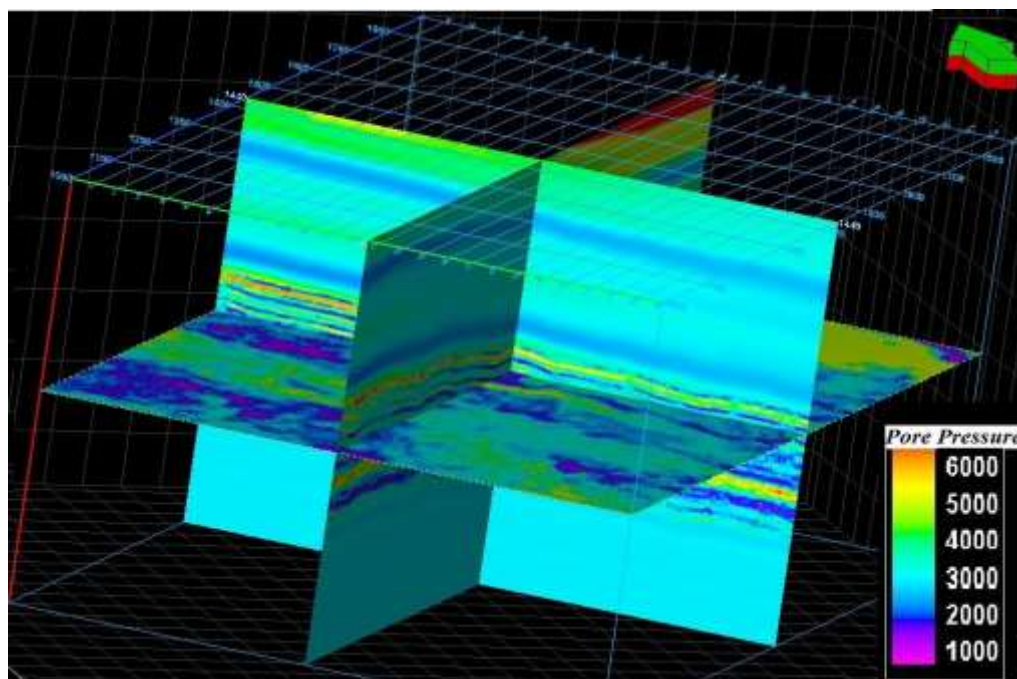
یکی دیگر از نکاتی که در تفسیرپذیری نتایج راه گشا است مشاهده‌ی یک مقطع زمانی (یا عمقی) از مقاومت صوتی ایجاد شده در مکعب داده‌ها است. در شکل ۳-۴۸ یک مقطع زمانی در محدوده‌ی مخزن نشان داده شده است. آنچه از این شکل مشخص است کاهش مقاومت در بخش میانی این مقطع است که این ویژگی نشان دهنده بالا بودن فشار منفذی در بخش میانی این مقطع بوده بنابراین در بخش میانی نسبت سنگ نفت‌ده به کل سنگ در دو طرف مخزن بهتر است.



شکل ۳-۴ مقاومت صوتی به دست آمده در مقطع زمانی ۱۷۵۰ (Z Slice).

در نهایت نتایج به دست آمده برای تخمین فشار منفذی به صورت یک حجم سه بعدی در محدوده مخزن محاسبه گردید که بایستی وزن گل حفاری مورد استفاده در چاه‌های آینده با توجه به مکعب فشار منفذی مورد بررسی قرار گیرد. که به عنوان یک نتیجه در قسمت‌های کم فشار مخزن به وزن گل حفاری کمتری نیاز است.

در شکل ۳-۴۹ به عنوان نتیجه نهایی، یک تصویر سه بعدی از مکعب به دست آمده برای فشار منفذی در سه راستای Inline، Cross line و Z Slice نشان داده شده است.



شکل ۳-۴۹ حجم سه بعدی به دست آمده برای مکعب فشار .

فصل چهارم

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتیجه گیری

روش‌های زیادی برای تخمین فشار منفذی وجود دارد که در این پژوهش به یکی از این روش‌ها پرداخته شد. به طور کلی در این مطالعه سعی شد تا با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری سه بعدی و دیگر داده‌های در دسترس و موجود در میدان مورد مطالعه، فشار منفذی تخمین شود. با توجه به این که مطالعات فشار در مخازن کربناته دنیا بسیار اندک می‌باشد، با این حال نتایج به دست آمده از این مطالعه تا حد قابل قبولی رضایت بخش می‌باشد. با توجه به موجود بودن داده‌های مورد استفاده در این مطالعه و عدم نیاز به برداشت داده جدید و صرف هزینه اضافی، می‌توان از این روش در مخازنی که با مشکل پیچیدگی توزیع فشار روبرو هستند استفاده کرد. در ادامه نتایج حاصل از این مطالعه ذکر می‌شود:

(۱) داده‌های حاصل از وارون سازی دارای ضریب همبستگی بالایی با مقادیر سرعت لرزه‌ای و چگالی به دست آمده از نگارهای چاه هستند. به علاوه این داده‌ها دارای نمونه‌برداری و پراکندگی زیادی نسبت به داده‌های چاه هستند که می‌توان از آن به عنوان پارامتر دوم در روش کوکریجینگ برای ساخت مکعب‌های سرعت و چگالی با وضوح بالا استفاده کرد.

(۲) برای تولید مکعب فشار موثر از رابطه بین سرعت و فشار موثر باورز استفاده شد. برای تولید ضرایب این رابطه از پردازش داده‌های فشار موثر و سرعت نگار صوتی در محل چاه استفاده شده است.

(۳) با استفاده از مکعب سرعت با وضوح بالا در محدوده مخزن و رابطه باورز فشار منفذی با دقت قابل قبولی به دست آمده و نتایج حاصل از کنترل کیفیت صحت این امر را تایید می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳-۲۳ مشاهده شد نتایج حاصل برای فشار در چاه E که در هیچ یک از مراحل انجام کار مشارکت داده نشده بود، نتایج کمی قابل قبولی برای فشار پیش‌بینی شده در این چاه‌ها

ارائه کرد. از طرف دیگر با بررسی کیفی و تفسیرپذیری نتایج حاصل برای فشار در بخش ۷-۸

این پژوهش، نتایج حاصل از لحاظ تفسیرپذیری و کیفی نیز مورد قبول واقع شدند.

(۴) نتایج به دست آمده برای فشار با استفاده از این روش در محدوده‌ی مخزن منطقه‌ای با فشار بالا

در دو لایه ۲ و ۴ که مابین لایه‌هایی با فشار پایین قرار دارند را نشان داد که در شکل ۳-۲۵

قابل مشاهده است. این نتیجه می‌تواند در تعیین محدوده‌ی مخزن و نیز در شناسایی منطقه‌ی

فشار بالا بسیار کمک کند و از نتایج این قسمت می‌توان در حفاری چاه‌های جدید استفاده نمود.

(۵) بنابراین از نتایج حاصل از تخمین فشار در این پژوهش می‌توان وزن گل حفاری مورد نیاز در

حفاری چاه‌های جدید را با توجه به مکعب فشار منفذی به دست آمده در این تحقیق تعیین نمود

و به عنوان یک نتیجه می‌توان پی برد که در حدود عمق زمانی ۱۷۵۰ قسمت‌های میانی مخزن

وزن گل حفاری بیشتری مورد نیاز می‌باشد.

(۶) از دیگر نتایجی که در این پژوهش می‌تواند قابل تأمل باشد، مشاهده‌ی موقعیت‌هایی در مخزن با

فشار بالا و نزدیک به فشار مخزن می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی نشت مخزن از این قسمت‌ها

و مهاجرت سیال در این نواحی باشد؛ بنابراین ارزیابی فشار سازندی نه تنها در جهت تنظیم وزن

گل حفاری است بلکه از آن در جهت مطالعه مخزن و نحوه مهاجرت سیالات نیز می‌توان استفاده

کرد.

(۷) اطلاعات فشار منفذی حاصل شده در این مطالعه می‌تواند ابزاری مفید در برنامه‌ریزی برای تعیین

یا تنظیم وزن گل حفاری و نصب لوله‌های جداری باشد. هر چند کاربرد اصلی این اطلاعات در

برنامه‌ریزی حفاری چاه‌های جدید در منطقه می‌باشد ولی می‌توان از آن در اکتشاف و بررسی

سازوکار گسل‌های منطقه نیز استفاده کرد.

پیشنهادهای

در این پژوهش هدف نهایی تعیین فشار منفذی بود که با توجه به مطالعه انجام شده، جهت تکمیل و تعریف پروژه‌های جدید موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به مطالعه انجام شده، جهت تکمیل و تعریف پروژه‌های جدید موارد زیر پیشنهاد می‌شود.
- ✓ ارزیابی فشار سازندی نه تنها در جهت تنظیم وزن گل حفاری است بلکه از آن در جهت مطالعه مخزن و نحوه مهاجرت سیالات نیز می‌توان استفاده کرد. لذا می‌توان در گام بعدی از داده‌های فشار در مطالعه مخازن و بررسی تحرک سیالات مخزن استفاده کرد.
- ✓ می‌توان تلاش نمود که با تعیین پارامترهای ثابت موجود در رابطه‌ی مورد استفاده در این تحقیق و تعیین محدوده‌های قابل قبول برای این ضرایب ثابت، خطای انسانی و یا وجود نویز در داده‌های فشار در هنگام کالیبره کردن رابطه و تعیین ضرایب را کاهش داد.
- ✓ علاوه بر پیشنهادات مربوط به توسعه‌ی رابطه‌ی مورد استفاده در این تحقیق می‌توان با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های فازی عصبی، روش‌های هوشمندتری برای تخمین فشار را مورد بررسی قرار داد.
- ✓ ترکیب نشانگرهای لرزه‌ای مناسب برای تخمین فشار با امپدانس صوتی.
- ✓ اعتبارسنجی این روش با دیگر روش‌های مرتبط با مهاجرت سیال مانند روش‌های شناسایی دودکش گازی به منظور بررسی و تعیین مناطق با فشار بالای غیرعادی.
- ✓ در این مطالعه از داده‌های برانبارش شده استفاده شد می‌توان از داده‌های قبل برانبارش در تخمین فشار منفذی استفاده کرد و نتایج را بررسی نمود.
- ✓ شناسایی نشانگرهای حساس به فشار منفذی غیرعادی.

فصل پنجم

ضمیمه

۵-۱ محاسبه فشار مخزنی با استفاده از نرم افزار PETREL

نرم افزار PETREL یک نرم افزارهای قدرتمند با محیط کاری ساده و عملیات سریع و افزایش کیفیت کار، مدل سازی سه بعدی را انجام می دهد. این نرم افزار قابلیت بارگذاری داده های منابع مختلف درمقیاس-های متفاوت از جمله داده های ژئوفیزیکی، داده های پتروفیزیکی، توصیف چاه ها، مدل های رسوبگذاری، نقشه های دوبعدی برای سطوح و خواص و داده های مهندسی مخزن را دارد. همه این اطلاعات به صورت یک قالب زمین شناسی با هم ترکیب می شوند. نتایج این مدل سازی به سرعت کیفی کنترل شده و تصحیح-پذیر است. این نرم افزار، ابزار پیشرفته مدیریت مخزن می باشد که به کاربر اجازه می دهد تا حداکثر بهره را با ساخت یک مدل سه بعدی از مخزن کسب نماید. مدل سازی سه بعدی به طور اولیه جهت اصلاح ساختمانی، تأیید شکل هندسی و تجسم نفت گیرهای پیچیده مورد استفاده قرار گرفت.

