

الله أكبر
الله أكبر



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رساله دکتری اکتشاف مواد معدنی

استفاده از روش‌های سرعت، مقاومت صوتی و میرایی فرکانس
لرزه‌ای برای پیش بینی فشار منفذی مخازن کربناته

نگارنده: ایرج مداحی

اساتید راهنما:

پروفسور دکتر علی مرادزاده

دکتر علی نجاتی کلاته

بهمن ۱۳۹۸

شماره: ۰۴۹۸۶۱۹
 تاریخ: ۹۸/۱۲/۲۰
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای ایرج مناحی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن-اکتشاف به شماره دانشجویی ۹۳۰۱۳۶۵ و ورودی ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۲۷ از رساله نظری / عملی ■ خود با عنوان: استفاده از روش های سرعت، مقاومت صوتی و میرایی فرکانس لرزه ای برای پیش بینی فشار منفذی مخازن کربناته

دفاع و با اخذ نمره ۱۹۱ به درجه عالی نائل گردید.

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰
 ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۷-۱۸/۹۹
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵
 د) مردود: کمتر از ۱۵

ردیف	سمت داوران	سمت	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر علی علی نجاتی	استاد راهنمای اول	دانشیار	
۲	دکتر علی مرادزاده	استاد راهنمای دوم	استاد	
۳	دکتر مهرداد سلیمانی	نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه	دانشیار	
۴	دکتر مجید نبی بید هندی	خارجی	استاد	
۵	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	داور داخلی	دانشیار	
۶	دکتر امین روشندل کاهو	داور داخلی / خارجی	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای ایرج مناحی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



شکر و قدردانی

اکنون که مراحل پژوهش، تدوین و نگارش پایان نامه به پایان رسیده است نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقایان پروفسور دکتر علی مرادزاده و دکتر علی نجاتی کلاته که در کمال سعه صدر و با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند و بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید، آشکار نمایم.

از داوران گرامی آقایان پروفسور دکتر مجید نبی بیدهندی، دکتر امین روشندل کاهو و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که زحمت داوری و تصحیح این پایان نامه را به عهده داشتند کمال سپاس را دارم. در نهایت از پدر و مادر عزیزم که وجودم جز هدیه وجودشان نیست و از خانواده عزیزتر از جانم که در طول زندگی و دوران تحصیل همراه و مشوقم بودند، سپاسگزاری می نمایم.

تعمدنامه

اینجانب ایرج مداحی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه " استفاده از روش‌های سرعت، مقاومت صوتی و میرایی فرکانس لرزه‌ای برای پیش بینی فشار منفذی مخازن کربناته " تحت راهنمایی پروفسور دکتر علی مرادزاده 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 می‌گردد.
- 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 :

پیش بینی فشار منفذی اهمیت زیادی در ارزیابی پتانسیل خطر حفاری، تعیین وزن گل و کنترل چاه دارد. اطلاعات دقیق از فشار لایه‌های زیر سطحی با استفاده از داده‌های آزمایش فشار چاه (RFT) بدست آورده می‌شود. امروزه روش‌های لرزه‌ای نیز به سرعت جای خود را در تخمین فشار منفذی محل‌های حفاری نشده باز کرده است. با توجه به اینکه مدل‌های پیش بینی فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای عمدتاً در مخازن ماسه سنگی توسعه پیدا کرده‌اند، بنابراین در این مطالعه هدف اصلی بر این است روش‌های جدید برای پیش بینی فشار منفذی ارائه شده و روش‌های موجود نیز به گونه‌ای بهبود داده شوند تا عملکرد قابل قبولی در مخازن کربناته داشته باشند.

قبل از همه چیز، ابتدا با تحلیل مکانیزم‌های موثر نشان داده شد که مکانیزم اصلی موثر در ایجاد فشار منفذی مخازن میدان مورد مطالعه واقع در جنوب غرب کشور، عامل تراکم نامتوازن بوده است. سپس برای نیل به هدف از نشانگرهای لرزه‌ای سرعت، مقاومت صوتی و فرکانس میانگین با شش روش متفاوت برای پیش بینی فشار منفذی بهره گرفته شد. سرعت لرزه‌ای هم بصورت مستقیم از وارون‌سازی لرزه‌ای و هم به روش آماری و از آنالیز چند نشانگری لرزه‌ای تخمین و در پیش بینی فشار منفذی استفاده شدند. همچنین نشانگرهای مقاومت صوتی و میرایی فرکانس به دو روش برازش با فشار منفذی (مستقیم) و برازش با فشار موثر (غیر مستقیم) در پیش بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی برش عرضی حاصله از مکعب فشار منفذی به روش‌های مختلف، نشان داد که روش سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری و روش‌های بر مبنای مقاومت صوتی لرزه‌ای بوضوح قادر به شناسایی و تفکیک لایه‌های مخزنی ایلام، سروک، بورگان و فهلیان از بخش‌های بالا و پایین خود در میدان مورد مطالعه بوده‌اند. همچنین برش افقی فشار منفذی پیش بینی شده سه روش مذکور، بخوبی تاثیر کانال‌های مدفون در تغییرات جانبی فشار منفذی مخزن کربناته سروک را که مخزن اصلی میدان مورد نظر است نشان می‌دهند. در حالی که سه روش دیگر یعنی روش سرعت حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و دو روش بر مبنای میرایی فرکانسی در تشخیص لایه‌های مخزنی و نیز شناسایی اثر کانال‌های مدفون در تغییرات فشار منفذی عملکرد مناسبی را مثل سه روش قبلی نشان نداده‌اند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری نتایج نشان می‌دهد که ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های پیش بینی شده فشار منفذی و داده‌های آزمایش چاه (RFT)، برای روش‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. مقدار R^2 از زیاد به کم به ترتیب برای؛ روش مستقیم مقاومت صوتی برابر با ۰/۹۱۰۳، روش مستقیم فرکانس

میانگین برابر با ۰/۸۷۳۷، روش غیر مستقیم مقاومت صوتی برابر با ۰/۸۵۲۵، روش غیر مستقیم فرکانس میانگین برابر با ۰/۸۳۸۶، روش سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری برابر با ۰/۸۳۴۸ و در نهایت روش سرعت وارون سازی برابر با ۰/۷۷۹۲ بوده است.

همچنین محاسبه خطای استاندارد برای روش های مختلف نشان می دهد که آن برای روش های غیر مستقیم و مستقیم مقاومت صوتی، به ترتیب برابر با ۲۸(psi) و ۵۰(psi) بوده است. همچنین خطای استاندارد برای روش سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری برابر ۲۹(psi) تعیین شد. بنابراین نتایج حاصله از محاسبه خطای استاندارد نشان دهنده دقت بالای هر سه روش مذکور می باشد که تایید کننده قدرت تفکیک بالای لایه های مخزنی در مقاطع لرزه ای نیز است. در حالی که محاسبه خطای استاندارد برای روش های دیگر از مقدار کم به زیاد به ترتیب مربوط به روش مستقیم فرکانس میانگین با مقدار ۵۷(psi)، روش سرعت وارون سازی با مقدار ۷۱(psi) و در نهایت روش غیر مستقیم میرایی فرکانس با ۷۵(psi) بوده اند که تاییدی بر نتایج حاصله از مقاطع عرضی و افقی فشار منفذی پیش بینی شده به این روش ها و ضعف این روش ها در تفکیک لایه های مخزنی می باشد.

کلمات کلیدی: فشار منفذی، سرعت لرزه ای، مقاومت صوتی، میرایی فرکانس لرزه ای، مکانیزم بارگذاری، مخازن کربناته

لیست مقالات استخراج شده از رساله:

مقالات منتشره در مجلات علمی و پژوهشی

- مداحی ایرج؛ مرادزاده، علی؛ نجاتی کلاته علی، (۱۳۹۸). پیش بینی فشارمنغذی در مخازن کربناته با استفاده از سرعت لرزه‌ای برآورد شده از آنالیز چند نشانگری. پذیرش شده از مجله مهندسی معدن.
- مداحی ایرج؛ مرادزاده، علی؛ نجاتی کلاته علی، (۱۳۹۸). مقایسه پیش بینی فشارمنغذی با استفاده از روش مرسوم سرعت لرزه‌ای و روش بر پایه داده‌های مقاومت صوتی. پذیرش شده از مجله پژوهش نفت.

مقالات ارائه شده کنفرانسی

- مداحی ایرج؛ مرادزاده، علی؛ نجاتی کلاته علی، (۱۳۹۸). پیش بینی فشارمنغذی در مخازن کربناته بر پایه داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای. چهارمین همایش ژئوفیزیک اکتشاف نفت. ۱۰ و ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸، تهران، ایران.
- مداحی ایرج؛ مرادزاده، علی؛ نجاتی کلاته علی، (۱۳۹۸). کاربرد مستقیم داده‌های وارون لرزه‌ای در پیش بینی فشار منغذی. سی و هشتمین گرد همایی زمین شناسی، ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸، تهران، ایران.
- مداحی ایرج؛ مرادزاده، علی؛ نجاتی کلاته علی، (۱۳۹۸). پیش بینی فشارمنغذی از سرعت وارون‌سازی لرزه‌ای در مخازن کربناته. چهارمین همایش ژئوفیزیک اکتشاف نفت. ۱۰ و ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۸، تهران، ایران.

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ تعریف مسئله
۵	۳-۱ پیشینه تحقیق
۱۰	۴-۱ محدودیت روش‌های پیشین در برآورد فشار منفذی
۱۲	۵-۱ ضرورت انجام تحقیق
۱۴	۶-۱ اهداف و سوالات تحقیق
۱۵	۷-۱ فرض‌های تحقیق
۱۶	۸-۱ نمودار گردش کار و مراحل کلی تحقیق
۱۸	۹-۱ ساختار رساله
۲۱	فصل ۲: موضوعات و تئوری‌های مرتبط با تحقیق
۲۲	۱-۲ مقدمه
۲۲	۲-۲ مفاهیم اصلی و پایه
۲۲	۱-۲-۲ فشار هیدرواستاتیک
۲۲	۲-۲-۲ فشار منفذی
۲۳	۳-۲-۲ فشار روباره
۲۳	۴-۲-۲ تنش موثر
۲۳	۵-۲-۲ سازند فشار بالا
۲۴	۶-۲-۲ مکانیزم‌های ایجاد فشار غیر نرمال
۲۴	۱-۶-۲-۲ مکانیزم بارگذاری
۲۶	۲-۶-۲-۲ مکانیزم‌های توسعه سیال
۲۷	۳-۲ تئوری تحقیق و مرور روش‌ها
۲۷	۱-۳-۲ تئوری تحقیق
۲۹	۲-۳-۲ مدل‌های پیش‌بینی فشار منفذی
۳۰	۱-۲-۳-۲ مدل ایتون
۳۱	۲-۲-۳-۲ مدل باورز
۳۳	۳-۲-۳-۲ مدل میلر
۳۴	۳-۳-۲ روش‌های غیر لرزه‌ای پیش‌بینی فشار منفذی
۳۴	۱-۳-۳-۲ پیش‌بینی فشار منفذی از نگار مقاومت ویژه
۳۵	۲-۳-۳-۲ پیش‌بینی فشار منفذی از نگار صوتی
۳۵	۳-۳-۳-۲ پیش‌بینی فشار منفذی از تراکم پذیری
۳۶	۴-۳-۲ روش‌های لرزه‌ای پیش‌بینی فشار منفذی
۳۶	۱-۴-۳-۲ پیش‌بینی فشار منفذی از سرعت لرزه‌ای
۴۰	۲-۴-۳-۲ پیش‌بینی فشار منفذی از مقاومت صوتی لرزه‌ای

۴۳	۳-۴-۳-۲	پیش بینی فشار منفذی از میرایی فرکانس لرزه‌ای
۴۸	۳	فصل ۳: معرفی منطقه و داده‌های مورد استفاده
۵۰	۱-۳	مقدمه
۵۰	۲-۳	موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه
۵۱	۳-۳	حوضه رسوبی شمال غربی خلیج فارس
۵۱	۱-۳-۳	ناحیه رسوبی دشت آبادان
۵۲	۴-۳	زمین شناسی میدان مورد مطالعه
۵۲	۱-۴-۳	زمین شناسی ساختمانی
۵۳	۲-۴-۳	سنگ شناسی سازندها در میدان مورد مطالعه
۵۸	۵-۳	داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده
۵۸	۱-۵-۳	داده‌های لرزه‌ای
۶۰	۲-۵-۳	نگارها و اطلاعات چاه
۶۱	۳-۵-۳	نرم افزارهای مورد استفاده
۶۳	۴	فصل ۴: پیش بینی فشار منفذی با سرعت لرزه‌ای
۶۴	۱-۴	مقدمه
۶۴	۲-۴	تفسیر ساختمانی داده‌های لرزه‌ای
۶۷	۳-۴	مدلسازی سرعت و تبدیل به عمق داده‌ها و اطلاعات لرزه‌ای
۷۰	۴-۴	وارون سازی داده‌های لرزه‌ای
۷۵	۵-۴	تخمین مکعب چگالی و مکعب فشار روباره
۷۹	۶-۴	تعیین مکانیزم اصلی موثر در ایجاد فشارهای مخزن
۸۰	۷-۴	پیش بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت وارون سازی
۸۸	۸-۴	پیش بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری
۹۹	۹-۴	جمع بندی
۱۰۰	۵-۵	فصل ۵: پیش بینی فشار منفذی با داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای
۱۰۲	۱-۵	مقدمه
۱۰۲	۲-۵	روش پیش بینی فشار منفذی برپایه اصول تنش موثر (روش غیر مستقیم)
۱۱۰	۳-۵	کاربرد مستقیم داده‌های مقاومت صوتی در پیش بینی فشار منفذی
۱۱۵	۴-۵	جمع بندی
۱۱۷	۶	فصل ۶: پیش بینی فشار منفذی با روش میرایی فرکانس لرزه‌ای
۱۱۸	۱-۶	مقدمه
۱۱۹	۲-۶	روش میرایی فرکانس لرزه‌ای بر اساس اصول تنش موثر
۱۲۷	۳-۶	روش پیش بینی مستقیم فشار منفذی از میرایی فرکانس لرزه‌ای
۱۳۳	۴-۶	جمع بندی
۱۳۵	۷	فصل ۷: نتایج و پیشنهادات
۱۳۶	۱-۷	اهم نتایج حاصله از مطالعه

۱۳۶	نتایج روش‌های سرعت	۱-۱-۷
۱۳۷	نتایج حاصله از روش مقاومت صوتی	۲-۱-۷
۱۳۷	نتایج حاصله از روش میرایی فرکانس	۳-۱-۷
۱۳۸	مقایسه نتایج روش‌ها	۲-۷
۱۳۸	میزان انطباق مقادیر فشار منفذی پیش بینی شده با داده‌های RFT چاه‌ها	۱-۲-۷
۱۴۳	تجزیه و تحلیل آماری نتایج	۲-۲-۷
۱۴۵	یافته‌ها و نوآوری تحقیق	۳-۷
۱۴۵	پیشنهادات	۴-۷
۱۴۷	مراجع:	

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): گردش کار پیش بینی فشار منفذی با استفاده از ترکیب داده‌های لرزه‌ای و چاه در مطالعه حاضر ۱۷
- شکل (۱-۲): گردش کار معمول در پیش بینی فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای ۳۷
- شکل (۲-۲): فرایند گردش کار پیش بینی فشار منفذی با استفاده از مقاومت صوتی ۴۱
- شکل (۳-۲): مقایسه نتایج پیش بینی فشار منفذی بین روش برپایه سرعت (روش باورز) و روش مستقیم مقاومت صوتی، ۴۳
- شکل (۴-۲): تعیین تغییرات طیف فرکانس با عمق با استفاده از روش (CFS) در یک تریس لرزه‌ای ۴۶
- شکل (۵-۲): تبدیل فرکانس به فشار منفذی با استفاده از یک خط روند نرمال فرکانسی ۴۷
- شکل (۱-۳): موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مورد مطالعه (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۰) ۵۰
- شکل (۲-۳): ستون چینه شناسی ناحیه خوزستان به همراه ستون چینه شناسی ایران، ۵۵
- شکل (۳-۳): نقشه پایه میدان مورد مطالعه به همراه موقعیت چاه‌ها ۵۹
- شکل (۵-۳): نگارهای پتروفیزیکی متداول و چک شات مربوط به چاه شماره ۴ میدان مورد مطالعه ۶۱
- شکل (۱-۴): نقشه زمانی (آیزو کرن) سازند ایلام ۶۵
- شکل (۲-۴): نقشه زمانی (آیزو کرن) سازند سروک ۶۶
- شکل (۳-۴): نقشه زمانی (آیزو کرن) سازند کژدمی ۶۶
- شکل (۴-۴): نقشه زمانی (آیزو کرن) سازند فهلیان ۶۷
- شکل (۵-۴): نقشه عمقی (آیزوپک) سازند ایلام ۶۸
- شکل (۶-۴): نقشه عمقی (آیزوپک) سازند سروک ۶۹
- شکل (۷-۴): نقشه عمقی (آیزوپک) سازند کژدمی ۶۹
- شکل (۸-۴): نقشه عمقی (آیزوپک) سازند فهلیان ۷۰
- شکل (۹-۴): ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی و انجام انطباق داده‌های چاه ۱ با داده‌های لرزه‌ای ۷۱
- شکل (۱۰-۴): ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی و انجام انطباق داده‌های چاه ۲ با داده‌های لرزه‌ای ۷۱
- شکل (۱۱-۴): مدل اولیه ساخته شده از داده‌های لرزه‌ای و چاه در محل چاه ۲ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است) ۷۲
- شکل (۱۲-۴): نتایج آنالیز وارون‌سازی برپایه مدل در محل چاه ۲ ۷۳
- شکل (۱۳-۴): نتایج آنالیز وارون‌سازی باند محدود در محل چاه ۲ ۷۳
- شکل (۱۴-۴): نتایج آنالیز وارون‌سازی رنگی در محل چاه ۲ ۷۴
- شکل (۱۵-۴): نتایج آنالیز وارون‌سازی خارهای پراکنده در محل چاه ۲ ۷۴
- شکل (۱۶-۴): برش عرضی شرقی-غربی از مکعب مقاومت صوتی حاصل از روش وارون‌سازی برپایه مدل در محل چاه ۵ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است) ۷۵
- شکل (۱۷-۴): آنالیز چند نشانگری و لیست نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده در تخمین سرعت (سمت راست)، نمودار خطای کل و خطای اعتبار سنجی (سمت چپ) ۷۶
- شکل (۱۸-۴): برش عرضی از مکعب چگالی حاصل از تخمین به روش آنالیز چند نشانگری در محل چاه ۲ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است) ۷۷

- شکل (۴-۱۹): برآورد فشار روباره از مکعب چگالی در نرم‌افزار پترل در محل چاه ۲: (الف) مقطعی عرضی (شرقی-غربی) از فشار روباره و (ب) نگار فشار روباره در محل چاه‌های میدان، (واحد محورها بر حسب متر است) ۷۸
- شکل (۴-۲۰): نمودار متقاطع سرعت-چگالی در چهار چاه میدان مورد مطالعه ۷۹
- شکل (۴-۲۱): برش‌های عرضی و افقی از مکعب سرعت و آرون سازی (واحد اعداد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است) ۸۰
- شکل (۴-۲۲): برازش بین فشار موثر و سرعت حاصل از آرون سازی ۸۱
- شکل (۴-۲۳): مقطع عرضی فشار موثر برآورد شده از سرعت و آرون‌سازی در محل چاه ۲: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار کمتر (رنگ تیره‌تر) تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک شدند (واحد محورها بر حسب متر است) ۸۲
- شکل (۴-۲۴): برازش بین داده‌های فشار موثر تخمین شده با داده‌های واقعی در چاه ۶ ۸۲
- شکل (۴-۲۵): مقطع عرضی فشار منفذی برآورد شده از سرعت و آرون‌سازی در محل چاه ۲: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است) ۸۳
- شکل (۴-۲۶): مقطع عرضی فشار منفذی برآورد شده از سرعت و آرون‌سازی در محل چاه ۴: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است) ۸۴
- شکل (۴-۲۷): نگار فشار منفذی حاصل از سرعت و آرون‌سازی در محل چاه‌های میدان (واحد محورها بر حسب متر است) ۸۴
- شکل (۴-۲۸): برش افقی فشار منفذی در زون مخزنی سروک که نشان دهنده تغییرات جانبی فشار می‌باشد. ۸۵
- شکل (۴-۲۹): برش افقی از نشانگر تشابه که کانال‌های آبی را در بخش مخزنی سازند سروک نشان می‌دهد. ۸۶
- شکل (۴-۳۰): برش افقی از فشار منفذی در زون بورگان که نشان دهنده تغییرات جانبی فشار می‌باشد. ۸۶
- شکل (۴-۳۱): برش افقی فشار منفذی در زون فهلیان که نشان دهنده کم شدن فشار از شمال به طرف جنوب مخزن می‌باشد. ۸۷
- شکل (۴-۳۲): انطباق داده‌های پیش بینی فشار منفذی با داده‌های آزمایش فشار در چاه ها ۸۷
- شکل (۴-۳۳): نمودار متقاطع و ضریب تعیین بین داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت و آرون‌سازی و داده‌های آزمایش چاه ها ۸۸
- شکل (۴-۳۴): آنالیز تک نشانگری: لیست نشانگرها و میزان همبستگی آنها با نگار صوتی (سمت راست)، میزان انطباق اولین نشانگر و خطای مدل (سمت چپ) ۸۹
- شکل (۴-۳۵): آنالیز چند نشانگری و لیست نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده در تخمین سرعت (سمت راست)، نمودار خطای کل و خطای آزمون (سمت چپ) ۹۰
- شکل (۴-۳۶): برش عرضی از سرعت موج تراکمی حاصل از تخمین به روش آنالیز چند نشانگری در محل چاه ۲ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است) ۹۱
- شکل ۴-۳۷: برازش بین فشار موثر و سرعت بدست آمده از آنالیز چند نشانگری ۹۲

- شکل (۴-۳۸): برازش بین داده‌های فشار موثر پیش بینی شده با داده‌های واقعی در چاه ۶..... ۹۳
- شکل (۴-۳۹): مقطع عرضی (شرقی-غربی) از فشار موثر پیش بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری: بخش‌های مخزنی ایلام، سروک، بورگان و فهلیان با فشار موثر کمتر (رنگ آبی تیره‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده‌اند (واحد محورها بر حسب متر است)..... ۹۳
- شکل (۴-۴۰): مقطع عرضی فشار منفذی پیش بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز نشانگرها در محل چاه ۲: مخازن ایلام، سروک، بخش بورگان و بخش بالایی سازند فهلیان با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده است (واحد محورها بر حسب متر است)..... ۹۴
- شکل (۴-۴۱): مقطع عرضی فشار منفذی پیش بینی شده با سرعت بدست آمده از آنالیز نشانگرها در محل چاه ۴: مخازن ایلام، سروک، بخش بورگان و بخش بالایی سازند فهلیان با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده است (واحد محورها بر حسب متر است)..... ۹۴
- شکل (۴-۴۲): نگار فشار منفذی پیش بینی شده در محل چاه‌ها (واحد محور قائم بر حسب متر است)..... ۹۵
- شکل (۴-۴۳): نمودار متقاطع و ضریب تعیین بین فشار منفذی پیش بینی شده و داده‌های چاه‌ها..... ۹۵
- شکل (۴-۴۴): برش افقی فشار منفذی پیش بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری در زون مخزنی سروک که نشان دهنده تاثیر کانال‌های زیر سطحی و شکستگی‌ها در توزیع و تغییرات جانبی فشار می‌باشد..... ۹۶
- شکل (۴-۴۵): نمایش گسل‌ها در بخش شمالی میدان در برش افقی از نشانگر تشابه لرزه‌ای..... ۹۷
- شکل (۴-۴۶): برش افقی فشار منفذی پیش بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری در زون مخزنی بورگان که نشان دهنده تغییرات جانبی فشار منفذی بوده و توانسته است نقش کانال مدفون در شمال شرقی میدان را تا اندازه‌های آشکار سازد..... ۹۷
- شکل (۴-۴۷): برش افقی فشار منفذی پیش بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری در زون مخزنی فهلیان که نشان دهنده تغییرات جانبی و کم شدن فشار مخزن از شمال به جنوب می‌باشد..... ۹۸
- شکل (۴-۴۸): انطباق داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری با داده‌های فشار در چاه‌ها..... ۹۸
- شکل (۵-۱): برش‌های عرضی و افقی از مکعب مقاومت صوتی لرزه‌ای (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است)..... ۱۰۳
- شکل (۵-۲): برازش بین فشار موثر و مقاومت صوتی حاصل از وارون لرزه‌ای..... ۱۰۳
- شکل (۵-۳): مقطع عرضی از فشار موثر حاصل از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۲: بخش مخزنی با فشار موثر کم از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است)..... ۱۰۴
- شکل (۵-۴): برازش بین داده‌های فشار موثر تخمین شده از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی با داده‌های واقعی در چاه ۶..... ۱۰۵
- شکل (۵-۵): مقطع عرضی فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۲: بخش مخزنی با فشار منفذی بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است)..... ۱۰۵

- شکل (۵-۶): مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون لرزه‌ای در محل چاه ۴: بخش مخزنی با فشار منفذی بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است). ۱۰۶
- شکل (۵-۷): نگار فشار منفذی پیش بینی شده در محل چاه‌ها با روش غیر مستقیم مقاومت صوتی (واحد محور قائم به متر است). ۱۰۶
- شکل ۵-۸: نمودار ضریب تعیین بین داده‌های پیش بینی شده فشار منفذی و آزمایش فشار چاه‌ها ۱۰۷
- شکل (۵-۹): برش افقی فشار منفذی مدل شده با روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در مخزن کربناته سروک که نشان دهنده تاثیر کانال‌های زیر سطحی و شکستگی‌ها در توزیع و تغییرات جانبی فشار می‌باشد. ۱۰۸
- شکل (۵-۱۰): برش افقی فشار منفذی مدل شده با استفاده از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در زون مخزنی ماسه سنگی بورگان که نشان دهنده تغییرات و کاهش افقی فشار از شمال به جنوب می‌باشد. ۱۰۹
- شکل (۵-۱۱): برش افقی فشار منفذی مدل شده با استفاده از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در زون کربناته فلهلیان که نشان دهنده جهت تغییرات فشار و کاهش آن از شمال به جنوب می‌باشد. ۱۰۹
- شکل (۵-۱۳): برازش بین داده‌های فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی با داده‌های واقعی در چاه ۶ ۱۱۱
- شکل (۵-۱۴): مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۲: بخش‌های مخزنی با فشار بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشند (واحد محورها بر حسب متر است). ۱۱۱
- شکل (۵-۱۵): مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۴: بخش‌های مخزنی تا حدودی با فشار بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است). ۱۱۲
- شکل (۵-۱۶): نگار فشار منفذی پیش بینی شده در محل چاه‌ها با روش مستقیم مقاومت صوتی (واحد محور قائم بر حسب متر است). ۱۱۲
- شکل (۵-۱۷): برش افقی فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی در زون مخزنی کربناته سروک که اثر کانال‌های زیر سطحی در تغییرات فشار قابل مشاهده است. ۱۱۳
- شکل (۵-۱۸): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی و تغییرات جانبی آن در زون مخزنی ماسه سنگی بورگان ۱۱۴
- شکل (۵-۱۹): برش افقی از فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی و تغییرات جانبی آن در زون مخزنی کربناته فلهلیان ۱۱۴
- شکل ۵-۲۰: نمودار ضریب تعیین بین داده‌های پیش بینی فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی و آزمایش فشار چاه‌ها ۱۱۵
- شکل (۶-۱): نشانگر دامنه فرکانس میانگین لرزه‌ای (واحد محورها بر حسب متر است). ۱۱۹
- شکل (۶-۲): استخراج روند نرمال میرایی فرکانس میانگین از داده‌های فرکانس میانگین در قسمت بالای چاه ۱۲۰

- شکل (۳-۶): برازش بین فشار موثر و نسبت میرایی فرکانس لرزه‌ای در محل چاه‌ها ۱۲۱
- شکل (۴-۶): برازش بین داده‌های فشار موثر حاصل از روش میرایی فرکانس با داده‌های واقعی در چاه ۰۶ ۱۲۲
- شکل (۵-۶): مقطع عرضی از فشار موثر برآورد شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای
(fa/fn) در محل چاه ۲ (واحد محورها بر حسب متر است) ۱۲۲
- شکل (۶-۶): مقطع عرضی از فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی
لرزه‌ای (fa/fn) در محل چاه ۲ (واحد محورها بر حسب متر است) ۱۲۳
- شکل (۷-۶): مقطع عرضی از فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی
لرزه‌ای (fa/fn) در محل چاه ۴ (واحد محورها بر حسب متر است) ۱۲۴
- شکل (۸-۶): نگار فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی (واحد محور قائم بر
حسب متر است) ۱۲۴
- شکل (۹-۶): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای در
بخش مخزنی سازند کربناته سروک ۱۲۵
- شکل (۱۰-۶): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای
در بخش مخزنی ماسه سنگی بورگان ۱۲۶
- شکل (۱۱-۶): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای
در سازند مخزنی کربناته فهلیان ۱۲۶
- شکل (۱۲-۶): برازش بین فشار منفذی چاه‌ها با مقادیر فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیر مستقیم
نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای ۱۲۷
- شکل ۱۳-۶: برازش بین فشار منفذی و میرایی فرکانس لرزه‌ای ۱۲۸
- شکل ۱۴-۶: برازش بین داده‌های فشار منفذی تخمین شده به کمک روش مستقیم میرایی فرکانس با
داده‌های واقعی چاه ۰۶ ۱۲۹
- شکل (۱۶-۶): نگار فشار منفذی حاصل از روش مستقیم میرایی فرکانسی (واحد محور قائم بر حسب متر
است) ۱۳۰
- شکل (۱۷-۶): برش افقی از مکعب فشار منفذی پیش بینی شده با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی در
بخش مخزنی سازند کربناته سروک ۱۳۱
- شکل (۱۸-۶): برش افقی از مکعب فشار منفذی با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی در بخش مخزنی ماسه
سنگی بورگان ۱۳۱
- شکل (۱۹-۶): برش افقی از مکعب فشار منفذی با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی در بخش مخزنی فهلیان
..... ۱۳۲
- شکل (۲۰-۶): برازش بین فشار منفذی پیش بینی شده با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی با داده‌های
RFT ۱۳۲
- شکل (۱-۷): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه ۱ و انطباق آن با
داده‌های RFT ۱۳۹
- شکل (۲-۷): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه ۲ و انطباق آن
با داده‌های RFT ۱۴۰

شکل (۳-۷): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه ۵ و انطباق آن با داده‌های RFT ۱۴۱

شکل (۴-۷): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه ۶ و انطباق آن با داده‌های RFT ۱۴۲

فهرست جداول

- جدول (۱-۳): اطلاعات چاه‌های میدان ۶۲
- جدول (۱-۴): سرعت، زمان و عمق سر سازندها در چاه‌های میدان مورد مطالعه ۶۸

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

پیش بینی فشار منفذی^۱ قبل از حفاری یکی از موضوعات مهم در ارزیابی پتانسیل خطر حفاری، طراحی چاه، ریسک اقتصادی، آسیب‌های زیست محیطی و خطرات جانبی از جمله ارزیابی عوامل خطر ساز مثل مهاجرت سیال سازند و یکپارچگی پوش سنگ در حین اکتشاف است. درک و دانش واقعی ما از زون‌های پرفشار بر پایه حفاری‌های روزانه، آزمایش‌های فشار چاه (RFT)^۲، گزارش نهایی و کامل چاه استوار می‌باشد.

امروزه روش‌های متفاوتی برای پیش بینی فشار منفذی بکار گرفته می‌شود که هر یک دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از داده‌های چاه‌نگاری و روش‌های لرزه‌ای اشاره نمود. با این حال پیش بینی واقعی فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای در مناطقی که هنوز حفاری نشده است، مورد وثوق زیادی بوده و موضوع تحقیق حاضر نیز می‌باشد. در این نوع روش‌ها، فشار منفذی قبل از حفاری با استفاده از برازش بین نشانگرهای لرزه‌ای^۳ و فشار مؤثر و یا بطور مستقیم با فشار منفذی و براساس روابط تجربی شناخته شده‌ای قابل محاسبه و تخمین است. از جمله روابط تجربی مهمی که برای تبدیل داده‌های سرعت به فشار استفاده شده‌اند، می‌توان به مدل‌های ایتون (Eaton, 1975) و باورز (Bowers, 1995) اشاره نمود. البته بدلیل تجربی و غیر مستقیم بودن این روابط، پیش بینی فشار منفذی از داده‌های لرزه‌ای دارای عدم قطعیت می‌باشد و این بدلیل آن است که رابطه بین نشانگرهای لرزه‌ای و فشار دارای تناظر یک به یک نبوده و عوامل زیادی بغیر از فشار، در تغییرات نشانگرهای لرزه‌ای مؤثر خواهند بود. از طرف دیگر، عوامل مختلفی مانند تغییرات لیتولوژیکی، رخساره‌ای، فشار آرتزین، دما، فرآیندهای ساختمانی (چین خوردگی و گسل‌ها)، میزان و نرخ رسوبگذاری و تراکم سنگ، دیاژنز کانی‌ها (بخصوص کانی‌های رسی) و بلوغ کروژن در فشار سازند

¹ Pore pressure

² Repeat Formation Tester

³ Seismic Attribute

موثر بوده و در مطالعات فشار باید مورد بررسی قرار گیرند. علی‌رغم اینها، در بیشتر مواقع یک انحراف مهم در تخلخل از روند تراکم نرمال، مؤید فشارهای بالا بوده و شناسایی آن را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی ممکن می‌سازد که بنوبه خود بیانگر عامل اصلی فشارهای غیرعادی بویژه در لایه‌های شیلی است (Bachrach et al., 2007). همچنین انبساط سیال و تبدیل هیدروکربن‌های سنگین به هیدروکربن‌های گازی و سبک یکی دیگر از عوامل مهم فشارهای غیرعادی لایه‌های زمین است که می‌تواند با استفاده از تغییرات در خواص سنگ، بویژه سرعت، چگالی، مقاومت صوتی^۱ و فرکانس لرزه‌ای^۲ تشخیص داده شود (Mouchet & Mitchell, 1989; Bell, 2002; Sayers et al., 2006).

۲-۱ تعریف مسئله

فشار منفذی یا فشار سازند، در واقع فشار سیال درون حفرات سنگ است که در زیر زمین با افزایش عمق زیاد می‌شود، علاوه بر افزایش مقدار فشار بر حسب عمق، شیب فشار نیز با افزایش عمق زیادتر می‌گردد. پیش بینی فشار منفذی قبل از حفاری، اهمیت زیادی در ارزیابی پتانسیل خطر، تعیین وزن گل و سلامت حفاری داشته و همواره یکی از موضوعات اساسی تحقیق در اکتشافات و تولید نفت و گاز می‌باشد.

فشار منفذی واقعی که بطور مستقیم از اندازه‌گیری فشار سازند در چاه (RFT) قابل حصول می‌باشد از داده‌های چاه نگاری و لرزه‌ای نیز قابل تخمین است. بر طبق رابطه ترزاقی تنش حاصل از فشار روباره در اعماق زمین با حاصل جمع تنش موثر (تنش بین ذرات جامد سنگ) و فشار منفذی، مساوی می‌باشد. به طور کلی دو دسته روش برای تخمین فشار منفذی وجود دارد، در دسته اول بر پایه اندازه‌گیری-های مستقیم و از روابط آماری فشار منفذی حاصل می‌شود و در دسته دوم فشار منفذی با استفاده از اندازه‌گیری مقادیر انحراف خواص فیزیکی (مقاومت ویژه الکتریکی و سرعت موج تراکمی) سازند نسبت به حالت نرمال و برازش آن با مقادیر فشار در محل چاه بدست می‌آیند. براین اساس و با توجه به

¹ Acoustic Impedance

² Seismic frequency

تحقیقات صورت گرفته، چندین رابطه و مدل تجربی نیز در این زمینه بوجود آمده است (Eaton, 1975; Bowers, 1995). یک راه برای پیش بینی فشار منفذی، تفسیر سرعت موج تراکمی در نگرهای چاه می‌باشد، راه دیگر بهره‌گیری از اطلاعات لرزه‌نگاری است که در اکثر روش‌های پیش بینی فشار منفذی قبل از حفاری از آن استفاده می‌شود (Choupra & Haffman, 2006).

با اینحال پیش بینی فشار منفذی قبل از حفاری به طور دقیق‌تر با استفاده از مطالعات ترکیبی از داده‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای حاصل می‌شود. امروزه بکارگیری سرعت لرزه‌ای بطور فزاینده‌ای راه خود را در پیش بینی فشار منفذی بخصوص در شیل‌ها باز کرده است. به هر حال در مناطق اکتشافی که در آن حفاری‌های قبلی وجود ندارد و یا در لایه‌های عمیق‌تر که تنها اکتشاف در لایه‌های بالایی انجام شده است، نقش روش‌های لرزه‌ای فوق‌العاده مهم خواهد بود. در بعضی از روش‌های تخمین فشار منفذی با نگرهای چاه و داده‌های لرزه‌ای نیاز به تعیین روند تراکم نرمال در سازندها است که بطور معمول از نگرهای چگالی، سرعت و مقاومت ویژه و انواع نگرهای حساس به تخلخل و با استفاده از روابط خطی و نمایی قابل استخراج می‌باشد، البته در تعیین روند تراکم نرمال شیل‌ها، باید از شیل‌های تمیز استفاده کرد (Ramadhan & Gouly, 2010, 2011).

در پیش بینی لرزه‌ای فشار منفذی قبل از عملیات حفاری بطور معمول از سرعت داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود که دقت برآورد فشار در این روش، بستگی زیادی به دقت و تفکیک‌پذیری داده‌های لرزه‌ای خواهد داشت. سرعت لرزه‌ای معمولاً خروجی آنالیز سرعت در مرحله پردازش داده‌های لرزه‌ای بوده و بسته به روش پردازشی اعمال شده می‌تواند سرعت برانبارشی^۱ و یا سرعت توموگرافی^۲ باشد (Bakulin et al., 2010). اگر چه سرعت‌های توموگرافی نسبت به سرعت‌های برانبارشی دقیق‌تر هستند ولی هر دو این داده‌های سرعت، از نوع فرکانس پائین بوده و لذا وقتی که از این سرعت‌ها برای تخمین فشار منفذی استفاده می‌شود مقادیر محاسبه شده، کمتر از فشار منفذی واقعی خواهند بود. بنابراین با

¹ Stacking Velocity

² Tomography Velocity

توجه به اهمیت موضوع جا دارد که تحقیق بیشتری صورت گرفته و راه‌حل‌های بهتری برای حل مسئله اندیشیده شود. بنظر می‌رسد یکی از راه‌کارهای حل این مسئله، بدست آوردن داده‌های سرعتی فرکانس بالا باشد که در تحقیق حاضر تلاش می‌شود، بجای استفاده مستقیم از سرعت‌های پردازشی، از روش‌های جدیدتری بهره گرفته شود که در ادامه بطور مختصر اشاره خواهد شد.

۳-۱ پیشینه تحقیق

اولین مطالعات پیش بینی فشارمنفدی احتمالاً به سال ۱۹۶۵ برمی‌گردد که بوسیله هاتمن^۱ و جانسون^۲ در ضمن استخراج خواص شیل‌ها صورت گرفت که روش آنها بر پایه انحراف از روند خط نرمال در سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده در نگارهای چاه استوار بود. پنه باکر^۳ (۱۹۶۸) نیز با استفاده از سرعت‌های لرزه‌ای به پیش بینی فشارمنفدی پرداخت. گاردنر^۴ و همکاران در سال ۱۹۷۴ رابطه‌ای بین گرادیان تنش روباره و گرادیان فشار نرمال سیال (فشار هیدرواستاتیک) و فشار سازندی پیشنهاد دادند (Gardner et al, 1974). در سال ۱۹۷۷ گرگوری^۵ نشان داد که سیال‌های مختلف با فشارهای گوناگون، در داخل منافذ سنگ، اثر مهمی روی سرعت سنگ دارند. او این نتایج را روی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از زمان سیر امواج الاستیک (امواج برشی و تراکمی) در سنگ و سیال و در فشارهای منفذی متفاوت بدست آورد (Gregory, 1977).

از بنیان گذاران پیش بینی فشار منفذی با روش‌های لرزه‌ای می‌توان به وینکلر و نور (Winkler & Nur, 1979) و نیز به دوتا (Dutta, 1983) اشاره کرد. از سال ۲۰۰۰ به بعد، روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی بر پایه اطلاعات لرزه‌ای به یکی از آنالیزهای رایج در مناطقی تبدیل شد که با مشکل فشار مواجه بودند. این روش به خصوص در خلیج مکزیک با استقبال گسترده‌ای روبرو شد چرا که در این منطقه

¹ Hatman

² Johnson

³ Pennebaker

⁴ Gardner

⁵ Gregory

اکثر چاه‌ها با سازندهای پر فشار برخورد می‌نمایند. دلیل دیگر این اقبال، عمق بالای آب این منطقه و هزینه‌های بالای حفاری در آن است. بنابراین تخمین فشار منفذی با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای که مقدار فشار را قبل از شروع فاز اصلی حفاری پیش‌بینی می‌نماید، در خلیج مکزیک به سرعت گسترش یافت، به نحوی که در سال ۲۰۰۵ مطالعه جامعی بر روی ۷۰۰ بلوک نفتی این منطقه که شامل ۲۰۰۰ چاه بودند توسط کلی و همکاران انجام شد (Kelly et al., 2005). در این مطالعه جامع، اطلاعات فشار ۶۰ چاه موجود جهت تخمین فشار مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه سرعت لرزه‌ای پردازشی که بطور مرسوم برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده می‌شد، از قدرت تفکیکی^۱ زیادی برخوردار نبوده است، لینرت و همکاران سعی کردند از ترکیب سرعت حاصل از توموگرافی لرزه‌ای با داده‌های چاه که بنوعی اطلاعات چاه را در مدل سرعت وارد می‌کند در پیش‌بینی فشار منفذی در خلیج مکزیک استفاده نمایند (Parnell et al., 2006). باچراچ و همکاران در سال ۲۰۰۷ روش ایتون را در پیش‌بینی فشار منفذی برای تعیین خواص مخزنی در خلیج مکزیک بکار گرفتند (Bachrach et al., 2007). ریاحی و سلیمانی (۲۰۱۱) روش باورز را برای پیش‌بینی فشار منفذی در مخزن ماسه سنگی میدان منصوری بکار بردند. همچنین حجت‌نیا و ریاحی (۱۳۹۱) روش باورز را در یکی از میداین جنوب غرب کشور و نوری و همکاران (۱۳۹۲) این روش را در پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته میدان سفید زاخور مورد استفاده قرار دادند.

صالحی و منون در سال ۲۰۱۳ روش جدیدی را به عنوان میرایی فرکانس^۲ برای پیش‌بینی فشار منفذی در طراحی برنامه حفاری چاه برای آب‌های عمیق خلیج مکزیک و در مخازن ماسه سنگی استفاده کردند (Salehi & Mannon, 2013).

بانیک و همکاران نیز در سال ۲۰۱۴ مقاومت صوتی لرزه‌ای را در پیش‌بینی فشار منفذی در یک مخزن ماسه سنگی در خلیج مکزیک بکار گرفتند. در روش مذکور داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای بجای

¹ Resolution

² Frequency Attenuation

داده‌های سرعت با فشار موثر یا فشار منفذی برآزش شده و در پیش بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه سازی پارامترهای این روش از طریق یک فرآیند تکرار شونده حاصل می‌شود که در آن انطباق داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از نشانگر مقاومت صوتی و فشار منفذی اندازه‌گیری شده در چاه بررسی و بهبود داده می‌شود (Banik et al., 2014). یو و همکاران (۲۰۱۵) با تلفیق روش‌های ایتون و یان به پیش بینی فشار منفذی درجا در ناحیه‌ای در جنوب کشور چین پرداختند. در هر دو روش فوق‌الذکر سرعت موج تراکمی باید از خط روند تراکم نرمال (V_{normal}) تعیین شود. اما این عمل زمانی که داده‌های نگار سرعت مربوط به اعماق کم باشند بدلیل اینکه داده‌ها شدیداً نوسانی می‌باشند سخت خواهد بود. همچنین در این حالت نتایج پیش بینی نیز بدلیل خطای حاصل از نوسان شدید، غیر قابل اعتماد خواهد بود. در روش تلفیقی مذکور نیازی به تعیین V_{normal} نمی‌باشد، بنابراین دقت پیش بینی فشار منفذی در مناطق کم عمق بطور زیادی بهبود پیدا می‌کند (Yu et al., 2015). هاسکین و اوکانور (۲۰۱۶) تاثیر خواص سنگ روی داده‌های سرعت را به منظور پیش بینی فشار منفذی درجا با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه تحقیق آنها نشان داد، در صورتی که از سرعت‌های لرزه‌ای به تنهایی استفاده شود، بدلیل تاثیر خواص سنگ و فاکتورهای مختلف از جمله دیاژنز، مواد ارگانیک^۱ (TOC)، ناهمگنی سنگ و ... عمل کالیبراسیون با نگار سرعت چاه بدرستی صورت نمی‌گیرد و در چنین مواقعی فشار پیش بینی از مقدار واقعی آن کمتر خواهد بود (Hoskin & O'Connor, 2016).

منون و یانگ در سال ۲۰۱۷ روش میرایی فرکانس را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده برای پیش بینی فشار منفذی لایه‌های زیر نمک در سازندهای آواری بکار بردند، آنها بیان کردند که این روش نسبت به روش سرعت لرزه‌ای دارای مزایایی است، مثلاً کمتر تحت تاثیر سنگ‌های با سرعت زیاد در کانال‌های زیر سطحی و نزدیکی با توده‌های نمک قرار گرفته و فشارهای واقعی‌تری را نشان می‌-

¹ Total Organic Carbone

دهد (Mannon & Young, 2017). ال-ویر و همکاران در سال ۲۰۱۷ سرعت لرزه‌ای را برای پیش بینی فشار منفذی در میدان نفتی بنی سوف مصر بکار گرفتند و با شناسایی دو لایه با فشارهای بالا، نتایج مطالعه را در برنامه حفاری میدان مذکور مورد استفاده قرار دادند (El-Werr et al., 2017). هریس و همکاران (۲۰۱۷) سرعت لرزه‌ای را به روش شبکه عصبی احتمالی بدست آوردند و برای تخمین فشار منفذی در سازند آواری قومای در سوماترای جنوبی مورد استفاده قرار داده و موفق به شناسایی منطقه فشار بالا در آن ناحیه شدند (Haris & Vobbilisetty, 2017). همچنین آزادپور و شادمنامن (۱۳۹۵) مکانیزم‌های ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران را که عمدتاً از توالی سنگ آهک و شیل تشکیل شده است را با استفاده از اطلاعات نمودارهای سرعت، چگالی و فشار موثر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که عامل بارگذاری^۱ مکانیزم اصلی ایجاد فشار بالا در میدان مورد مطالعه بوده و عامل باربرداری نیز تا اندازه‌ای در فرایند تولید فشار بالا موثر بوده است. بنابراین آنها از روش ایتون که روشی مبتنی بر بارگذاری است و نیز از روش باورز که بر پایه هر دو مکانیزم تراکم نامتوازن^۲ و باربرداری استوار است جهت پیش بینی فشار منفذی در مطالعه خود استفاده کردند. محمدی و همکاران (۱۳۹۶) با کالیبره کردن سرعت برانبارش لرزه‌ای به وسیله نگارهای صوتی و با بکارگیری رابطه باورز در میدان کوپال موفق به شناسایی فشار غیرعادی برای سازندهای گچساران و پابده شدند، حال اینکه موفق به شناسایی بخش مخزنی سازند کربناته آسماری و مخزن کربناته بنگستان نشدند. آدیم و همکاران (۱۳۹۷) روش باورز را برای پیش بینی فشار منفذی از سرعت لرزه‌ای در یکی از میادین کربناته ایران بکار گرفتند. آنها مدل سرعت لرزه‌ای را با استفاده از نگارهای صوتی و به روش کوکریجینگ و با کمک گرفتن از مکعب مقاومت صوتی بدست آوردند و نتایج پیش بینی را با فشار منفذی بدست آمده از نگارهای چاهی به روش ایتون مقایسه کردند که نتایج بدست آمده از نگارهای چاهی بهتر بوده است. این گروه، مقطع عرضی که ارائه دادند فقط ستون چینه‌شناسی سازند مخزنی را

¹ Loading

² Unbalanced Compaction

شامل بوده و نشان ندادند که آیا روش بکار گرفته شده توانسته است بخش‌های مخزنی را از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید یا خیر؟. لی و همکاران (۲۰۱۸) با انجام وارون‌سازی همزمان دامنه مقابل دورافت^۱ و دامنه مقابل آزیموت^۲، سرعت موج تراکم را استخراج و در پیش بینی فشار منفذی بکار گرفتند. آنها از مدل ایتون استفاده کردند و نشان دادند که فرایند تعیین روند تراکم نرمال اهمیت زیادی در نتایج مطالعات آنها داشته است، (Lei et. al., 2018). همچنین ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2018) برای کاهش خطرات ناشی از حفاری در مناطق با فشار و دمای بالا از تکنیک پیش بینی قبل از حفاری استفاده کردند. آنها نشان دادند که در این مناطق عوامل مختلفی مانند بارگذاری سریع، تزریق نمک، تولید هیدروکربن و گسترش حرارتی سیالات در ایجاد فشار موثر هستند. آنها روی شناسایی بعضی چالش‌ها و راه حل‌ها تمرکز کردند، و خواستار تحقیقات بیشتر در این مناطق و برطرف کردن چالش‌های مرتبط با آب‌های عمیق شدند. لی و همکاران یک سال بعد موفق به پیش بینی فشار منفذی در شیل‌ها، از ضریب بالک بر پایه مدل فیزیک سنگ شدند. آنها روند تراکم نرمال شیل را در سرعت و ضریب بالک را با مدل‌سازی فیزیک سنگ برای افزایش دقت روند تراکم نرمال شبیه‌سازی کردند و در نهایت نتایج مطالعه را با مقادیر اندازه‌گیری فشار منفذی در چاه مورد ارزیابی قرار دادند که مطابقت نسبتاً خوبی را نشان می‌داد که این موضوع بیانگر امکان سنجی پیش بینی فشار منفذی به روش جدید قلمداد شد (Lei et. al., 2019). بهمنی و حسینی (۲۰۱۹) سرعت وارون‌سازی لرزه‌ای را برای پیش بینی فشار منفذی میدان سفید-زاخور بکار بردند. آنها نشان دادند که فشار منفذی بجز در سمت چپ طاق‌دیس ناحیه مورد مطالعه دارای روندی نرمال می‌باشد (Bahmaei, & Hosseini, 2019). هاتومو و همکاران در سال ۲۰۱۹ با ترکیب روش‌های ایتون و شبکه عصبی به پیش بینی فشار منفذی در یک مخزن کربناته پرداختند. آنها از مدل‌های مقاومت صوتی، مقاومت الاستیک، فرکانس و دامنه لرزه‌ای برای یادگیری شبکه استفاده کردند و ثابت کردند که روش ترکیبی آنها قادر به پیش بینی و مدل‌سازی

¹ Amplitude Versus Offset (AVO)

² Amplitude Versus Azimuth (AVAZ)

فشار منفذی در مخزن پیچیده کربناته بوده است (Hutomo et al. 2019). دوانتری و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از یک مطالعه مقایسه‌ای بین سرعت موج تراکمی و مقاومت صوتی به پیش بینی فشار منفذی پرداختند. آنها معکوس شدن نگار صوتی را به عنوان ورود به لایه فشار بالا و مقاومت صوتی را به عنوان پارامتر توزیع فشار منفذی شناسایی کردند (Dewantari, et al. 2019).

۴-۱ محدودیت روش‌های پیشین در برآورد فشار منفذی

روش‌های پیش بینی فشار منفذی با استفاده از نگارهای چاه، فقط حاوی تجربیات کوچک مقیاس نوسانات حاصل از تغییر فشار منافذ بوده، فلذا برای پیش بینی فشار منفذی با دقت‌های در سطح میدان ناتوان می‌باشند. پیش بینی فشار منفذی بر مبنای داده‌های لرزه‌ای نیز نیازمند داده‌های با کیفیت خوب و سرعت‌های پردازش قابل قبول است. بعضی پیش فرض‌هایی که در استفاده از داده‌های لرزه‌ای و در روش‌های مرسوم پیش بینی فشار منفذی در نظر گرفته می‌شوند، عبارتند از: (۱) ستون سنگی بطور غالب از شیل تشکیل شده است. (۲) تغییر تخلخل سنگ فقط از طریق مکانیزم‌های تراکمی کنترل می‌شوند. (۳) سرعت‌های لرزه‌ای در یک چگالی مناسب پیک شده‌اند. (۴) یک منحنی تراکم نرمال مناسب در دسترس می‌باشد. فرض‌های فوق بویژه اینکه سرعت‌های پردازشی اغلب دارای دقت کمی می‌باشند، باعث محدود شدن پیش بینی‌های فشار منفذی، بخصوص در سازندهای پیچیده و غیرآواری خواهند شد.

یک مسئله اساسی در استفاده از سرعت بازه لرزه‌ای^۱، تعیین رابطه بین فشار موثر و سرعت سنگ است. عوامل مختلفی که سرعت سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد، عبارتند از: سنگ شناسی، تخلخل، اشباع سیال، تنش محصور کننده، ساختار منافذ، دما، نوع سیال منافذ، محتوای رس، شیبدار بودن افق‌ها و سیمان شدگی (Dutta, 2002). حال اگر هر یک از این فاکتورها، بیشتر از عامل تنش موثر در کنترل سرعت سنگ موثر باشند، می‌تواند پیش بینی فشار منفذی را دچار اختلال نماید.

¹ Interval Velocity

همچنین بیشتر الگوریتم‌های موجود در پیش بینی فشار منفذی در خلیج مکزیک در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ و در توالی‌های آواری با شیل‌های غنی از اسمکتیت شکل گرفته‌اند و در رسوبات آواری که با دمای کم سازگار باشند، نتایج خوبی را فراهم می‌کنند ولی در مناطق آواری با اسمکتیت کم نیازمند اصلاح و تغییر خواهند بود. بطوریکه در تغییرات دمایی بالا، پتانسیل‌های تقویت یا تضعیف شیل اعم از تغییرات کانی شناسی و دیگر خواص در سنگ اتفاق می‌افتند، مثلاً در دمای بالای ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد مربوط به اعماق ۲/۵ تا ۴ کیلومتری زمین در بیشتر حوضه‌ها، خواص شیلی سنگ بشدت توسط واکنش‌های دیاژنزی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در چنین نواحی با دمای بالا، فشار زمین بیشتر بوسیله فرایندهایی نظیر شکست نفت به گاز و انبساط سیال اتفاق می‌افتند، در نتیجه اثرات آن نسبت به عامل تخلخل (روند تراکم نرمال) بارزتر خواهد بود. (Swarbrick, 2012).

تجربه جهانی نشان می‌دهد که افزایش چگالی وابسته به کانی شناسی و یا تغییرات بافتی در شیل‌ها و پاسخ سرعتی مربوط به آن بطور ضعیفی به تنش موثر مربوط می‌باشد. بنابراین یک روش مناسب پیش بینی باید متکی بر روابط بین دما، انبساط سیال، سن، عمق، نرخ بارگذاری قائم از یک طرف و تنش موثر از طرف دیگر بوده و پیش بینی آن برای برش‌های قائم فشار در یک ستون پیوسته شیلی تحت افزایش بارگذاری، ثابت باشد. از آنجایی که روش‌های موجود در بردارنده چنین روابط مستقل از سرعت نمی‌باشند لذا در محدوده‌های دمایی بالا برای ایجاد یک پیش بینی فشار منفذی رضایت بخش نخواهد بود (Swarbrick, 2012). علاوه بر آن تمامی روش‌های پیش بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت لرزه‌ای در شیل‌ها و مخازن ماسه سنگی توسعه پیدا کرده‌اند، لذا با توجه به تفاوت‌های اساسی در ساختار حفرات در سازندهای آواری و سازندهای کربناته، احتمالاً این روش‌ها دارای محدودیت‌هایی در تخمین فشار منفذی قبل از حفاری در مخازن کربناته می‌باشند، چرا که رفتار سرعت در رابطه با تنش و تراکم (تخلخل) در این سازندها واضح نبوده و به عوامل مختلفی چون شکل و نوع منافذ بستگی دارند کاندیداهای خوبی برای پیش بینی فشار منفذی بر مبنای سرعت بازه‌ی لرزه‌ای نمی‌باشند.

با در نظر گرفتن سابقه فوق و با توجه به اینکه همه روش‌های پیش بینی فشار منفذی ابتدا در مخازن ماسه‌سنگی و در خارج از ایران توسعه پیدا کرده‌اند و در مطالعات انجام شده برای مخازن کربناته نیز کم و کاست‌هایی مشاهده می‌شود، فلذا در مطالعه حاضر تلاش می‌شود روش‌های جدیدی از جمله روش سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز چند نشانگری معرفی شود. همچنین روش مقاومت صوتی لرزه‌ای و روش میرایی فرکانس لرزه‌ای به طرق مختلف در پیش بینی و مدل‌سازی دقیق‌تر فشار منفذی در مخازن کربناته استفاده و بهبود داده می‌شود.

۱-۵ ضرورت انجام تحقیق

در عملیات اکتشاف و توسعه میادین نفتی، فشار سازندی باید قبل از حفر چاه تخمین زده شود تا بتوان با طراحی مناسب گل حفاری، یک برنامه حفاری درست و کم هزینه را به اجرا در آورد. در عمل وزن گل حفاری به نحوی تعیین می‌شود که فشار ناشی از آن، فشار سازند را در عمق سرمرته خنثی نماید، بطوریکه اگر فشار گل حفاری از فشار سازند کمتر باشد، سیال از درون سازند به داخل چاه وارد شده و ممکن است موجب فوران چاه و از دست رفتن آن و نیز صدمات جانی و زیست محیطی بشود. برعکس، اگر فشار ناشی از گل حفاری از فشار سازند بیشتر باشد یا به عبارت دیگر بیشتر از فشار شکست سازند باشد، سبب می‌شود تا دیواره سازند دچار شکستگی شده و هرز روی گل حفاری اتفاق بیافتد.

لذا پیش بینی فشار منفذی قبل از حفاری، ضروری بوده و بنابراین مطالعات مربوط به عوامل ایجاد زون‌های پرفشار و نحوه توزیع آنها در حفاری‌های نفتی سودمند خواهد بود. حال با عنایت به اهمیت و حساسیت فشار منفذی در عملیات حفاری و توسعه میادین، در تحقیق حاضر تلاش می‌شود از روش‌های مختلف (سرعت بازه لرزه‌ای، مقاومت صوتی لرزه‌ای و تضعیف فرکانس) و با بکارگیری از داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی نسبت به پیش بینی و تخمین فشار منفذی در سازندهای کربناته پرداخته شود. بطوریکه با بهره‌گیری از نگارهای چاه نگاری و آزمایش‌های فشار درجا، خواص پتروفیزیکی و لیتولوژی، تغییرات فشار و دما و ارتباط این پارامترها با فشار، مورد بررسی قرار گرفته و علل بوجود

آورنده فشارهای غیرعادی در میدان بررسی شود. بیشترین مطالعات صورت گرفته در این زمینه بر پایه فرضی استوار است که بیان می‌کند هر تغییری در یک لایه زمین‌شناسی با فشار نرمال، موجب تغییری در بعضی خواص پتروفیزیکی مانند تراکم و تخلخل و جابجایی سیال می‌شود. بنابراین هر پارامتر قابل اندازه‌گیری که بتواند بطریقی این تغییرات را نشان دهد در تفسیر و ارزیابی فشار منفذی و کمی سازی آن سودمند بوده و قابل استفاده خواهد بود. در نهایت با استفاده از روش‌های لرزه‌ای به تخمین فشار منفذی در مناطق حفاری نشده و ساخت مدل سه بعدی فشار منفذی در میدان مورد مطالعه پرداخته می‌شود و مناطق احتمالی با فشار غیرعادی در میدان موردشناسایی قرار می‌گیرند.

در حال حاضر شناسایی مناطق با فشار غیر عادی با توجه به تجربیات چاه‌های مجاور و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، نگارهای چاه نگاری و شاید هم به کمک عملیات پروفیل‌زنی لرزه‌ای قائم^۱ (VSP) انجام می‌شود. حال با عنایت به اینکه استفاده از تجربیات چاه‌های قبلی همواره ممکن و قابل اعتماد نبوده، به علاوه داده‌های VSP نیز تنها اطلاعاتی از نزدیکی سرمرته به دست می‌دهند، لذا با توسعه و بکارگیری روش‌های لرزه‌ای در پیش بینی فشارمنفذی، مقدار فشار منفذی و نحوه توزیع آن و احتمال وجود مناطق با فشار زیاد در محدوده وسیعی از میدان (گستره داده‌های لرزه‌ای)، امکان پذیر می‌شود. بنابراین در صورت پیش بینی و ساخت مدل سه بعدی از فشار منفذی قبل از حفاری (هر چند با دقت کم، در حد دقت داده‌های لرزه‌ای) می‌توان با طراحی بهتر و هدایت مسیر چاه‌ها (به خصوص چاه‌های جهت‌دار) و انتخاب بهتر پارامترهای حفاری، هزینه عملیات حفاری و توسعه میدان را به میزان زیادی کاهش داد.

با عنایت به اینکه کلیه روابط مورد استفاده در روش‌های لرزه‌ای تخمین فشار منفذی، در میادین ماسه‌سنگی در دنیا توسعه داده شده‌اند، بنابراین در مناطقی مانند ایران که اکثر میادین نفتی آن از نوع کربناته است و تعداد مطالعات بسیار کم در این زمینه و آن هم تنها با روش سرعت لرزه‌ای انجام شده است، لذا انجام این تحقیق و تحقیق‌های بیشتر در زمینه پیش بینی فشارمنفذی در سازندهای کربناته

¹ Vertical Seismic profile

به روش‌های جدید ضروری است. همچنین بررسی علل فشارهای غیر طبیعی در بعضی افق‌های مخزنی با استفاده از تلفیق اطلاعات مختلف (زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، پتروفیزیکی و اندازه‌گیری‌های درجای فشار) دارای اهمیت بوده و در بهینه‌سازی روابط تجربی و کاربرد آنها در میدان کشور، سودمند خواهد بود. به هر حال در این مطالعه توانایی روش سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای و نیز روش برازش مستقیم میرایی فرکانس لرزه‌ای که برای اولین بار در این تحقیق بکار گرفته شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت با مقایسه نتایج آنها با روش‌های دیگر، روش‌های مناسب جهت پیش‌بینی فشار منفذی برای مخازن کربناته پیشنهاد خواهد شد.

۱-۶ اهداف و سوالات تحقیق

هدف اصلی این تحقیق شناسایی روش‌های لرزه‌ای مناسب جهت پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کشور، بخصوص در مخازن کربناته بوده و برای این منظور از روش‌های مختلف لرزه‌ای بهره گرفته می‌شود. بنابراین با انجام پیش‌بینی به روش‌های مختلف و مقایسه نتایج بدست آمده، روش یا روش‌های مناسب پیش‌بینی فشار منفذی شناسایی شده و نسبت به پیش‌بینی فشار مخزنی در یک میدان نفتی اقدام می‌شود. بطور کلی با انجام این تحقیق فشار منفذی و تغییرات آن در مخازن هدف به دقت مورد تخمین قرار می‌گیرد که بنوبه خود باعث کاهش عدم اطمینان و ریسک عملیات حفاری در میدان مذکور خواهد شد. برای رسیدن به هدف اصلی، اهداف واسطه‌ای زیر مورد پیگیری قرار خواهند گرفت:

- پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای
- بهبود مدل سرعت لرزه‌ای با بهره‌گیری از آنالیز چند نشانگری و بررسی آن در پیش‌بینی فشار منفذی

- پیش‌بینی فشار منفذی با بهره‌گیری از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای
- بررسی عملکرد روش میرایی فرکانسی و فاکتور کیفیت در تخمین فشار منفذی
- حساسیت سنجی و بررسی‌های مقایسه‌ای بین مدل‌های پیش‌بینی

- استخراج مکعب سه بعدی فشار منفذی با دقت مناسب در یک مطالعه موردی
 - شناسایی زون‌ها و نواحی پرفشار در مخازن مورد مطالعه
- حال سوالات مهمی که در رسیدن به اهداف فوق‌الذکر مطرح بوده و در طی انجام این تحقیق کوشش می‌شود که پاسخ قابل قبولی به آنها داده شود، به قرار زیر می‌باشند:
- عملکرد مدل‌های موجود در پیش بینی فشار منفذی که بیشتر در مخازن شیلی و ماسه سنگی توسعه داده شده اند نسبت به مخازن کربناته چگونه می‌باشد؟
 - پاسخ نشانگر سرعت در پیش بینی‌های فشار منفذی چگونه است؟
 - اثر افزایش فرکانس مدل سرعت لرزه‌ای در افزایش کیفیت پیش بینی فشار منفذی چگونه است؟
 - بهترین مدل سرعت لرزه‌ای در ارتباط با تخمین فشار منفذی کدام است؟
 - نقاط قوت و ضعف بکارگیری مستقیم مکعب مقاومت صوتی در پیش بینی فشار منفذی چیست؟
 - پاسخ روش میرایی فرکانس لرزه‌ای در پیش بینی‌های فشار منفذی چگونه است؟
 - نحوه توزیع فشار منفذی در مناطق مختلف میدان و مخازن مورد مطالعه چگونه است؟
 - عوامل موثر بر ایجاد مناطق با فشار بالا در میدان مورد مطالعه چیست؟
 - خطای تخمین انجام شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به چه میزان است؟

۷-۱ فرض‌های تحقیق

فرض‌های اساسی این تحقیق بصورت زیر می‌باشند:

- ۱- در سازندهای مخزنی، فشار منفذی از فشار هیدرواستاتیک سیال بیشتر است.
- ۲- فرآیندهای رسوبی، نحوه تراکم رسوبات و تغییرات سنگ شناختی در تغییرات فشار سیال منفذی موثر هستند.

