

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی نفت و ژئوفیزیک

مقایسه پاسخ مدل های فیزیک سنگ جهت بررسی پاسخ لرزه ای به تغییرات سیال یکی از
مخازن نفتی ماسه ای ایران

دانشجو : بهاره فریدونی

اساتید راهنما :

دکتر علی مرادزاده

دکتر امین روشندل کاهو

استاد مشاور :

دکتر سید حسام الدین کاظمینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۴

شماره: ۲۶۹۳/۱۶۲۹
تاریخ: ۹۴/۱۲/۲
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم بهاره فریدونی به شماره دانشجویی ۹۲۱۰۹۰۴، رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف تحت عنوان مقایسه پاسخ مدل های فیزیک سنگ جهت بررسی پاسخ لرزه ای به تغییرات سیال یکی از مخازن نفتی ماسه ای ایران که در تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز: ۱۸.۷۵) ☒ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

- ۱- عالی (۲۰-۱۹)
۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹-۱۸)
۳- خوب (۱۷/۹۹-۱۶)
۴- قابل قبول (۱۵/۹۹-۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علی مرادزاده	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر امین روشندل کاهو	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر سید حسام الدین کاظمینی	-	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر سوسن ابراهیمی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	

رئیس دانشکده:

ماحصل آموخته ایمم را تقدیم می کنم به

آمان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زینبی ام است

به استوارترین نکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در کتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس توانم بگویم.

ره آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان شاکرم، باشد که حاصل تلاشم، نیم گونه غبار هستیانتان

را بر دایم.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تشکر و قدردانی

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. لذا اکنون که در سایه‌سار بنده نوازی‌هایش پایان نامه حاضر به انجام رسیده است، بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگوارانی به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود، هرگز این پایان نامه به انجام نمی‌رسید.

ابتدا از اساتید گرانقدر جناب آقایان دکتر علی مرادزاده و دکتر امین روشندل کاهو که زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده داشتند، کمال سپاس را دارم.

از استاد عالی قدرم جناب آقای دکتر سید حسام الدین کاظمینی که زحمت مشاوره این پایان نامه را متحمل شدند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب بهاره فریدونی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت (اکتشاف) دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه " مقایسه پاسخ مدل های فیزیک سنگ جهت بررسی پاسخ لرزه ای به تغییرات سیال یکی از مخازن نفتی ماسه ای ایران" تحت راهنمایی دکتر علی مرادزاده و دکتر امین روشندل کاهو متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا «Shahroud University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ ۱۳۹۴/ ۱۱ / ۲۹

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

چکیده

تغییرات ایجاد شده در خواص سیگنال لرزه‌ای که وابسته به مقدار تولید نفت و سیال جانشین شده در مخزن می‌باشد، می‌تواند امکان مجدد برداشت لرزه‌ای از میادین نفتی را فراهم کند. در مطالعه حاضر هدف اصلی این است که با بررسی روابط مختلف فیزیک سنگ، مدل مناسب برای مخزن ماسه سنگی یکی از میادین نفتی خلیج فارس انتخاب شود و سپس به کمک آن، اثرات جانشینی سیال بر روی سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی محاسبه شده و در مرحله بعد تغییرات ایجاد شده بر خواص سیگنال لرزه‌ای با استفاده از مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای بررسی شود.

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، دو مدل فیزیک سنگ گسمن و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن، به عنوان مدل‌های فیزیک سنگ مناسب برای محاسبه مدول حجمی خشک سنگ انتخاب شدند. نتایج حاصل از جانشینی سیال در دو سناریوی مختلف، درصد تغییرات سرعت موج تراکمی در مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن را در هر دو سناریو در چاه W_1 و W_2، بیش از ۱۰ درصد و برای اشباع‌شدگی ناهمگن کمتر از یک درصد نشان می‌دهد. مقادیر ضرایب تعیین (R^2) بین سرعت موج تراکمی محاسبه شده بر اساس مدل گسمن و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین، در دو چاه W_1 و W_2 به ترتیب برابر با ۰/۸۲۵ و ۰/۶۹۶ به دست آمده است. همچنین مقادیر میانگین مربعات خطا (MSE) در این دو چاه نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۸۹ و ۰/۱۱۳ است. بنابراین مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین، مدل مناسبی برای این مخزن تشخیص داده شد. با توجه به سناریوهای در نظر گرفته شده برای جانشینی سیال و نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای می‌توان به این نتیجه رسید زمانی که میزان تولید نفت از مخزن حداقل به ۱۵ درصد ذخیره برجای آن می‌رسد و در صورتی که حداقل ۱۰ درصد گاز جانشین نفت شود، دامنه سیگنال لرزه‌ای در بالای مخزن به دلیل کاهش سرعت موج تراکمی افزایش یافته و می‌توان مجدداً از میدان مورد نظر برداشت لرزه‌ای انجام داد. البته این امکان در صورتی فراهم خواهد شد که توزیع سیال در مخزن بصورت همگن باشد. در غیر این صورت اگر اشباع‌شدگی مخزن از نوع ناهمگن باشد، به ازای تولید بیشتری از مخزن امکان مجدد برداشت لرزه‌ای از میدان فراهم خواهد شد. نتایج حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای برای شناسایی جانشینی سیال نشان می‌دهد که از بین نشانگرهای پوش دامنه، مشتق اول زمانی پوش دامنه، مشتق دوم زمانی پوش دامنه، لحظه‌ای تربیعی و نرمی، دو نشانگر پوش دامنه لرزه‌ای و نرمی تغییرات حاصل از جانشینی سیال را بهتر نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: فیزیک سنگ، مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای، نشانگرهای لرزه‌ای، جانشینی سیال.

فهرست

فصل اول مقدمه و کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه مطالعات	۳
۳-۱ اهمیت و ضرورت مطالعه	۵
۴-۱ اهداف پایان‌نامه و روش تحقیق	۶
۵-۱ فصل‌بندی پایان‌نامه	۷
فصل دوم مبانی مدل سازی فیزیک سنگ و داده‌های لرزه‌ای	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ تفاوت فیزیک سنگ و پتروفیزیک	۱۰
۳-۲ عوامل تاثیرگذار بر خواص الاستیک سنگ	۱۰
۴-۲ مدل‌های فیزیک سنگ	۱۲
۱-۴-۲ مدل گسمن و جانشینی سیال	۱۲
۲-۴-۲ جانشینی سیال بدون استفاده از سرعت موج برشی یا مدول حجمی سنگ خشک	۲۳
۳-۴-۲ سایر مدل‌های تجربی و تئوری	۲۵
۵-۲ لرزه‌نگاری	۳۵
۱-۵-۲ ضریب بازتاب	۳۶
۶-۲ مدل‌سازی لرزه‌ای	۳۷
۱-۶-۲ مقدمه	۳۷
۲-۶-۲ کاربرد مدل‌سازی لرزه‌ای	۳۸
۳-۶-۲ مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای	۳۹

۴۱	۲-۶-۳ محاسبه عددی پاسخ لرزه‌ای از مدل
۴۴	۷-۲ نشانگرهای لرزه‌ای
۴۴	۱-۷-۲ محاسبه نشانگرها با استفاده از ردلرزه مختلط
۴۹	فصل سوم معرفی زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و داده‌های موجود
۵۰	۱-۳ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
۵۰	۲-۳ داده‌های مورد استفاده
۵۹	فصل چهارم تخمین سرعت موج برشی و مدل‌سازی فیزیک سنگی
۶۰	۱-۴ مقدمه
۶۰	۲-۴ تخمین سرعت موج برشی
۶۲	۱-۲-۴ نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون
۶۶	۲-۲-۴ بررسی صحت نگار سرعت موج برشی تخمین زده شده برای سایر چاه‌ها
۶۸	۳-۴ مدل‌سازی فیزیک سنگ
۷۰	۱-۳-۴ بررسی شرایط مخزن به لحاظ تحکیم‌یافتگی و سیمان‌شدگی
۷۴	۲-۳-۴ بررسی اثرات نوع اشباع‌شدگی بر خواص الاستیسیته مخزن
۷۶	۳-۳-۴ مقایسه و انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب برای مخزن
۸۵	پ) مدل دیوورکین-نور
۸۸	۴-۳-۴ نتیجه‌گیری و انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب برای جانشینی سیال
۹۰	۳-۴ جانشینی سیال و تغییرات سرعت و چگالی سنگ
۹۵	فصل پنجم مدل‌سازی لرزه‌ای و نشانگرهای لرزه‌ای
۹۶	۱-۵ مقدمه
۹۶	۲-۵ مراحل کار

۳-۵	وارد کردن داده‌ها به نرم‌فزار همپسون-راسل و اعمال چکشات	۹۷
۴-۵	رسم افق‌های لرزه‌ای	۹۸
۵-۵	استخراج موجک	۹۸
۶-۵	مدل‌سازی الاستیک یک بعدی	۹۹
۷-۵	مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای با استفاده از روش ردیابی پرتو	۱۰۳
۸-۵	استفاده از نشانگرها	۱۱۲
۱-۸-۵	نتایج مربوط به نشانگر پوش دامنه	۱۱۲
۲-۸-۵	نتایج مربوط به نشانگرهای مشتق اول زمانی پوش دامنه، مشتق دوم زمانی پوش دامنه و دامنه لحظه‌ای	
	تربيعی	۱۱۵
۳-۸-۵	نتایج مربوط به نشانگر نرمی	۱۲۲
	فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۲۵
۱-۶	نتیجه‌گیری	۱۲۶
۲-۶	پیشنهادات	۱۲۹
	منابع	۱۳۱
	پیوست الف: تخمین سرعت موج برشی با استفاده از روش‌های تجربی	۱۳۷
	پیوست ب: نمودارهای مربوط به تغییرات سرعت و چگالی بعد از جانشینی سیال و مقایسه بین سرعت‌های موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از دو مدل فیزیک سنگ	۱۴۷
	پیوست پ: استخراج موجک لرزه‌ای	۱۵۵
	پیوست ت: نمودارهای مربوط به مدل‌سازی الاستیک یک بعدی	۱۵۹
	پیوست ث: نتایج مربوط به مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای و اعمال نشانگرها در چاه W_2	۱۶۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): فلوچارت مراحل انجام کار در این پایان‌نامه. ۸.....
- شکل (۱-۲): الف) توزیع اشباع‌شدگی آب و نفت در نتیجه شبیه‌سازی اثر تزریق آب (از سمت چپ) به یک مخزن دربردارنده نفت و آب. مقیاس تمام شکل‌ها از یک طول موج لرزه‌ای کوچکتر است. ب) مربوط به آمین تکه است. فشار منفذی القا شده در سیالات، در مقیاس‌های کوچکتر از طول پخش L_c ، به تعادل می‌رسند و رفتاری مانند یک سیال موثر همگن (همگن) محلی دارد. مشخصه طول پخش به خواص سیال، تراوایی سنگ و فرکانس لرزه‌ای بستگی دارد. ج) مربوط به آمین تکه است. توزیع سیالات منفذی به صورت تکه‌ای می‌باشد. فشار منفذی القا شده به تعادل نرسیده و باعث ایجاد مدول حجمی بیشتری از تکه به تعادل رسیده در شکل (ب) می‌شود (ماوکو و موکرچی، ۱۹۹۸). ۱۷.....
- شکل (۲-۲): مفهوم فیزیکی تخلخل بحرانی (نور و همکاران، ۱۹۹۸). ۲۷.....
- شکل (۳-۲): بهبود یافته حد پایینی هشین-اشتریکمن با فشارهای محصور مختلف برای ماسه کوارتزی (دیوورکین-نور، ۱۹۹۶). ۳۱.....
- شکل (۴-۲): الف) طرح‌های ارائه شده مربوط به انواع رسوبگذاری سیمان. ب) طرح یک؛ تمام سیمان‌ها در سطح تماس دانه‌ها رسوب کرده است. ج) طرح دو؛ سیمان در سراسر دانه به صورت یکسان رسوب کرده است (دیوورکین و نور، ۱۹۹۶). ۳۴.....
- شکل (۵-۲): ارتباط بین خواص پتروفیزیکی، الاستیک و لرزه‌ای سنگ. ۳۶.....
- شکل (۱-۳): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، زون‌های مخزنی (ترک ۳)، سونیک (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع‌شدگی (ترک ۷) و سنگ‌شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_1. ۵۳.....
- شکل (۲-۳): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، زون‌های مخزنی (ترک ۳)، سونیک (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع‌شدگی (ترک ۷) و سنگ‌شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_2. ۵۴.....
- شکل (۳-۳): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، زون‌های مخزنی (ترک ۳)، سونیک (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع‌شدگی (ترک ۷) و سنگ‌شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_9. ۵۵.....
- شکل (۴-۳): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، سونیک (ترک ۳)، زمان گذر موج برشی (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع‌شدگی (ترک ۷) و سنگ‌شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_7. ۵۶.....
- شکل (۵-۳): نمایش موقعیت چاه‌ها در میدان مورد بررسی با استفاده از نرم‌افزار همپسون-راسل. ۵۷.....
- شکل (۶-۳): موقعیت چاه‌ها و مقاطع لرزه‌ای دو بعدی گذرنده از نزدیک این چاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار پترل. ۵۷.....

شکل (۴-۱): ارتباط بین نگار گاما و سرعت برشی در چاه W_7 ۶۲

شکل (۴-۲): ارتباط بین نگار نوترون و سرعت برشی در چاه W_7 ۶۳

شکل (۴-۳): ارتباط بین نگار چگالی و سرعت برشی در چاه W_7 ۶۳

شکل (۴-۴): ارتباط بین نگار سرعت تراکمی و سرعت برشی در چاه W_7 ۶۳

شکل (۴-۵): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون خطی در مقابل مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه W_7 ۶۵

شکل (۴-۶): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون غیرخطی در مقابل مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه W_7 ۶۵

شکل (۴-۷): نمودار سرعت موج برشی تخمین زده شده (خط چین) و سرعت موج برشی واقعی (خط پر) در مقابل عمق در چاه W_7. شکل سمت چپ مربوط به رگرسیون خطی و شکل سمت راست مربوط به رگرسیون غیرخطی میباشد. ۶۶

شکل (۴-۸): مدول موج تراکمی برای شرایط اشباع شدگی ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد آب با استفاده از رابطه (۲-۲۵) (رنگ آبی) و گسمن (رنگ نارنجی) برای چاه های W_1 (سمت راست)، W_2 (وسط) و W_9 (چپ). ۶۷

شکل (۴-۹): حدهای بالایی (آبی) و پایینی (نارنجی) مدول حجمی ماتریکس هشین-اشتریکمن (سمت چپ)، و ویت-رویس (وسط) و میانگین حدهای هشین-اشتریکمن (سمت راست) که در مدل سازی فیزیک سنگ استفاده شده است (چاه W_9). ۶۹

شکل (۴-۱۰): حد ویت-رویس و داده های ماسه سنگ مطالعه شده توسط بین (۱۹۹۳)، همیلتون (۱۹۵۶) و هان (۱۹۸۶) (هان و باتزل، ۲۰۰۴). ۷۲

شکل (۴-۱۱): حد ویت-رویس و داده های سرعت موج تراکمی ماسه سنگ اشباع از آب بخش مخزنی چاه W_1. رنگ آبی مربوط به زون X1، رنگ قرمز مربوط به زون X2 و رنگ سبز زون X3 می باشد. ۷۲

شکل (۴-۱۲): حد ویت-رویس و داده های سرعت موج تراکمی ماسه سنگ اشباع از آب بخش مخزنی چاه W_2. رنگ آبی مربوط به زون X1، رنگ قرمز مربوط به زون X2 و رنگ سبز زون X3 می باشد. ۷۳

شکل (۴-۱۳): حد ویت-رویس و داده های سرعت موج تراکمی ماسه سنگ اشباع از آب بخش مخزنی چاه W_9. رنگ آبی مربوط به زون X1، رنگ قرمز مربوط به زون X2 و رنگ سبز زون X3 می باشد. ۷۳

شکل (۴-۱۴): مدول حجمی مخزن در شرایط اشباع شدگی همگن (خط)، ناهمگن (خط چین) و مدول برشی (خط-نقطه) در شرایط برجای مخزن (ماتریکس، سیال و تخلخل میانگین ۲۹/۴٪) در چاه W_2 ۷۵

شکل (۴-۱۵): سرعت موج تراکمی مخزن در شرایط اشباع‌شدگی همگن (خط)، ناهمگن (خط چین) و سرعت برشی (خط نقطه) در شرایط برجای مخزن (ماتریکس، سیال و تخلخل میانگین $29/4\%$) در چاه W_2 ۷۵

شکل (۴-۱۶): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل‌های تجربی تخلخل بحرانی (خطچین) و کریف (خط پر) نسبت به تخلخل با استفاده از ماتریکس واقعی مخزن ۷۷

شکل (۴-۱۷): مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از مدل تجربی کریف (خطچین) و نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) برای سه چاه W_1 (چپ)، W_2 (وسط) و W_9 (راست) ۷۹

شکل (۴-۱۸): مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از مدل تجربی تخلخل بحرانی (نارنجی) و نگار چاه‌پیمایی (آبی) برای سه چاه W_1 (چپ)، W_2 (وسط) و W_9 (راست) ۸۰

شکل (۴-۱۹): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرترز-میندلین (خطچین) سیمانی‌شده (چپ) و سیمانی نشده (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_1) ۸۲

شکل (۴-۲۰): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرترز-میندلین (خطچین) سیمانی‌شده (چپ) و سیمانی نشده (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_2) ۸۳

شکل (۴-۲۱): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرترز-میندلین (خطچین) سیمانی‌شده (چپ) و سیمانی نشده (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_9) ۸۴

شکل (۴-۲۲): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل دیوورکین-نور (خطچین) طرح یک (چپ) و طرح دو (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_1) ۸۶

شکل (۴-۲۳): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل دیوورکین-نور (خطچین) طرح یک (چپ) و طرح دو (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_2) ۸۷

شکل (۴-۲۴): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل دیوورکین-نور (خطچین) طرح یک (چپ) و طرح دو (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_9) ۸۸

شکل (۴-۲۵): مقایسه مدول‌های حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از رابطه گسمن (رنگ آبی)، میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین -اشتریکمن با استفاده از تئوری هرترز-میندلین (رنگ سبز) و مدول دیوورکین نور طرح دو (رنگ نارنجی) برای چاه‌های W_1 (چپ)، W_2 (وسط) و W_9 (راست) ۹۰

شکل (۴-۲۶): شکل سمت چپ مربوط به مدل‌های اشباع‌شدگی ناهمگن (به رنگ سبز)، همگن (نارنجی) و برجا (آبی) برای مدل گسمن در چاه W_1 برای سناریو A می‌باشد. شکل وسط مربوط به چگالی بعد از جانشینی سیال با سناریو A (با رنگ

نارنجی) و شرایط برجا (آبی) می‌باشد. شکل سمت راست مربوط به سرعت برشی بعد از جانشینی سیال با سناریو A (با رنگ نارنجی) و شرایط برجا (آبی) می‌باشد. ۹۳.....

شکل (۴-۲۷): نمودار متقاطع مقاومت صوتی در مقابل نسبت پواسون مربوط به چاه W_1. ماسه‌های مربوط به سناریو B، از ماسه‌های اشباع از آب شور (رنگ آبی) در هر دو حالت اشباع‌شدگی ناهمگن (سبز) و همگن (قرمز) تفکیک شده‌اند. ۹۴..

شکل (۵-۱): تصحیح چکش‌شات چاه W-2. ۹۸.....

شکل (۵-۲): رسم افق‌های لرزه‌ای بر روی مقطع لرزه‌ای عبوری از نزدیکی چاه W-1. ۹۹.....

شکل (۵-۳): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو A (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-1. بر روی نگار سرعت موج تراکمی، مدل گسمن برای اشباع همگن به رنگ نارنجی و برای اشباع ناهمگن به رنگ سبز است که به دلیل درصد کم تغییرات سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن این حالت مشاهده نمی‌شود. ۱۰۰.....