بازسازی دقیق سه بعدی تنها روشی است که پارامترهای نظیر استمرار افق های مخزنی کنترل کننده تولید هیدروکربن را مشخص می نماید (Hennings et al., 2000).

با ایجاد تجسم سه بعدی، به راحتی می توان داده های ورودی را از نظر کیفی کنترل کرد و فرایند تفسیر را توسط امکان برقراری ارتباط فضایی بین داده ها برای درک ساده آن ممکن می سازد. همچنین در مدل سه بعدی با استفاده از حداکثر اطلاعات می توان به تفسیر جامع تری از مخزن دست یافت. این در حالی است که مدل های دو بعدی چهره بسیار ساده تری از ساختمان واقعی مخزن ارائه می دهند. در واقع مدل سه بعدی بهترین مکانیزم برای ترکیب داده های موجود بوده و درک بهتری از پیچیدگی ساختمانی میدان و سایر ویژگی های مخزن را فراهم می آورد (Valcarce et al., 2006).

۵-۲ مدل‌های زمین‌شناسی مخزن

مدل‌های زمین‌شناسی مخزن معمولاً شامل چهار مرحله اصلی (Cosentino, 2001) است:

۱- مدل‌سازی چینه‌ای^۱

۲- مدل‌سازی ساختمانی^۲

۳- مدل‌سازی رخساره‌ای^۳ (لیتولوژی)

۴- مدل‌سازی پتروفیزیکی^۴

در مدل چینه‌نگاری، با استفاده از داده‌های چاه یک نقشه چینه‌نگاری تعریف می‌شود که مبنایی برای تطابق چاه‌ها به کار گرفته می‌شود. اطلاعات مورد استفاده در این مرحله شامل نمودارهای الکتریکی، صوتی و رادیواکتیو است که در صورت امکان با داده‌های تولیدی و مطالعات متخصصین دیگر با هم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. توسعه یک مدل چینه‌نگاری، بدون شک یکی از متداول‌ترین وظایف زمین‌شناسان مخزن است که باید انطباق چاه به چاه را با هدف تعریف افق‌های چینه‌ای که مرز سکانس‌های زمین‌شناسی‌اند را در سازندهای هیدروکربن‌دار انجام دهند.

در مدل‌سازی ساختمانی، ویژگی‌های هندسی و ساختاری مخزن به وسیله تعریف یک نقشه از رأس آن ساختمان و دسته گسل‌های که از آن عبور می‌کنند بازسازی می‌شوند. این مرحله از کار به کمک تفاسیر

¹ Stratigraphic Modelling

² Structural Modelling

³ Facies Modelling

⁴ Petrophysical Modelling

بررسی‌های لرزه‌ای نظیر نقشه‌های^۱ UGC و اطلاعات چاه انجام می‌گیرد. این بخش خود دارای دو مدل چینه‌ای^۲ و گسلی^۳ می‌باشد.

ویژگی‌های ساختاری مخزن، ارتباط لایه‌های مختلف مخزنی، شکل هندسی مخزن و تهیه نقشه رأس زون‌های مختلف در بخش مدل‌سازی چینه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. ویژگی‌های گسل‌ها، ارتباط گسل‌ها با یکدیگر، عمق اثر گسل و تأثیر آن بر ساختار هندسی مخزن در بخش مدل‌سازی گسلی اهمیت دارند.

برای مدل‌سازی رخساره، تعداد مشخصی از انواع لیتولوژی برای مخزن معرفی می‌شود که بر اساس سنگ-شناسی مناسب، رسوب شناسی و خواص پتروفیزیک تعیین می‌شوند. این دسته‌بندی در قالب رخساره روش مناسبی برای بیان خصوصیات زمین‌شناسی مخزن به ویژه برای اهداف بعدی مدل‌سازی سه‌بعدی مخزن محسوب می‌شود.

مدل‌های پتروفیزیکی، در واقع تفسیر کمی از نمودارهای چاه‌پیمایی برای تعیین برخی خصوصیات اصلی پتروفیزیکی سنگ مخزن از قبیل تخلخل، تراوایی و اشباع آب می‌باشد.

میزان تخلخل در لایه‌های مختلف و در طول و عرض و عمق مخزن، توزیع تراوایی و اشباع آب در مخزن، برای تعیین بهترین مکان‌ها جهت تولید هیدروکربن از یک مخزن که کمک قابل توجهی به تعیین بهترین مکان‌های حفاری در آینده و کاهش ریسک حفاری و صرفه‌جویی در هزینه‌های حفاری چاه‌ها می‌کند، در مدل‌سازی پتروفیزیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تهیه هریک از این مدل‌ها (ساختاری، چینه‌ای،

¹ User-generated Content

² Horizon Modelling

³ Fault Modelling

رخساره‌ای و پتروفیزیکی) و میزان دقت در انجام هر مرحله، تعیین کننده‌ی دقت نهایی برآورد از مخزن می‌باشد. بنابراین بایستی جریان مدل‌سازی را چندین بار تکرار کرد و بهترین و منطقی‌ترین برآورد را که با ایده‌های زمین‌شناسی همخوانی بیشتری دارد، مورد استفاده قرار داد. نتایج این مراحل مختلف ذکر شده، منبعی برای محاسبه هیدروکربن درجا مخزن بوده و مبنای اولیه برای مدل‌سازی دینامیک قلمداد می‌شوند. به مدل‌های رخساره‌ای و پتروفیزیکی در مجموع به آن‌ها مدل خواص مخزنی^۱ نیز گفته می‌شود. با توجه به مطالب فوق و ترتیب مدل‌های ذکر شده، نرم افزار PETREL نیز مراحل مدل‌سازی را به شکل زیر انجام می‌دهد:

۱- وارد کردن اطلاعات

۲- مدل‌سازی ساختاری مخزن

۳- مدل‌سازی شبکه و تغییرات ابعاد شبکه

۴- مدل‌سازی خصوصیات پتروفیزیکی

۵- آنالیز مدل‌های مختلف

۵-۲-۱ وارد کردن اطلاعات

برای شروع ساخت یک مدل زمین‌شناسی، ابتدا باید نرم‌افزار پترل را اجرا کرد، سپس ورود اطلاعات از طریق Import Data انجام می‌گیرد. ولی بهتر است قبل از هر کاری سیستم مختصات جغرافیایی منطقه-ای را که مخزن در آن واقع شده است، را تعریف نمود. معمولاً اطلاعات جدید بر مبنای سیستم جهانی UTM^۲ برداشت می‌شوند.

^۱ Property Modelling

^۲ Universal Transverse Mercator

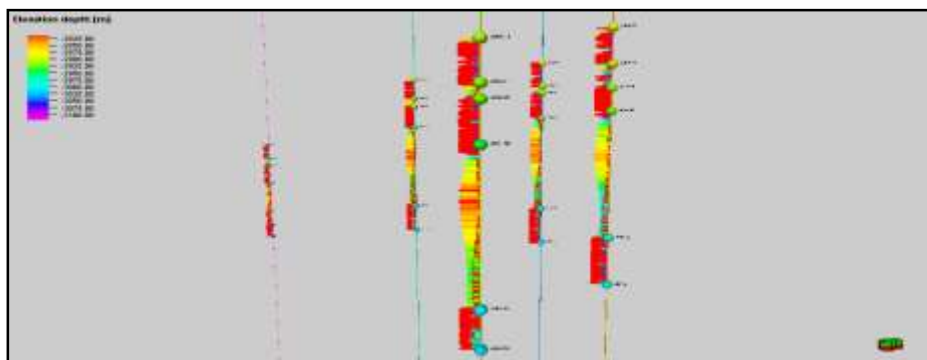
معمولا اولین ورودی به نرم افزار، مختصات و اطلاعات چاه است. برای این کار روی پنجره input کلیک راست کرده و اطلاعات چاه که شامل Well Head، Well Trajectory و اطلاعات نگاره های پتروفیزیکی می باشد را وارد محیط پترل می کنیم.

بعد از آنکه همه چاه ها و نگاره های مربوط به آن ها وارد شد، باید لایه های زمین شناسی و زون های موجود در مخزن و ترتیب آن ها برای نرم افزار تعریف و سپس عمق محل برخورد هر چاه با آن سازند را وارد کرد. با وارد کردن اطلاعات Well Top که با فرمت Ascii و به صورت رقومی ذخیره شده است، مشاهده می شود که لایه های زمین شناسی و زون ها و ترتیب قرارگیری آن ها در مخزن و نیز عمق برخورد چاه با افق های موجود (MD) در محیط نرم افزار وارد شده اند (شکل ۵-۱).

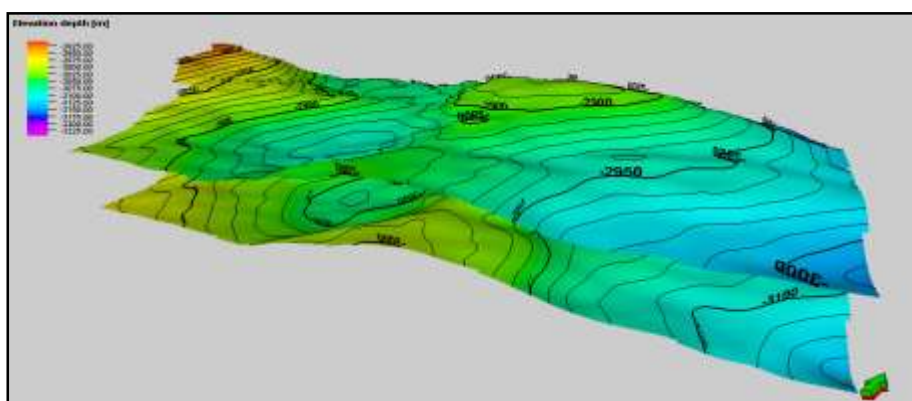
۵-۲-۲ تعیین چهارچوب چینه ای مخزن

برای انجام عملیات مدل سازی در ابتدا باید یک چهارچوب چینه ای از سطوح مورد نظر که ساختمان مخزن در آن قرار می گیرد، ساخته شود. در این بخش اطلاعات اولیه مربوط به افق ها نظیر ترتیب زمانی، سطوح ناپیوستگی ها و تعیین نوع افق ها مشخص می شود.

افق های مورد استفاده در Petrel به صورت Horizon یا Isochore در نظر گرفته می شوند که Horizon نمایانگر افق های بالایی و پایینی (Top or Base) یک واحد یا لایه چینه نگاری که نتیجه ی تفسیر داده های ژئوفیزیکی هستند و به صورت نقشه های عمقی ارائه می گردند و Isochore نمایانگر مشخصات بین دو واحد یا لایه چینه نگاری می باشد که از طریق محاسبه ی ضخامت قائم و اضافه نمودن آن به افق تفسیر شده به دست می آیند. (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۱: وود اطلاعات Well Heads، Well Logs و Well Tops چاه‌های میدان.