- ۳- تغییر حجم سیال محبوس در سازند به سبب تغییرات دما در اندازه فشار سازند موثر است.
- ۴- تغییرات دیاژنزی در بخش‌های معدنی و آلی سنگ در تغییر فشار سازند موثر هستند.
- ۵- تغییر فشار منفذی، موجب تغییر در مدول‌های الاستیک و نشانگرهای لرزه‌ای خواهند شد.
- ۶- سرعت امواج لرزه‌ای، مقاومت صوتی و فاکتور کیفیت با فشار منفذی نسبت معکوس داشته و می‌توانند در پیش‌بینی فشار منفذی سودمند باشند.

فرض اول موجب هدف‌گذاری روشن تحقیق شده و سبب شناسایی مخازن نفتی خواهد بود. فرض‌های ۲ تا ۴ در رابطه با انتخاب مکانیسم‌های تولید فشار منفذی بالا راهگشا می‌باشند. فرض‌های ۵ و ۶ در انتخاب روش‌های لرزه‌ای برای پیش‌بینی فشار منفذی موثر می‌باشند.

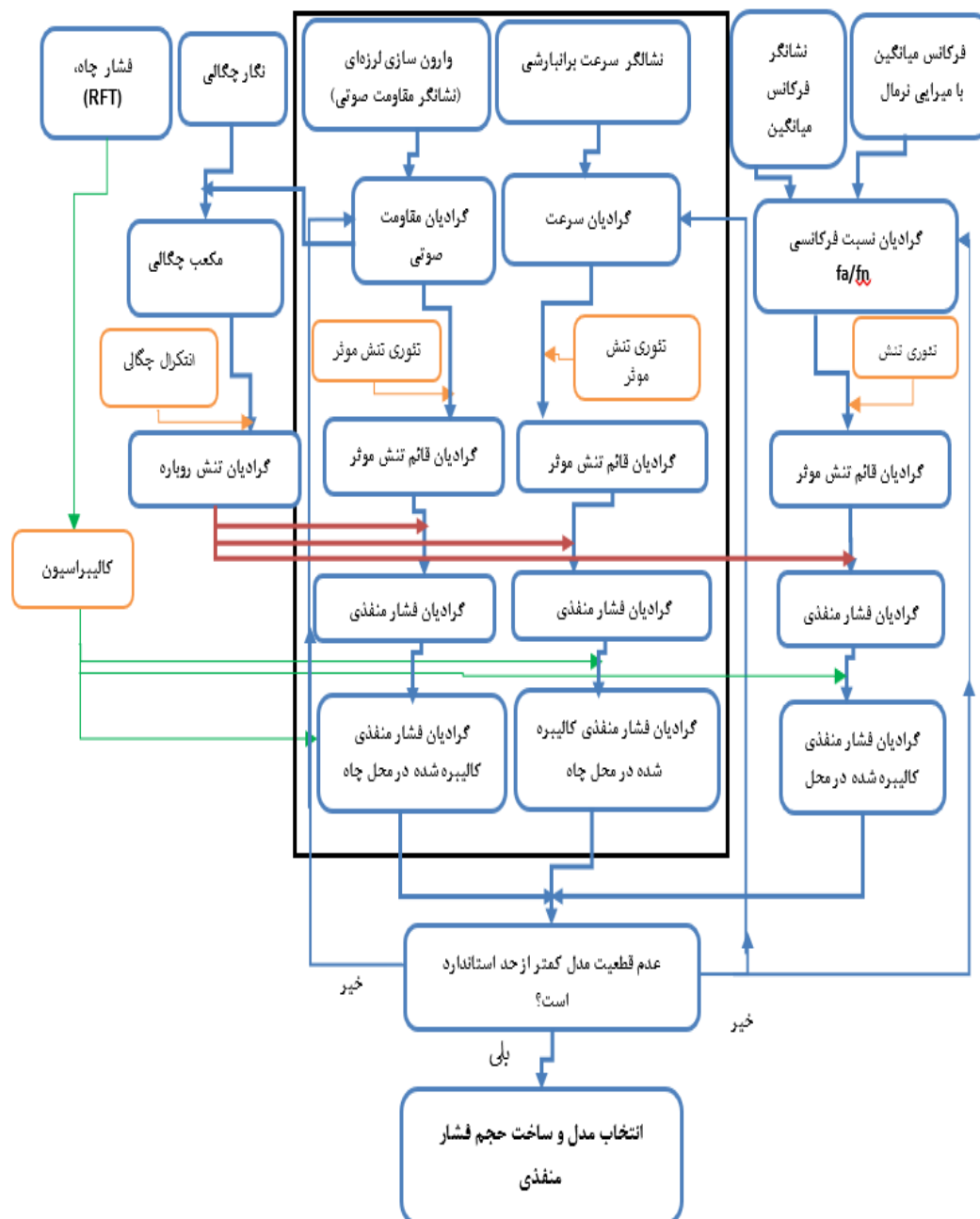
۸-۱ نمودار گردش کار و مراحل کلی تحقیق

در این تحقیق از روش‌ها و سناریوهای متفاوتی برای پیش‌بینی فشار منفذی و تجزیه و تحلیل داده‌ها و اطلاعات بهره گرفته شد که در شکل (۱-۱) گردش کار آن بطور کلی آورده شده است که در ادامه هر یک از مراحل کار به اختصار تشریح می‌شوند:

محاسبه و استخراج فشار روباره و گرادیان آن: در این قسمت ابتدا با ساخت مدل زمین و پر کردن آن با پارامتر چگالی بدست آمده از داده‌های لرزه‌ای و با استفاده از انتگرال چگالی نسبت به محاسبه مکعب فشار روباره و گرادیان آن اقدام شده و در فرآیند پیش‌بینی فشار منفذی بکار گرفته می‌شود.

تصحیح روابط و کالیبراسیون ضرایب مدل‌ها: با تصحیح روابط حاصل از برازش‌های اولیه، دقت و صحت داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از داده‌های چاه آزمون مورد بررسی قرار گرفته و ضرایب مدل‌ها کالیبره می‌شوند.

تخمین مکعب فشار موثر^۱ با استفاده از روش‌های مختلف لرزه‌ای: با بکارگیری مدل‌ها و روابط استخراج شده، بین سرعت-فشار موثر، مقاومت صوتی-فشار موثر و فرکانس لرزه‌ای-فشار موثر در محل چاه، سعی می‌شود مکعب سرعت لرزه‌ای، مکعب مقاومت صوتی و مکعب فرکانس میانگین لرزه‌ای به مکعب فشار موثر قائم برگردانده می‌شوند.



شکل (۱-۱): گردش کار پیش بینی فشار منفذی با استفاده از ترکیب داده‌های لرزه‌ای و چاه در مطالعه حاضر

¹ Effective Pressure

تخمین مکعب فشار منفذی و کالیبره کردن آنها با اطلاعات چاه: با توجه به استخراج مکعب فشار روباره و مکعب تنش موثر در مراحل قبلی، در این مرحله با بکارگیری رابطه بنیادی ترازقی، مکعب فشار منفذی اولیه برای هر سه روش (روش‌های سرعت، مقاومت صوتی و میرایی فرکانس لرزه‌ای) و در هر نقطه از شبکه برآورد می‌شود. همچنین مکعب فشار منفذی بطور مستقیم و با برازش بین نشانگرهای مقاومت صوتی و نسبت میرایی فرکانسی با فشار منفذی در این قسمت مورد استخراج قرار می‌گیرد. در ادامه با توجه به امکان وجود خطا در مکعب فشار منفذی اولیه، پارامتر مذکور با استفاده از فشار منفذی اندازه‌گیری می‌شوند در محل چاه‌ها و وزن گل حفاری کالیبره می‌شوند. به کمک این فرآیند، میزان وضوح مکعب فشار منفذی و دقت تخمین به نحو چشم‌گیری افزایش یافته و مقادیر نهایی مکعب فشار منفذی استخراج گردید.

تعیین خطای پیش بینی و تجزیه و تحلیل نقاط قوت و ضعف مدل‌ها: از آنجایی که تمامی مدل‌ها و روش‌های تخمین فشار منفذی هر کدام با فرضیات و شرایط خاص و برای مخازن خاصی توسعه پیدا کرده‌اند، استفاده از آنها برای مخازن دیگر و در شرایط متفاوت، با عدم قطعیت‌هایی روبرو خواهند بود. بنابراین مدل‌های مختلف از نظر دقت و صحت مورد تجزیه و تحلیل‌های آماری قرار گرفته و نقاط قوت و ضعف آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۹-۱ ساختار رساله

مطالب آورده شده در این رساله در هفت فصل تهیه و تنظیم شده‌اند. در فصل اول کلیاتی در مورد فشار منفذی، پیشینه تحقیق، ضرورت مطالعه همراه با هدف مطالعه و روش کار آورده شده است. در فصل دوم، ابتدا به مفاهیم پایه و اولیه مرتبط با موضوع رساله پرداخته شده و توضیحات مختصری از اصول تنش موثر ارائه می‌شود و سپس مکانیزم‌های ایجاد فشارهای غیرنرمال آورده شده است. در ادامه تئوری‌های مرتبط با تحقیق و مدل‌های تجربی مختلف مورد بحث قرار گرفته و نقاط قوت و ضعف آنها

بررسی شدند. همچنین در انتهای فصل روش‌های مختلف تخمین فشار منفذی، بخصوص روش‌های لرزه‌ای مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

در فصل سوم نیز به موقعیت جغرافیایی و توصیف زمین‌شناسی منطقه و داده‌های مورد استفاده پرداخته شده و در این خصوص توضیحات مختصری داده شده است. در فصل چهارم، داده‌ای لرزه‌ای ابتدا از نظر ساختمانی مورد تفسیر قرار گرفته و به شکل سه بعدی وارون‌سازی شدند و سپس فشار منفذی به دو روش، سرعت حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای بطور مستقیم و سرعت استخراج شده از نشانگرهای لرزه‌ای به روش آماری، مورد پیش‌بینی قرار گرفته و نتایج با هم مقایسه می‌شوند.

در فصل پنجم، فشار منفذی با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای و به دو روش، برازش مستقیم و یا برازش با فشار موثر، مورد پیش‌بینی قرار گرفته و نتایج با هم مقایسه می‌شوند. در فصل ششم، روش میرایی فرکانس میانگین لرزه‌ای برای پیش‌بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفت. در این فصل فشار منفذی با استفاده از نشانگر نسبت فرکانس میانگین به فرکانس میانگین نرمال (f_a/f_n) و به دو روش بدست آورده شده‌اند، ابتدا بین نشانگر نسبت فرکانسی فوق‌الذکر با تنش موثر برازش انجام و نتایج حاصل شدند و سپس این برازش بطور مستقیم با داده‌های فشار منفذی برای اولین بار در این تحقیق ارائه و نتایج با هم مقایسه شدند. نهایتاً در فصل هفتم، نتایج همه روش‌ها با هم تجزیه و تحلیل شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند و در ارائه پیشنهادات لازم برای کارهای بعدی ارائه شده است.

فصل ۲:

موضوعات و تئوری‌های مرتبط با تحقیق

۱-۲ مقدمه

در ابتدای این فصل تعریف دقیقی از مفاهیم پایه و اصلی مرتبط با موضوع تحقیق اعم از فشار هیدرواستاتیک، فشار روباره، فشار منفذی، تنش موثر و سازند فشار بالا ارائه می‌شود تا مقدمات لازم برای ورود به تئوری و روش تحقیق رساله فراهم شود. در ادامه مدل‌های تجربی و مهمی که تا به حال برای پیش بینی فشار منفذی در مخازن هیدروکربوری بکار گرفته شده‌اند از جمله مدل‌های ایتون و باورز مورد تشریح قرار گرفته و نقاط قوت و ضعف آنها نیز مورد بررسی قرار خواهند گرفت. سپس معرفی تئوری تحقیق و روش‌های پیش بینی فشار منفذی، ابتدا با بررسی روش‌های غیر لرزه‌ای مانند: روش داده‌های نگار مقاومت ویژه، داده‌های نگار صوتی و روش تراکم پذیری انجام و در ادامه روش‌های لرزه‌ای مختلف مورد استفاده برای پیش بینی فشار منفذی بصورت مبسوط توضیح داده شده‌اند.

۲-۲ مفاهیم اصلی و پایه

۱-۲-۲ فشار هیدرواستاتیک

فشار ستون سیال از سطح زمین تا هر عمق را فشار هیدرواستاتیک در آن عمق می‌نامند. فشار هیدرواستاتیک می‌تواند بصورت معادله زیر تعریف شود (Kumar et al., 2012):

$$P_h = \rho gh \quad (1-2)$$

که در آن: P_h به عنوان فشار هیدرواستاتیک، ρ چگالی متوسط سیال، g شتاب جاذبه زمین و h ارتفاع قائم ستون سیال می‌باشند. گرادیان فشار هیدرواستاتیک نسبت به عمق نیز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\partial p_h / \partial h = \rho g \quad (2-2)$$

۲-۲-۲ فشار منفذی

فشار منفذی در واقع فشار سیال داخل منافذ سنگ می‌باشد و در حالتی که سیال منافذ تنها تحت تاثیر وزن سیال بالای خود باشد، این فشار برابر با فشار هیدرواستاتیک خواهد بود.

۳-۲-۲ فشار روباره

فشار روباره یا فشار لیتواستاتیک در هر عمق برابر با تنش قائم ناشی از وزن رسوبات بالایی و سیال داخل آن بوده و بصورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\sigma_v = g\rho_b z = g \int_0^z \rho_b(z) dz \quad (۳-۲)$$

که در آن σ_v برابر با فشار (تنش) روباره، ρ_b چگالی بالک و z ضخامت قائم رسوبات بالایی می باشد. با توجه به اینکه چگالی بالک ناشی از محتوای کل سنگ اعم از رسوب و سیال محتوی آن می باشد لذا برای محیط های متخلخل می تواند بصورت زیر محاسبه شود (Noah, 2016).

$$\rho_b = \rho_m(1 - \varphi) + \rho_f \varphi \quad (۴-۲)$$

که در آن φ برابر با تخلخل، ρ_m برابر با چگالی زمینه و ρ_f برابر با چگالی سیال می باشند.

۴-۲-۲ تنش موثر

تنش موثر تنشی است که روی قالب جامد سنگ عمل کرده و مستقیماً قابل اندازه گیری نیست، با این حال تنش موثر می تواند بوسیله معادله ترزاچی (Terzaghi, 1943) و با استفاده از تفاضل بین تنش روباره با فشار منفذی محاسبه شود:

$$\sigma_e = \sigma_v - p_p \quad (۵-۲)$$

در رابطه فوق σ_v تنش روباره، σ_e تنش موثر و p_p فشار منفذی می باشند.

۵-۲-۲ سازند فشار بالا

بالا بودن فشار سازند زمانی اتفاق می افتد که فشار منفذی از فشار هیدرواستاتیک فراتر رود. عوامل مختلفی مانند رسوبگذاری سریع، نفوذپذیری پایین، دیاژنز، افزایش دما، متمرکز شدن جریان سیال، انبساط سیال و بعضی عوامل دیگر می توانند فشار سیال زیر سطحی را بالا ببرند (Gibson, 1958);

(Bowers, 1995; Wang & Manga, 2010) به چنین سنگ‌هایی که فشار منفذی آن به طور قابل توجهی بیشتر از فشار هیدرواستاتیک در عمق مربوطه است، سنگ‌های فشار بالا (فشار غیر نرمال) گفته می‌شود و مقدار فشار اضافی بصورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$p_o = p_p - p_h \quad (۶-۲)$$

که در آن P_o به عنوان فشار اضافی سازند، P_p به عنوان فشار منفذی و P_h برابر با فشار هیدرواستاتیک می‌باشند.

۶-۲-۲ مکانیزم‌های ایجاد فشار غیر نرمال

مکانیزم‌های گوناگونی برای ایجاد محدوده‌های فشار زیاد در حوضه‌های رسوبی ارائه شده است که بطور کلی در سه دسته زیر قابل طبقه‌بندی می‌باشند (Swarbrick & Osborne, 1998):

- ۱) مکانیسم افزایش فشار تراکمی ناشی از تراکم نامتوازن و فشردگی تکتونیکی
 - ۲) تغییر حجم سیال ناشی از افزایش دما، دیاژنز، تولید هیدروکربن‌های سبک و تبدیل هیدروکربن مایع به گاز
 - ۳) جابجایی سیال و فرآیندهای مرتبط با اختلاف چگالی بین سیالات و گازهای ناشی از سطح پتانسیومتریکی، اسموز و شناوری
- در همه این مکانیزم‌ها اگر چنانچه امکان خارج کردن فشار اضافی برای سازند وجود نداشته باشد، تولید لایه‌های با فشارهای منفذی بالا دور از انتظار نخواهند بود.

۱-۶-۲-۲ مکانیزم بارگذاری

مکانیزم بارگذاری به علت مقاومت سیال منفذی در فرار سریع از داخل رسوب و ماندن در تعادل هیدرواستاتیکی اتفاق می‌افتد و به عنوان یک عامل افزایش تنش فشاری عمل کرده و منجر به تولید فشار منفذی بالا می‌شود. پدیده‌های تراکم نامتوازن و تنش تکتونیکی می‌توانند از جمله مکانیزم‌های بارگذاری در نظر گرفته شوند:

الف) تراکم نامتوازن

در طی فرایند دیاژنز و ته نشست رسوبات، فشار روباره باعث افزایش تراکم رسوبات زیرین شده و آن هم باعث خارج شدن سیال از رسوب خواهد شد. حال اگر خروج سیال تا رسیدن به فشار هیدرواستاتیک اتفاق نیافتد، فشار منفذی سازند بالاتر رفته و بیشتر از فشار هیدرواستاتیک در آن عمق می شود، ولی اگر چنانچه نرخ رسوبگذاری کمتر باشد، خروج آب در یک حالت نرمال صورت گرفته و فشار درون منفذی به حالت تعادل با فشار هیدرواستاتیک خواهد رسید.

مکانیزم های مولد فشار ناشی از تراکم نامتوازن بیشتر در حوضه های کواترن و نئوژن و در رسوبات با نفوذپذیری کم و شیلی و به دلیل رسوب گذاری سریع اتفاق می افتند. در حوضه های قدیمی تر نیز، فشار زیاد به طور لحظه ای می تواند در لایه های ضخیم و با نفوذپذیری کم بوجود بیاید، اما غالباً به دلیل فشار بالای لایه ها به مرور زمان برطرف می شود، بطوریکه در طول مدت رسوب گذاری و با روی هم انباشتن رسوبات در اثر وزن رسوبات بالایی، سیال از منافذ رسوبات زیرین خارج می شوند (Swarbrick and Osborne, 1998, 2002). به هر حال در مواقعی، به دلیل عدم توانایی سازند در خروج سیال منافذ جهت حفظ فشار در حد هیدرواستاتیک، افزایش فشار روباره منجر به افزایش فشار منفذی می شود که بر سیال درون منافذ تحمیل خواهد شد. به عنوان یک نتیجه از این وضعیت، می توان به رسوبات کمتر متراکم شده و با تخلخل بالا نسبت به دیگر رسوبات هم عمق اشاره کرد. در چنین ساختاری که زهکشی افقی نیز وجود ندارد، سرعت خروج سیال نسبت به زمینه، مستقیماً از معادله داری و به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$V = - \left(\frac{k P_f g}{\mu} \right) d \left(\frac{\sigma_o}{d_z} \right) \quad (7-2)$$

که در آن: k : برابر با نفوذپذیری رسوب، μ به عنوان گرانیوی سیال، P_f فشار سیال، g به عنوان شتاب جاذبه زمین و σ_o/d_z نیز گرادیان تنش روباره می باشند.

ب) تراکم تکتونیکی

افزایش در تنش تکتونیکی به عنوان بخش دیگری از مکانیزم بارگذاری است که می تواند فشارهای غیر نرمال را تولید کند و بطور معمول با فرض اینکه تنش قائم به عنوان تنش اصلی موثر می باشد، در یک صفحه افقی عمل می کند.

۲-۲-۶-۲ مکانیزم های توسعه سیال

این مکانیزم ها به عنوان عوامل کاهش دهنده تنش موثر (افزایش دهنده فشار منفذی) در نظر گرفته می شوند که یا بوسیله کاهش محصورشدن (باربرداری) و یا بوسیله افزایش حجم سیال منفذی مانند تولید هیدروکربن، شکست هیدروکربن های سنگین به هیدروکربن های سبک و گاز و انبساط در اثر دما اعمال می شوند (Bowers, 1995; Alnes et al., 1998).

الف) تولید هیدروکربن

بلوغ کروژن از طریق تشکیل سیال کم چگال از کروژن با چگالی بالا و شکست نفت به گاز، نقش عمده ای در تولید پرفشاری سازند بازی می کند. تولید هیدروکربن بطور زیادی به دما و زمان بستگی داشته و احتمالاً در اعماق ۲ تا ۴ کیلومتر و در دمای بین ۷۰ تا ۱۲۰ درجه اتفاق می افتد (Tissot et al., 1987).

ب) انبساط حرارتی

انبساط حرارتی سیال منافذ نیز باعث افزایش فشار سازندی می شود (Barker, 1972). این نظریه که ابتدا از روی مدل سازی انبساط آب در حین گرم شدن، ساخته شد، بیان کننده افزایش فشار در یک محفظه بسته محدود در حین عمل انبساط حرارتی می باشد. عمده ترین ضعف مدل انبساط حرارتی آب، نیازمندی به وجود یک حالت بسته بودن کامل یا خیلی موثر بوده که نزدیک به نقطه تحمل ناپذیری

سازند می‌باشد (Daines, 1982; Luo & Vasseur, 1992) و بیانگر ارتباط بین افزایش دما و کاهش گرانیروی است.

ج) شکست نفت به هیدروکربن‌های سبک

این فرایند به نام شکست شیمیایی-حرارتی معروف بوده و بطور زیادی به دما و عمق وابسته می‌باشد و شامل تبدیل هیدروکربن‌های سنگین به هیدروکربن‌های سبک بوده و در پر فشاری سازندها موثر می‌باشد. بارکر (Barker, 1990) عنوان می‌کند که تبدیل نفت-بیتومن به گاز در اعماق زیر ۳ کیلومتر و در دمای بین ۹۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد.

د) دیاژنز رس‌ها

خروج آب در طی فرایند تبدیل کانی اسمکتیت به ایلیت بصورت مرحله ای رخ می‌دهد (Burst, 1969). مطابق نظر سواربریک و همکاران (Swarbrick et al., 1998) کمیت آب تولیدی در این فرایند کم بوده و نمی‌تواند در تولید فشار غیر عادی سازند اهمیت زیادی داشته باشد. با این حال لاهان و سواربریک (Lahann & Swarbrick, 2011) اذعان داشتند که تبدیل اسمکتیت به ایلیت شامل یک تغییر ساختاری نیز بوده و گل سنگ های ایلیتی شده متراکم حاوی تخلخل کم بوده، بنابراین متراکم بودن گل سنگ، نشانه خروج آب زیادی در طی این فرایند تبدیلی می‌باشد.

۳-۲ تئوری تحقیق و مرور روش‌ها

۱-۳-۲ تئوری تحقیق

در همه مطالعات پیشین فرض بر این است که تغییرات سرعت موج الاستیک با فشار منفذی از اصول تنش موثر طبیعت می‌کند که برای اولین بار توسط ترزاقی (Terzaghi, 1943) فرمول بندی شده است. ترزاقی در سال ۱۹۴۳ آزمایشی را برای توصیف تراکم سنگ به سبب فشار روباره طراحی کرد و نشان داد که فشار روباره بوسیله فشار منفذی و تنش موثر در زیر سطح تحمل و خنثی می‌گردد. بر

طبق این نظریه همه اثرات قابل اندازه گیری ناشی از تنش، مانند تراکم و تغییرات سرعت موج الاستیک تابعی از تانسور تنش موثر می باشند.

تئوری پیش بینی فشارمنفدی بر پایه قانون تنش موثر بایوت^۱ و ترزاقی، رابطه زیر را بین فشار روباره، تنش موثر و فشار منفدی بیان می کند:

$$p_p = \frac{(\sigma_v - \sigma_e)}{\beta} \quad (۸-۲)$$

که در آن: p_p فشار منفدی، σ_v فشار روباره، σ_e تنش موثر و β ضریب تنش موثر بایوت می باشد. ضریب بایوت نسبتی از تغییرات حجم سیال منفدی به تغییرات حجم کل سنگ است و وقتی که سیال برای خارج شدن از منافذ سنگ آزاد باشد مقدار آن برابر با ۱ خواهد بود (Zhang, 2011).

بر اساس اصول تنش موثر فرض می شود که سرعت و خواص مربوط به تخلخل تابعی از تنش موثر بوده و سعی می شود دو متغیر فشار روباره (σ_v) و فشار منفدی (P_p) به یک متغیر معادل یعنی تنش موثر (σ_e) بر گردانده شود (Terzaghi, 1943):

$$Vp = f(\sigma_e) = f(\sigma_v - nP_p) \quad (۹-۲)$$

که در آن n ضریب تنش موثر می باشد.

از نظر تئوری سنگ هایی که از یک ماده الاستیک تشکیل شده باشند و تراکم پذیری شان نیز وابسته به فشار باشد، تحت تنش های متوسط دارای ضریب تنش موثر برابر ۱ می باشند ($n=1$)، با این حال این نتیجه گیری برای سنگ های غیر همگن صادق نخواهد بود (Gurevich, 2004).

تاد و سیمون یک روش آزمایشگاهی برای اندازه گیری n و بصورت رابطه (۱۰-۲) بدست آوردند (Todd & Simmons, 1972)

$$n = 1 - \frac{(\partial V_p / \partial P_p) P_D}{(\partial V_p / \partial P_D) P_p} \quad (۱۰-۲)$$

¹ Biot

که در آن P_D فشار تفاضلی بوده و برابر اختلاف بین فشار روباره (σ_v) و فشار منفذی (P_p) می باشد. معادله فوق نشان می دهد که با اندازه گیری گرایان V_p-P_p و گرادیان V_p-P_D از نتایج آزمایشگاهی می توان به مقادیر n رسید، با این حال اندازه گیری های آزمایشگاهی در شرایط مختلف، مقادیر متفاوتی از n را نشان می دهند. بیشتر منابع چاپ شده اعداد نزدیک به یک را برای n در سنگ های با تخلخل بالا بدست می دهند، در حالیکه مقادیر n در سنگ های با تخلخل پایین بطور محسوسی کمتر از یک خواهد بود، (Todd and Simmons, 1972; Sarker & Batzle, 2008).

برای سنگ های با تخلخل بالا که دارای تراکم پذیری زیاد می باشند، سرعت موج تراکمی وقتی که فشار تفاضلی P_D ثابت باشد ضرورتاً ثابت می ماند، بنابراین $V=f(P_D)$ خواهد بود (Hicks & Berry, 1956; Wyllie et al., 1958). در صورتیکه برای سنگ های با تخلخل پایین که دارای تراکم پذیری کم می باشند سرعت تابعی از تنش موثر است. در نتیجه سنگ ها که در اعماق زیاد بطور نمایی تخلخل خود را از دست می دهند و تراکم پذیری شان نیز کم می شود (Athy, 1930; Mondol et al., 2007)، حساسیت شان نسبت به فشار منفذی کم خواهد شد.

۲-۳-۲ مدل های پیش بینی فشار منفذی

بیشترین مدل های بکار گرفته شده برای پیش بینی فشار منفذی، روابط تجربی ایتون (Eaton, 1975) و باورز (Bowers, 1995) بوده است که بر پایه اصول تنش موثر (رابطه ۲-۱۱) بیان شده است:

$$V_p = f(\sigma_e) = f(\sigma_v - nP_p) \Rightarrow P_p = (\sigma_v - g(V_p)) / n \quad (۱۱-۲)$$

که در آن g وارون تابع f می باشد.

این رابطه بیان می کند که اگر سرعت موج تراکمی V_p در سنگ معلوم باشد، می توان تنش موثر را تخمین زد و در ادامه فشار منفذی در صورت معلوم بودن فشار روباره و تنش موثر، قابل پیش بینی خواهد بود. بیشتر کارهای اکتشافی توام با فرض مقدار ۱ برای n بوده است. با این توصیف در ذیل به چند مدل تجربی بدست آمده از داده های سرعت پرداخته می شود:

۲-۳-۱-۲ مدل ایتون

ایتون (۱۹۷۵) یک معادله تجربی جهت کمی سازی فشار منفذی با استفاده از نگارهای چاهی زمان عبور موج تراکم‌ی پیشنهاد کرد. وی تراکم نامتوازن را بعنوان مکانیزم اصلی تولید مناطق پر فشار در نظر گرفته و انحراف در روند طبیعی فشردگی شیل را به کمک نگار صوتی کالیبره می‌نماید که بیشتر بر پایه روش ارائه شده اولیه توسط هاتمن و جانسون بوده است. مبنای اصلی همه این روش‌ها نیز اصول تنش ترازقی (Terzaghi, 1943) است.

رابطه ایتون برای پیش بینی فشار منفذی با استفاده از زمان عبور موج لرزه‌ای بصورت زیر می باشد:

$$P_{pg} = \sigma_{vg} - (\sigma_{vg} - P_{hg}) \left(\frac{\Delta_{tn}}{\Delta_t} \right)^x \quad (12-2)$$

در رابطه فوق: P_{pg} گرادیان فشار منفذی، σ_{vg} گرادیان فشار روباره، P_{hg} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک، Δ_t زمان سیر اندازه‌گیری شده صوت در شیل توسط نگار چاه، Δ_{tn} زمان سیر اندازه‌گیری شده صوت در شیل در فشار نرمال (بدست آمده از ناحیه روند نرمال در نمودار چاه) و x ثابت توان می‌باشند.

همانطور که در رابطه (۱۲-۲) دیده می شود، برای استفاده از روش ایتون به گرادیان زمان سیر نرمال (Δ_{tn}) یا روند سرعت در حالت تراکم نرمال نیاز می‌باشد. ون روت و همکاران (Van, et al., 2004) یک روند تراکم نرمال و زمان سیر صوت با عمق در شیل‌های حوضه کارنارون^۱ را با استفاده از برازش یک رابطه توانی به زمان سیرهای صوتی از ۱۷ چاه با فشار نرمال استخراج کردند همچنین روابط مشابهی نیز برای حوضه نفتی برونئی استفاده شده است (Tingay et al., 2009). روش ایتون یکی از روش‌های متداول در پیش بینی فشار منفذی درجا بوده و در برخی از حوضه‌های نفتی و توسط افراد زیادی بکار گرفته شده است (Suwannasri, et al., 2014; Mouchet & Mitchell, 1989; Hermanrud et al., 1998).

¹ Carnarvon

ثابت توان (x) در معادله (۲-۱۲) بصورت اولیه عدد ۳ در نظر گرفته می شود که در عمل نیاز به اصلاح (بخصوص در مخازن کربناته) دارد (Contreras et al., 2011). با توجه به اینکه توان (x) در معادله ایتون به طور زیادی به خاصیت تراکم پذیری شیل ها بستگی دارد، لذا در حضور رسوبات کربناته نمی تواند بطور قابل اعتمادی مورد کالیبراسیون قرار بگیرد. عیب دیگر این روش این است که فرض می کند تنها عامل بوجود آورنده فشارهای بالا در زمین، تراکم نامتوازن بوده و عامل باربرداری در آن نادیده گرفته می شود و این نیز باعث محدودیت کاربرد آن بویژه در نواحی پیچیده زمین شناختی مانند نواحی بالا آمده^۱ زمین می باشد.

۲-۲-۳-۲ مدل باورز

باورز در سال ۱۹۹۵ معادله ترزاقی را برای پیش بینی فشار منفذی بکار گرفت. روش وی مبتنی بر تنش موثر بوده و هر دو عامل تراکم نامتوازن و مکانیزم باربرداری حاصل از انبساط سیال را به عنوان مکانیزم های اصلی ایجاد فشارهای غیر عادی در نظر می گیرد. با توجه به اینکه عامل تراکم موجب کاهش مقدار تخلخل و در نتیجه باعث افزایش سرعت موج تراکمی می شود، بنابراین نمودار بارگذاری در سنگ های با تراکم نرمال، دارای روند نرمال سرعت-تنش موثر می باشند. به هر حال وقتی که سیال منفذی مجبوس شده و آزادی حرکت نداشته باشد، در شرایط تراکم نامتوازن، فشارهای بالا ایجاد خواهند شد. در این شرایط، مکانیزم تراکم در رسوبات با تخلخل بالا مهار شده و فشار منفذی بطور موازی با تنش روباره افزایش می یابد به عبارت دیگر تنش موثر با افزایش رسوب ثابت می ماند. بنابراین رسوباتی که تراکم نامتوازن را تجربه کردند از منحنی بارگذاری در نمودار سرعت-تنش موثر تبعیت می کنند (Bowers, 1995). باورز (۱۹۹۵) برای نواحی با تراکم نامتوازن رابطه تجربی زیر را بین تنش موثر و سرعت موج تراکمی ارائه نمود:

$$V = V_0 + A(\sigma_e)^B \quad (۲-۱۳)$$

¹¹ Uplift

که در آن: V سرعت موج تراکمی در عمق داده شده، V_0 نیز سرعت موج تراکمی در سطح زمین است، σ_e تنش موثر و A و B پارامترهای حاصل از کالیبراسیون رابطه سرعت ناحیه‌ای در برابر داده‌های تنش موثر در چاه‌های آزمایشی می‌باشند.

در مقابل، جهت برآورد فشار بالای تولید شده از انبساط سیال از منحنی باربرداری حاصل از نمودار تنش موثر-سرعت استفاده می‌شود (Bower, 1995; Tingay et al., 2007). در رسوباتی که تحت تراکم نرمال قرار داشته و سپس در اثر عواملی مانند توسعه سیال، دارای فشار زیاد می‌شوند، پیش بینی فشار بوسیله نمودار مربوط به مکانیزم باربرداری دنبال می‌شوند. در این شرایط توسعه سیال باعث افزایش فشار منفذی و به تبع آن کاهش تنش موثر می‌شود. بر اساس نظر باورز تراکم نمی‌تواند عامل اصلی کاهش تنش موثر باشد در صورتی که عامل باربرداری می‌تواند بعنوان کاهنده تنش موثر عمل نماید. انبساط سیال می‌تواند سبب افزایش فشار حفره‌ای با سرعت‌های بیشتر از افزایش فشار روباره شده و در نتیجه موجب کاهش تنش موثر در پیوستگی‌های رسوبی گردد. باورز (۱۹۹۵) رابطه تجربی زیر را برای محاسبه تنش موثر در حوضه‌های با مکانیزم باربرداری پیشنهاد کرد:

$$V = V_0 + A \left[\sigma_{\max} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\max}} \right)^{1/u} \right]^B \quad (۱۴-۲)$$

که در آن u به پارامتر باربرداری معروف بوده و بیانگر حالت پلاستیکی رسوبات می‌باشد، $u=1$ به منزله تغییر شکل دائمی بوده که در این حالت رابطه به شکل ساده و بدون باربرداری درمی‌آید، $u=\infty$ نیز مربوط به تغییر شکل‌های کاملاً برگشت ناپذیر می‌باشد و این حالت بیان کننده این فرض است که برای تمامی مقادیر تنش موثر کمتر از تنش بیشینه، سرعت برابر با حداکثر می‌باشد، σ_{\max} نیز مقدار تنش موثر در مرحله شروع باربرداری بوده و در واقع مقدار بیشینه تنش موثر می‌باشد (Bowers, 1995).

حال با استفاده از معادله ترزاقی و معادله (۱۴-۲) می‌توان نوشت:

$$P_{ulo} = \sigma_v - \left((\sigma_{max})^{1-u} \left(\frac{Vp - Vm}{A} \right)^{\frac{u}{B}} \right) \quad (15-2)$$

در رابطه فوق: P_{ulo} فشار منفذی در حالت باربرداری، σ_v تنش روباره، σ_{max} نیز مقدار تنش موثر بیشینه، u پارامتر باربرداری، V_p و V_m به ترتیب سرعت موج تراکمی در سطح و عمق، A و B پارامترهای مربوط به کالیبراسیون سرعت-تنش موثر می باشند.

با اینکه رابطه باورز در حوضه های نفتی زیادی از جمله در خلیج مکزیک (Zhang, 2011) و نیز در میدان منصوری کشورمان (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۱) بکار گرفته شده است، با اینحال این روش در مناطق کم عمق یا مناطق نامتراکم پیش بینی بالاتر از واقعیت را برای فشار منفذی بدست خواهد داد، زیرا سرعت موج تراکمی در چنین سازندهایی خیلی پایین است.

۳-۲-۳-۲ مدل میلر

میلر^۱ نیز رابطه ای بین سرعت موج تراکمی و تنش موثر ارائه می کند که می تواند برای ارتباط بین زمان سیر موج لرزه ای با فشار منفذی استفاده شود. در روش میلر یک پارامتر ورودی بنام " عمق سرعت ماکزیمم (d_{max}) - عمقی که عمل شروع باربرداری اتفاق افتاده است - وجود دارد که کنترل می کند که آیا عمل باربرداری اتفاق افتاده است یا نه؟ بطوریکه اگر d_{max} پایین تر از عمق Z باشد، در آن عمق باربرداری اتفاق نیفتاده و فشار منفذی می تواند از رابطه زیر بدست آورده شود (Zhang et al., 2011):

$$p = \sigma_v - \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{v_m - v_{ml}}{v_m - v_p} \right) \quad (16-2)$$

که در آن: P فشار منفذی، V_{ml} سرعت میان لایه ای^۲ موج تراکمی در (Mudline)، V_m سرعت میان لایه ای موج تراکمی در زمینه شیل (زمان سیر تقریبی در تنش موثر بینهایت f/s تا 16000 تا 4000)

¹ Miller

² Interval

، V_p سرعت موج p در عمق داده شده و λ یک پارامتر تجربی است که بیان کننده نرخ افزایش سرعت با تنش موثر می باشد (معمولاً ۰/۰۰۰۲۵).

اگر عمق سرعت ماکزیمم بالاتر یا مساوی عمق Z باشد، در آن صورت "عمل باربرداری" اتفاق افتاده است و فشار منفذی از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$p_{ulo} = \sigma_v - \frac{1}{\lambda} \ln \left[a_m \left(1 - \frac{v_p - v_{ulo}}{v_m - v_{ml}} \right) \right] \quad (17-2)$$

که در آن: α_m نسبت شیب های سرعت در نواحی بارگذاری و باربرداری در نگرهای فشار موثر بوده $a_m = v_p / v_{ulo}$ (معمولاً $\alpha_m = 1/8$) و P_{ulo} برابر با فشار منفذی در رسوبات ناحیه باربرداری و v_{ulo} سرعت موج تراکمی در ناحیه ای است که باربرداری اتفاق افتاده است.

۲-۳-۳ روش های غیر لرزه ای پیش بینی فشار منفذی

۲-۳-۳-۱ پیش بینی فشار منفذی از نگار مقاومت ویژه

داده های حاصل از نگرهای چاه بعنوان یکی از قابل اعتمادترین و با ارزش ترین منابع داده ها در تعیین فشار منفذی سازند می باشند. اولین بار هاتمن (Hottmann, & Johnson, 1965) در رابطه با پیش بینی فشار منفذی با استفاده از نگار مقاومت ویژه الکتریکی بحث کرد.

ایتون (Eaton, 1975) با استفاده از نگار مقاومت ویژه، معادله زیر را برای پیش بینی شیب تغییرات فشار منفذی در سازندهای شیلی ارائه دادند:

$$P_{pg} = \sigma_{vg} - (\sigma_{vg} - P_{hg}) \left(\frac{R}{R_n} \right)^n \quad (18-2)$$

که در آن P_{pg} گرادیان فشار منفذی در طول چاه، σ_{vg} گرادیان تنش روباره، P_{hg} گرادیان فشار هیدرواستاتیک، (که عموماً 0.5 psi/ft یا $1/0.3 \text{ Mpa/km}$ در نظر گرفته می شود)، R مقاومت ویژه حاصل از نگار چاه در سازند شیلی، R_n مقاومت ویژه سازند شیلی در حالت بدون فشار غیر عادی (حالت

هیدرواستاتیک) که از نگار مقاومت ویژه تعیین می‌شود و n نیز متغیر توان بوده و برابر با $۱/۶$ تا $۱/۵$ می‌باشد و عموماً $۱/۲$ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۳-۲ پیش بینی فشار منفذی از نگار صوتی

اولین بار گاردنر در سال ۱۹۷۴ توانست رابطه‌ای را برای پیش‌بینی فشار منفذی از نگار صوتی و بصورت زیر پیشنهاد کند (Gardner et al., 1974):

$$P_p = \sigma_v - \frac{(\sigma_{vng} - P_{png})(A_1 - B_1 \ln \Delta t)^3}{Z^2} \quad (۱۹-۲)$$

در رابطه بالا، P_p فشار منفذی برحسب پوند بر اینچ مربع (psi)، σ_v تنش روباره برحسب پوند بر اینچ مربع (psi)، σ_{vng} گرادیان تنش روباره نرمال برحسب psi/ft ، P_{png} گرادیان فشار منفذی نرمال برحسب psi/ft ، Z برابر با عمق (ft)، Δt برابر زمان عبوری ($\mu\text{s/ft}$) و A_1 و B_1 نیز ضرایب ثابت هستند. خروجی پیش‌بینی فشار منفذی از سرعت موج تراکمی معمولاً با پارامترهای کالیبراسیون سازگار است با اینحال در نواحی با کانال‌های زیر سطحی و در نزدیکی توده‌های نمک پیش‌بینی‌های توأم با خطای زیاد دیده می‌شوند (Mannon & Young, 2017).

۳-۳-۳-۲ پیش بینی فشار منفذی از تراکم پذیری

در این روش که بوسیله ونگولف-راچت (Vangolf-Racht, 1982) ارائه شد، فرض می‌شود، فشار منفذی با تغییرات حجم حفرات سنگ مرتبط بوده و هر تغییری در فضای منافذ تابعی از تراکم پذیری سنگ و سیال داخل آن می‌باشد، بنابراین از خاصیت تراکم پذیری سنگ به عنوان عامل محاسبه فشار منفذی استفاده می‌شود. عموماً وقتی که سازند تحت فشار و بارگذاری قرار بگیرد، فضای حفرات آن کاهش می‌یابد که به نوبه خود می‌تواند سبب افزایش فشار وارده به سیال داخل آن باشد. آتشیباری و تینگای (Atashbari & Tingay, 2012) این روش را برای پیش‌بینی فشار منفذی در سازندهای کربناته در ایران پیشنهاد کردند. آنها نشان دادند که به دست آوردن صحیح روند تراکم نرمال، بعنوان یک پارامتر اصلی در توصیف سنگ مخزن، سرنخ مهمی برای پیش‌بینی فشار منفذی است.

$$P_p = \left(\frac{(1 - \Phi)C_b \sigma_{ef}}{(1 - \Phi)C_b - \Phi C_p} \right)^{\gamma} \quad (2-20)$$

که در آن: P_p فشار منفذی، Φ تخلخل، C_b تراکم پذیری بالک با واحد psi^{-1} ، C_p تراکم پذیری منفذی با واحد psi^{-1} ، σ_{ef} تنش موثر با واحد psi ، و γ یک ثابت تجربی است که محدوده آن بین ۰.۹ تا ۱ می باشد.

۲-۳-۴ روش های لرزه ای پیش بینی فشار منفذی

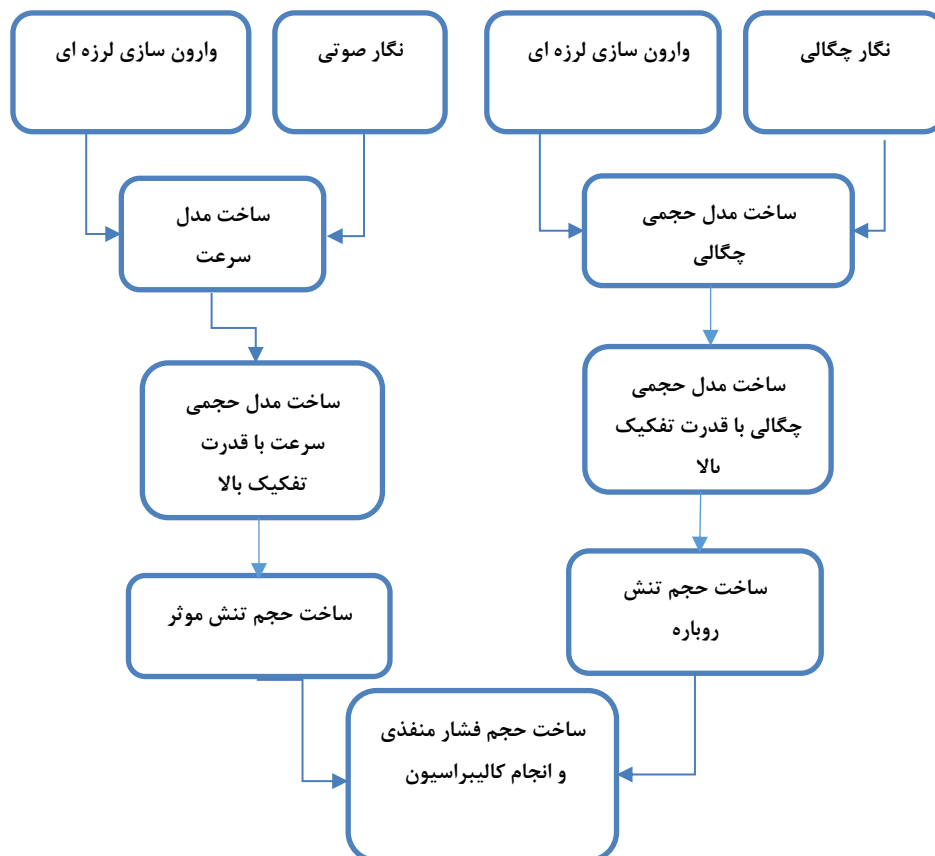
۲-۳-۴-۱ پیش بینی فشار منفذی از سرعت لرزه ای

در تخمین فشار منفذی با استفاده از داده های سرعت لرزه ای، همانند روش استفاده از نگار صوتی، از یک دسته روابط تجربی استفاده می شود که خواص ژئوفیزیکی مانند سرعت میان لایه ای و چگالی را بر پایه قانون تنش موثر به فشار منفذی مرتبط می کند (Terzaghi, 1943; Biot & Willis, 1957; Kumpel, 1991). همان طور که در نمودار شکل (۲-۱) پیش بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت لرزه ای نشان داده شده است، چهار جزء اساسی روش های پیش بینی فشار منفذی عبارتند: (۱) استخراج مدل سرعت، (۲) برآورد تنش موثر، (۳) محاسبه تنش روباره ناشی از وزن رسوبات بالایی، (۴) محاسبه فشار منفذی و کالیبراسیون مدل ها با استفاده از نگارهای چاه و داده های ناشی تست فشار (RFT) که بصورت اجمال در ذیل به آنها پرداخته می شود:

الف) استخراج مدل سرعت

یکی از گام های اساسی در تخمین فشار منفذی بر پایه داده های لرزه ای، تولید یک مدل سرعتی دقیق با قدرت تفکیک بالا است. تفاوت اصلی پیش بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت لرزه ای با پیش بینی آن از نگار سرعت (Δt)، در نحوه تعیین سرعت لایه ای است. در این روش سرعت لرزه ای، یا از جذر میانگین مربعات (RMS) برانبارش داده های لرزه ای بدست می آید و یا از سرعت های حاصل از وارون سازی لرزه ای به روش مستقیم و یا غیر مستقیم حاصل می شوند، در حالیکه سرعت موج تراکمی

در نگارهای چاهی با فرض عمودی بودن چاه فقط بصورت عمودی اندازه گیری می شوند، سرعت های لرزه ای دارای افقی و قائم می باشند.



شکل (۲-۱): گردش کار معمول در پیش بینی فشارمنفذی با استفاده از داده های لرزه ای

(با تغییر: Soleymani & Riahi, 2012)

همانطور که قبلا بیان گردید، سرعت های لرزه ای که از آنالیز سرعت در مرحله پردازش داده های لرزه ای بدست می آیند، بسته به سکانس پردازشی اعمال شده می تواند سرعت برانبارشی و یا سرعت حاصل از توموگرافی باشند. البته سرعت لرزه ای مورد استفاده در پیش بینی فشارمنفذی، مشتقی از سرعت های مذکور بوده و با استفاده از معادله دیکس^۱ که با رابطه (۲-۲۱) محاسبه می شود و به عنوان سرعت بازه ای و یا سرعت سنگ، مورد استفاده قرار می گیرد (Soleyman & Riahi i, 2012):

$$V = \left[\frac{(t_2 V_{rms2}^2 - t_1 V_{rms1}^2)}{(t_2 - t_1)} \right]_{int}^{\frac{1}{2}} \quad (21-2)$$

¹ DIX

که در آن: V_{int} برابر با سرعت بازه‌ای، t_1 ، V_{rms1} ، t_2 و V_{rms2} به ترتیب برابر با زمان سیر و جذر میانگین مربعات (rms) سرعت در لایه‌های اول و دوم می‌باشند.

اگرچه سرعت‌های توموگرافی نسبت به سرعت‌های برانبارشی دقیق‌تر هستند ولی هر دو این داده‌های سرعتی، دارای محتوای فرکانسی پائینی بوده، لذا وقتی که از این سرعت‌ها برای تخمین فشار سازند استفاده می‌شود، فشار محاسبه شده خیلی کمتر از مقدار واقعی نشان داده می‌شود (Soleyman & Riahi i, 2012).

امروزه پیشرفت‌های خوبی در روش‌های پردازشی و ساخت مدل سرعت و تصویر سازی لرزه‌ای بوجود آمده است، با این حال دوتا و خزانه داری (Dutta & Khazanehdari, 2006)، به اهمیت مدل‌های سرعت با محتوای فرکانسی بالا تاکید زیادی داشتند و برای این منظور، سرعت لرزه‌ای فرکانس پائین حاصل از معادله دیکس (سرعت بازه‌ای) را بعنوان سرعت زمینه برای آنالیزهای وارون سازی مورد استفاده قرار داده و با استفاده از نشانگر مقاومت صوتی و تبدیل آن به سرعت و چگالی، یک مدل سرعتی با محتوای فرکانسی بالا (حاصل از سری‌های بازتابی) بدست آوردند.

البته کیفیت مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی لرزه‌ای می‌بایست، با استفاده از مقاومت صوتی حاصل از داده‌های چاه مورد ارزیابی و تصحیح قرار گرفته و سپس برای استخراج مدل نهایی سرعت در گستره داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در هر حال سرعت استخراج شده با این روش دارای محتوای فرکانسی نسبتاً خوبی بوده و جهت شناسایی لیتولوژی و تفکیک مناطق با درصد‌های متفاوت تخلخل قابل استفاده خواهد بود و لذا در فرایند مطالعات فشار منفذی سازند نیز اهمیت زیادی دارد.

ب) محاسبه مولفه قائم تنش روباره

ابتدا گرادیان چگالی با استفاده از رابطه گاردنر (رابطه ۲-۲۲) و نگار چگالی محاسبه می‌شود و سپس با انتگرال گیری (رابطه ۲-۲۳) از نگار چگالی نسبت به محاسبه مکعب فشار روباره و گرادیان آن پرداخته می‌شود و در ادامه فشار روباره و گرادیان منتج از آن در فرایند پیش بینی فشار منفذی بکار گرفته خواهد شد.

$$\rho = \alpha V_p^\beta \quad (22-2)$$

که در آن، ρ چگالی و V_p سرعت موج P می باشد. پارامترهای α و β از طریق کالیبره کردن رابطه در نقاطی از چاه که هر دو نگار چگالی و سرعت موجود است بدست می آیند (Gardner et. al, 1974). در ادامه، مولفه قائم تنش روباره در هر عمق، با انتگرال گیری از نگار چگالی در آن عمق از طریق معادله زیر قابل محاسبه است.

$$\sigma_v = g \int_0^z \rho_b(z) dz \quad (23-2)$$

که در آن: g شتاب جاذبه زمین و $\rho_b(z)$ نیز چگالی بالک در عمق مربوطه (z) می باشد.

ج) برآورد تنش موثر

پس از محاسبه فشار روباره و با توجه به داده های اندازه گیری فشار منفذی موجود حاصل از تست های درون چاهی و با بهره گیری از رابطه ترزاقی ابتدا فشار موثر در نقاط چاه محاسبه می شود. در صورت عدم اندازه گیری فشار منفذی در چاه ها، می توان با در نظر گرفتن برابری فشار ناشی از گل حفاری در چاه با فشار منفذی سازندهای زمین، میزان فشار موثر در چاه را برآورد کرد.

حال با رسم نمودار متقاطع^۱ بین سرعت لرزه ای در مقابل داده های فشار موثر بدست آمده در محل چاه ها و با بهره گیری از مدل های مختلف مثلاً مدل باورز، نسبت به برآزش یک رابطه نمایی یا خطی بین داده های سرعت لرزه ای و فشار موثر اقدام می شود و سپس رابطه اولیه استخراج گردیده و داده های سرعت با استفاده از پارامترهای بدست آمده به داده های تنش موثر برگردانده می شوند.

د) کالیبراسیون مدل های پیش بینی

پس از اینکه داده های فشار موثر بصورت اولیه و در محل چاه ها مورد پیش بینی قرار گرفت، در این مرحله دقت داده های پیش بینی شده مورد بررسی قرار گرفته و با انجام یک سری تصحیحات در محل چاه ها، ضرایب رابطه اولیه تصحیح و کالیبره می شوند بطوریکه با این عمل دقت و صحت داده های پیش

¹ Cross plot

بینی شده بالا رفته و رابطه نهایی برای برگرداندن درست مکعب سرعت های لرزه ای به فشار موثر بدست آورده می شود.

۲-۳-۳-۲ پیش بینی فشار منفذی از مقاومت صوتی لرزه ای

روش بر پایه مقاومت صوتی (AI) برای محاسبه فشار موثر ابتدا توسط رسول اف و تونلات (Rasolof & Tonellot, 2011) مورد بحث قرار گرفت. تفاوت اساسی این روش با روش معمول باورز این است که مقاومت صوتی حاصل از داده های لرزه ای بصورت مستقیم به جای سرعت لرزه ای و چگالی، در محاسبات تنش موثر و تنش روباره مورد استفاده قرار می گیرد. بر پایه یک بازنویسی از رابطه باورز (رابطه ۲-۱۳)، از طریق ضرب طرفین در چگالی، معادله مذکور بصورت رابطه ای از مقاومت صوتی و تنش موثر درمی آید. بنابراین، مقاومت صوتی بصورت تابعی از تنش موثر درآمده و بصورت زیر بازنویسی می شود:

$$I_p = I_{p0} + A\sigma_e^B \quad (24-2)$$

به بیان دیگر می توان نوشت:

$$\sigma_e = [(I - I_{p0})/A]^{1/B} \quad (25-2)$$

در معادلات فوق، I_p و I_0 به ترتیب مقاومت صوتی موج تراکمی در سطح و عمق زمین بوده و σ_e تنش موثر، A و B نیز پارامترهای کالیبراسیون مقاومت صوتی با تنش موثر می باشند.

معادلات (۲۴-۲) و (۲۵-۲) به عنوان معادلات بهینه شده روش باورز تعریف می شوند (Banik, 2014).

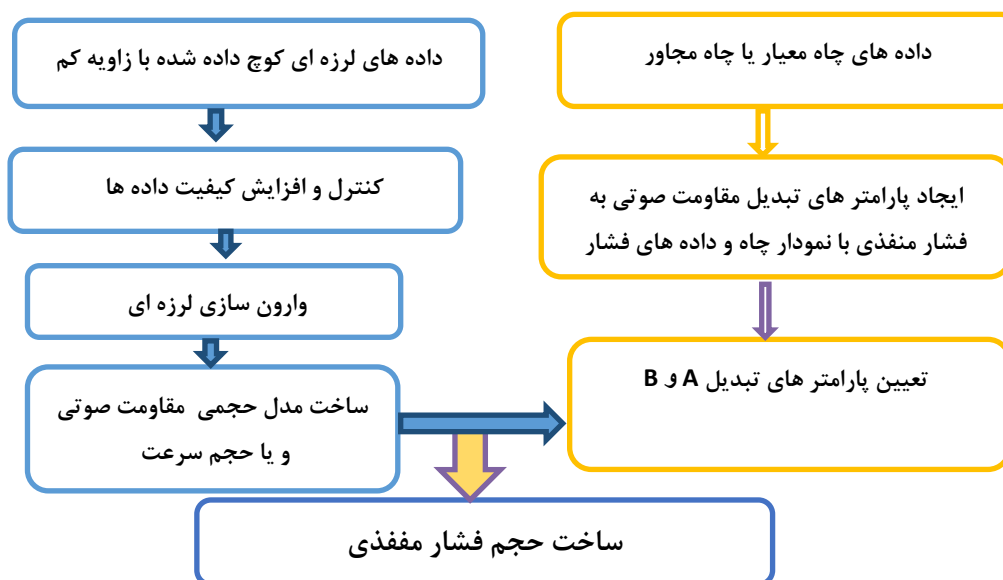
بطور مشابه تنش روباره σ_v که عموماً بصورت تابعی از چگالی رسوبات روباره نوشته می شود، نیز می تواند بصورت تابعی از مقاومت صوتی و بصورت زیر بازنویسی شود:

$$\sigma_v = g \sum_i \rho_i \Delta z_i = g \sum_i I_{pi} \Delta t_i \quad (26-2)$$

در معادله (۲-۲۶) علامت جمع (زیگما) روی تمامی نمونه‌های بالای لایه هدف در نظر گرفته می‌شود که در آن ρ_i و I_{pi} به ترتیب چگالی و مقاومت صوتی لایه ام بوده Δt_i و Δz_i به ترتیب فواصل نمونه‌ها در زمان و عمق بوده و g شتاب جاذبه زمین می‌باشند. همچنین علامت t (زمان) در معادله فوق، در جمله مربوط به مقاومت صوتی نشان دهنده یک نوع مزیت این معادله می‌باشد چرا که بسیاری از خواص وارون‌سازی لرزه‌ای در حوزه زمان محاسبه می‌شوند. در نهایت فشار منفذی از معادله ترزافی و بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$p_p = (\sigma_v - \sigma_e) / \beta \quad (2-27)$$

ضریب تنش موثر بایوت β در معادله (۲-۲۷) برای رسوبات آواری برابر واحد در نظر گرفته می‌شود (Hofmann et al., 2005). فرایند گردش کار پیش بینی فشار منفذی با استفاده از مقاومت صوتی در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲): فرایند گردش کار پیش بینی فشار منفذی با استفاده از مقاومت صوتی

(با تغییر: Banik et al., 2014)

از آنجایی که فرایند رسوب گذاری در حوضه های مختلف و یا حتی در افق های مختلف همان حوضه ممکن است متفاوت باشد، لذا تصریح می شود که تابع زیر دارای خاصیت نظام منقطع بوده و قابل تعمیم به حوضه های دیگر نمی باشد:

$$\sigma_e = f(I_p) \quad (2-28)$$

رابطه فوق نشان می دهد که در افق های مختلف مورد علاقه، پارامترهای تعریف تابع و یا حتی شکل خود تابع نیز ممکن است نیاز به تنظیم مجزا داشته باشند. این مسئله مشابه روش باورز در رابطه با تنش موثر و سرعت است؛ بطوریکه در معادله (۲-۱۳)، V_0 و پارامترهای A و B ممکن است در حوضه ها و افق های مختلف متفاوت باشند. در ادامه بانیک و همکاران دریافتند حتی تشکیل یک رابطه خطی ساده بین داده های مقاومت صوتی و فشار منفذی و برآزش بین آنها برای پیش بینی فشار منفذی در زیر لایه های عمیق نمک کافی می باشد، بطوریکه مثلاً در مناطقی از خلیج مکزیک یک تابع خطی ساده معکوس از مقاومت صوتی بصورت ذیل برای پیش بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفته است (Banik et al., 2014).

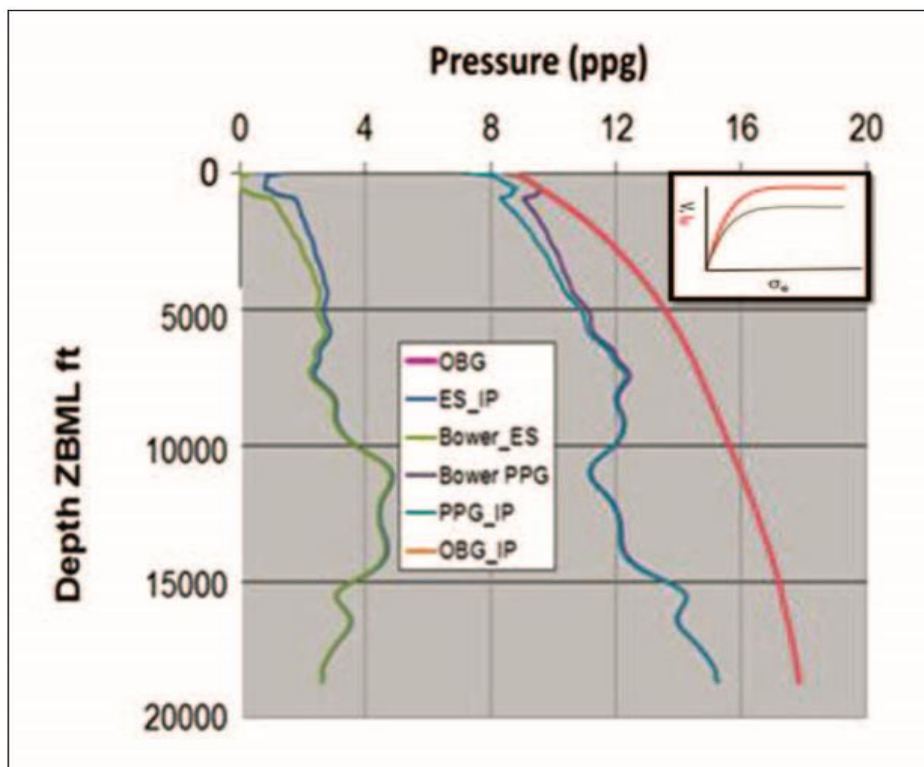
$$p_p = A + B/I_p \quad (2-29)$$

با این حال در مناطق با فرایند رسوب گذاری پیچیده، ممکن است به چند جمله ای هایی با مرتبه بالاتر از مقاومت صوتی نیاز باشد. لذا پارامترهای A و B در معادله فوق از طریق کالیبره کردن مدل با داده های فشار در چاه های آزمون یا چاه های مقایسه ای بدست می آیند.

مفهوم اساسی معادله (۲-۲۹) آن است که عموماً با کاهش مقاومت صوتی، فشار منفذی افزایش می یابد و یا به عبارت دیگر تنش موثر کاهش خواهد یافت. در شکل (۲-۳) پیش بینی فشار منفذی با استفاده از روش مستقیم مقاومت صوتی در مقایسه با روش سرعت (روش باورز) در محل یک چاه نشان داده شده است.

مزیت روش مقاومت صوتی (AI) نسبت به روش های معمول سرعت این است که در این روش از مراحل اضافی مانند برگرداندن مقاومت صوتی به سرعت و چگالی اجتناب می شود که بنوبه خود موجب

کاهش پتانسیل ایجاد خطای پیش بینی خواهد شد، با این حال نیاز به کالیبراسیون برای این روش خیلی مهم می باشد.



شکل (۲-۳): مقایسه نتایج پیش بینی فشار منفذی بین روش برپایه سرعت (روش باورز) و روش مستقیم مقاومت صوتی،

(Banik et al., 2014)

۲-۳-۴-۳ پیش بینی فشار منفذی از میرایی فرکانس لرزه‌ای

روش لرزه‌ای مرسوم برای پیش بینی فشار منفذی که برپایه سرعت‌های میان لایه‌ای است، بطور زیادی متکی به این فرض است که روند تخلخل بطور مستقیم با فشار منفذی مربوط است. همچنین می‌دانیم که سرعت سنگ به عواملی مانند سنگ شناسی وابسته می‌باشند که ممکن است هیچ تأثیری در عمل کردن و ارتباط با تنش موثر نداشته باشند و این در حالی است که فاکتور کلیدی تمام مدل‌های پیش بینی فشار منفذی بر اساس تنش موثر طراحی شده‌اند.