شکل (۵-۴): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 در شرایط برجا. ۱۰۴.....

شکل (۵-۵): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 مربوط به سناریو A، مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن. ۱۰۴..

شکل (۵-۶): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 مربوط به سناریو A، مدل هرترز-میندلین. ۱۰۴.....

شکل (۵-۷): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 مربوط به سناریو A، مدل گسمن با اشباع‌شدگی ناهمگن. ۱۰۵.

شکل (۵-۸): مقطع لرزه‌ای واقعی گذرنده از چاه W_1. ۱۰۶.....

شکل (۵-۹): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده در شرایط برجا مربوط به چاه W_1. ۱۰۶.....

شکل (۵-۱۰): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1. ۱۰۷.....

شکل (۵-۱۱): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1. ۱۰۸.....

شکل (۵-۱۲): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1. ۱۰۹.....

شکل (۵-۱۳): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1. ۱۰۹.....

- شکل (۵-۱۴): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۰
- شکل (۵-۱۵): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۱
- شکل (۵-۱۶): نشانگر پوش دامنه برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1 ۱۱۳
- شکل (۵-۱۷): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۳
- شکل (۵-۱۸): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۴
- شکل (۵-۱۹): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۴
- شکل (۵-۲۰): نشانگر مشتق اول زمانی پوش برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1 ۱۱۵
- شکل (۵-۲۱): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۶
- شکل (۵-۲۲): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۶
- شکل (۵-۲۳): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۷
- شکل (۵-۲۴): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1 ۱۱۸
- شکل (۵-۲۵): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۸
- شکل (۵-۲۶): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۹
- شکل (۵-۲۷): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1 ۱۱۹
- شکل (۵-۲۸): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1 ۱۲۰

شکل (۵-۲۹): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.
۱۲۱.....

شکل (۵-۳۰): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.
۱۲۱.....

شکل (۵-۳۱): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.
۱۲۲.....

شکل (۵-۳۲): نشانگر نرمی برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1.
۱۲۳.....

شکل (۵-۳۳): نشانگر نرمی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.
۱۲۳.....

شکل (۵-۳۴): نشانگر نرمی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.
۱۲۴.....

شکل (۵-۳۵): نشانگر نرمی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.
۱۲۴.....

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲): عوامل کنترل‌کننده خواص لرزه‌ای در سنگ‌های رسوبی (وانگ، ۲۰۰۱). ۱۱
- جدول (۱-۳): فواصل خطوط لرزه‌نگاری از هر چاه. ۵۰
- جدول (۲-۳): عمق شروع سراسازندها در چاه‌ها. ۵۱
- جدول (۳-۳): اطلاعات مربوط به PVT و خواص سیالات مخزن. ۵۲
- جدول (۱-۴): مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطا رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی در چاه W_7. ۶۴
- جدول (۲-۴): مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطای مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن و رابطه (۲۵-۲) در سه چاه W-1، W-2 و W-9. ۶۸
- جدول (۳-۴): خواص سیال محاسبه شده با استفاده از روابط تجربی باتزل و وانگ (۱۹۹۲) و خواص کانی‌های تشکیل‌دهنده مخزن (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹). ۶۸
- جدول (۴-۴): میانگین خواص ماتریکس سنگ. ۷۰
- جدول (۵-۴): میانگین خواص موثر سیال مخزن. ۷۰
- جدول (۶-۴): مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک مدل کریف، تخلخل بحرانی و نگار چاه‌پیمایی برای تمام چاه‌ها. ۷۸
- جدول (۷-۴): داده‌های مربوط به یک مجموعه کروی ایده‌آل توسط اسمیت و همکاران (۱۹۹۲). ۸۱
- جدول (۸-۴): مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک مدل هرتز-میندلین سیمانی شده، مدل هرتز-میندلین سیمانی-نشده، نگار چاه‌پیمایی برای تمام چاه‌ها. ۸۵
- جدول (۹-۴): مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک مدل دیوورکین-نور طرح یک، طرح دو و نگار چاه‌پیمایی برای تمام چاه‌ها. ۸۶
- جدول (۱-۵): میانگین سرعت و چگالی در تمام چاه‌ها برای بخش‌های غیر مخزنی بکار برده شده در مدل‌سازی لرزه‌ای. ۱۰۱
- جدول (۲-۵): میانگین سرعت و چگالی قبل و بعد از جانشینی سیال در بخش مخزنی (زون نفتی) (لایه شماره ۷). ۱۰۲

جدول (۳-۵): درصد تغییرات سرعت موج تراکمی در اثر جانشینی سیال نسبت به شرایط برجا (این تغییرات بصورت کاهشی می باشد). ۱۰۲

جدول (۴-۵): پارامترهای انتخاب شده مربوط به موقعیت چشمه/گیرنده در چاه W_1 ۱۰۵

فصل اول

مقدمه و کلیات

امروزه به منظور اکتشاف مخازن هیدروکربوری می‌توان از روش‌های مختلف اکتشافی بهره جست. ژئوفیزیک اکتشافی به‌ویژه لرزه‌نگاری، از اوایل قرن بیستم به عنوان روشی کارآمد در اکتشاف مخازن هیدروکربوری مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های لرزه‌نگاری دو بعدی و سه بعدی دارای قدرت تفکیک‌پذیری جانبی خوبی هستند و علاوه بر اطلاعات دورتر از چاه‌ها، ویژگی‌های ساختاری و چینه‌ای را نیز در اختیار می‌گذارند. برخلاف اطلاعات لرزه‌نگاری، نگارهای چاه‌پیمایی و مغزه خواص مخزن را با قدرت تفکیک‌پذیری عمودی بالایی از اطراف چاه در اختیار می‌گذارند (گریبner و واسون^۱، ۱۹۸۱). بنابراین برای توصیف دقیق کمی و کیفی خواص و ساختار مخزن، ترکیب داده‌های چاه‌پیمایی، داده‌های لرزه‌ای و اطلاعات زمین‌شناسی ضروری می‌باشد.

از آن جایی که عمر بسیاری از مخازن هیدروکربوری ایران به نیمه دوم تولید خود رسیده است، بنابراین امکان مجدد برداشت لرزه‌نگاری بر روی این مخازن در فواصل زمانی مشخص (لرزه‌نگاری چهاربعدی) باید بررسی شود. فیزیک سنگ به عنوان روشی برای برقراری ارتباط بین خواص پتروفیزیکی دخیل در برداشت (تخلخل، سنگ‌شناسی، نوع سیال و درجه اشباع شدگی) و خواص الاستیک سنگ (مدول حجمی، مدول برشی و چگالی حجمی سنگ) به منظور محاسبه سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از رابطه فیزیک سنگ متداول گسمن^۲، اثر تغییرات اشباع‌شدگی و جانشینی سیال بر روی نگار سرعت محاسبه می‌شود. از نتایج جانشینی سیال می‌توان در تجزیه و تحلیل شاخص‌های مستقیم

¹ Greabner and Wason

² Gassmann

هیدروکربور^۱، مانند دامنه لکه‌های روشن^۲، تغییرات دامنه با دورافت^۳ و بازبینی در زمان‌های مختلف^۴ مخزن استفاده کرد (هان و باتزل^۵، ۲۰۰۴).

با استفاده از مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای^۶، می‌توان تغییرات ایجاد شده در اثر جانشینی سیال را بر روی خواص سیگنال لرزه‌ای بررسی کرد. روش‌های مدل‌سازی لرزه‌ای بسته به پیچیدگی مخزن از نظر تداخل امواج بازتابی چندگانه^۷ از بین مدل‌سازی هم‌امیختگی^۸، ردیابی پرتو^۹ و یا تفاضل محدود^{۱۰} انتخاب می‌شود. در صورت پیچیده بودن مخزن، روش تفاضل محدود روش مناسب‌تری خواهد بود. در غیر این‌صورت هر یک از روش‌های دیگر مدل‌سازی تا حد زیادی جوابگوی مدل کردن پاسخ لرزه‌ای خواهند بود.

۱-۲ تاریخچه مطالعات

هرتز و میندلین^{۱۱}، برای توصیف خواص سنگ‌های دانه‌ای با تخلخل بالا (معمولاً تخلخل بحرانی) و تحت تنش هیدروستاتیک، مدلی را ارائه دادند که مدول حجمی موثر سنگ خشک را برای سنگ‌های تحکیم‌نیافته بخوبی تخمین زده اما مدول برشی موثر را به دلیل در نظر نگرفتن لغزش بین دانه‌های سنگ، بیشتر تخمین می‌زند (میندلین، ۱۹۴۹). گسمن (۱۹۵۱) برای محاسبه سرعت امواج تراکمی و برشی در محدوده فرکانس پایین، مدلی را برای سنگ‌های اشباع شده به‌دست‌آورد. در این مدل فرض بر این است که مدول برشی در طی جانشینی سیال ثابت است و تغییر نمی‌کند. ماوکو^{۱۲} و همکاران (۱۹۹۵) یک روش تقریبی برای حل معادله گسمن با استفاده از مدول موج تراکمی و بدون نیاز به سرعت موج برشی ارائه دادند. این روش بر این اساس است که تغییر مدول موج تراکمی معادل با تغییر مدول حجمی در طی جانشینی سیال است.

¹ Direct hydrocarbon indicators (DHI)

² Bright spots

³ Amplitude vs. Offset (AVO)

⁴ Time_Lapse monitoring

⁵ Han and Batzle

⁶ Seismic forward modeling

⁷ Multiples

⁸ Convolutional modeling

⁹ Ray Tracing

¹⁰ Finite Difference

¹¹ Hertz and Mindlin

¹² Mavko

دیوورکین و نور^۱ (۱۹۹۶)، مدلی را برای ماسه‌سنگ‌های سیمانی شده که سیمان در سطح تماس دانه‌ها نفوذ کرده است و خواص آن متفاوت از دانه‌های کروی تشکیل دهنده سنگ است، ارائه کردند. اسکلت^۲ (۲۰۰۴)، روشی را برای محاسبه مدول حجمی خشک سنگ در ماسه‌های ورقه‌ای با شیل ارائه داد. او به این نتیجه رسید که در اثر حضور شیل مقدار مدول حجمی سنگ خشک کاهش یافته و در نتیجه اثر جانشینی سیال در توالی‌های شیل افزایش می‌یابد. چای و هان^۳ (۲۰۰۹)، سنگ‌شناسی و تفکیک سیال را با استفاده از الگوی فیزیک سنگ در خلیج مکزیک بررسی کردند. میلووک^۴ (۲۰۰۹)، مدل‌های مختلف فیزیک سنگ را بر روی یک مخزن تحکیم نیافته واقع در خلیج مکزیک مورد مطالعه قرار داد. وی در نهایت مدل بهبود یافته حد پایینی هشین-اشتریکمن^۵ با مدل هرتز-میندلین در تخلخل بحرانی را به عنوان مدل مناسب فیزیک سنگ برای تفسیر لرزه‌ای مخزن فوق معرفی کرد. میثاقی^۶ و همکاران (۲۰۱۰)، مدل‌های فیزیک سنگ را برای جانشینی سیال در سنگ‌های کربناته در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران بررسی کردند. کاظمینی^۷ و همکاران (۲۰۱۰)، با مطالعه موردی بر روی سازند ماسه‌سنگی اشتوتگارت^۸ در کتزین^۹ آلمان، با استفاده از مدل فیزیک سنگ گسمن اثر CO₂ تزریق شده روی سرعت لرزه‌ای را بررسی کردند. بر اساس این مدل، پاسخ لرزه‌ای برای مقادیر مختلف CO₂ با مدل‌سازی الاستیک یک بعدی و مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای دو بعدی، با روش تفاضل محدود، مورد بررسی قرار گرفت. ژانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از مدل فیزیک سنگ والتون و ساخت مدل پیشرو لرزه‌ای با استفاده از روش ردیابی پرتو، اثر تغییرات گاز آزاد و گاز هیدراته را بر روی مخزن تحکیم نیافته واقع در خلیج مکزیک بررسی کردند. علی‌مرادی^{۱۱} و همکاران

¹ Dvorkin and Nur

² Skelt

³ Chi and Han

⁴ Milovac

⁵ Hashin-Shtrikman

⁶ Misaghi

⁷ Kazemeini

⁸ Stuttgart

⁹ Ketzin

¹⁰ Zhang

¹¹ Alimoradi

(۲۰۱۴)، رابطه گسمن را برای مخازن کربناته بهبود بخشیدند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک ضریبی برای مدول‌های حجمی خشک سنگ محاسبه کردند که تابعی از اندازه منفذ است. اید^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، به منظور شناسایی مهاجرت CO₂، از مدل‌سازی فیزیک سنگ و مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای به کمک روش تفاضل محدود استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از مدل گسمن و استفاده از هر دو نوع اشباع‌شدگی همگن و ناهمگن، تغییرات سرعت با گذشت زمان را بررسی کردند. این تغییرات سرعت ارتباط مستقیمی با حجم CO₂ مهاجرت کرده خواهد داشت. آن‌ها نشان دادند که توزیع فضایی و تغییرات زمین‌شناسی در مخزن نیز در تشخیص و شناسایی مهاجرت CO₂ موثر است. هانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، با مطالعه موردی بر روی یکی از مخازن آلمان با استفاده از تلفیق اطلاعات چاه و داده لرزه‌ای سه بعدی، پاسخ لرزه‌ای در زمان‌های مختلف را توسط CO₂ تزریق شده بررسی کردند. آن‌ها از روش هم‌امیخت برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای استفاده کرد.

۱-۳ اهمیت و ضرورت مطالعه

مدل‌سازی فیزیک سنگ در موارد زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی لزوم انجام این بررسی برای هر سنگ مخزن در میدان خاص ضروری به نظر می‌رسد. رابطه متداولی که اغلب برای جانشینی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد، رابطه گسمن می‌باشد. از تمام پارامترهای موجود در رابطه گسمن، تخمین مدول حجمی سنگ خشک بخش سخت و مهم این رابطه است. دلیل این امر را می‌توان به وابسته بودن مدول حجمی سنگ خشک به سایر محاسبات مربوط به خواص ماتریکس، خواص سیال، تخلخل و اشباع‌شدگی ارتباط داد. بنابراین محاسبه نادرست هریک از موارد ذکر شده، باعث ایجاد خطای تجمعی در مدول حجمی سنگ خشک می‌شود. لذا به نظر ضروری می‌رسد که با استفاده از سایر روش‌های تئوری و تجربی که توسط

¹ Eid

² Haung

محققین معرفی شده است، مدلی برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک در مخزن معرفی کرد تا در صورت نادرست بودن سایر پارامترهای ورودی، با اطمینان بیشتری بتوان از رابطه گسمن برای بررسی اثرات جانشینی سیال بر روی خواص لرزه‌ای در مخزن استفاده کرد. در واقع میزان تغییرات اشباع‌شدگی سیال وابسته به نوع مدل فیزیک سنگ مخزن است.

با استفاده از جانشینی سیال می‌توان به بررسی مطالعات امکان‌سنجی^۱ برداشت لرزه‌نگاری چهاربعدی، که در واقع برداشت داده‌های سه بعدی در بازه‌های زمانی مشخص است، پرداخت. با این کار می‌توان نشان داد که به ازای چه حجمی از نفت یا گاز تولیدی از مخزن، در خواص سیگنال لرزه‌ای تغییر ایجاد می‌شود. در صورت ایجاد تغییر، می‌توان مجدداً برداشت لرزه‌ای از آن میدان را انجام داد.

۱-۴ اهداف پایان‌نامه و روش تحقیق

هدف اصلی این پایان‌نامه، بررسی و انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب جهت انجام مطالعات امکان‌سنجی به منظور برداشت مجدد لرزه‌نگاری در اثر تغییرات ناشی از جانشینی سیال بر روی خواص سیگنال لرزه‌ای می‌باشد. در این مطالعه، در گام اول ابتدا با ساختن مدل‌های مختلف فیزیک سنگ با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی سه چاه یکی از مخازن نفتی ماسه‌سنگی واقع در خلیج فارس، مدل فیزیک سنگ مناسب برای مخزن انتخاب می‌شود. سپس از مدل فیزیک سنگ انتخاب شده برای تخمین مدول حجمی خشک سنگ استفاده می‌شود. مدل‌های مختلف به صورت برنامه کامپیوتری در نرم‌افزار متلب^۲ نوشته شده است. در گام دوم با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف جانشینی سیال و درجات اشباع‌شدگی مختلف، تغییرات خواص الاستیک سنگ با استفاده از رابطه گسمن محاسبه می‌شود. در گام سوم، مدل الاستیک یک بعدی با استفاده از نگارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی حجمی ساخته می‌شود. این مدل بلوکی بر

^۱ Feasibility study

^۲ Matlab

اساس حدهای زمین‌شناسی و تغییرات عمده در روند نگار سرعت موج تراکمی در محل چاه ساخته می‌شود. در گام چهارم، افق‌های لرزه‌ای مربوط به این بلوک‌ها بر روی مقطع لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار پترل^۱ رسم شده و سپس این افق‌های لرزه‌ای از حوزه زمان به عمق منتقل می‌شوند. در گام پنجم، با استفاده از خواص هر لایه که شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی حجمی مدل الاستیک یک بعدی است و استفاده از روش ردیابی پرتو، مدل لرزه‌ای مصنوعی دو بعدی با استفاده از نرم‌افزار GXII^۲ ساخته می‌شود. با مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای پاسخ لرزه‌ای^۳ هر یک از حالت‌های اشباع‌شدگی در بخش مخزنی مدل می‌شود. در گام ششم، با اعمال نشانگرهای لرزه‌ای^۴ مختلف با استفاده از نرم‌افزار پترل، تغییرات خواص لرزه‌ای بررسی می‌شود و در نهایت نشانگری که می‌تواند این تغییرات را بهتر نشان دهد، به عنوان نشانگر مناسب برای مخزن مورد مطالعه انتخاب می‌شود. مراحل انجام کار در این پایان‌نامه به صورت فلوچارتی در شکل (۱-۱) آورده شده است.