شکل ۵-۲: نقشه‌های هم‌تراز عمقی UG در میدان مورد مطالعه

به منظور تهیه چهارچوب چین‌های سازند مورد مطالعه در نظر گرفته شد. که نقشه‌های هم‌تراز عمقی هر کدام به کمک اطلاعات لرزه‌ای و پتروفیزیکی تهیه شده است که باید آن‌ها را برای مدل‌سازی به پترل بدهیم. در واقع با وارد کردن نقشه‌های هم‌تراز عمقی (UGC) مورد نظر به پترل، مرز چین‌های لایه‌ها در مخزن مشخص می‌شود.

۵-۳ مدل‌سازی ساختمانی

اولین گام و یکی از مهمترین بخش‌های مدل‌سازی تهیه مدل ساختمانی می‌باشد که شامل ایجاد مدل چین‌های و گسلی است. با انجام مطالعات لرزه‌نگاری در میدان مورد مطالعه گسلی شناسایی نشده است، لذا

مدلسازی ساختمانی تنها شامل ایجاد مدل چینه‌ای مخزن که همانند یک کیک لایه‌ای است، می‌باشد. منظور از مدل چینه‌ای، مشخص کردن نحوه‌ی قرار گیری و تغییرات ضخامت لایه‌های مختلف زمین-شناسی در ساختمان شبکه است که این کار از طریق وارد کردن افق‌های زمین‌شناسی و ایجاد سطوح مورد نظر انجام می‌شود. مدل ساختمانی در واقع اسکلت زمین‌شناس مخزن است که نقش حیاتی در توصیف مخازن ایفا می‌کند (Petro & Paulo, 2007). در حقیقت مدل‌سازی ساختمانی چهارچوب مخزن و شبکه‌بندی آن است، به طوری که کلیه اطلاعات و داده‌های ساختمانی به صورت یک مدل سه‌بعدی مشاهده می‌شود. در بخش مدل چینه‌ای علاوه بر اطلاعات مربوط به سطوح تفسیری و نقاط ورودی هر افق (سازند، زون و زیرزون)، نقشه‌های هم ضخامت^۱ و نقشه‌های هم شیب^۲ سازندها تهیه شده است. (Groshong 2006).

۵-۳-۱ تعیین محدوده پروژه

برای انجام پروژه‌های مدل‌سازی معمولاً باید یک مرز پیرامون محدوده مطالعاتی ایجاد شود تا از وارد کردن اطلاعات اضافی خودداری شود و وسعت منطقه مورد مطالعه کاهش یابد. با تعیین محدوده‌ای خاص کلیه‌ی محاسبات پروژه در آن صورت می‌پذیرد. به دو حالت می‌توان پروژه را مرزبندی کرد:

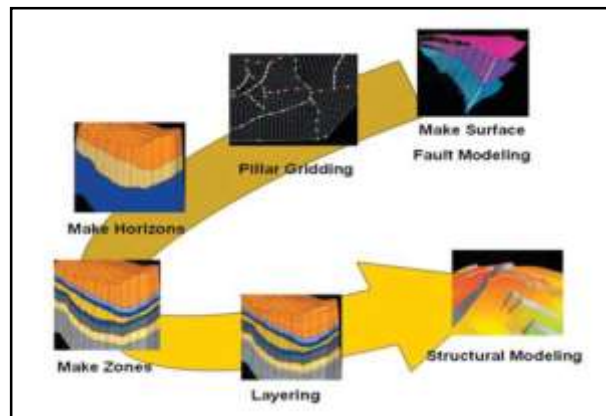
۱- استفاده از مرزبندی آماده که توسط اداره‌ی پتروفیزیک تهیه می‌شود و شامل مختصات X,Y,Z است.

۲- انجام مرزبندی به صورت دستی: در این حالت توسط ابزار ویرایش که برنامه در اختیار قرار می‌دهد می‌توان مرز پروژه را تعیین کرد. این محدوده باید به صورت یک چند ضلعی (Boundary) در نظر گرفته

¹ Isopach Maps

² Isodip Maps

شود. این کار از طریق فرایند Make/Edit Polygons در زیر مجموعه Utilities و در برگه اصلی Processes انجام پذیرفت. در اینجا مرز محدوده را منطبق بر نقشه‌ی UGC انتخاب شده است. تهیه مدل ساختمانی در نرم‌افزار پترل توسط فرآیندهای زیر صورت می‌گیرد (شکل ۵-۳).



شکل ۵-۳: ترتیب و مراحل ساخت مدل ساختمانی در نرم‌افزار پترل

۵-۳-۲ مدل‌سازی گسل^۱

مشخصات و نوع گسل‌ها معمولاً از روی اطلاعات ژئوفیزیکی شناسایی و تفسیر می‌شوند که به صورت فایل‌هایی آماده می‌شوند. همچنین می‌توان از روی نقشه‌های UGC^۲ میدان نیز این گسل‌ها را تشخیص داد که باید موقعیت و روند آن‌ها را مشخص کرده و در مدل ساختمانی به کار برد. میدان مورد مطالعه از عملکرد گسل‌های عمده و تاثیرگذار که باعث تغییرات اساسی در ساختمان میدان شده باشد در امان بوده و در بررسی‌های لرزه‌ای نیز شواهدی از عملکرد گسل‌ها مشاهده نگردیده است. بنابراین به دلیل نبود گسل‌های شاخص، مدل‌سازی گسل در این میدان نیاز نیست.

^۱ Fault Modelling

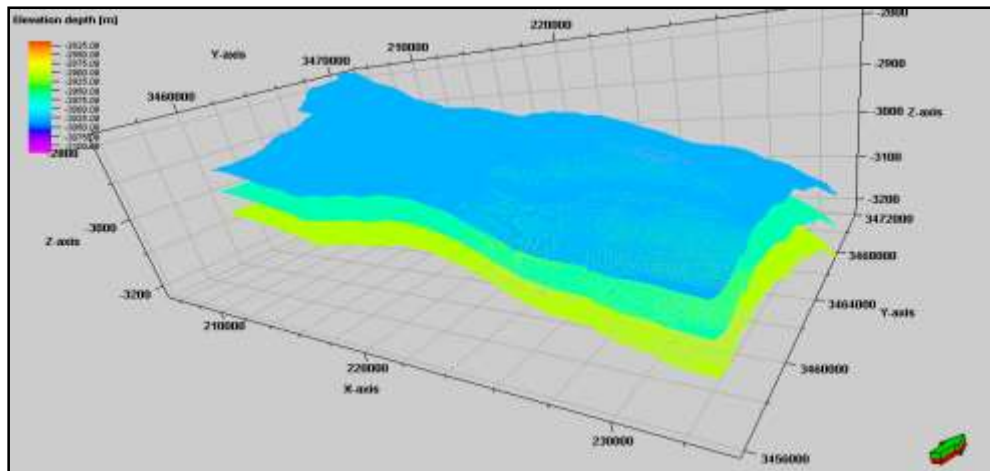
^۲ User-generated Content

۵-۳-۳ شبکه‌بندی مخزن^۱

ساخت شبکه‌بندی، بخش مهمی از فرآیند مدل‌سازی مخزن است (Holden et al., 2003). مدل‌گریدبندی سه‌بعدی زمین‌شناسی در حقیقت یک شبکه سلولی می‌باشد که فرآیندهای دیگر مدل‌سازی، در آن اتفاق می‌افتد. در حقیقت شبکه‌ای از سلول‌ها، با ابعاد معین، در سرتاسر مخزن ایجاد می‌گردد و در مراحل بعدی مدل‌سازی، به هر یک از این سلول‌ها یک مقدار عددی تعلق می‌گیرد. سلول‌ها در این مدل دارای طول، عرض و ضخامت می‌باشند که بر مبنای متراندازه‌گیری می‌شوند. برای مثال در مدل‌سازی پتروفیزیکی هر سلول، دارای یک ارزش عددی از نظر تخلخل یا تراوایی می‌باشد و تمامی نقاط موجود در آن سلول همان ارزش عددی را می‌یابد. طرح و نقشه‌ی سلول‌ها باید طوری باشد که بتواند هم‌زمان چند فاکتور مخزنی را با حداکثر کارآمدی و دقت پوشش دهد. مزیتی که سلول‌بندی برای مدل دارد این است که دقت آنالیزهای مخزن را چه به صورت جانبی و چه به صورت افقی بالا برده و همچنین وجود ناهمگنی‌ها را در مخزن به اثبات می‌رساند. با توجه به هدف پروژه، می‌توان ابعاد سلول‌ها را در زون‌های مختلف مخزن و یا بخش‌های مختلف گسلی متفاوت در نظر گرفت. هر چه ابعاد خانه‌های شبکه کوچک‌تر باشد، دقت محاسبه بیشتر خواهد بود و مدل نهایی به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود اما به دلیل افزایش سلول‌ها زمان بیشتری نیاز دارد تا حجم زیادی از محاسبات را خصوصاً در بخش شبیه‌سازی انجام دهد. در مخازن با وسعت کوچک ابعاد ۵۰ متر و برای مخازن بزرگ ابعاد سلول‌ها را ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر در نظر می‌گیرند که در بیشتر مخازن به طور متوسط ابعاد ۱۰۰ متر را انتخاب می‌کنند. معمولاً ابعاد سلول‌های زون‌های مخزنی را کوچک‌تر در نظر می‌گیرند تا با ارزش‌گذاری تعداد نقاط بیشتر، دقت تخمین را بالا ببرند. این امر در

1 Pillar Gridding

محاسبه میانگین نهایی پارامترهای مخزنی نظیر تخلخل، تأثیر قابل توجهی خواهد داشت. پس از بررسی-های لازم، شبکه‌بندی مخزن به صورت افقی در دو جهت اصلی I و J و به ابعاد 100×100 انتخاب شد.



شکل ۳-۴: ایجاد شبکه‌بندی مخزن جهت مدل‌سازی خواص مخزنی

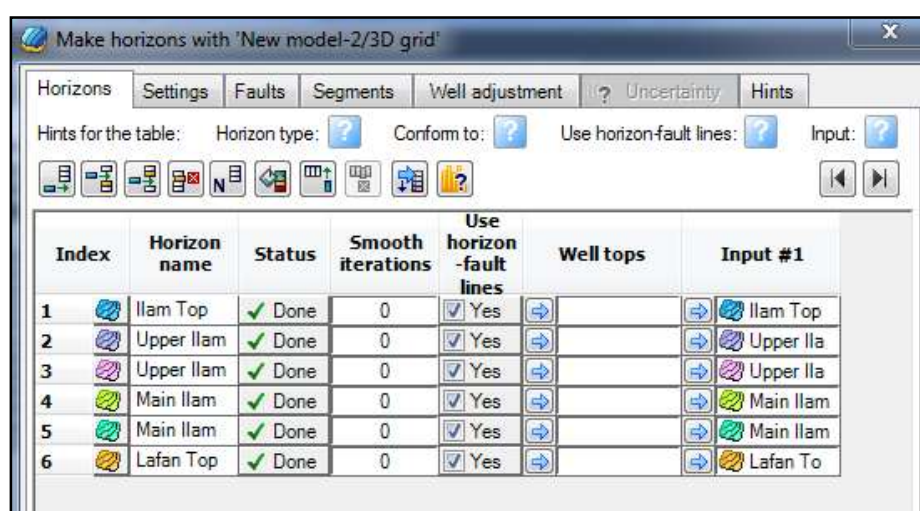
۵-۴ تفکیک عمودی مدل

پس از تهیه شبکه سه‌بعدی مخزن و برای آنکه دقت کار افزایش یابد، باید سلول‌ها در راستای عمودی به تعداد بیشتری لایه تقسیم شوند تا تعداد بلوک‌ها بیشتر شده و نحوه تغییرات پارامترها را بهتر نمایش داد. از آنجا که شدت تغییرات خواص پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی در جهت عمودی خیلی سریع‌تر از تغییر در راستای افقی است (به علت ماهیت رسوبگذاری)، لذا بلوک‌ها باید در جهت عمودی با ضخامت کمتر معین شوند. ضمن آنکه در محل چاه‌ها در راستای عمودی، به ازای هر ۳۰ سانتی‌متر یک مقدار عددی برای یک پارامتر پتروفیزیکی مانند تخلخل وجود دارد. بنابراین قدرت تفکیک اطلاعات موجود، خیلی بیشتر از قدرت تفکیک اطلاعات جانبی می‌باشد.