پیش بینی فشار منفذی بر اساس میرایی فرکانس لرزه‌ای^۱ از هر گونه فرض رابطه بین تخلخل و تنش موثر اجتناب کرده و براساس تماس دانه به دانه و مستقل از فاکتورهای مانند سنگ شناسی، تخلخل و یا چگالی بالک عمل می‌کند (Young et al., 2004). همچنین این روش اساساً کمتر از روش‌های بر پایه سرعت لایه‌ای تحت تاثیر حضور نمک قرار می‌گیرد (سرعت موج در لایه‌های نمک زیاد است در حالی که میرایی فرکانس موج کمتر تحت تاثیر جنس سنگ قرار دارد)، از این منظر مزیتی برای این روش محسوب می‌شود.

به منظور بیان ایده پیش بینی فشار منفذی از طریق فرکانس لرزه‌ای، ابتدا باید مفهوم میرایی و ضریب کیفیت (Q) درک شود. میرایی را می‌توان در لرزه‌شناسی به عنوان کاهش انرژی یک موج صوتی و یا افت فرکانس متوسط برای یک سیگنال لرزه‌ای در حین حرکت از میان یک محیط تعریف نمود (Nowick & Berry, 1972). فاکتور کیفیت "Q" به عنوان کمیتی از سنگ و یا هر محیط دیگری تعریف می‌شود که موج صوتی را از خود عبور می‌دهد. سیگنالی که دارای فرکانس متوسط بالاتری است، نشان دهنده مقدار Q بالاتر محیط عبور موج نسبت به محیط عبور سیگنال دارای فرکانس پایین‌تر می‌باشد؛ در نتیجه، ضریب میرایی بصورت معکوس با فاکتور کیفیت (Q) مربوط می‌باشد (Batzle et al., 2005). میرایی فرکانس لرزه‌ای یک خصوصیت اساسی سازند بوده و عموماً سازندهای سنگی که سیگنال‌های لرزه‌ای را خوب عبور می‌دهند، دارای ضریب میرایی کمی بوده و بر عکس دارای فاکتور Q بالاتری می‌باشند.

رابطه بین تنش موثر و فاکتور Q در مطالعات زیادی اثبات شده است (Prasad & Manghnani, 1997; Khaksar et al, 1999; Siggins et al., 2001; Carcione & Helle, 2002). این نوع ارتباط هم در فرکانس‌های اولتراسونیک در آزمایش‌های فیزیک سنگ و هم در داده‌های لرزه‌ای با فرکانس کم دیده می‌شود (Carcione & Helle, 2002). در مطالعات آزمایشگاهی مقادیر Q در حالی ثبت می‌شوند

¹ Seismic frequency attenuation

که سیگنال لرزه‌ای از میان نمونه های مغزه تحت فشار عبور می کند. تمام مطالعات نشان می دهند که فشارهای منفذی بالا (فشار موثر پایین) مقادیر Q پایینی را نتیجه می دهند.

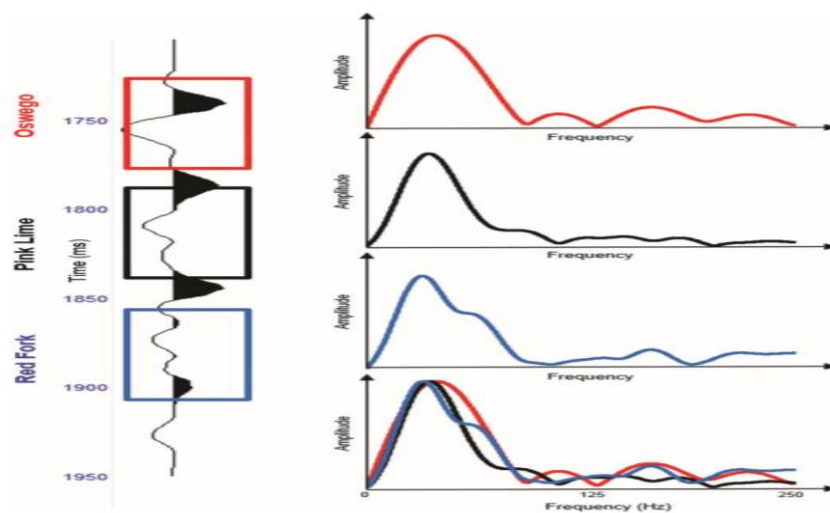
در حالی که تعیین فاکتور کیفیت در لرزه‌نگاری سطحی دشوار است، تاثیر آن در باند فرکانسی موج بسادگی قابل مشاهده می باشد، بطوریکه یکی از اصول شناخته شده در لرزه‌شناسی کاهش فرکانس موج با افزایش عمق است و این عمل به علت پراکندگی در امواج صوتی وقتی که از میان رسوبات عبور می کند اتفاق می افتد که در نتیجه آن فرکانس متوسط موج عبوری با یک نرخ کاهش طبیعی در بازه فشاری نرمال، کاهش می یابد. هنگامی که با یک فاصله عمقی تحت فشار غیر طبیعی مواجه شویم، فرکانس متوسط شروع به افزایش در نرخ میرایی می کند و روند میرایی نسبت به نوارهای با فشار نرمال دچار تغییر می شود. افزایش نرخ میرایی بوسیله افزایش نرخ پراکندگی موج لرزه‌ای در واکنش به کاهش تماس دانه به دانه در سازندهای با فشار بالا اتفاق می افتد (Salehi & Mannon, 2013).

سیگینز و همکاران (Siggins et al., 2001) پاسخ فاکتور کیفیت را نسبت به افزایش فشار منفذی در حالی که فشار روباره ثابت نگه داشته می شود با پاسخ سرعت سنگ در همان شرایط مقایسه کردند و نشان دادند که Q خیلی حساس به تغییرات فشار منفذی بوده و در حالی که یک تغییر تقریباً ۱۵۰ درصدی در آن اتفاق می افتد، تحت همین شرایط، سرعت سنگ فقط ۵ درصد تغییر را نشان می دهد (Salehi and Mannon, 2013). بر همین اساس در سال ۲۰۰۴ یانگ و همکاران معادله زیر را بر پایه میرایی فرکانس لرزه‌ای برای پیش بینی فشار منفذی ارائه داد (Young et al., 2004):

$$p_p = \sigma_v - \left((\sigma_v - p_n) \left(\frac{f}{f_n} \right)^m \right) \quad (30-2)$$

در معادله فوق: p_n فشار نرمال، σ_v تنش روباره، f فرکانس میانگین، f_n فرکانس در امتداد روند نرمال و m نیز یک ثابت تجربی می باشد.

در این روش فرکانس متوسط لرزه‌ای از داده‌های برانبارشی با پردازش^۱ (PSTM) بدست می‌آید (Mannon & Young, 2017). برای این منظور نشانگر پوش دامنه فرکانس میانگین را از آنالیز محتوای فرکانسی داده‌های لرزه‌ای استخراج کرده و تغییرات آن بدست آورده می‌شود. البته فاکتور کیفیت نیز با استفاده از روش جابجایی فرکانس مرکزی^۲ از داده‌های لرزه‌ای بدست آورده می‌شود، در این روش بطوریکه در شکل (۴-۲) روی یک تریس لرزه‌ای (رد لرزه‌ای) نمایش داده شده است، با استفاده از روند خطی کاهش فرکانس مرکزی نسبت به دورافت، ابتدا فرکانس مرکزی در دور افت صفر روی یک بازتابنده تعیین می‌گردد و سپس با استفاده از آن فاکتور کیفیت لایه مورد نظر تخمین زده می‌شود (Li et al., 2016).



شکل (۴-۲): تعیین تغییرات طیف فرکانس با عمق با استفاده از روش (CFS) در یک تریس لرزه‌ای

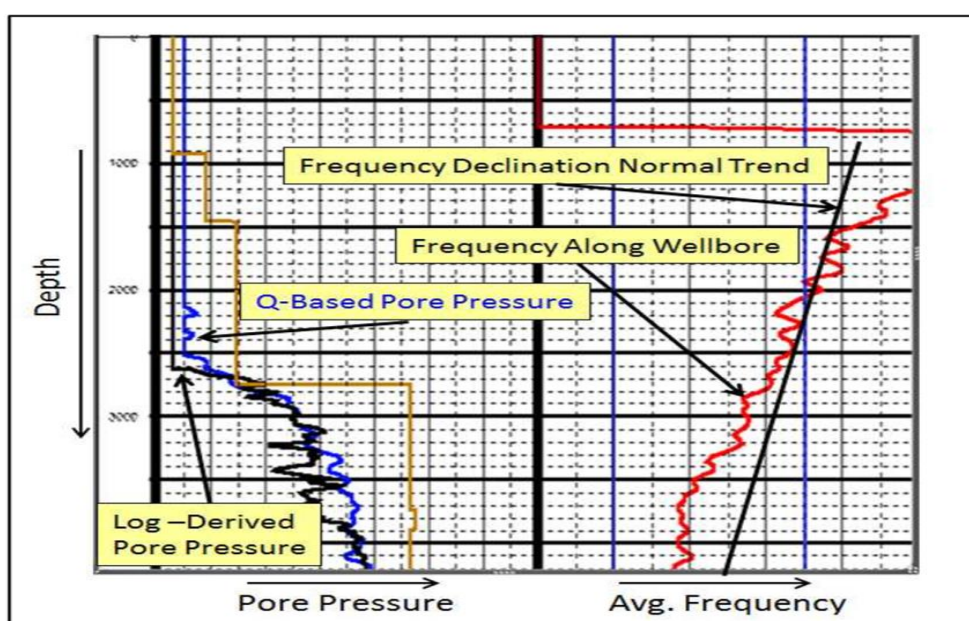
(Li et al., 2016)

برای بدست آورده فرکانس با روند کاهش نرمال (f_n) همانطور که در شکل (۵-۲) دیده می‌شود، ابتدا یک خط بر بخش بالایی نگار فرکانس میانگین در محل چاه برآزش می‌شود و سپس گرادیان این خط بر کل نگار فرکانس میانگین ضرب شده و نشانگر f_n بدست آورده می‌شود. البته روند کاهش نرمال

¹ Pre-Stack Time Migration

² Centroid Frequency Shift method (CFS)

فرکانس بصورت مرحله به مرحله انتخاب می‌گردد، بطوریکه در هر مرحله f_n بدست آمده در رابطه (۲-۳۰) مورد آزمون قرار گرفته و دقت آن با توجه به نتایج مدل و داده‌های چاه بررسی می‌شود. در نهایت فشار منفذی بر اساس میرایی فرکانسی حاصل از نشانگر وابسته به فرکانس و رابطه (۲-۳۰) مورد پیش بینی قرار می‌گیرد (Young et al., 2004). در نهایت روند فشار منفذی پیش بینی شده با داده‌های فشار اندازه‌گیری شده در محل چاه، کالیبره می‌گردد و نهایتاً روندی که بهترین انطباق را در چاه‌های آزمون نشان می‌دهد برای پیش بینی فشار منفذی در کل حجم میدان انتخاب می‌گردد (شکل ۲-۵).



شکل (۲-۵): تبدیل فرکانس به فشار منفذی با استفاده از یک خط روند نرمال فرکانسی

(Mannon & Young, 2017)

فصل ۳:

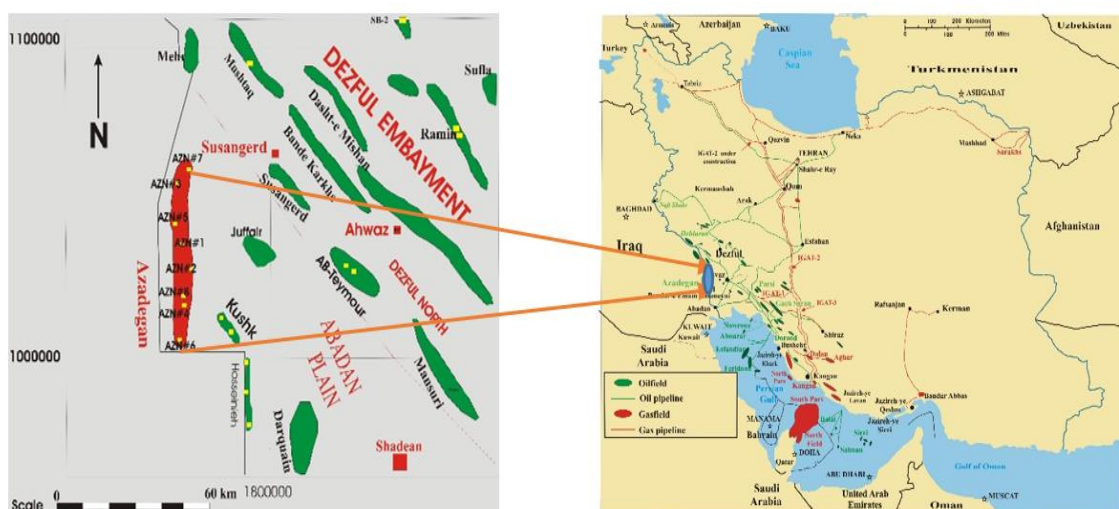
معرفی منطقه و داده‌های مورد استفاده

۳-۱ مقدمه

میدان نفتی مورد مطالعه با وسعتی حدود ۷۴۰ کیلومتر مربع و حجم نفت در جای بالغ بر ۳۳ میلیارد بشکه، یکی از عظیم‌ترین میداین نفتی جهان بوده و در حوضه رسوبی شمال غربی خلیج فارس و در ناحیه رسوبی دشت آبادان قرار واقع شده است (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۰). امتداد میدان شمالی-جنوبی بوده و از ساختارهای پلاتفرم عربی طبیعت می‌کند. در این میدان چهار لایه مخزنی مربوط به سازندهای ایلام، سروک، فهلیان و بخش ماسه سنگی بورگان به عنوان مخازن قابل بهره‌برداری شناخته شده‌اند. مخزن بورگان ماسه سنگی بوده در حالی که مخازن دیگر کربناته می‌باشند. در ادامه فصل در مورد موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی میدان مورد نظر بحث و در مورد داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده نیز مطالبی ذکر می‌شوند.

۳-۲ موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه

میدان نفتی مورد مطالعه در جنوب غربی کشور ایران و در مجاورت مرز ایران و عراق، به موازات خط مرزی و در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب اهواز واقع شده است. این میدان با تاق‌دیس‌های یاران، دارخوین و یادآوران دارای روند مشابهی می‌باشد که در شکل (۳-۱) موقعیت جغرافیایی آن نمایش داده شده است.



شکل (۳-۱): موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مورد مطالعه (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۰).

۳-۳ حوضه رسوبی شمال غربی خلیج فارس

حوضه هیدروکربنی شمال غربی خلیج فارس، حاشیه جنوبی حوضه رسوبی فروافتادگی دزفول است و شامل بخشی از دشت خوزستان نیز می‌باشد. میدان‌های این حوضه دارای روند غالب شمال شرقی- جنوب غربی (در شمال غربی خلیج فارس (از جمله میدان‌های درود و نوروز) تا راستای شمالی-جنوبی (از جمله میادین مورد مطالعه، دارخوین و یادآوران در دشت آبادان) می‌باشند.

۳-۳-۱ ناحیه رسوبی دشت آبادان

حوضه رسوبی دشت آبادان جزء حوضه هیدروکربنی شمال غربی خلیج فارس بوده و در انتهای جنوب غربی زاگرس واقع شده است که از شمال و شمال شرقی به محدوده چین خوردگی‌های زاگرس، از جنوب به عربستان و خلیج فارس و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود. از ویژگی‌های این حوضه می‌توان به حضور تاقدیس‌های شمالی جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی اشاره کرد. این ناحیه از یک پهنه حد واسط بین پلاتفرم عربی در جنوب غربی و فروافتادگی دزفول در شمال شرقی تشکیل شده است. بر اساس اطلاعات حفاری و لرزه‌ای، گسلش در پی‌سنگ و حرکت نمک هرمز به عنوان عامل اصلی ساختمان‌هایی با روند شمالی-جنوبی و شمال شرقی-جنوب غربی معرفی شده‌اند. اوج این فعالیت‌ها در زمان کرتاسه اتفاق افتاده و با گسترش حرکات زاگرسی در اواخر پالئوژن ساختمان‌هایی با روند غربی مجدداً فعال شده‌اند. همچنین در برخی نواحی ساختمان‌های با روند غربی به صورت مانعی در مقابل دگرشکلی ناشی از چین خوردگی زاگرس عمل کرده‌اند (عبدالهی فرد و همکاران، ۱۳۸۵).

مهم‌ترین تفاوت‌های دشت آبادان با حوضه‌های زاگرس و فرو افتادگی دزفول عبارتند از:

- ساختمان‌های حوضه رسوبی دشت آبادان برخلاف ناحیه زاگرس و فرو افتادگی دزفول دارای روند شمالی-جنوبی می‌باشند.
- شیب تاقدیس‌های این ناحیه نیز بر خلاف نواحی زاگرس و فرو افتادگی دزفول ملایم هستند.
- هیچ گونه بیرون زدگی تاقدیسی در این ناحیه مشاهده نمی‌شود.

- وجود تاقدیس‌ها در این ناحیه حاصل گسل‌های پی‌سنگی است.
- برخلاف حوضه رسوبی زاگرس و فروافتادگی دزفول که در آنها مخازن کم عمق تر (سازند آسماری) دارای اهمیت هستند، در این ناحیه مخازن اصلی را سازندهای عمیق تر گروه بنگستان و خامی، تشکیل می‌دهند.
- مخازن این ناحیه از نوع ساختمانی ساده نبوده و بیشتر از نوع مخازن ساختمانی-چینه‌ای می‌باشند (Alavi, 2007).

۴-۳ زمین شناسی میدان مورد مطالعه

۱-۴-۳ زمین شناسی ساختمانی

تاقدیس مورد مطالعه که هیچگونه عارضه و بیرون زدگی ساختمانی در روی زمین ندارد، بر اساس عملیات لرزه‌نگاری در سال‌های ۱۳۳۹ و ۱۳۵۶ محرز و تایید شد. روند کلی این تاقدیس شمالی جنوبی بوده و با روند تاقدیس‌های داخوین و یادآوران مشابه است. با توجه به نقشه‌های عمقی لرزه‌نگاری، این ساختمان در سازند آسماری بدون بستگی^۱ بوده در حالی که در افق‌های بنگستان و خامی دارای بستگی می‌باشد. همچنین در افق‌های هدف این تحقیق یعنی سازندهای ایلام، سروک، فهلیان و بورگان شکل تاقدیس شبیه به یک بیضی نامتقارن با روند شمالی-جنوبی می‌باشد. شیب لایه‌ها در بخش شمالی تاقدیس بیشتر از بخش جنوبی بوده در حالی که شیب یال‌های شرقی و غربی آن تقریباً متقارن بنظر می‌رسند. تاقدیس مورد مطالعه در بخش شمالی نسبتاً باریک بوده و این در حالی است که در بخش جنوبی بازتر شده و پهنای بیشتری به خود می‌گیرد. ساختمان مورد مطالعه در سازندهای ایلام، سروک، فهلیان و بخش بورگان سالم بوده و فاقد گسل خوردگی‌های بزرگ می‌باشد، جزء اینکه در بخش شمالی آن در حوالی چاه-۵ حاوی گسل خوردگی‌های نرمال کوچکی می‌باشد. این تاقدیس بر روی افق‌های

¹ Clouser

سروک و فهلیان به ترتیب دارای ابعاد (۵ در ۲۲ کیلومتر) و (۴ در ۲۱ کیلومتر) می‌باشد (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۶).

در میدان مورد مطالعه سازندهای ایلام، سروک و فهلیان و بخش بورگان به عنوان مخازن نفتی بوده و سازندهای، سرگلو، گرو، کژدمی و گدوان به عنوان سنگ‌های منشأ احتمالی معرفی شده‌اند (علیزاده و همکاران ۱۳۹۰). با توجه به نقشه‌های عمقی حاصل از داده‌های لرزای سه بعدی، این تاقدیس در افق‌های بنگستان و خامی دارای بستگی می‌باشد. در تاقدیس مورد مطالعه کلیه سازندها با توالی معمول زمین‌شناسی بر روی هم قرار گرفته‌اند و بدون گسل و گسستگی‌های زاویه‌دار می‌باشند (نیک طبع، ۱۳۸۱).

۳-۴-۲ سنگ شناسی سازندها در میدان مورد مطالعه

به منظور بررسی‌های بیشتر سنگ‌شناختی و تفهیم آن، ابتدا در شکل (۳-۲) ستون چینه شناسی ناحیه رسوبی خوزستان به همراه ستون چینه‌شناسی ایران نشان داده شده است و در ادامه شرح مختصری از آنها می‌آید. سازندهای رسوبی در طول میدان مورد مطالعه تغییرات زیادی نشان نمی‌دهند و از سطح زمین تا آخرین سازند حفاری شده در میدان توصیف سنگ‌شناختی آنها بصورت زیر می‌باشند (شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۶):

سازند آغاچاری: این سازند که سطح ناحیه را می‌پوشاند، دارای ضخامت تقریبی ۸۶۷ متر بوده و زمان رسوب گذاری آن به میوسن-پلیوسن برمی‌گردد. سازند آغاچاری شامل رس سنگ قهوه‌ای قرمز و ماسه‌ای چسبنده توام با لایه‌های نازک مارن خاکستری نیمه زاویه‌دار تا نیمه گرد متوسط تا درشت دانه است. گاهی نودول‌هایی از ژپیس در لایه‌های رس سنگ و مارن مشاهده می‌شوند. در قائده سازند لایه‌های نازکی از آهک‌های خاکستری تا نخودی رنگ وجود دارد. مرز سازند آغاچاری با سازند زیرین یعنی گچساران از نوع ناهمساز می‌باشد.

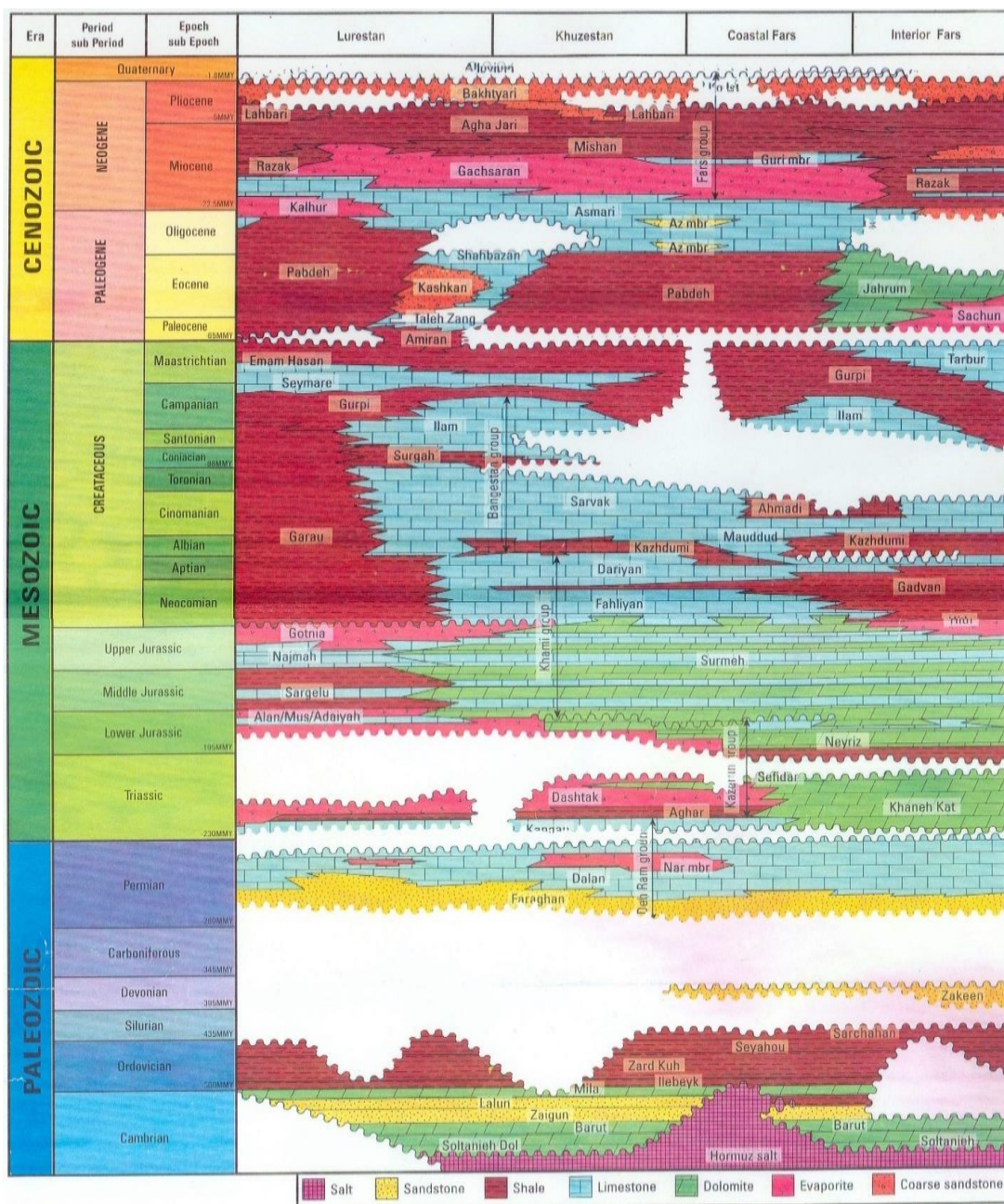
سازند گچساران: سازند گچساران که سن رسوب گذاری آن به میوسن میانی-پسین برمی گردد دارای ضخامت تقریبی ۲۶۵ متر در جنوب این میدان بوده و تقریباً در عمق ۸۶۵ متری از سطح تراز دریا واقع شده است. این سازن با تناوبی از لایه‌های متعدد انیدریت، مارن و رس سنگ قرمز آغاز شده و در ادامه شامل لایه‌های ضخیمی از مارن و رس سنگ خاکستری می‌باشد. در قسمت‌های تحتانی شامل تناوبی از مارن خاکستری و انیدریت و میان لایه‌های بسیار نازکی از آهک خاکستری است. مرز تحتانی آن با سازند آسماری از نوع همساز می‌باشد.

سازند آسماری: این سازند که سن آن مربوط به الیگو-میوسن می‌باشد، تقریباً ۲۲۲ متر ضخامت داشته و از سطح تراز دریا در عمق ۱۱۳۰ متری قرار گرفته است. سازند آسماری با آهک‌های خاکستری تا نخودی رنگ با کمی دولومیتی فسیل دار آغاز شده و در ادامه شامل مارن، ماسه‌های خاکستری روشن شیشه‌ای ریز تا متوسط دانه با سیمان آهکی می‌باشد. در قسمت‌های زیرین شامل تناوبی از ماسه و آهک‌های سفید تا کرم رنگ بوده که در قسمت قائده‌ای شامل آهک سفید و کرم نرم و فسیل دار و آهک دولومیتی است.

سازند پابده-جهرم: با زمان رسوبگذاری پالئوسن-الیگوسن و با ضخامت ۱۲۱ متر بوده و در عمق ۱۳۵۲ متری از سطح تراز دریا قرار دارد. این سازند با دولومیت‌های سخت نخودی شروع شده و در ادامه حاوی آهک‌های رسی خاکستری متوسط دانه بوده که دارای میان لایه‌هایی از دولومیت قهوه‌ای روشن می‌باشد.

سازند جهرم: این سازند با سن پالئوسن-الیگوسن و با ضخامت ۲۰۲ متر در عمق ۱۴۷۳ متری از سطح تراز دریا قرار داشته و قسمت فوقانی آن شامل دولومیت‌های کرم تا نخودی رنگ سخت بوده و در قسمت میانی و تحتانی شامل لایه‌هایی از آهک نیمه روشن با سختی متوسط می‌باشد. مرز تحتانی آن با سازند پابده بصورت همساز می‌باشد.

سازند پابده: این سازند با سن پالئوسن-الیگوسن از سطح تراز دریا ۱۶۷۵ متر عمق داشته و ضخامت آن در حدود ۳۵۷ متر است که قسمت بالایی آن از آهک‌های رسی نیمه سخت خاکستری تشکیل شده و قسمت پایینی آن شامل مارن، آهک‌های چاکی نرم تا نیمه سخت با میان لایه‌هایی از آهک رسی خاکستری می‌باشد. مرز تحتانی این سازند با سازند گورپی ناهم‌ساز می‌باشد.



شکل (۲-۳): ستون چینه‌شناسی ناحیه خوزستان به همراه ستون چینه‌شناسی ایران، (Schlumberger, 2003)

سازند گوری: این سازند با سن کامپانین-ماستریشین بوده و در عمق تقریباً ۲۰۳۲ متری از سطح تراز دریا قرار دارد و ضخامت آن ۳۹۷ متر است. در قسمت‌های فوقانی شامل آهک‌های رسی و آهک‌های چاکی خاکستری نیمه سخت بوده و بخش میانی آن یعنی بخش تاربور از عمق ۲۱۹۵ تا ۲۲۷۶ متری عمدتاً از آهک‌های کرم تا قهوه‌ای روشن سخت تشکیل شده است. بخش‌های زیرین آن شامل آهک‌های رسی خاکستری تا نخودی نیمه سخت با میان لایه‌های مارن خاکستری نرم و چسبنده است. مرز زیرین آن یا سازند ایلام همساز است.

سازند ایلام: این سازند با سن کنیاسین-سنتونین در عمق تقریبی ۲۴۲۹ متری از تراز دریا قرار داشته و ضخامت آن ۸۹ متر است. در قسمت فوقانی از آهک‌های کرم تا نخودی حاوی لکه‌های نفتی شروع شده و بعد از آن دارای میان لایه‌هایی از مارن و شیل خاکستری می‌گردد. در ادامه این سازند شامل شیل‌های خاکستری تیره با میان لایه‌های مارن و رس سنگ خاکستری روشن بوده که در قسمت زیرین شامل آهک و آهک‌های کرم، خاکستری روشن و نخودی است. مرز زیرین آن با سازند لافان همساز است.

سازن لافان: این سازند دارای سن کنیاسین بوده و تقریباً در عمق ۲۵۱۸ متری تراز دریا قرار گرفته است. ضخامت سازند لافان ۳۰ متر بوده و شامل رس-سنگ خاکستری-سبز در بالا و یک لایه آهک کرم و سفید کدر و نسبتاً چاکی در بخش میانی می‌باشد و بخش پایینی آن از مارن خاکستری روشن تشکیل شده است. مرز پایینی آن با سازند سروک ناهم‌ساز می‌باشد.

سازند سروک: این سازند با سن سنومانین-تورونین و با ضخامت ۶۱۵ متر بوده و از سطح تراز دریا در عمق ۲۵۴۸ متری قرار گرفته است. سازند سروک شامل آهک‌های کرم رنگ، قهوه‌ای روشن، خاکستری روشن بوده و در قسمت میانی حاوی رس و در قسمت‌های تحتانی شامل آهک‌های دولومیتی و چاکی می‌باشد. همچنین حاوی میان لایه‌های نازکی از مارن‌های خاکستری نرم و چسبنده است. مرز زیرین آن با سازند کژدمی همساز است.

سازند کژدمی: این سازند دارای سن آلبین بوده و از سطح تراز دریا در عمق ۳۱۶۳ متری قرار دارد. ضخامت آن تقریباً ۲۰۰ متر بوده و از شیل‌های نیمه سخت خاکستری تیره تا سیاه رنگ حاوی بیتومن فراوان به همراه با میان‌لایه‌های مارن خاکستری نرم و آهک رسی قهوه‌ای نیمه سخت در قسمت‌های بالایی تشکیل شده است. در بخش تحتانی آن ماسه سنگ مورد مطالعه بورگان قرار دارد که از عمق ۳۲۹۶ تا ۳۳۷۲ متری قرار دارد و شامل تناوبی از رس سنگ خاکستری روشن سیلتی-ماسه‌ای و ماسه سنگ دانه ریز نیمه مدور با رنگ‌های کرم تا خاکستری روشن است. مرز زیرین این لایه با سازند داریان بصورت ناهمساز قرار گرفته است.

سازند داریان: این سازند دارای سن رسوب گذاری آپتین بوده و از سطح تراز دریا در عمق تقریباً ۳۳۶۳ متری قرار دارد. سازند داریان شامل تناوبی از آهک و آهک رسی کرم و خاکستری روشن است. مرز پایین آن با سازند گدوان بصورت همساز می‌باشد.

سازند گدوان: سن این سازند بarmین-آپتین بوده و در عمق ۳۵۲۰ متری از سطح تراز دریا قرار گرفته است. ضخامت آن ۱۳۴ متر بوده و بخش بالایی آن شامل تناوبی از لایه‌های شیلی خاکستری تیره و مارن و آهک-های رسی است. در ادامه بخش آهکی خلیج از عمق ۳۵۹۴ تا ۳۶۰۱ متر قرار دارد که شامل آهک‌های سفید تا کرم می‌باشند. بخش پایینی شامل تناوبی از شیل و رس سنگ خاکستری روشن می‌باشد. علاوه بر آن لایه‌هایی از ماسه سنگ و سیلتستون از عمق ۳۶۰۷ تا عمق ۳۶۴۹ متر شامل ماسه سنگ کوشک تشکیل شده است که به رنگ کرم تا نخودی و خاکستری روشن ریز تا متوسط دانه می‌باشد. مرز زیرین آن با سازند فهلیان بصورت همساز می‌باشد.

سازند فهلیان: سن این سازند نئوکومین بوده و از سطح تراز دریا در عمق ۳۶۹۴ متری قرار گرفته است. ضخامت آن ۵۴۴ متر بوده و بخش‌های بالایی آن متشکل از سنگ‌آهک و آهک‌های رسی خاکستری در تناوب با مارن‌های خاکستری سست و شیل‌های خاکستری تیره آهکی می‌باشد. در بخش

پایینی شامل آهک‌های خاکستری روشن نیمه سخت تا سخت آغشته به هیدروکربور در برخی فواصل است. همچنین قسمت تحتانی حاوی پلت نیز می‌باشد.

بخش فهلین/گرو: سن این بخش نئوکومین بوده و از عمق ۴۱۹۸ متری سطح تراز دریا شروع می‌شود. این بخش دارای ضخامت ۵۷ متری بوده و شامل تناوبی از آهک‌های رسی خاکستری سست تا نیمه سخت و آهک‌های سفید چرک تا خاکستری روشن رس دار و پلت‌دار تشکیل شده است.

۳-۵ داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این رساله که مربوط به میدان مورد مطالعه هستند، از کیفیت لازم برای این تحقیق برخوردار می‌باشند، که در ذیل به اختصار اشاره می‌شود:

۳-۵-۱ داده‌های لرزه‌ای

اولین برداشت‌های لرزه‌نگاری دو بعدی میدان مورد مطالعه در سال‌های ۱۳۳۹ و ۱۳۵۶ صورت گرفت که در سال ۱۳۷۴ برداشت‌های تکمیلی لرزه‌نگاری دو بعدی انجام شد. لرزه‌نگاری سه بعدی میدان توسط شرکت عملیات اکتشاف نفت در سال‌های ۸۲-۱۳۸۱ برداشت گردید که هندسه برداشت آن به همراه موقعیت چاه‌های مورد استفاده در تحقیق در نقشه پایه شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

هندسه برداشت داده‌های لرزه‌ای سه بعدی در شکل (۳-۳) از تعداد ۲۱۹۴ اینلاین^۱ در امتداد تقریباً شرقی-غربی و با فاصله ۲۵ متر از هم (از اینلاین ۲۹۷۵ تا ۵۱۶۹) و نیز از تعداد ۸۵۶ ایکس لاین^۲ در امتداد تقریباً شمالی-جنوبی و با فواصل ۲۵ متر (از ایکس لاین ۵۰۱۲ تا ۵۸۶۸) تشکیل شده است. همچنین محل قرارگیری چاه‌های مورد استفاده، روی خطوط لرزه‌ای بدین صورت می‌باشند:

Well#1(Inline: 4341, Xline: 5414) , Well #2(Inline: 3995, Xline: 5480)

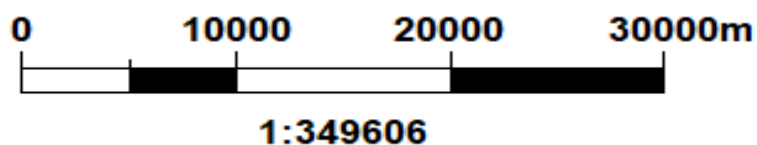
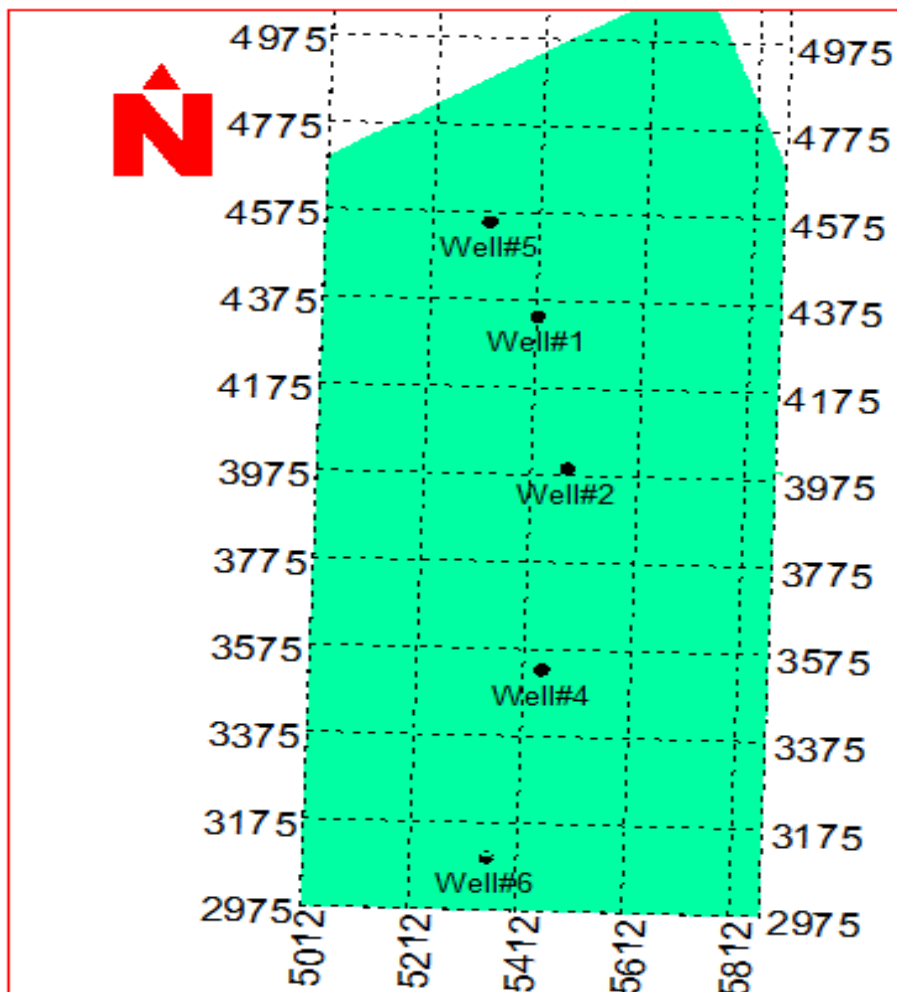
Well #4(Inline: 3532, Xline: 5447) ، Well #5(Inline: 4557, Xline: 5319)

Well #6(Inline: 3019, Xline: 5356)

¹ Inline

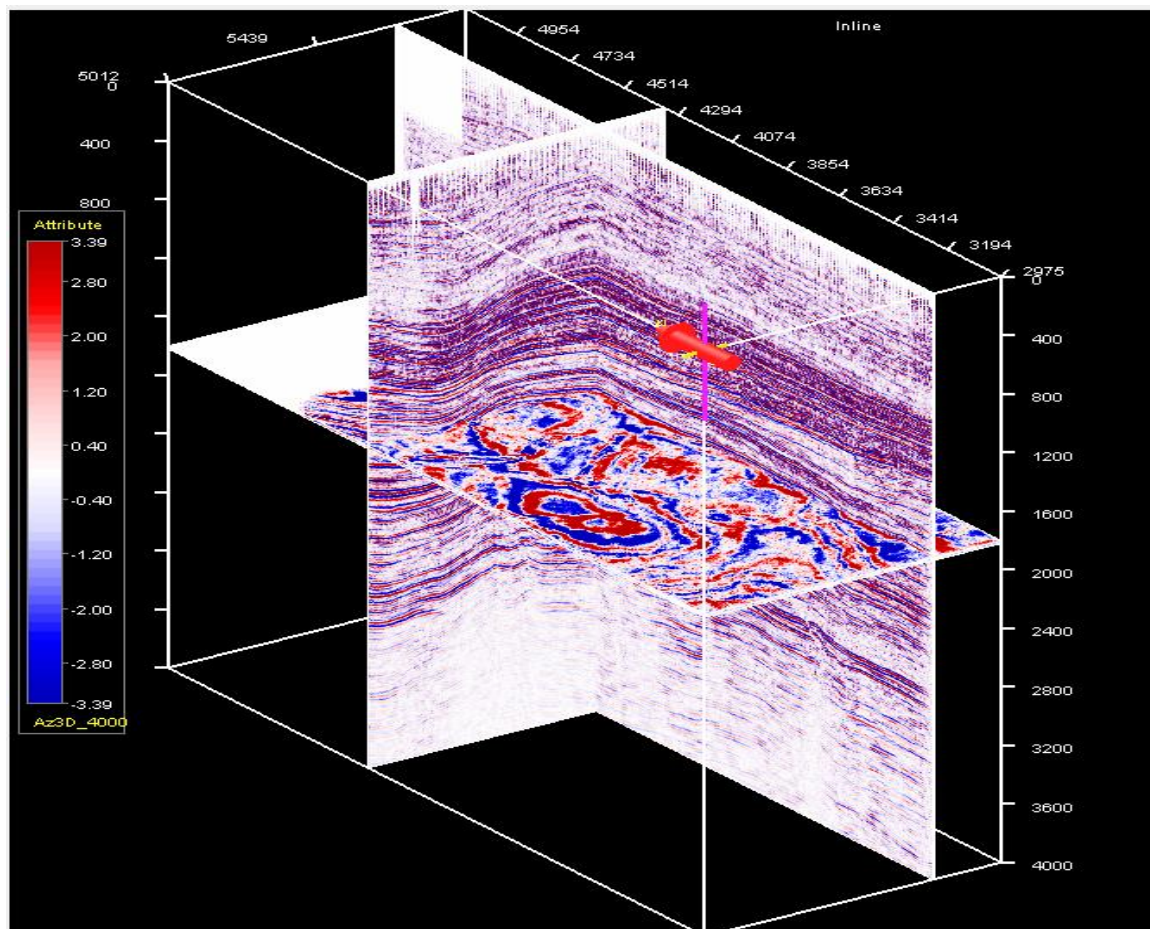
² Xline

داده‌های لرزه‌ای سه بعدی استفاده شده در این تحقیق در حدود ۱۱۷۴ کیلومتر مربع گسترش داشته و توسط شرکت وریتاس^۱ در سال ۱۳۸۳ مورد پردازش قرار گرفته است. که در شکل (۳-۴) برش‌های عرضی و افقی از آن نمایش داده شده است.



شکل (۳-۴): نقشه پایه میدان مورد مطالعه به همراه موقعیت چاه‌ها

¹ Vrritas



شکل (۳-۴): نمایشی از برش‌های عرضی و افقی داده‌های لرزه‌ای میدان مورد مطالعه، (واحد عمق بر حسب میلی ثانیه است)

۳-۵-۲ نگارها و اطلاعات چاه

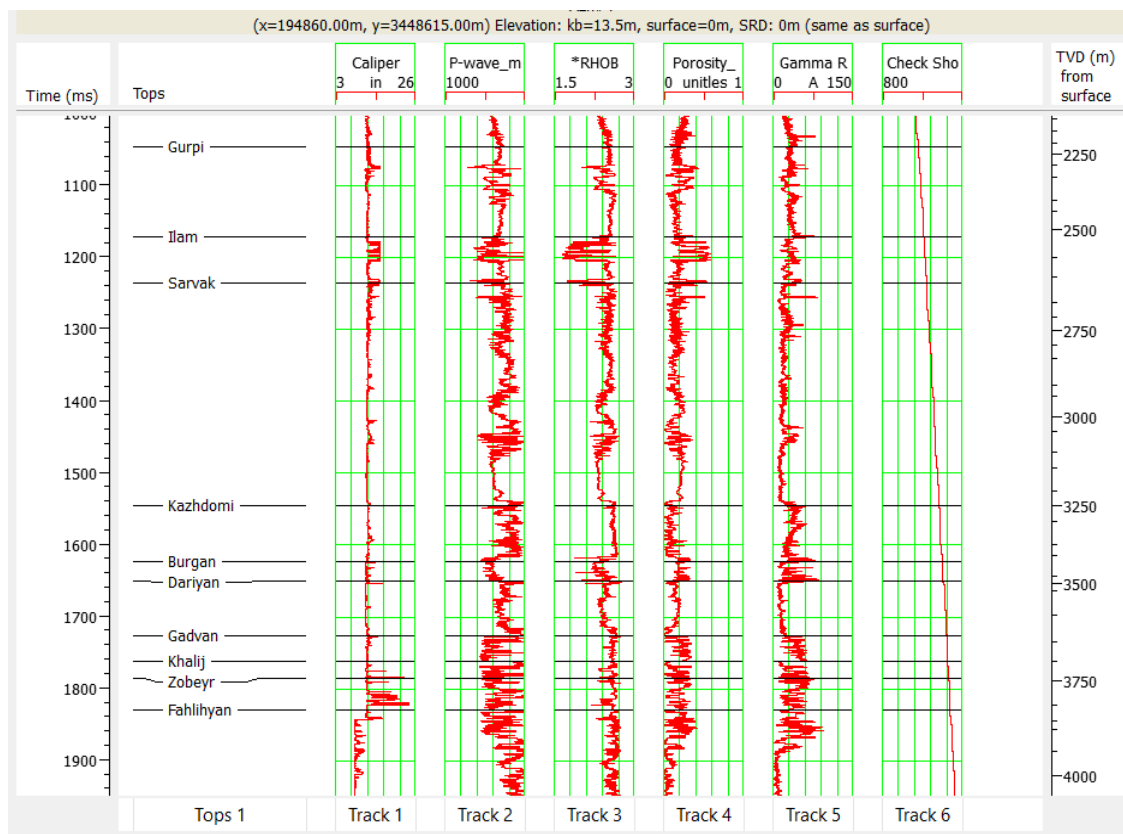
نگارهای چاهی مربوط به ۵ حلقه چاه اعم از نگارهای پتروفیزیکی متداول مانند نگارهای گاما، چگالی، صوتی و تخلخل در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت که در شکل (۳-۵) برای نمونه نگارهای مربوط به چاه ۴ نشان داده شده است. داده‌ها و اطلاعات تفسیر شده نگارهای پتروفیزیکی شامل نتایج ارزیابی-های سنگ شناختی و تخلخل، گزارشات تکمیلی چاه‌ها و نیز نگار زمین شناسی^۱ مربوط به چاه‌های مذکور نیز در مورد استفاده قرار گرفت که اطلاعات زمین شناسی و سر سازندها از آن استخراج شده‌اند. تست‌های درون چاهی فشار یعنی داده‌های (RFT)^۲ و نمودارهای گل حفاری^۳ و گزارش‌های فشار مربوط

^۱ Graphic well log

^۲ Repeat Formation Tester

^۳ Mudlog

به چاه‌های ۱، ۲، ۵ و ۶ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در جدول (۳-۱) اطلاعات چاه‌های مورد استفاده در تحقیق آورده شده‌اند.



شکل (۳-۵): نگارهای پتروفیزیکی متداول و چک شات مربوط به چاه شماره ۴ میدان مورد مطالعه

۳-۵-۳ نرم‌افزارهای مورد استفاده

نرم افزارهای تخصصی زیر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند:

- از نرم‌افزار پترل برای انجام تفسیرهای ساختمانی و تبدیل به عمق داده‌ها استفاده شد.
- از نرم‌افزار همپسون راسل و از ماژول‌های استراتا و ایمرج برای وارون سازی داده‌های لرزه‌ای و استخراج نشانگرهای لرزه‌ای بهره گرفته شد.

جدول (۳-۱): اطلاعات چاه‌های میدان

نگارها و اطلاعات چاه					
شماره چاه	چاه-۱	چاه-۲	چاه-۴	چاه-۵	چاه-۶
Well Compl. Report	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
RFT(psi)	دارد	دارد	ندارد	دارد	دارد
Tops	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
Check(m/s)	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
GR(.GAPI)	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
Prosity(V/V)%	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
RHOB(g/cm³)	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
Vp(m/s)	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد
Caliper(inc.)	دارد	دارد	دارد	دارد	دارد

فصل ۴:

پیش بینی فشار منفذی با سرعت لرزه ای

۴-۱ مقدمه

سرعت سیر امواج لرزه‌ای در لایه‌های زمین متأثر از ویژگی‌های سنگ‌شناختی و سیال درون خلل و فرج بوده و از پارامترهای لرزه‌ای مهم در مطالعات مخازن هیدروکربوری می‌باشند. هدف اصلی این فصل بکارگیری داده‌های سرعت لرزه‌ای در پیش‌بینی فشار منفذی است. امروزه سرعت‌های لرزه‌ای مختلفی برای این منظور مورد استفاده بوده و با توجه به قابلیت و میزان تفکیک آنها، نتایج متفاوتی از آنها نیز مورد انتظار می‌باشد. سرعت حاصل از پردازش داده‌های لرزه‌ای یکی از آنها بوده و دارای بیشترین استفاده در پیش‌بینی فشار منفذی بوده و در عین حال، دارای کمترین میزان قدرت تفکیک لایه‌های زمین نیز است، در این تحقیق به جهت بالا بردن قدرت تفکیک داده‌های سرعت از روش‌های جدیدی بهره گرفته شد. برای این منظور ابتدا داده‌های لرزه‌ای در نرم‌افزار همپسون-راسل وارون سازی شد و سپس سرعت لرزه‌ای به دو روش: استخراج مستقیم سرعت از مدل وارون‌سازی در ماژول استراتا و با استفاده از آنالیز چند نشانگری در ماژول ایمرج استخراج شدند. سپس با انجام برازش بین تنش موثر و سرعت‌های بدست آمده، مکعب تنش موثر مورد تخمین قرار گرفته و در نهایت با بهره‌گیری از رابطه ترزاقی، مکعب فشار منفذی بدست آورده شد.

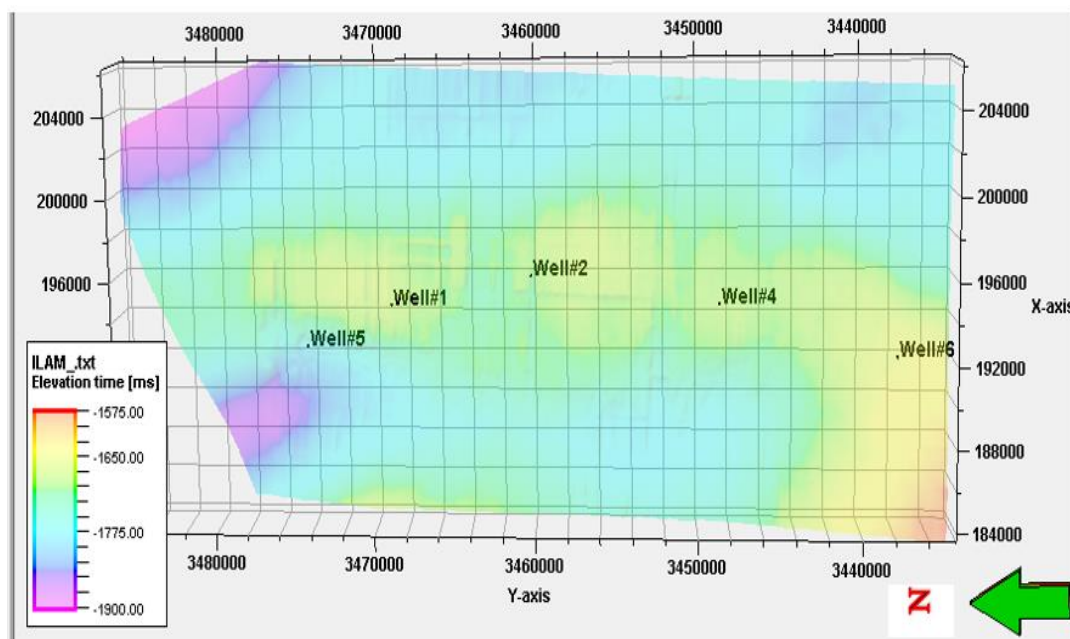
از آنجایی که لایه‌های مخزنی کربناته ایلام، سروک، فهلیان و زیر لایه ماسه سنگی بورگان از سازند کژدمی، از اهداف پیش‌بینی فشار منفذی در این تحقیق بوده‌اند، بنابراین لایه‌های مذکور در حوزه زمان و از نظر ساختمانی در نرم‌افزار پترل مورد تفسیر قرار گرفتند و در ادامه با ساخت مدل سرعت زمین، تفاسیر بدست آمده به همرا داده‌های لرزه‌ای، به عمق برگردانده شدند.

۴-۲ تفسیر ساختمانی داده‌های لرزه‌ای

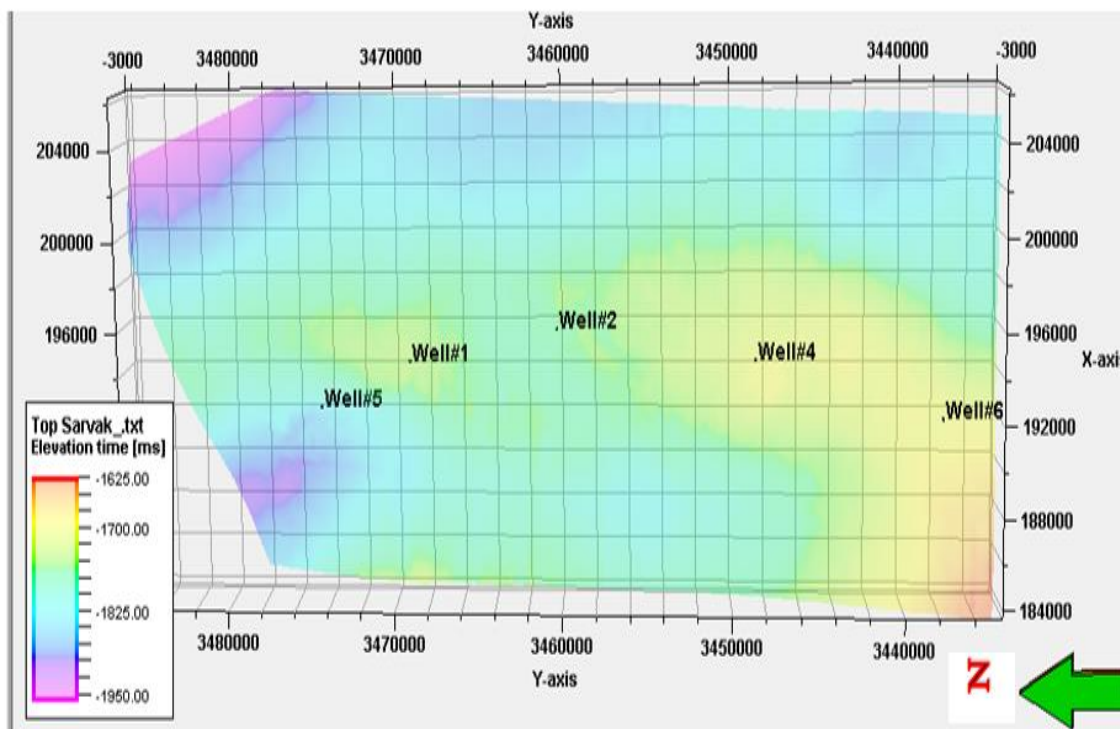
داده‌های مورد استفاده برای تفسیر شامل داده‌های لرزه‌ای سه بعدی و داده‌های چاه اعم از نگارهای چاه، چک شات و گزارش‌های تکمیل مربوط به ۵ چاه میدان بودند. تفسیر لرزه‌ای در واقع، اولین گام مربوط به مدل‌سازی ساختمانی و مخزنی در این تحقیق بوده و برای این منظور تقریباً ۱۱۷۴ کیلومتر

مربع داده لرزه‌ای سه بعدی از نظر کیفیت مورد بررسی قرار گرفت. علی‌رغم اینکه تشخیص واقعی بودن دامنه‌ها در داده‌های برآیند شده دشوار است ولی گزارش پردازش داده‌ها و نیز داشتن اختلاف فاز کم بین داده‌های لرزه‌ای با داده‌های مصنوعی ساخته شده در محل چاه‌ها، نشان دهنده تغییرات کم دامنه‌ها در حین پردازش لرزه‌ای بوده است.

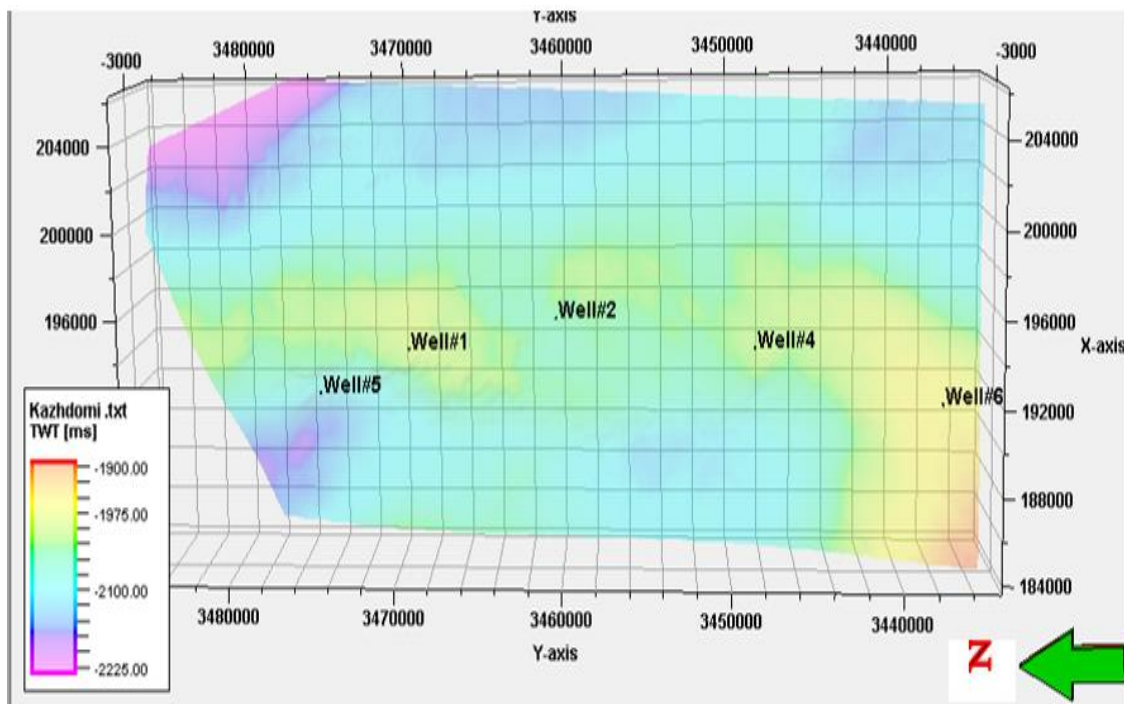
برای تفسیر ساختمانی سازندهای هدف، مدل‌سازی سرعت و تبدیل به عمق داده‌های لرزه‌ای از نرم‌افزار پترل بهره گرفته شد، بطوریکه در ادامه افق‌های مربوط به سازندهای ایلام، سروک، کژدمی و فهلیان مورد تفسیر قرار گرفتند. این لایه‌ها در واقع مخازن نفتی میدان مورد مطالعه بوده و لایه‌های هدف این مطالعه نیز می‌باشند. نقشه‌های زمانی (ایزوکرن‌های) مربوط به آنها استخراج گردیدند و در مدل‌سازی ساختمانی و فشار منفذی میدان مورد استفاده قرار گرفتند که در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴) نشان داده شده است، هموار بودن این نقشه‌ها نشان دهنده شیب ملایم ساختمان میدان مورد مطالعه می‌باشد. در تمام شکل‌های مذکور خطوط رنگی نشان‌دهنده زمان رفت و برگشت و منحنی میزان در حوزه زمان بوده و جهت پیکان نیز نشان دهنده شمال جغرافیایی می‌باشد.



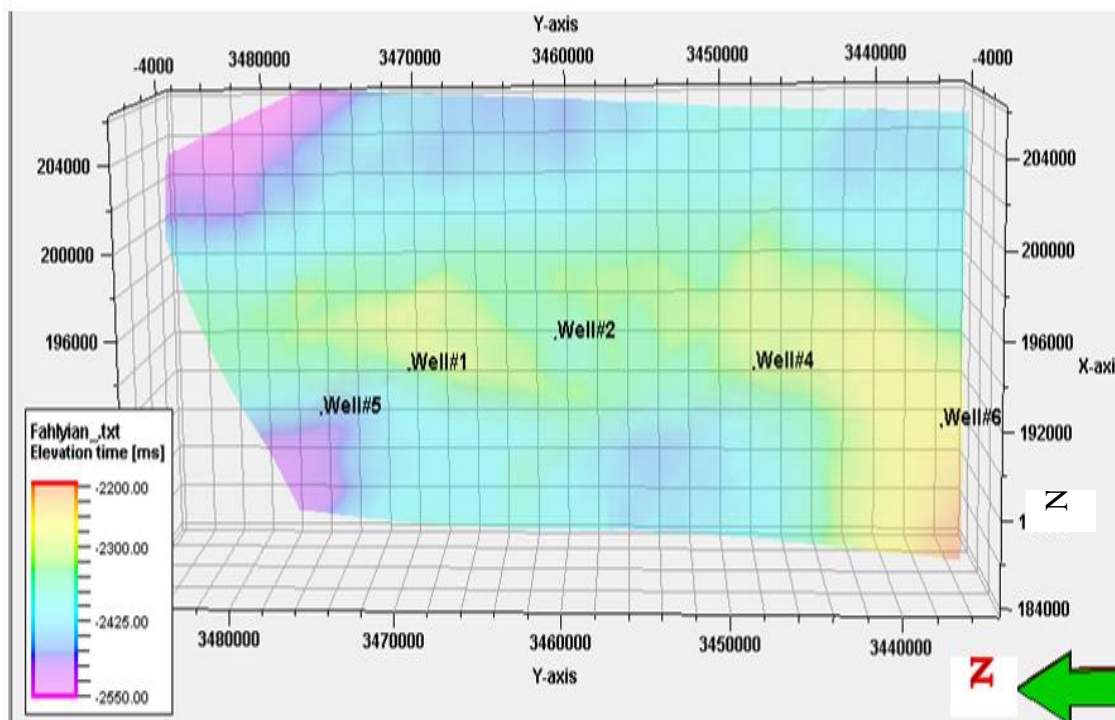
شکل (۴-۱): نقشه زمانی (ایزوکرن) سازند ایلام



شکل (۲-۴): نقشه زمانی (آیزوگرن) سازند سروک



شکل (۳-۴): نقشه زمانی (آیزوگرن) سازند کژدمی



شکل (۴-۴): نقشه زمانی (آیزو کرن) سازند فهلیان

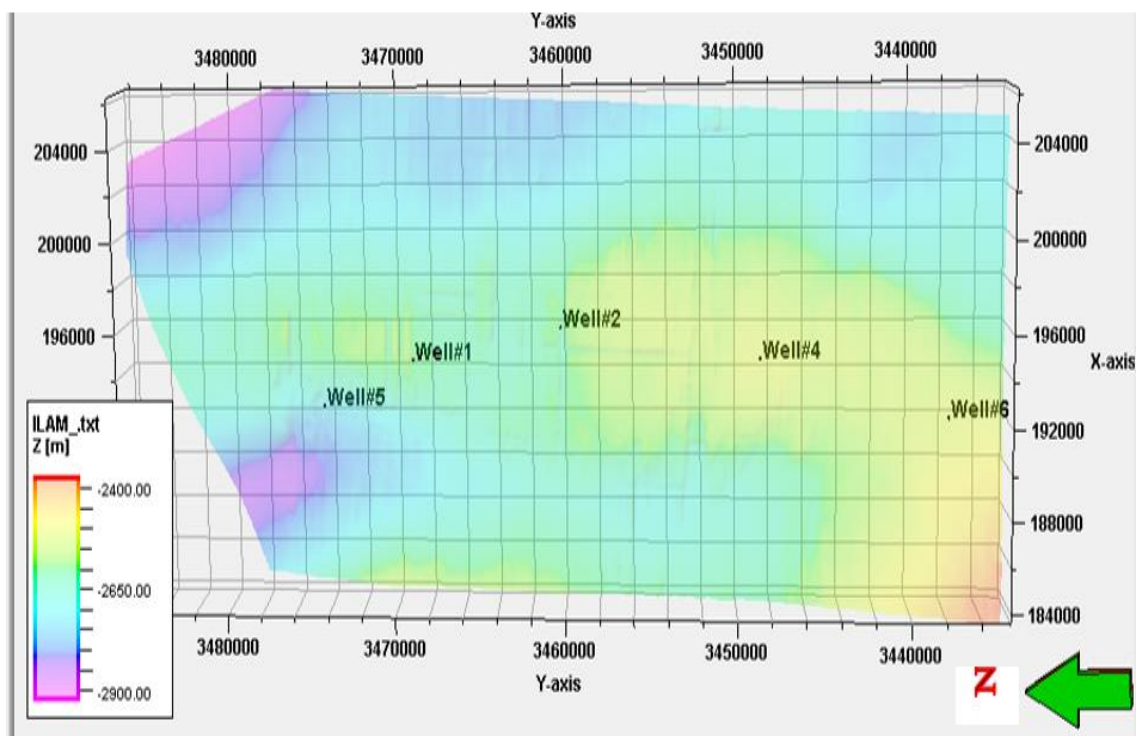
۳-۴ مدل‌سازی سرعت و تبدیل به عمق داده‌ها و اطلاعات لرزه‌ای

در این قسمت با استفاده از داده‌های سرعت در دسترس که عبارت از سرعت‌های سرچاه و VSP بودند مدل‌سازی سرعت در نرم‌افزار پترل انجام گرفت که در جدول (۴-۱) اطلاعات مربوط به زمان، عمق و سرعت لرزه‌ای در محل چاه‌ها نشان داده شده‌اند.