۱-۵ فصل‌بندی پایان‌نامه

این پایان‌نامه در شش فصل تدوین شده است. فصل اول مربوط به مقدمه، تاریخچه مطالعات، اهمیت و ضرورت مطالعه، اهداف پایان‌نامه و روش تحقیق است. همچنین خلاصه‌ای از مراحل کار در این فصل آورده شده است. فصل دوم شامل مبانی مدل‌سازی فیزیک سنگ و داده‌های لرزه‌ای می‌باشد. در فصل سوم به معرفی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و داده‌های موجود پرداخته شده است. فصل چهارم مربوط به تخمین سرعت موج برشی و مدل‌سازی فیزیک سنگی می‌باشد. در فصل پنجم نتایج حاصل از مدل‌سازی

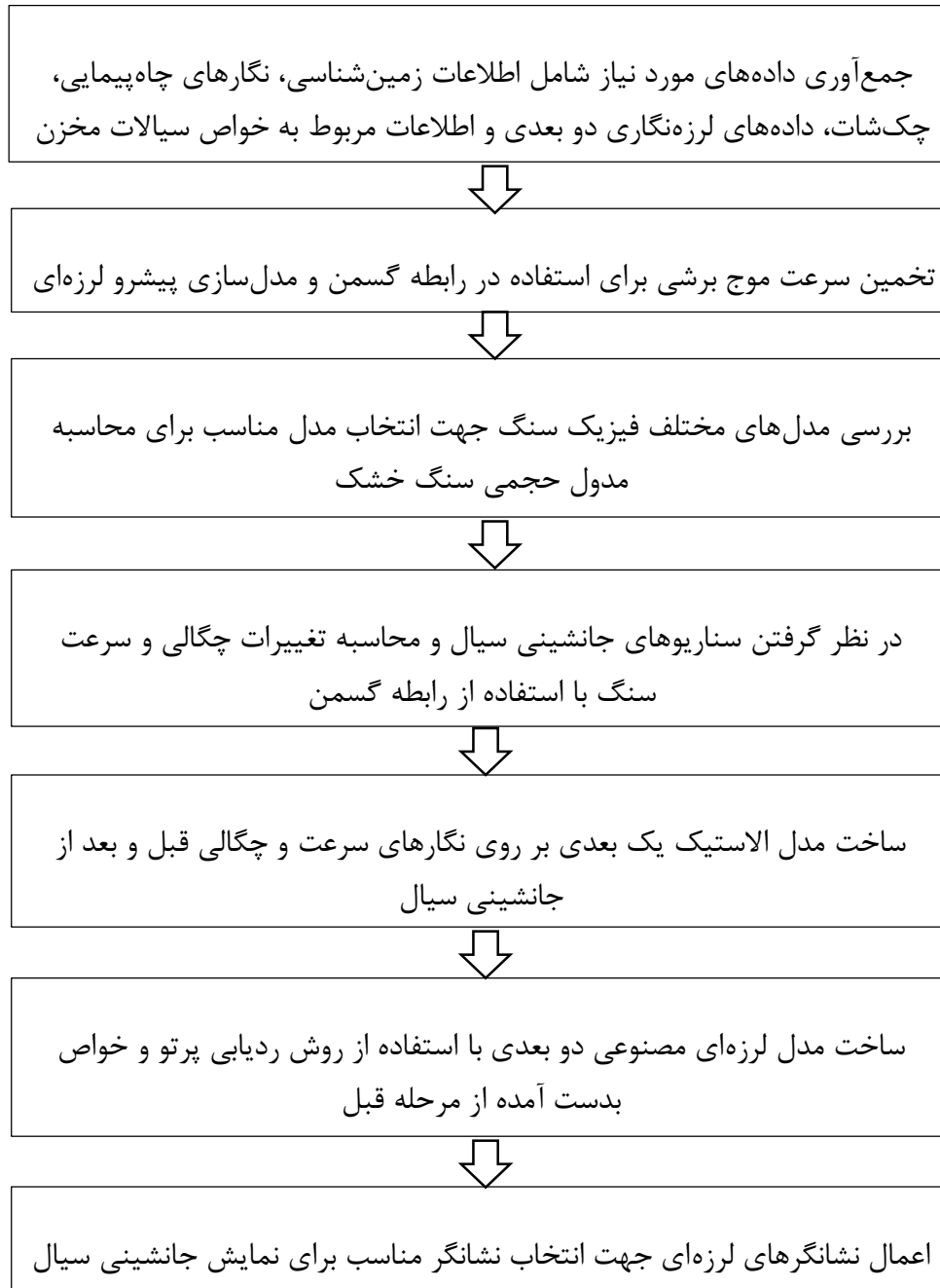
^۱Petrel, Schlumberger Public, (2009).

^۲ GX Technology Corporation (1998).

^۳ Seismic response

^۴ Seismic attributes

لرزه‌ای و نشانگرهای لرزه‌ای آورده شده است. در نهایت در فصل ششم نتایج و پیشنهادات و کارهایی که در آینده قابل انجام است، ارائه شده است.



شکل (۱-۱): فلوچارت مراحل انجام کار در این پایان‌نامه.

فصل دوم

مبانی مدل سازی فیزیک سنگ و داده‌های لرزه‌ای

۲-۱ مقدمه

در این فصل روابط مختلف فیزیک سنگ و نحوه محاسبه پارامترهای موجود در آن، تئوری مدل سازی پیشرو لرزه ای و مراحل انجام آن و همچنین مبانی نشانگرهای لرزه ای مورد استفاده توضیح داده شده است.

۲-۲ تفاوت فیزیک سنگ و پتروفیزیک

هدف فیزیک سنگ تعیین سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی، تعیین وضعیت تراکم سنگ و ارتباط آن ها با مدول های الاستیسیته شامل مدول حجمی و مدول برشی، تخلخل، سیال موجود در منافذ، دما، فشار و غیره به منظور تعیین سنگ شناسی و نوع سیال موجود در منافذ می باشد. در فیزیک سنگ ممکن است از اطلاعات فراهم شده توسط مهندس پتروفیزیک، مثل مقدار شیل، درجه اشباع شدگی آب و تخلخل در تعیین ارتباط بین خصوصیات فیزیک سنگی یا تجزیه و تحلیل جابه جایی سیال استفاده شود (دیوار و پیک فورد^۱، ۲۰۰۱).

در پتروفیزیک با استفاده از اطلاعاتی مانند نگارهای چاه پیمایی، مغزه و نتایج حاصل از آن می توان به اطلاعاتی نظیر تخلخل، اشباع شدگی، سطح تماس سیالات، تراوایی و زون بندی مخازن دست یافت. علم پتروفیزیک کم تر به بررسی خواص امواج لرزه ای می پردازد و بیشتر از نتایج اندازه گیری شده در چاه برای توصیف خواص مخزن استفاده می کند (دیوار و پیک فورد، ۲۰۰۱).

۲-۳ عوامل تاثیر گذار بر خواص الاستیک سنگ

به طور کلی خواص الاستیک سنگ ها با سنگ شناسی (ترکیب و بافت)، تخلخل (مقدار و نوع)، سیالات منفذی (نوع و مقدار)، عمق (اختلاف فشار، دما، سن)، تناوب و تکرار و غیره کنترل می شود (میلوک، ۲۰۰۹).

¹ Dewar and Pickford

عوامل کنترل کننده خواص لرزه‌ای سنگ‌های رسوبی در جدول (۱-۲) آورده شده است.

جدول (۱-۲): عوامل کنترل کننده خواص لرزه‌ای در سنگ‌های رسوبی (وانگ^۱، ۲۰۰۱).

خواص سنگ	خواص سیال	محیط
تراکم	گرانروی	تناوب و تکرار
تاریخچه	چگالی	تاریخچه تنش
سن	ترشوندگی	محیط رسوبی
سیمان‌شدگی	ترکیب سیال	دما
بافت	فاز	فرآیندهای مخزن
چگالی حجمی	نوع سیال	تاریخچه تولید
محتوای رس	نسبت گاز به نفت و نسبت نفت به آب	هندسه لایه‌ها
ناهمسانگردی	اشباع	فشار خالص مخازن
شکستگی		
تخلخل		
سنگ‌شناسی		
شکل منفذ		

¹¹ Wang

۴-۲ مدل های فیزیک سنگ

۱-۴-۲ مدل گسمن و جانشینی سیال

روش تئوری که اغلب برای جانشینی سیال مورد استفاده قرار می گیرد، رابطه فرکانس پایین گسمن است. معادله گسمن مدول های حجمی سنگ اشباع شده (K_{sat}) را به تخلخل (ϕ)، مدول حجمی سنگ خشک (K_{dry})، مدول های حجمی کانی های تشکیل دهنده ماتریکس (K_{matrix}) و مدول های حجمی سیال پر کننده منفذ (K_{fl}) ارتباط می دهد (اسمیت^۱ و همکاران، ۲۰۰۳):

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - \frac{K_{dry}}{K_{matrix}})^2}{\frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{(1 - \phi)}{K_{matrix}} - \frac{K_{dry}}{K_{matrix}^2}} \quad (۱-۲)$$

استفاده از رابطه گسمن برای جانشینی سیال شامل دو مرحله کلی است (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

۱- تعیین مدول حجمی سنگ خشک.

۲- محاسبه مدول حجمی سنگ اشباع شده با سیال دلخواه.

معادله گسمن (رابطه (۱-۲))، مدول حجمی سنگ اشباع شده (K_{sat}) را به خواص حجمی سنگ خشک و سیال پر کننده منفذ ارتباط می دهد. مقادیر مدول حجمی سنگ اشباع شده را می توان با استفاده از نگارهای چاه پیمایی به سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی حجمی سنگ ارتباط داد (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

$$K_{sat} = \rho_b (V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2) \quad (۲-۲)$$

در رابطه (۲-۲)، ρ_b ، چگالی، V_p ، سرعت تراکمی و V_s ، سرعت برشی بر جای سنگ است.

مدول برشی سنگ، μ ، با استفاده از رابطه (۳-۲) محاسبه می شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

¹ Smith

$$\mu = \rho_b V_s^2 \quad (3-2)$$

اگر سرعت‌ها بر حسب کیلومتر بر ثانیه و چگالی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب باشند، آنگاه مدول‌های حجمی و برشی بر حسب گیگاپاسکال خواهند بود. در رابطه گسمن، برخلاف مدول‌های حجمی سنگ که به تغییر سیالات منفذی حساس می‌باشد، مدول برشی سنگ مستقل از تغییر سیالات منفذی است. این فرض از عدم فعل و انفعالات شیمیایی بین سیالات منفذی و دانه‌های سنگ ناشی می‌شود (بريمن^۱، ۱۹۹۹):

$$\mu_{dry} = \mu_{wet} \quad (4-2)$$

پارامتر دیگری که برای جانشینی سیال نیاز است، محاسبه چگالی حجمی سنگ می‌باشد. معادله موازنه جرم^۲ (۵-۲)، ارتباط بین چگالی سیال (ρ_{fl})، تخلخل (ϕ)، چگالی کانی‌های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ (ρ_g) و چگالی حجمی سنگ (ρ_b) را توصیف می‌کند (میلووک، ۲۰۰۹):

$$\rho_b = \rho_g (1 - \phi) + \rho_{fl} \phi \quad (5-2)$$

الف - پارامترهای لازم برای استفاده از معادله گسمن

قبل از شروع جانشینی سیال با استفاده از معادله (۱-۲)، ابتدا باید تخلخل سنگ (ϕ)، خواص سیال منفذی (ρ_{fl} ، K_{fl})، مدول حجمی کانی‌های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ (K_{matrix}) و مدول حجمی سنگ خشک را با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا نگارهای چاه‌پیمایی محاسبه کرد.

• تخلخل

تخلخل به‌طور معمول از اطلاعات مغزه و یا از نگارهای چاه‌پیمایی محاسبه می‌شود.

• خواص سیال

^۱ Beryman

^۲ Mass Balance Equation

قبل از جانشینی سیال، باید مدول‌های حجمی و چگالی سیال برجای منفذ و همچنین سیال جدید را به‌دست آورد. از سه روش رایج برای تعیین این مقادیر استفاده می‌شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

۱- اندازه‌گیری مستقیم (در دما و فشار مخزن) از سیالات منفذی مخزن.

۲- معادلات حالت (مک‌کین^۱، ۱۹۹۰)

۳- محاسبات تجربی (باتزل و وانگ^۲، ۱۹۹۲).

در این تحقیق از روابط تجربی باتزل و وانگ استفاده شده است.

خواص سیالات منفذی به‌طور سیستماتیک و قابل توجهی با تراکم، فشار و دما تغییر می‌کند. چگالی، مدول حجمی گاز و نفت و همچنین گرانروی^۳ نفت با افزایش وزن ملکولی و فشار، افزایش و با دما کاهش می‌یابند. گرانروی گاز نیز رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهد (به استثنای دماهای بالاتر و فشارهای پایین‌تر که گرانروی با افزایش دما به آرامی افزایش خواهد یافت). چگالی، گرانروی و مدول حجمی آب شور با افزایش محتوای نمک و فشار افزایش می‌یابد. آب شور در اثر تغییرات دما رفتار خاصی از خود نشان می‌دهد، بطوریکه مدول‌های حجمی به یک مقدار بیشینه‌ای در دمای ۴۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسند. مقادیر زیادی از گاز می‌تواند در نفت‌های سبک‌تر حل شده و به‌طور قابل توجهی گرانروی و مدول حجمی نفت را کاهش دهد. به مراتب مقدار گاز کمتری نسبت به نفت‌های سبک در آب شور حل می‌شوند. در نتیجه گاز محلول در نفت، باعث ایجاد لکه‌های روشن بازتاب لرزه‌ای می‌شود که ممکن است در سطح تماس بین سنگ‌های اشباع شده با نفت و آب ایجاد گردد (باتزل و وانگ، ۱۹۹۲).

• اشباع‌شدگی همگن (همگن^۴) و ناهمگن (تکه‌ای^۵)

¹ McCain

² Batzle and Wang

³ Viscosity

⁴ Uniform

⁵ Patchy

سیالات پرکننده منافذ سنگ مخزن بصورت دو فاز و یا سه فاز می باشند، بنابراین لازم است که پس از محاسبه خواص هر یک از سیالات، خواص میانگین ترکیب سیالات موجود در مخزن نیز محاسبه شود. دومینکو^۱ (۱۹۷۶)، برای محاسبه مدول حجمی و چگالی موثر سیالات، روابط (۶-۲) و (۷-۲) را پیشنهاد کرد:

$$K_{fl} = \left[\frac{S_w}{K_w} + \frac{S_o}{K_o} + \frac{S_g}{K_g} \right]^{-1} = \left\langle \frac{1}{K_{fl}(x, y, z)} \right\rangle \quad (6-2)$$

$$\rho_{fl} = \rho_g S_g + \rho_o S_o + \rho_w S_w = \langle \rho_{fl}(x, y, z) \rangle \quad (7-2)$$

در روابط (۶-۲) و (۷-۲)، S_w اشباع شدگی آب، K_w مدول حجمی آب، S_o اشباع شدگی نفت، K_o مدول حجمی نفت، S_g اشباع شدگی گاز، K_g مدول حجمی گاز، ρ_w چگالی آب، ρ_o چگالی نفت و ρ_g چگالی گاز می باشند. همچنین K_{fl} و ρ_{fl} به ترتیب مدول حجمی و چگالی موثر سیالات می باشند. نماد $\langle \cdot \rangle$ بیان کننده میانگین حجمی از پارامترهای ذکر شده است. $K_{fl}(x, y, z)$ و $\rho_{fl}(x, y, z)$ به ترتیب تغییرات فضایی مدول های حجمی و چگالی سیالات منفذی می باشند (دومینکو، ۱۹۷۶). در این صورت با فرض یک سیال همگن که در سراسر فضای منفذ به طور یکسان توزیع شده است، می توان مدول حجمی موثر سیالات را با استفاده از رابطه (۶-۲) محاسبه کرد (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳). این روش میانگین گیری امروزه به طور گسترده ای برای بررسی اثرات مدل سیال روی سرعت لرزه ای و مقاومت صوتی فرکانس های پایین مورد استفاده قرار می گیرد (ماو کو و موکر جی، ۱۹۹۸).

معادله گسمن فرض می کند که تمام فازهای سیالات امتزاج ناپذیر^۲ هستند و در سراسر فضای منفذ به صورت همگن توزیع شده اند (اشباع شدگی همگن). این فرضیات در سیستم هایی انتظار می رود که برای رسیدن به

¹ Domenico

² Immiscible

تعدادل به زمان‌های طولانی زمین‌شناسی نیاز دارند. بنابراین انتظار درستی است که سیالات توانایی توزیع همگن و همگن در سراسر فضای منفذ در یک مخزن را نداشته باشند. به علاوه در سنگ ترشونده با آب (آب دوست)، آب به طور ترجیحی در منافذی با اندازه کوچک تر و هیدروکربور در منافذ بزرگتر قرار می‌گیرند. این وضعیت ممکن است منجر به تفکیک فاز و یا شاید عدم تعادل فشار منفذی در طول زمان عبور موج لرزه‌ای شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳).

توزیع واقعی اشباع‌شدگی در مخزن می‌تواند بازه‌ای از اشباع‌شدگی ناهمگن (تکه‌ای) تا همگن (همگن) باشد (ماوکو و موکرجی، ۱۹۹۸). شکل (۱-۲ الف)، توزیع آب و نفت حاصل از شبیه‌سازی^۱ تزریق آب به یک مخزن نفتی را نشان می‌دهد. به طور کلی انتظار می‌رود که افزایش فشار منفذی القا شده ناشی از موج، به صورت فضایی با تغییر سیال منفذی، تغییر کند. سیالات تراکم‌پذیر، مانند نفت و گاز، افزایش فشار منفذی کوچکتری دارند در حالی که سیالات تراکم‌ناپذیرتر مانند آب شور و نفت با نسبت گاز به نفت پایین، افزایش فشار منفذی بالایی دارند. در فرکانس‌های لرزه‌ای، انتظار می‌رود که این فشارها در فواصل کمتر از طول پخش^۲ (L_c) به تعادل برسند. در واقع هر نقطه از سنگ با یک سیال موثر اشباع‌شده رفتار خواهد کرد که میانگین محلی^۳ فازهای گاز، نفت و آب شور است (شکل (۱-۲ ب)). میانگین داده شده با معادلات (۶-۲) و (۷-۲) مربوط به یک تکه با اندازه L_c است. نقاطی که در فواصل کمتر از L_c قرار گرفته‌اند، فشار منفذی در آن‌ها به تعادل خواهد رسید در حالی که در فواصل بیشتر از L_c اختلاف فشار باقی می‌ماند. بنابراین یک سنگ می‌تواند از تعداد زیادی تکه با اندازه L_c تشکیل شده باشد که هریک از آن‌ها فاز یا سیال موثر محلی مختص خود را دارد (ماوکو و موکرجی، ۱۹۹۸). در فرکانس لرزه‌ای (f)، طول پخش (L_c)، با استفاده از رابطه (۸-۲) محاسبه می‌شود (سنگوپتا^۴ و ماوکو، ۲۰۰۳):

¹ Simulation

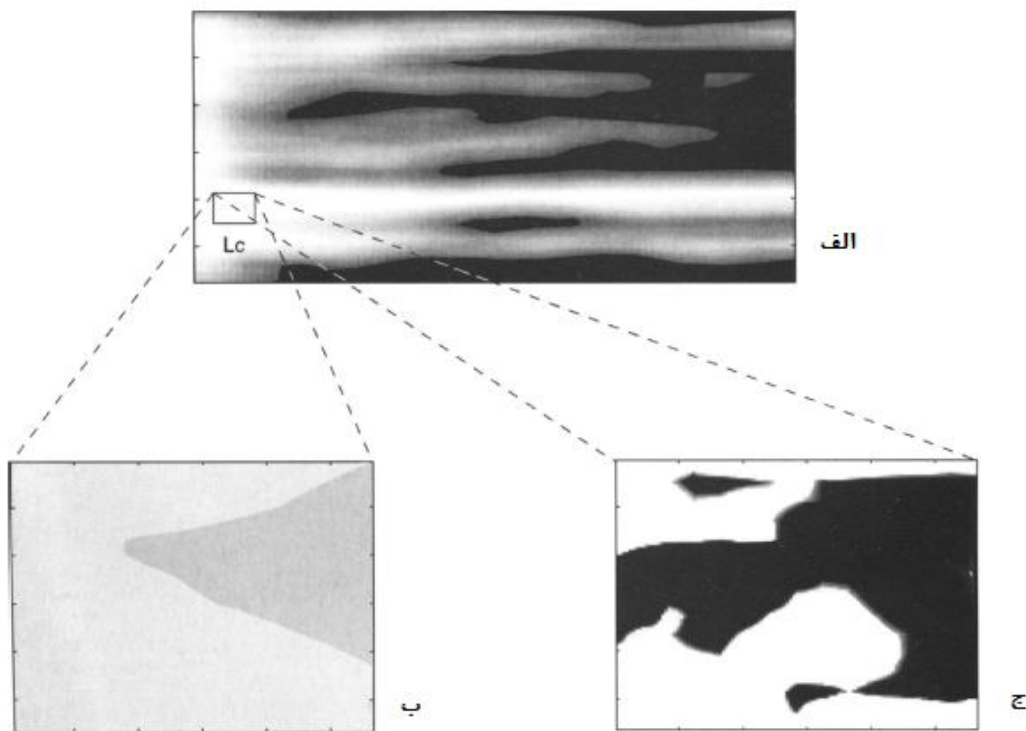
² Diffusion

³ Locally

⁴ Sengupta

$$L_c \approx \sqrt{\frac{4D}{f}} \quad (۸-۲)$$

که در آن، $D = \frac{\kappa K_{fl}}{\eta}$ ، تراوایی، K_{fl} مدول‌های بالک سیال، و η گرانیوی سیال است. بنابراین در صورت توزیع ناهمگن آب و هیدروکربور در منافذ سنگ، رابطه (۸-۲) برای محاسبه مدول حجمی ترکیب سیالات، مناسب نخواهد بود (ماوکو و موکرجی، ۱۹۹۸).