۵-۳-۵ ساخت افق‌ها^۱

در این مرحله، افق‌های زمین‌شناسی وارد شبکه مخزن شده و شبکه مخزن به تعداد مشخصی افق تقسیم می‌شوند. افق‌ها، در اصل همان سطوح راس و قاعده سازندهای مخزنی می‌باشند که معمولاً خروجی تفاسیر سائزیمیکی می‌باشند. افق‌ها در ابتدا به صورت صفحه وارد پنجره Input می‌گردند و باید آن‌ها را از طریق فرآیند Make Horizons تبدیل به افق کرد تا در پنجره مدل داخل گرید سه‌بعدی قرار گیرند.

(شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵: پنجره مربوط به وارد کردن افق‌های زمین‌شناسی به شبکه مخزن

¹ Make Horizon

۵-۳-۶ ساخت زون^۱

پس از ایجاد چند افق در پترنل، نرم افزار به صورت خودکار زون ها را در بین افق ها تشکیل می دهد. زون بیانگر یک ضخامت است در حالی که افق یک صفحه را تشکیل می دهد. فاصله بین هر دو افق در برگه مدل به نام یک زون نمایش داده می شود و البته از طریق فرآیند Make Zone نیز می توان روی آن ها کنترل داشت. در این فرآیند امکان ایجاد زون های بیشتر و در نتیجه افق های جدیدتر نیز وجود دارد. در صورتی که نقشه های تفسیر شده زیرسطحی از افق ها در دسترس نباشد، می توان آن ها را از طریق Well Tops و ایجاد نقشه های هم ضخامت Isochore، زون های مخزن را از هم تفکیک کرد.

مرحله ساخت زون با چینه شناسی و زون بندی پتروفیزیکی مخزن ارتباط دارد. در یک مخزن نفتی از بالا تا پایین تغییرات پتروفیزیکی مشاهده می شود که دلایل چینه ای و رسوبی دارد. این تغییرات روی اطلاعات لرزه ای مشخص نیست که بتوان آن ها را به صورت سطح تفسیر کرد. معمولاً متخصصین پتروفیزیکی آن ها را از روی نگار و اطلاعات مغزه بر اساس مقادیر تخلخل تعیین می کنند، لذا اطلاعات موجود از گسترش این زون ها منحصر به محل چاه است.

۵-۴ لایه بندی مخزن^۲

با توجه به اینکه اطلاعات نگارهای چاه پیمایی در جهت عمودی به ازای هر ۱۵ سانتی متر یک مقداری قرائت می شود، از این رو انتظار می رود که روند تغییرات پتروفیزیکی در مدل به دقت دیده شود، بنابراین باید

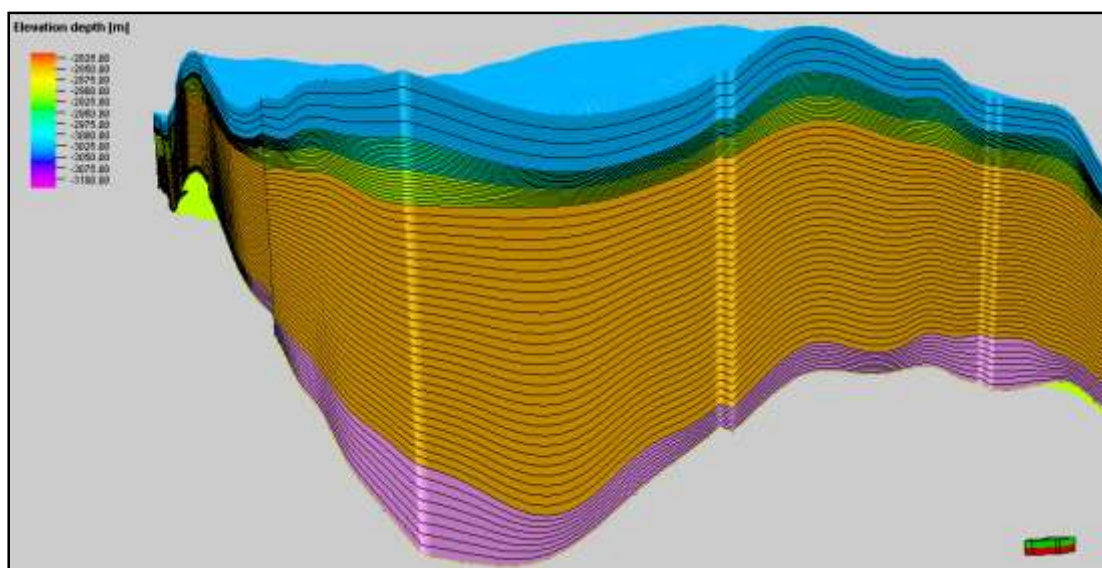
^۱ Make Zone

^۲ Layering

تقسیم‌بندی عمودی را مجدداً ریزتر کرد. این کار از طریق فرآیند Layering در نرم‌افزار پترل انجام می‌شود.

ضخامت لایه‌ها با توجه به شدت تغییرات عمودی نگارهای پتروفیزیکی انجام می‌گیرد. این بدین معناست که هر چه شدت تغییرات پتروفیزیکی شدیدتر باشد، بایستی ضخامت لایه نازک‌تر باشد تا به هر یک بتوان مقدار عددی جداگانه‌ای داد که روند تغییرات واقعی بهتر حفظ شود. تعیین تعداد لایه‌ها در هر زون و یا زیرزون با توجه به مخزنی بودن و یا غیرمخزنی بودن آن‌ها انجام می‌گیرد. برای بخش‌های مخزنی با اهمیت که تغییرات عمودی آن‌ها از لحاظ مدل‌سازی مهم می‌باشد تعداد لایه‌های بیشتری به منظور دربرگیری هرچه بیشتر هتروژنیتهی مخزن در نظر گرفته می‌شود.

برای لایه‌بندی باید روی فرایند Layering کلیک کرده تا پنجره آن باز شود. در این پنجره حالت‌های مختلف لایه‌بندی ظاهر می‌شود و باید روش مناسب را با توجه به نوع مخزن انتخاب کنیم. در حالت Follow Top زون‌ها از بالا به طرف پایین و به موازات سطح بالایی زون لایه‌بندی می‌شود. در حالت Follow Base، لایه‌بندی از پایین به طرف بالا و به موازات سطح پایینی زون انجام می‌شود. زمانی که بخواهیم برای هر یک از زون‌ها تعداد مشخصی لایه با ضخامت‌های یکسان معین کنیم، از حالت Proportional استفاده می‌کنیم. حالت Fraction زمانی به کار می‌رود که لازم است تا یک زون به لایه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت تقسیم شود.



شکل ۵-۶: زون‌بندی و لایه‌بندی شبکه مخزن و تفکیک زون‌های مخزنی از غیرمخزنی

۵-۵ مراحل مدل سازی پتروفیزیکی

مدل سازی پتروفیزیکی^۱ توزیع خواص مخزنی نظیر تخلخل، تراوایی و اشباع آب در کل میدان می باشد و یک تصویر سه بعدی از نحوه ی تغییرات این پارامترها را به وجود می آورد که می توان توزیع آن ها را در ابعاد مختلف مورد بررسی قرار داد و بخش هایی از مخزن که بهره ده هستند را شناسایی کرد. از نقطه نظر مهندسی مخزن مدل سازی پتروفیزیکی حساس ترین بخش مدل سازی محسوب می شود. زیرا اعتبار مدل - سازی دینامیک مخزن به نتایج حاصل از این بخش، خصوصا مدل تراوایی و مدل اشباع آب، بستگی دارد. هرچه قدر میزان مدل های پتروفیزیکی به واقعیت نزدیک تر باشند، نتایج مدل دینامیکی مخزن اطمینان بیشتری خواهد داشت.

برای ساخت مدل پتروفیزیکی باید سه فرآیند اصلی زیر طی شود:

۱- تغییر مقیاس نمودارهای پتروفیزیکی^۲

۲- ارزیابی داده ها^۳

۳- طراحی واریوگرام های مناسب^۴

¹ Petrophysical Modelling

² Scale Up Well logs

³ Data Analysis

⁴ Variogram Analysis

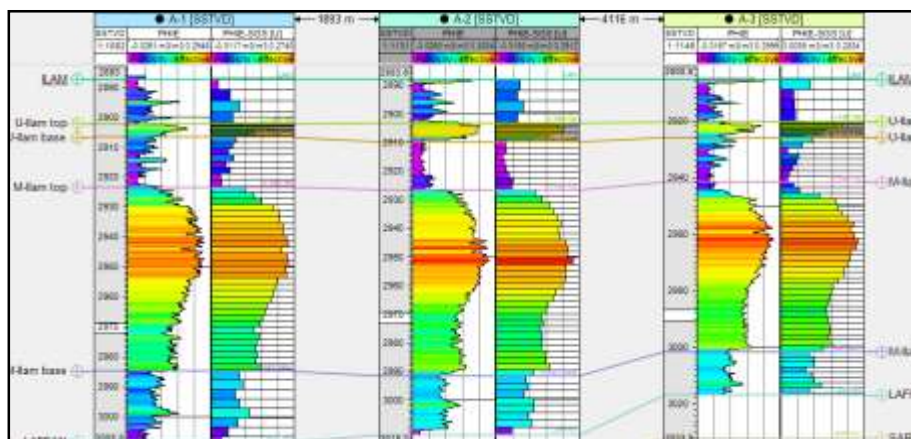
۵-۱-۵ تغییر مقیاس نمودارهای چاه‌پیمایی

پس از اینکه مدل سه‌بعدی شبکه مخزن ایجاد گردید، اطلاعات نمودارها برای ورود به شبکه آماده می‌شوند. داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی پیوسته هستند و معمولاً به ازای هر چند سانتی‌متر (15cm) یک مقدار عددی دارند ولی سلول‌های گرید چندین متر ضخامت دارند. لذا ابتدا باید در محل چاه، مقیاس نمودارها را بزرگ کرد. به این معنی که که متوسط مقادیر آن‌ها را در محدوده ضخامت سلولی که با آن در تماس است را به دست آورده و یک مقدار به آن پارامتر در آن سلول اختصاص داد. این کار از طریق فرآیند Scale up Well logs صورت می‌گیرد. این کار برای هر کدام از نمودارهای مورد نظر مثل تخلخل موثر، اشباع آب و غیره به طور جداگانه انجام می‌گیرد. با توجه به نوع متغییر، بایستی روشی مناسب برای عمل میانگین‌گیری انتخاب نمود. روش‌های متنوعی برای این کار از قبیل میانگین ریاضی، میانگین هندسی، میانگین هارمونیک، میانگین RMS و غیره وجود دارد. معمولاً برای پارامترهای تخلخل، اشباع آب و N/G از روش میانگین ریاضی استفاده می‌شود که تمام اعداد در بازه سلولی را با هم جمع کرده و بر تعداد تقسیم می‌کند. در میانگین هندسی عملاً میانگین لگاریتم اعداد نمونه‌ها محاسبه می‌گردد که این کار باعث شده تاثیر مقادیر خیلی بالا کاهش یابد. معمولاً این روش برای خاصیت تراوایی که گستره اعدادش خیلی زیاد است، خصوصاً زمانی که بین مقادیر همبستگی کمی وجود داشته باشد، استفاده می‌شود. برای داده‌های ناپیوسته روش استفاده از مقدار حداکثر به کار می‌رود که نشان‌دهنده آن است که در سلول مورد نظر کدام رخساره بیشترین میزان حضور را داشته و همان را به عنوان رخساره شاخص کل آن سلول قرار می‌دهد. نتیجه کار در برگه مدل در زیر قسمت Properties و با علامت U به معنای Upscaled در جلوی نام آن ظاهر می‌گردد.

۵-۱-۱ کنترل کیفیت نگارهای Upscale شده

بعد از انجام عمل Scale up Well log، باید دقت کار انجام شده مورد ارزیابی قرار گیرد. در این بخش پارامترهای آماری همچون میانگین و انحراف معیار داده‌های خام و Upscale شده که بیانگر میزان دقت در طی مراحل فوق و تهیه‌ی سلول زمین‌شناسی هستند، با هم مقایسه می‌شوند. بنابراین میانگین مقادیر به دست آمده بعد از بلوک کردن چاه‌ها، با میانگین داده‌های خام نباید اختلاف چندانی داشته باشند. اگر اختلاف بیش از ۱ رقم باشد باید گریذبندی مربوط به آن زون مورد اختلاف را، ریزتر انجام داد (تعداد لایه‌ها و سلول‌ها بیشتر انتخاب شود) تا مقدار میانگین بین داده‌های خام و چاه بلوک شده نزدیک باشد.

برای انجام کنترل کیفی نهایی نگار Upscale شده، بر روی نگار مورد نظر در پوشه Property در برگه مدل کلیک می‌کنیم و با انتخاب Setting، در برگه Histogram نحوه توزیع نگار اصلی و نگار تغییر مقیاس داده شده را بررسی می‌کنیم که باید نسبتاً روند مشابهی داشته باشند در غیر این صورت بهتر است فرآیند Scale up با روشی دیگر اجرا شود و یا اینکه ضخامت سلول‌ها در لایه‌بندی تغییر کند. همچنین می‌توان در پنجره Well Section نمودارهای عادی و بزرگ مقیاس شده را کنار هم نمایش داد و کیفیت فرآیند را کنترل کرد (شکل ۵-۷).



شکل ۵-۷: نمایش و مقایسه لاگ‌های تخلخل عادی و Upscale شده

۵-۲ ارزیابی اطلاعات

پس از اینکه مقادیر خواص پتروفیزیکی وارد شبکه شدند، باید این مقادیر در کل سلول‌ها توزیع شوند. بدین منظور باید ابتدا ایده‌ای از نحوه حرکت و تغییرات این خواص در جهات سه‌بعدی داشته باشیم تا روند تغییرات پس از توزیع پارامترها در گرید از واقعیت مخزن تبعیت کنند. برای انجام این کار باید از فرآیند ارزیابی اطلاعات یا همان Data Analysis کمک گرفت. ارزیابی اطلاعات شامل فرآیند کنترل کیفیت داده‌ها، جستجو و آماده‌سازی ورودی‌ها جهت مدل‌سازی رخساره و خواص پتروفیزیکی می‌شود (Petrel 2009.1 help) در این مرحله روند داده‌ها حذف شده و واریوگرام داده‌های باقی‌مانده محاسبه می‌گردد (Li and White, 2003).

روش‌های مورد استفاده در ارزیابی اطلاعات، نمودارهای هیستوگرام و پراکنش (Scatter plot)، ارزیابی روند (Trend) و تبدیل آن‌ها (Transformation)، تخمین واریوگرام (Variogram estimation) و مدل‌سازی آن‌ها می‌باشند (همایی، ۱۳۸۶). دو شرط اساسی در محاسبات زمین‌آماري این است که اولاً داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند و ثانیاً روندی در آن‌ها موجود نباشد.

برای دستیابی به چنین داده‌هایی مراحل محاسباتی زیر بر روی داده‌های پتروفیزیکی صورت پذیرفت:

الف- حذف داده‌های پرت^۱

ب- حذف روندهای زمین‌شناسی^۲

^۱ Truncate data and real

^۲ Geological trends

ج- انتقال داده‌ها یا نرمال‌سازی داده‌ها^۱

د- تعیین ساختار فضایی داده‌ها^۲

۵-۳ حذف داده‌های ناهماهنگ

ارزیابی اطلاعات پتروفیزیکی بر اساس نمودارهای هیستوگرام کمک فراوانی به حذف داده‌های ناهماهنگ از جامعه آماری مورد نظر می‌کند. در این مرحله داده‌های خیلی زیاد و خیلی کم از مجموع داده‌ها حذف می‌گردد.

۵-۳-۱ حذف روند زمین‌شناسی

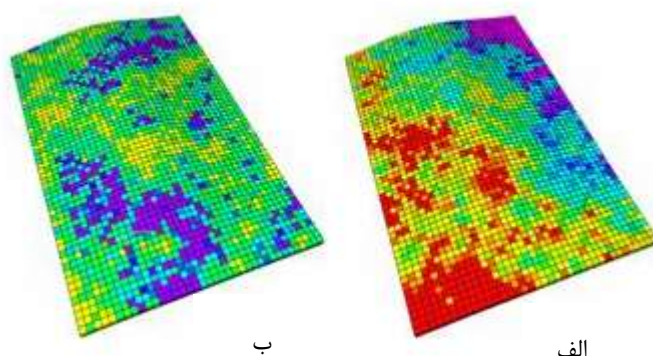
در صورت وجود روند قبل از شروع محاسبات باید روند داده‌ها حذف شده و سپس محاسبات روی مقادیر باقی‌مانده انجام گیرد. نداشتن روند بدین معنی است که میانگین و واریانس فضایی داده‌ها خیلی اختلاف نداشته باشند (Bohling, 2005). برای تشخیص روند می‌توان از واریوگرام استفاده کرد. واریوگرام برای تشریح ارتباط فضایی بین هر مشخصه در نقاط مختلف یک کانسار یا مخزن به کار می‌رود و یک ابزار اساسی در زمین‌آمار می‌باشد. با استفاده از واریوگرام می‌توان مشخصه‌های مهمی از میداین نفتی (مشخصه‌هایی که در ارزیابی ذخیره یا مطالعه‌ی میداین نفتی موثرند) را بررسی کرد. به طور کلی عدم رسیدن واریوگرام در محدوده‌ی مورد نظر به سقف ثابت می‌تواند حاکی از وجود روند باشد (حسنی پاک، ۱۳۷۱).

در این مطالعه نمودارهای پراکندگی (Scatter Plot)، وجود یا عدم وجود روند را در پنجره Data Analysis برای پارامتر مورد نظر نشان می‌دهد. این کار برای نمودارهای تخلخل و اشباع آب در زون‌های

^۱ Data Transformation

^۲ Variography

مختلف در جهت‌های X, Y, Z و همچنین و در جهت عمق عمودی واقعی (TVD) انجام شده و روند، حذف گردید. بنابراین واریوگرام‌های رسم شده، حاصل داده‌های فاقد روند هستند. شکل (۵-۸) نمودار پراکندگی توزیع تخلخل مربوط به زون اصلی را قبل و بعد از حذف روند در جهت عمق عمودی واقعی (TVD) نشان می‌دهند.



شکل ۵-۸: مدل‌های تصادفی دارای روند (الف) و فاقد روند زمین‌شناسی (ب) (Petrel 2017)

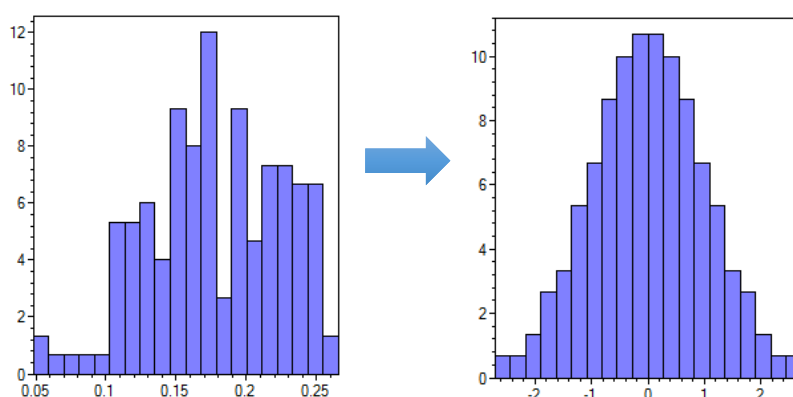
۵-۳-۲ نرمال‌سازی و انتقال اطلاعات

الگوریتم‌های زمین‌آماري در پترل برای فرآیند مدل‌سازی پتروفیزیکی نیاز به داده‌هایی دارند که میانگین صفر و انحراف معیار یک داشته باشند تا بتوانند یک ویژگی مخزنی با توزیع استاندارد نرمال را فراهم آورند. اگر داده‌های ورودی توزیع نرمال نداشته باشند، سپس نتایج حاصل از آن نیز ارتباط منطقی و منسجم با ورودی‌ها نخواهد داشت. بنابراین شرط نرمال بودن داده‌ها اساس کار محاسبات و تخمین‌های آماری را تشکیل می‌دهد در این صورت فرض نرمال بودن داده‌ها برقرار نباشد، می‌توان با استفاده از روش‌های تبدیل، توزیع داده‌ها را به صورت نرمال درآورد (حسنی پاک، ۱۳۷۱).

نمودار توزیع نرمال به شکل یک منحنی زنگی شکل کاملاً متقارن است و با پارامترهای آماری میانگین و واریانس تعریف می‌شود. واریانس نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی داده‌ها و در نتیجه گستردگی منحنی

توزیع نرمال است. به طور کیفی نیز می‌توان بودن توزیع داده‌ها را بررسی کرد. برای این منظور کافی است هیستوگرام داده‌ها نزدیک به نرمال بوده و کج‌شدگی داده‌ها نزدیک به صفر و کشیدگی آن‌ها نزدیک به ۳ باشد. کج‌شدگی در حقیقت معیاری از وجود تقارن یا عدم تقارن در تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملاً متقارن، کج‌شدگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر بالاتر، کج‌شدگی مثبت و بالاخره برای توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر کوچک‌تر، مقدار کج‌شدگی منفی است. این مقدار معیاری از میزان تیزی منحنی در نقطه ماکزیمم است.