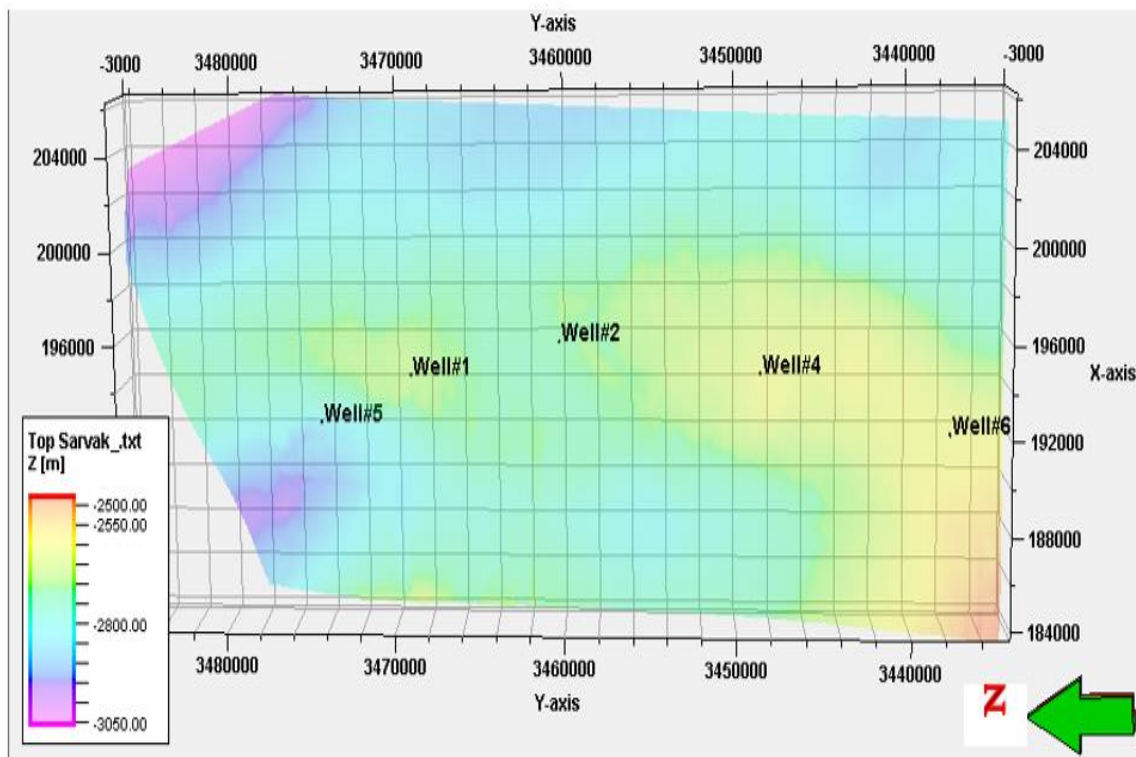
در ادامه نقشه‌ها و افق‌های تفسیر شده و نیز داده‌ها و نشانگرهای لرزه‌ای که در حوزه زمان هستند با استفاده از مدل سرعت بدست آمده به عمق برگردانده شدند. بنابراین امکان تطابق داده‌ها و اطلاعات چاهی و لرزه‌ای امکان پذیر شده و در ادامه، تمام کارهای این مطالعه در حوزه عمقی ادامه یافت و واحد اعداد در مقاطع عمقی براساس متر تعیین گردید. سرسازندهای ایلام، سروک، کژدمی و فهلیان نیز پس از تبدیل به عمق به ترتیب در شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۸) نشان داده شده‌اند.

جدول (۴-۱): سرعت، زمان و عمق سر سازندها در چاه‌های میدان مورد مطالعه

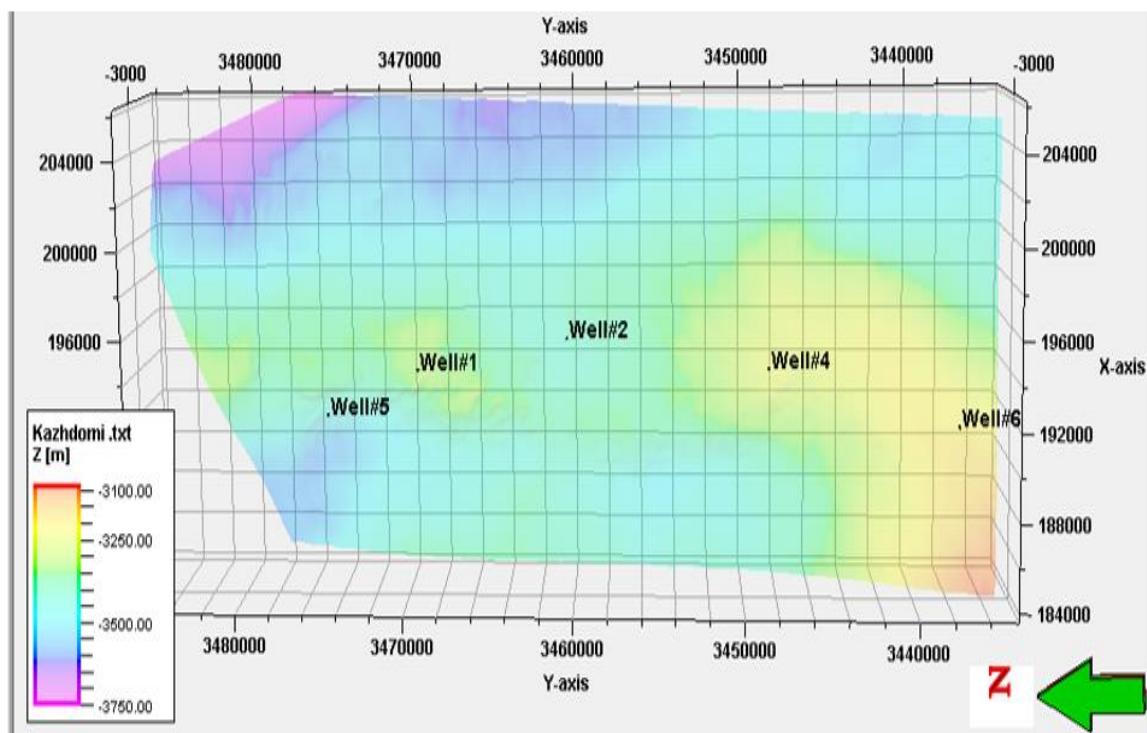
Well Name	Well-1			Well-2			Well-4			Well-5			Well-6		
	TVD(m)	TWT (ms)	Vp(m/s)	TVD(m)	TWT(ms)	Vp(m/s)	TVD(m)	TWT(ms)	Vp(m/s)	TVD(m)	TWT(ms)	Vp(m/s)	TVD(m)	TWT(ms)	Vp(m/s)
Ilam	2593.3	1687	3074	2603.2	1713	3039	2510.5	2983	2713	2727	3087	2517	2531	1654	3044
Lafan	2676.8	1728	3002	2704.7	1761	3072	2606.5	3011	2813	2827	3119	2611	2625	1705	3063
Sarvak	2683.3	1731	3100	2711.7	1764	3074	2612.5	3012	2819	2833	3118	2617.5	2631.5	1707	3067
Kazhdomi	3320.8	2017	3293	3382.7	2053	3295	3257.5	3230	3410.5	3424.5	3324	3255	3269	1984	3281
Burgan	3494.3	2079	3362	3545.7	2118	3348	3416.5	3285	3588	3602	3384	3402	3416	2042.5	3331
Darian	3523.8	2092	3369	3587.2	2136	3359	3465.5	3294	3613	3627	3386	3457	3471	2067.5	3344
Gadvan	3712.3	2170	3421	3784.7	2221	3408	3634.5	3344	3807	3821	3443	3620.5	3634.5	2145	3376
Khalij	3766.3	2196	3430	3851.7	2253	3419	3699.5	3358	3862	3876	3444	3687.5	3701.5	2170.5	3398
Zobeyr	3813.3	2219	3437	3908.2	2281	3427	3745.5	3365	3917.5	3931.5	3453	3726.5	3740.5	2184.5	3412
Top Fahlian	3908.3	2263	3454	3993.2	2321	3441	3813.5	3376	3991	4005	3458	3812	3826	2233	3414
Base Fahlian	4343	2491	3487	4399.7	2480	3548	4286.5								



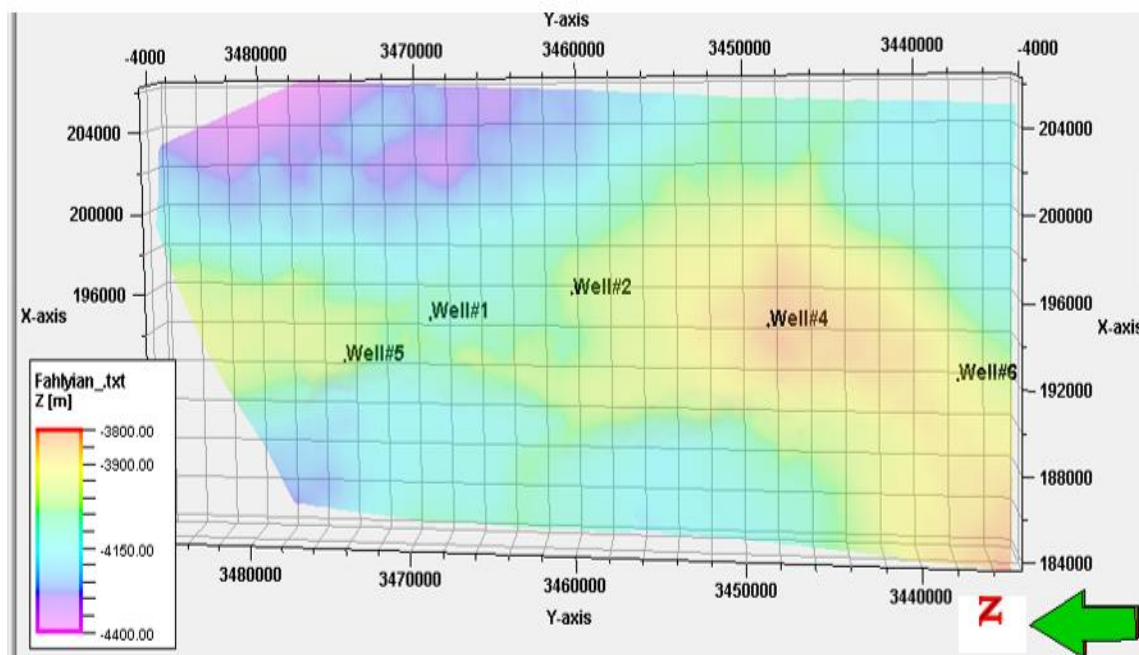
شکل (۴-۵): نقشه عمقی (آیزوپیک) سازند ایلام



شکل (۴-۶): نقشه عمقی (آیزوپیک) سازند سروک



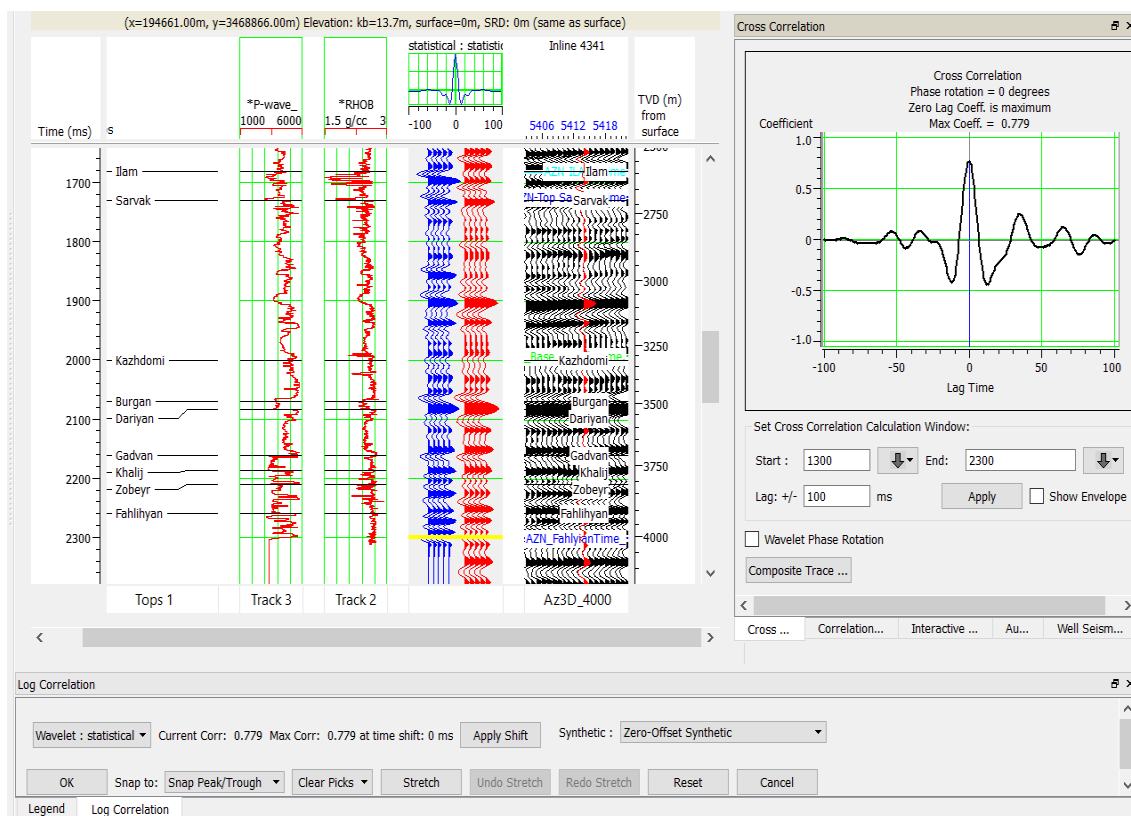
شکل (۴-۷): نقشه عمقی (آیزوپیک) سازند کژدمی



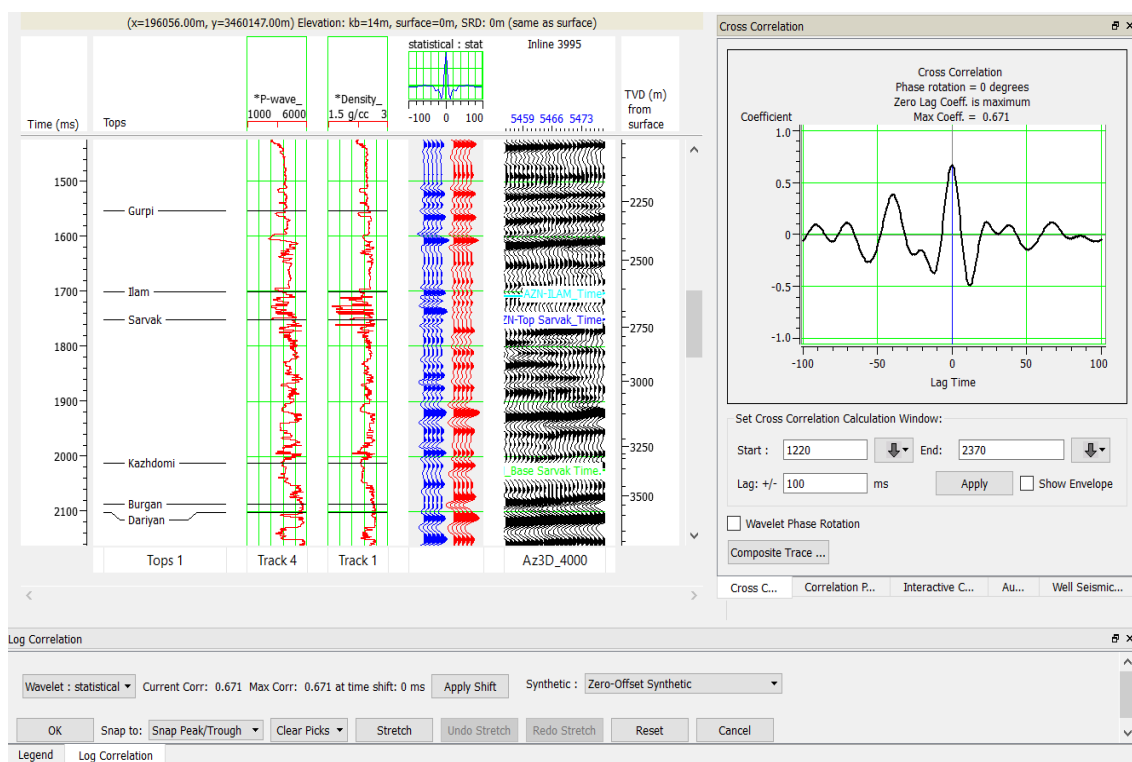
شکل (۴-۸): نقشه عمقی (آیزوپک) سازند فهلیان

۴-۴ وارون‌سازی داده‌های لرزهای

برای انجام وارون‌سازی لرزهای از نرم‌افزار همپسون-راسل استفاده شد. ابتدا داده‌های لرزهای و چاه در نرم افزار بارگذاری شدند و سپس لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی که حاصل هم‌امیخت مدل بازتاب زمین (ضریب بازتاب زمین) با موجک استخراج شده از داده‌های لرزهای است در محل چاه‌های میدان مورد مطالعه ساخته شدند و در انطباق داده‌های چاه با داده‌های لرزهای مورد استفاده قرار گرفتند. برای نمونه، لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی بدست آمده در محل چاه‌های ۱ و ۲ به همراه با داده‌های لرزهای واقعی به ترتیب با رنگ‌های آبی و سیاه (با تکرار ۵ تایی)، در قسمت وسط شکل‌های (۴-۹) و (۴-۱۰) نمایش داده‌شده‌اند، در سمت بالایی شکل‌های مذکور موجک استخراج شده از داده‌های لرزهای و در سمت راست شکل‌ها کراس کورولیشن لرزه‌نگاشت مصنوعی با داده‌های لرزهای نشان داده شده است، همانطور که در قسمت بالای نمودار همبستگی متقابل دیده می‌شوند، اعداد مربوط به میزان انطباق و همبستگی داده‌های چاه و داده‌های لرزهای برای چاه ۱ تقریباً برابر با ۷۸ و برای چاه ۲ برابر با ۶۷ درصد برآورد شده است.

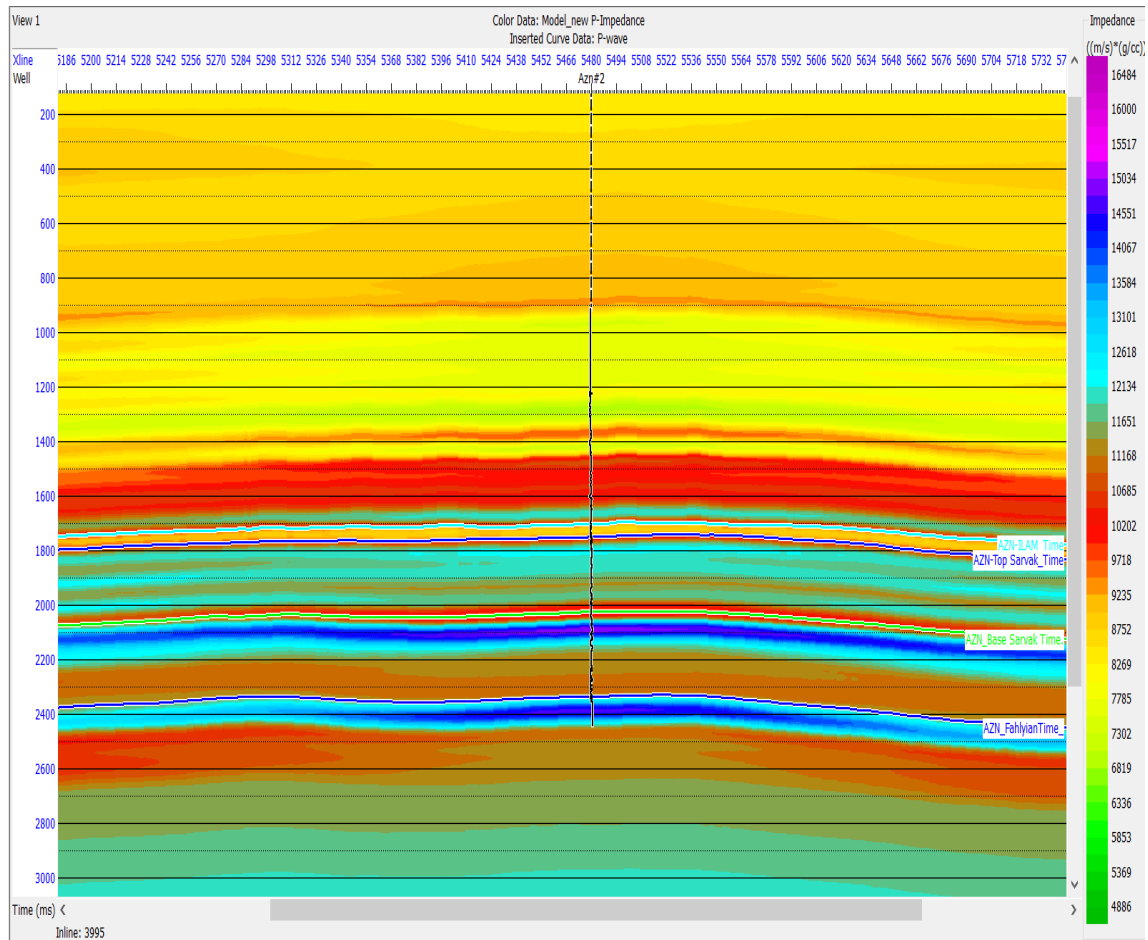


شکل (۴-۹): ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی و انجام انطباق داده‌های چاه ۱ با داده‌های لرزه‌ای



شکل (۴-۱۰): ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی و انجام انطباق داده‌های چاه ۲ با داده‌های لرزه‌ای

در ادامه وارون‌سازی لرزه‌ای، مدل اولیه زمین با استفاده از داده‌های فرکانس پایین لرزه‌ای و اطلاعات چاه ساخته شد، که در شکل (۴-۱۱) مقطع عرضی آن در محل عبوری از چاه ۲ نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۱): مدل اولیه ساخته شده از داده‌های لرزه‌ای و چاه در محل چاه ۲ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است)

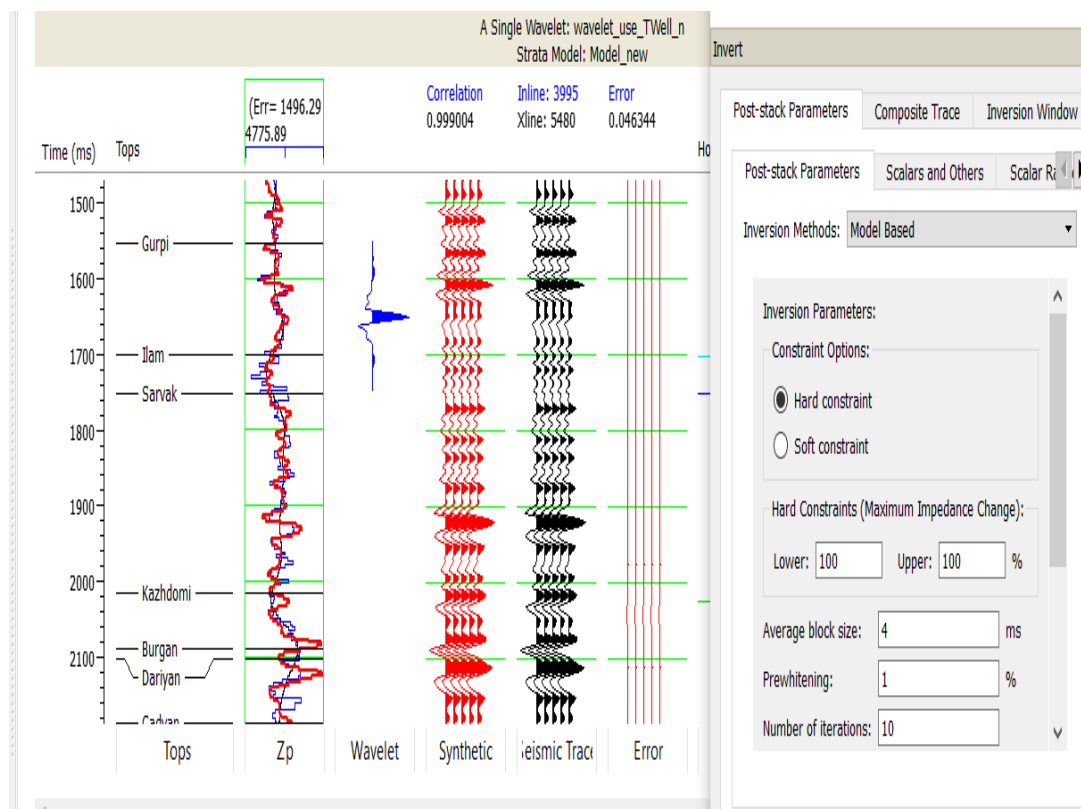
سپس تجزیه و تحلیل وارون‌سازی به روش‌های مختلف، جهت بدست آوردن سریع نتایج وارون‌سازی توام با تغییر پارامترها، در محل چاه‌ها انجام شد، که نتایج آن برای نمونه در محل چاه ۲، در شکل‌های (۴-۱۲) تا (۴-۱۵) به ترتیب برای روش‌های وارون‌سازی برپایه مدل^۱، باند محدود^۲، وارون‌سازی رنگی^۳ و خارهای پراکنده^۴ نشان داده شده‌اند.

^۱ Model Base Inversin

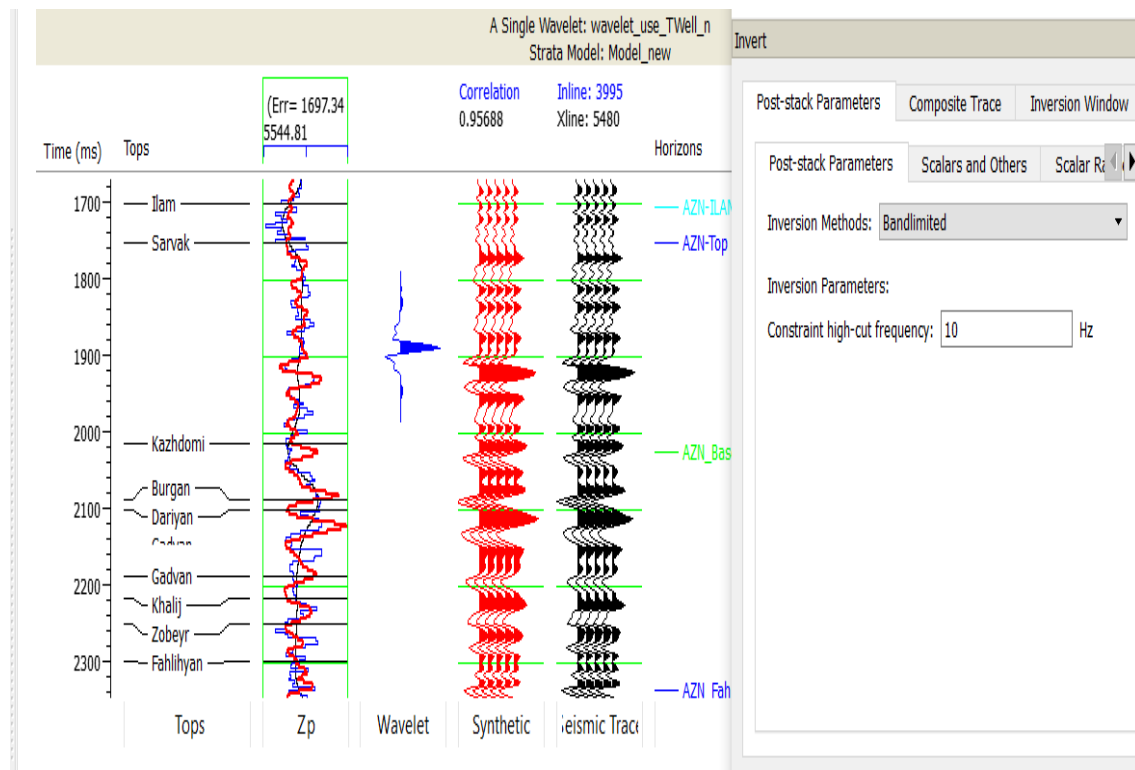
^۲ Bandlimited

^۳ Colored Inversion

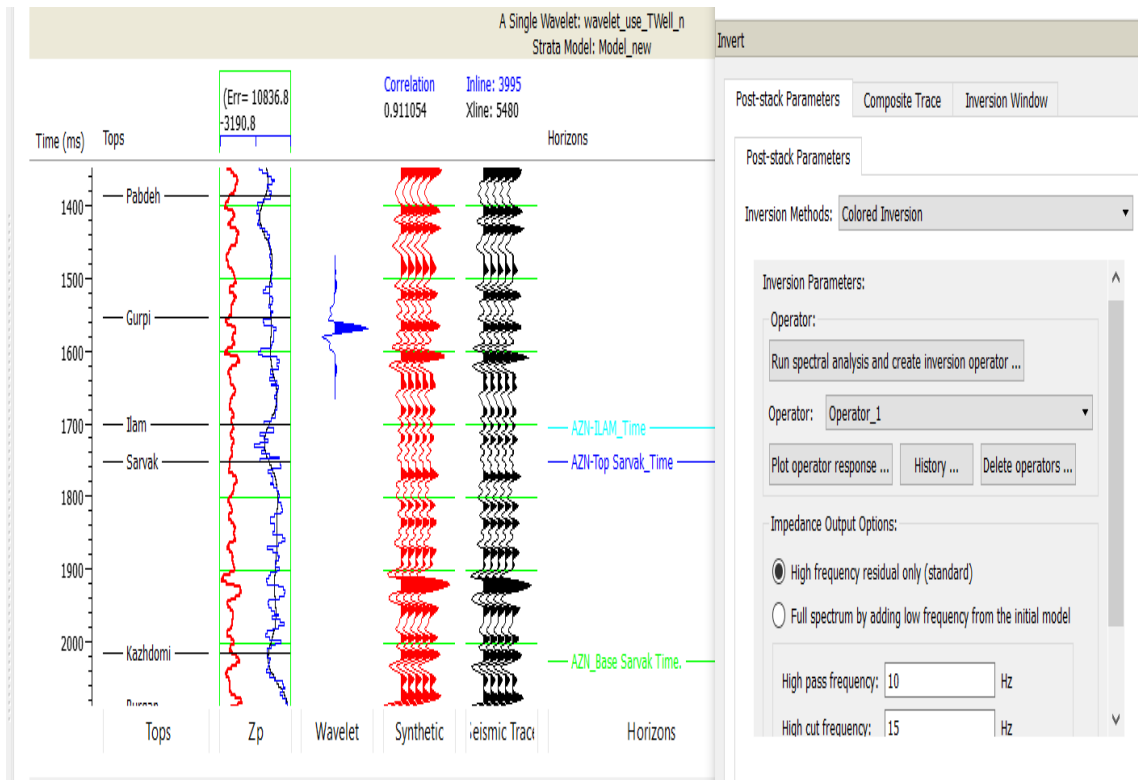
^۴ Spars Spike



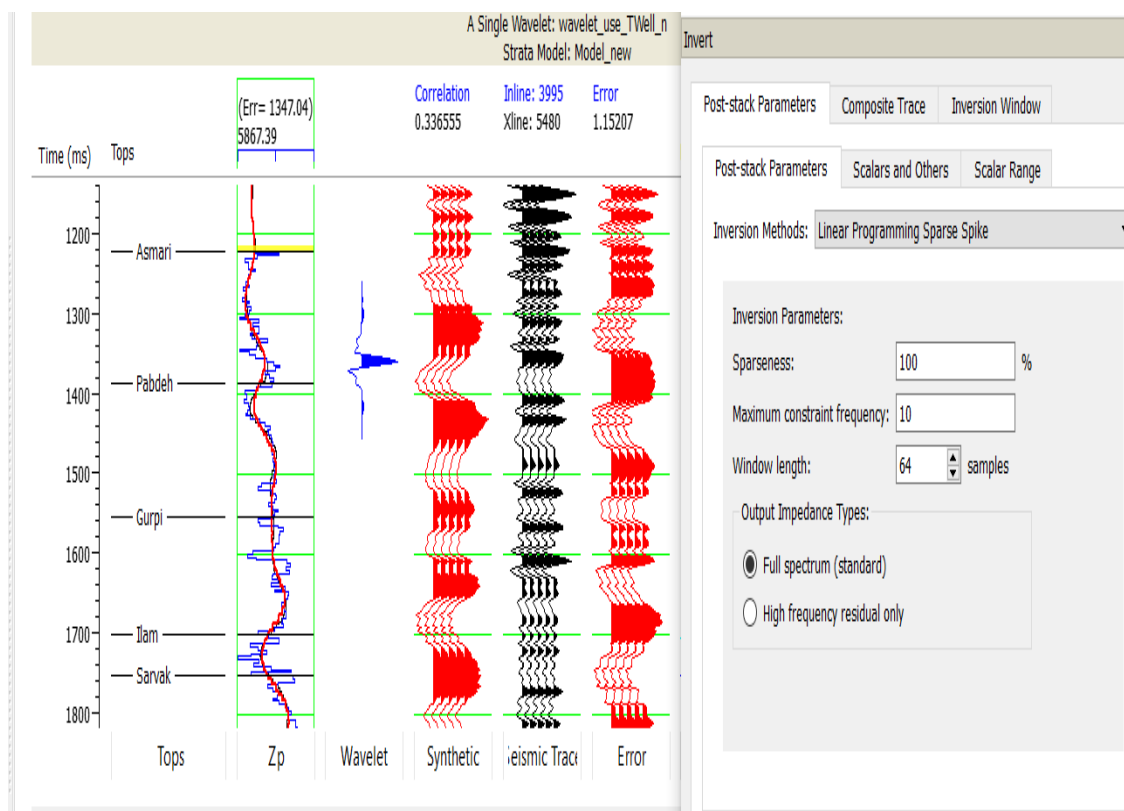
شکل (۴-۱۲): نتایج آنالیز وارون‌سازی برپایه مدل در محل چاه ۲



شکل (۴-۱۳): نتایج آنالیز وارون‌سازی باند محدود در محل چاه ۲

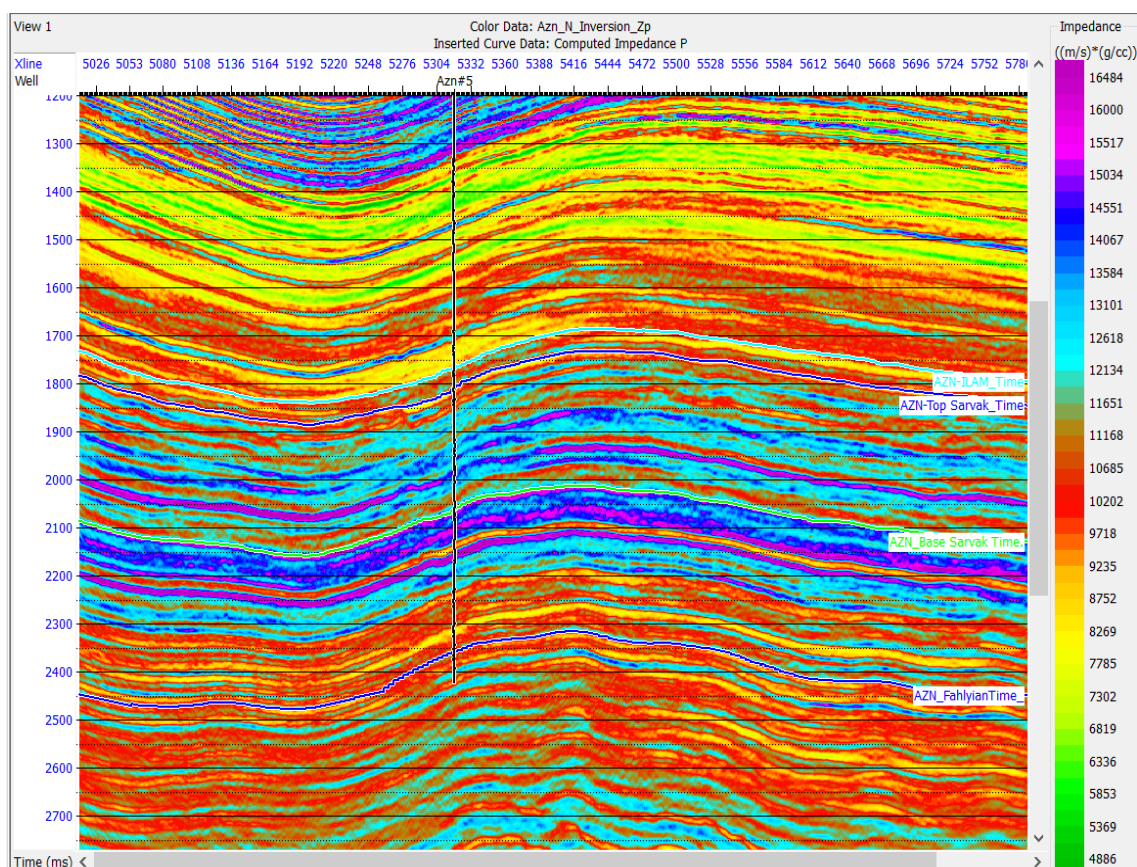


شکل (۴-۱۴): نتایج آنالیز وارون‌سازی رنگی در محل چاه ۲



شکل (۴-۱۵): نتایج آنالیز وارون‌سازی خارهای پراکنده در محل چاه ۲

با توجه به آنالیزهای فوق‌الذکر و مقایسه نتایج آنها مشخص شد که روش برپایه مدل دارای بالاترین میزان همبستگی و کمترین میزان خطا بین داده‌های وارون‌سازی و داده‌های لرزه‌ای بوده است و لذا در ادامه مطالعه از نتایج وارون‌سازی بر پایه مدل جهت استخراج مکعب مقاومت صوتی و سرعت‌های لرزه‌ای بهره گرفته شد. بطوریکه که در شکل (۴-۱۶) برش عرضی (شرقی-غربی) عبوری از محل چاه-۲ از مکعب مقاومت صوتی بدست آمده از این روش نشان داده شده است.



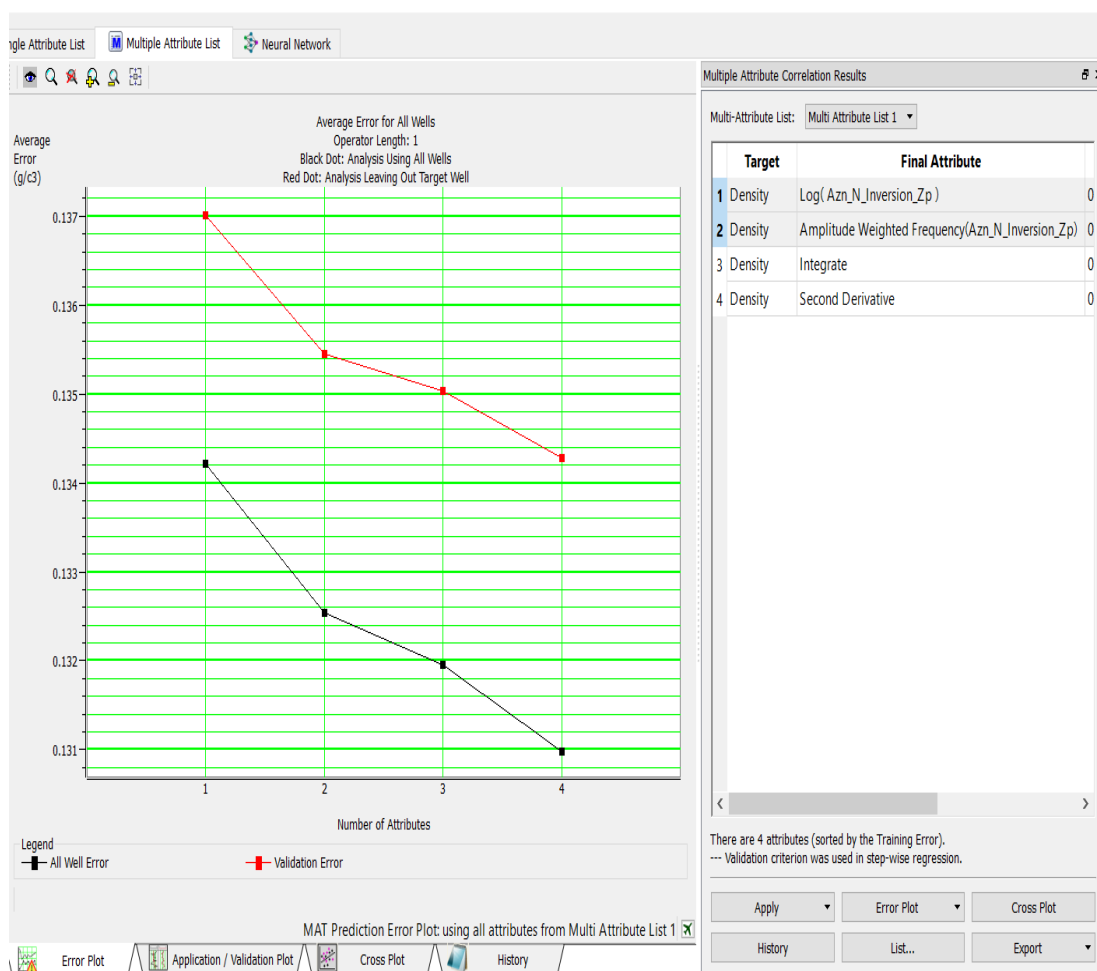
شکل (۴-۱۶): برش عرضی شرقی-غربی از مکعب مقاومت صوتی حاصل از روش وارون‌سازی برپایه مدل در محل چاه-۵ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است)

۵-۴ تخمین مکعب چگالی و مکعب فشار روباره

پس از انجام وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای، مکعب چگالی با استفاده از نگارهای چگالی و داده‌های لرزه‌ای و در ماژول ایمرج نرم‌افزار همپسون-راسل و به روش آنالیز چند نشانگری^۱ مورد استخراج قرار گرفت. برای این منظور ابتدا با استفاده از آنالیز تک نشانگری، مقادیر همبستگی تک نشانگرها با نگار

¹ Multi-Attribute Analysis

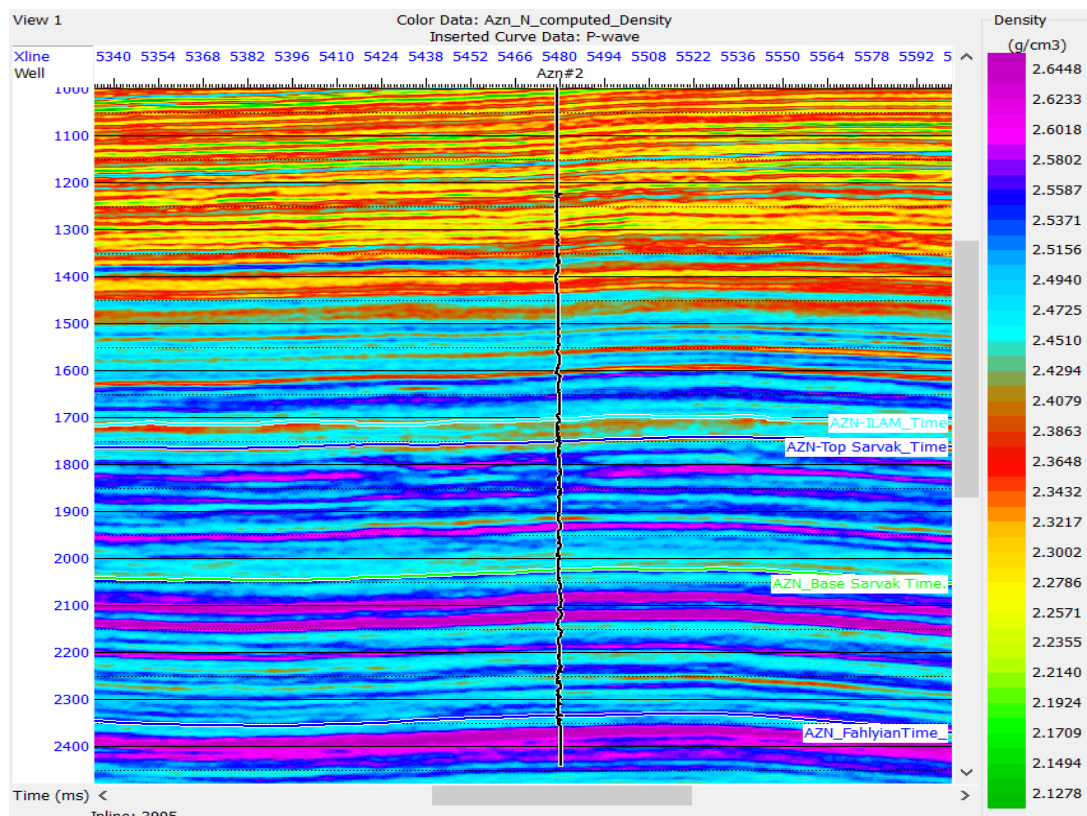
چگالی محاسبه شد و سپس با استفاده از نشانگرهای با بالاترین همبستگی با نگار چگالی و به روش آنالیز چند نشانگری مکعب چگالی مورد تخمین قرار گرفته و استخراج گردید. با توجه به اینکه تعداد نشانگرهای مورد استفاده در آنالیز گروهی نشانگرها، نباید بیشتر از تعداد چاه‌ها باشد (Hampson Russell, 2014) و از آنجا که در این تحقیق تعداد ۵ حلقه موجود بوده که یکی از آنها نیز برای آزمون نتایج کنار گذاشته شده بود لذا تعداد نشانگرهای بکار گرفته شده در مطالعه ۴ نشانگر بوده است که در شکل (۴-۱۷) گروه نشانگرهای بکار گرفته شده همراه با خطای تخمین آنها داده شده است.



شکل (۴-۱۷): آنالیز چند نشانگری و لیست نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده در تخمین سرعت (سمت راست)، نمودار خطای کل و خطای اعتبار سنجی^۱ (سمت چپ)

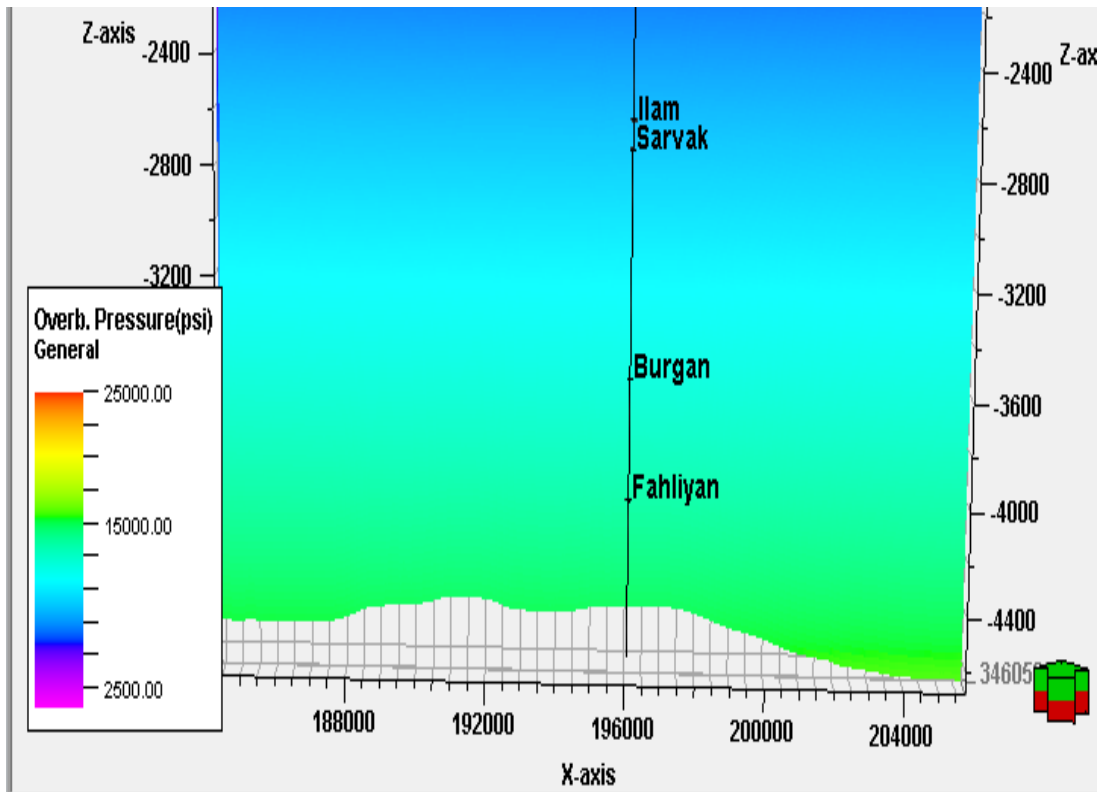
¹ Validatin Error

در نهایت پس از تخمین نگار چگالی در محل‌های حفاری نشده، با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، مکعب چگالی بدست آمد که برش عرضی (شرقی-غربی) آن در محل چاه-۲ در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است.

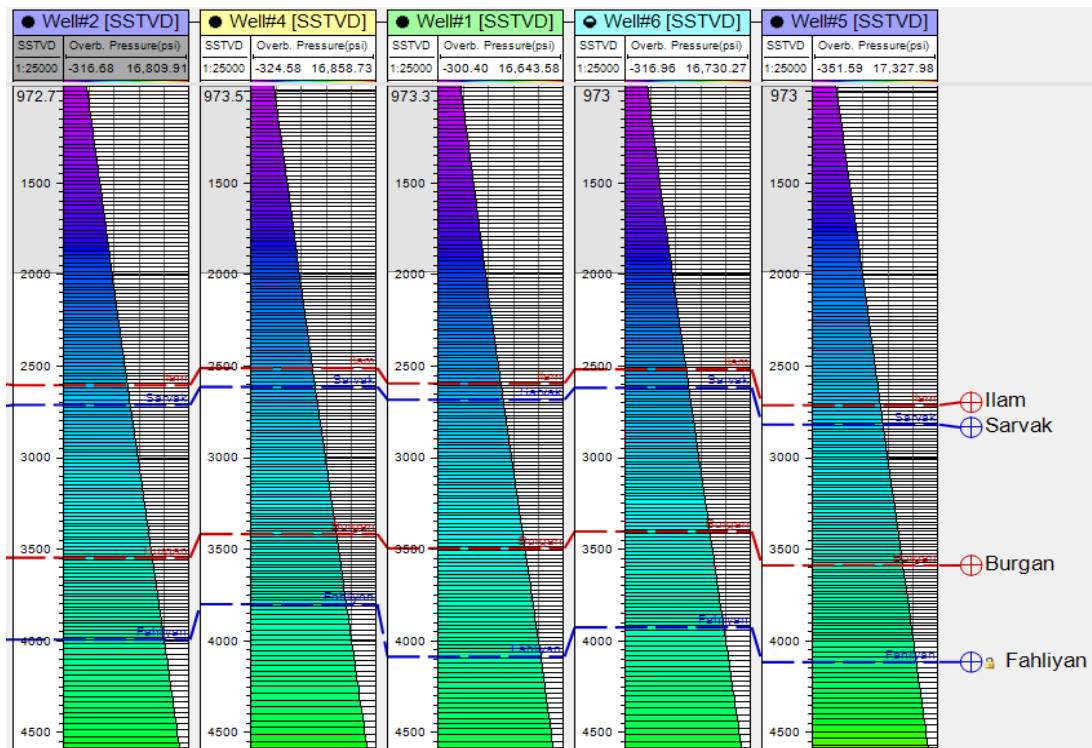


شکل (۴-۱۸): برش عرضی از مکعب چگالی حاصل از تخمین به روش آنالیز چند نشانگری در محل چاه ۲ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است)

در ادامه کار مکعب فشار روباره که در هر عمق برابر با تنش قائم ناشی از وزن رسوبات بالایی و سیال داخل آن می‌باشد، با استفاده مازول مدل‌سازی نرم‌افزار پترل محاسبه شد. به این صورت که ابتدا مدل مفهومی لایه‌های میدان و ضخامت سلول‌ها تا زمان رفت و برگشت (ms) ۴۰۰۰ که داده‌های لرزه‌ای دارای کیفیت قابل قبولی بودند ساخته شد. سپس به سلول‌های مدل پارامتر چگالی اختصاص داده شد. حال با استفاده از رابطه (۲-۳) و انتگرال مکعب چگالی مکعب فشار روباره استخراج گردید که در شکل (۴-۱۹ الف) مقطع عرضی آن بصورت شرقی-غربی در محل چاه-۲ و در شکل (۴-۹ ب) نگار فشار روباره در چاه‌های میدان نشان داده شده است:



(الف)

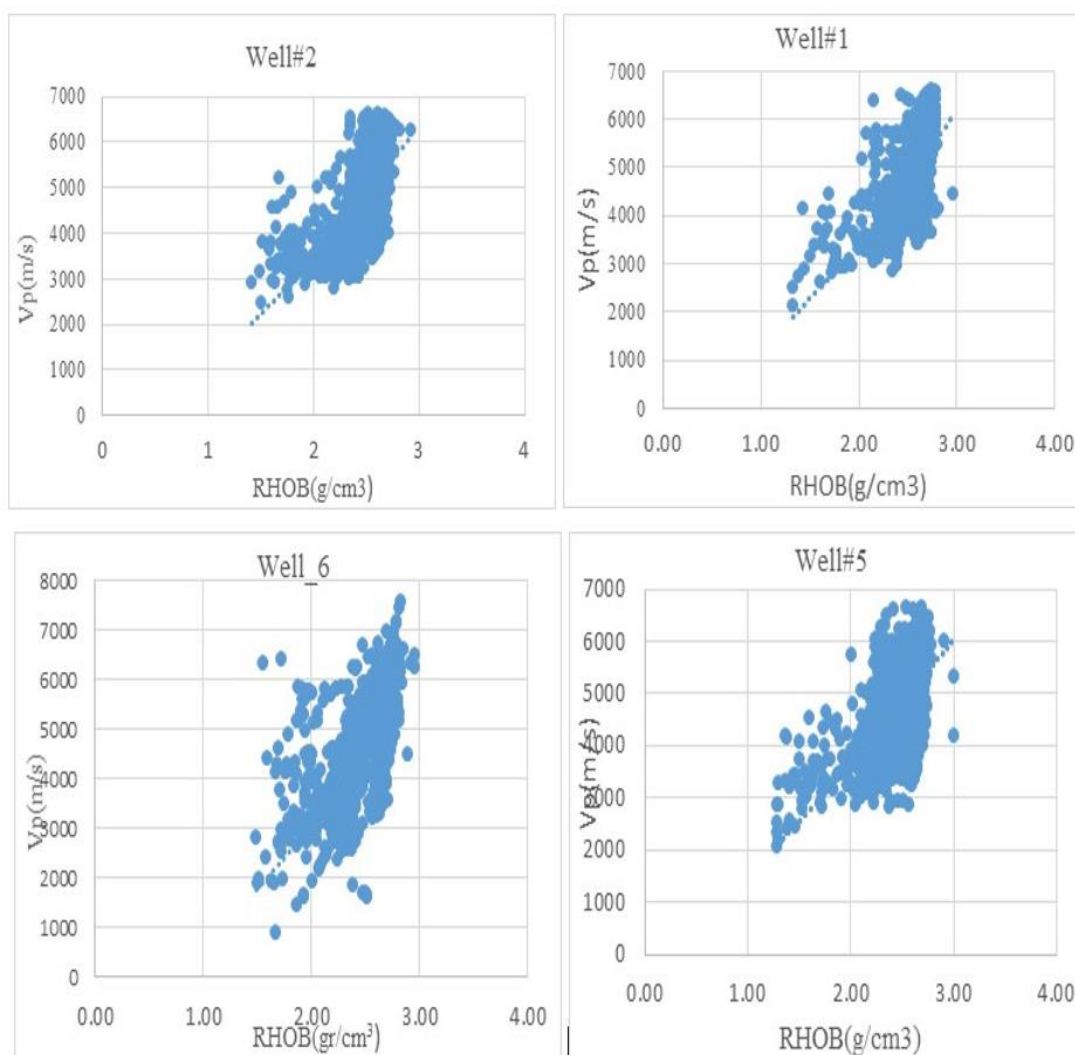


(ب)

شکل (۴-۱۹): برآورد فشار روباره از مکعب چگالی در نرم‌افزار پترل در محل چاه-۲: (الف) مقطعی عرضی (شرقی-غربی) از فشار روباره و (ب) نگار فشار روباره در محل چاه‌های میدان، (واحد محورها بر حسب متر است)

۴-۶ تعیین مکانیزم اصلی موثر در ایجاد فشارهای مخزن

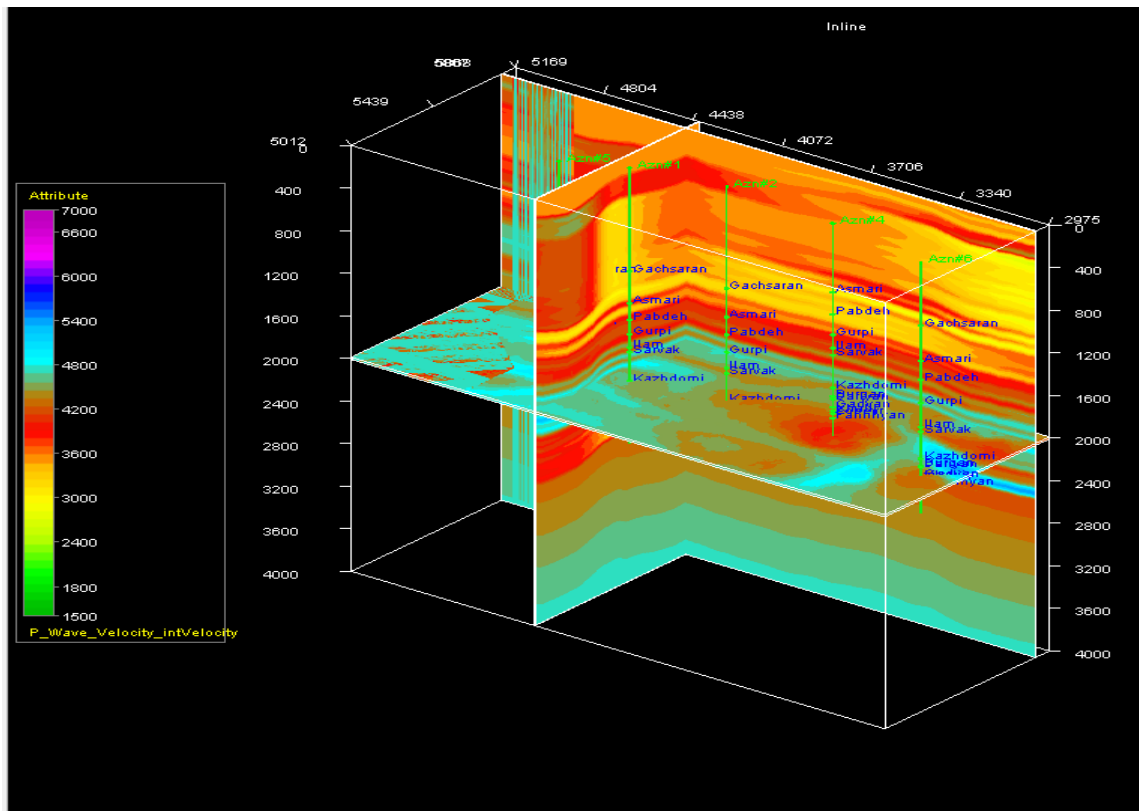
برای انتخاب مکانیزم اصلی موثر در ایجاد فشارهای مخزن، نمودار متقاطع سرعت-چگالی بالک در چاه‌های این میدان با استفاده از نگارهای Δt و چگالی رسم گردید که در شکل (۴-۲۰) برای چاه‌های ۱، ۲، ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این نمودارها دیده می‌شود با افزایش عمق، سرعت و چگالی هر دو افزایش می‌یابند که این نوع رفتار نمودار چه در حالت فشارهای بالا و چه در فشارهای نرمال مربوط به روند تراکم نامتوازن و مکانیزم بارگذاری می‌باشد (Swarbrick et al., 2013). بنابراین در ادامه مطالعه از روابط بارگذاری (رابطه بارگذاری باورز) برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده شد.



شکل (۴-۲۰): نمودار متقاطع سرعت-چگالی در چهار چاه میدان مورد مطالعه

۷-۴ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت وارون‌سازی

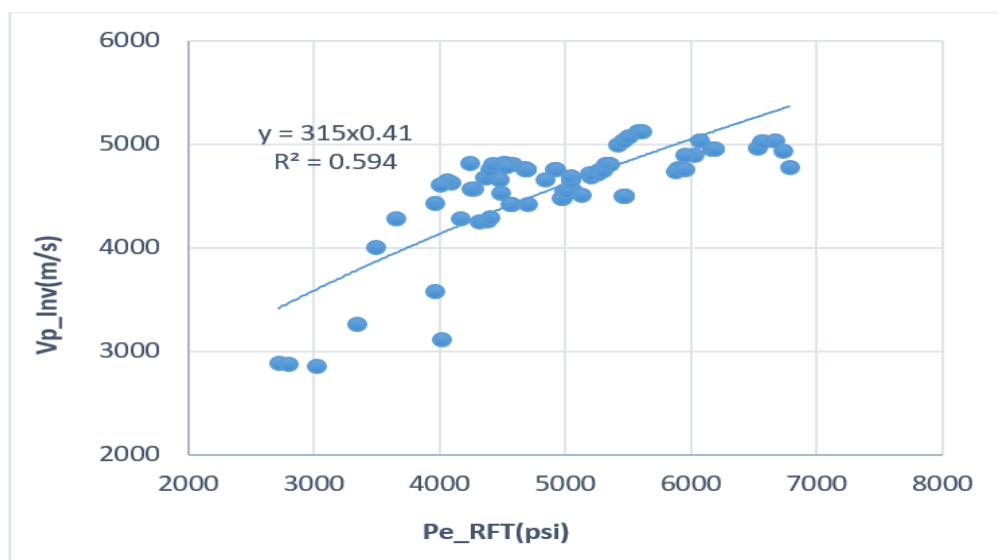
به منظور استخراج مکعب سرعت مورد نیاز در این روش، ابتدا وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای انجام شد و سپس داده‌های سرعت لرزه‌ای بطور مستقیم از مدل استراتا استخراج گردید که در شکل (۴-۲۱) برش‌های عرضی و افقی از آن نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۱): برش‌های عرضی و افقی از مکعب سرعت وارون‌سازی (واحد اعداد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است)

حال با تشکیل نمودار متقاطع بین داده‌های سرعت وارون‌سازی و فشار موثر بدست آمده از داده‌های RFT سه چاه و انجام برازش خطی بین آنها که در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است، رابطه اولیه بین داده‌های مذکور تعیین شد که پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها، ضرائب کالیبراسیون نهائی بدست آورده می‌شود. این بخش از تحقیق بصورت مرحله به مرحله ادامه یافته و با بدست آوردن ضرایب کالیبراسیون، داده‌های مورد انتظار (داده‌های پیش‌بینی شده) در هر مرحله تولید می‌شوند و سپس بوسیله داده‌های واقعی کنترل شده و دقت آنها بررسی می‌شود. این کار چندین بار تکرار شده، تا نتیجه

قابل قبول حاصل شود، بطوریکه امکان بهینه‌سازی ضرایب وجود نداشته باشند. در نهایت، ضرائب کالیبراسیون نهائی برای روش سرعت حاصل از وارون‌سازی با مقادیر $A=250$ و $B=0.4$ بدست آمدند.