شکل (۸-۲): توزیع اشباع‌شدگی آب و نفت در نتیجه شبیه‌سازی اثر تزریق آب (از سمت چپ) به یک مخزن دربردارنده نفت و آب. مقیاس تمام شکل‌ها از یک طول موج لرزه‌ای کوچکتر است. (ب) مربوط به آمین تکه است. فشار منفذی القا شده در سیالات، در مقیاس‌های کوچکتر از طول پخش L_c ، به تعادل می‌رسند و رفتاری مانند یک سیال موثر همگن (همگن) محلی دارد. مشخصه طول پخش به خواص سیال، تراوایی سنگ و فرکانس لرزه‌ای بستگی دارد. (ج) مربوط به آمین تکه است. توزیع سیالات منفذی به صورت ناهمگن می‌باشد. فشار منفذی القا شده به تعادل نرسیده و باعث ایجاد مدول حجمی بیشتری از تکه به تکه به تعادل رسیده در شکل (ب) می‌شود (ماوکو و موکرجی، ۱۹۹۸).

هیل^۱ (۱۹۶۳) و بریمن و میلتن^۲ (۱۹۹۱) رابطه (۹-۲) را برای تخمین مدول‌های حجمی موثر سنگ در این شرایط، ارائه دادند:

$$K_{eff} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{K_i + \frac{4}{3}\mu} \right]^{-1} - \frac{4}{3}\mu \quad (9-2)$$

که در آن، n ، تعداد تکه‌های با سیال مختلف، x_i ، کسر حجمی سیال تکه i ام، μ ، مدول برشی سنگ، K_i ، مدول حجمی سنگ اشباع‌شده با سیال i ام و K_{eff} ، مدول حجمی موثر سنگ می‌باشد.

• حدهای بالایی و پایینی سرعت

مدول حجمی سنگ زمانی که فازهای سیالات منفذی در مقیاس‌های بزرگتری از هم تفکیک می‌شوند، همیشه بزرگتر یا مساوی حالتی است که سیالات در مقیاس خیلی کوچکی ترکیب شده‌اند. در واقع اشباع-شدگی تکه‌ای با مقیاس بزرگ، همیشه منجر به سرعت لرزه‌ای بالاتری نسبت به اشباع‌شدگی همگن (همگن) با مقیاس کوچک می‌شود. سرعت‌های تکه‌ای و همگن نشان‌دهنده حد بالایی و پایینی سرعت مربوط به فرکانس پایین لرزه‌ای می‌باشد (ماو کو و موکرچی، ۱۹۹۸).

• خواص ماتریکس

برای محاسبه مدول حجمی موثر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، K_{matrix} ، اطلاعات ترکیب سنگ باید در دسترس باشد. در صورت وجود نمونه‌های مغزه، نوع و کسر حجمی کانی‌ها با استفاده از روش‌های متداول آزمایشگاهی تعیین می‌شود (مقاطع نازک، XRD). در صورت دسترسی نداشتن به داده‌های مغزه، با استفاده از حجم رس محاسبه شده از ارزیابی‌های پتروفیزیکی و فرض دو کانی رس و کوارتز، مدول حجمی ماتریکس سنگ محاسبه می‌شود. برای سنگ‌شناسی‌های پیچیده‌تر، از روش‌هایی که درصد حجمی کانی‌های موجود

¹ Hill

² Milton

را تخمین می‌زند، مانند روش‌های قطعی، رگرسیون خطی چندگانه، شبکه عصبی و غیره استفاده می‌شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳).

با توجه به تئوری متوسط موثر^۱، مدول الاستیک موثر یک ترکیب متشکل از چند کانی بین دو حد قرار می‌گیرد که با کسر حجمی و مدول الاستیک هر کانی کنترل می‌شود. مقدار دقیق مدول الاستیک موثر به آرایش هندسی قرارگیری دانه‌های تشکیل دهنده سنگ وابسته می‌باشد (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹). با این حال، زمانی که اختلاف بین حدهای بالا و پایین کوچک باشد، میانگین حسابی از دو حد تقریب خوبی از مدول الاستیک موثر ارائه می‌دهد (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹). دو حد الاستیسیته وویت-رویس^۲ و هشین-اشتریکمن بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (هشین و اشتریکمن، ۱۹۶۳). دقیق‌ترین حد الاستیسیته بدون تعیین آرایش هندسی، حد الاستیسیته هشین-اشتریکمن می‌باشد، زیرا حدهای بالا و پایین آن بهم نزدیک‌ترند (بريمن، ۱۹۹۵).

• حدهای هشین-اشتریکمن

معادله عمومی حدهای هشین-اشتریکمن برای ترکیبات بیشتر از دو فاز، به صورت زیر نوشته می‌شود (بريمن، ۱۹۹۵):

$$K^{HS+/-} = \Lambda(\mu_{max/min}), \quad (10-2)$$

$$\mu^{HS+/-} = \Gamma(\zeta(K_{max/min}, \mu_{max/min})) \quad (11-2)$$

$$\Lambda(\mu_{max/min}) = \left\langle \frac{1}{K(r) + \frac{4}{3}\mu_{max/min}} \right\rangle^{-1} - \frac{4}{3}\mu_{max/min} \quad (12-2)$$

¹ Effective medium theory

² Voigt-Reuss

$$\Gamma(\zeta(K_{max/min}, \mu_{max/min})) \quad (13-2)$$

$$= \left\langle \frac{1}{\mu(r) + \zeta(K_{max/min}, \mu_{max/min})} \right\rangle^{-1} - \zeta(K_{max/min}, \mu_{max/min})$$

$$\zeta(K_{max/min}, \mu_{max/min}) = \frac{\mu_{max/min}}{6} \left(\frac{9K_{max/min} + 8\mu_{max/min}}{K_{max/min} + 2\mu_{max/min}} \right) \quad (14-2)$$

که در آن Λ ، تابعی از مقادیر کمینه و بیشینه مدول برشی کانی‌های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ، ζ ، تابعی از مقادیر کمینه و بیشینه مدول حجمی و برشی کانی‌های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ، $K(r)$ و $\mu(r)$ به ترتیب مقادیر مدول حجمی و برشی مولفه r ام کانی‌های تشکیل دهنده ماتریکس سنگ می‌باشند. به دلیل اینکه در تعداد زیادی از مدل‌های متوسط موثر (مانند مدل بایوت-گسمن) فرض می‌شود که یک مدول کانی همگن وجود دارد، بنابراین استفاده از یک ترکیب میانگین کانی شناسی با استفاده از میانگین حدها مفید است (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$M_{eff} = \frac{M^{HS+} + M^{HS-}}{2} \quad (15-2)$$

که M ، مدول برشی یا مدول حجمی می‌باشد.

• حدهای وویت-رویس

حد وویت (حد بالا) مربوط به مدول‌های الاستیک موثر، M_V با N فاز، مطابق رابطه (۱۶-۲) محاسبه می‌شود (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$M_V = \sum_{i=1}^N f_i M_i \quad (16-2)$$

در رابطه (۱۶-۲)، f_i ، کسر حجمی فاز λ_m و M_i ، مدول الاستیک فاز λ_m می‌باشد. حد وویت اغلب اوقات "میانگین کرنش یکسان"^۱ نامیده می‌شود، زیرا نسبت میانگین تنش به میانگین کرنش را زمانیکه تمام مولفه‌ها، کرنش یکسان دارند محاسبه می‌کند. حد رویس (حد پایین) مربوط به مدول‌های الاستیک موثر، M_R با N فاز، مطابق رابطه (۱۷-۲) محاسبه می‌شود (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$M_R = \left[\sum_{i=1}^n \frac{f_i}{M_i} \right]^{-1} \quad (17-2)$$

حد رویس "میانگین تنش یکسان"^۲ نامیده می‌شود، زیرا نسبت میانگین تنش به میانگین کرنش را زمانیکه تمام مولفه‌ها، تنش یکسان دارند محاسبه می‌کند.

- تخمین مدول میانگین وویت- رویس- هیل

میانگین مدول وویت- رویس- هیل، برابر با میانگین هندسی حد وویت و رویس می‌باشد.

$$M_{VRH} = \frac{M_V + M_R}{2} \quad (18-2)$$

- خواص سنگ خشک متخلخل

مدول حجمی سنگ خشک متخلخل، در طول جانشینی سیال ثابت در نظر گرفته می‌شود. مدول برشی نیز به عنوان یک ویژگی سنگ خشک در طول پروسه جانشینی سیال ثابت است. روش‌های محاسبه مدول حجمی سنگ خشک متخلخل، به شرح زیر است (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

۱- سرعت‌های اندازه‌گیری شده با کنترل رطوبت مغزه

۲- استفاده از روابط تجربی و تئوری متوسط موثر

۳- محاسبه مستقیم از نگارهای چاه‌پیمایی

¹ Isostrain average

² Isostress average

هنگامی که از نگارهای چاه‌پیمایی استفاده می‌شود، روش متداول برای تعیین مدول حجمی سنگ خشک، به کارگیری مجدد رابطه (۱-۲) است (ژو و مگ مکان^۱، ۱۹۹۰):

$$K_{dry} = \frac{K_{sat} \left(\frac{\phi K_{matrix}}{K_{fl}} + 1 - \phi \right) - K_{matrix}}{\frac{\phi K_{matrix}}{K_{fl}} + \frac{K_{sat}}{K_{matrix}} - 1 - \phi} \quad (۱۹-۲)$$

ابتدا مدول حجمی سنگ اشباع شده برای حالت برجا (K_{sat}) با استفاده از معادله (۲-۲) و دیگر پارامترهای موجود (K_{fl} ، K_{matrix} و ϕ) در رابطه، محاسبه می‌شود. برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک، K_{fl} مربوط به مدول حجمی موثر سیالات پرکننده منافذ در حالت برجا می‌باشد. عدم اطمینان در تخلخل، اشباع آب، خواص سیال و یا سنگ‌شناسی باعث ایجاد خطا در محاسبه مدول حجمی سنگ خشک و به وجود آمدن مقادیر منفی و یا خیلی بزرگ خواهد شد.

پس از محاسبه مدول حجمی سنگ خشک، می‌توان مدول‌های حجمی اشباع شده را برای سیال مورد نظر محاسبه کرد (ابتدا مدول‌های حجمی سیال با استفاده از رابطه (۲-۶) محاسبه می‌شود).

سپس با استفاده از معادلات (۲-۵) و (۲-۷) چگالی سنگ برای اشباع‌شدگی با سیال جدید محاسبه می‌شود. با استفاده از چگالی حجمی جدید محاسبه شده، می‌توان برای محاسبه سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی از رابطه (۲-۲۰) و (۲-۲۱) استفاده کرد (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

$$V_p = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu}{\rho_b}} \quad (۲۰-۲)$$

¹ Zhu and McMechan

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_b}} \quad (2-21)$$

با توجه به اینکه مدول‌های برشی سنگ در طول جانشینی سیال ثابت در نظر گرفته می‌شود، تغییرات سرعت موج برشی مربوط به تغییرات چگالی سیال خواهد بود، بنابراین سرعت موج برشی ماسه سنگ گازی از سرعت موج برشی ماسه سنگ دارای آب شور بیشتر است.

به‌طور کلی، روند کار با استفاده از معادله گسمن شامل مراحل زیر است (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۳):

- ۱- تصحیح و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی
- ۲- تخمین سرعت موج برشی (در صورت نیاز)
- ۳- محاسبه مدول حجمی و برشی در شرایط برجای مخزن
- ۴- محاسبه مدول حجمی ماتریکس سنگ (با استفاده از ترکیب وویت-رویس یا هشین-اشتریکمن)
- ۵- محاسبه خواص سیال برجا (مدول حجمی و چگالی)
- ۶- ترکیب سیالات با استفاده از اشباع‌شدگی برجا
- ۷- محاسبه مدول حجمی سنگ خشک
- ۸- محاسبه خواص سیال جدید (مدول حجمی و چگالی) برای جایگزینی با سیال برجا
- ۹- محاسبه مدول حجمی سنگ اشباع شده با سیال جدید با استفاده از معادله گسمن
- ۱۰- محاسبه چگالی سنگ اشباع شده با سیال جدید
- ۱۱- محاسبه سرعت موج تراکمی و موج برشی سنگ اشباع شده با سیال جدید

۲-۴-۲ جانشینی سیال بدون استفاده از سرعت موج برشی یا مدول حجمی سنگ خشک

برای محاسبه مدول الاستیک سنگ اشباع شده با سیال جدید، معادله گسمن را می‌توان بدون استفاده از مدول‌های سنگ خشک و با کمک مدول الاستیک سنگ اشباع شده با سیال برجا محاسبه کرد (ماوکو و

همکاران، ۱۹۹۸). معادله گسمن بدون استفاده از مدول حجمی سنگ خشک، مطابق رابطه (۲۲-۲) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{K_{sat1}}{K_{matrix} - K_{sat1}} - \frac{K_{fl1}}{\phi(K_{matrix} - K_{fl1})} \\ = \frac{K_{sat2}}{K_{matrix} - K_{sat2}} - \frac{K_{fl2}}{\phi(K_{matrix} - K_{fl2})} \end{aligned} \quad (22-2)$$

که در آن، K_{sat1} ، مدول حجمی سنگ اشباع‌شده با سیال برجا، K_{matrix} ، مدول حجمی ماتریکس سنگ، K_{fl1} ، مدول حجمی سیال برجا، K_{sat2} ، مدول حجمی سنگ اشباع‌شده با سیال جدید، K_{fl2} ، مدول حجمی سیال جدید و ϕ تخلخل سنگ است.

مشکل عمده‌ای که در استفاده از رابطه گسمن وجود دارد، عدم برداشت زمان گذر موج برشی در تمام چاه‌ها می‌باشد. بنابراین محاسبه مدول حجمی سنگ در شرایط برجا بدون حضور سرعت موج برشی، ممکن نیست و نمی‌توان از معادله گسمن استفاده کرد (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹).

ماوکو و موکرجی (۱۹۹۵) و ماوکو و همکاران (۲۰۰۹)، یک روش تقریبی برای حل معادله گسمن با استفاده از مدول موج تراکمی (M_{sat}) و بدون استفاده از سرعت موج برشی معرفی کردند. این روش بر این اساس است که در طول جانشینی سیال، تغییر در مدول موج تراکمی ($\Delta M_{gassmann}$) برابر با تغییر مدول حجمی ($\Delta K_{gassmann}$) است:

$$\Delta M_{gassmann} = \Delta K_{gassmann}$$

$$\Delta \mu_{gassmann} = 0 \quad (23-2)$$

بنابراین معادله گسمن به طور تقریبی مطابق معادله (۲۴-۲) نوشته می‌شود (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$M_{sat} \approx M_{dry} + \frac{(1 - \frac{M_{dry}}{M_{matrix}})^2}{\frac{\phi}{M_{fl}} + \frac{(1 - \phi)}{M_{matrix}} - \frac{M_{dry}}{M_{matrix}^2}} \quad (24-2)$$

M_{sat} ، مدول موج تراکمی سنگ اشباع شده در شرایط برجای مخزن، M_{matrix} ، مدول موج تراکمی ماتریکس سنگ، M_{fl} ، مدول موج تراکمی سیال پرکننده منفذ و M_{dry} ، مدول موج تراکمی سنگ خشک است. رابطه (۲۴-۲)، مستقل از سرعت موج برشی است ولی خواص خشک سنگ باید مشخص باشد. کاظمینی و همکاران (۲۰۱۰)، بر اساس شباهت رابطه (۲۴-۲) و (۱-۲) و با استفاده از ترکیب دو روش آورده شده در بالا، یک تقریب جدیدی برای محاسبه مدول موج تراکمی در اثر جانشینی سیال به دست آوردند:

$$\frac{M_{sat1}}{M_{matrix} - M_{sat1}} - \frac{M_{fl1}}{\phi(M_{matrix} - M_{fl1})} \quad (25-2)$$

$$\approx \frac{M_{sat2}}{M_{matrix} - M_{sat2}} - \frac{M_{fl2}}{\phi(M_{matrix} - M_{fl2})}$$

مطابق رابطه (۲۵-۲)، مدول موج تراکمی سنگ اشباع شده بعد از جانشینی با سیال جدید، M_{sat2} ، با استفاده از مدول موج تراکمی سنگ اشباع شده با سیال درجا، M_{sat1} ، محاسبه می شود. در این صورت، نیازی به محاسبه و حضور مدول موج تراکمی سنگ خشک و سرعت موج برشی نمی باشد (کاظمینی و همکاران، ۲۰۱۰).

۳-۴-۲ سایر مدل های تجربی و تئوری

علاوه بر روش مستقیم، روابط تجربی و تئوری دیگری نیز برای برقراری ارتباط بین مدول موثر سنگ خشک و خواص دانه و منفذ وجود دارد. مدل های تئوری (میندیلین، ۱۹۴۹؛ دیوورکین و نور، ۱۹۹۶) خواص الاستیک سنگ خشک را بر اساس خواص دانه و منفذ با مجموعه ای از اجزای کروی تصادفی توصیف می کنند. در این

مدل‌ها، مدول الاستیک موثر سنگ خشک به عنوان پارامتری وابسته به تخلخل، میانگین تعداد تماس‌ها در سطح هر دانه، اندازه دانه و صلبیت بیان می‌شوند. مدل‌های تجربی و تئوری در شرایطی که داده‌های قابل اطمینانی (چاه و مغزه) در دسترس نباشند، تنها تخمینی از مدول موثر سنگ خشک ارائه می‌دهند (کاظمینی و همکاران، ۲۰۱۰).

در رابطه گسمن، مشکل‌ترین بخش محاسبه مدول حجمی سنگ خشک می‌باشد. معمولاً خطاهای تجمعی ناشی از محاسبات مراحل قبل، در محاسبه مدول خشک سنگ اثرگذار است. از جمله عوامل ایجاد کننده خطا می‌توان به نادرست بودن هر یک از پارامترهای خواص ماتریکس، سیال، تخلخل، اشباع آب، نادرست بودن سرعت‌ها و حضور شیل و رس اشاره کرد (میلووک، ۲۰۰۹).

الف- مدل‌های تجربی

دو مدل تجربی مورد بررسی، مدل خطی تخلخل بحرانی^۱ ارائه شده توسط نور^۲ و همکاران (۱۹۹۸) و مدل غیرخطی کریف^۳ و همکاران (۱۹۹۰) است. هر دو مدل شامل دو مرحله زیر می‌باشند (میلووک، ۲۰۰۹):

۱- برقراری روابط تجربی بین مدول حجمی سنگ خشک و مدول برشی با تخلخل و مدول الاستیسیته ماتریکس سنگ.

۲- استفاده از معادله گسمن برای محاسبه خواص الاستیک با سیالات مختلف.

مدل‌های تجربی یک رابطه ریاضی بین مدول‌های موثر الاستیک سنگ خشک و خواص دانه و منفذ برقرار می‌کنند (کاظمینی و همکاران، ۲۰۱۰). نور و همکاران (۱۹۹۸)، بر اساس مفهوم تخلخل بحرانی، سنگ‌ها را به دو دسته کلی تقسیم کردند:

^۱ Critical porosity

^۲ Nur

^۳ Krief

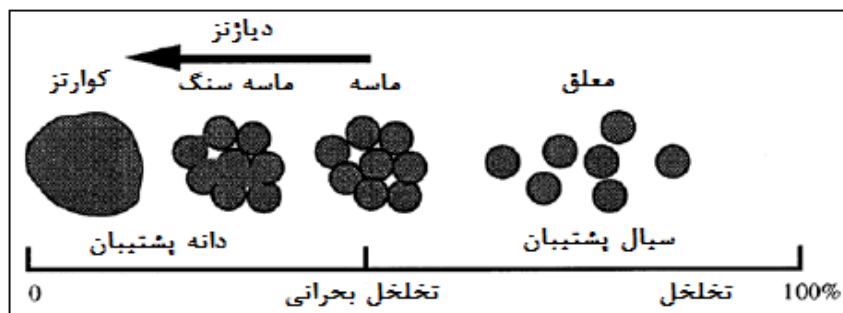
۱- سنگ های تحت بارگذاری دانه که در آن مقادیر تخلخل، $\emptyset$ ، از تخلخل بحرانی، $\emptyset_c$ ، کمتر می باشد
 $(\emptyset_c > \emptyset)$.