نرمال‌سازی داده‌های پتروفیزیکی از طریق محاسبات آماری در پترل به طور اتوماتیک صورت می‌پذیرد. در این مطالعه هیستوگرام توزیع تخلخل و اشباع آبدار زون‌های مخزن ترسیم و نرمال‌سازی گردیده است. شکل (۵-۹) توزیع تخلخل اصلی را قبل از نرمال‌سازی و پس از انتقال داده‌ها و نرمال‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد.

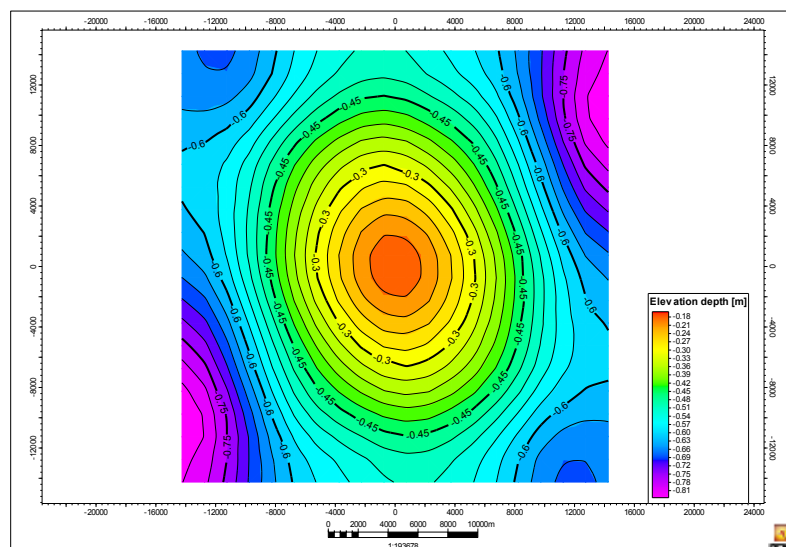


شکل ۵-۹: فرآیند نرمال‌سازی داده‌های ورودی در پترل

۵-۳-۳ تعیین ساختار فضایی داده‌ها

در زمین‌آمار به بررسی آن دسته از متغیرهایی پرداخته می‌شود که ساختار فضایی از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر ابتدا وجود یا عدم وجود ساختار فضایی بین داده‌ها بررسی شده و سپس در صورت وجود ساختار فضایی، تحلیل داده‌ها انجام می‌گیرد (حسنی پاک، ۱۳۷۱). این ساختار فضایی در محاسبات آماری همان واریوگرام تجربی است که برای داده‌هایی با توزیع نرمال و فاقد روند تعریف می‌شود. در حقیقت برای

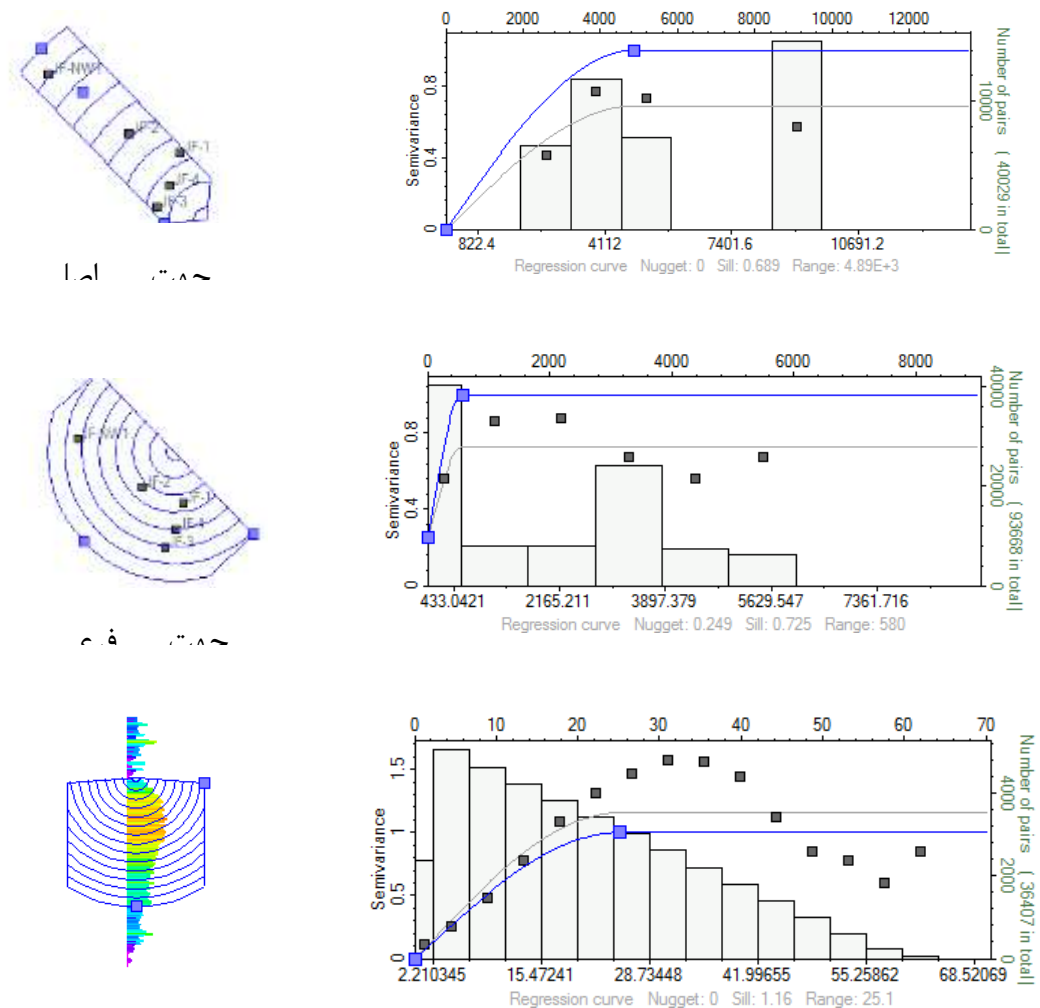
داده‌ها در سه جهت در مخزن واریوگرامی تعریف می‌شود که در هر سلول از گرید مخزنی با توجه به فاصله‌ای که از محل چاه دارد تخمینی انجام داده و به هر سلول یک ارزش عددی برای هر پارامتر اختصاص می‌دهد. از این رو باید برای سه جهت اصلی، فرعی و قائم مقادیر دامنه تاثیر، سقف و اثر قطعه‌ای را مشخص کنیم. معمولاً برای محاسبه واریوگرام عمودی نمونه‌ها اطلاعات کافی دارند، چون چاه‌ها در جهت عمودی حفاری شده و به ازای هر سلول در این راستا داده وجود دارد و می‌توان فاصله تطابق اطلاعات لاگ را محاسبه نمود. اگر تعداد چاه‌ها کم باشد و با فاصله بین نقاط خیلی زیاد باشد، عملاً نمی‌توان واریوگرام‌های نمونه جهات افقی را رسم کرد و مدل واریوگرام را بر آن منطبق ساخت. در این صورت باید مقادیر آن‌ها به صورت دستی و به کمک دانش زمین‌شناسی و نقشه واریوگرام در برگه مدل وارد شوند. برای تعریف واریوگرام‌های افقی می‌توان از لرزه‌نگاری نیز استفاده شود با توجه به اینکه تعداد چاه‌های میدان مورد مطالعه کم می‌باشد، لذا برای واریوگرام‌های افقی از نقشه واریوگرام حاصل از مدل مکعب امپدانس صوتی استفاده شده است. به کمک آن‌ها می‌توان مقدار دامنه تاثیر را در جهت حداکثر و حداقل بدست آورد (شکل ۵-۱۰)



شکل ۵-۱۰: نقشه واریوگرام مربوط به مکعب امپدانس صوتی و تعیین شعاع جستجو

اگر داده‌ها دارای ناهمسان‌گردی باشند، اثر آن در نقشه واریوگرام به صورت کانتورهای بیضوی منعکس می‌شود. آخرین کانتور بسته در هر دو جهت حداکثر و حداقل، مقدار شعاع جستجو واریوگرام را تعیین می‌کند. همچنین جهت کانتورهای بیضوی، جهت و آزمون ناهمسان‌گردی را نشان می‌دهد که در مورد میدان مورد مطالعه، مقدار آزمون $N160$ می‌باشد.

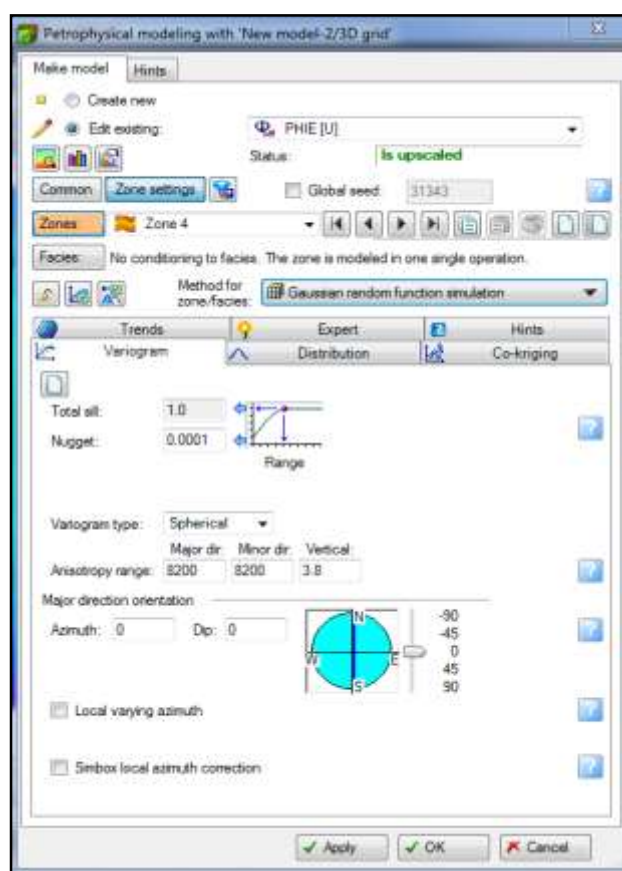
هدف اصلی از ایجاد تابع واریوگرام این است که بتوانیم ساختار تغییرپذیری را به خصوص نسبت به فاصله تعیین کرده و سپس بر اساس این تابع، تخمین و یا مدل‌سازی توزیع تخلخل و اشباع آب را در تمام زون‌های مخزنی انجام دهیم. شکل (۵-۱۲) واریوگرام‌های ترسیم شده برای تخلخل را در سه جهت مخزن نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۱: واریوگرام‌های ترسیم شده تخلخل در سه جهت اصلی میدان