شکل (۴-۲۲): برازش بین فشار موثر و سرعت حاصل از وارون‌سازی

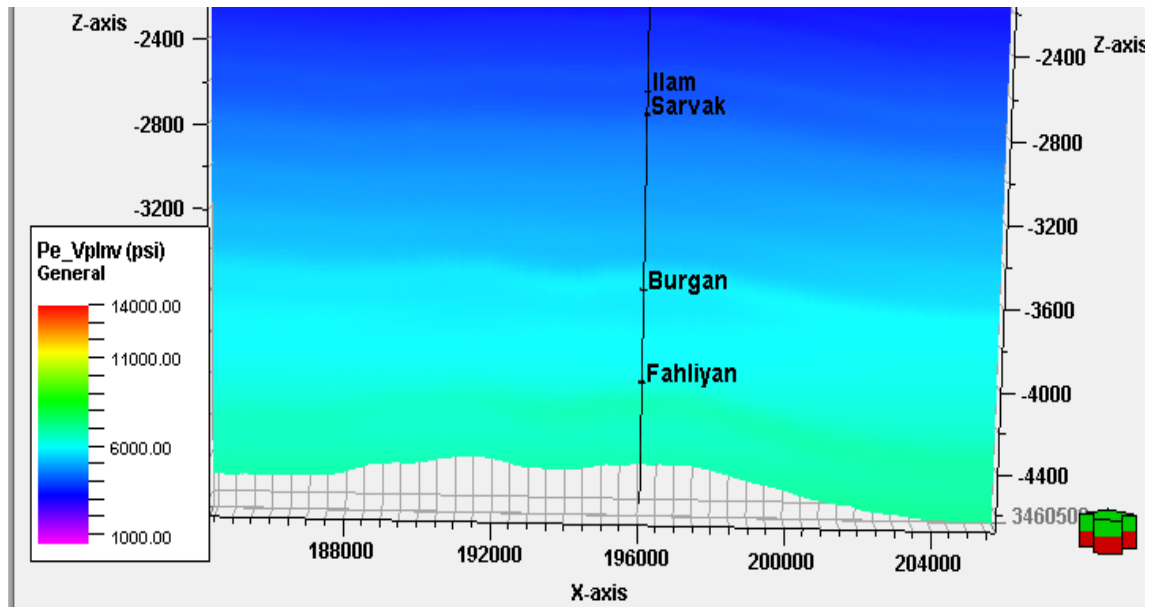
در نهایت با بهره‌گیری از معادله باورز (۲-۱۳)، رابطه بین داده‌های سرعت وارون‌سازی با داده‌های تنش موثر در میدان مورد مطالعه بصورت رابطه زیر تعیین گردید.

$$V = 1500 + 250(\sigma_e)^{0.4} \quad (1-4)$$

در رابطه فوق سرعت موج تراکمی در سطح زمین در حین کالیبراسیون برابر با 1500 (m/s) تعیین شد.

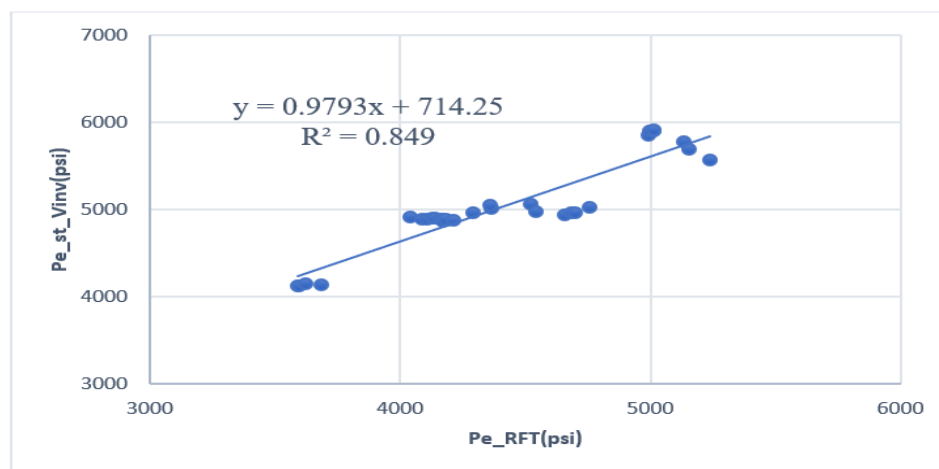
در ادامه با استفاده از رابطه (۴-۱) داده‌های سرعت وارون‌سازی در محل چاه‌ها به داده‌های تنش موثر برگردانده شد. سپس با انجام کالیبراسیون و نهایی شدن رابطه، مکعب داده‌های سرعت به فشار موثر برگردانده شد که در شکل (۴-۲۳) برش عرضی آن در محل چاه ۲ نشان داده شده است. همانطور که از مقطع عرضی قابل استنباط است، در این روش شناسایی لایه‌های مخزنی بورگان و فهلیان میسر

نشد و تنها مخازن ایلام و سروک با رنگ تیره‌تر از لایه‌های بالا و پایین خود بصورت درست (با فشار موثر پایین) شناسایی و تفکیک شدند.



شکل (۴-۲۳): مقطع عرضی فشار موثر برآورد شده از سرعت وارون‌سازی در محل چاه ۲: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار کمتر (رنگ تیره‌تر) تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک شدند (واحد محورها برحسب متر است).

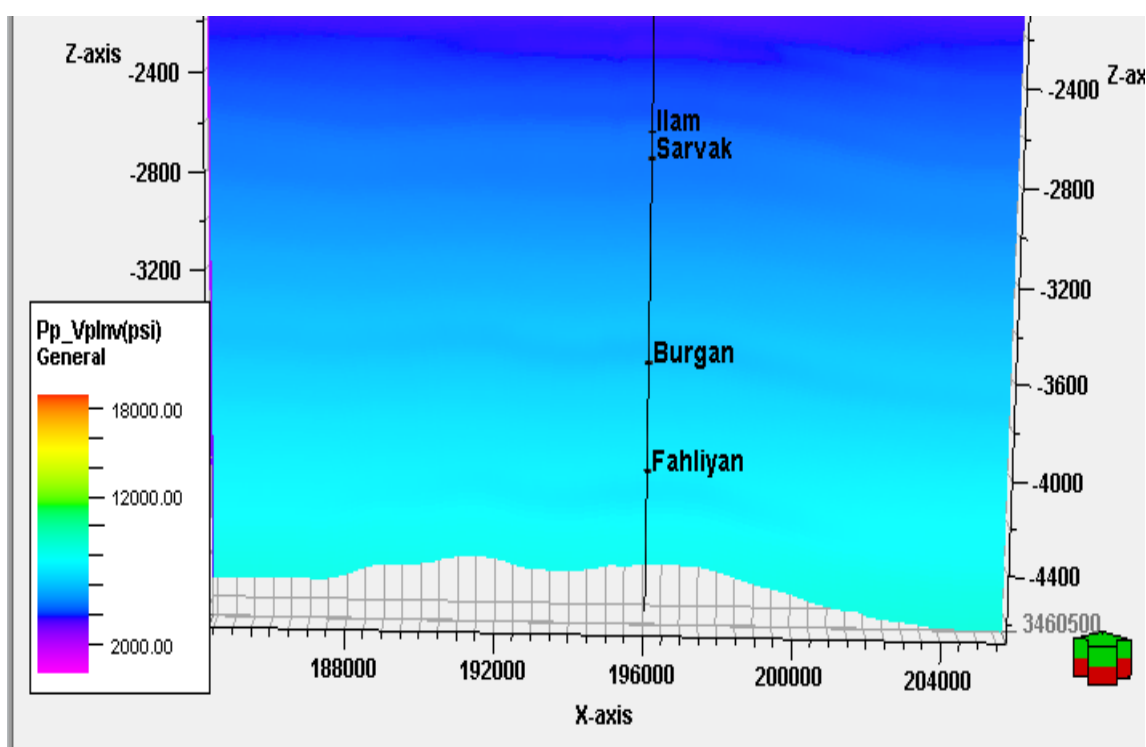
پس از انجام آزمون دقت در محل چاه ۶ که داده‌های آن در برازش اولیه مورد استفاده قرار نگرفته بودند، دقت پیش‌بینی روش بر اساس محاسبه ضریب تعیین^۱ (R^2) برابر با ۰.۸۴۹۰ تعیین شد، که در شکل (۴-۲۴) دیده می‌شود.



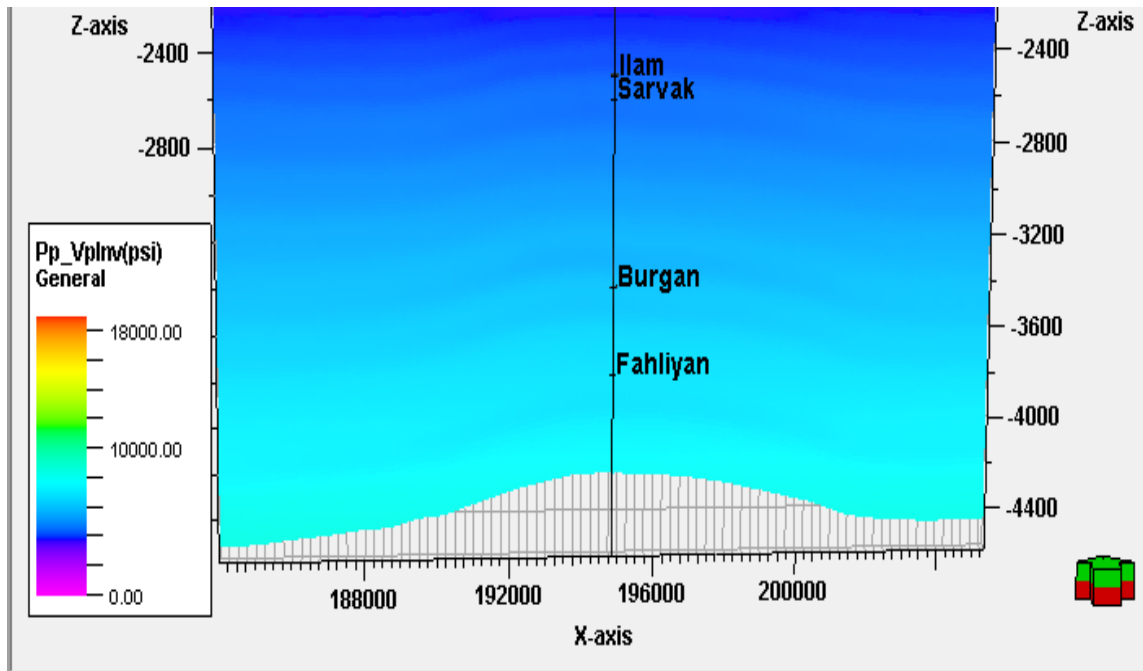
شکل (۴-۲۴): برازش بین داده‌های فشار موثر تخمین شده با داده‌های واقعی در چاه ۶

^۱ Determination Coefficient

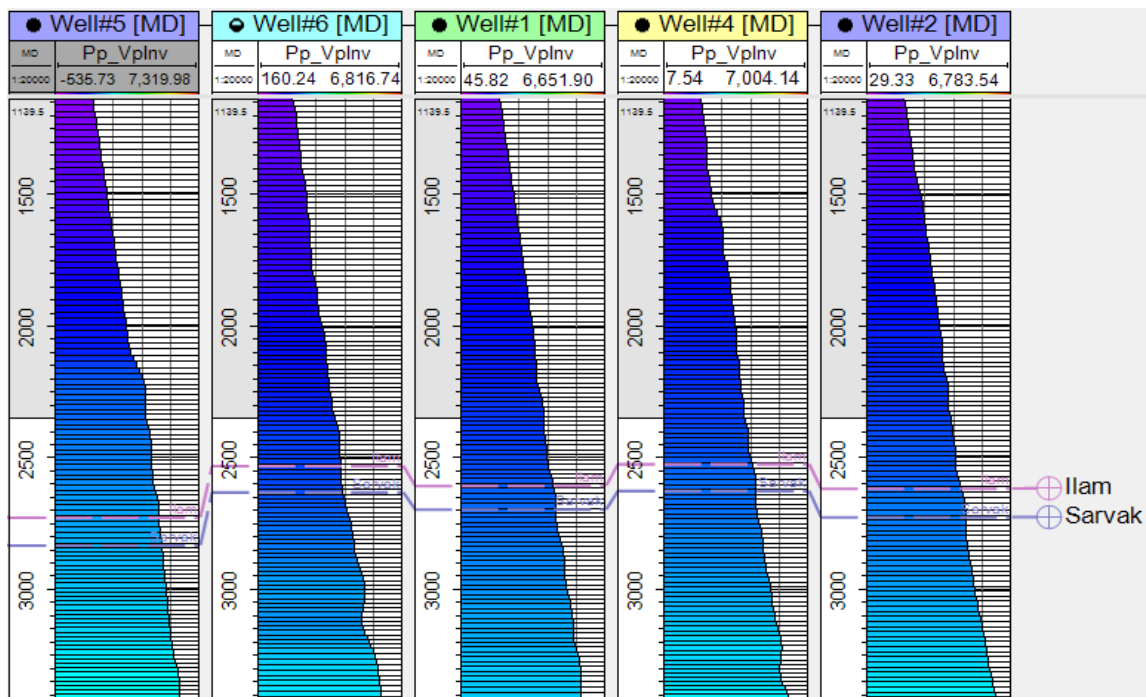
در نهایت مکعب فشار منفذی با بهره‌گیری از رابطه ترازقی (رابطه ۲-۸) مورد استخراج قرار گرفت. برای این منظور، فشار روباره حاصل از مکعب چگالی و فشار موثر بدست آمده در فوق، مورد استفاده قرار گرفتند که در شکل‌های (۴-۲۵) و (۴-۲۶) مقطع عرضی آن به ترتیب در محل چاه-۲ و چاه-۴ نشان داده شده‌اند. همچنین نگار فشار منفذی در محل ۵ چاه میدان مورد مطالعه استخراج شده و در شکل (۴-۲۷) نشان داده شده است. همانطور که از مقاطع عرضی و نیز از نگار فشار منفذی قابل مشاهده است، این روش قادر به شناسایی دقیق نوارهای مخزنی نبوده و تنها توانسته است مخازن اصلی میدان یعنی مخازن ایلام و سروک را تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود به درستی (با رنگ روشن‌تر و به عبارت دیگر با فشار منفذی بیشتر) تفکیک نماید. از آنجایی که گزارش‌های زمین‌شناسی تکمیلی چاه ۶ بیانگر حالت غیر مخزنی برای سازندهای ایلام و سروک است و این موضوع با مقدار فشار منفذی کم در نگار شکل (۴-۲۷) قابل مشاهده است.



شکل (۴-۲۵): مقطع عرضی فشار منفذی برآورد شده از سرعت وارون‌سازی در محل چاه ۲: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک می‌باشد (واحد محورها برحسب متر است).



شکل (۴-۲۶): مقطع عرضی فشار منفذی برآورد شده از سرعت وارون‌سازی در محل چاه ۴: بخش مخزنی ایلام و سروک با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است).



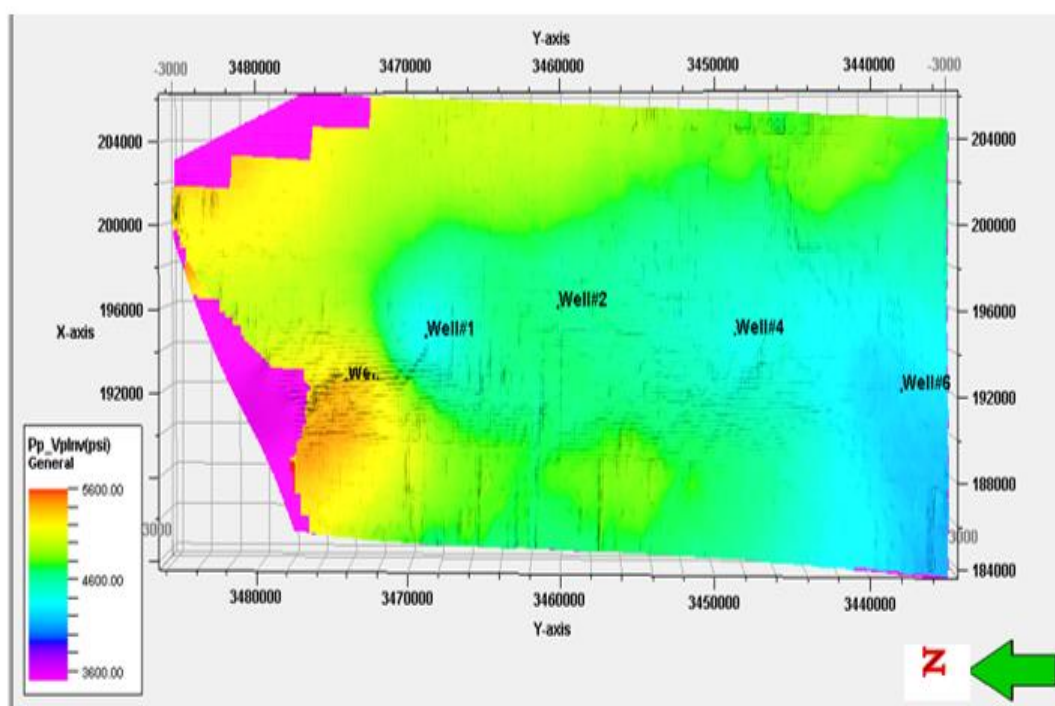
شکل (۴-۲۷): نگار فشار منفذی حاصل از سرعت وارون‌سازی در محل چاه‌های میدان (واحد محورها بر حسب متر است)

در ادامه جهت انجام بررسی‌های بیشتر مدل از نظر تغییرات جانبی، برش‌های افقی از مکعب فشار

منفذی پیش‌بینی شده در مخازن سروک، بورگان و فهلیان تهیه گردید که به ترتیب در شکل‌های (۴-۴)

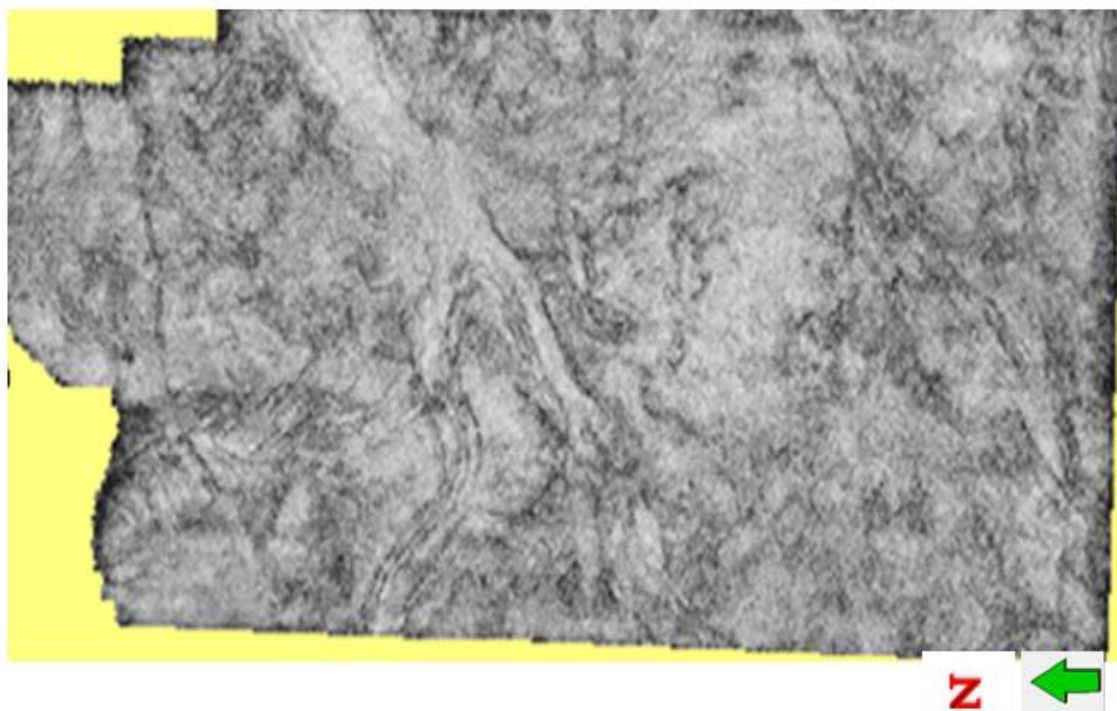
(۲۸)، (۴-۳۰) و (۴-۳۱) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۴-۲۸) دیده می‌شود، این روش فقط توانسته است تغییرات جانبی را در فشار مخزنی سروک نشان دهد، اما قادر به نشان دادن تاثیر کانال‌های مدفون در توزیع جانبی فشار منفذی نبوده است.

وجود کانال‌های آبی مدفون در بخش مخزنی سازند سروک در قسمت میانی و جنوبی میدان در نشانگرهای لرزه‌ای مختلف قابل شناسایی می‌باشند، که بعنوان نمونه در شکل (۲-۲۹) توسط نشانگر تشابه^۱ نشان داده شده‌اند. همانطور که در برش‌های افقی از مخازن میدان مورد مطالعه، قابل مشاهده است، بخش‌های جنوبی میدان همراه با ستیغ ساختمان، حاوی فشار منفذی پایینی می‌باشند، که می‌تواند علل مختلفی داشته باشد. بخشی از این پایین بودن فشار به توپوگرافی و عمق کم لایه‌ها در مناطق مذکور مربوط بوده، ولی همانطور که در تفسیر نگار فشار منفذی در محل چاه ۶ گفته شد، یکی دیگر از دلایل این تغییرات جانبی فشار منفذی، نداشتن حالت مخزنی در سازندهای ایلام و سروک در بخش جنوبی میدان خواهد بود.

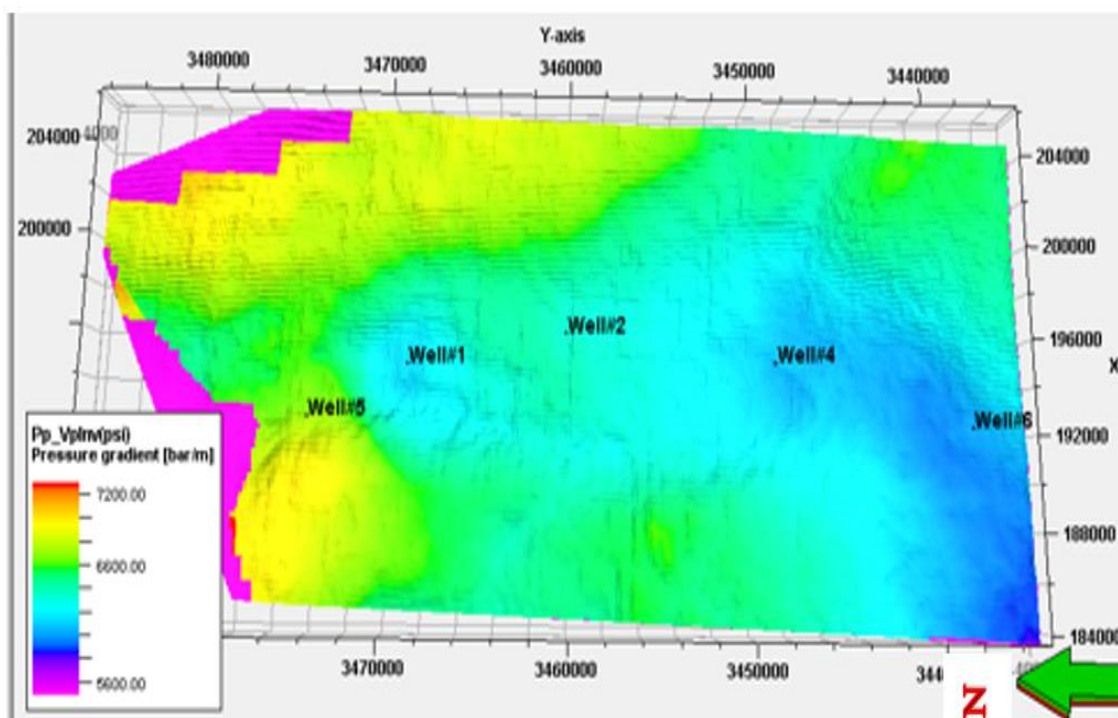


شکل (۴-۲۸): برش افقی فشار منفذی در زون مخزنی سروک که نشان دهنده تغییرات جانبی فشار می‌باشد.

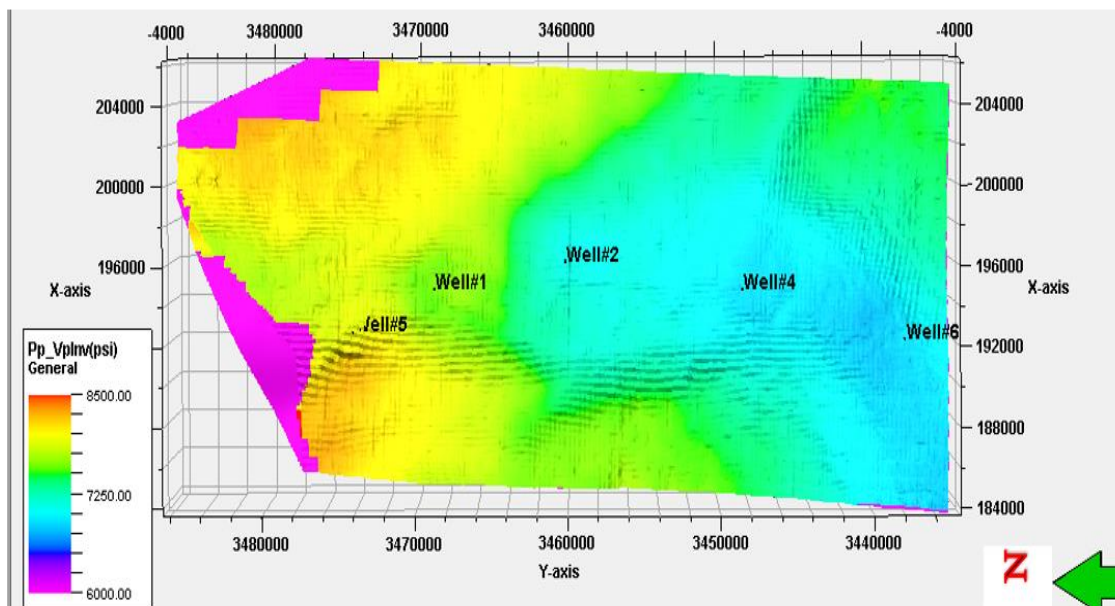
¹ Similarity



شکل (۴-۲۹): برش افقی از نشانگر تشابه که کانال‌های آبی را در بخش مخزنی سازند سروک نشان می‌دهد.

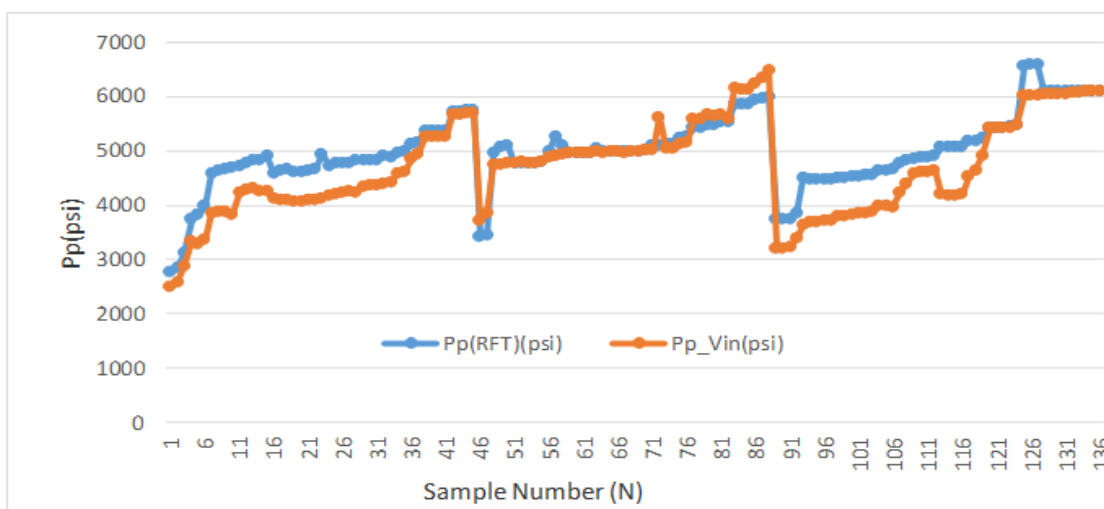


شکل (۴-۳۰): برش افقی از فشار منفذی در زون بورگان که نشان دهنده تغییرات جانبی فشار می‌باشد.

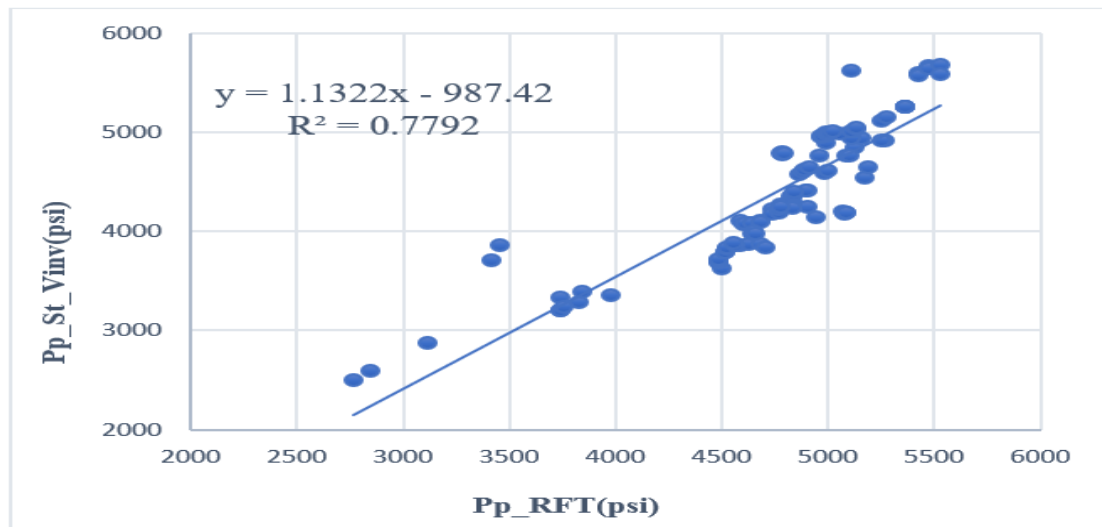


شکل (۴-۳۱): برش افقی فشار منفذی در زون فلهیان که نشان دهنده کم شدن فشار از شمال به طرف جنوب مخزن می‌باشد.

در ادامه میزان انطباق داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های چاه ترسیم شد که در نمودار شکل (۴-۳۲) نمایش داده شده است (نمونه‌های فشار مربوط به ۴ چاه بوده و افت و خیزهای وسط نمودار به علت تغییر چاه و عمق می‌باشند). در نهایت جهت تعیین خطای مدل پیش‌بینی فشار منفذی برای این روش، بین داده‌های اندازه‌گیری فشار منفذی چاه‌ها (RFT) و داده‌های پیش‌بینی شده، برازش انجام شد و مطابق شکل ۴-۳۳ ضریب تعیین بین آنها برابر 0.7792 تعیین شد.



شکل (۴-۳۲): انطباق داده‌های پیش‌بینی فشار منفذی با داده‌های آزمایش فشار در چاه‌ها



شکل (۴-۳۳): نمودار متقاطع و ضریب تعیین بین داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده از سرعت وارون‌سازی و داده‌های آزمایش چاه‌ها

همچنین میزان خطای استاندارد میانگین یا خطای استاندارد (SE_x)^۱ فشار منفذی پیش‌بینی شده نیز به کمک رابطه (۴-۲) به میزان ۷۱ (psi) محاسبه شد.

$$SE_x = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (۴-۲)$$

که در آن n تعداد نمونه فشار منفذی و S انحراف معیار آن است.

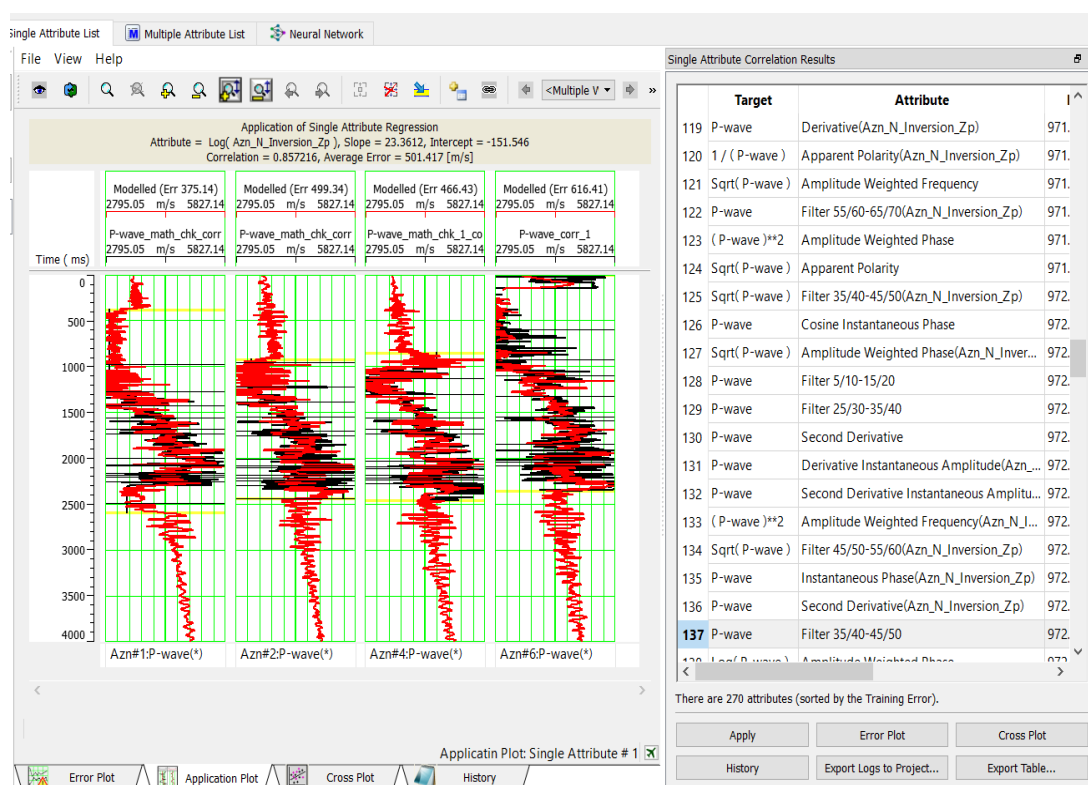
۴-۸ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری

پس از تجزیه و تحلیل نتایج در بخش قبلی و آشکار شدن ضعف روش سرعت وارون‌سازی در تفکیک مناسب لایه‌های مخزنی تلاش شد، که در استخراج نشانگر سرعت از روش‌های مناسب‌تری بهره گرفته شود. برای این منظور به عنوان یک گزینه، از سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری استفاده شد که در ماژول ایمرج از نرم‌افزار همپسون-راسل بدست آمد. در این روش تخمین سرعت که برای اولین بار در پیش‌بینی فشار منفذی بوسیله نگارنده بکار گرفته شده است، ابتدا با آنالیز تک نشانگری، میزان

^۱ Standard error of the mean (SEM) or standard error (SE)

حساسیت نشانگرهای مختلف از نظر همبستگی و خطای پیش‌بینی نسبت به نگار هدف (سرعت موج تراکمی) مورد سنجش قرار گرفت که در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده است.

سپس با انجام آنالیز چند نشانگری به روش رگرسیون مرحله‌ای^۱، بهترین گروه نشانگرها جهت برآورد سرعت موج تراکمی مورد استخراج قرار گرفت. در این روش ابتدا از تک نشانگرها شروع کرده و سپس همبستگی جفت نشانگرها و بعد همبستگی سه نشانگری و الی آخر انتخاب شده و با نگار هدف سنجیده می‌شود، و لذا بیشینه تعداد نشانگرهای انتخابی که در واقع بیانگر تعداد مراحل تکرار روش نیز می‌باشد نباید از تعداد کل چاه‌های مورد استفاده در تحلیل بیشتر باشد (Hampson Russell, 2015).

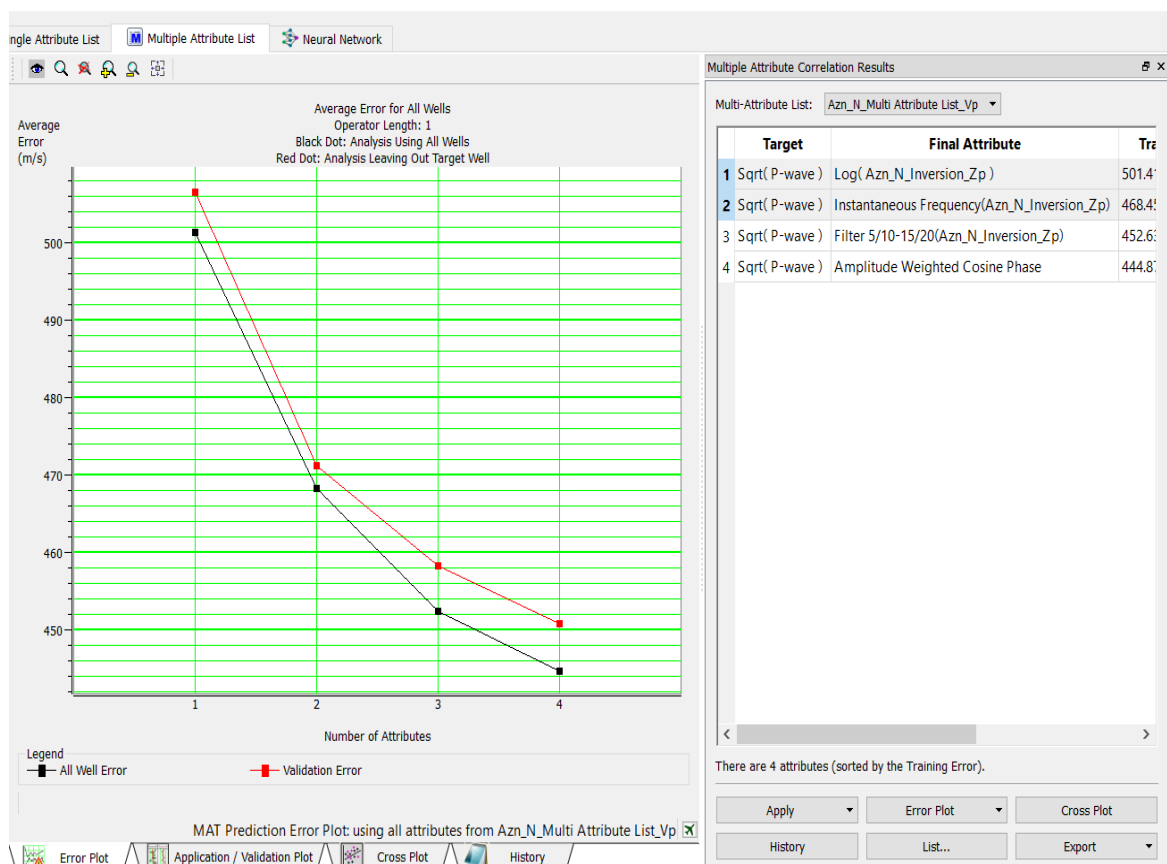


شکل (۴-۳۴): آنالیز تک نشانگری: لیست نشانگرها و میزان همبستگی آنها با نگار صوتی (سمت راست)، میزان انطباق اولین نشانگر و خطای مدل (سمت چپ)

حال با عنایت به اینکه تعداد کل چاه‌های مورد استفاده در پروژه ۵-حلقه بوده که در این مرحله آنالیز یکی از آنها (چاه-۵) جهت اعتبار سنجی کنار گذاشته شده و در مرحله آموزش بکار گرفته نشده

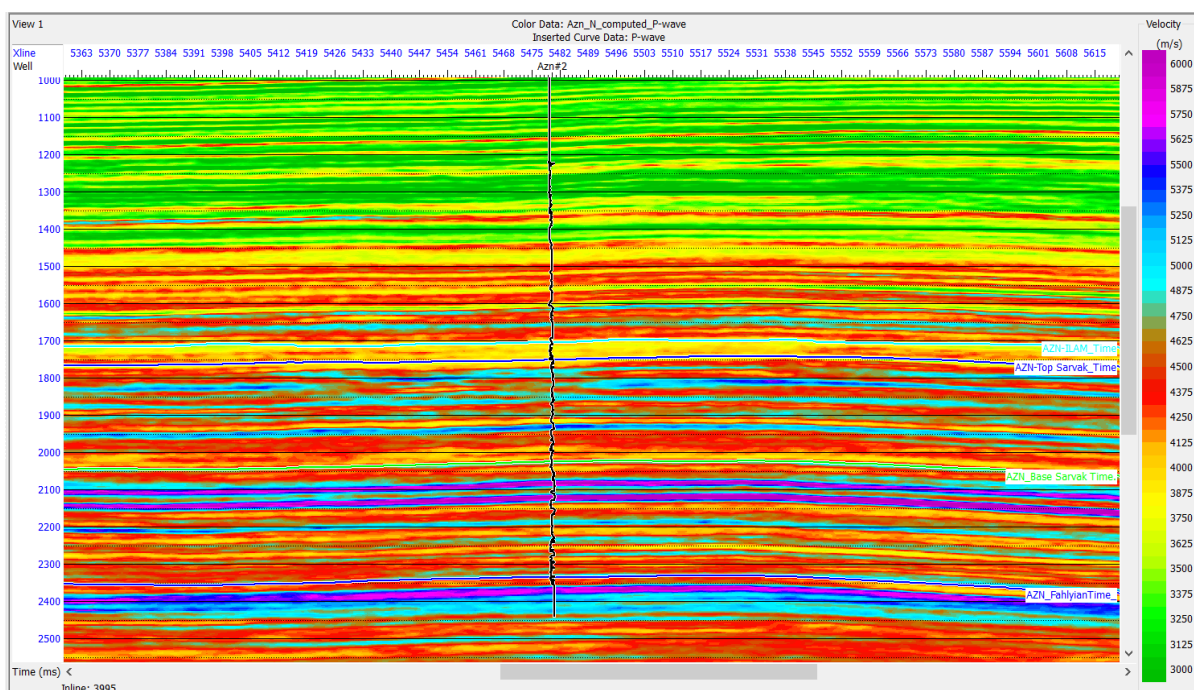
¹ Step-wise Regression

بود، بنابراین تعداد بیشینه نشانگرها و در نتیجه تعداد مراحل بازگشت در محاسبه همبستگی‌ها عدد چهار انتخاب گردید. در ادامه با انجام آزمون همبستگی و حساسیت نشانگرها با نگار صوتی، بهترین لیست نشانگرهای چهارگانه انتخاب گردید که در شکل (۴-۳۵-سمت راست) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مذکور (نمودار سمت چپ) دیده می‌شود با اضافه شدن تعداد نشانگرها، هر دو نمودار خطای کل و خطای اعتبار سنجی کم شده است و از نظر منطقی هم درست است که با اضافه شدن نشانگر به گروه، همبستگی نباید از حالت اولیه کمتر بشود، با اینحال با اضافه شدن نشانگر سوم، به همان اندازه که مقدار کل خطا کم شده است از مقدار خطای اعتبار سنجی کاسته نشده است، به عبارت دیگر خطای آزمون (اختلاف بین این دو خطا) زیاد شده است، در نتیجه تعداد ۲ نشانگر (مقاومت صوتی و حاصل ضرب فرکانس لحظه‌ای با مقاومت صوتی) جهت تخمین سرعت موج تراکمی انتخاب گردیدند.



شکل (۴-۳۵): آنالیز چند نشانگری و لیست نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده در تخمین سرعت (سمت راست)، نمودار خطای کل و خطای آزمون (سمت چپ)

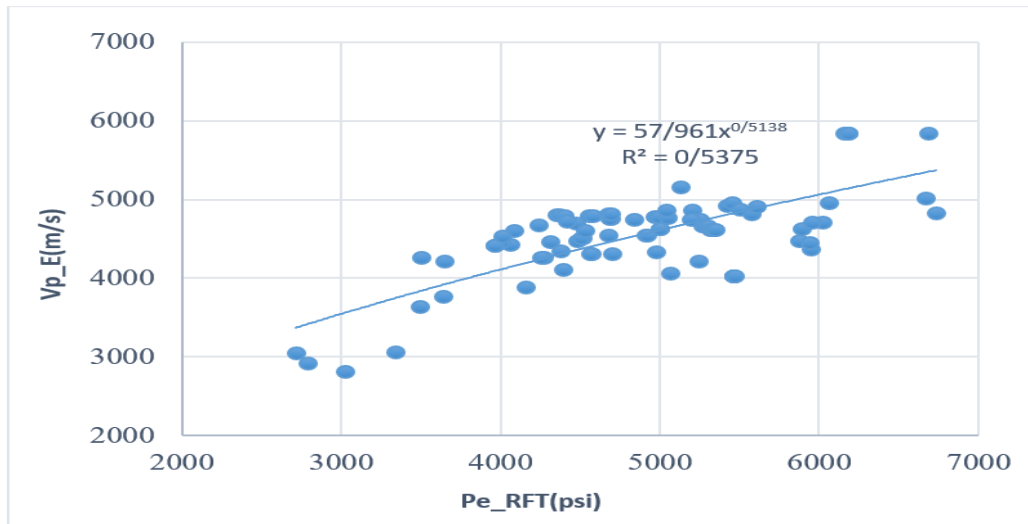
در نهایت مکعب سرعت لرزه‌ای به روش آنالیز چند نشانگری مورد تخمین قرار گرفت که برش عرضی (شرقی-عربی) آن در مقطع عبوری از چاه ۲ در شکل (۴-۳۶) نمایش داده شده است. بنابراین با استخراج داده‌های سرعت در نقاط متناظری که اندازه‌گیری فشار در محل چاه‌ها (RFT) وجود دارد، اقدام به تشکیل نمودار متقاطع بین داده‌های سرعت و فشار موثر گردید. سپس رابطه اولیه با ضرائب کالیبراسیون A و B به ترتیب برابر با $۵۷/۹۶۱$ و $۰/۵۱۳۸$ برای رابطه باورز (۲-۱۳) و با ضریب تعیین R^2 برابر با $۰/۵۳$ بدست آمدند که در شکل (۴-۳۷) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۶): برش عرضی از سرعت موج تراکمی حاصل از تخمین به روش آنالیز چند نشانگری در محل چاه ۲ (واحد محور قائم بر حسب میلی ثانیه است).

از آنجاییکه ضرایب همبستگی اولیه بدست آمده در فوق، کم بوده و مناسب ادامه کار و پیش‌بینی پارامتر فشار منفذی نیست، فلذا نیاز با یک سری تصحیحات و کالیبراسیون در محل چاه‌ها وجود داشت تا رابطه مذکور برای برگرداندن داده‌های سرعت به داده‌های فشار موثر دقت لازم را داشته باشد. این کار در عمل به دو روش انجام گرفت، در مرحله اول تعدادی از داده‌ها که خارج از محدوده بوده و ارقام نامعقولی به نظر می‌رسیدند از لیست داده‌ها حذف گردید، در قدم بعدی ضرایب رابطه بصورت مرحله

به مرحله تغییر داده شدند و در هر مرحله داده‌های فشار موثر پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی (RFT) مقایسه گردیدند. عمل تغییر ضرایب و تکرار تولید داده‌های پیش‌بینی تا آنجا ادامه پیدا کرد که ضریب تعیین بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های RFT به اندازه کافی بهینه شده و ادامه بهبود ضرایب دیگر ممکن نبوده است.

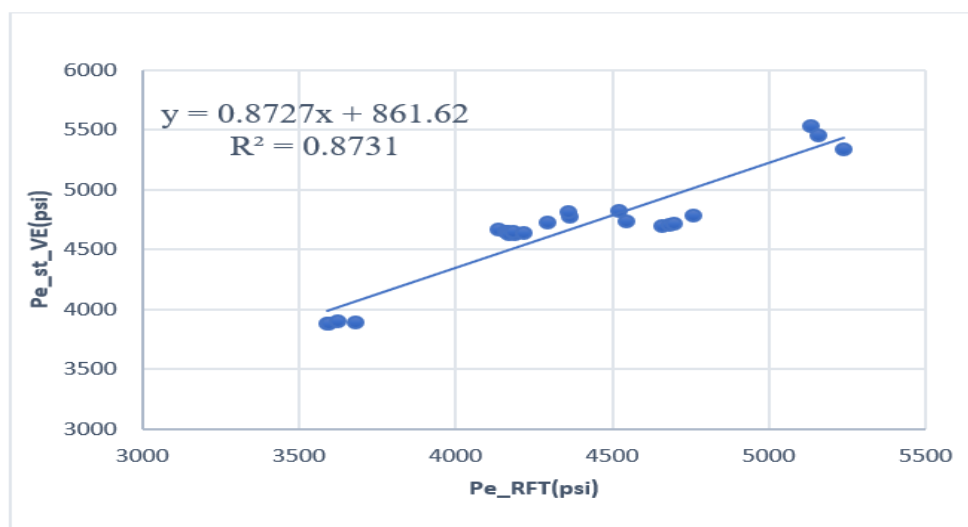


شکل ۴-۳۷: برازش بین فشار موثر و سرعت بدست آمده از آنالیز چند نشانگری

بنابراین ضرائب کالیبراسیون نهائی با مقادیر $A=185$ و $B=0.44$ بدست آمدند و در رابطه (۳-۴) برای برگردان داده‌های سرعت به داده‌های فشار موثر مورد استفاده قرار گرفتند.

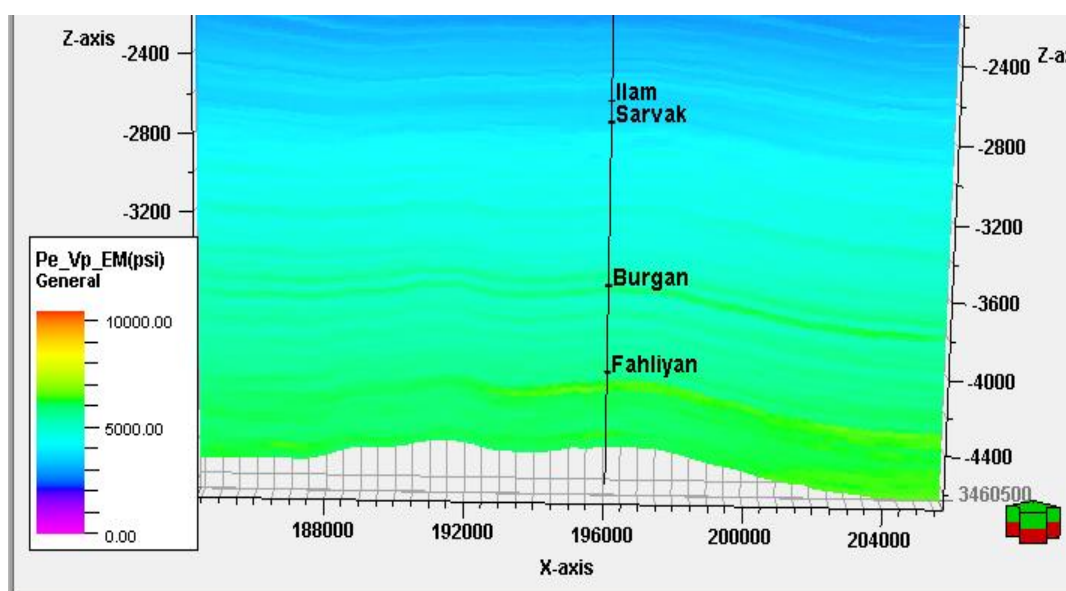
$$V = 1500 + 185(\sigma_e)^{0.44} \quad (3-4)$$

همانطور که در بخش قبل بیان شد مقدار سرعت موج تراکمی در سطح زمین با توجه به نتایج کالیبراسیون 1500 (m/s) تعیین شد. در ادامه مکعب سرعت برآورد شده از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از رابطه نهایی (۳-۴) به مکعب فشار موثر برگردانده شد و سپس دقت داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از داده‌های واقعی (RFT) چاه-۶ (چاه آزمون) که قبلاً در برازش و استخراج رابطه اولیه استفاده نشده بودند، مورد بررسی قرار گرفته و اعتبار سنجی شدند که در شکل (۳۸-۴) نتایج این آزمون با ضریب تعیین نسبتاً بالایی ($R^2=08731$) نشان داده شده است.

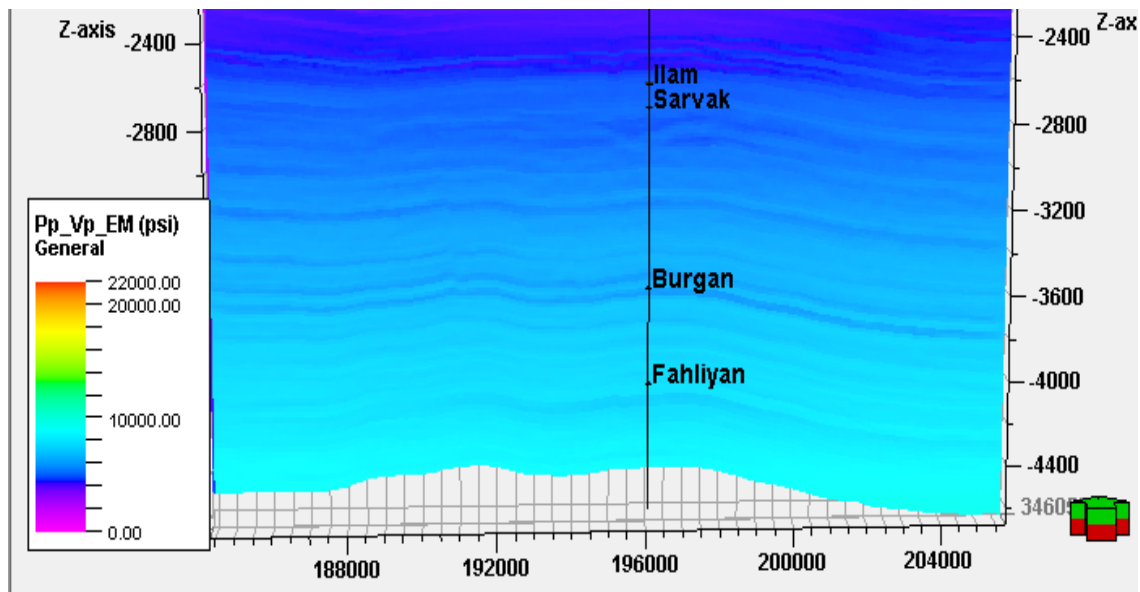


شکل (۴-۳۸): برازش بین داده‌های فشار موثر پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی در چاه ۶

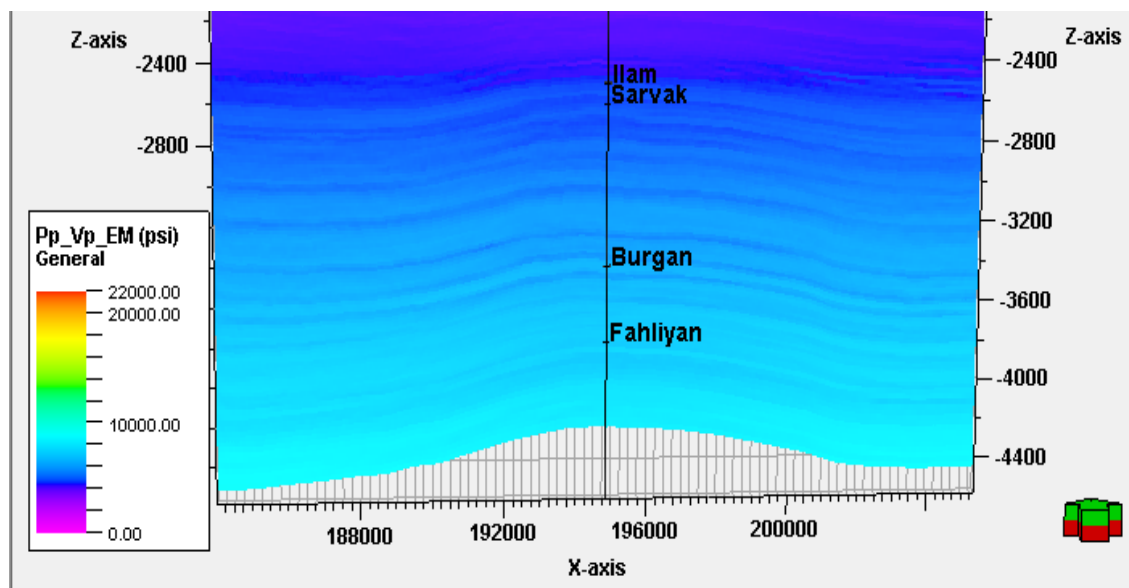
برای انجام بررسی‌های بیشتر از مکعب فشار موثر در محل چاه ۲- مقطع عرضی بصورت شرقی-غربی برش داده شد که در شکل (۴-۳۹) نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، چهار زون مخزنی: ایلام، سروک، بورگان و فهلیان در مقطع مذکور بوضوح از بخش‌های بالا و پایین خود با رنگ‌های متفاوت تفکیک شده‌اند که نشان دهنده فشار موثر پایین نسبت به لایه‌های بالا و پایین خود می‌باشند.



شکل (۴-۳۹): مقطع عرضی (شرقی-غربی) از فشار موثر پیش‌بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری: بخش‌های مخزنی ایلام، سروک، بورگان و فهلیان با فشار موثر کمتر (رنگ آبی تیره‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده‌اند (واحد محورها بر حسب متر است).

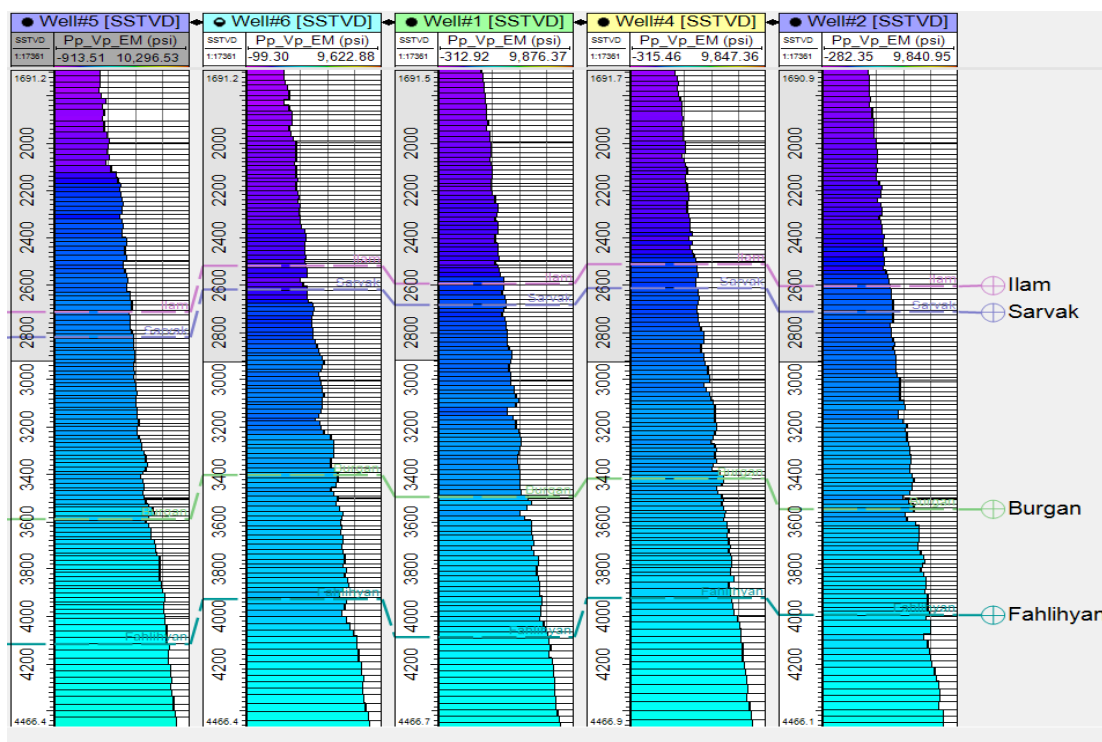


شکل (۴-۴۰): مقطع عرضی فشار منفذی پیش‌بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز نشانگرها در محل چاه ۲: مخازن ایلام، سروک، بخش بورگان و بخش بالایی سازند فهلیان با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده است (واحد محورها بر حسب متر است).



شکل (۴-۴۱): مقطع عرضی فشار منفذی پیش‌بینی شده با سرعت بدست آمده از آنالیز نشانگرها در محل چاه ۴: مخازن ایلام، سروک، بخش بورگان و بخش بالایی سازند فهلیان با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده است (واحد محورها بر حسب متر است).

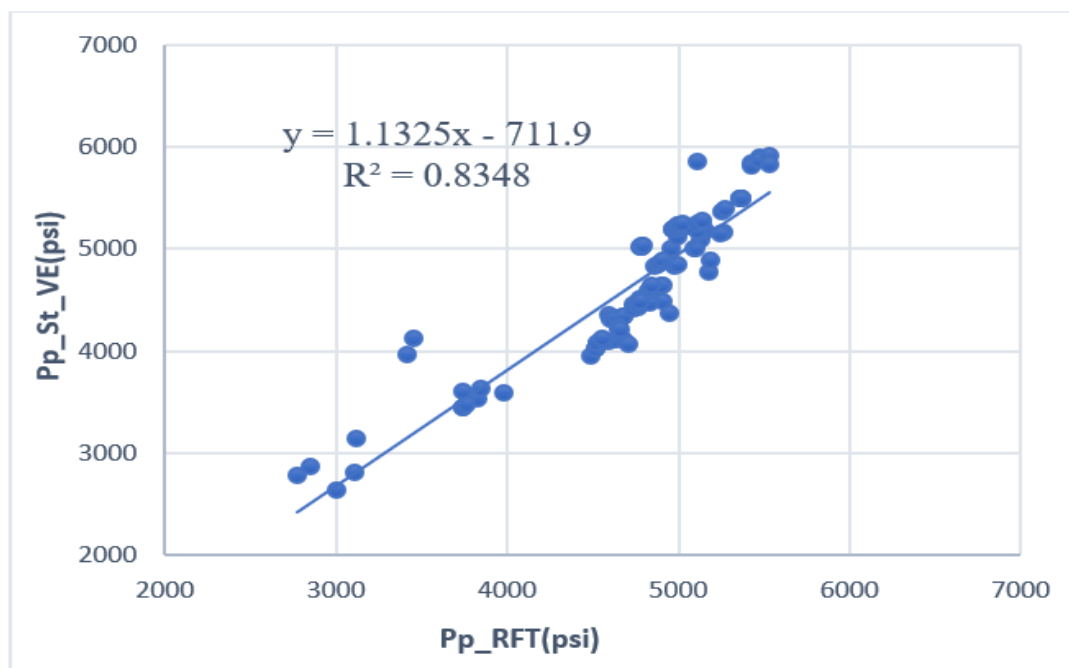
همچنین نگار فشار منفذی در محل چاه‌ها در شکل (۴-۴۲) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۴-۴۲) دیده می‌شود مقدار فشار منفذی کم مخازن ایلام و سروک در نگار چاه ۶ نشان دهنده غیر مخزنی بودن آنها در بخش جنوبی میدان است، که با گزارشات زمین‌شناسی تکمیلی چاه مطابقت دارد.



شکل (۴-۴۲): نگار فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل چاه‌ها (واحد محور قائم برحسب متر است).

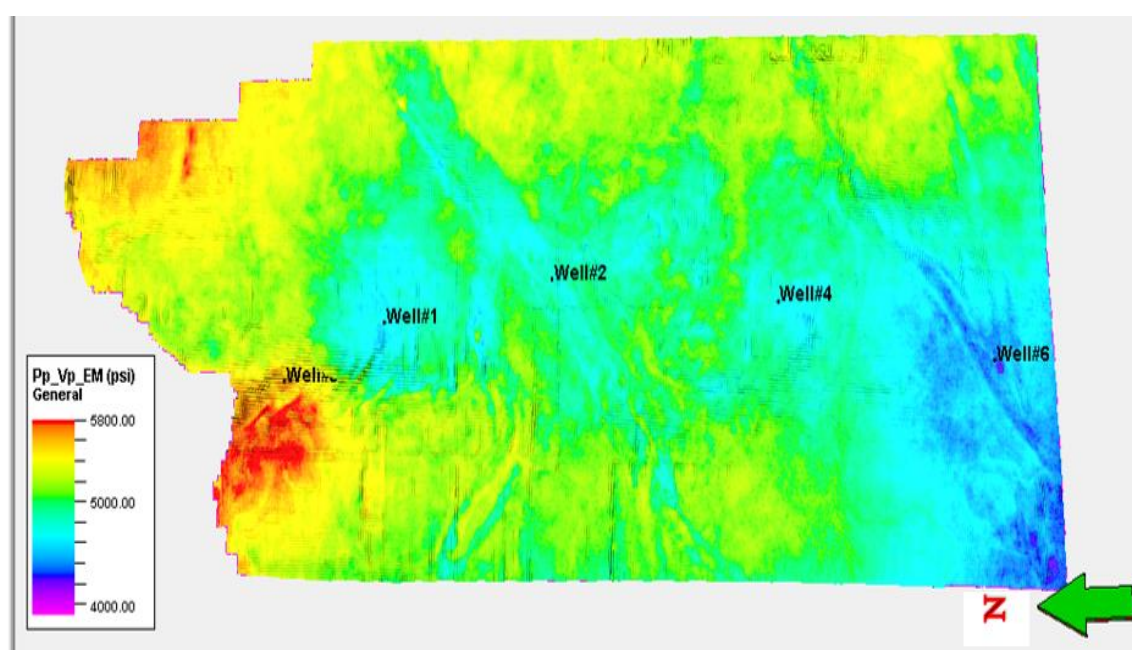
در ادامه ضریب تعیین داده‌های پیش‌بینی شده فشار منفذی با داده‌های RFT موجود در چاه‌ها،

همانطور که در شکل (۴-۴۳) نشان داده شده است، R^2 برابر با ۰/۸۳۴۸ محاسبه شد.