۲- سنگ های تحت بارگذاری سیال که در آن مقادیر تخلخل، $\emptyset$ ، از تخلخل بحرانی، $\emptyset_c$ ، بیشتر می باشد
 $(\emptyset > \emptyset_c)$.

• مدل تخلخل بحرانی

در اغلب سنگ های آواری، رفتار صوتی و مکانیکی سنگ ها به ازای یک تخلخل مشخص که آن را تخلخل بحرانی می نامند، مطابق شکل (۲-۲) به دو بخش دانه پشتیبان و سیال پشتیبان تقسیم می شوند (نور و همکاران، ۱۹۹۸).

سرعت موج تراکمی و نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی ($\frac{V_P}{V_S}$) برای مقادیر پایین تخلخل، به سمت مقادیر ماتریکس سنگ و برای تخلخل های بالا به سمت مقادیر سیال موجود در منافذ میل می کند (کاستاگنا^۱ و همکاران، ۱۹۹۳). مدل تخلخل بحرانی، روابط سرعت-تخلخل را برای مقادیر کمتر و بیشتر از تخلخل بحرانی توصیف می کند.



شکل (۲-۲): مفهوم فیزیکی تخلخل بحرانی (نور و همکاران، ۱۹۹۸).

¹ Castagna

در وضعیت سیال پشتیبان (بیشتر از تخلخل بحرانی)، مدول حجمی (K_{sat}) و برشی (μ_{sat}) موثر سنگ با استفاده از حد رويس تخمین زده می شود (ماوکو و همکاران، ۱۹۹۸):

$$\frac{1}{K_{sat}} = \frac{\phi}{K_{fl}} + \frac{1 - \phi}{K_{matrix}} \quad (26-2)$$

$$\mu = 0$$

در محدوده دانه پشتیبان (کمتر از تخلخل بحرانی)، مدول حجمی و برشی سنگ از مقادیر معلق در تخلخل بحرانی به سمت مقادیر ماتریکس سنگ در تخلخل صفر افزایش می یابند. در مدل تخلخل بحرانی، برای سنگ های خشک، مدول حجمی و برشی با تابع خطی از مدول حجمی و برشی ماتریکس سنگ و نسبت تخلخل موجود به تخلخل بحرانی، توصیف می شوند:

$$K_{dry} = K_{matrix} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_c}\right) \quad (27-2)$$

$$\mu_{dry} = \mu_{matrix} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_c}\right) \quad (28-2)$$

• مدل کریف

کریف و همکاران (۱۹۹۰)، برای محاسبه مدول های سنگ خشک که تابعی از مدول حجمی و برشی ماتریکس سنگ و ضریب بایوت است، روابط (۲۹-۲) و (۳۰-۲) را ارائه کردند. آن ها با استفاده از داده های ماسه سنگ مربوط به مطالعه رایمر^۱ و همکاران (۱۹۸۰)، یک رابطه تجربی بین ضریب بایوت و تخلخل پیشنهاد کردند:

$$K_{dry} = K_{matrix} (1 - \beta) \quad (29-2)$$

¹ Raymer

$$\mu_{dry} = \mu_{matrix}(1 - \beta) \quad (30-2)$$

$$(1 - \beta) = (1 - \phi)^{m(\phi)} \quad (31-2)$$

β ضریب بایوت است و مقدار $m(\phi)$ برابر است با:

$$m(\phi) = \frac{3}{1 - \phi} \quad (32-2)$$

ب- مدل‌های تئوری (تماسی)

• مدل هرتز-میندلین

مدول‌های الاستیک در تخلخل بالا (معمولاً تخلخل بحرانی)، به عنوان یک مجموعه کروی الاستیک تحت تاثیر فشار همه جانبه با استفاده از تئوری هرتز-میندلین مدل می‌شوند (دیوورکین و همکاران، ۱۹۹۶). در مدل تماس دانه‌ای، دانه‌ها بصورت همگن، همسانگرد، کروی، الاستیک و کرنش‌ها کوچک فرض می‌شوند (ماوکو و همکاران، ۱۹۹۸). در تخلخل بحرانی، تئوری تماس هرتز-میندلین مطابق رابطه (۳۰-۲) و (۳۱-۲) داده می‌شود:

$$K_{HM} = \left[\frac{n^2 (1 - \phi_c)^2 \mu^2}{18\pi^2 (1 - \nu)^2} P \right]^{\frac{1}{3}} \quad (33-2)$$

$$\mu_{HM} = \frac{5 - 4\nu}{5(2 - \nu)} \left[\frac{3n^2 (1 - \phi_c)^2 \mu^2}{2\pi^2 (1 - \nu)^2} P \right]^{\frac{1}{3}} \quad (34-2)$$

در روابط فوق، K_{HM} و μ_{HM} مدول حجمی و برشی سنگ خشک در تخلخل بحرانی (ϕ_c) ، n عدد کئوردیناسیون^۱، P فشار موثر، μ و ν به ترتیب مدول برشی و نسبت پواسون فاز جامد سنگ (کانی) می‌باشد.

¹ Coordination number

عدد کئوردیناسیون مجموعه‌ای از دانه‌ها، با میانگین تعداد تماس‌ها در هر دانه تعیین می‌شود (ماوکو و همکاران، ۱۹۹۸). عدد کئوردیناسیون با کاهش تخلخل افزایش می‌یابد که به‌طور موثر از افزایش فشار محصور نتیجه می‌شود.

• مدل ماسه‌سنگ سیمانی نشده

مدل ماسه سیمانی نشده (یا ماسه نرم)، مدول حجمی و برشی ماسه خشک که سیمان در سطح تماس دانه‌ها رسوب نکرده است را محاسبه می‌کند. برای محاسبه مدول حجمی و برشی سنگ خشک با فرض یک مجموعه‌ی تصادفی از دانه‌های کروی ایده‌آل با تخلخل بحرانی ۰/۳۶ و میانگین عدد کئوردیناسیون ۹، از حد پایینی هشین-استریکمن برای محدوده کمتر از تخلخل بحرانی استفاده می‌شود:

$$K_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3} \mu_{HM}} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{K + \frac{4}{3} \mu_{HM}} \right]^{-1} - \frac{4}{3} \mu_{HM} \quad (۳۵-۲)$$

$$\mu_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_{HM} + \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right)} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{\mu + \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right)} \right]^{-1} - \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right) \quad (۳۶-۲)$$

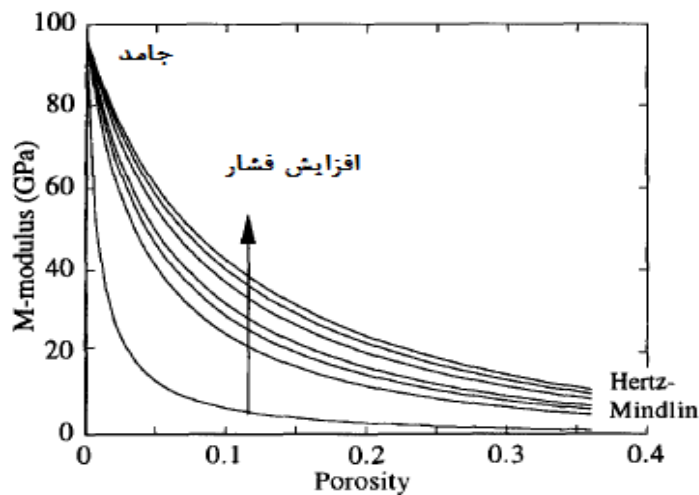
• مدل ماسه‌سنگ سیمانی شده

نقطه مقابل مدل ماسه نرم (سیمانی نشده)، مدل ماسه سیمانی شده است که برای محاسبه مدول حجمی و برشی سنگ خشک با فرض یک مجموعه‌ی تصادفی از دانه‌های کروی ایده‌آل با تخلخل بحرانی ۰/۳۶ و میانگین عدد کئوردیناسیون ۹، از حد بالایی هشین-استریکمن برای محدوده کمتر از تخلخل بحرانی استفاده می‌شود:

$$K_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3} \mu} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{K + \frac{4}{3} \mu} \right]^{-1} - \frac{4}{3} \mu \quad (37-2)$$

$$\mu_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{\mu_{HM} + \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right)} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{\mu + \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right)} \right]^{-1} - \frac{\mu}{6} \left(\frac{9K + 8\mu}{K + 2\mu} \right) \quad (38-2)$$

این دو مدل تماسی مطابق شکل (۳-۲)، دو عضو نهایی دارند؛ یک عضو مربوط به تخلخل صفر و مدول‌های فاز جامد و عضو دیگر مربوط به تخلخل بحرانی و مدول‌های وابسته به فشار است که در تئوری هرتز-میندلین داده شده است. این تئوری تماس، به‌طور قابل توجهی به فشار وابسته است که معمولاً در ماسه‌ها مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۲): بهبود یافته حد پایینی هشین-اشتریکمن با فشارهای محصور مختلف برای ماسه کوارتزی (دیوورکین-نور، ۱۹۹۶).

- مدل دیوورکین-نور (مدل ماسه‌سنگ سیمانی شده)

مدل دیوورکین-نور مستقل از فشار است. این مدل با فرض اینکه سیمان در سطح دانه‌ها رسوب کرده است و دانه‌ها بصورت یک مجموعه تصادفی با دانه‌های کروی ایده‌آل با تخلخل بحرانی $0/36$ و میانگین عدد کثوردیناسیون 9 می‌باشد، مدول حجمی و برشی سنگ خشک را محاسبه می‌کند. در این مدل، سیمان به‌صورت الاستیک بوده و خواص آن متفاوت از دانه‌های کروی تشکیل‌دهنده سنگ است. سیمان قرار گرفته در سطح دانه‌ها، تخلخل را کاهش داده و مدول الاستیک موثر را افزایش می‌دهد. مدول حجمی و برشی موثر خشک سنگ مطابق رابطه $(39-2)$ و $(40-2)$ محاسبه می‌شود (دیوورکین و نور، ۱۹۹۶):

$$K_{dry} = \frac{1}{6}n(1 - \phi_c)M_c S_n \quad (39-2)$$

$$\mu_{dry} = \frac{3}{5}K_{dry} + \frac{3}{20}n(1 - \phi_c)\mu_c S_\tau \quad (40-2)$$

$$M_c = \rho_c V_{Pc}^2 \quad (41-2)$$

$$\mu_c = \rho_c V_{sc}^2 \quad (42-2)$$

در روابط فوق، ρ_c چگالی سیمان و V_{Pc} و V_{sc} به ترتیب سرعت موج تراکمی و برشی سیمان می‌باشند. S_n و S_τ به ترتیب صلبیت نرمال و برشی یک ترکیب دودانه‌ای سیمانی شده^۱ هستند. این دو پارامتر به مقدار سیمان در سطح تماس بین دانه‌ها مربوط می‌باشد و خواص سیمان و دانه‌ها مطابق روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$S_n = A_n \alpha^2 + B_n \alpha + C_n \quad (43-2)$$

$$A_n = -0.024153 A_n^{-1.3646} \quad (44-2)$$

¹ Cemented two-grain combination

$$B_n = 0.20405 \Lambda_n^{-0.89008} \quad (45-2)$$

$$C_n = 0.00024649 \Lambda_n^{-1.9864} \quad (46-2)$$

$$S_\tau = A_\tau \alpha^2 + B_\tau \alpha + C_\tau \quad (47-2)$$

$$A_\tau = -0.01(2.26v^2 + 2.07v + 2.3) \Lambda_\tau^{0.079v^2 + 0.1754v - 1.342} \quad (48-2)$$

$$B_\tau = (0.0573v^2 + 0.0937v + 0.202) \Lambda_\tau^{0.027v^2 + 0.0529v - 0.8765} \quad (49-2)$$

$$C_\tau = -0.0001(9.654v^2 + 4.945v + 3.1) \Lambda_\tau^{0.01867v^2 + 0.4011v - 1.8186} \quad (50-2)$$

$$\Lambda_n = \frac{2\mu_c(1-v)(1-v_c)}{\pi\mu_c(1-2v_c)} \quad (51-2)$$

$$\Lambda_\tau = \frac{\mu_c}{\pi\mu} \quad (52-2)$$

در روابط (۴۳-۲) تا (۵۲-۲)، μ و v به ترتیب مدول برشی و نسبت پواسون دانه‌ها و μ_c و v_c به ترتیب مدول برشی و نسبت پواسون سیمان بین دانه‌ها می‌باشد. مقدار سیمان بین دانه‌ها را می‌توان با نسبت α که برابر با شعاع لایه سیمانی شده، a ، به شعاع دانه، R ، است، بیان کرد:

$$\alpha = \frac{a}{R} \quad (53-2)$$

شعاع لایه سیمانی شده در سطح تماس دانه‌ها، لزوماً ارتباط مستقیمی با مقدار کل سیمان ندارد؛ مطابق شکل (۴-۲)، بخشی از سیمان ممکن است دور از سطح تماس بین دانه‌ها قرار گیرند. هرچند فرض بر این است که کاهش تخلخل در ماسه‌ها، فقط ناشی از سیمانی شدن است و طرح‌های معین رسوبگذاری سیمان مورد قبول است، لذا می‌توان پارامتر α را به تخلخل فعلی ماسه سیمانی شده ارتباط داد. برای مثال از طرح

۱ برای حالتی که تمام سیمان در سطح تماس بین دانه‌ها رسوب کرده و از طرح ۲ برای حالتی که سیمان در سطح دانه رسوب کرده است استفاده می‌شود.

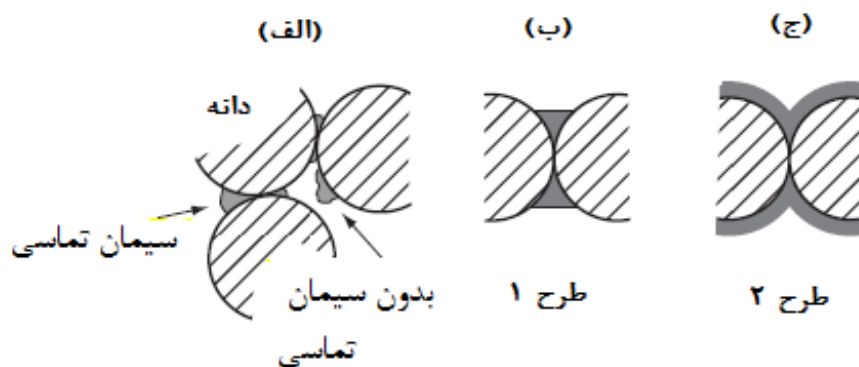
طرح یک:

$$\alpha = 2 \left[\frac{\phi_c - \phi}{3n(1 - \phi_c)} \right]^{\frac{1}{4}} = 2 \left[\frac{S\phi_c}{3n(1 - \phi_c)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (۵۴-۲)$$

طرح دو:

$$\alpha = \left[\frac{2(\phi_c - \phi)}{3(1 - \phi_c)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2S\phi_c}{3(1 - \phi_c)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۵۵-۲)$$

در روابط (۵۴-۲) و (۵۵-۲)، S اشباع‌شدگی سیمان در فضای منفذ است که برابر با کسر حجمی فضای منفذ (ماسه سیمانی‌نشده) اشغال شده با سیمان (در ماسه سیمانی‌شده) می‌باشد.



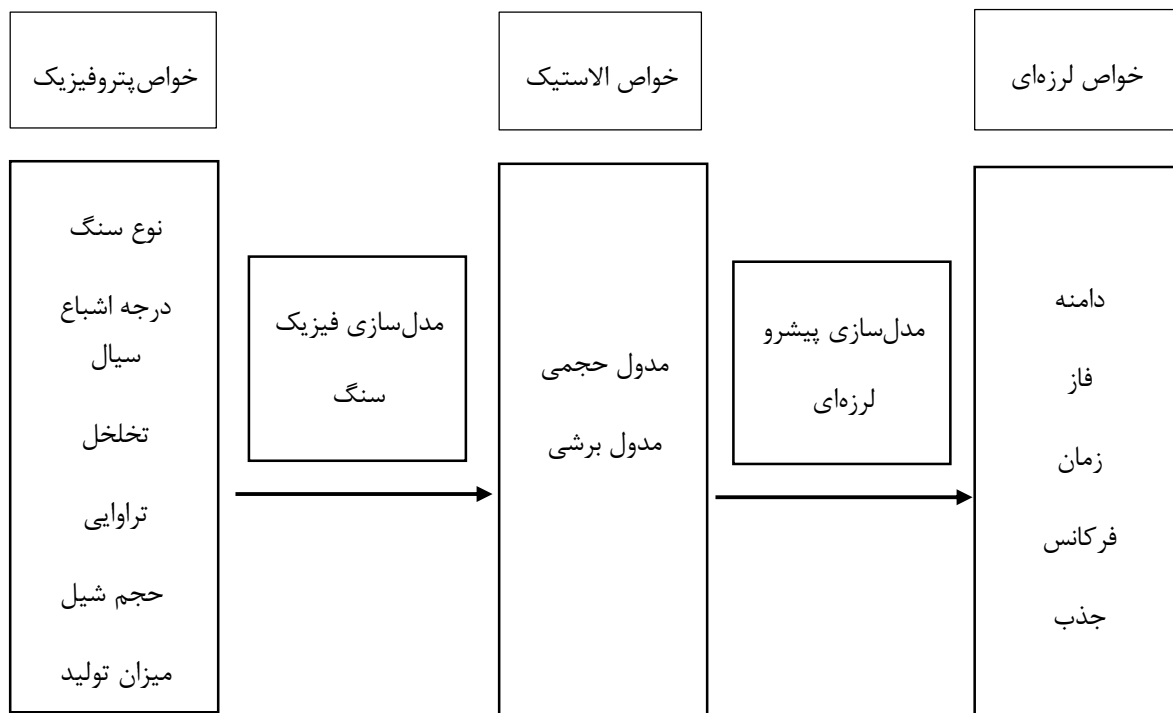
شکل (۴-۲): الف) طرح‌های ارائه شده مربوط به انواع رسوبگذاری سیمان. ب) طرح یک؛ تمام سیمان‌ها در سطح تماس دانه‌ها رسوب کرده است. ج) طرح دو؛ سیمان در سراسر دانه به صورت یکسان رسوب کرده است (دیوورکین و نور، ۱۹۹۶).

۵-۲ لرزه‌نگاری

از اوایل قرن بیستم، ژئوفیزیک اکتشافی و بویژه لرزه‌نگاری به عنوان ابزاری مناسب در پی‌جویی و اکتشاف ذخایر نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفته است. در طی چند دهه گذشته ژئوفیزیکدانان و نیز زمین‌شناسان با ارائه نظریات نوین و فرمول‌های جدید تلاش کرده‌اند تا اطلاعات مورد نظر خود را از داده‌های لرزه‌ای استخراج کنند. در این میان نقش نشانگرهای لرزه‌ای، مقاومت صوتی، بررسی‌های ساختمانی و مطالعات چینه‌شناسی لرزه‌ای از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است. علاوه بر موارد فوق، تکرار برداشت دو بعدی یا سه بعدی لرزه‌ای در فواصل زمانی معین و مشاهده تغییرات به‌وجود آمده نیز به‌صورت ابزاری کارآمد در بررسی رفتار مخزن موثر بوده است (قلاوند و همکاران، ۱۳۸۸).