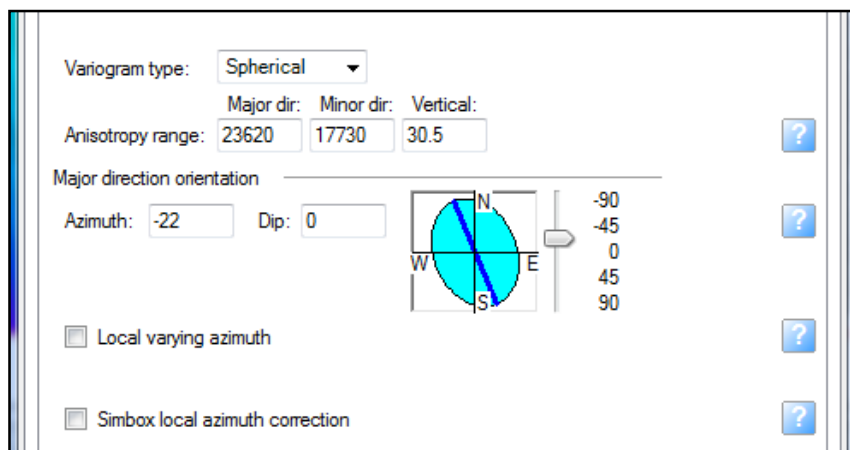
۵-۶ مدل سازی خواص پتروفیزیکی

بعد از انجام مراحل ذکر شده فوق، زمان این فرا می رسد که خواص مخزنی در نقاط مختلف میدان که اطلاعاتی وجود ندارد، بر اساس روش های تخمینی زمین آمار مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مرحله پس از بزرگ مقیاس کردن نمودارهای چاه پیمایی، انجام آنالیز اطلاعات و رسم واریوگرام های لازم در جهت مختلف، با استفاده از الگوریتم های مناسب زمین آماری که در نرم افزار پترل تعریف شده است، مدل سازی پتروفیزیکی انجام می شود. یکی از مهم ترین و متداول ترین روش های تخمین، الگوریتم شبیه سازی گوسی متوالی (SGS) است که برای تخمین تخلخل و اشباع آب معمولاً از آن استفاده می گردد. این کار در پنجره Processes و در قسمت Property modelling و در زیر مجموعه Petrophysical modelling انجام می گیرد (شکل ۵-۱۲).



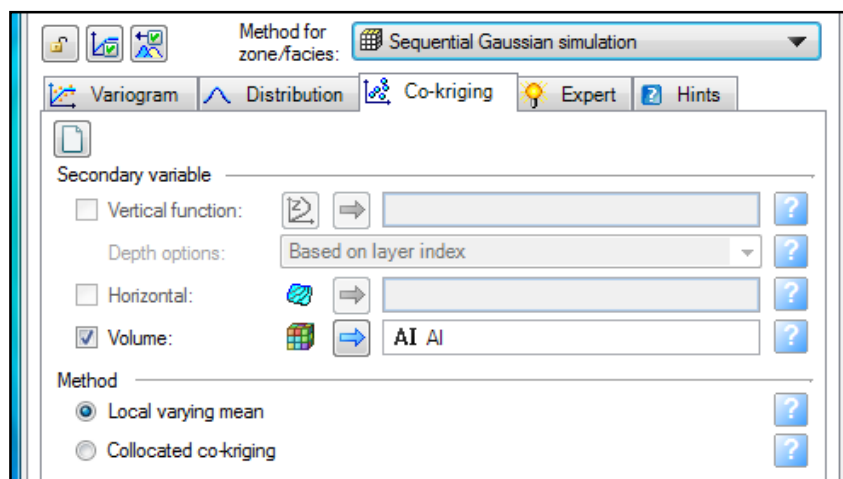
شکل ۵-۱۲: پنجره مربوط به فرآیند مدل سازی

برای اعمال اثر واریوگرام در مدل سازی، با انتخاب گزینه ی *Used the Variogram from Data Analysis* که از مرحله قبل ذخیره شده اند، تخمین پارامتر مورد نظر به کمک آن انجام می شود. همچنین می توان برای این کار به صورت دستی مقادیر دامنه تاثیر در جهات حداکثر و حداقل و مقدار آزیموت درجه ناهمسانگردی را در قسمت های مشخص شده وارد کرد (شکل ۵-۱۳).



شکل ۵-۱۳: ورود واریوگرام و آزیموت ناهمسانگردی به نرم افزار توسط کاربر

در برگه مدل سازی پتروفیزیکی می توان از طریق *Co-Kriging* روند یک متغیر دیگر را که با پارامتر مخزنی مورد نظر رابطه و تطابق خوبی دارند، به عنوان متغیر ثانویه در نحوه توزیع آن پارامتر دخیل کرد. برای مثال می توان از مدل مکعب امپدانس صوتی که ارتباط مناسبی تخلخل دارد به صورت متغیر ثانوی برای ساخت مدل تخلخل بهره گرفت (شکل ۵-۱۴).

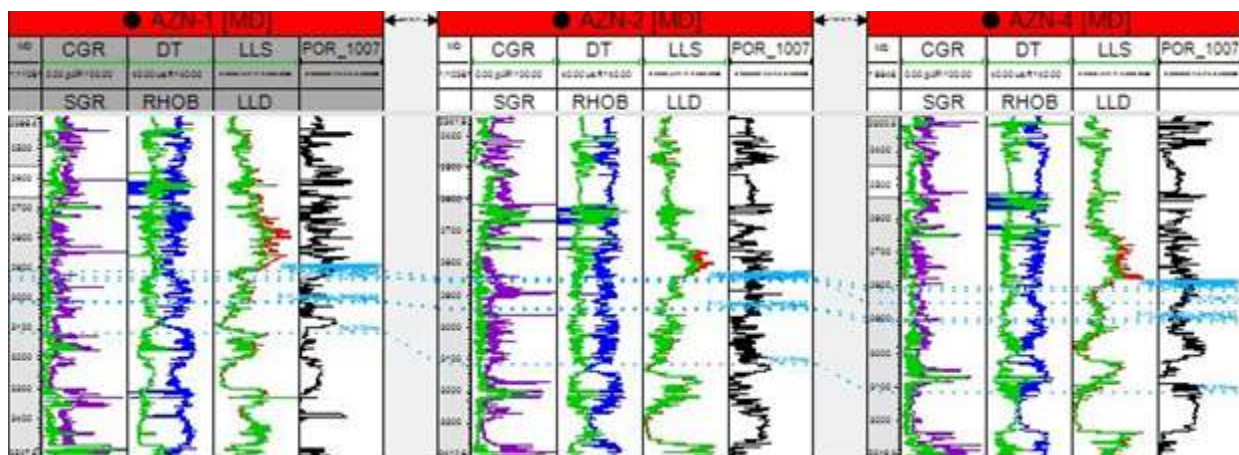


شکل ۵-۱۴: ورود متغیر ثانویه از طریق *Co-Kriging* برای مدل سازی

۵-۶-۱ اعمال حد برش^۱ و مدل سازی Net/Gross

گاهی اوقات کل ضخامت لایه زمین شناسی مخزنی، به طور یکپارچه دارای خواص سنگ مخزن نیست. یعنی برخی قسمت های آن فاقد تخلخل کافی برای ذخیره هیدروکربن است که باید این قسمت ها را به نحوی از محاسبات حجمی خارج کرد. تهیه ی نقشه دقیق از نسبت ضخامت بخش تولیدکننده به ضخامت کلی مخزن (Net/Gross) برای توسعه یک میدان ضروری است. ضخامت خالص در حقیقت ضخامتی از سازند است که شرایط مخزنی و خواص پتروفیزیکی قابل قبولی داشته باشد. این پارامتر با استفاده از حدود برش برای تخلخل و اشباع آب و مدل های گسترش تخلخل و اشباع آب محاسبه می شود. حدود برش برای مخازن نفتی و گازی کاملاً متفاوت است. حدود برش مخزن با اعلام اداره ی پتروفیزیکی برای تخلخل ۴٪ و برای اشباع آب ۵۰٪ در نظر گرفته شد. برای تهیه این مدل باید حدود برش را در نرم افزار در پوشه Well و از طریق عمل Calculator، نمودار این مدل ساخته شود. این کار با ایجاد یک تابع به این صورت بیان می شود که اگر مقدار تخلخل کوچکتر از ۴٪ و مقدار اشباع آب نیز بزرگتر از ۵۰٪ باشد نسبت NTG برابر صفر در نظر گرفته شود در غیر این صورت این نسبت برابر یک باشد. این عبارت در واقع مفهوم حدود برش برای تخلخل و اشباع آب را بیان می کند. بدین ترتیب نقشه های توزیع (Net/Gross) برای زون های مخزنی ساخته می شود. با این وجود زون های اصلی، به طور کلی بخش Net هستند که این مدل در شکل زیر در موقعیت چاه ها مشخص شده است (شکل ۵-۱۵).

¹ Cut off



شکل ۵-۱۵: مدل Net/Gross برای چاه‌های میدان و مقایسه با نمودارهای تخلخل و اشباع آب

۵-۷ محاسبات حجمی مخزن

یکی از مهمترین مراحل مدل‌سازی استاتیک مخزن، محاسبه‌ی حجم هیدروکربن در جای اولیه می‌باشد که یکی از قدم‌های اساسی برای ارزیابی مخزن و تعیین برنامه‌ی آینده جهت بهره‌برداری از آن است. محاسبات حجمی که بر مبنای محاسبه حجم کل شبکه سه‌بعدی مخزن و متوسط پارامترهای پتروفیزیکی انجام می‌گیرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا نشان دهنده‌ی حجم تمام هیدروکربن‌های موجود در مخزن می‌باشد. آنچه که در این مرحله بدست می‌آید حجم هیدروکربن‌ها است که در شرایط فشار و دمای مخزن زیرزمین وجود دارد و اصطلاحاً به آن نفت و گاز درجا می‌گویند. بخش گازی آن هم GOIP و GIIP نام دارد. جهت انجام حجم سنجی نفت در جای مخزن موارد زیر مورد نیاز است:

۱- مدل تخلخل (PHIE)

۲- مدل اشباع آب (Sw)

۳- مدل نسبت زون خالص به ناخالص (NTG)

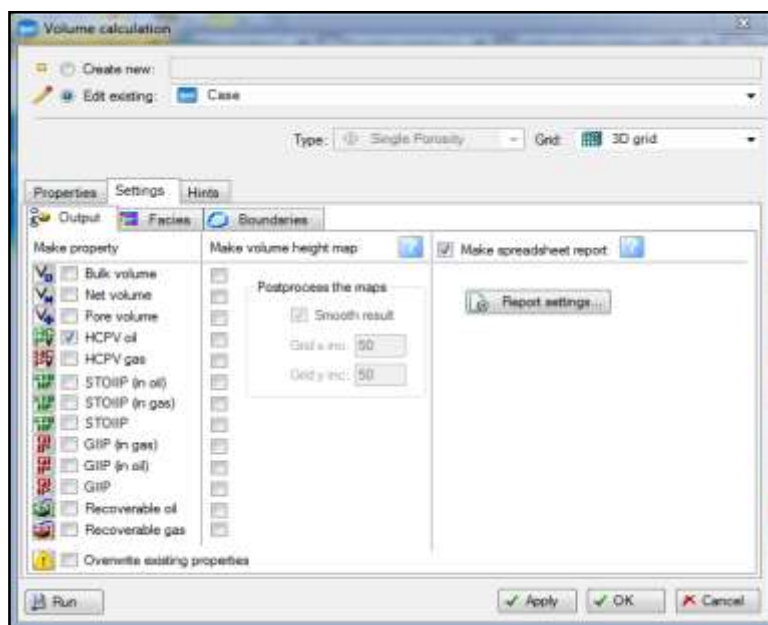
۴- سطح تماس سیالات (OWC or GOC)