شکل (۴-۴۳): نمودار متقاطع و ضریب تعیین بین فشار منفذی پیش‌بینی شده و داده‌های چاه‌ها

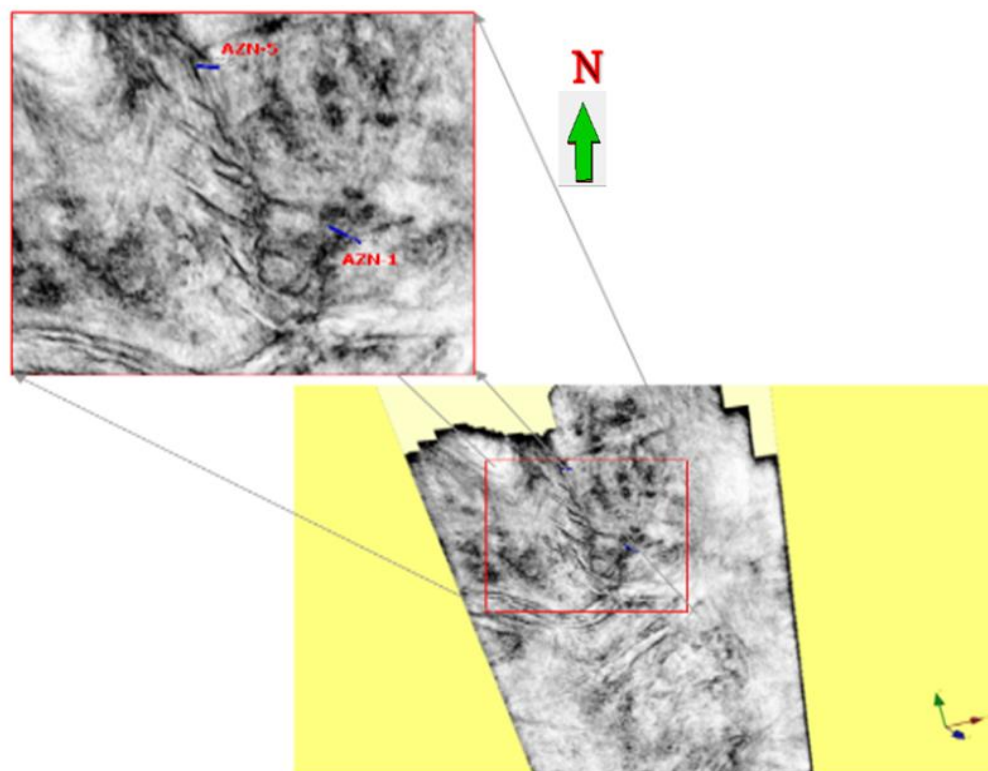
جهت انجام بررسی‌های بیشتر، برش‌های افقی از مخازن سروک، بورگان و فهلیان از این روش مدل پیش‌بینی فشار منفذی تهیه گردید که به ترتیب در شکل‌های (۴-۴۴)، (۴-۴۶) و (۴-۴۷) نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۴-۴۴) نشان داده شده است، تغییرات جانبی در فشار مخزن سروک وجود داشته دارد و در عین حال وجود مقادیر فشار مخزنی کم در داخل کانال‌های مدفون در بخش میانی و جنوب میدان موید قدرت بالای این روش در پیش‌بینی توزیع جانبی فشار منفذی در این مخزن می‌باشد.



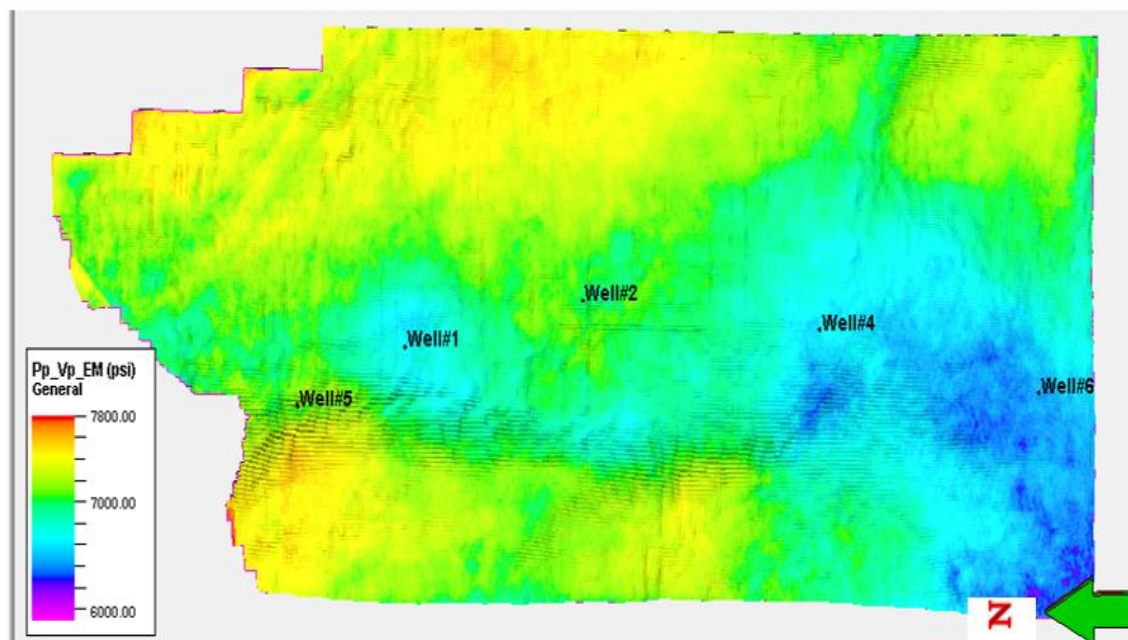
شکل (۴-۴۴): برش افقی فشار منفذی پیش‌بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری در زون مخزنی سروک که نشان دهنده تاثیر کانال‌های زیر سطحی و شکستگی‌ها در توزیع و تغییرات جانبی فشار می‌باشد.

همچنین مقادیر فشار مخزنی پایین در محدوده چاه-۱ که حاوی گسل‌های نرمال و شکستگی بوده و در شکل (۴-۴۵) نیز به کمک نشانگر تشابه تشخیص داده شده‌اند، بیانگر توان بالای این روش در تهیه تغییرات جانبی فشار منفذی و تاثیر شکستگی‌ها در این تغییرات است.

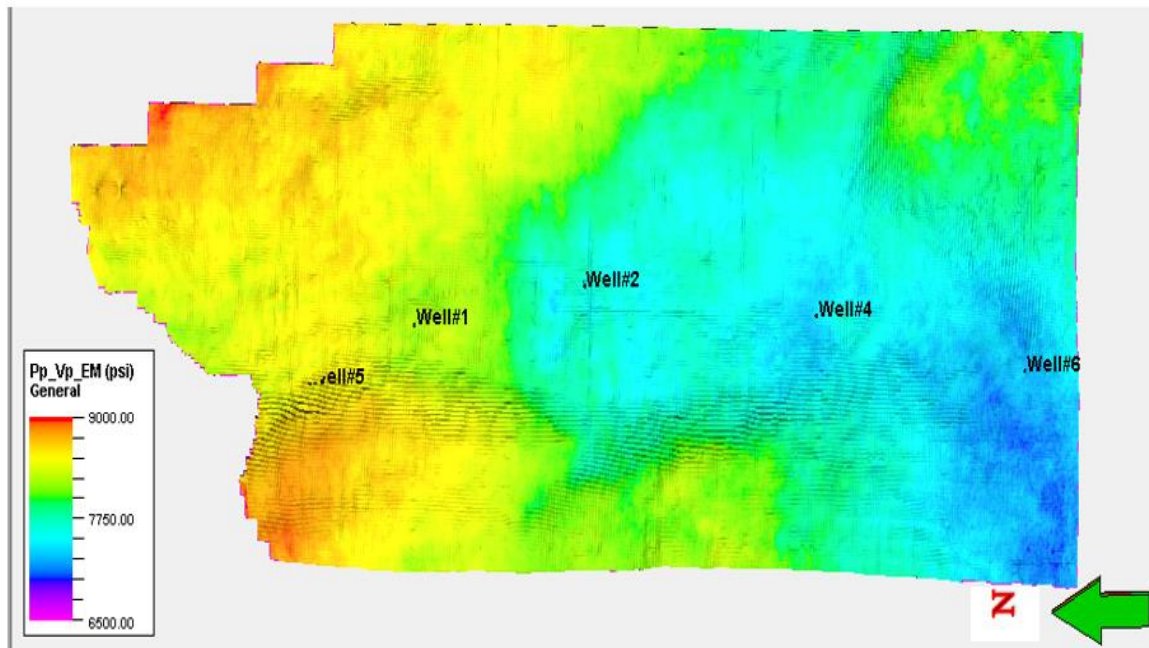
برش افقی فشار منفذی تهیه شده با این روش در زون مخزنی بورگان در شکل (۴-۴۶) نیز نشان دهنده تغییرات جانبی فشار منفذی بوده و توانسته است نقش کانال مدفون در شمال شرقی میدان را تا اندازه‌ای آشکار سازد.



شکل (۴-۴۵): نمایش گسل‌ها در بخش شمالی میدان در برش افقی از نشانگر تشابه لرزه‌ای



شکل (۴-۴۶): برش افقی فشار منفذی پیش‌بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری در زون مخزنی بورگان که نشان دهنده تغییرات جانبی فشار منفذی بوده و توانسته است نقش کانال مدفون در شمال شرقی میدان را تا اندازه‌ای آشکار سازد.

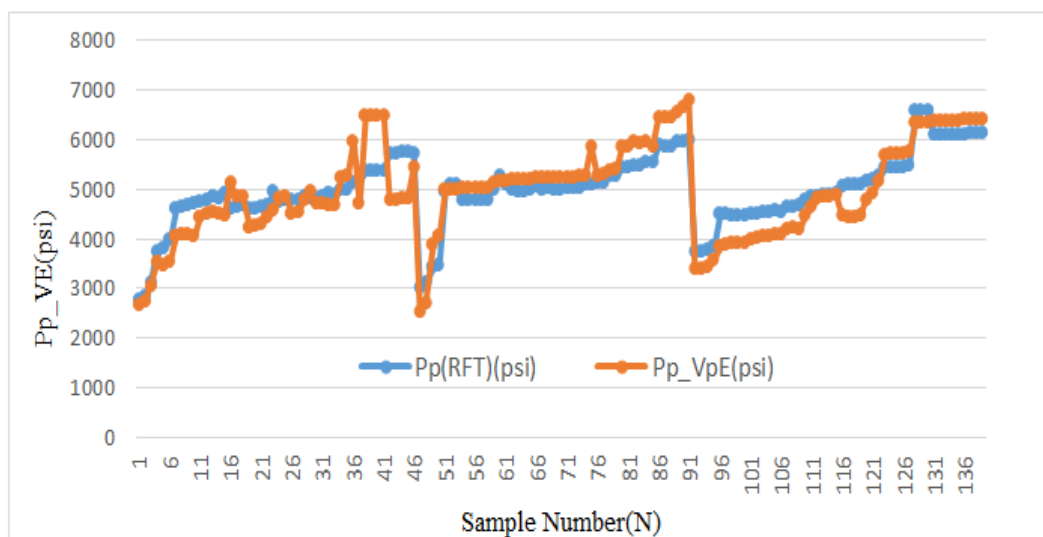


شکل (۴-۴): برش افقی فشار منفذی پیش‌بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری در زون مخزنی فلهیان که نشان‌دهنده تغییرات جانبی و کم شدن فشار مخزن از شمال به جنوب می‌باشد.

برای تعیین عدم قطعیت مدل بدست آمده، ابتدا میزان انطباق بین داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی

شده با داده‌های فشار منفذی حاصل از آزمایش فشار چاه ترسیم شد (شکل ۴-۴۸). همانطور که از

نمودار شکل (۴-۴۸) برمی‌آید انطباق قابل‌قبولی بین داده‌های مذکور دیده می‌شود.



شکل (۴-۴۸): انطباق داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری با داده‌های فشار در چاه‌ها

در نهایت میزان خطای استاندارد (SE_x) بین داده‌های پیش‌بینی شده فشار منفذی با سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری و داده‌های آزمایش فشار چاه‌ها برابر با ۲۹ (psi) تعیین شد. با توجه به خطای کم و همبستگی بالای داده‌های پیش‌بینی شده از سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری با داده‌های واقعی ($R^2 = 0/8348$)، بنظر می‌رسد که پیش‌بینی فشار منفذی در مخازن کربناته با این روش قابل قبول‌تر نسبت به روش قبلی بوده و دارای اعتبار بالایی است.

۹-۴ جمع‌بندی

در این فصل از دو نوع سرعت لرزه‌ای نسبت به تخمین فشار منفذی در مخازن نفتی میدان مورد مطالعه بهره گرفته شد. در روش اول داده‌های سرعت بطور مستقیم از وارون‌سازی لرزه‌ای استخراج شد، این روش قبلاً در تحقیقات پیشین نیز مورد استفاده قرار گرفته بود. خروجی این مدل تاحدی توانست زون‌های مخزنی اصلی (سازند ایلام و بخش بالایی سازند سروک) را از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید ولی قادر به تفکیک زون‌های مخزنی بورگان و فهلیان نبوده است. در کل نتایج حاصل از این مدل در پیش‌بینی فشار منفذی چندان رضایت بخش نبوده است. لذا جهت بهبود نتایج طرح استفاده، از روش سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای که به روش آماری استخراج شده بود، به عنوان روشی جدید برای اولین بار در پیش‌بینی فشار مخزنی مطرح و در یک مخزن کربناته مورد استفاده قرار گرفت. نتایج پیش‌بینی هم در خروجی‌های مقاطع عرضی (شکل‌های ۴-۲۵ و ۴-۲۶ در مقایسه با شکل‌های ۴-۴۰ و ۴-۴۱) و هم نگارهای استخراج شده (شکل‌های ۴-۲۷ و ۴-۴۲) از آنها در محل چاه‌ها نشان داد که عملکرد مدل در تفکیک زون‌های پرفشار خوب بوده و به خوبی توانسته است سازندهای مخزنی (ایلام، سروک، بخش بورگان و سازند فهلیان) را که از فشار منفذی بالاتری نسبت به لایه‌های بالا و پایین خود می‌باشند، پیش‌بینی و مورد تفکیک قرار دهد. همچنین برش افقی از مخزن سروک (شکل‌های ۴-۲۸ و ۴-۴۳) که مخزن اصلی این میدان می‌باشد، موید قدرت بالای روش پیشنهادی جدید در نشان دادن تغییرات جانبی در فشار مخزن بوده و نقش کانال‌های مدفون و

شکستگی‌ها را در تغییرات فشار بصورت بهتری نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل آماری از نتایج این تحقیق، اعم از ضریب تعیین و همینطور خطای استاندارد بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایش چاه نشان داد که ضریب تعیین (R^2) در روش اول برابر $0/7792$ و برای روش دوم عدد $0/8348$ بوده است. همچنین خطای استاندارد (SE_x) برای روش اول برابر با عدد 71 (psi) و برای روش دوم برابر با 29 (psi) بوده است که بوضوح نشان دهنده دقت و صحت بالای پیش‌بینی فشار منفذی با روش سرعت بدست آمده از آنالیز چند نشانگری می‌باشد.

فصل-۵

پیش بینی فشار منفذی با

داده های مقاومت صوتی لرزه ای

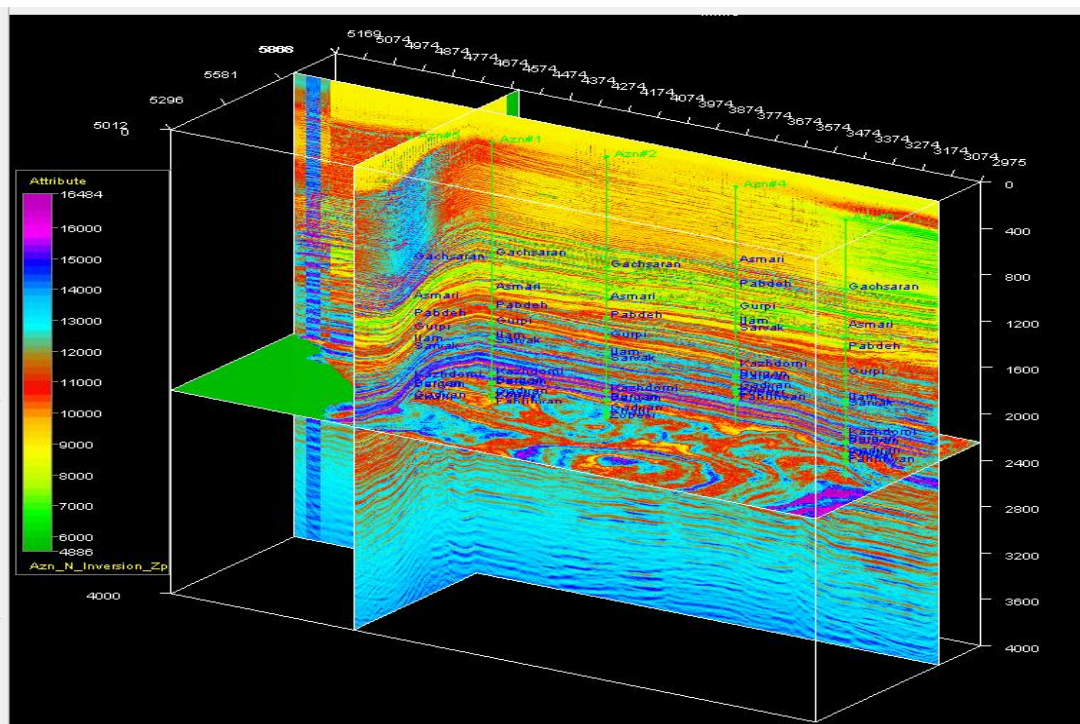
۵-۱ مقدمه

پیش‌بینی فشار منفذی بر پایه روش مقاومت صوتی لرزه‌ای روش جدیدی بوده و در واقع یک فرایند تک مرحله‌ای در پیش‌بینی فشار از داده‌های داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای به حساب می‌آید، بطوریکه در این روش نیازی به برگرداندن داده‌های مقاومت صوتی به داده‌های سرعت و چگالی نمی‌باشد. این روش پیش‌بینی فشار منفذی، به دو صورت قابل انجام بوده و در یک مدل آن که شبیه روش سرعت لرزه‌ای است، از اصول تنش موثر بهره گرفته می‌شود، بنابراین با انجام برآزش بین داده‌های مقاومت صوتی و فشار موثر، ابتدا مکعب فشار موثر مورد تخمین قرار گرفته و سپس با استفاده از رابطه ترزاقی مکعب فشار منفذی مورد استخراج قرار می‌گیرد. در حالی که در مدل دیگر مربوط به این روش، داده‌های فشار منفذی مستقیماً از برآزش با داده‌های مقاومت صوتی بدست آورده می‌شوند. در هر حال آنچه مسلم است در روش مقاومت صوتی با حذف مراحل اضافی در تبدیل داده‌ها و به تبع آن حذف تقریب‌های متوالی، پتانسیل خطای پیش‌بینی کاهش یافته و نتایج روش بهبود قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. با توجه به اینکه روش مقاومت صوتی جدید بوده و برای اولین بار در مخازن کربناته بکار گرفته می‌شود، بنابراین با انجام این مطالعه ضمن اینکه کارایی روش در پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته نشان داده می‌شود، در عین حال بررسی نقاط قوت و ضعف روش و بهره‌گیری از آن در کشور کار جدیدی در پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته است.

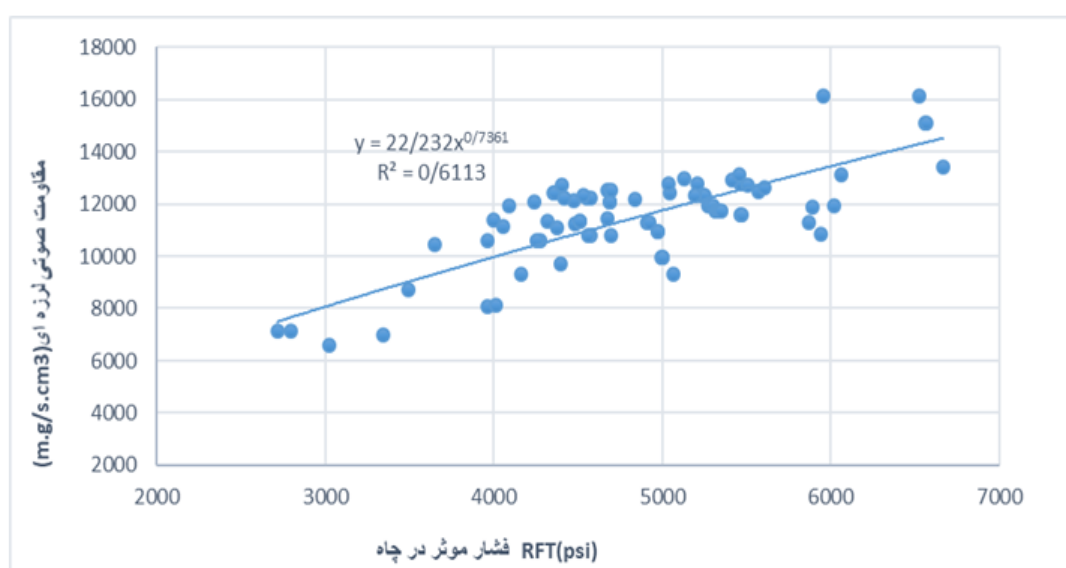
۵-۲ روش پیش‌بینی فشار منفذی بر پایه اصول تنش موثر (روش غیر مستقیم)

در این روش پس از انجام وارون سازی لرزه‌ای، مکعب مقاومت صوتی مورد نیاز در پیش‌بینی فشار موثر، در مازول استراتا از نرم‌افزار همپسون-راسل استخراج گردید که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.

به منظور انجام پیش‌بینی فشار منفذی، ابتدا با تشکیل نمودار متقاطع و با انجام برازش بین داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای و داده‌های فشار موثر بدست آمده در محل چاه‌ها، رابطه بین آنها تعیین و ضرایب اولیه براساس معادله بارگذاری باورز (رابطه ۲-۲۴) بدست آورده شد که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱): برش‌های عرضی و افقی از مکعب مقاومت صوتی لرزه‌ای (واحد محورها بر حسب میلی ثانیه است)



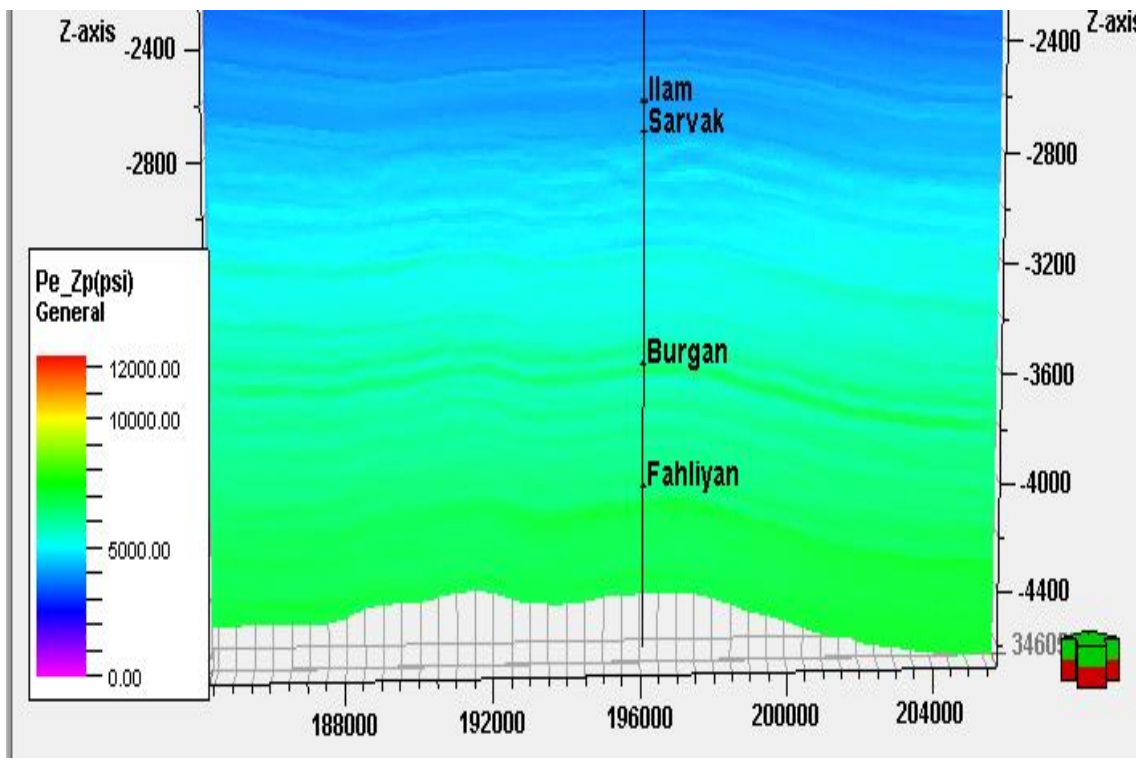
شکل (۵-۲): برازش بین فشار موثر و مقاومت صوتی حاصل از وارون لرزه‌ای

سپس ضرائب کالیبراسیون A و B در معادله باورز (۲-۲۴) پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها با مقادیر $A=135$ و $B=0/65$ نهائی و در رابطه (۵-۱) نمایش داده شده است.

$$I = 3500 + 135(\sigma_e)^{0.65} \quad (1-5)$$

که در آن I_0 مقاومت صوتی لرزه‌ای در سطح زمین بوده و مقدار آن در فرایند کالیبراسیون برابر با $3500 \text{ (g.m/cm}^3\text{s)}$ تعیین شد.

سپس مکعب داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از ضرائب کالیبره شده در فوق به داده‌های فشار موثر برگردانده شد که در شکل (۵-۳) مقطع عرضی (شرقی-غربی) آن در محل چاه-۲ نشان داده شده است.



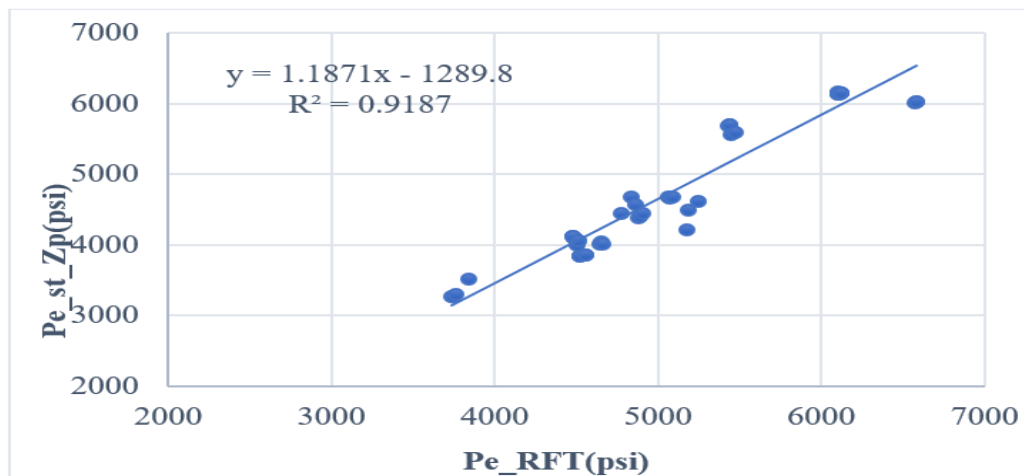
شکل (۵-۳): مقطع عرضی از فشار موثر حاصل از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۲: بخش مخزنی با فشار موثر کم از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است).

در ادامه دقت داده‌های پیش‌بینی شده در محل چاه-۶ مورد آزمون قرار گرفت و نشان داده شد که

ضریب تعیین آن با داده‌های چاه بالا و R^2 برابر با $0/9187$ می‌باشد (شکل ۵-۴). لازم به ذکر است که

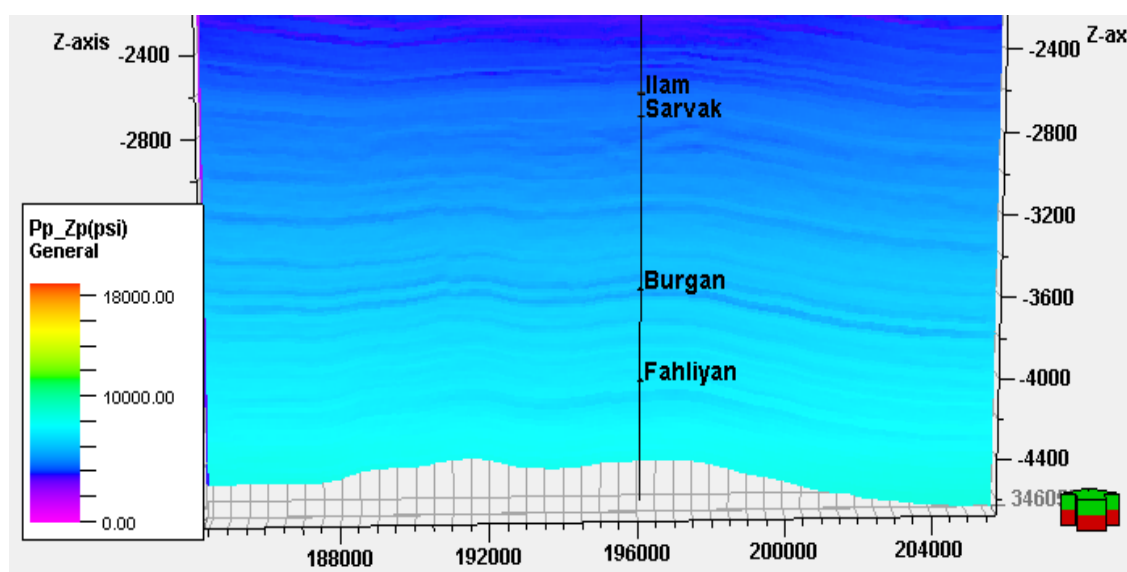
اطلاعات چاه-۶ جهت بدست آوردن ضرائب کالیبراسیون و رابطه (۵-۱) بکار گرفته نشده نبود. حال با

بهره‌گیری مجدد از رابطه ترزاقی (۲-۸) و با استفاده از مکعب فشارهای روباره و فشار موثر برآورد شده، مکعب فشار منفذی مورد استخراج قرار گرفت.

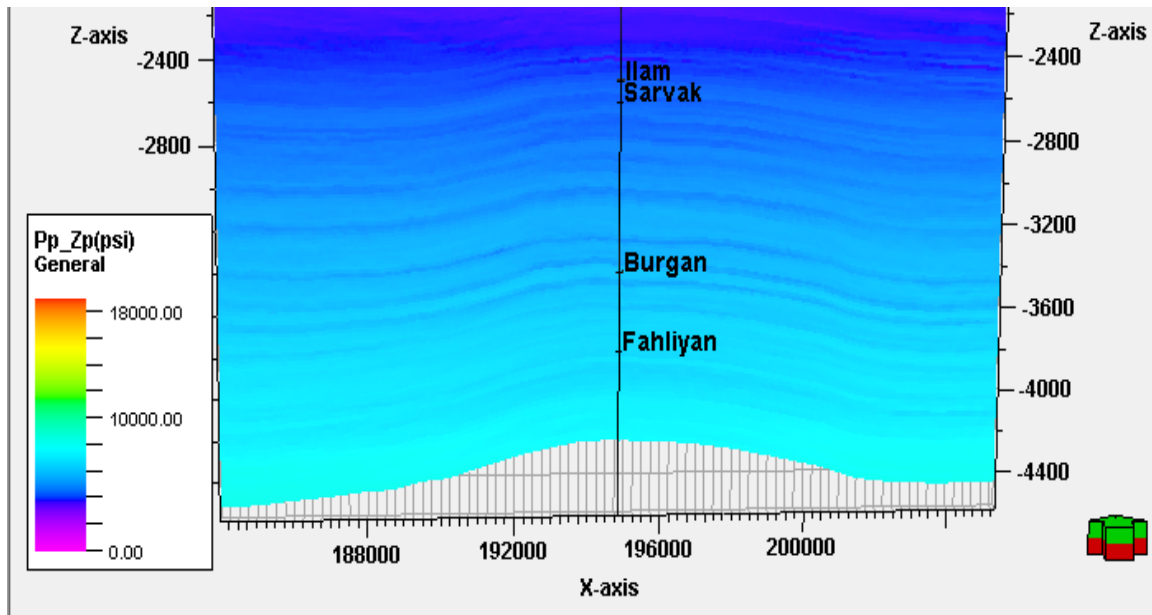


شکل (۴-۵): برازش بین داده‌های فشار موثر تخمین شده از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی با داده‌های واقعی در چاه-۶

همانطور که در مقطع عرضی (شرقی-غربی) نمایش داده شده از مکعب فشار منفذی (شکل‌های (۵-۵) و (۵-۶)) دیده می‌شود، همه بخش‌های مخزنی (سازندهای ایلام، سروک، فهلیان و بخش بورگان) بوضوح با فشار منفذی بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود قابل تفکیک می‌باشند که نشان دهنده توانایی بالای این روش در پیش‌بینی فشار مخزنی در مخازن کربناته مورد مطالعه است.

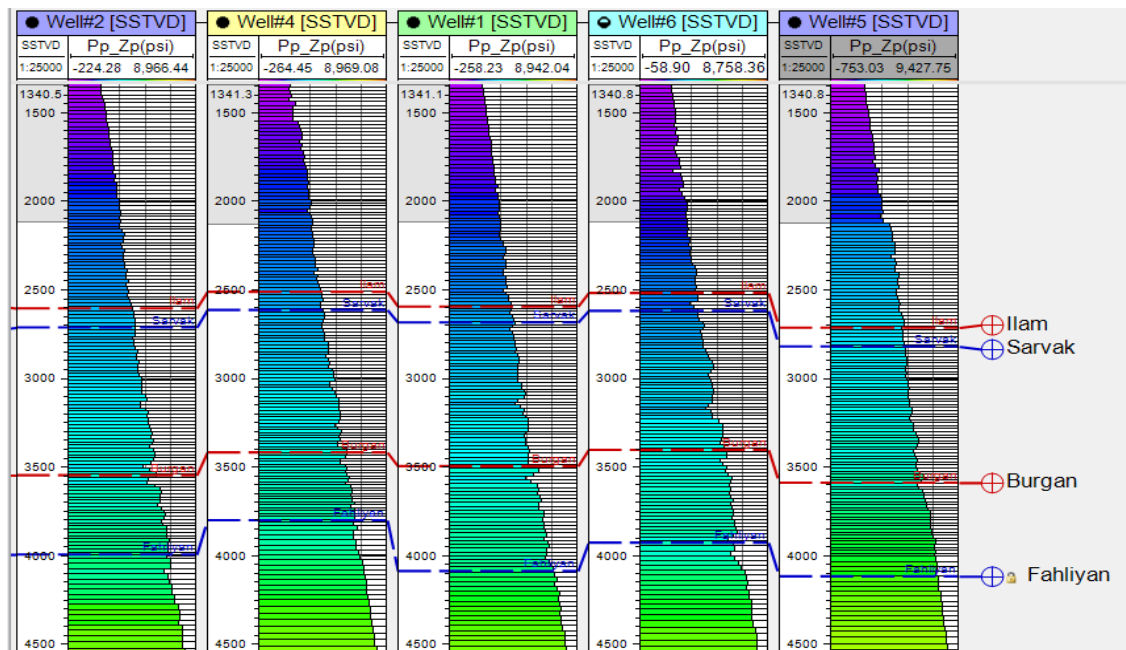


شکل (۵-۵): مقطع عرضی فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۲: بخش مخزنی با فشار منفذی بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است).



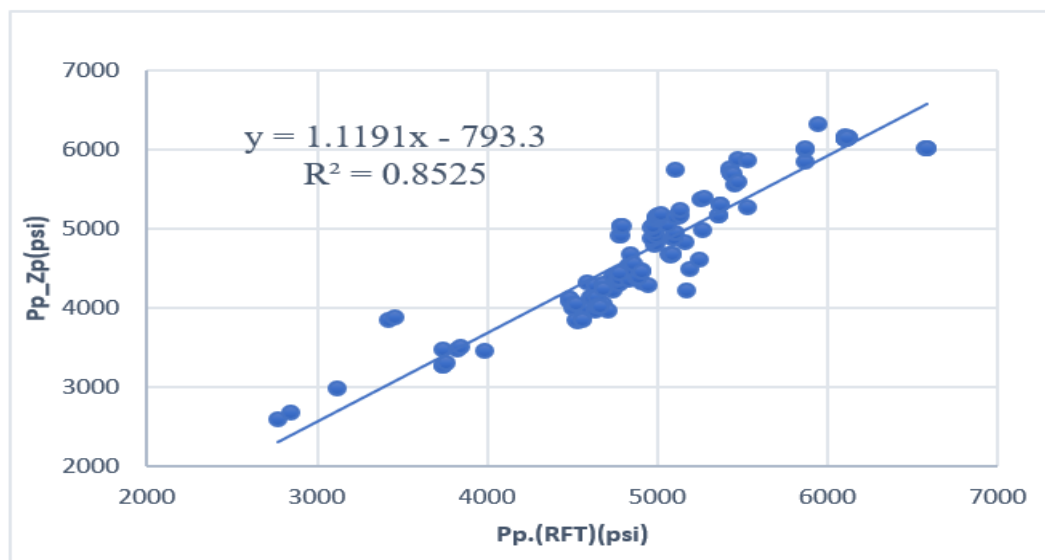
شکل (۵-۶): مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون لرزه‌ای در محل چاه ۴: بخش مخزنی با فشار منفذی بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است).

نگار فشار منفذی نیز در محل چاه‌ها استخراج شد که در شکل (۵-۷) نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مقدار فشار منفذی کم مخازن ایلام و سروک در نگار چاه ۶ نشان دهنده غیر مخزنی بودن آنها در بخش جنوبی میدان است، که با گزارشات زمین‌شناسی تکمیلی چاه مطابقت دارد.



شکل (۵-۷): نگار فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل چاه‌ها با روش غیر مستقیم مقاومت صوتی (واحد محور قائم به متر است)

در نهایت برای تعیین عدم قطعیت مدل پیش‌بینی کننده فشار منفذی، بین داده‌های اندازه‌گیری شده فشار (RFT) چاه‌ها و داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده این روش برازش انجام شد که ضریب تعیین (R^2) بالایی برابر با ۰/۸۵۲۵ بدست آمد (شکل ۵-۸).

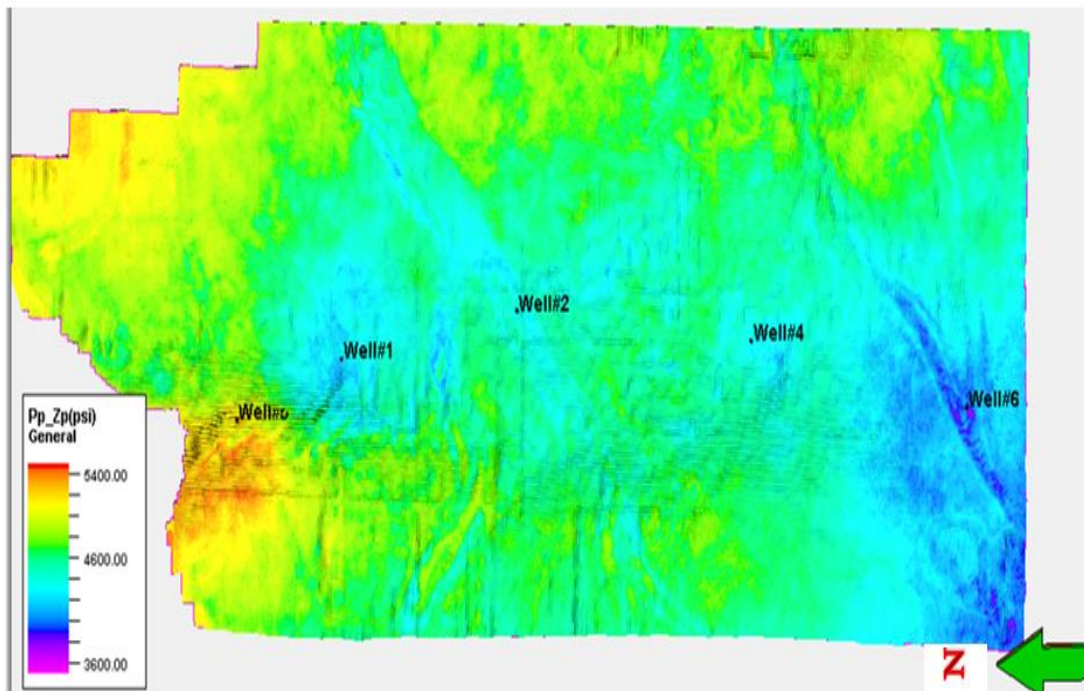


شکل ۵-۸: نمودار ضریب تعیین بین داده‌های پیش‌بینی فشار منفذی و آزمایش فشار چاه‌ها

در ادامه میزان خطای استاندارد فشار منفذی پیش‌بینی شده برای این روش محاسبه گردید که مقدار آن بر اساس رابطه (۲-۴) برابر با ۲۸(psi) تعیین شد که بیانگر دقت بالا و قابل قبول بودن نتایج این مدل پیش‌بینی می‌باشد.

مکعب فشار منفذی حاصل نشان دهنده تغییرات افقی در فشار سازند سروک بوده است. به منظور بررسی‌های بیشتر، برش‌های افقی از خروجی مکعب فشار منفذی در زون مخزنی سروک تهیه گردید که در شکل (۵-۹) نشان داده شده است. بررسی برش‌های افقی نشان می‌دهد که تغییرات افقی فشار منفذی در مخزن سروک متاثر از دو پدیده زمین‌شناسی کانال‌های زیرزمینی و شکستگی‌های گسلی است. بطوریکه فشار منفذی در نواحی تحت تاثیر آنها دارای مقادیر کمتری می‌باشد و این احتمالاً به دلیل تغییرات مرتبط با تخلخل و نفوذپذیری در اثر پدیده‌های مذکور است. همانطور که در شکل فوق‌الذکر دیده می‌شود، کانال‌ها با اشکال خاصی در جنوب و بخش میانی میدان در نشانگر تشابه لرزه‌ای (شکل ۴-۲۹) و گسل‌ها نیز بصورت شکستگی‌های نرمال در نشانگر تشابه لرزه‌ای (شکل ۴-۴۴) در

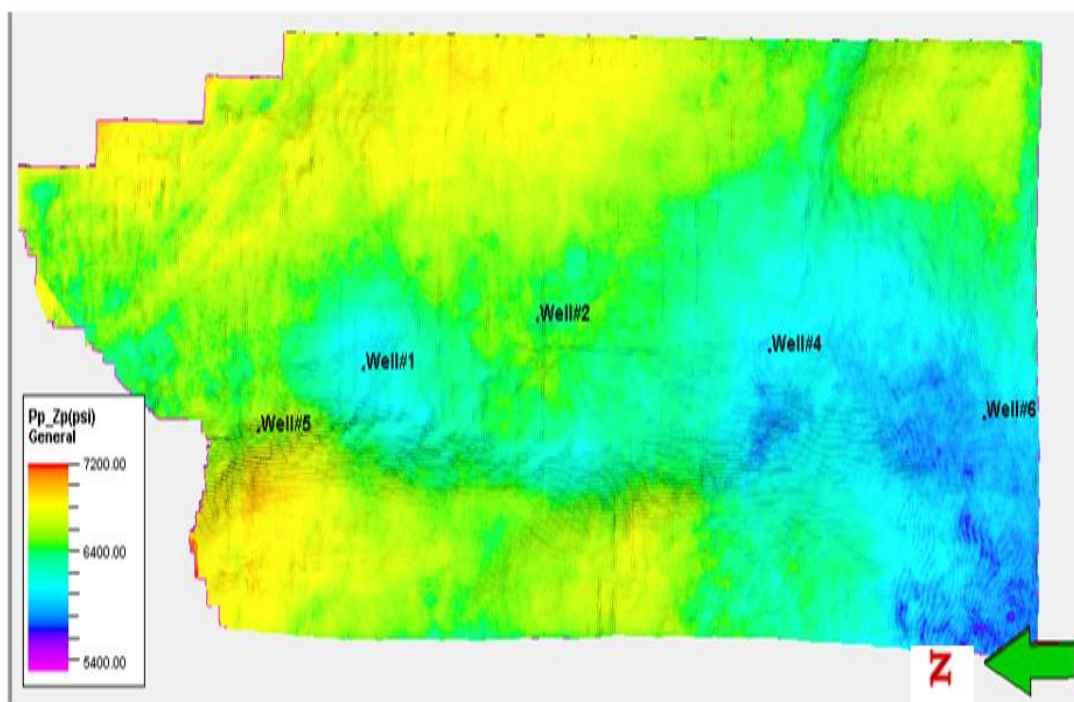
نواحی شمالی میدان قابل تشخیص است.



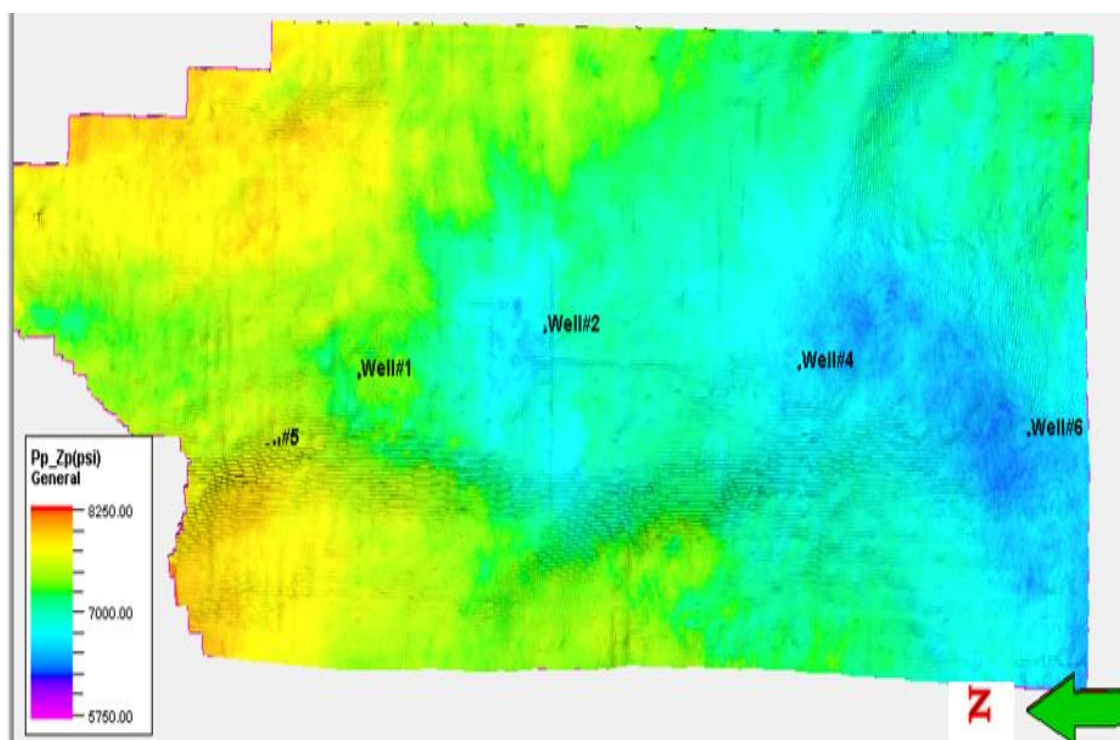
شکل (۵-۹): برش افقی فشار منفذی مدل شده با روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در مخزن کربناته سروک که نشان دهنده تاثیر کانال‌های زیر سطحی و شکستگی‌ها در توزیع و تغییرات جانبی فشار می‌باشد.

در ادامه برش افقی از مخزن ماسه سنگی بورگان تهیه گردید که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است. همانطور که در برش افقی مذکور دیده می‌شود فشار مخزن بورگان نیز بصورت جانبی تغییراتی نشان می‌دهد که در بخش جنوبی میدان دارای فشار کمتری می‌باشد که بیشتر بخاطر عمق کم و توپوگرافی بالای بخش جنوبی میدان می‌باشد و در بخش شمال شرقی میدان نیز یک کانال آبی مدفون قابل مشاهده است.

همچنین برش افقی از مخزن کربناته فهلیان نیز تهیه گردید که در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است. همانطور که در برش افقی مذکور دیده می‌شود، فشار مخزنی، بصورت جانبی از بخش شمالی به طرف جنوب میدان کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۵-۱۰): برش افقی فشار منفذی مدل شده با روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در زون مخزنی ماسه سنگی بورگان که نشان دهنده تغییرات و کاهش افقی فشار از شمال به جنوب می‌باشد.



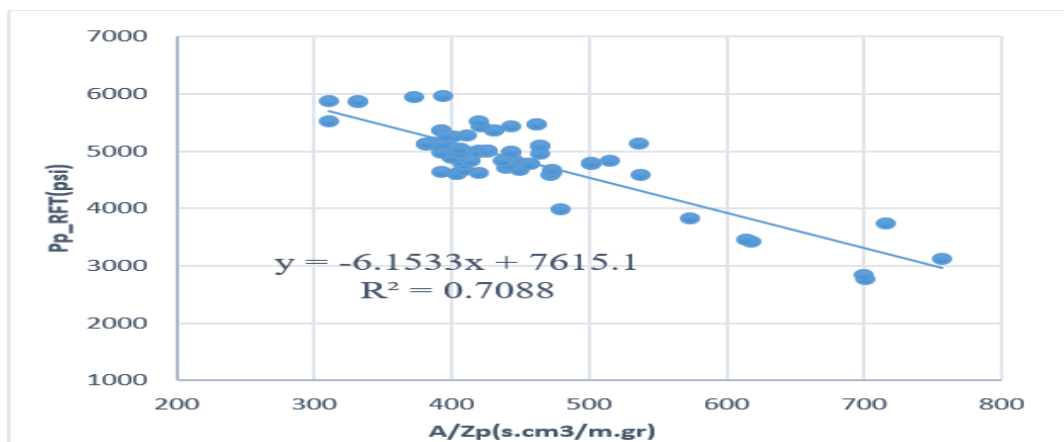
شکل (۵-۱۱): برش افقی فشار منفذی مدل شده با روش غیر مستقیم مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای در زون کربناته فهلیان که نشان دهنده جهت تغییرات فشار و کاهش آن از شمال به جنوب می‌باشد.

۳-۵ کاربرد مستقیم داده‌های مقاومت صوتی در پیش‌بینی فشار منفذی

با عنایت به انجام وارون سازی لرزه‌ای در مراحل قبلی تحقیق، برای انجام این روش ابتدا نمودار مقاومت صوتی لرزه‌ای در محل چاه‌ها استخراج شد و سپس با تشکیل نمودار متقاطع بین معکوس داده‌های مقاومت صوتی ($1/Z_p$) با داده‌های فشار منفذی حاصل از آزمایش فشار (RFT) در محل چاه، رابطه بین آنها براساس یک برازش خطی مطابق رابطه زیر تعیین و ضرایب اولیه بدست آورده شد که در شکل (۱۲-۵) نشان داده شده است.

$$P_p = A + \frac{B}{I_p} \quad (۲-۵)$$

که در آن P_p فشار منفذی، I_p مقاومت صوتی، A و B ضرایب رابطه می‌باشند.



شکل ۱۲-۵: برازش بین فشار منفذی چاه‌ها و معکوس مقاومت صوتی لرزه‌ای

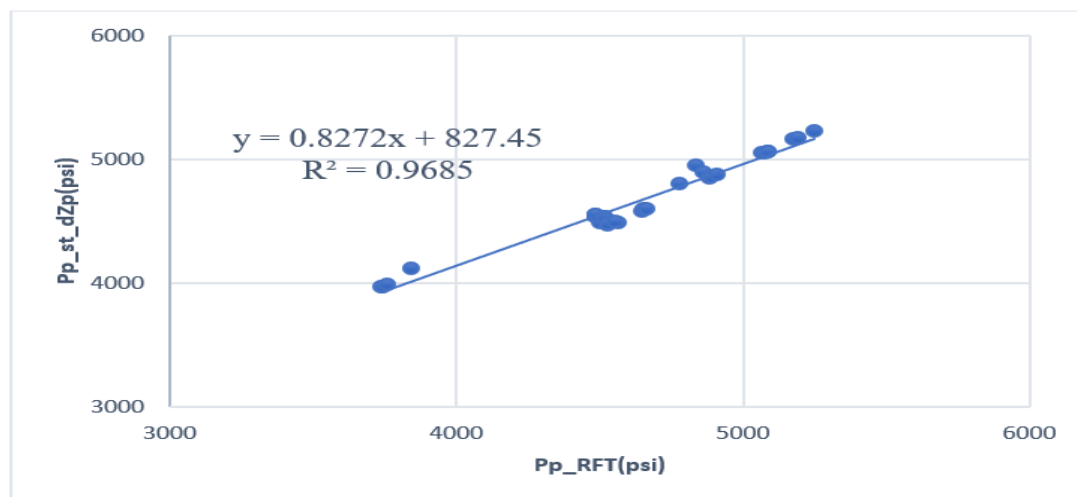
در ادامه ضرایب کالیبراسیون A و B پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها با مقادیر $A=7500$

و $B=500000$ نهایی شدند و در رابطه (۳-۵) نمایش داده شده است.

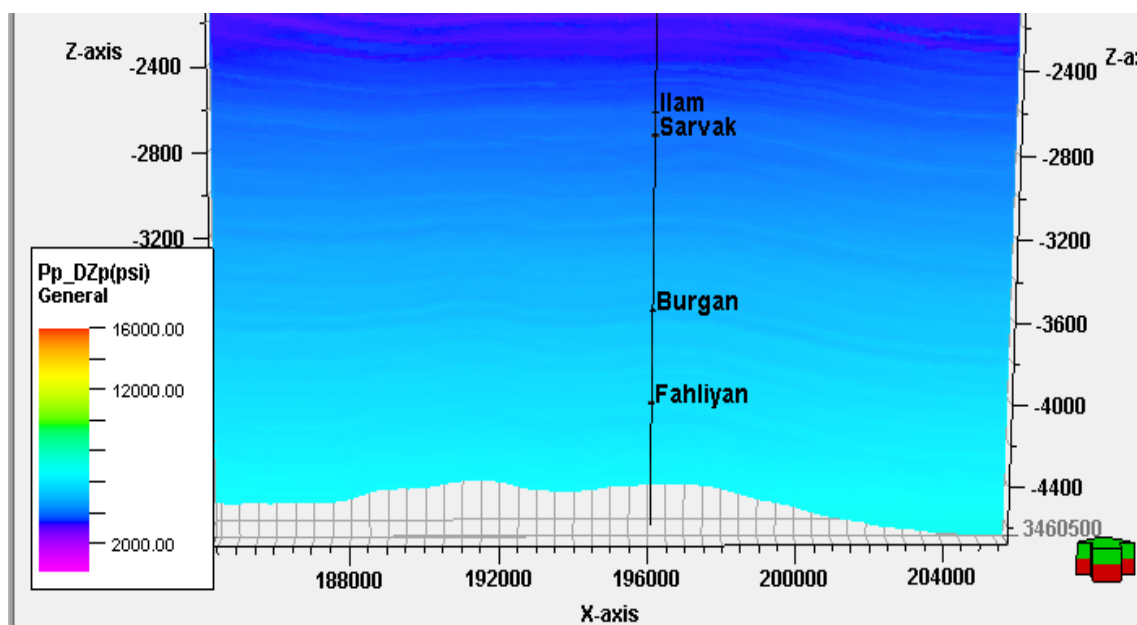
$$P_p = 7500 + \frac{500000}{I_p} \quad (۳-۵)$$

در ادامه دقت داده‌های پیش‌بینی شده در محل چاه آزمون (چاه-۶) مورد بررسی قرار گرفت و نشان

داده شد که ضریب تعیین آن با داده‌های چاه R^2 برابر با 0.9685 می‌باشد (شکل ۱۳-۵).

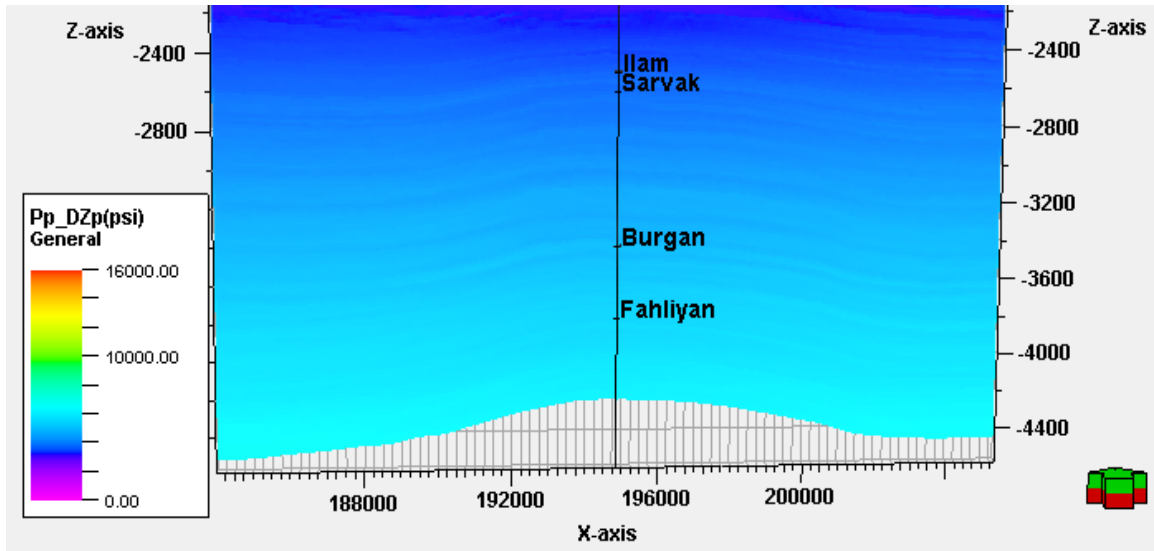


شکل (۵-۱۳): برازش بین داده‌های فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی با داده‌های واقعی در چاه ۶ داده‌های مقاومت صوتی با استفاده از ضرائب کالیبره شده در فوق به مکعب فشار منفذی برگردانده شد که مقاطع عرضی (شرقی-غربی) آن در شکل‌های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) به ترتیب در محل چاه‌های ۲- و ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که در مقطع عرضی فوق قابل تشخیص است، روش مستقیم برآورد فشار منفذی از داده‌های مقاومت صوتی نیز توانسته است مخازن ایلام، سروک، بورگان و فهلیان را با فشار مخزنی بالاتر و با رنگ روشن‌تر از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید.



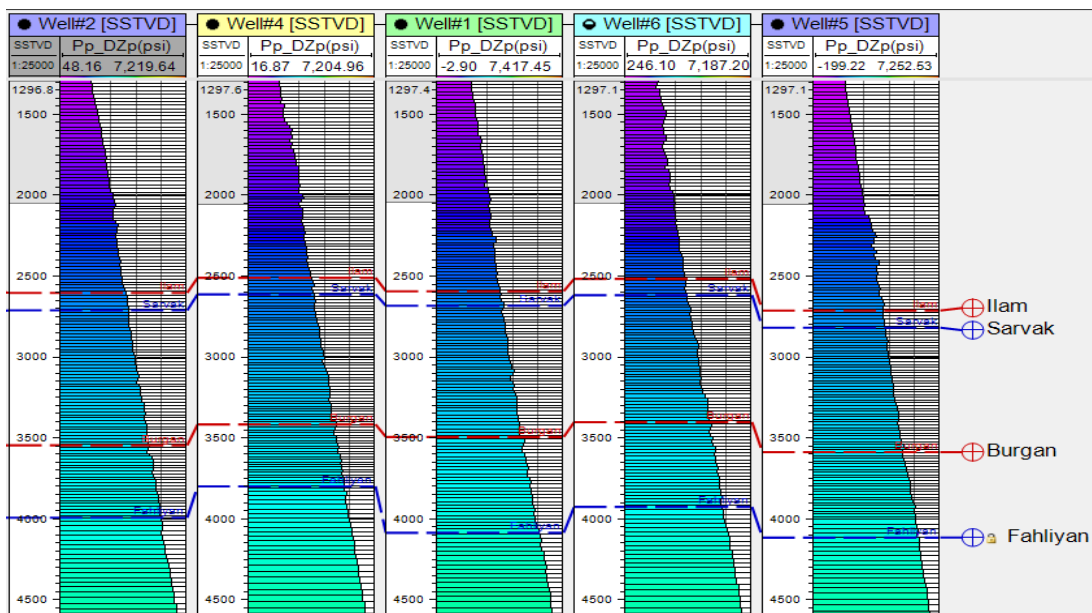
شکل (۵-۱۴): مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۲: بخش‌های مخزنی با فشار بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشند (واحد محورها بر حسب متر است).

مقایسه مقاطع عرضی شکل‌های (۵-۵) و (۵-۶) با شکل‌های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) نشان می‌دهد که روش مدل‌سازی با فشار موثر به کمک داده‌های مقاومت صوتی عملکرد بهتری در تفکیک لایه‌های مخزنی دارد.



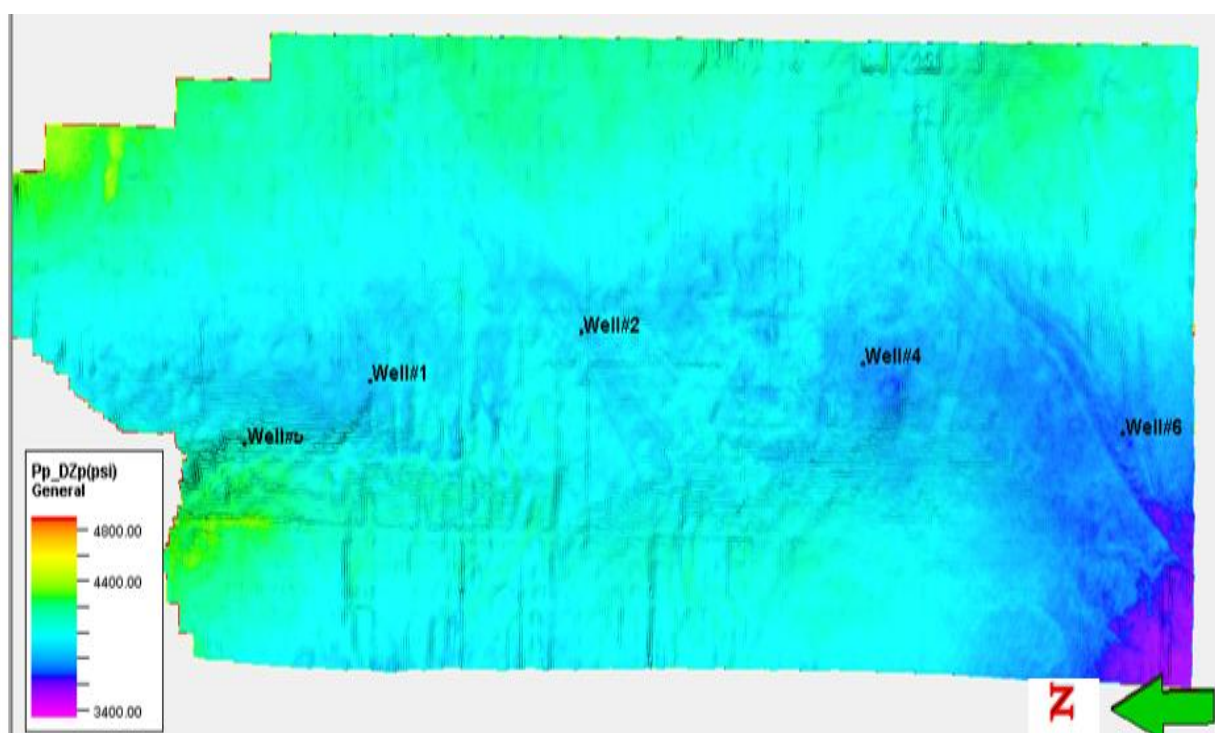
شکل (۵-۱۵): مقطع عرضی از فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی در محل چاه ۴: بخش‌های مخزنی تا حدودی با فشار بیشتر از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص می‌باشد (واحد محورها بر حسب متر است).

همچنین نگار فشار منفذی در محل چاه‌ها در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده‌اند.