همانطور که در فصل یک اشاره شد، محققین بسیاری از فیزیک سنگ به منظور محاسبه خواص لرزه‌ای و بازبینی مخازن استفاده کرده‌اند (چای و همکاران، ۲۰۰۹؛ کاظمینی و همکاران، ۲۰۱۰؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ اید و همکاران، ۲۰۱۴؛ هانگ و همکاران، ۲۰۱۵). ارتباط بین خواص پتروفیزیکی، الاستیک و لرزه‌ای سنگ در شکل (۵-۲) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با استفاده از مدل‌سازی فیزیک سنگ می‌توان به خواص الاستیک سنگ از اطلاعات پتروفیزیکی دست یافت. همچنین با مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای با استفاده از خواص الاستیک محاسبه شده، می‌توان خواص لرزه‌ای سنگ را محاسبه کرد. در واقع فیزیک سنگ اجازه پیش‌بینی قابل اعتمادی از تغییرات پاسخ لرزه‌ای ناشی از تغییر شرایط مخزن را می‌دهد (آوست^۱ و همکاران، ۲۰۰۵).

¹ Avseth



شکل (۵-۲): ارتباط بین خواص پتروفیزیکی، الاستیک و لرزه‌ای سنگ.

۵-۲-۱ ضریب بازتاب

قابلیت پیش‌بینی و ویژگی خواص صوتی یک سنگ بر اساس مقاومت صوتی آن تعیین می‌شود. اگر دامنه یک موج لرزه‌ای با A_0 نشان داده شود، زمانی که این موج به سطح میان دولایه با مقاومت صوتی متفاوت برخورد می‌کند، موج عبوری با دامنه A_1 به درون لایه دوم وارد شده و به سمت لایه‌های پایینی ادامه مسیر می‌دهد و موج بازتابی با دامنه A_2 به سطح زمین بازتاب می‌کند. ضریب انعکاس R_C با نسبت دامنه موج بازتاب شده به دامنه موج اولیه تعریف می‌شود و برای یک برخورد عمودی با استفاده از معادله زوپریتز^۱ با توجه به تعریف مقاومت صوتی می‌توان نوشت (امره^۲، ۲۰۰۵):

$$Z(j) = \rho(j)V(j) \quad (۵۶-۲)$$

^۱ Zeoppritz

^۲ Emre

$$R_c(j) = \frac{Z(j) - Z(j-1)}{Z(j) + Z(j-1)} \quad (57-2)$$

در روابط فوق، $Z(j)$ ، مقاومت صوتی لایه j ام، $\rho(j)$ ، چگالی لایه j ام، $V(j)$ ، سرعت انتشار موج در لایه j ام و $R_c(j)$ ، ضریب بازتاب مربوط به حد بین لایه $j-1$ و j ام می‌باشد.

برای موج‌های تابشی غیر عمود، نسبت دامنه‌ها به پارامترهای دیگری مثل سرعت انتشار موج برشی و زاویه تابش بستگی دارد. در رابطه (57-2) مقدار ضریب بازتاب بین عدد $+1$ و -1 قرار می‌گیرد. ضریب بازتاب بسته به اینکه $Z(j-1)$ یا $Z(j)$ کدام بزرگتر باشند، می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مثبت بودن این مقدار نشان‌دهنده این است که مقاومت صوتی بین دولایه با افزایش عمق زیاد می‌شود و اگر منفی باشد نشان‌دهنده کاهش مقاومت صوتی بین دولایه با افزایش عمق می‌باشد (هاردیج^۱، ۱۹۸۷).

۲-۶ مدل‌سازی لرزه‌ای

۲-۶-۱ مقدمه

مدل‌سازی لرزه‌ای عددی که از اوایل دهه ۱۹۵۰ آغاز شده است، شامل حل معادلات موج به‌منظور شبیه‌سازی انتشار امواج لرزه‌ای در داخل زمین می‌باشد. روش‌های مدل‌سازی لرزه‌ای عددی را می‌توان به سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: روش‌های مستقیم^۲، روش‌های انتگرالی^۳ و روش‌های ردیابی پرتو^۴ (کارکیونه^۵ و همکاران، ۲۰۰۲).

در روش‌های مستقیم، که روش معادله کامل موج^۶ نیز نامیده می‌شود، امواج لرزه‌ای در سراسر یک شبکه عددی انتشار یافته و در نقاط شبکه ثبت می‌شوند. یکی از روش‌های مدل‌سازی عددی قدیمی که مربوط به

¹ Hardage

² Direct method

³ Integral equation

⁴ Ray Tracing

⁵ Carcione

⁶ Full_wave equation

دهه ۱۹۵۰ است، روش مدل سازی لرزه‌ای بازتابی می‌باشد که در دسته روش‌های مستقیم قرار می‌گیرد (تامسون^۱، ۱۹۵۰). روش‌های مستقیمی که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل روش تفاضل محدود^۲(FD)، شبه طیفی^۳ (PS) و المان‌های محدود^۴ (FE) می‌باشند. در روش‌های مدل سازی مستقیم لرزه‌ای، اگر شبکه به اندازه کافی کوچک باشد، می‌توان با دقت بسیار بالایی مدل سازی را انجام داد. یکی از معایب روش‌های مدل سازی مستقیم، بالا بودن زمان محاسبات است (کارکیونه و همکاران، ۲۰۰۲). در روش معادله انتگرالی، میدان‌های موج در موقعیت‌های مختلف و در امتداد جبهه موج بر اساس اصل هویگنس^۵ محاسبه می‌شود. دو روش موجود در این محاسبه شامل روش معادله انتگرال حوزه^۶ و روش معادله انتگرال حدی^۷ می‌باشد.

روش ردیابی پرتو به‌طور فراوانی در مدل سازی لرزه‌ای و تصویر سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش به میدان کامل موج دسترسی ندارد و میدان موج به عنوان یک سری از رویدادهای معین که شامل زمان سیر و دامنه می‌باشند، مطرح می‌گردند (علایی^۸، ۲۰۱۲). برای محاسبه زمان سیر و دامنه امواج لرزه‌ای عبوری در داخل زمین، از معادلات ایکونال^۹ و انتقال^{۱۰} استفاده می‌شود. ردیابی پرتو به‌طور کلی سریعتر از روش‌های معادله موج مستقیم اجرا می‌شود و راندمان بالایی را در مدل سازی لرزه‌ای نشان می‌دهد (ما^{۱۱}، ۲۰۰۳).

۲-۶-۲ کاربرد مدل سازی لرزه‌ای

مدل سازی لرزه‌ای، نقش مهمی در تمامی بخش‌های لرزه‌شناسی اکتشافی مانند طراحی عملیات لرزه‌ای، پردازش، تفسیر و توصیف مخازن دارد (سدر^{۱۲}، ۲۰۱۳). هدف از مدل سازی لرزه‌ای، شبیه سازی انتشار امواج

¹ Thomson

² Finite difference

³ Pseudo spectral

⁴ Finite element

⁵ Huygens

⁶ Domain integral-equation

⁷ Boundary integral-equation

⁸ Alaei

⁹ Eikonal

¹⁰ Transport

¹¹ Ma

¹² Seather

لرزه‌ای با استفاده از مدل‌های منطبق با ساختارهای واقعی زمین‌شناسی است. مفسران با کمک داده‌های لرزه‌ای مصنوعی حاصل از روش‌های مدل‌سازی لرزه‌ای، بهتر می‌توانند داده‌های واقعی حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری را تفسیر کنند (ما، ۲۰۰۳). استفاده از مدل‌سازی در طراحی عملیات لرزه‌ای، باعث کاهش ریسک در اکتشاف و طراحی بهتر برداشت لرزه‌ای می‌شود. اگر وضعیت زمین‌شناسی پیچیده باشد، مدل‌سازی لرزه‌ای می‌تواند برای بررسی پارامترهای مختلف عملیات لرزه‌ای و به‌دست آوردن کیفیت مطلوب داده‌ها استفاده شود (آندرسون و کاردیمونو^۱، ۲۰۰۲).

در پردازش داده‌های لرزه‌ای، از مدل‌سازی برای بررسی الگوریتم‌های مختلف پردازش استفاده می‌شود. مرحله کوچ^۲، یکی از مهم‌ترین مراحل برای تنظیم کردن مدل‌سازی لرزه‌ای است (سدر، ۲۰۱۳). در تفسیر داده‌های لرزه‌ای با کمک مدل‌سازی لرزه‌ای و تولید لرزه‌نگاشت مصنوعی و مقایسه آن با لرزه‌نگاشت واقعی، می‌توان تفسیر بهتری از مخازن هیدروکربوری به عمل آورد. همچنین می‌توان برای بررسی مشکلات مختلفی که ممکن است در طول تفسیر داده‌های واقعی با آن مواجه شد، به‌ویژه در مناطقی که ساختار پیچیده زمین‌شناسی دارند، استفاده کرد.

از نقطه نظر مطالعات امکان‌سنجی می‌توان گفت که مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای بخشی از این مطالعات می‌باشد که با هدف پیش‌بینی تغییرات لرزه‌ای که ممکن است در بازبینی لرزه‌ای زمان‌های مختلف اتفاق بیفتد، انجام می‌شود (ژانگ، ۲۰۰۶).

۲-۶-۳ مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای

مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای شامل دو مرحله اصلی ساخت مدل زمین‌شناسی و محاسبه عددی پاسخ لرزه‌ای از مدل می‌باشد. مدل‌های لرزه‌ای می‌تواند به‌صورت یک، دو و یا سه بعدی باشند. مدل‌های یک بعدی در مکان

¹ Anderson and Cardimona

² Migration

چاه به منظور پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای مدل زمین‌شناسی و کمک به آنالیز همبستگی چاه با داده لرزه‌ای ساخته می‌شوند (علایی، ۲۰۱۲).

۲-۶-۳-۱ ساخت مدل^۱

مدل‌سازی فرآیندی است که با ساخت هندسه مدل شروع شده و از خواص مربوط به واحدهای مختلف مدل مانند سرعت و چگالی، پیروی می‌کند. هندسه مدل صرف‌نظر از روش مدل‌سازی، ترکیبی از گسل‌ها و سطوح چین‌شناسی (افق‌ها) مانند افق‌هایی که مربوط به بالا و پایین سنگ مخزن، دگرشیبی، بالا و پایین گنبد نمکی و سطوحی که منطبق با تغییرات عمده سرعت است، می‌باشد. گسل‌ها و سطوح ساختاری که از کنار هم قرار گرفتن سنگ‌هایی با خواص مختلف می‌باشد، باعث پراکندگی موج لرزه‌ای می‌شوند. این واحدهای ساختمانی بایستی براساس اهداف مدل‌سازی و زمین‌شناسی انتخاب شوند. اهداف مدل‌سازی علاوه بر اینکه اهداف زمین‌شناسی را شامل می‌شود، انتشار موج لرزه‌ای از طریق مدل را نیز در برمی‌گیرد. برای مثال اگر تغییرات عمده سرعت در بالای افق هدف (روباره) وجود داشته باشد، سطوح اضافی یا فصل مشترک‌هایی باید گنجانده شود که به‌طور صحیحی توزیع موج لرزه‌ای را از طریق تغییرپذیری سرعت روباره شبیه‌سازی کند (سدر، ۲۰۱۳).

مسیرهای پرتو با حل یک معادله دیفرانسیل معین که از معادله موج بدست آمده (مدل‌های شبکه‌بندی شده) و یا با استفاده از نتایج تحلیلی در داخل لایه‌ها و قانون اسنل (مدل‌های مبتنی بر سطح مشترک) حل می‌شوند (علایی، ۲۰۱۲).

الف) مدل‌های مبتنی بر سطح مشترک

¹ Model Building

اولین مرحله در ساخت مدل مبتنی بر سطح مشترک، انتخاب ابعاد مدل می‌باشد. مرحله بعدی مربوط به ایجاد مدل با افق‌ها و گسل‌ها (سطح مشترک) می‌باشد. این سطح مشترک‌ها که توسط منحنی و یا خطوط ساخته می‌شوند، شامل نقاطی در حوزه زمان و یا عمق هستند. پس از ساخت مدل زمین‌شناسی، اختصاص خواص فیزیکی به هر لایه در مدل نیاز است. مدل‌سازی لرزه‌ای به خواص سرعت موج تراکمی، موج برشی و چگالی نیاز دارد. این خواص به بلوک‌هایی در مدل اختصاص داده می‌شود. یک بلوک به عنوان فصل مشترک بین دو سطح مشترک مختلف و حدهای مدل تعیین می‌شود. مدل‌های مبتنی بر سطح مشترک در روش‌های ردیابی پرتو استفاده می‌شود که در بخش‌های بعدی توضیح داده خواهد شد (سدر، ۲۰۱۳).

ب) مدل‌های مبتنی بر شبکه

مدل مبتنی بر شبکه با نقاطی که گره نامیده می‌شوند، معرفی می‌گردد. این گره‌ها به همسایگان خود متصل شده و شبکه را به وجود می‌آورند. فاصله بین نقاط در یک امتداد یکسان می‌باشد اما فاصله بین نقاط در یک امتداد با فاصله بین نقاط در امتدادهای دیگر ممکن است، متفاوت باشد. به دلیل ساده شدن معادلات و کاهش زمان محاسبات، معمولاً از فاصله یکسانی بین نقاط در تمام امتدادها استفاده می‌شود (سدر، ۲۰۱۳). هر گره دارای یک مقدار مختصات (x, y, z) و خواص فیزیکی (سرعت و چگالی) می‌باشد. روش ساخت یک مدل مبتنی بر شبکه بسیار شبیه به مدل مبتنی بر سطح مشترک است. مرحله اول تعیین اندازه مدل و سپس نقشه ساختارهای زمین‌شناسی در مدل می‌باشد. پس از آن خواص مربوط به هر واحد و مقادیر مربوط به آن گره‌ها تعیین می‌شود. مدل‌های مبتنی بر شبکه در روش‌های مستقیم استفاده می‌شود (سدر، ۲۰۱۳).

۲-۶-۳-۲ محاسبه عددی پاسخ لرزه‌ای از مدل

روش‌های مدل‌سازی لرزه‌ای، پاسخ لرزه‌ای مربوط به مدل‌های زیرسطحی را محاسبه کرده و توسط گیرنده‌ها پاسخ را ثبت می‌کنند. ورودی مدل‌سازی لرزه‌ای، مدل‌هایی با خواص مورد نیاز است. همچنین لازم است

در مورد پارامترهای هدفیابی مانند چشمه سیگنال، که اغلب موجک ریکر است، تصمیم‌گیری شود (سدر، ۲۰۱۳). در ادامه به توصیف روش‌های محاسباتی رایجی که برای ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی استفاده می‌شود، مانند روش ردیابی پرتو و تفاضل محدود، پرداخته می‌شود (امیر^۱، ۲۰۱۱).

الف) روش ردیابی پرتو

روش ردیابی پرتو، به جای جبهه موج منتشر شده از چشمه به گیرنده‌ها، با یکسری مسیرهای پرتو آسروکار دارند. مسیرهای پرتو توسط حل معادله دیفرانسیل به‌دست آمده از معادله موج لرزه‌ای یا با استفاده از قانون اسنل که به‌ترتیب برای یک مدل شبکه‌بندی شده و یک مدل مبتنی بر سطح مشترک است، محاسبه می‌شوند. هنگام استفاده از قانون اسنل، سرعت و جهت مسیر پرتو در داخل یک لایه ناهمگن، ثابت فرض می‌شود. سرعت و تغییرات امتداد در یک سطح مشترک، مطابق با این قانون است (علایی، ۲۰۱۲). معادله ایکونال (۵۸-۲)، یک معادله غیرخطی دیفرانسیل با مشتقات جزئی مرتبه اول است. این معادله زمان سیر موج لرزه‌ای را توصیف می‌کند و برای شرایط فرکانس بالا معتبر است. معادله ایکونال، پایه و اساس ردیابی پرتو پویا است که تنها نیاز به یک مدل سرعت برای محاسبه زمان سیر پرتوها دارد (لندرو^۳، ۲۰۱۱). زمان سیر موج (T) از چشمه به نقطه x در یک محیط همسانگرد ناهمگن، توسط معادله ایکونال مطابق با رابطه (۵۸-۲) حل می‌شود (کریس^۴، ۲۰۰۴):

$$(\nabla T)^2 = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{v^2} \quad (58-2)$$

که v سرعت موج لرزه‌ای در نقطه x می‌باشد.

¹ Amir

² Raypaths

³ Landrø

⁴ Krebs

زمانی که T معلوم باشد، دامنه پرتو A را می‌توان با تقریب فرکانس بالا با حل معادله انتقال که یک معادله خطی دیفرانسیل با مشتقات جزئی مرتبه اول است، مطابق رابطه (۵۹-۲) محاسبه کرد (کریس، ۲۰۰۴). ردیابی پرتو پویا و یا محاسبه دامنه، نیاز به هر دو مدل سرعت و مدل چگالی دارد (سدر، ۲۰۱۳).

$$2\nabla A \cdot \nabla T + A\nabla^2 T = 0 \quad (۵۹-۲)$$

روش‌های ردیابی پرتو در زوایای کم‌تر از زاویه بحرانی کاملاً دقیق و درست می‌باشند و برای دورافت‌های بیشتر از زاویه بحرانی به‌طور قابل قبولی صحیح هستند، اما برای دورافت‌های نزدیک به زاویه بحرانی نادرست می‌باشند (کریس، ۲۰۰۴). ردیابی پرتو را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: روش‌های دورافت و دورافت صفر، که بستگی به تنظیمات چشمه و گیرنده هدف مدل‌سازی دارد (سدر، ۲۰۱۳).

ب) روش تفاضل محدود

اساس حل معادلات دیفرانسیل با روش تفاضل محدود بر پایه جایگزینی مشتقات دیفرانسیل با تقریباتی است که به کمک بسط چند جمله‌ای تیلور حول یک نقطه بدست می‌آید (خسروی و همکاران، ۱۳۹۳). مقادیر مشتقات را با سه روش می‌توان تقریب زد؛ تقریب از نوع پیش‌رونده^۱، پس‌رونده^۲ و مرکزی^۳. برای افزایش دقت باید ابعاد شبکه کوچکتر انتخاب شود و برای جلوگیری از پراکندگی شبکه می‌توان از اندازه شبکه‌های تنظیم شده مربوط به طول موجک غالب در میدان موج استفاده کرد. یکی از معایب روش تفاضل محدود تولید بازتاب مصنوعی از لبه‌های شبکه عددی است، که می‌توان با استفاده از شرایط جذب^۴ یا بدون بازتاب^۵ این مشکل را حل کرد. یکی دیگر از معایب این روش وقت‌گیر بودن آن است (کریس، ۲۰۰۴).

¹ Forward
² Backward
³ Central

⁴ Absorbing
⁵ Non-reflecting

از آنجایی که در این پایان نامه از روش ردیابی پرتو استفاده شده است، از توضیحات بیشتر در مورد روش تفاضل محدود خودداری شده است.

۷-۲ نشانگرهای لرزه‌ای

هرگونه اطلاعات کمی و یا کیفی حاصل از داده‌های لرزه‌ای را نشانگر لرزه‌ای می‌نامند. نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان یک مقدار ریاضی از داده‌های خام لرزه‌ای محاسبه شده و اطلاعات پنهان آن را استخراج می‌کند. از نشانگرهای لرزه‌ای می‌توان برای پیش‌بینی، توصیف و بازبینی مخازن هیدروکربوری استفاده کرد (سابرامانیام و رائو^۱، ۲۰۰۸).

کاربرد نشانگرهای لرزه‌ای از دهه ۱۹۷۰ آغاز شد و نشانگرهای زیادی معرفی و مورد استفاده قرار گرفتند. هر کدام از نشانگرهای لرزه‌ای برای توصیف یکی از ویژگی‌های فیزیکی یا زمین‌شناختی لایه‌های زیر سطحی کاربرد دارند.

۷-۲-۱ محاسبه نشانگرها با استفاده از ردلرزه مختلط

روش‌های مختلفی برای محاسبه نشانگرهای لرزه‌ای وجود دارد. این روش‌ها شامل تحلیل ردلرزه مختلط^۲، روش‌های آماری بازه‌ای^۳، اندازه‌گیری همبستگی^۴، آنالیز فوریه، آنالیز زمان-فرکانس، تبدیل موجک^۵، مولفه‌های اصلی^۶ و روش‌های تجربی مختلف می‌شوند (بارنز^۷، ۲۰۰۱).