۵- ضریب حجمی نفت و گاز (Bo or Bg)

در مطالعات مخازن هدف اصلی در این بخش محاسبه حجم نفت در روی زمین و با شرایط فشار و دمای سطح است. زیرا این مقدار به طور واقعی می‌تواند بر روی زمین تولید شده و برای محاسبات و سرمایه‌گذاری باید به آن استناد شود. به این مقدار اصطلاحاً STOIP (Stock Tank OilIP) گفته می‌شود. در واقع این حجم، مقدار نفتی است که در تانک‌های ذخیره سوخت سطح زمین قرار دارند. وقتی نفت به سطح زمین می‌رسد و در تانک‌های ذخیره با فشار و دمای عادی قرار می‌گیرد، حجم آن به دلیل خروج گازهای محلول در آن، کاهش می‌یابد. بنابراین برای محاسبه نفت قابل بازیافت از مخزن باید حجم نفت درجا را بر ضریب حجمی نفت سازند (Bo) تقسیم کرد. مقدار نفت اولیه در شرایط تانک ذخیره از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$STOIP = V_b \times NTG \times \phi \times (1 - S_w) \times \frac{1}{B_o} \quad \text{رابطه (۵-۱)}$$

که در آن V_b حجم کلی مخزن بر حسب bbl بوده و از حاصل ضرب مساحت سطح موجود در ضخامت به دست می‌آید. مقادیر تخلخل و اشباع آب به صورت Fraction بوده و B_o نیز بر حسب BBL/STB می‌باشد. این عمل در پنجره Processes و از قسمت Utilities، با انتخاب گزینه Volume Calculation و در داشتن موارد فوق، انجام می‌شود (شکل ۵-۱۶).



شکل ۵-۱۶: پنجره مربوط به محاسبات حجمی در نرم‌افزار Petrel

- [1] Azadpour, M., Shadmanan, N., Kadkhodaie-Ilkhchi, A. and Sedghipour, M.R., 2015, Pore Pressure
- [2] Tingay, M. R., Hillis, R. R., Swarbrick, R. E., Morley, C. K., & Damit, A. R. (2007). 'Vertically transferred' overpressures in Brunei: Evidence for a new mechanism for the formation of high-magnitude overpressure. *Geology*, 35(11), 1023-1026
- [3] Dutta, N.C. 2002. Geopressure prediction using seismic data . Current status and the road ahead. *Geophysics*, 2012-2041 .
- [4] Ahmed, A., Elkatatny, S., Ali, A., Mahmoud, M. and Abdulraheem, A., 2019. New Model for Pore Pressure Prediction While Drilling Using Artificial Neural Networks. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(6), pp.6079-6088.
- [5] Atashbari, V. and Tingay, M.R., 2012, January. Pore pressure prediction in carbonate reservoirs. In *SPE Latin America and Caribbean petroleum engineering conference*. Society of Petroleum Engineers.
- [6] Bowers, G.L., 2002. Detecting high overpressure. *The leading edge*, February, 174-177.
- [7] Chopra, S., Huffman, A. 2006. Velocity determination for pore pressure prediction. *CSEG RECORDER*: 29-46.
- [8] Dutta, N.C., Khazanedari, J., 2006. Estimation of formation fluid pressure using high resolution velocity from inversion of seismic data and a rock physics model based on compaction and burial diagenesis of shales, *The leading edge*, December, 1528- 1539.

- [9] Tanko, A., Bello, K. Tanko, I., 2019, Development of an appropriate model for predicting pore pressure in Niger delta, Nigeria using offset well data. *Internat. J. Petrochem. & Research*, 3(1), 274-279.
- [10] Ugwu, G., 2015. Pore pressure prediction using offset well logs: Insight from onshore .niger delta, nigeria. *Am. J. Geophys. Geochemistry Geosystems* 1, 77–86
- [11] Ugwu, G.Z., 2015. An overview of pore pressure prediction using seismically derived .velocities. *J. Geol. Min. Res.* 7, 31–40
- [12] Wang, Z., Wang, R., 2015. Pore pressure prediction using geophysical methods in carbonate reservoirs: Current status, challenges and way ahead. *J. Natur. Gas Sci. & Eng.* 27, 986-993.
- [13] Zhang, J., 2011. Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and .new approaches. *Earth-Science Rev.* 108, 50–63
- [14] Zhang, J., 2013. Effective stress, porosity, velocity and abnormal pore pressure prediction accounting for compaction disequilibrium and unloading. *Marine and Petroleum Geology*, 45, pp.2-11.
- [15] Zhang, J., Yin, J., 2017. Real-time pore pressure detection: Indicators and improved methods, *Geofluids*. 2017, 1-12.
- [16] Kumar, Sri Niwas, b, Bikram K. Mangaraj, Pore Pressure Prediction from Well Logs and Seismic DataBikas.
- [17] Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G., 1996. Soil mechanics in engineering practice. John Wiley & Sons.

- [18] Aki, K., and Lee, W. H. K., 1976, Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes 1. A homogeneous initial model: *J. Geophys. Res.*, 81, 4381-4399.
- [19] Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics *Trans. Am. Inst. Mech. Eng.*, 146, 54-62.
- [20] Al-Chalabi, M., 1994, Seismic velocity—A critique: *First Break*, 12, 589–596.
Gardner, G.H. F., Gardner, L.W., and Gregory, A. R., 1974, Formation velocity and density—The diagnostic basics of stratigraphic traps: *Geophysics*, 39, 770–780.
- [21] Brown, K.E., 1967. Gas lift theory and practice. The petroleum publishing Co., Tulsa, OK, 924-929.
- [22] Bruce, B., Bowers, G.L., 2002, Pore pressure terminology, *The leading edge*. February, 170-173.
- [23] Bowers, G.L., 1995. Porepressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanism beside undercompactions. *SPE drilling and completion*, June, 89-95.
- [24] Bishop, T. N., Bube, K. P., Cutlers, R. T., Langan, R. T., Love, P. L., Resnick, J. R., Shuey, R. T., Spindler, D. A., and Wyld, H. W., 1985, Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media: *Geophysics*, 50, 903–923.
- [25] Chopra, S., Huffman, A. 2006. Velocity determination for pore pressure prediction. *CSEG RECORDER*: 29-46.
- [26] Issler, D. R., 1992, A new approach to shale compaction and stratigraphic restoration; Beaufort-McKenzie basin and McKenzie corridor, North Canada: *AAPG Bull.*, 8, 1170–1189.
- [27] Journrl, A.G. and Huijbregts, C.J. (1978) *Mining Geostatistics*. Academic Press, Londen, 600.
- [28] Kolb, P., Collino, F., and Lailly, P., 1986, Pre-stack inversion of a 1-D medium: *Proc. IEEE*, 74, 498–508.
- [29] Davis, G.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, Inc.

- [30] Dutta, N.C., 1987. Geopressure. Soc. Pet. Eng., Geophys. Reprint Ser. No7.
- [31] Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements: Geophysics, 20, 68–66.
- [32] Eaton, B.A., 1972. Graphical method predicts geopressure worldwide. World oil, June, 51-56.
- [33] ELOG module, Hampson-Russell, Theory and Guide, December 2006.
- [34] Fertl, W.H., 1976. Abnormal formation pressure. Elsevier, Amsterdam, 385.
- [35] Fertl, W.H., Chapman, R.E. and Holz, R.F., 1994. Studies in abnormal pressure. Elsevier, Amsterdam, 251-2790.
- [36] Fillippone, W.R., 1982. Estimation of formation parameters and prediction of overpressure from seismic data. Presented at SEG Research Symp. Geopressure studies, Dallas, TX, Paper R1.4, Oct. 17-21.
- [37] Gumti, Y.D. and Kanes, W.H. (1985) Early tertiary subsidence and sedimentary facies- Norten Sirtte Basin, Libya. Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 69, 3952.
- [38] Hohn, M.E., 1999. Geostatistics and petroleum geology. Kluwer Academic Publishers.
- [39] Harkins, K.L. and Baugher III, J.W., 1969. Geological Significance of abnormal formation pressure. J.pet. Technol., 21, 961-966.

[40] تخمین فشار منفذی در دشت گرگان نمازی فردپ و حمیدزاده مقدم ر ، ساجدی.
س ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز ش ۱۷۰

[41] تحلیل داده های اکتشافی ، حسنی پاک.ع ، شریف الدین .م انتشارات دانشگاه
تهران

[42] تخمین فشار منفذی به روش ایتون و باورز آدیم.ع ، ریاحی.م ، باقری .ع نشریه
پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی ش ۲- ۱۳۹۷ ص ۲۷۵

[43] بررسی روشهای تخمین فشار منفذی نوری.م و همکاران ماهنامه علمی -ترویجی
اکتشاف و تولید نفت و گاز ش ۱۰۵

Abstract

Drilling engineers to optimize drilling decisions, such as designing the path and location of wells, to avoid hazards such as explosion and pipe blockage; They need a little information about the high pressure zones in the subsurface.

Pore pressure or fluid pressure inside rock cavities is one of the important committees in the discussion of exploration and drilling of hydrocarbon resources. High pore pressure has been reported in drilling oil and gas wells in many parts of the world. Existence of high pore pressure causes many problems such as well eruption, unstable well, clogging of drilling pipe or loss of drilling mud rotation. That seems to be why Numerical estimation of pore pressure in high pressure formations before drilling is essential for safe and economical drilling. Also in the field of exploration, the concept of pore pressure can be used in the analysis and study of hydrocarbon migration routes and also in the study of rock cover quality.

In this study, we first try to study the basic concepts used in pore pressure estimation and then to investigate the seismic methods of pore pressure estimation, which is mainly using the effect of pressure on the amount of seismic velocity. The reason is that the speeds obtained from processing seismic data are usually not accurate enough in pressure analysis due to the low resolution and the assumptions of layered terrestrial and hyperbolic output. Therefore, in the study field, the pore pressure has been investigated using acoustic resistance.

For this purpose, using acoustic graphs and density obtained from well drilling and three-dimensional seismic data, we calculate the acoustic resistance and then obtain the estimated pore pressure. Finally, the results of validation indicate the suitability of the pore pressure model obtained from this method.

In general, in this study, we tried to estimate the pore pressure using three-dimensional seismic data and other available data in the study field. Given that the pressure studies in the world's carbonate reservoirs are very few, however, the results obtained from this study are reasonably satisfactory.

Keywords : pore pressure, acoustic resistance, overburden pressure, inversion, hydrostatic pressure



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering - Exploration

Prediction of pore pressure in one of hydrocarbon fields in south of Iran using petrophysical parameters

By: Yaser Abedi

Supervisor:

Dr. Aboulghasem Kamkar Rohani

Dr. Ali Reza Arab Amiri

Advisor:

Mr. Ehsan Larki

Feb, 2021