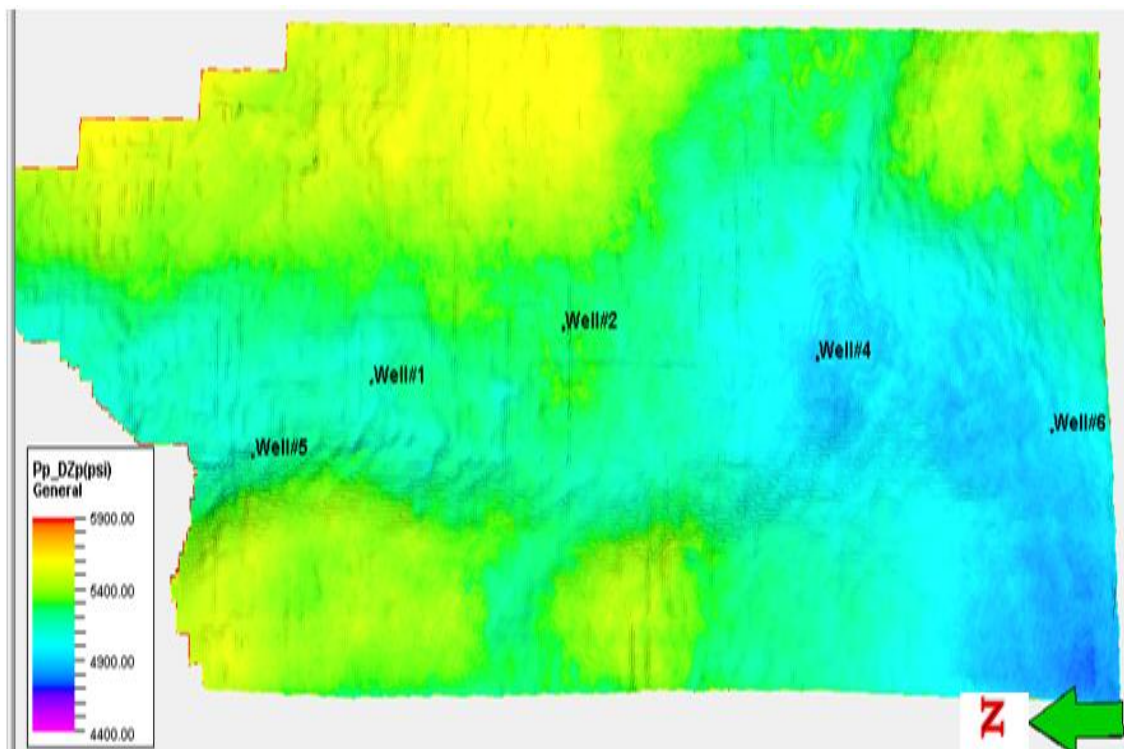


شکل (۵-۱۶): نگار فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل چاه‌ها با روش مستقیم مقاومت صوتی (واحد محور قائم بر حسب متر است).

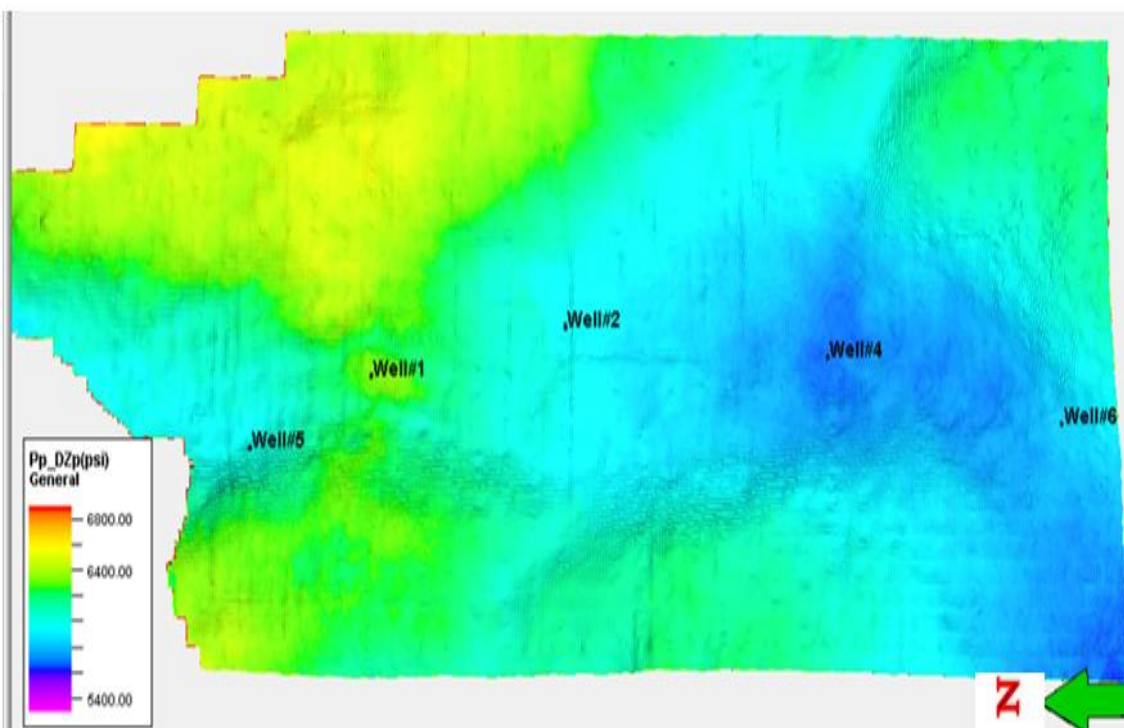
همانطور که در این شکل دیده می‌شود، قدرت تفکیک لایه‌های مخزنی در این روش کمتر از روش غیر مستقیم بوده و نیز مقدار فشار منفذی کم مخازن ایلام و سروک در نگار چاه ۶ نشان دهنده غیر مخزنی بودن آنها در بخش جنوبی میدان است، که با گزارشات زمین‌شناسی تکمیلی چاه مطابقت دارد. در ادامه به منظور بررسی‌های بیشتر نسبت به تغییرات افقی فشار منفذی، برش‌های افقی از خروجی مکعب فشار منفذی در زون‌های مخزنی مذکور تهیه گردید که به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۷) تا (۵-۱۹) نشان داده شده‌اند. بررسی برش افقی از مخزن سروک (شکل ۵-۱۷) نشان دهنده تاثیر کانال‌های زیرزمینی و شکستگی‌ها در تغییرات جانبی فشار منفذی می‌باشد. بطوریکه فشار منفذی در نواحی تحت تاثیر آنها دارای مقادیر کمتری بوده است، همانطور که قبلاً گفته شد، کاهش فشار منفذی در این مناطق احتمالاً به دلیل تغییرات مرتبط با تخلخل و نفوذپذیری در اثر پدیده‌های مذکور است.



شکل (۵-۱۷): برش افقی فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی در زون مخزنی کربناته سروک که اثر کانال‌های زیر سطحی در تغییرات فشار قابل مشاهده است.



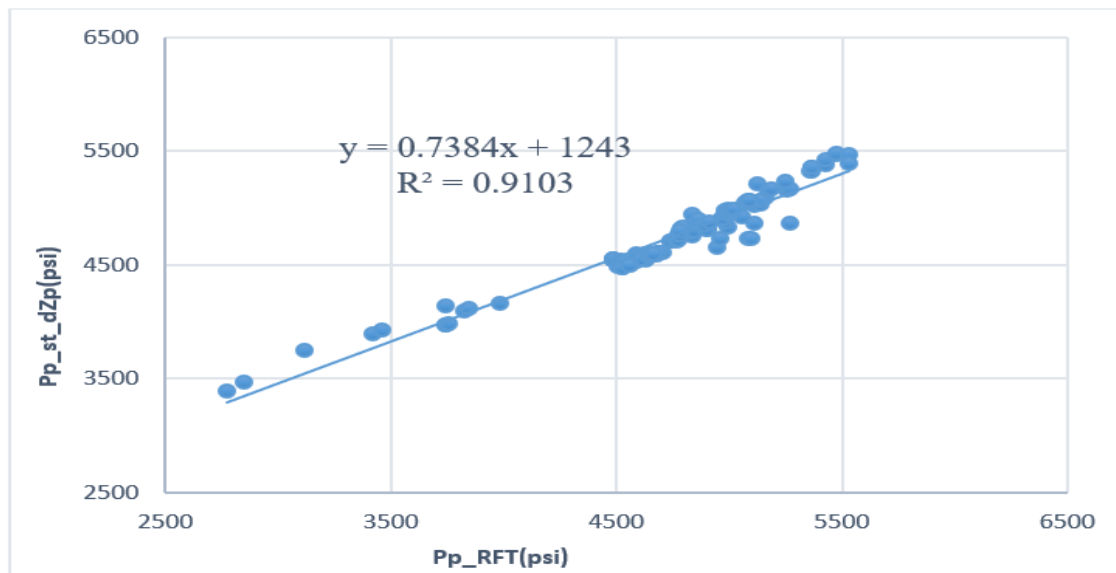
شکل (۵-۱۸): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی و تغییرات جانبی آن در زون مخزنی ماسه سنگی بورگان



شکل (۵-۱۹): برش افقی از فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی و تغییرات جانبی آن در زون مخزنی کربناته فهلپان

برای تعیین عدم قطعیت این مدل پیش‌بینی، ابتدا نمودار متقاطع (شکل ۵-۲۰) بین داده‌های

آزمایش فشار چاه‌ها (RFT) و داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده تشکیل شد و برازش بین داده‌ها انجام شد و سپس همبستگی بین آنها (R^2) برابر با ۰/۹۱۰۳ بدست آمد.



شکل ۵-۲۰: نمودار ضریب تعیین بین داده‌های پیش‌بینی فشار منفذی حاصل از روش مستقیم مقاومت صوتی و آزمایش فشار چاه‌ها

در نهایت میزان خطای استاندارد فشار منفذی پیش‌بینی شده برای روش محاسبه گردید که مقدار آن بر اساس رابطه (۳-۴) برابر با ۵۰ (psi) تعیین شد که بیانگر دقت نسبتاً خوب و قابل قبول برای نتایج این مدل پیش‌بینی می‌باشد.

۴-۵ جمع بندی

در این فصل ل، پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای به دو روش مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. در روش اول، با تشکیل نمودار متقاطع بین داده‌های مقاومت صوتی و داده‌های فشار موثر در محل چاه‌ها برازش انجام شد و در روش دوم این برازش بطور مستقیم با استفاده از داده‌های فشار منفذی حاصل از چاه‌ها (RFT) بکار گرفته شد. روابط اولیه بدست آمده پس از تصحیح و کالیبراسیون در محل چاه‌ها، نهایی شد و مدل‌های بدست آمده برای برگردان داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای به مکعب فشار موثر و فشار منفذی مورد بهره‌برداری قرار گرفتند.

نتایج این بخش از مطالعه نشان داد که مدل‌های پیش‌بینی کننده فشار منفذی به خوبی توانسته‌اند،

زون‌های مخزنی مربوط به سازندهای ایلام، سروک، بورگان و فهلیان را از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نمایند. با توجه به اینکه مخازن این میدان از نوع مخازن با فشار غیر نرمال نبوده‌اند، بنابراین اختلاف فشار آنها با لایه‌های بالا و پایین خود زیاد نمی‌باشند، لذا شناسایی و تفکیک مخازن میدان، نشان دهنده کارایی خوب این روش‌ها نیز بوده است.

تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه نتایج مدل‌ها نشان داد که ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده فشار منفذی در روش برازش غیر مستقیم و روش برازش مستقیم به ترتیب برابر با $0/8525$ و $0/9103$ بوده است. روش برازش غیر مستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای، علی‌رغم ضریب تعیین کمتر، از دقت بالاتری در تفکیک لایه‌های مخزنی از لایه‌های بالا و خود، دارا است. همچنین خطای استاندارد برای این روش پایین‌تر بوده و برابر با عدد 28 (psi) می‌باشد در حالی که مقدار آن برای روش برازش مستقیم برابر با 50 (psi) بوده است. بررسی فشار منفذی مدل شده در برش افقی از مخزن کربناته سروک که مخزن اصلی این میدان می‌باشد، موید قدرت بالاتر روش فشار موثر در نشان دادن تغییرات جانبی در فشار مخزن بوده و نقش کانال‌های مدفون و شکستگی‌ها را در تغییرات فشار بصورت بهتری نشان می‌دهد.

در کل می‌توان گفت که بهره‌گیری از روش‌های مقاومت صوتی در مدل‌سازی و پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته که برای اولین بار انجام گرفته است، با توجه به نتایج بدست آمده از عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌ها در شناسایی و تفکیک افق‌های مخزنی برخوردار است که این موضوع خود مزیت این مطالعه را نشان می‌دهد.

فصل ۶:

پیش‌بینی فشار منفذی با روش میرایی فرکانس

لرزه‌ای

۶-۱ مقدمه

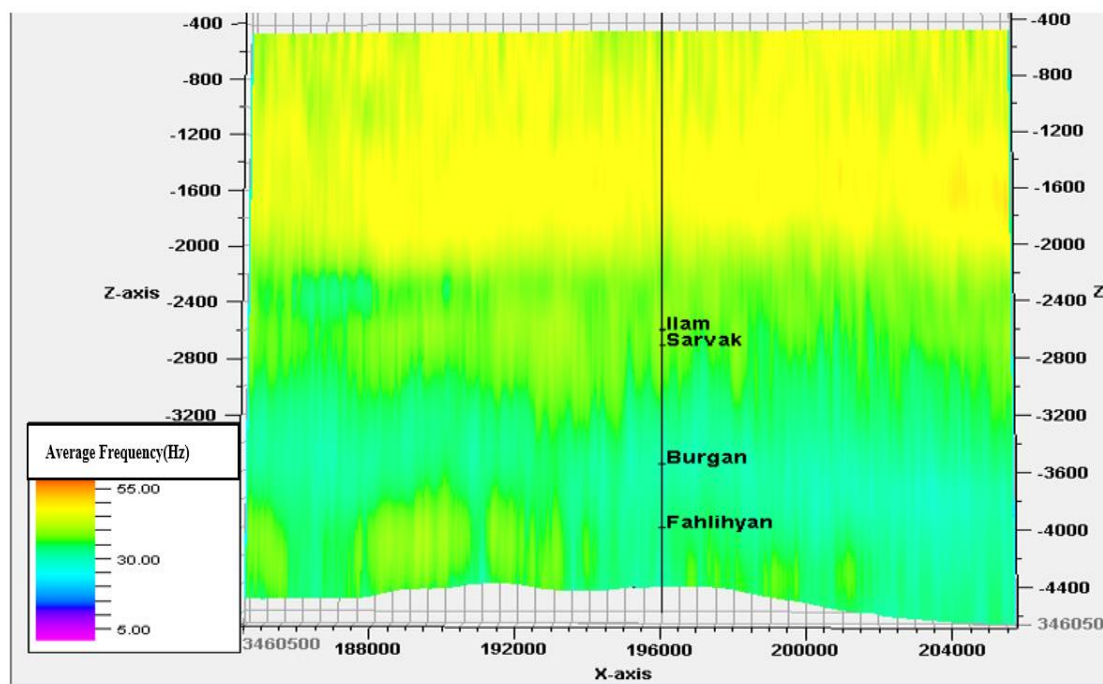
عبارت فاکتور کیفیت (Q) برای توصیف میزان تضعیف انرژی امواج لرزه‌ای در حین انتشار آن بکار برده می‌شود. فاکتور کیفیت بالا مربوط به سنگ‌هایی است که امواج لرزه‌ای را بهتر عبور داده و برعکس فاکتور کیفیت پایین مربوط به سنگ‌هایی است که امواج لرزه‌ای را بطور ضعیف عبور می‌دهند. با عنایت به اینکه در لایه‌های زمین افزایش فشار منفذی عملکردی برخلاف تراکم پذیری سنگ داشته و موجبات کاهش فاکتور کیفیت را فراهم می‌کند، می‌توان از آن بعنوان ابزاری برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده کرد. همچنین در داده‌های لرزه‌ای دیده می‌شود که دامنه و محتوای فرکانسی امواج در حین عبور از لایه‌های زمین، با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که اندازه‌گیری فرکانس میانگین در داده‌های لرزه‌ای راحت‌تر می‌باشد، بنابراین ابتدا فرکانس میانگین که در واقع پوش دامنه میانگین فرکانس در هر لحظه می‌باشد با استفاده از نرم‌افزار همپسون-راسل استخراج شد. سپس با رسم نمودار فرکانس میانگین لرزه‌ای (f_a) نسبت به عمق، فرکانس میانگین نرمال (f_n) با استفاده از روند میرایی فرکانس (خط برازش شده بر فرکانس میانگین) در بخش کم عمق داده‌ها بدست آورده شد. بنابراین هر گونه تغییر از مقدار روند نرمال در فرکانس میانگین، می‌تواند بعنوان تغییر در فشار منفذی لایه‌های زمین قلمداد شده و در پیش‌بینی آن بکار گرفته شود.

مدلی که برای این روش در کارهای قبلی (Mannon & Young, 2017) و برای مخازن ماسه‌سنگی استفاده شده است، همانند مدل ایتون بوده و در آن با استفاده از برازش بین نسبت فرکانس لرزه‌ای میانگین به فرکانس میانگین نرمال (f_a/f_n) با تنش موثر، رابطه لازم برای تبدیل نسبت فرکانسی (f_a/f_n) به تنش موثر بدست آورده می‌شود. در این تحقیق نیز ابتدا این مدل برای پیش‌بینی فشار منفذی بکار گرفته شد که نتایج قابل قبولی حاصل نکرد. بنابراین در ادامه با ارائه مدلی جدید تلاش شد نتایج بهبود یابد. روش پیشنهادی جدید از برازش مستقیم بین فشار منفذی با نسبت فرکانسی f_a/f_n بهره می‌برد

این مدل برای اولین بار در این تحقیق استفاده شده است و نتایج آن نیز در مقایسه با کارهای قبلی بهبود قابل توجهی نشان داده است.

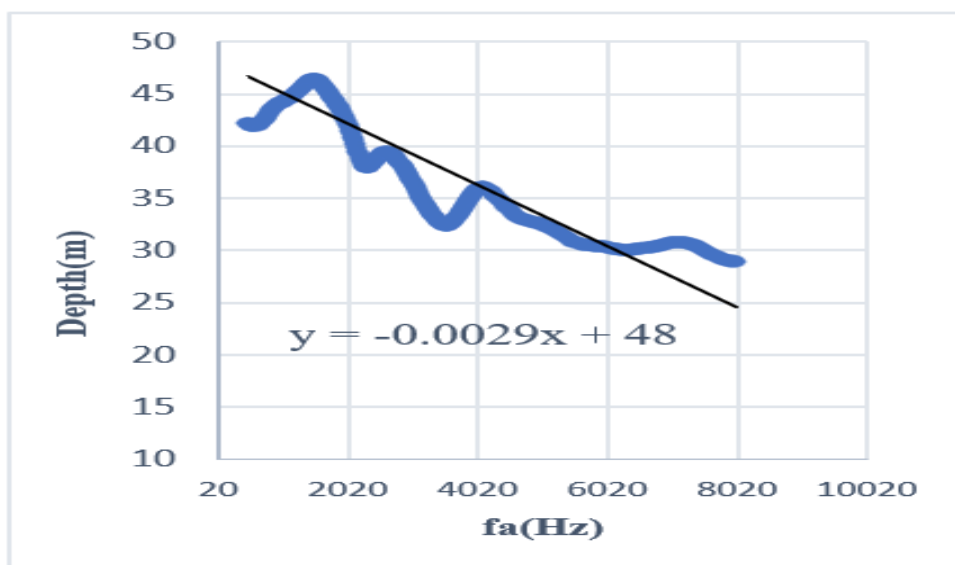
۲-۶ روش میرایی فرکانس لرزه‌ای بر اساس اصول تنش موثر

همانطور که در مبحث تئوری فصل دوم بیان شد روش میرایی فرکانس لرزه‌ای یکی از جدیدترین روش‌ها در تخمین فشار منفذی بوده که در خلیج مکزیک برای سازندها و مخازن آواری بکارگرفته شد و نتایج آن بویژه برای مخازن بوجود آمده در کنار لایه‌های نمکی عملکرد خوبی نشان داده است در حالیکه در این مناطق روش‌های سرعت و مقاومت صوتی لرزه‌ای پیش‌بینی‌های قابل قبولی ارائه نمی‌دهند (Salehi & Mannon, 2013). در این روش ابتدا نشانگر پوش دامنه فرکانس میانگین از داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده استخراج گردید که در شکل (۱-۶) مقطع عرضی آن بصورت شرقی-غربی در محل چاه-۲ نشان داده شده است. همانطور که در این مقطع دیده می‌شود فرکانس غالب در لایه‌های مخزنی سروک و ایلام حدود ۴۰ هرتز و در لایه‌های مخزنی بورگان و فهلیان حدود ۳۰ هرتز بوده است.



شکل (۱-۶): نشانگر دامنه فرکانس میانگین لرزه‌ای (واحد محورها بر حسب متر است).

در ادامه نگار فرکانس میانگین نرمال (f_n) با استفاده از برازش خط در بخش بالایی نگار فرکانس میانگین (f_a) داده‌های لرزه‌ای و اعمال گرادیان خط مذکور به نگار فرکانس میانگین محاسبه گردید که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است. در نهایت نشانگر نسبت فرکانس میانگین به فرکانس میرایی نرمال (f_a/f_n) محاسبه گردید.



شکل (۲-۶): استخراج روند نرمال میرایی فرکانس میانگین از داده‌های فرکانس میانگین در قسمت بالای چاه ۲

حال با تشکیل نمودار متقاطع بین داده‌های نسبت فرکانسی (f_a/f_n) با داده‌های تنش موثر حاصل از چاه (RFT) و با انجام برازش بین آنها در محل چاه‌ها، رابطه بین آنها تعیین و ضرایب اولیه معادله (۶-۱) بر اساس شکل (۳-۶) بدست آمد.

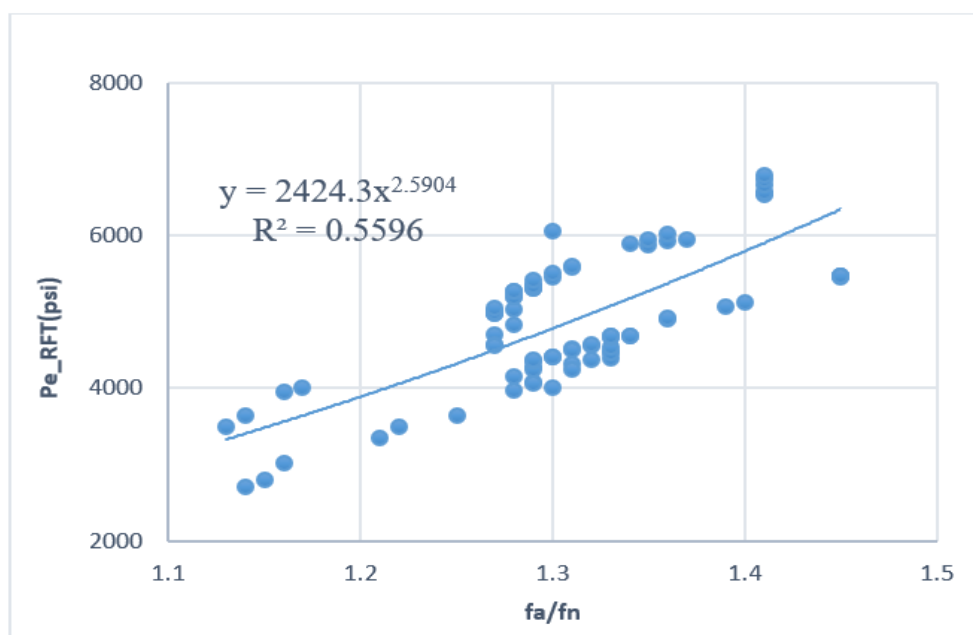
$$\sigma_e = 2424.3 \left(\frac{f_a}{f_n} \right)^{2.5904} \quad (۱-۶)$$

که در آن σ_e تنش موثر، و اعداد $A=2424.3$ و $M=2.5904$ ضرایب برازش مربوط به معادله ۲-۳۰ می‌باشند.

که پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها ضرایب کالیبراسیون A و M به ترتیب برابر با σ_v و p_n و ۲/۱ بصورت رابطه (۲-۶) نهایی گردیدند.

$$\sigma_e = (\sigma_v - p_n) \left(\frac{f_a}{f_n} \right)^{2.1} \quad (۲-۶)$$

که در آن σ_e فشار موثر، σ_v فشار روباره بوده و P_n نیز فشار منفذی نرمال می‌باشد که با استفاده از محاسبه فشار گل به کمک نمودار گل حفاری^۱ و بدست آوردن معادله روند افزایش فشار گل بر حسب عمق و اعمال آن به نگار فشار منفذی درمحل چاه بدست آمد.



شکل (۳-۶): برازش بین فشار موثر و نسبت میرایی فرکانس لرزه‌ای در محل چاه‌ها

در ادامه دقت داده‌های پیش‌بینی شده در محل چاه-۶ مورد آزمون قرار گرفت که ضریب تعیین

(R^2) آن با داده‌های RFT چاه بالا بوده و برابر ۰/۹۸۶۱ می‌باشد (شکل ۴-۶).

سپس داده‌های فشار موثر از رابطه (۲-۶) مورد تخمین قرار گرفته و مکعب آن استخراج گردید که در

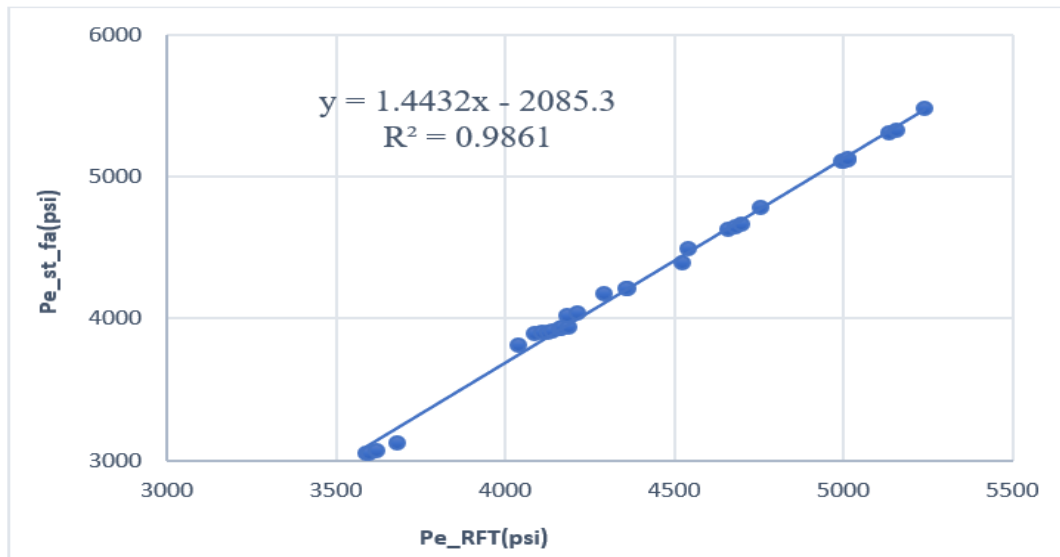
شکل (۵-۶) مقطع عرضی آن در راستای شرقی-غربی در محل چاه-۲ نشان داده شده است. همانطور

که از شکل (۵-۶) قابل استنباط است، لایه‌های مخزنی ایلام، سروک، بورگان و فهلیان از لایه‌های بالا

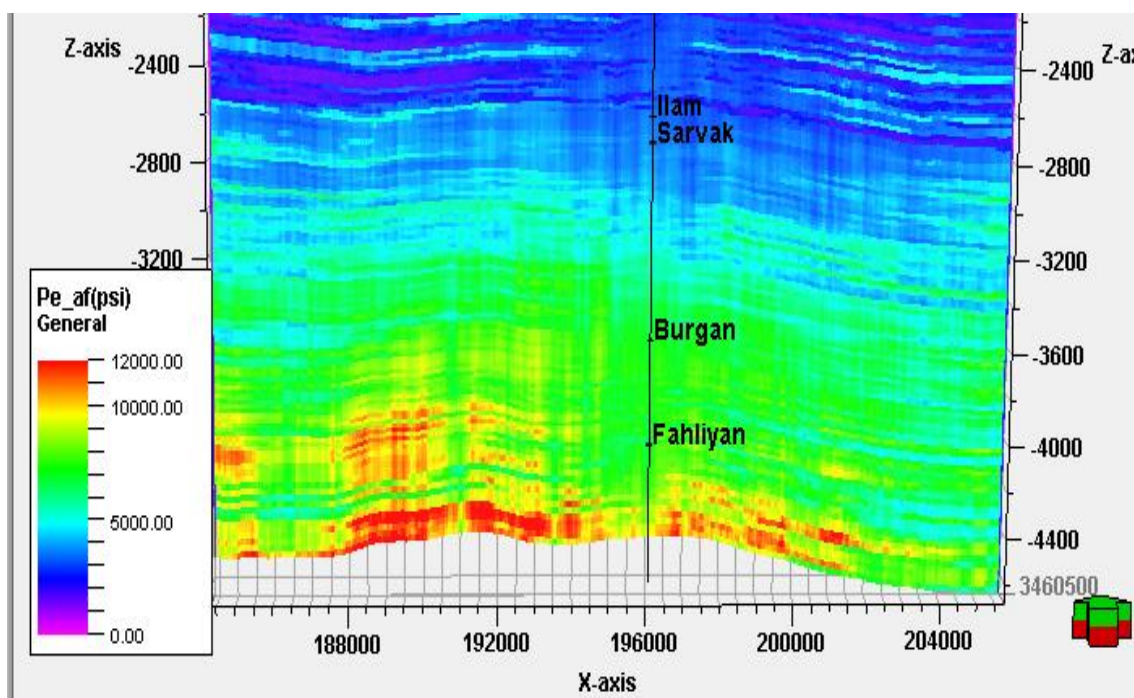
و پایین خود بصورت مناسب (فشار موثر کم) قابل تفکیک نیستند، بنابراین این روش علی‌رغم داشتن

^۱ Mud log

ضریب تعیین بالا بین داده‌های پیش‌بینی شده و چاه، از قدرت تفکیک کافی برای لایه‌های مخزنی برخوردار نیست

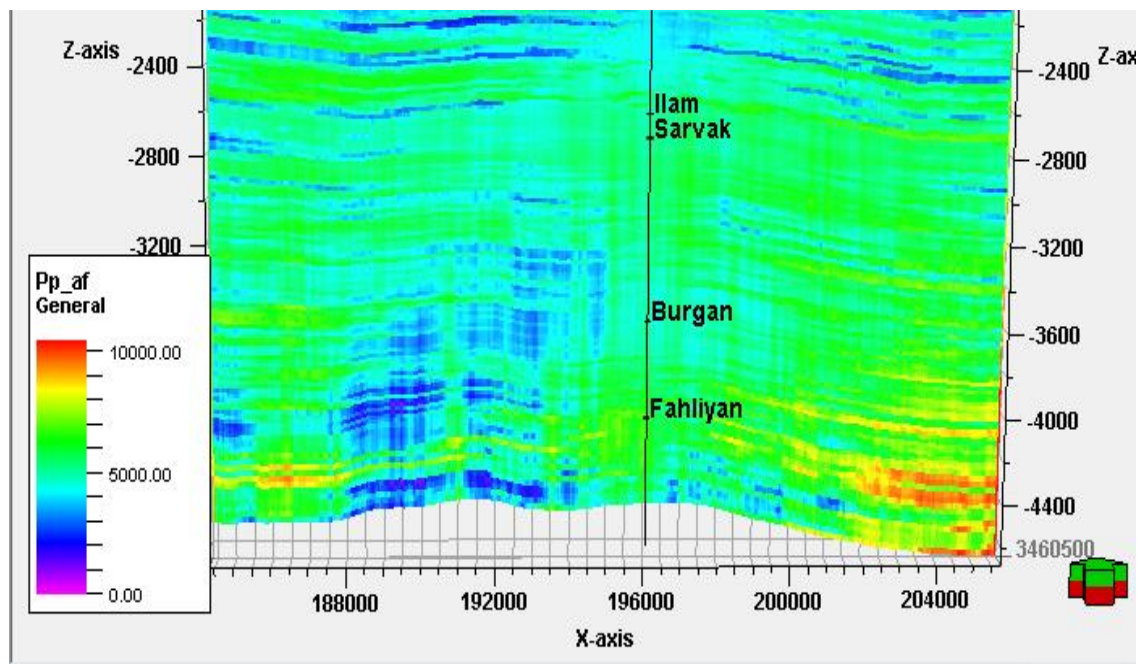


شکل (۴-۶): برازش بین داده‌های فشار موثر حاصل از روش میرایی فرکانس با داده‌های واقعی در چاه ۶



شکل (۵-۶): مقطع عرضی از فشار موثر برآورد شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای (fa/fn) در محل چاه ۲ (واحد محورها بر حسب متر است).

حال با بهره‌گیری از رابطه ترزاقی (۲-۸) و با استفاده از مکعب فشار موثر و روباره بدست آمده در تحقیق، مکعب فشار منفذی مورد استخراج قرار گرفت که مقطع عرضی آن در محل چاه‌های ۲ و ۴ به ترتیب در شکل‌های (۶-۶) و (۶-۷) نشان داده شده‌اند.

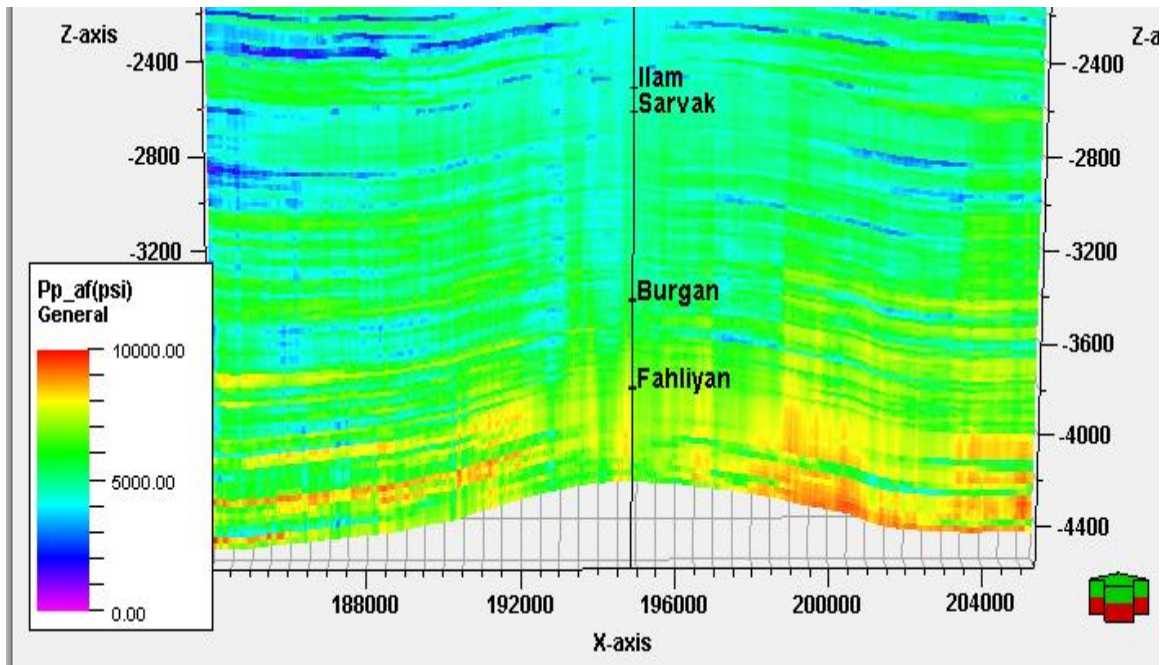


شکل (۶-۶): مقطع عرضی از فشار منفذی پیش‌بینی شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزهای (fa/fn) در محل چاه ۲ (واحد محورها بر حسب متر است).

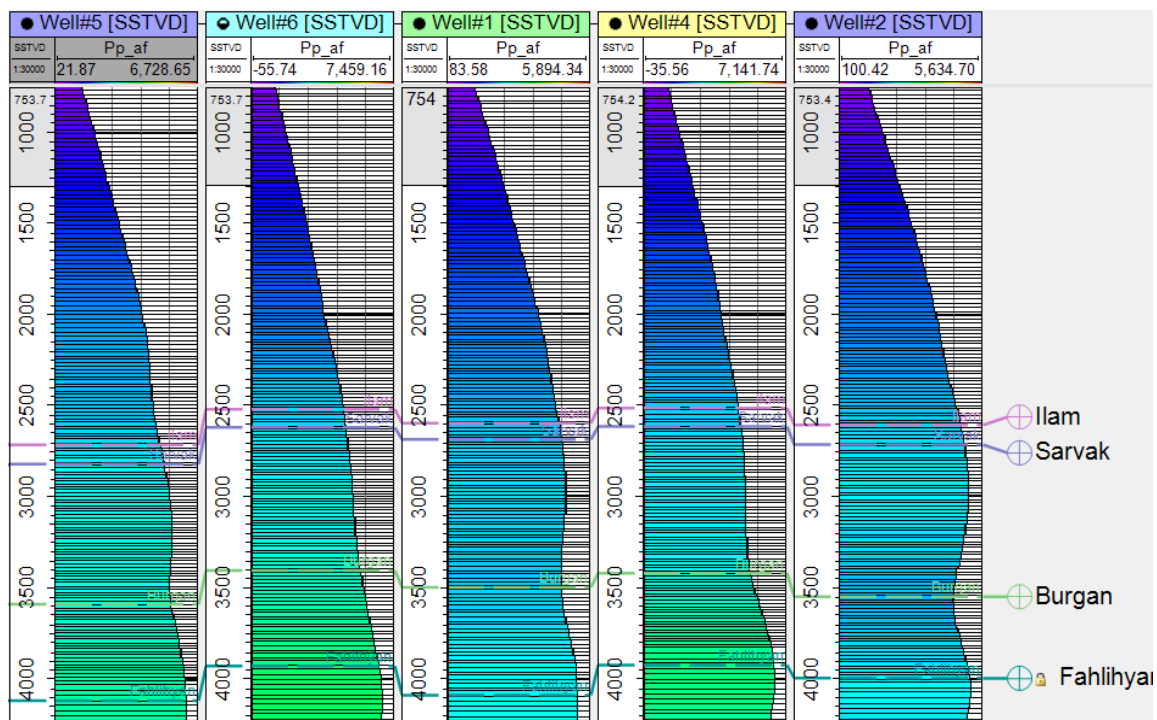
همانطور که در قسمت سمت چپ تصویر شکل ۶-۶ و در اعماق بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر دیده می‌شود وجود فشارهای منفذی نزدیک صفر در آن اعماق نشان دهنده عملکرد نادرست روش فوق‌الذکر است، همینطور در اعماق مذکور و در سمت راست میدان، فشارهای بالا و خیلی متفاوت با بخش سمت چپ در همان افق دیده می‌شوند که نشان دهنده غیر واقعی بودن پیش‌بینی روش میرایی فرکانسی می‌باشد.

در مقطع عرضی شکل (۶-۷) نوسانات فشاری غیر عادی کم شده، با اینحال هنوز تفکیک مناسبی از لایه‌های مخزنی دیده نمی‌شود. همچنین نگار فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل چاه‌ها که در شکل ۶-۸ نشان داده شده است. همانطور که از نگارهای این شکل پیداست، افق‌های مخزنی از لایه‌های

بالا و پایین خود خوب تفکیک نشده‌اند در عین حال تغییرات خیلی زیاد فشار منفذی در اعماق هم ارز در شکل نیز گویای توانایی ضعیف این روش در پیش‌بینی بوده است.

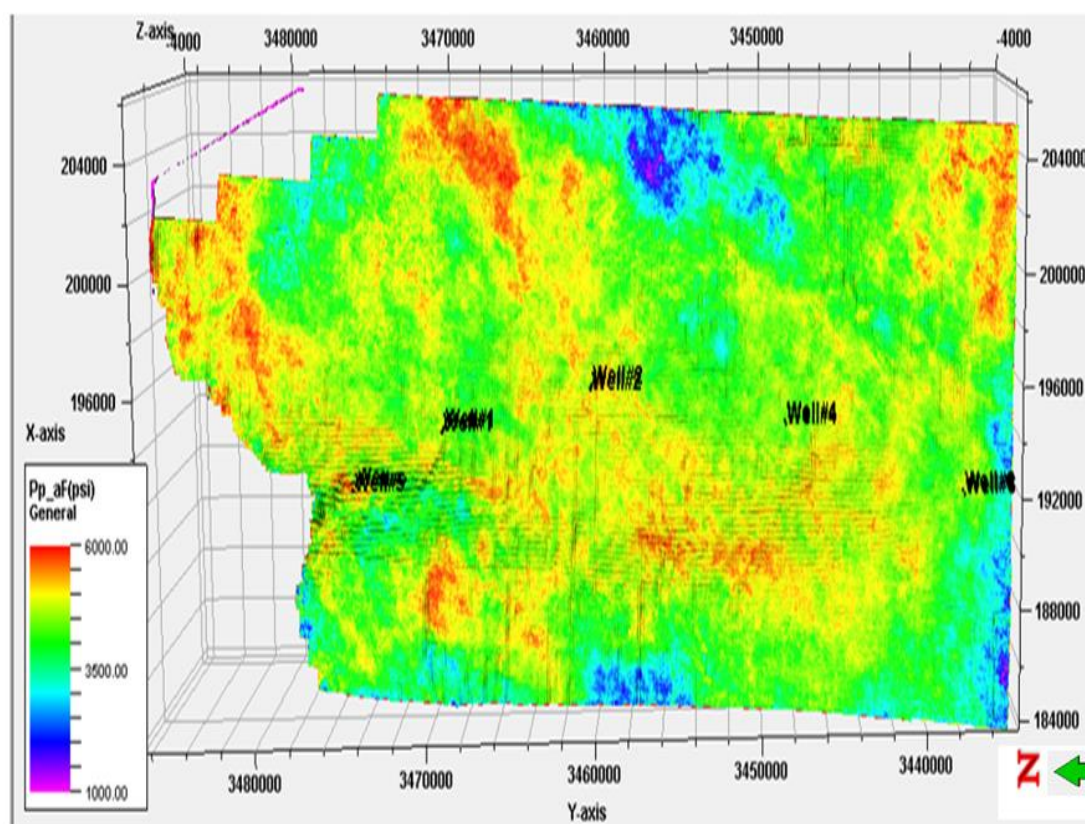


شکل (۶-۷): مقطع عرضی از فشار منفذی پیش‌بینی شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزهای (fa/fn) در محل چاه ۴ (واحد محورها بر حسب متر است).

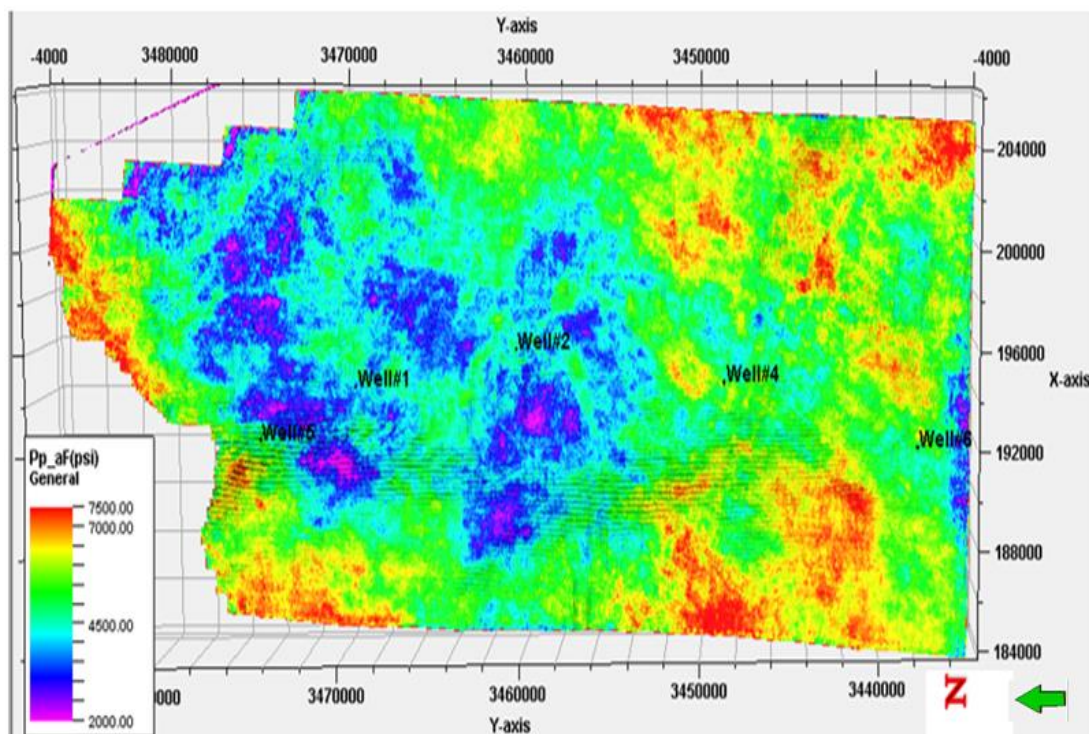


شکل (۶-۸): نگار فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی (واحد محور قائم بر حسب متر است).

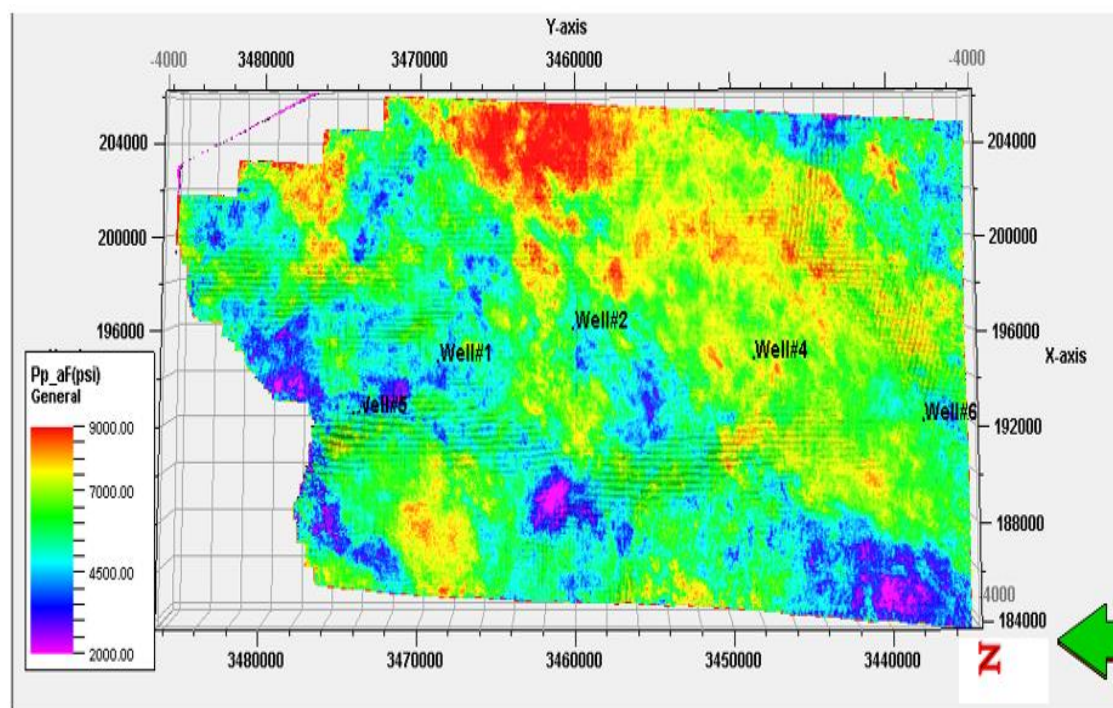
به منظور بررسی توانایی روش میرایی در تعیین تغییرات جانبی فشار مخزنی، برش افقی از مکعب فشار منفذی پیش‌بینی شده در افق‌های مخزنی تهیه گردید که به ترتیب در شکل‌های (۶-۹) تا (۶-۱۱) برای مخازن سروک، بورگان و فهلیان نشان داده شده است. همانطور که از برش افقی ۶-۹ مشخص است این روش نتوانسته است، کانال‌های مدفون و تغییرات فشار در داخل کانال‌ها را که روش‌های مقاومت صوتی و سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری بوضوح نشان داده بوده‌اند، پیش‌بینی نماید، همچنین در قسمت‌هایی از مخزن (یال شرقی مخزن در قسمت بالای شکل) فشارهای خیلی پایین مشاهده می‌شود که موید غیر واقعی بودن پیش‌بینی خواهد بود و نیز تغییرات عددی خیلی زیاد فشار منفذی در افق مخزنی سروک مطابق با واقعیات مربوط با داده‌های RFT نبوده و این موضوع در مخازن بخش بورگان و سازند فهلیان نیز مشاهده می‌شود که موید ضعف روش میرایی فرکانسی در پیش‌بینی فشار منفذی می‌باشد.



شکل (۶-۹): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای در بخش مخزنی سازند کریناته سروک

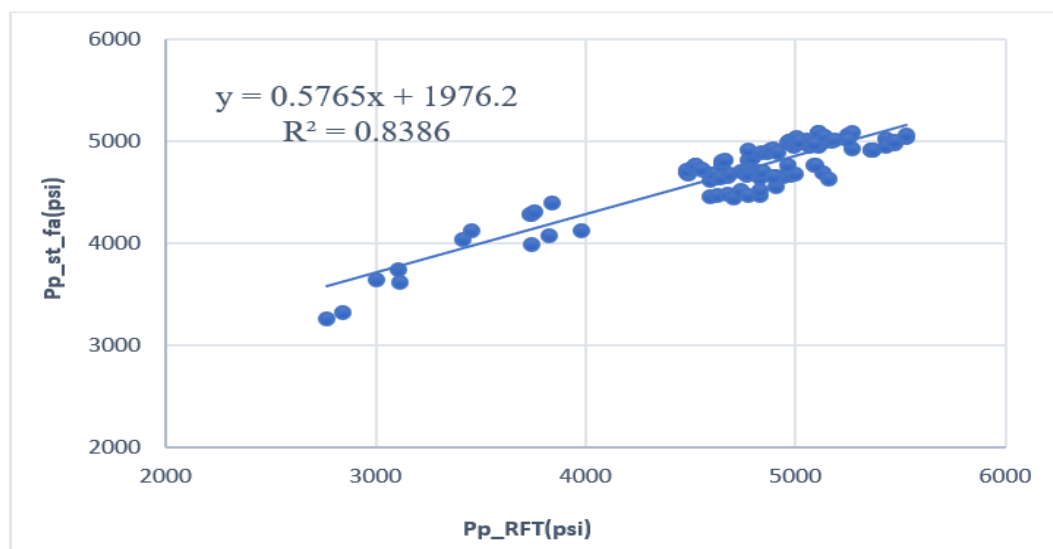


شکل (۶-۱۰): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای در بخش مخزنی ماسه سنگی بورگان



شکل (۶-۱۱): برش افقی از مکعب فشار منفذی حاصل از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای در سازند مخزنی کربناته فهلیان

در نهایت داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل تمامی چاه‌ها با داده‌های فشار اندازه‌گیری شده (RFT) برازش شد که R^2 برابر 0.8386 بدست آمد که در شکل (۶-۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۲): برازش بین فشار منفذی چاه‌ها با مقادیر فشار منفذی پیش‌بینی شده از روش غیر مستقیم نسبت میرایی فرکانسی لرزه‌ای

همچنین خطای استاندارد برای داده‌های پیش‌بینی شده این روش به کمک رابطه (۴-۲) محاسبه و برابر 75 (psi) حاصل شده است.

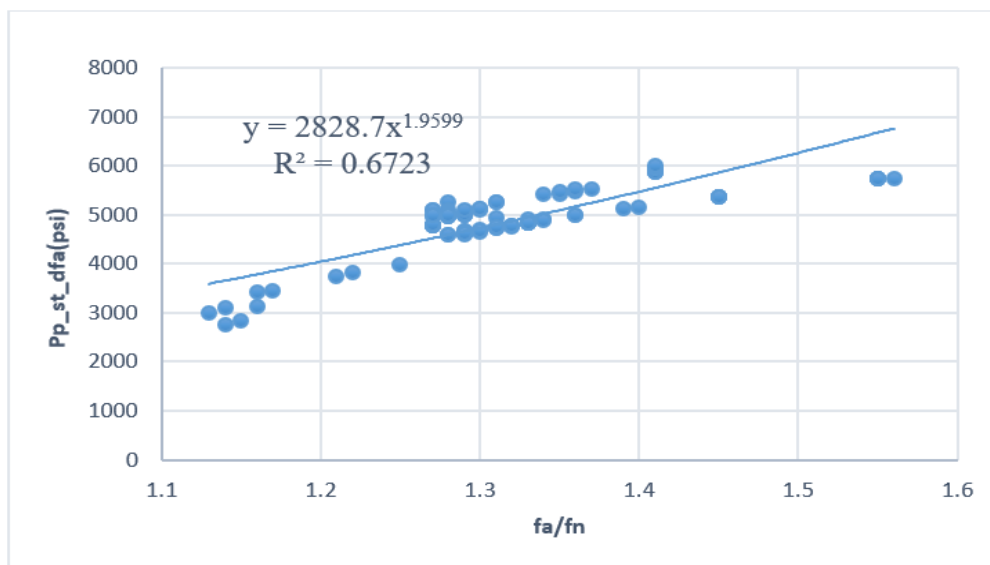
۶-۳ روش پیش‌بینی مستقیم فشار منفذی از میرایی فرکانس لرزه‌ای

همانطور که در مبحث قبلی دیده شد روش غیرمستقیم میرایی فرکانسی نتایج خوبی در پیش‌بینی فشار مخزنی در خارج از نقاط چاه ارائه نداد، بنابراین تلاش شد راه‌های مختلفی برپایه میرایی فرکانس لرزه‌ای جهت پیش‌بینی فشار منفذی ارائه شود. در این روش نیز از نشانگر دامنه فرکانس میانگین لرزه‌ای استخراج شده در بخش قبلی بهره گرفته شد، همچنین میرایی نرمال فرکانس لرزه‌ای محاسبه گردید، سپس نشانگر نسبت فرکانس میانگین به میرایی نرمال فرکانس (f_a/f_n) بدست آورده شد. در ادامه با تشکیل نمودار متقاطع بین نسبت فرکانسی (f_a/f_n) با داده‌های فشار منفذی (RFT) بطور

مستقیم و با انجام برازش بین آنها در محل چاه‌ها (شکل ۶-۱۳) ابتدا رابطه اولیه بین آنها تعیین شده و ضرایب A و M براساس معادله (۳-۶) محاسبه شدند.

$$P_p = A \left(\frac{f_a}{f_n} \right)^M \quad (3-6)$$

که در آن P_p فشار منفذی، A و M ضرایب برازش می‌باشند.



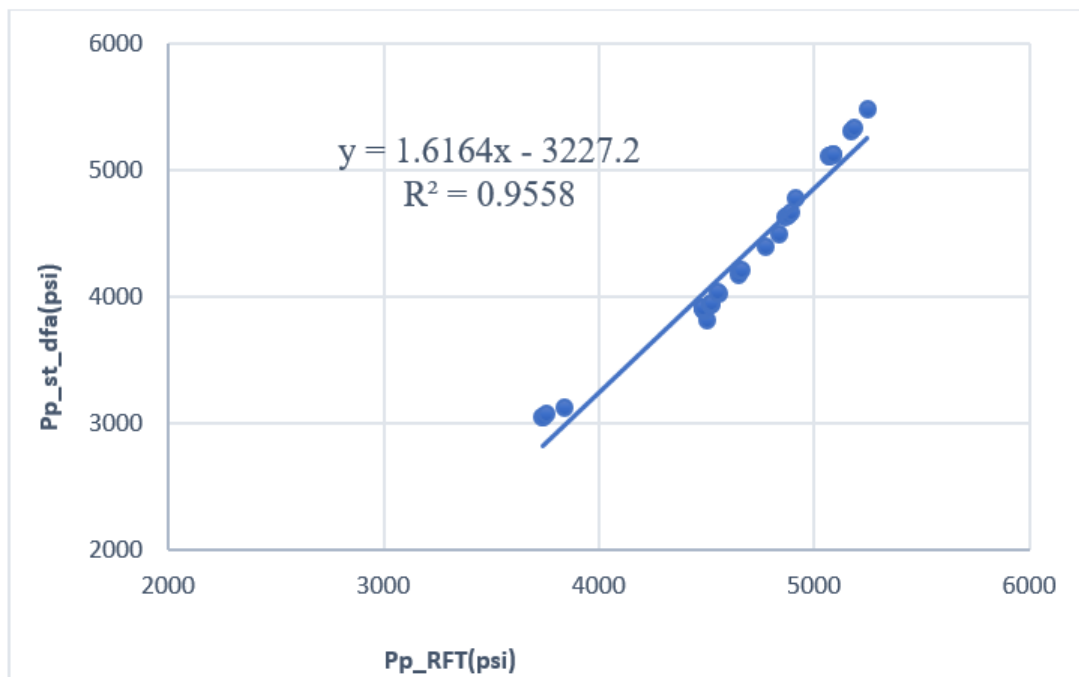
شکل ۶-۱۳: برازش بین فشار منفذی و میرایی فرکانس لرزه‌ای

که پس از اعمال تصحیحات لازم در محل چاه‌ها ضرائب کالیبراسیون $A = (\sigma_v - p_n)$ و $M = 2/2$ بصورت رابطه (۴-۶) نهایی گردیدند.

$$p_p = (\sigma_v - p_n) \left(\frac{f_a}{f_n} \right)^{2.2} \quad (4-6)$$

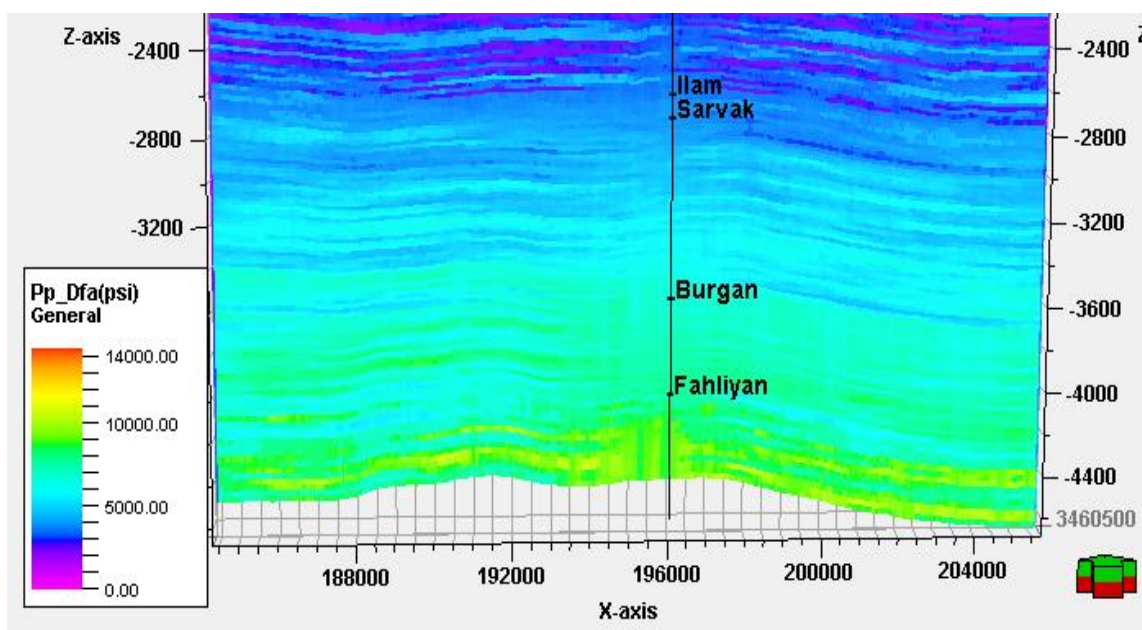
که در آن P_p فشار منفذی، σ_v فشار روباره، P_n فشار منفذی نرمال و f_a/f_n نسبت فرکانس میانگین به فرکانس میرایی نرمال می‌باشند.

در ادامه دقت داده‌های پیش‌بینی شده در محل چاه-۶ مورد آزمون قرار گرفت و نشان داد که ضریب تعیین (R^2) آن با داده‌های RFT چاه برابر با ۰/۹۵۵۸ می‌باشد (شکل ۶-۱۴). لازم به ذکر است که اطلاعات چاه-۶ جهت بدست آوردن ضرائب کالیبراسیون رابطه (۴-۶) بکار گرفته نشده نبود.



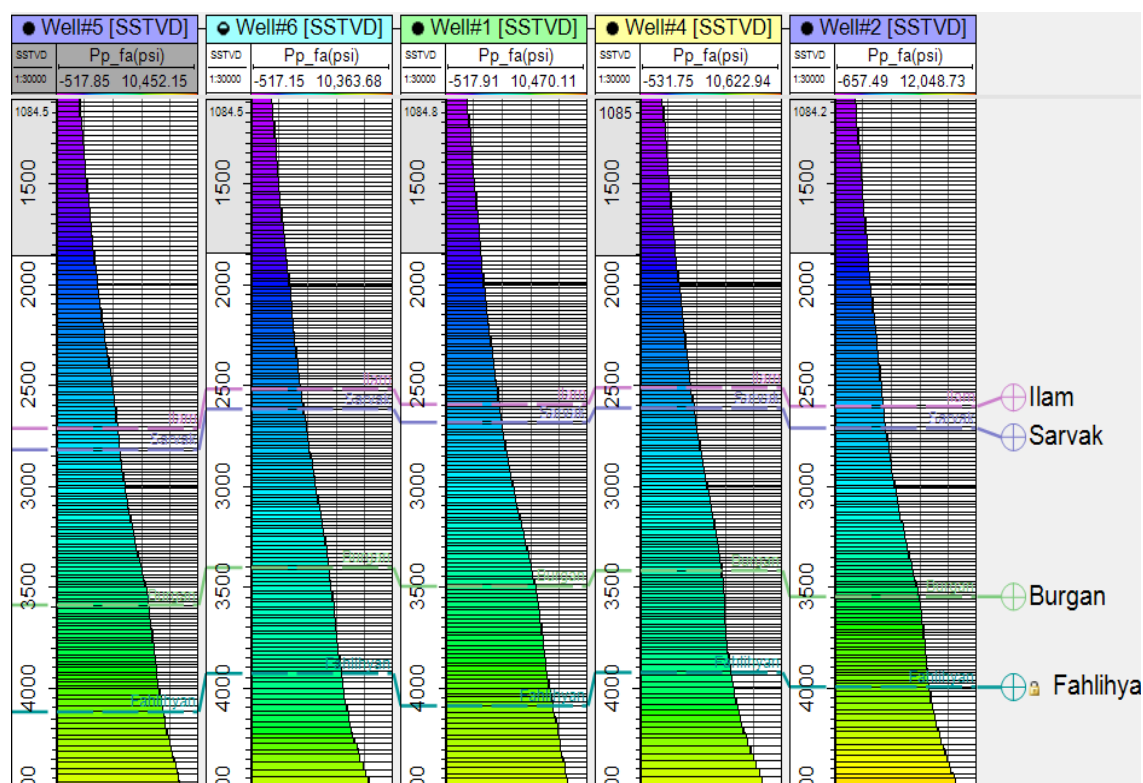
شکل ۶-۱۴: برازش بین داده‌های فشار منفذی تخمین شده به کمک روش مستقیم میرایی فرکانس با داده‌های واقعی چاه ۶

سپس داده‌های فشار منفذی با استفاده از رابطه (۶-۴) مورد تخمین قرار گرفته و مکعب آن استخراج گردید، که برش عرضی شرقی-غربی آن در محل چاه-۲ در شکل (۶-۱۵) نشان داده شده است.



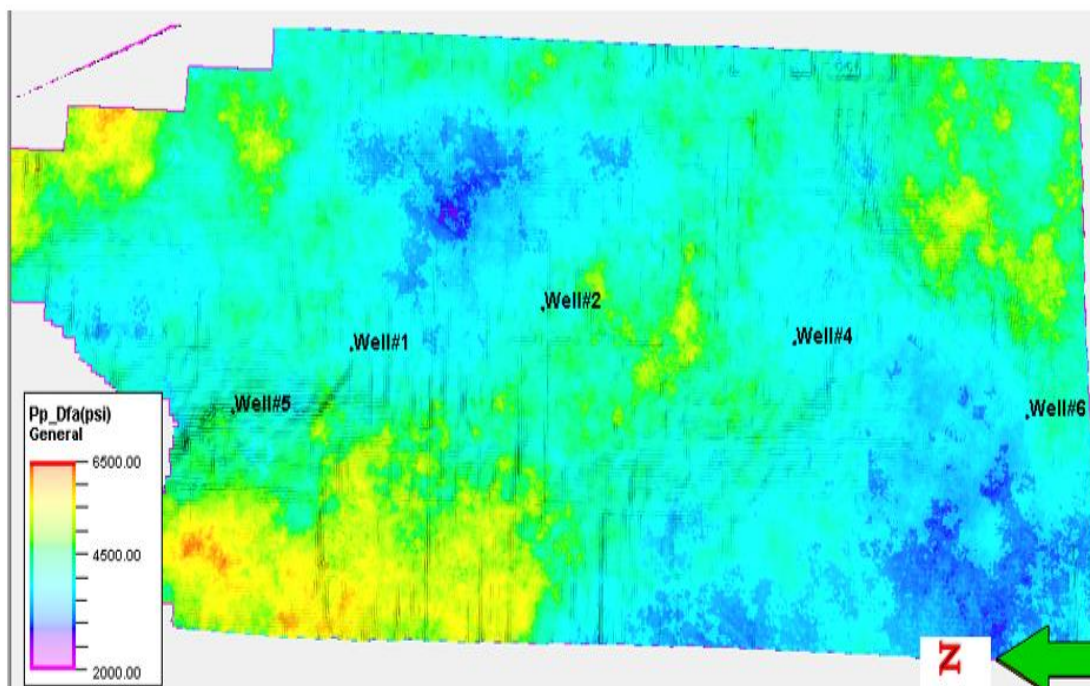
شکل (۶-۱۵): مقطع عرضی شرقی-غربی از فشار منفذی برآورد شده به کمک روش مستقیم میرایی فرکانس لرزه‌ای (fa/fn) در محل چاه ۲ (واحد محورها بر حسب متر است).