آنالیز ردلرزه مختلط، اطلاعات فاز و دامنه را از هم تفکیک می‌کند. یک ردلرزه مختلط مانند $z(t)$ شامل یک بخش حقیقی $x(t)$ که مربوط به ردلرزه است و یک بخش موهومی $y(t)$ که از تبدیل هیلبرت ردلرزه محاسبه شده است، می‌باشد (بارنز، ۲۰۰۷):

¹ Subrahmanyam and Rao

² Complex trace analysis

³ Interval statistic

⁴ Correlation measures

⁵ Wavelet transforms

⁶ Principal components

⁷ Barnez

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (۶۰-۲)$$

با کمک تبدیل هیلبرت، تابعی حاصل می‌شود که فقط تابع زمان بوده و با استفاده از آن می‌توان نشانگرهای لحظه‌ای راحاسبه کرد (تانر^۱، ۲۰۰۰).

در ادامه به توصیف برخی از نشانگرهای حاصل از ردلرزه مختلط پرداخته می‌شود.

الف) نشانگر پوش دامنه (شدت بازتاب)^۲

نشانگر پوش دامنه، $A(t)$ ، با استفاده از ردلرزه مختلط مطابق رابطه (۶۱-۲) محاسبه می‌شود (بارنز، ۲۰۰۷):

$$A(t) = |z(t)| = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (۶۱-۲)$$

این نشانگر با یک فرکانس پایین ظاهر شده و فقط شامل دامنه‌های مثبت می‌باشد. نشانگر پوش دامنه نشان دهنده انرژی لحظه‌ای ردلرزه و متناسب با دامنه (مقدار) آن در ضریب بازتاب می‌باشد. این نشانگر مستقل از فاز بوده و بطور عمده‌ای نشان دهنده اختلاف مقاومت صوتی و در نتیجه بازتاب‌پذیری می‌باشد. از جمله کاربردهای این نشانگر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (سابرامانیام و رائو، ۲۰۰۸):

لکه‌های روشن، تجمع گاز، توالی حدها، حوضه‌های رسوبگذاری، دگرشیبی، تغییرات عمده سنگ‌شناسی، تغییرات محلی تعیین کننده گسلش، همبستگی فضایی با تخلخل و دیگر تغییرات سنگ‌شناسی می‌باشد.

ب) مشتق اول زمانی پوش دامنه^۳

این نشانگر مطابق با رابطه (۶۲-۲) محاسبه می‌شود:

$$D_1(t) = \frac{d(A(t))}{dt} \quad (۶۲-۲)$$

از کاربردهای این نشانگر می‌توان موارد زیر را نام برد (سابرامانیام و رائو، ۲۰۰۸):

¹ Taner

² Amplitude envelope (Reflection strength)

³ The first derivative of envelope

- تغییر در بازتاب پذیری که به جذب انرژی ارتباط دارد.

- واضح شدن افزایش زمان مرتبط با جذب.

- فواصل مشترک مشخص و ناپیوستگی‌ها.

پ) مشتق دوم زمانی پوش دامنه^۱

نشانگر مشتق دوم زمانی پوش دامنه، مطابق با رابطه (۶۳-۲) محاسبه می‌شود:

$$D_2(t) = \frac{d^2(A(t))}{dt^2} \quad (۶۳-۲)$$

این نشانگر بیش از حد به دامنه حساس نبوده و می‌تواند برای مشخص کردن هر رویداد ضعیف مورد استفاده

قرار گیرد. از جمله کاربردهای این نشانگر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (سابرامانیام و رائو، ۲۰۰۸):

- نشان‌دهنده تمام سطوح مشترک بازتاب‌شده قابل مشاهده در پهنای باند لرزه‌ای.

- نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی رویدادها.

- نمایان ساختن تغییرات شدید سنگ‌شناسی.

- ارائه دهنده بسیار خوبی از تصویر زیر سطحی در پهنای باند لرزه‌ای.

ت) دامنه لحظه‌ای تربیعی^۲

نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی، $y(t)$ ، برابر با تبدیل هیلبرت ردلرزه ورودی، $x(t)$ ، است. این نشانگر از

چرخش فاز ۹۰- درجه بر روی ردلرزه ورودی حاصل شده است (بارنز، ۲۰۰۷). خصوصیت چرخش فاز در

این نشانگر در کنترل کیفیت فاز لحظه‌ای، شناسایی برخی از ناهنجاری‌های AVO از لایه‌های نازک که

ممکن است فقط در فاز خاصی قابل مشاهده باشد، مفید است (سابرامانیام و رائو، ۲۰۰۸).

¹ The second derivative of envelope

² Instantaneous quadrature amplitude

ث) نرمی^۱

نشانگر نرمی، $s_r(t)$ ، از نسبت پاسخ دامنه، $a_r(t)$ ، به جذر پاسخ فرکانس، $f_r(t)$ ، حاصل می‌شود:

$$s_r(t) = \frac{a_r(t)}{\sqrt{f_r(t)}} \quad (۶۴-۲)$$

نرمی یک نشانگر لرزه‌ای تجربی است که برای شناسایی نقاط نرم^۲، که مستعد حضور نفت و گاز می‌باشند طراحی شده است. در رسوبات آواری جوان، نقاط نرم اغلب با دامنه بالا و فرکانس پایین مشخص می‌شوند. بعضی مواقع شدت بازتاب و فرکانس لحظه‌ای، بجای پاسخ دامنه و پاسخ فرکانس استفاده می‌شود. نرمی دقیقاً مشابه شدت بازتاب است.

^۱ Sweetness

^۲ Sweet spots

فصل سوم

معرفی زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و داده‌های

موجود

۱-۳ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی مورد مطالعه یکی از میادین نفتی واقع در خلیج فارس می‌باشد. افق اصلی تولید کننده نفت در این میدان، ماسه‌سنگ X می‌باشد که در عمق تقریبی ۸۰۰ تا ۹۰۰ متر و زمان رفت و برگشت ۷۰۰ تا ۷۵۰ میلی‌ثانیه واقع شده است. مخزن نفتی حداکثر از ۱۰۰ متر ماسه سخت نشده با جورشدگی ضعیف و بین لایه‌های شیل، دولومیت و سیمان دولومیتی و انیدریتی تشکیل شده است. دانه‌بندی ماسه‌ها ریز تا خیلی ریز با مقدار کمی فلدسپات می‌باشد. بخش ماسه‌سنگ X، به پنج زون X1، X2، X3، X4 و X5 تقسیم می‌شود. باتوجه به مقررات شرکت ملی نفت، از ذکر جزئیات بیشتر میدان مورد مطالعه اجتناب شده است.

۲-۳ داده‌های مورد استفاده

۱- چک‌شات^۱: در دو چاه W_1 و W_2 موجود می‌باشد. از چک‌شات برای تبدیل داده‌ها از حوزه عمق به زمان استفاده می‌شود.

۲- داده لرزه‌نگاری دو بعدی: سه خط لرزه‌نگاری دو بعدی که از نزدیکی سه چاه W_1، W_2 و W_9 عبور می‌کند موجود می‌باشد. فواصل خطوط لرزه‌نگاری عبوری نزدیک به هر چاه، در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول (۱-۳): فواصل خطوط لرزه‌نگاری از هر چاه.

چاه	فاصله از خطوط لرزه‌نگاری دوبعدی (متر)
W_1	۶۸۲
W_2	۶۲۷/۲
W_9	۳۸۰/۹۱

¹ Check Shot

۳. نگارهای چاه‌پیمایی و ارزیابی‌های پتروفیزیکی: در این مطالعه از داده‌های چهار چاه W_1، W_2، W_7 و W_9 استفاده شده است. ارزیابی‌های پتروفیزیکی شامل درصد اشباع آب، تخلخل، حجم شیل و درصد کانی‌ها در هر چهار چاه موجود می‌باشد. سایر نگارها شامل نگار چگالی و زمان گذر موج تراکمی می‌باشد. از بین چاه‌های موجود، فقط در چاه W_7 بوسیله ابزار نمودارگیری دو قطبی برشی (DSI^۱) زمان گذر موج برشی تهیه شده است. شکل (۳-۱) تا (۳-۴)، نگارهای چاه‌پیمایی، ستون چینه‌شناسی، نگار اشباع آب و تخلخل چاه‌ها را که با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ^۲ ترسیم شده است، نشان می‌دهد.

۴- اطلاعات مربوط به عمق سرسازندها و بخش‌ها: عمق شروع سرسازندها و بخش‌های پوش‌سنگ M، بخش M، پوش‌سنگ مخزن ماسه‌ای X، مخزن ماسه‌ای X و بخش N در تمام چاه‌ها موجود می‌باشد. عمق شروع سرسازندها در جدول (۳-۲) آورده شده است. این اعماق از سطح میز دوار (RKB^۳) اندازه‌گیری شده است.

جدول (۳-۲): عمق شروع سرسازندها در چاه‌ها.

عمق شروع سازندها (متر)				نام سازندها
W_1	W_2	W_7	W_9	
۸۲۸	۸۲۲	۸۴۵	۸۵۲	پوش‌سنگ M
۸۳۸	۸۳۱	۸۵۳	۸۶۲	بخش M
۸۵۸	۸۵۰	۸۷۸	۸۸۷	پوش‌سنگ مخزن ماسه‌ای X
۸۶۱	۸۵۶	۸۸۱	۸۹۱	مخزن ماسه‌ای X
۹۳۷	۹۳۰	۹۶۹	۹۷۷	بخش N

^۱ Dipole Shear Sonic Imager

^۲ Geolog

^۳ Rotary Kelly Bushing

۵- موقعیت و مسیر چاه‌ها: این اطلاعات شامل مختصات چاه‌ها، ارتفاع میزگردان از سطح دریا (RKB)، شیب و آزمون چاه‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که تمام چاه‌ها قائم می‌باشند، بنابراین شیب و آزمون آن‌ها برابر با صفر است.

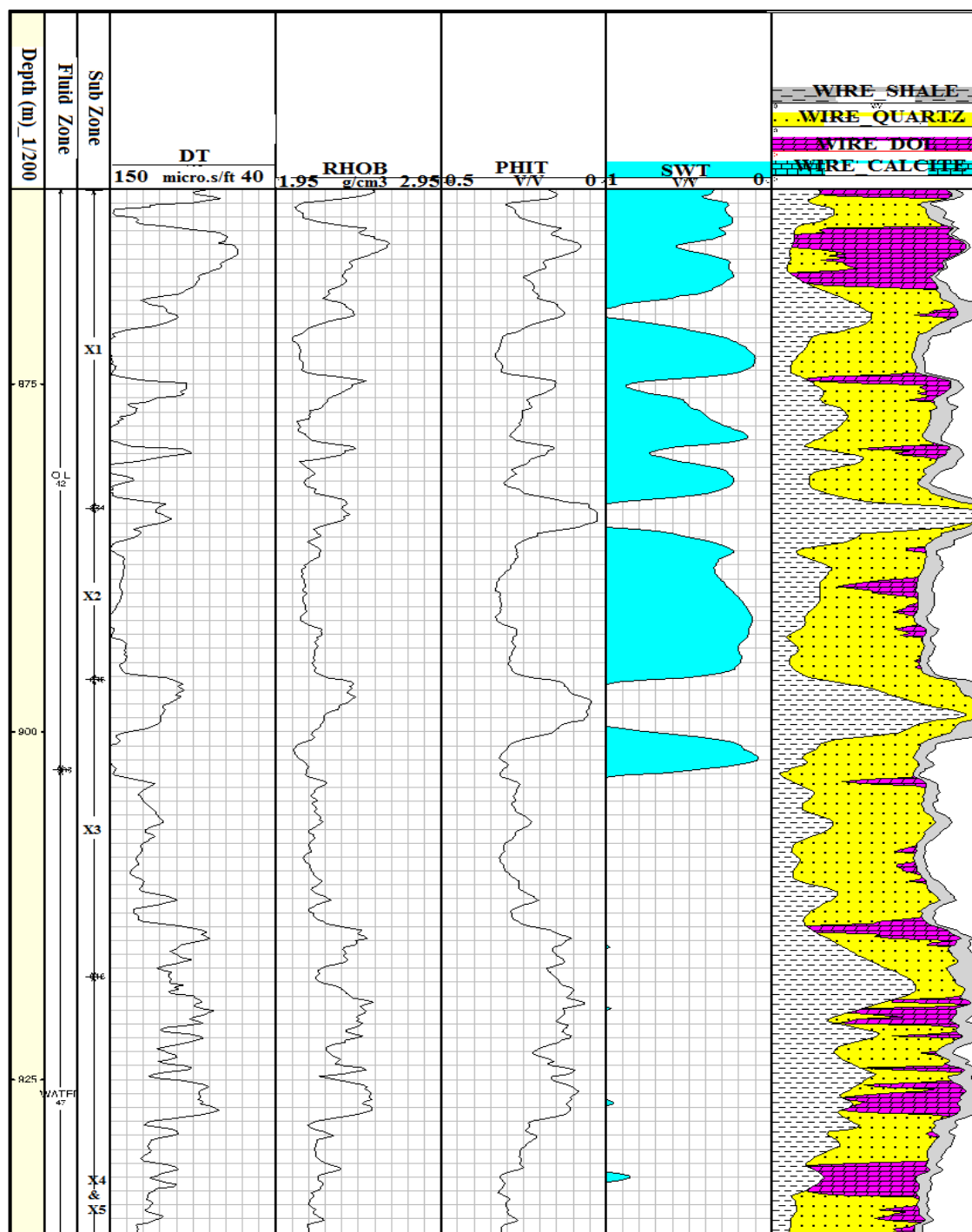
۶- اطلاعات مربوط به PVT^1 و خواص سیالات مخزن: این اطلاعات شامل دما، فشار، گرانیوی مخصوص گاز (درجه API)، میزان شوری آب و نسبت گاز به نفت (GOR) می‌باشد که در جدول (۳-۳) آورده شده است.

موقعیت قرارگیری چاه‌ها در میدان مورد بررسی، در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. شکل (۳-۶) موقعیت چاه‌ها و مقطع لرزه‌ای دو بعدی گذرنده از نزدیکی این چاه‌ها را نمایش می‌دهد. لازم به توضیح است که از بین چهار چاه موجود، فقط چاه‌های W_1 و W_2 تولیدی می‌باشند. از چاه W_7 فقط برای تخمین سرعت برشی استفاده شده است. با توجه به موقعیت قرارگیری چاه‌های W_1 ، W_2 و W_9 که در بخش‌های مختلف میدان قرار گرفته‌اند و به دلیل اینکه چاه W_7 چاه آزمایشی می‌باشد، از سه چاه W_1 ، W_2 و W_9 برای بدست آوردن مدل فیزیک سنگ مناسب استفاده شده است. در نهایت به دلیل اینکه چاه‌های W_1 و W_2 تولیدی هستند، برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای از این دو چاه استفاده شده است.

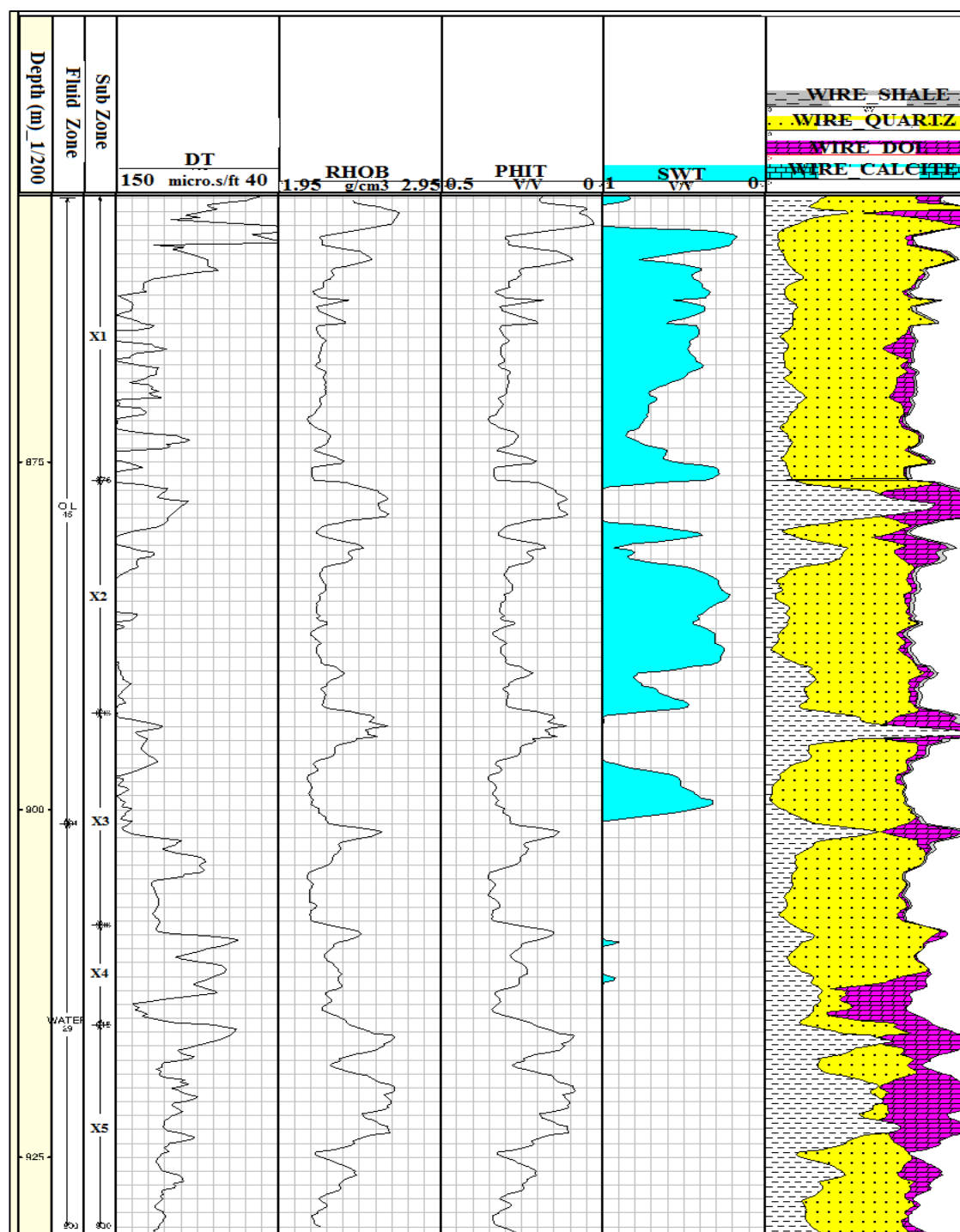
جدول (۳-۳): اطلاعات مربوط به PVT و خواص سیالات مخزن.