همانطور که در مقطع عرضی از مکعب فشار منفذی در محل چاه-۲ (شکل ۶-۱۵) دیده می‌شود و نیز نگارهای فشار منفذی در محل دیگر چاه‌ها (شکل ۶-۱۶) قابل مشاهده است این روش تا حدی توانسته است لایه‌های مخزنی ایلام و سروک را از نظر اختلاف فشار با لایه‌های بالا و پایین خود (با فشار بیشتر) تفکیک نماید، با اینحال قادر به شناسایی مخازن ماسه سنگی بورگان و کربناته فهلیان نبوده است.

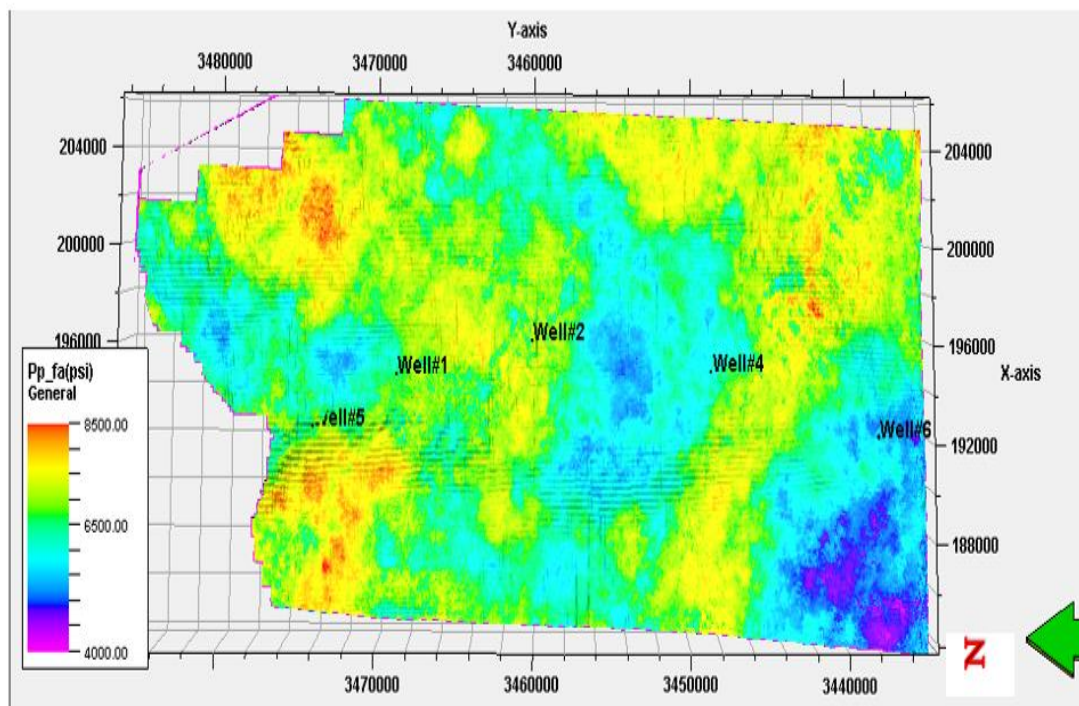


شکل (۶-۱۶): نگار فشار منفذی حاصل از روش مستقیم میرایی فرکانسی (واحد محور قائم بر حسب متر است)

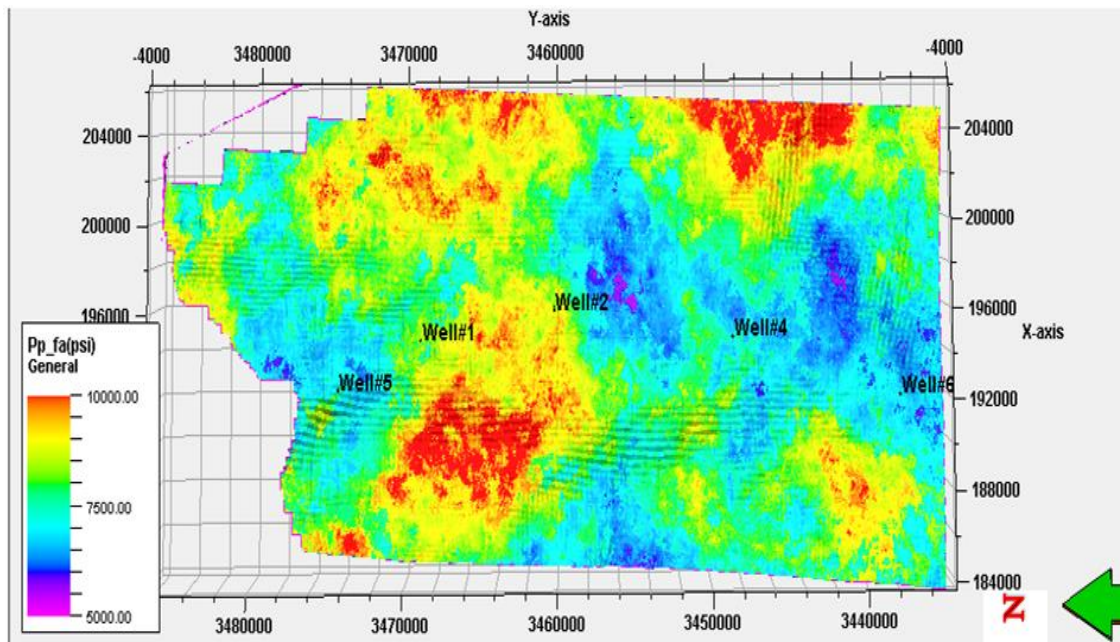
به منظور بررسی بیشتر نتایج روش اصلاح شده، برش افقی از مکعب فشار منفذی پیش‌بینی شده در افق‌های مخزنی سروک، بورگان و فهلیان تهیه و به ترتیب در شکل‌های (۶-۱۷ تا ۶-۱۹) نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل (۶-۱۷) مشخص است این روش نیز همانند روش قبلی میرایی فرکانسی نتوانسته است، کانال‌های مدفون و تغییرات فشار در داخل کانال‌ها را پیش‌بینی نماید، همچنین هنوز تغییرات جانبی فشار منفذی در افق مخزنی سروک غیر واقعی بوده و مطابق با واقعیت مربوط به داده‌های RFT نمی‌باشد که در حدود (psi) ۵۰۰۰ است. همین‌طور برش‌های افقی بدست آمده از مخازن بورگان و فهلیان نیز دارای تغییرات جانبی زیادی بوده و با داده‌های واقعی سازگار نمی‌باشند.



شکل (۶-۱۷): برش افقی از مکعب فشار منفذی پیش‌بینی شده با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی در بخش مخزنی سازند کریناته سروک

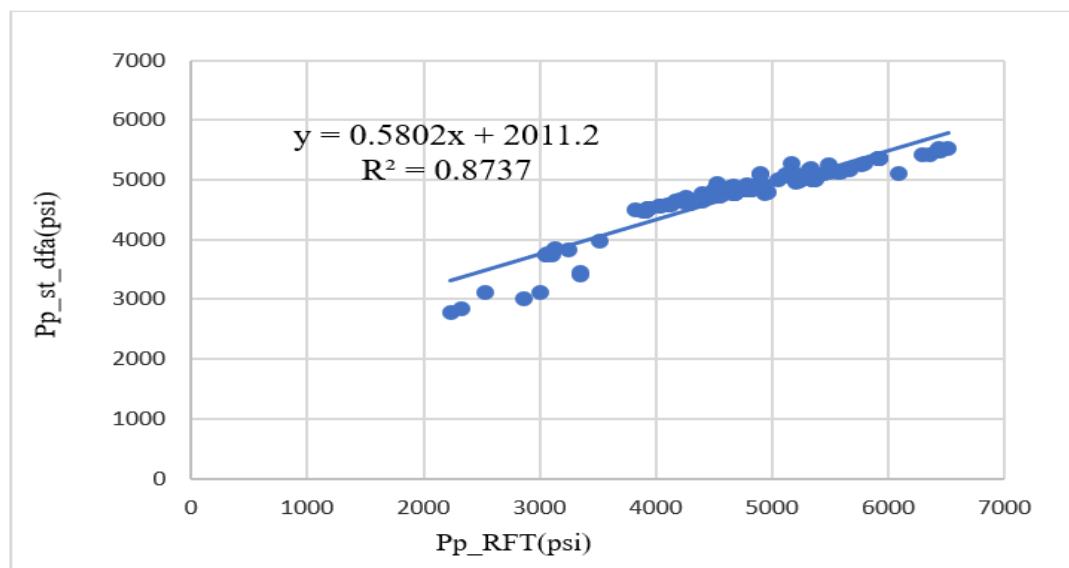


شکل (۶-۱۸): برش افقی از مکعب فشار منفذی با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی در بخش مخزنی ماسه سنگی بورگان



شکل (۶-۱۹): برش افقی از مکعب فشار منفذی با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی در بخش مخزنی فلهلیان

در نهایت داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده این روش در محل تمامی چاه‌ها با داده‌های فشار چاه بدست آمده از داده‌های RFT برازش شده و R^2 برابر با 0.8737 بدست آمد که در شکل (۶-۲۰) نشان داده شده است. این مقدار در مقایسه با ضریب تعیین روش میرایی فرکانس معمولی حدود ۴ درصد افزایش نشان می‌دهد.



شکل (۶-۲۰): برازش بین فشار منفذی پیش‌بینی شده با روش اصلاح شده میرایی فرکانسی با داده‌های RFT

خطای استاندارد داده‌های پیش‌بینی شده این روش نیز براساس رابطه (۴-۲) محاسبه گردید که برابر با ۵۷ محاسبه گردید که در مقایسه با روش میرایی فرکانسی معمولی نزدیک به ۳۲ درصد کمتر است، که نشان دهنده عملکرد بهتر و بهبود قابل ملاحظه نتایج پیش‌بینی فشار منفذی نسبت به روش معمولی میرایی فرکانس است.

۴-۶ جمع بندی

پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از میرایی فرکانس به دو روش مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. در روش معمول (اول) با تشکیل نمودار متقاطع بین نسبت فرکانسی f_a/f_n و داده‌های فشار موثر در محل چاه‌ها، برازش انجام شد و در روش اصلاح شده (دوم) برازش بطور مستقیم با داده‌های فشار منفذی صورت گرفت. در هر دو روش پس از تصحیح و کالیبراسیون روابط اولیه در محل چاه‌ها، مدل‌های نهایی بدست آمده برای استخراج مکعب فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفتند. مقاطع عرضی حاصل از مکعب فشار منفذی روش اول نشان داد که این روش نتوانسته است لایه‌های مخزنی را بدرستی از لایه‌های بالا و پایین خود تفکیک نماید، بخصوص اینکه فشار پیش‌بینی شده نزدیک صفر در اعماق زیر ۴۰۰۰ متر نشان دهنده عملکرد نادرست روش مذکور است. با اینحال روش دوم تا اندازه‌ای عملکرد بهتری داشته و توانسته است لایه‌های مخزنی اصلی یعنی مخازن ایلام و سروک را تا حدودی از لایه‌های بالا و پایین خود بدرستی و با فشار منفذی بیشتر (رنگ روش‌تر) تفکیک نماید، هرچند که در تفکیک لایه‌های مخزنی بورگان و فهلیان عملکرد درستی را نشان نمی‌دهد. برش‌های افقی حاصل از مکعب فشار منفذی در بخش مخزنی سروک نشان می‌دهند که هر دو روش میرایی فرکانسی در تعیین تغییرات جانبی فشار عملکرد ضعیفی داشتند، بطوریکه اثر کانال‌ها و شکستگی‌ها در برش‌های مذکور دیده نمی‌شود و نیز تغییرات جانبی فشار در مخزن زیاد و غیر واقعی است. بطوریکه در سمت جنوبی میدان تحت تاثیر توپوگرافی و کم عمق بودن مخزن، فشار کم شده است (شکل ۶-۱۶). بررسی‌های آماری نتایج حاصله نیز نشان دهنده عملکرد بهتر روش دوم بوده بطوریکه ضریب تعیین (R^2) بین

داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های واقعی فشار منفذی برای روش اول ۰/۸۳۸۶ و برای روش دوم ۰/۸۷۳۷ می‌باشد و نیز خطای استاندارد برای روش اول عدد ۷۵(psi) و برای روش دوم ۵۷(psi) بدست آورده شد.

در تجزیه و تحلیل روش میرایی فرکانسی و ضعف آن در پیش‌بینی فشار منفذی در این مطالعه، دلایل مختلفی مدنظر قرار گرفته و مدل‌ها و راه‌های مختلفی برای بهبود روش بکار گرفته شد که حصول روش برازش مستقیم با فشار منفذی که برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده است از نتایج این رساله بوده است. علی‌رغم بهبود نسبی نتایج به نظر می‌رسد، هنوز جای کار زیادی در رابطه با این روش وجود دارد که بعضی از آنها در فصل آینده پیشنهاد می‌شوند.

فصل ۷:

نتایج و پیشنهادات

۷-۱ اهم نتایج حاصله از مطالعه

با توجه به نتایج کلی حاصله از این مطالعه و در پاسخ به سوال‌های مطرح در فصل اول تحقیق، نشان داده شد که مدل‌های توسعه داده شده در مخازن ماسه سنگی در صورت کالیبره شدن درست می‌توانند در مخازن کربناته هم عملکرد خوبی داشته باشند. همچنین عامل ایجاد فشار منفذی بالا در مخازن میدان مورد مطالعه، تراکم نامتوازن تشخیص داده شد. در ادامه تلاش می‌شود تا اهم نتایج حاصل از مطالعه به روش‌های مختلف ارائه شوند.

۷-۱-۱ نتایج روش‌های سرعت

در این روش از دو نوع سرعت (سرعت وارون‌سازی و سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری) برای پیش بینی فشار منفذی استفاده شد که نتایج کلی حاصله از آنها به شرح زیر است:

- روش سرعت وارون‌سازی لرزه‌ای دارای قدرت خوبی برای پیش بینی فشار منفذی در مخازن نمی‌باشد. خطای استاندارد این روش بالا بوده و فقط قادر به شناسایی مخازن اصلی ایلام و سروک در میدان مورد مطالعه شده است.
- روش سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری از قدرت و کیفیت خوبی برای پیش بینی فشار منفذی برخوردار است، بطوریکه خطای استاندارد آن برای پیش بینی فشار منفذی پایین بوده و همه چهار لایه مخزنی میدان مورد مطالعه (مخازن ایلام، سروک، بورگان و فهلیان) در مقاطع عرضی فشار منفذی پیش بینی شده به این روش، شناسایی و تفکیک شدند.
- با توجه نتایج حاصله، افزایش فرکانس مدل سرعت در پیش بینی فشار منفذی و دقت آن تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته است، بطوریکه سرعت حاصل از تحلیل چند نشانگری نتایج بهتری در پیش بینی فشار منفذی نسبت به سرعت وارون‌سازی داشته است.

۲-۱-۷ نتایج حاصله از روش مقاومت صوتی

داده‌های مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای که به دو روش مستقیم (برازش با فشار منفذی) و غیر مستقیم (برازش با فشار موثر) برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده شد دارای نتایج کلی بشرح زیر است:

- نتایج حاصله از روش غیر مستقیم داده‌های مقاومت صوتی عملکرد خوبی در پیش‌بینی فشار منفذی نشان داد. خطای استاندارد این روش پیش‌بینی فشار منفذی پایین بوده است و در مقاطع عرضی حاصل از مکعب فشار منفذی نیز هر چهار زون مخزنی (مخازن ایلام، سروک، بورگان و فهلیان) میدان مورد مطالعه بخوبی شناسایی و تفکیک شدند.
- نتایج پیش‌بینی فشار منفذی به روش مستقیم از داده‌های مقاومت صوتی لرزه‌ای نیز قابل قبول بوده است. خطای استاندارد آن در مدل‌سازی نسبتاً پایین بوده و این روش نیز قادر به شناسایی هر چهار زون مخزنی در میدان مورد مطالعه شده است.
- با توجه به نتایج حاصله از این روش، نشانگر مقاومت صوتی لرزه‌ای بطور کلی عملکرد خوبی در پیش‌بینی فشار منفذی در مخازن کربناته نشان می‌دهد و مزایای این روش در کنار نتایج خوب، داشتن مراحل کم محاسباتی و سریع بودن آن است.

۳-۱-۷ نتایج حاصله از روش میرایی فرکانس

داده‌های میرایی فرکانس لرزه‌ای نیز به دو روش مستقیم (برازش با فشار منفذی) و غیر مستقیم (برازش با فشار موثر) برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده شدند که نتایج حاصله از آنها به شرح زیر است:

- روش غیر مستقیم (معمول) میرایی فرکانس لرزه‌ای، دارای خطای استاندارد بالایی بوده و نتایج حاصله از روش عملکرد خوبی را در شناسایی و تفکیک لایه‌های مخزنی نشان نمی‌دهد.

• در روش مستقیم (اصلاح شده) میرایی فرکانس لرزه‌ای که برای اولین بار در این تحقیق مطرح و استفاده شده است، مقدار خطای استاندارد مدل‌سازی فشار منفذی بهبود یافته و شناسایی و تفکیک لایه‌های مخزنی ایلام و سروک مقدور شده است ولی هنوز شناسایی و تفکیک مخازن بورگان و فهلیان میسر نبوده است.

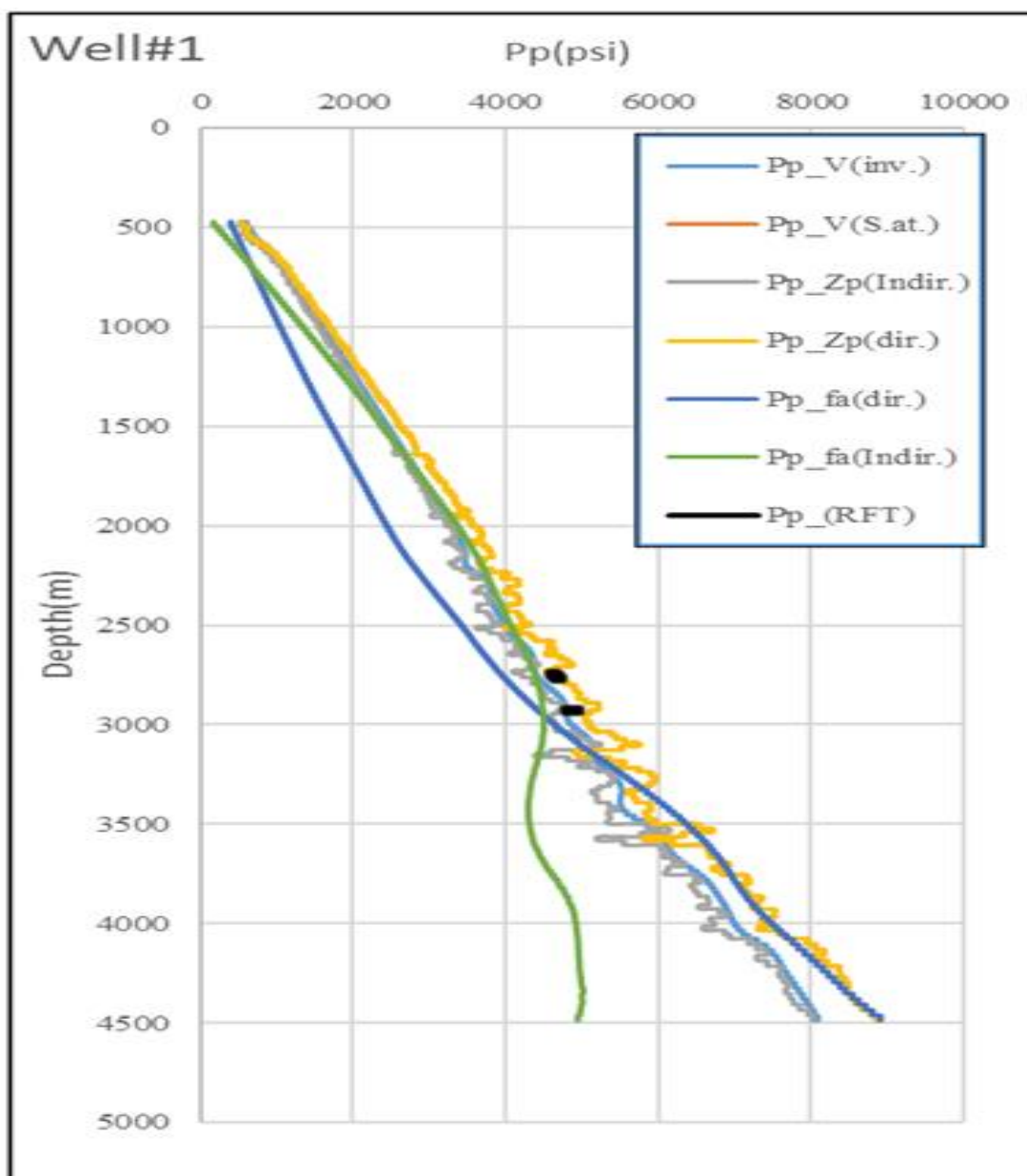
• با توجه به نتایج حاصله و در پاسخ به سوال‌های مطرح در فصل اول تحقیق، روش میرایی فرکانس لرزه‌ای عملکرد نسبتاً خوبی در پیش بینی فشار منفذی نشان داد، ولی عملکرد روش اصلاح شده جدید دقت پیش بینی را تا حدودی نسبت به روش موجود قبلی افزایش داده است.

۲-۷ مقایسه نتایج روش‌ها

۱-۲-۷ میزان انطباق مقادیر فشار منفذی پیش بینی شده با داده‌های

RFT چاه‌ها

در این تحقیق فشار منفذی با استفاده از شش روش مختلف و به کمک نشانگرهای لرزه‌ای سرعت، مقاومت صوتی و فرکانس میانگین مورد پیش بینی قرار گرفت که در این بخش نتایج روش‌های مذکور با هم مقایسه شده و نقاط قوت و ضعف آنها بررسی می‌شود. برای این منظور ابتدا داده‌های پیش بینی شده از هر شش روش مذکور، در محل هر یک از چاه‌ها بصورت نمودار فشار منفذی ارائه و با داده‌های RFT چاه‌ها (نقاط سیاه رنگ) و در شکل‌های (۱-۷ تا ۴-۷) مقایسه می‌شوند.



شکل (۷-۱): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه-۱ و انطباق آن با داده‌های

RFT

علائم کناری شکل نشان‌دهنده فشار منفذی حاصل از روش‌های مختلف بوده و به صورت زیر تعریف شده اند:

$Pp_V(inv.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت وارون لرزه‌ای

$Pp_V(S.at.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت حاصل از انالیز نشانگرهای لرزه‌ای

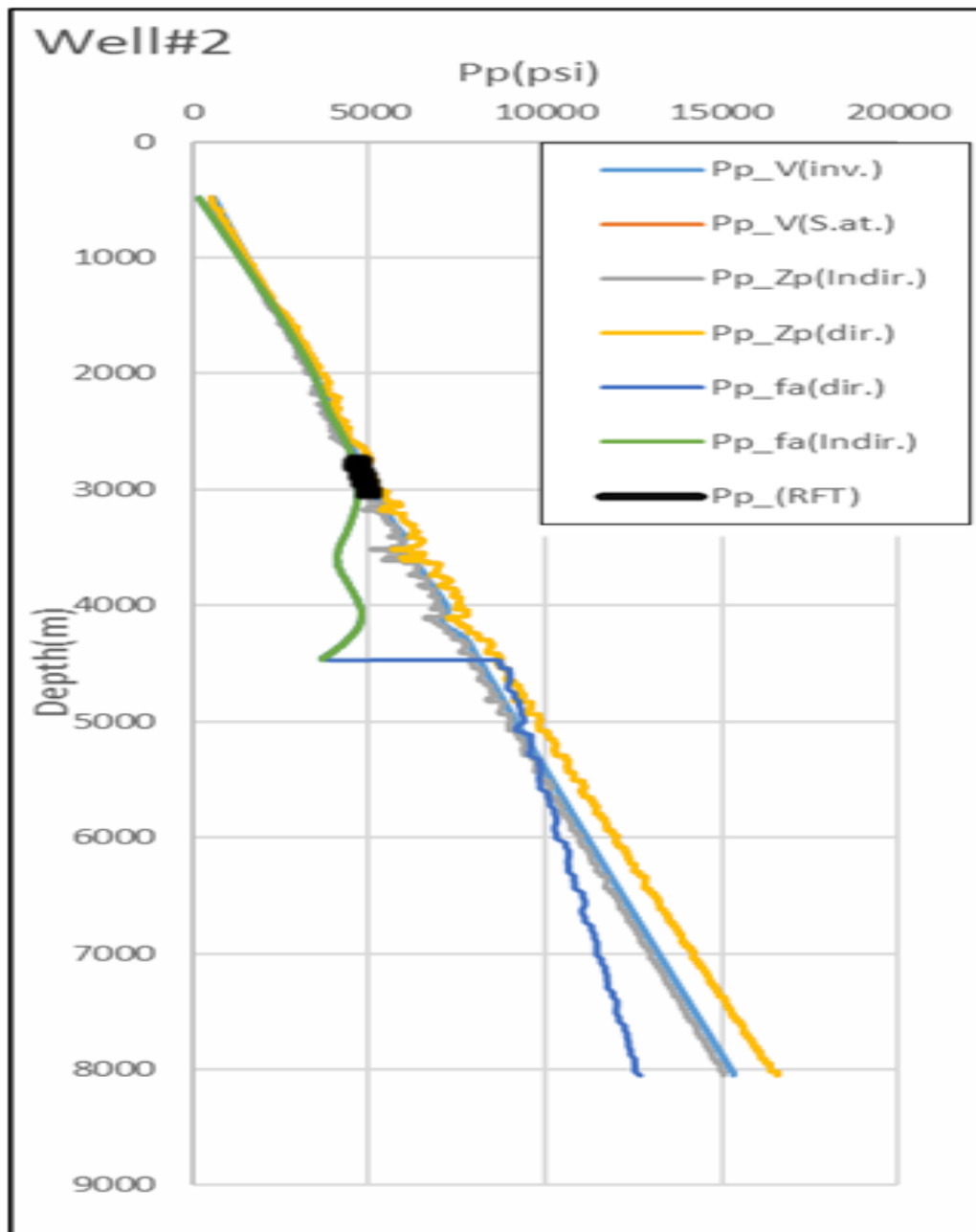
$Pp_Zp(Indir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_Zp(dir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_fa(dir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم (اصلاح شده) میرایی فرکانس لرزه‌ای

$Pp_fa(Indir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم (معمول) میرایی فرکانس لرزه‌ای

$Pp_RFT =$ داده‌های فشار منفذی چاه



شکل (۷-۲): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه-۲ و انطباق آن با داده‌های RFT

علائم کناری شکل نشان‌دهنده فشار منفذی حاصل از روش‌های مختلف بوده و به صورت زیر تعریف شده اند:

$Pp_V(inv.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت وارون لرزه‌ای

$Pp_V(S.at.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت حاصل از انالیز نشانگرهای لرزه‌ای

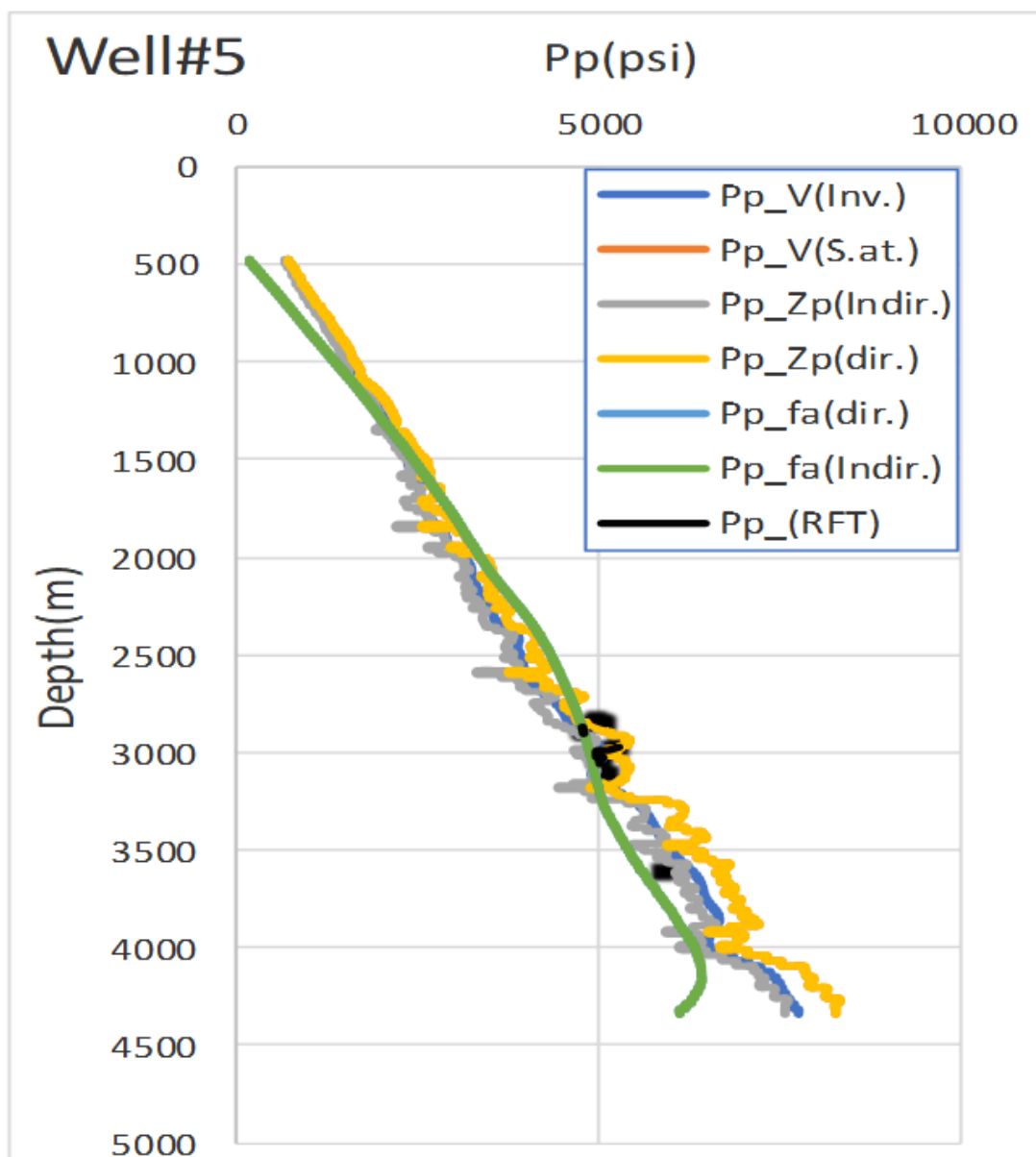
$Pp_Zp(Indir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_Zp(dir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_fa(dir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم (اصلاح شده) میرایی فرکانس لرزه‌ای

$Pp_fa(Indir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم (معمول) میرایی فرکانس لرزه‌ای

Pp_RFT = داده‌های فشار منفذی چاه



شکل (۷-۳): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه-۵ و انطباق آن با داده‌های RFT

علائم کناری شکل نشان‌دهنده فشار منفذی حاصل از روش‌های مختلف بوده و به صورت زیر تعریف شده اند:

$Pp_V(inv.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت وارون لرزه‌ای

$Pp_V(S.at.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت حاصل از انالیز نشانگرهای لرزه‌ای

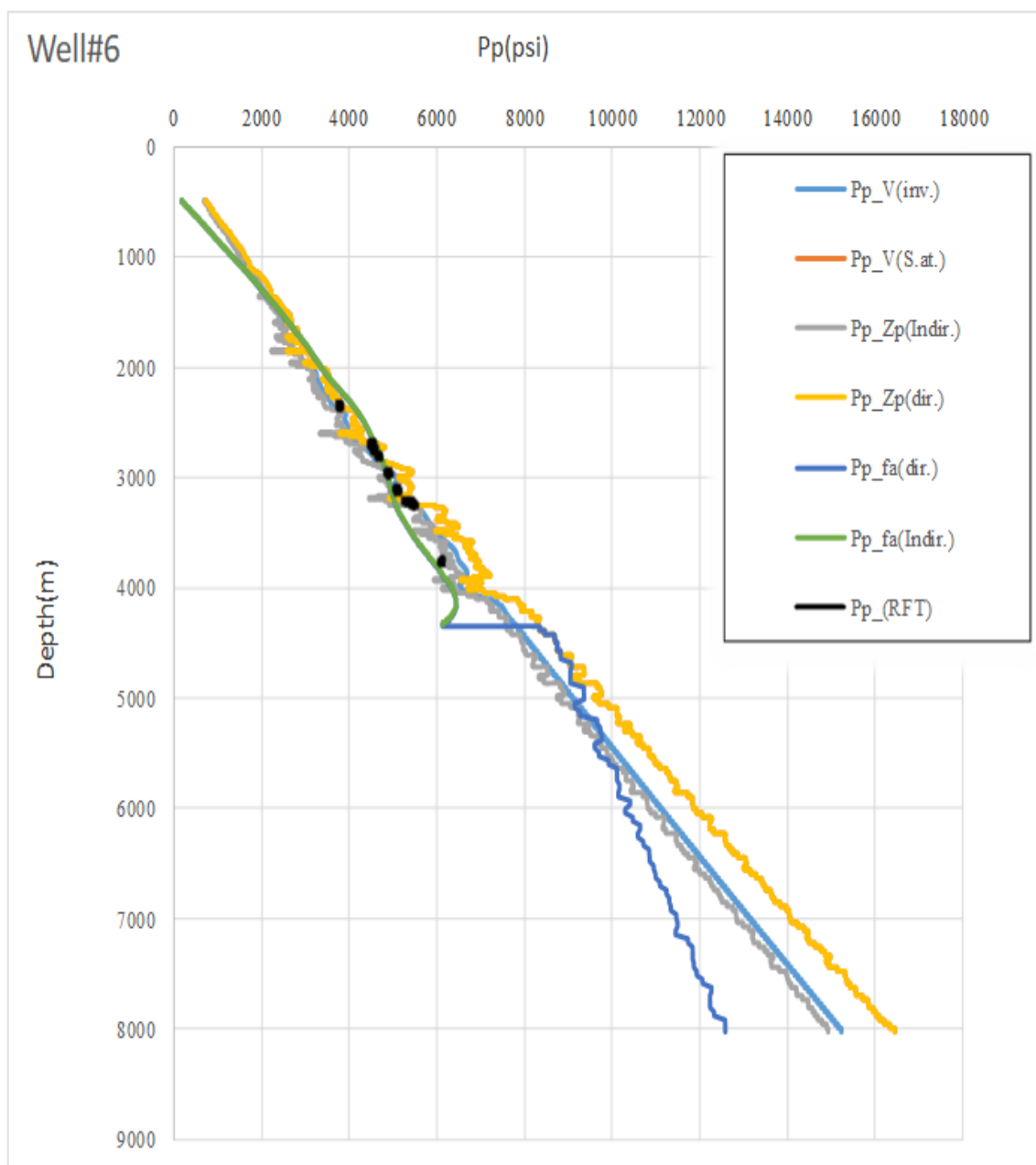
$Pp_Zp(Indir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_Zp(dir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_fa(dir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم (اصلاح شده) میرایی فرکانس لرزه‌ای

$Pp_fa(Indir.)$ = فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم (معمول) میرایی فرکانس لرزه‌ای

Pp_RFT = داده‌های فشار منفذی چاه



شکل (۷-۴): نمودار داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش‌های مختلف در محل چاه-۶ و انطباق آن با داده‌های RFT

علائم کناری شکل نشان‌دهنده فشار منفذی حاصل از روش‌های مختلف بوده و به صورت زیر تعریف شده اند:

$Pp_V(inv.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت وارون لرزه‌ای

$Pp_V(S.at.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از سرعت حاصل از انالیز نشانگرهای لرزه‌ای

$Pp_Zp(Indir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_Zp(dir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم مقاومت صوتی لرزه‌ای

$Pp_fa(dir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش مستقیم (اصلاح شده) میرایی فرکانس لرزه‌ای

$Pp_fa(Indir.) =$ فشار منفذی پیش بینی شده از روش غیرمستقیم (معمول) میرایی فرکانس لرزه‌ای

$Pp_RFT =$ داده‌های فشار منفذی چاه

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق انتظار می‌رود که نتایج پیش بینی فشار منفذی با سه روش (سرعت حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای و دو روش مقاومت صوتی) از دقت و صحت بیشتری نسبت به سه روش دیگر (سرعت وارون سازی و دو روش فرکانس میانگین) برخوردار باشند که این نتیجه در نمودار شکل‌های (۷-۱ تا ۷-۴) نیز قابل استنتاج است. این شکل‌ها نشان می‌دهد که داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده از روش سرعت وارون سازی لرزه‌ای نیز همانند روش‌های سرعت بدست آمده از آنالیز نشانگرها و مقاومت صوتی از انطباق خوبی با داده‌های واقعی برخوردار می‌باشند، ولی عیب اصلی این روش بیشتر بخاطر قدرت تفکیک پایین آن می‌باشد که قادر به تفکیک مناسب لایه‌های مخزنی از هم نبوده است. همینطور نمودارهای شکل مذکور نشان می‌دهند، علی‌رغم اینکه نتایج پیش بینی روش اصلاح شده میرایی فرکانس نسبت به روش معمول (روش غیر مستقیم) بهتر بوده است، با اینحال نتایج هر دو روش‌های میرایی فرکانس از روش‌های سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری و مقاومت صوتی پایین بوده است. هر چند که برای محدوده‌های کم عمق که داده‌های آزمایش فشار چاه وجود داشته است، نتایج پیش بینی‌های روش میرایی تا اندازه‌ای قابل قبول است، با اینحال برای اعماقی که داده‌های واقعی حاصل از آزمایش فشار چاه (RFT) برای کالیبره کردن مدل وجود نداشته است، نتایج پیش بینی فشار منفذی برای این روش نیز رضایت بخشی نبوده است.

۷-۲-۲ تجزیه و تحلیل آماری نتایج

تجزیه و تحلیل آماری نتایج این تحقیق، نشان می‌دهد که خطای استاندارد (SE_x) محاسبه شده برای روش‌های مختلف نشان داد که مقدار آن برای روش سرعت وارون‌سازی برابر با ۷۱ (psi) و برای روش سرعت بدست آمده از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای برابر با ۲۹ (psi) بوده است و این در حالی است که مقدار آن برای روش برازش مقاومت صوتی-فشار موثر برابر با ۲۸ (psi) و برای روش برازش مستقیم مقاومت صوتی-فشار منفذی مساوی ۵۰ (psi) است. همچنین خطای استاندارد برای روش فرکانس میانگین-فشار موثر برابر با ۷۵ (psi) و برای روش برازش مستقیم فرکانس میانگین-فشار منفذی برابر

با عدد ۵۷(psi) تعیین گردید. بنابراین محاسبه خطای استاندارد، نشان می‌دهد که داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده در مخازن کربناته به روش‌های برازش مقاومت صوتی-فشار موثر و سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری از دقت و صحت بیشتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار می‌باشند. دیگر روش‌های پیشنهادی به ترتیب اولویت روش برازش مستقیم مقاومت صوتی-فشار منفذی، روش برازش فرکانس میانگین-فشار منفذی، روش سرعت وارون سازی و روش برازش فرکانس میانگین- فشار فشار موثر برای پیش بینی فشار منفذی می‌باشند.

همچنین ضریب تعیین (R^2) بین داده‌های فشار منفذی پیش بینی شده و داده‌های آزمایش چاه، برای روش سرعت وارون‌سازی برابر ۰/۷۷۹۳ و برای روش سرعت بدست آمده از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای برابر با عدد ۰/۸۳۴۸ است. همچنین مقدار R^2 برای روش برازش مقاومت صوتی-فشار موثر برابر با ۰/۸۵۲۵ و برای روش برازش مستقیم مقاومت صوتی-فشار منفذی برابر با ۰/۹۱۰۳ می‌باشد و این در حالی است که این عدد برای روش برازش فرکانس میانگین- فشار موثر و برازش فرکانس میانگین- فشار منفذی به ترتیب برابر با ۰/۸۳۸۶ و ۰/۸۷۳۷ بوده است. با توجه به مقادیر فوق بالاترین میزان ضریب تعیین بین داده‌های واقعی و پیش بینی شده فشار منفذی به ترتیب مربوط به روش‌های برازش مستقیم مقاومت صوتی-فشار منفذی، روش برازش مستقیم فرکانس لرزه‌ای با فشار منفذی، روش برازش فشار موثر- مقاومت صوتی لرزه‌ای، روش برازش فرکانس میانگین با فشار موثر، روش سرعت بدست آمده از آنالیز چند نشانگری و در نهایت پایین ترین همبستگی مربوط به روش سرعت وارون لرزه‌ای است. بنابراین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پارامتر ضریب تعیین تفاوت زیادی را بین روش‌های مختلف نشان نمی‌دهد در حالی که پارامتر خطای استاندارد تفاوت قابل ملاحظه‌ای برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد که با نتایج قدرت تفکیک لایه‌های مخزنی در روش‌های مختلف سازگارتر می‌باشد.

۳-۷ یافته‌ها و نوآوری تحقیق

- در این مطالعه تلاش شد، ضمن استفاده از روش سرعت وارون‌سازی لرزه‌ای، برای اولین بار از روش سرعت حاصل از آنالیز چند نشانگری برای پیش‌بینی فشار منفذی در مخازن کربناته بهره‌گرفته شود. همانطور که در بخش‌های قبلی این مطالعه آمده است این روش نتایج خوبی داشته و در نوع خود دست‌آوری نو برای این مطالعه محسوب می‌شود.
- بکارگیری روش مقاومت صوتی بصورت مقایسه‌ای با استفاده از دو مدل مستقیم (برازش با فشار منفذی) و غیر مستقیم (برازش با فشار موثر) برای پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته، برای اولین بار در این تحقیق میسر شد. علی‌رغم کیفیت بهتر نتایج در روش غیر مستقیم، بطور کلی بهره‌گیری از روش‌های مقاومت صوتی برای پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته از مزیت‌های دیگر این مطالعه محسوب می‌شود.
- در این تحقیق، روش اصلاح شده میرایی فرکانس (روش برازش مستقیم با داده‌های فشار منفذی) برای اولین بار در این مطالعه در پیش‌بینی فشار منفذی مخازن کربناته مطرح و استفاده شده است و نتایج نسبت به روش قبلی میرایی فرکانس بهبود داده شد. بنابراین معرفی روش جدید میرایی فرکانسی از دست‌آوردهای دیگر این تحقیق می‌باشد.

۴-۷ پیشنهادات

- با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق و به منظور پیشبرد اهداف عملیاتی و تکمیل نتایج در پروژه‌های پیش‌بینی فشار منفذی میادین نفتی پیشنهادهای زیر قابل بررسی خواهند بود:
- با توجه به عدم دقت کافی روش میرایی فرکانس که نسبت به محتوای فرکانسی و تغییرات دامنه داده‌های لرزه‌ای حساس است، و از آنجائی که در این مطالعه از داده‌های برانبارش شده با پردازش PSTM^۱ استفاده شده است، که در آن توجه کافی به حفظ دامنه واقعی

^۱ Pre-Stack Time Migration

داده‌ها نشده بود، بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی و تکمیلی برای بهبود نتایج این روش از داده‌های PSDM^۱ استفاده شود که با پردازش‌های ویژه میزان نوفه داده‌های لرزه‌ای تقلیل یافته است.

- با توجه به اهمیت زیادی که پیش بینی فشار منفذی در شناسایی نواحی و مخازن هیدروکربوری با فشار بالا دارد، پیشنهاد می‌شود، در کارهای تکمیلی از نشانگرهای دیگر بویژه از داده‌های قبل از برانبارش نیز در پیش بینی فشار منفذی بهره‌گیری و نتایج روش‌ها با هم مقایسه شود.

^۱ Pre-Stack Depth Migration

مراجع:

آدیم، ع؛ ریاحی، م.ع؛ و باقری، م.؛ (۱۳۹۷). تخمین فشار منفذی به روش های ایتون باورز با استفاده از داده های لرزه نگاری و چاه پیمایی، نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴ شماره ۲، صفحات ۲۶۷-۲۷۵.

آزادپور، م. و شادمنامن، ن.؛ (۱۳۹۳). بررسی مکانیزم های ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میداین هیدروکربنی جنوب ایران، مجله پژوهش نفت، شماره ۸۸، صفحه ۱۴۷-۱۶۰.

حجت نیا، پ.؛ و ریاحی، م.ع.؛ (۱۳۹۱). برآورد فشار منفذی با استفاده از داده های لرزه ای بازتابی در یک میدان نفتی، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۳، صفحه ۵۳-۶۰.

سلیمانی، ح. ر.؛ سکوتی، م.ر. و ریاحی، م.ع.؛ (۱۳۹۱). پیش بینی فشار منفذی با استفاده از وارون سازی و تحلیل سرعت لرزه ای، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۴، صفحه ۵۷-۷۰.

شرکت ملی نفت ایران (۱۳۹۶). گزارش زمین شناسی تکمیلی چاه ۲۵ آزادگان.

عبداللهی فرد، ا.؛ علوی، س. ا.؛ مختاری، م.؛ (۱۳۸۵). چهار چوب ساختاری دشت آبادان (جنوب غرب ایران) و شمال خلیج فارس براساس داده های ژئوفیزیکی، مجله علوم دانشگاه تهران، دوره ۳۲، ص. ۱۲۰-۱۰۷.

علیزاده، ب.؛ سعادت، ح.؛ جمال دین، ص.؛ حسینی، س. ح.؛ گندمی ناجی، ا. ر.؛ (۱۳۹۰). مطالعه نفت های مخازن بورگان و گدوان در میدان نفتی آزادگان با استفاده از روش کروماتوگرافی گازی، ص. ۱-۷.

محمدی، م.؛ سلیمانی، ب.؛ و محمودیان، م.؛ (۱۳۹۶). پیش بینی فشار غیرعادی سازند با استفاده از داده های سرعت لرزه ای سه بعدی، میدان کوپال، مجله پژوهش نفت، شماره ۹۷، صفحه ۱۱۵-۱۰۳.

نوری، م.؛ شادی زاده، س. ر.؛ ریاحی، م.ع. و جمالی، ج.؛ (۱۳۹۲). بررسی روش های تخمین فشار منفذی و تخمین فشار منفذی میدان سفید زاخو با استفاده داده های لرزه نگاری، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۰۵، صفحه ۷۱-۷۸.

نیک طبع، م. ر.؛ (۱۳۸۱). گزارش تکمیلی زمین شناسی چاه شماره ۵ میدان آزادگان، اداره کل زمین شناسی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران.

- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of science*, 307(9), pp.1064-1095.
- Alnes, J. R., Lilburn, R. A., Osborne, M. J., & Swarbrick, R. E. (1998). Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation: discussion. *AAPG bulletin*, 82(12), 2266-2269.
- Atashbari, V., & Tingay, M. R. (2012). Compressibility method for pore pressure prediction. In Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Athy, L. F. (1930). Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *AAPG Bulletin*, 14(1), 1-24.
- Bachrach, R., Noeth, S., Banik, N., Sengupta, M., Bunge, G., Flack, B., & Leu, L. (2007). From pore-pressure prediction to reservoir characterization: A combined geomechanics-seismic inversion workflow using trend-kriging techniques in a deepwater basin. *The Leading Edge*, 26(5), 590-595.
- Bahmaei, Z., & Hosseini, E. (2019). Pore pressure prediction using seismic velocity modeling: case study, Sefid-Zakhor gas field in Southern Iran. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 1-12.
- Bakulin, A., Woodward, M., Liu, Y., Zdraveva, O., Nichols, D., & Osypov, K. (2010). Application of steering filters to localize anisotropic tomography with well data. In 2010 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Banik, N., Koesoemadinata, A., Wagner, C., Inyang, C., & Bui, H. (2013). Pre-drill pore-pressure prediction directly from seismically derived acoustic impedance. In 2013 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Banik, N., Koesoemadinata, A., Wagner, C., Inyang, C., Agarwal, V., & Priezzhev, I. (2014). Pre-drill prediction of subsalt pore pressure from seismic impedance. *The Leading Edge*, 33(4), 400-412.
- Barker, C. (1972). Aquathermal Pressuring--Role of Temperature in Development of Abnormal-Pressure Zones: Geological Notes. *AAPG Bulletin*, 56(10), 2068-2071.
- Barker, C. (1990). Calculated Volume and Pressure Changes during the Thermal Cracking of Oil to Gas in Reservoirs (1). *AAPG Bulletin*, 74(8), 1254-1261.
- Batzle, M., Hofmann, R., Prasad, M., Kumar, G., Duranti, L., & Han, D. H. (2005). Seismic attenuation: Observations and mechanisms. In 2005 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Bell, F. (2002). *Engineering treatment of soils*. CRC Press.
- Biot, M., & Willis, D. (1957). The theory of consolidation. *J. Appl Elastic Coefficients of the Mech*, 24, 594-601.

Bowers, G. L. (1995). Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction. *SPE Drilling & Completion*, 10(02), 89-95.

Burst, J. F. (1969). Diagenesis of Gulf Coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration. *AAPG bulletin*, 53(1), 73-93.

Carcione, J. M., & Helle, H. B. (2002). Rock physics of geopressure and prediction of abnormal pore fluid pressures using seismic data. *CSEG Recorder*, 27(7), 8-32.

Chopra, S., & Huffman, A. R. (2006). Velocity determination for pore-pressure prediction. *The Leading Edge*, 25(12), 1502-1515.

Contreras, O. M., Tutuncu, A. N., Aguilera, R., & Hareland, G. (2011). A case study for pore pressure prediction in an abnormally sub-pressured western Canada Sedimentary Basin. In *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.

Daines, S. R. (1982). Aquathermal Pressuring and Geopressure Evaluation: GEOLOGIC NOTES. *AAPG Bulletin*, 66(7), 931-939.

Den Boer, L. D., Sayers, C. M., Nagy, Z. R., Hooyman, P. J., & Woodward, M. J. (2006). Pore pressure prediction using well-conditioned seismic velocities. *first break*, 24(5), 43-49.

Dewantari, B. T., Supriyanto, S., & Ronoatmojo, I. S. (2018). Comparative study using seismic P-wave velocity and acoustic impedance parameter to pore pressure distribution: Case study of North West Java Basin. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2023, No. 1, p. 020274)*. AIP Publishing LLC.

Dugan, B., & Sheahan, T. C. (2012). Offshore sediment overpressures of passive margins: Mechanisms, measurement, and models. *Reviews of Geophysics*, 50(3).

Dutta, N. C. (1983). Shale Compaction and Abnormal Pore-Pressures: A Model of Geopressures in the Gulf Coast Basin. In *1983 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists.

Dutta, N. C. (2002). Geopressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead. *Geophysics*, 67(6), 2012-2041.

Dutta, N. C., & Khazanehdari, 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*, 25(12), 1528-1539.

Eaton, B. A. (1975). The equation for geopressure prediction from well logs. In *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Society of Petroleum Engineers.
Eaton, B. A. (1976). Graphical method predicts geopressures worldwide. *World oil*; (United States), 183(1).

El-Werr, A., Shebl, A., El-Rawy, A. & Al-Gundor, N., (2017). Pre-drill pore pressure prediction using seismic velocities for prospect areas at Beni Suef Oil Field, Western Desert, Egypt. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7(4), pp.1011-1021.

Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., & Gregory, A. R. (1974). Formation velocity and density-the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6), 770-780.

Gibson, R. E. (1958). The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time. *Geotechnique*, 8(4), 171-182.

Gurevich, B. (2004). A simple derivation of the effective stress coefficient for seismic velocities in porous rocks. *Geophysics*, 69(2), 393-397.

Hampson Russell, (2014). *Emerge Guide* Hampson Russell Software.

Haris, S., & Vobbilisetty, S. (2017). U.S. Patent No. 9,807,031. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Hermanrud, C., Wensaas, L., Teige, G. M. G., Bolas, H. N., Hansen, S., & Vik, E. (1998). *Memoir 70, Chapter 4: Shale Porosities from Well Logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) Show No Influence of Overpressuring.*

Hicks, W. G., & Berry, J. E. (1956). Application of continuous velocity logs to determination of fluid saturation of reservoir rocks. *Geophysics*, 21(3), 739-754.

Hofmann, R., Xu, X., Batzle, M., Prasad, M., Furre, A. K., & Pillitteri, A. (2005). Effective pressure or what is the effect of pressure. *The Leading Edge*, 24(12), 1256-1260.

Hoskin, E., & O'Connor, S. A. (2016). The Influence of Rock Properties on Velocity Data with Respect to Pressure Prediction—with Particular Focus on Seismic Velocity Data. *Journal of Earth Sciences*, 2, 19-34.

Hottmann, C. E., & Johnson, R. K. (1965). Estimation of formation pressures from log-derived shale properties. *Journal of Petroleum Technology*, 17(06), 717-722.

Hutomo, P. S., Rosid, M. S., & Haidar, M. W. (2019). Pore Pressure Prediction Using Eaton and Neural Network Method in Carbonate Field “X” Based on Seismic Data. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 546, No. 3, p. 17-32). IOP Publishing.

Kelly, M. C., Skidmor, C. M., & Cotton, R. D. (2005). Pressure Prediction for Large Surveys. In *2005 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists.

Khaksar, A., Griffiths, C., & McCann, C. (1999). Effective stress coefficient for P- and S-wave velocity and quality factor in sandstone, Example from Cooper Basin-Australia. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999* (pp. 192-195). Society of Exploration Geophysicists.

- Kumar, B., Niwas, S., & Mangaraj, B. K. (2012). Pore pressure prediction from well logs and seismic data. In 9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics.
- Kümpel, H. J. (1991). Poroelasticity: parameters reviewed. *Geophysical Journal International*, 105(3), 783-799.
- Lahann, R. W., & Swarbrick, R. E. (2011). Overpressure generation by load transfer following shale framework weakening due to smectite diagenesis. *Geofluids*, 11(4), 362-375.
- Lei, T., Yin, X., & Zong, Z. (2018). Pore-pressure prediction methods using normal compaction trend based on seismic inversion. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018 (pp. 1509-1513). Society of Exploration Geophysicists.
- Lei, T., Yin, X., & Zong, Z. (2019). Pore pressure prediction from bulk modulus in shale based on rock physics modeling. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019 (pp. 1808-1812). Society of Exploration Geophysicists.
- Li, F., Verma, S., Zhou, H., Zhao, T., & Marfurt, K. J. (2016). Seismic attenuation attributes with applications on conventional and unconventional reservoirs. *Interpretation*, 4(1), SB63-SB77.
- Luo, X., & Vasseur, G. (1992). Contributions of Compaction and Aquathermal Pressuring to Geopressure and the Influence of Environmental Conditions (1). *AAPG bulletin*, 76(10), 1550-1559.
- Mannon, T. P., & Young, R. A. (2017). Pre-drill pore pressure modelling and post-well analysis using seismic interval velocity and seismic frequency-based methodologies: A deepwater well case study from Mississippi Canyon, Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 79, 176-187.
- Mondol, N. H., Bjørlykke, K., Jahren, J., & Høeg, K. (2007). Experimental mechanical compaction of clay mineral aggregates—Changes in physical properties of mudstones during burial. *Marine and Petroleum Geology*, 24(5), 289-311.
- Mouchet, J. P., & Mitchell, A. (1989). *Abnormal Pressures While Drilling: Origins, Prediction, Detection. Evaluation*. Paris: Elf EP-Editions, Editions Technip, 255.
- Noah, A. Z. (2016). New pore pressure evaluation techniques for LAGIA-8 well, Sinai, Egypt as a case study. *International Journal of Geosciences*, 7(1), 32-46.
- Nowick, A., & Berry, D. (1972). *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Acad. Press, New York, 57.
- Parnell, P., Dayton, P. K., Lennert-Cody, C. E., Rasmussen, L. L., & Leichter, J. J. (2006). Marine reserve design: optimal size, habitats, species affinities, diversity, and ocean microclimate. *Ecological Applications*, 16(3), 945-962.
- Pennebaker, E. S. (1968). Seismic data indicate depth, magnitude of abnormal pressure. *World Oil*, 166(7), 73-78.

- Prasad, M., & Manghnani, M. H. (1997). Effects of pore and differential pressure on compressional wave velocity and quality factor in Berea and Michigan sandstones. *Geophysics*, 62(4), 1163-1176.
- Ramdhan, A. M., & Goult, N. R. (2010). Overpressure-generating mechanisms in the Peciko field, lower Kutai Basin, Indonesia. *Petroleum Geoscience*, 16(4), 367-376.
- Ramdhan, A. M., & Goult, N. R. (2011). Overpressure and mudrock compaction in the Lower Kutai Basin, Indonesia: A radical reappraisal. *AAPG bulletin*, 95(10), 1725-1744.
- Rasolof, P., & Tonellot, T. (2011). U.S. Patent No. 7,974,785. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Salehi, S., & Mannon, T. (2013). Application of Seismic Frequency Based Pore Pressure Prediction in Well Design: Review of an Integrated Well Design Approach in Deep Water Gulf of Mexico. *Journal of Geology & Geosciences*, 2013.
- Sarker, R., & Batzle, M. (2008). Effective stress coefficient in shales and its applicability to Eaton's equation. *The Leading Edge*, 27(6), 798-804.
- Sayers, C. M., den Boer, L. D., Nagy, Z. R., & Hooyman, P. J. (2006). Well-constrained seismic estimation of pore pressure with uncertainty. *The Leading Edge*, 25(12), 1524-1526.
- Siggins, A. F., Dewhurst, D. N., & Tingate, P. R. (2001). Stress path, pore pressure and microstructural influences on Q in Carnarvon Basin Sandstones. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Soleymani, H., & Riahi, M. A. (2012). Velocity based pore pressure prediction—A case study at one of the Iranian southwest oil fields. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 94, 40-46.
- Suwannasri, K., Promrak, W., Utitsan, S., Chaisomboonpan, V., Groot, R. J., Sognnes, H. I., & Morley, C. K. (2014). Reducing the variation of Eaton's exponent for overpressure prediction in a basin affected by multiple overpressure mechanisms. *Interpretation*, 2(1), SB57-SB68.
- Swarbrick, R. E., & Osborne, M. J. (1998). *Memoir 70, Chapter 2: Mechanisms that Generate Abnormal Pressures: an Overview*.
- Swarbrick, R. E., Osborne, M. J., & Yardley, G. S. (2002). The magnitude of overpressure from generating mechanisms under realistic basin conditions. *AAPG Memoir*, 76, 1-12.
- Swarbrick, R., (2012). Review of pore-pressure prediction challenges in high-temperature areas. *The Leading Edge*, 31(11), pp.1288-1294.
- Swarbrick, R., Lahann, R., O'Connor, S., & Hoskin, E. (2013, June). Limitations of seismic pore pressure prediction-what is the alternative?. In *75th EAGE Conference & Exhibition-Workshops* (pp. cp-349). European Association of Geoscientists & Engineers.

- Terzaghi, K. (1943). Earth Pressure and Shearing Resistance of Plastic Clay: A Symposium: Liner-Plate Tunnels on the Chicago (IL) Subway. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 108(1), 970-1007.
- Tingay, M. R., Hillis, R. R., Swarbrick, R. E., Morley, C. K., & Damit, A. R. (2009). Origin of overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei. AAPG Bulletin, 93(1), 51-74.
- 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.
- Tissot, B. P., Pelet, R., & Ungerer, P. H. (1987). Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation. AAPG bulletin, 71(12), 1445-1466.
- Todd, T., & Simmons, G. (1972). Effect of pore pressure on the velocity of compressional waves in low-porosity rocks. Journal of Geophysical Research, 77(20), 3731-3743.
- Van Golf-Racht, T. D. (1982). Fundamentals of fractured reservoir engineering (Vol. 12). Elsevier.
- Van Ruth, P., Hillis, R., & Tingate, P. (2004). The origin of overpressure in the Carnarvon Basin, Western Australia: implications for pore pressure prediction. Petroleum Geoscience, 10(3), 247-257.
- Wang, C. Y., & Manga, M. (2010). Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. Geofluids, 10(1-2), 206-216.
- Winkler, K., & Nur, A. (1979). Pore fluids and seismic attenuation in rocks. Geophysical Research Letters, 6(1), 1-4.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., & Gardner, G. H. F. (1958). An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. Geophysics, 23(3), 459-493.
- Young, R. A., Pankratov, A. B., & Greve, J. F. (2004). Method of seismic signal processing. USA Patent No. 6,681,185. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Yu, L., Sun, S. Z., Liu, Z., Dong, N., Ma, Y., & Yang, W. (2015). A New Method for Pore Pressure Prediction Using Logging and Seismic Data. In 2015 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists.
- Zhang, H., Liu, H., Wu, S., Sun, J., Yang, C., Xie, Y., ... & Wang, J. (2018). Pre-drilling prediction techniques on the high-temperature high-pressure hydrocarbon reservoirs offshore Hainan Island, China. Journal of Ocean University of China, 17(1), 72-82.

Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1), 50-63.

Abstract

The pore pressure prediction has a great importance in assessing drilling risk potential, determining mud weight and well control. Detailed information on the subsurface layers pressure is obtained using well pressure test data (RFT). Nowadays, indirect seismic methods are also rapidly expanding their roles in pore pressure estimation of non-drilled areas. Since the most pore pressure prediction models have been developed for sandstone reservoirs, therefore in this study it is firstly attempt to present new methods for pore prediction and the available models are then also modified so that to have acceptable results in carbonate reservoirs.

First of all, by analyzing all effective mechanisms, it was shown that the unbalanced compaction is the main effective mechanism for pore pressure in reservoirs in one of the oil field located in the southwestern part of Iran. To achieve the goals, seismic velocity, acoustic impedance and average frequency were then used in six different methods to predict pore pressure within the study area. Seismic velocities that were estimated directly by inversion of seismic data and also by statistical multi-attribute seismic analysis, used to predict pore pressure. Moreover, the acoustic impedance (AI) and frequency attenuation (FA) data were both used as two different fitting methods with pore pressure (direct) and with effective pressure (indirect) to predict pore pressure of the reservoirs.

The verification of cross sections of pore pressure cube of various methods, indicated that the velocity method based on multi-attribute seismic analysis, as well as both AI methods clearly discriminated the Ilam, Sarvak, Bourgan and Fahlyian reservoirs from their top and bottom layers in the study area. In addition, the horizontal predicted pore pressure maps of these three methods clearly illustrate the impact of buried channels on lateral changes of pore pressure in Sarvak carbonate reservoir which is the main reservoir within the field of under study. However, the other three methods, namely the inversion velocity method and the two frequency attenuation methods, did not well performance in detecting reservoir layers and the effect of buried channels on pore pressure changes.

The statistical analysis of the results also show that the determination coefficient (R^2) between the predicted pore pressure and the well (RFT) data is different for six methods. The R^2 , from high to low value respectively related to the methods of; the direct acoustic impedance method with $R^2 = 0.9103$, the method based on pore pressure to average frequency data fitting (direct) with $R^2 = 0.8737$, the indirect acoustic impedance method with $R^2 = 0.8525$, the method based on effective pressure to average frequency data fitting (indirect) with $R^2 = 0.8386$, the multi-attribute analysis velocity method with $R^2 = 0.8348$ and the inversion velocity method with $R^2 = 0.7792$.

Furthermore, the standard error (SE_x) calculation for these different methods shows that SE_x was respectively 28(psi) and 50(psi) for the indirect (fitting of effective stress to AI data) and direct (fitting of AI to pore pressure data) AI methods. It was 29(psi) for the multi-attribute analysis velocity method. These results indicate high accuracy and

performance of these three pore predication models for identifying of all oil reservoirs from their top and bottom layers. Whereas, the standard error of other three methods including; the direct seismic frequency attenuation (fitting of average frequency to pore pressure data) method is 57(psi), that of the inversion velocity method is 71(psi) and finally that of the indirect seismic frequency attenuation (fitting of average frequency to effective pressure data) method is 75(psi). These results confirm those obtained by of the prepared cross and horizontal pore pressure sections of these methods that indicated they are unable to resolve all oil reservoir layers in the study area properly.

Keywords: *Pore pressure, seismic velocity, acoustic impedance, seismic frequency attenuation, loading mechanism, carbonate reservoirs.*



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mineral Exploration

**Seismic velocity, acoustic impedance and frequency
attenuation methods for pore pressure prediction in
carbonate reservoirs**

By: Iraj Maddahi

Supervisors:

Prof. Dr. Ali Moradzadeh

Dr. Ali Nejati Kalateh

February 2020