مقدار	واحد	پارامتر اندازه‌گیری شده
۴۷/۲۲	C^0	دما
۱۴۱۴/۷	PSI	فشار
۲۷	API	گرانیوی مخصوص نفت
۱۸۶۵۶۹	PPM	میزان شوری آب
۶۱/۹۸	L/L	نسبت گاز به نفت

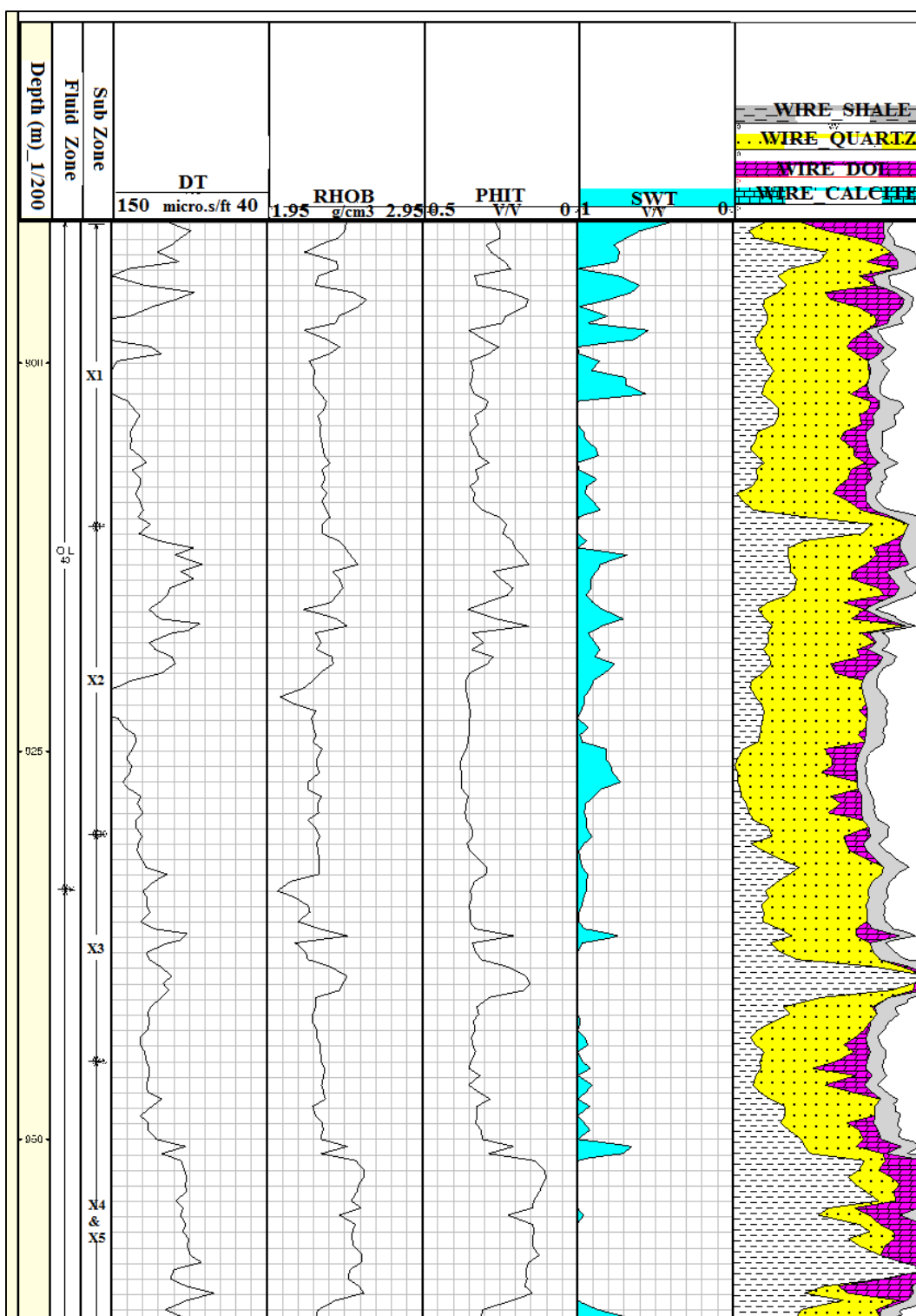
¹ Pressure-Volume-Temperature



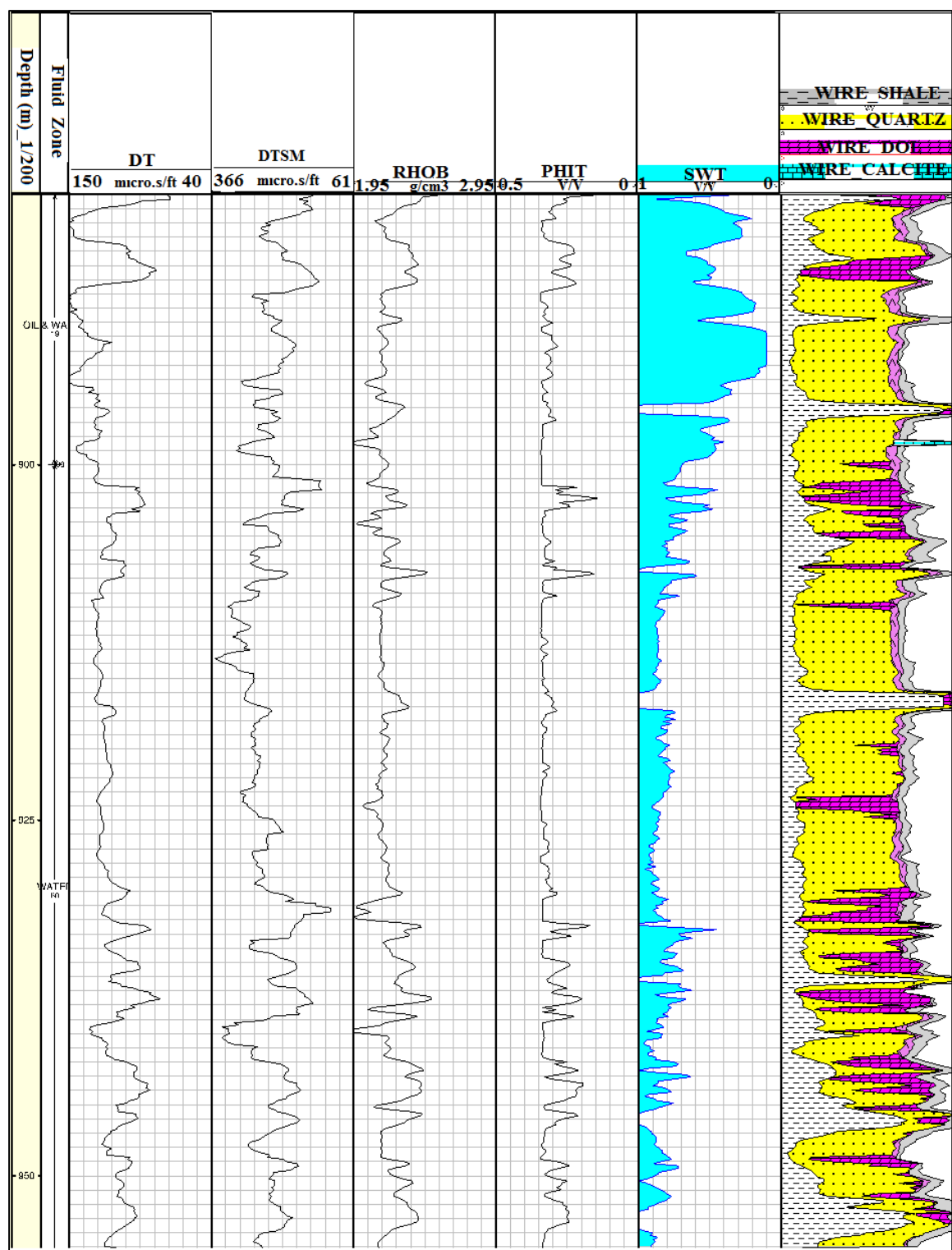
شکل (۱-۳): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، زون های مخزنی (ترک ۳)، سونیک (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع شدگی (ترک ۷) و سنگ شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_1.



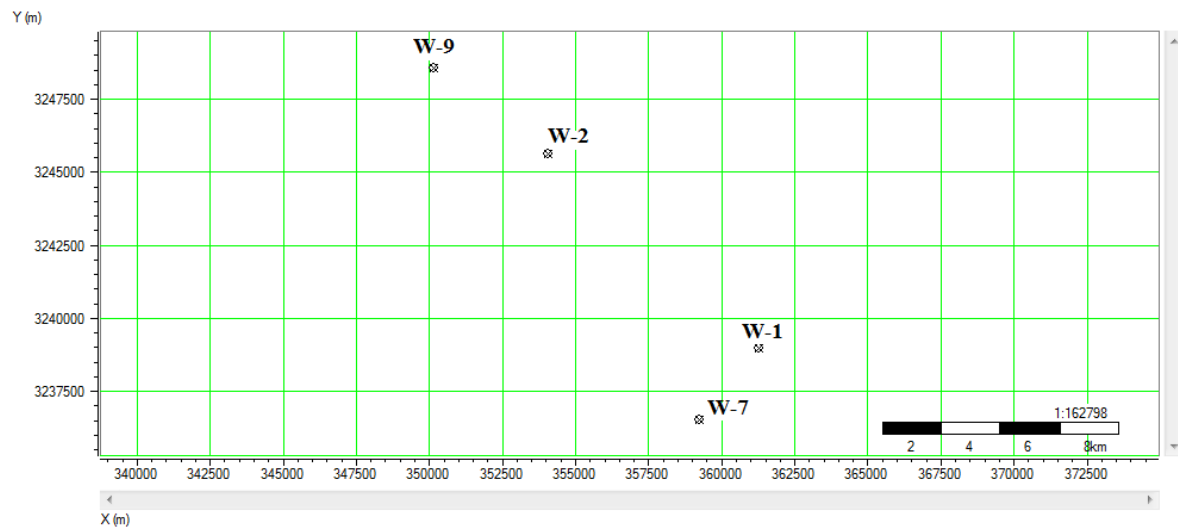
شکل (۳-۲): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، زون های مخزنی (ترک ۳)، سونیک (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع شدگی (ترک ۷) و سنگ شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_2.



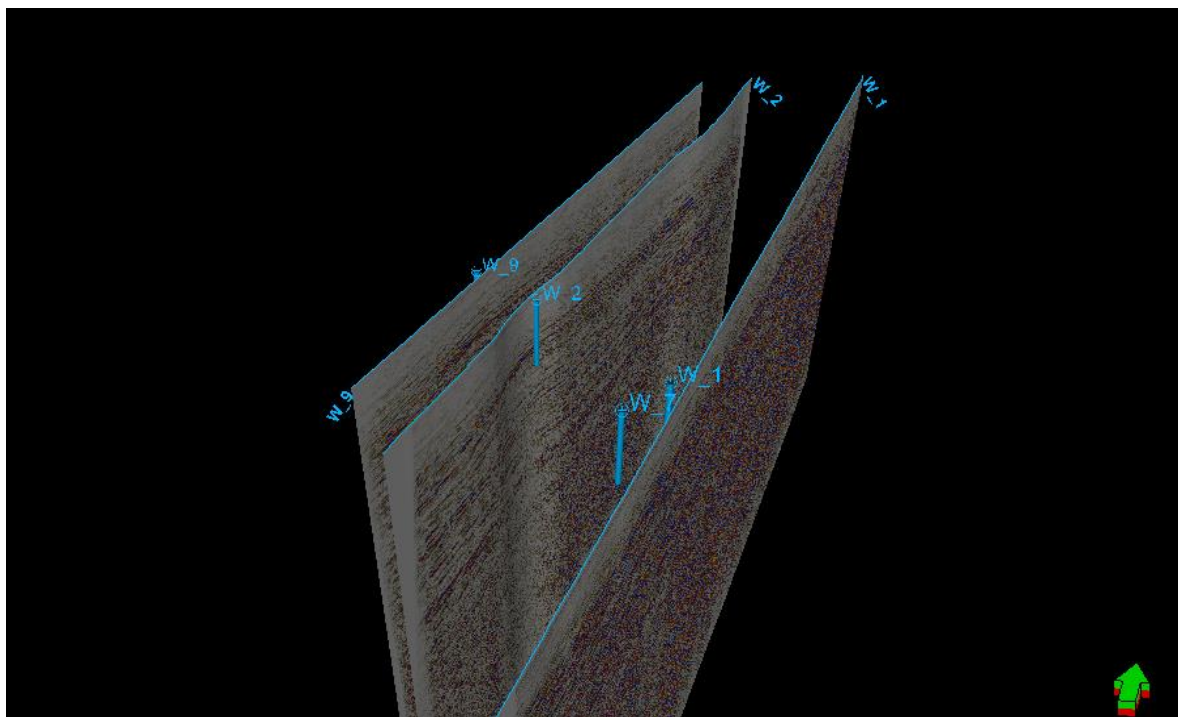
شکل (۳-۳): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، زون های مخزنی (ترک ۳)، سونیک (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع شدگی (ترک ۷) و سنگ شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_9.



شکل (۳-۴): نمایش نگارهای عمق (ترک ۱)، ستون آب و نفت (ترک ۲)، سونیک (ترک ۳)، زمان گذر موج برشی (ترک ۴)، چگالی (ترک ۵)، تخلخل کل (ترک ۶)، اشباع‌شدگی (ترک ۷) و سنگ‌شناسی (ترک ۸) مربوط به چاه W_7.



شکل (۳-۵): نمایش موقعیت چاه‌ها در میدان مورد بررسی با استفاده از نرم‌افزار همپسون-راسل.



شکل (۳-۶): موقعیت چاه‌ها و مقاطع لرزه‌ای دو بعدی گذشته از نزدیک این چاه‌ها با استفاده از نرم‌افزار پترل.

فصل چهارم

تخمین سرعت موج برشی و مدل سازی

فیزیک سنگی

۴-۱ مقدمه

در این فصل، ابتدا نتایج حاصل از تخمین سرعت موج برشی با استفاده از روش رگرسیون در چاه W-7 و بررسی صحت آن در چاه‌های W-1، W-2 و W-9 که سرعت موج برشی ندارند، شرح داده شده است. سپس نتایج حاصل از مدل‌سازی فیزیک سنگ با استفاده از روش‌های تئوری و تجربی بررسی شده و الگوریتمی برای محاسبه مدل فیزیک سنگ در مخزن معرفی شده است. در نهایت، اثرات جانشینی سیال و تغییرات سرعت و چگالی مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۲ تخمین سرعت موج برشی

به‌منظور استفاده از رابطه گسمن و محاسبه پاسخ جانشینی سیال در مدل‌سازی لرزه‌ای، به سرعت موج برشی نیاز می‌باشد. متأسفانه به‌دلیل هزینه بالا، در اغلب چاه‌ها سرعت موج برشی اندازه‌گیری نمی‌شود. از اینرو، از روش‌های متعددی برای برآورد آن با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی و از جمله زمان گذر موج تراکمی که در اکثر چاه‌ها ثبت شده‌اند، استفاده می‌شود. در میدان مورد بررسی، فقط در چاه W-7 به وسیله ابزار نمودارگیری DSI، زمان گذر موج برشی تهیه شده است. به منظور اعتبارسنجی سرعت موج برشی تخمین‌زده شده در چاه‌های W-1، W-2 و W-9 که زمان گذر موج برشی آن‌ها اندازه‌گیری نشده است، مدول موج تراکمی (M) سنگ اشباع شده با ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد آب شور با استفاده از دو روش محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در دو چاه W-1 و W-2 در ضخامت کمی از مخزن، گاز قرار گرفته است. به منظور یکسان‌سازی اثر سیالات موجود در کل ضخامت مخزن و همچنین مشاهده تغییرات عمده بر روی مدول موج تراکمی، سناریوی در نظر گرفته شده برای جانشینی سیال صرفاً برای مقایسه نتایج مدول موج تراکمی تخمین‌زده شده با استفاده از دو روش در نظر گرفته شده است. در روش اول، مدول موج تراکمی سنگ اشباع شده از آب شور و گاز با استفاده از رابطه (۲-۲۵) محاسبه می‌گردد. در این روش خواص سنگ خشک

و سرعت موج برشی وارد نمی‌شود. در روش دوم، با استفاده از معادله گسمن (رابطه (۲-۱)) که از خواص سنگ خشک و سرعت موج برشی تخمین زده شده استفاده می‌کند، مدول موج تراکمی محاسبه می‌شود. با مقایسه مدول موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از این دو روش، می‌توان به صحت سرعت موج برشی تخمین زده شده پی‌برد. در این مطالعه برای تخمین سرعت موج برشی از روش‌های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و روش‌های تجربی گرینبرگ-کاستاگنا^۱ (۱۹۹۲) و بروچر^۲ (۲۰۰۵، ۲۰۰۸) استفاده شده است. در این بخش نتایج مربوط به آنالیز رگرسیون، با توجه به اینکه رگرسیون غیرخطی نسبت به سایر روش‌ها ضریب تعیین بالاتر و میانگین مربعات خطای کمتری دارد، آورده شده است. روش کار و نتایج حاصل از روش‌های تجربی گرینبرگ-کاستاگنا (۱۹۹۲) و بروچر (۲۰۰۵، ۲۰۰۸) در پیوست الف بررسی شده است.

از آنالیز رگرسیون به منظور تعیین ضرایب مدل و ارتباط بین یک متغیر وابسته با یک یا چند متغیر مستقل استفاده می‌شود. روابط رگرسیون خطی و غیرخطی برای بیش از یک متغیر مستقل، به ترتیب در رابطه (۴-۱) و (۴-۲) آورده شده است (معتضدیان^۳ و همکاران، ۲۰۱۱):

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (۱-۴)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1^{Z_1} + \beta_2 X_2^{Z_2} + \beta_3 X_3^{Z_3} + \dots + \beta_n X_n^{Z_n} \quad (۲-۴)$$

y ، متغیر وابسته، β_i ، ضرایب رگرسیون و β_0 مقدار ثابت رگرسیون هستند که باید تخمین زده شوند. X_i متغیرهای مستقل (نگارهای چاه‌پیمایی) و Z پارامترهای نمایی می‌باشند.

میانگین مربعات خطا^۴ مطابق رابطه (۴-۳) محاسبه می‌شوند (معتضدیان و همکاران، ۲۰۱۱):

¹ Grinberg -Castagna

² Brocher

³ Moatazedian

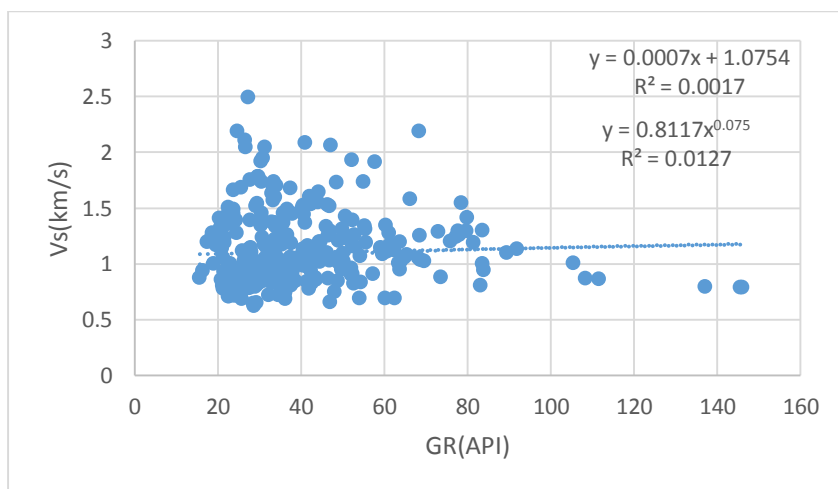
⁴ Mean Squared Error (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_s(real) - V_s(estimated))^2}{n} \quad (3-4)$$

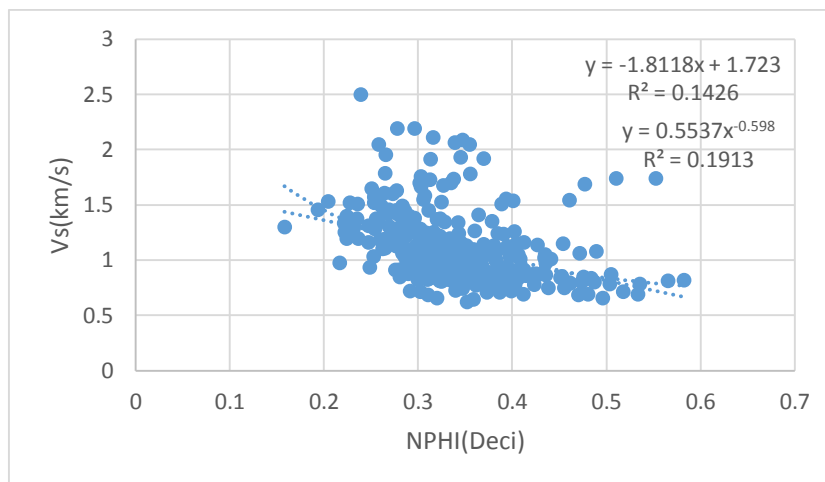
در رابطه فوق، n برابر با تعداد نمونه‌های موجود در هر متغیر مستقل (نگارهای چاه‌پیمایی)، y_i برابر با مقدار متغیر وابسته تخمین‌زده شده و $\hat{y}_i$ نیز مقدار متغیر وابسته واقعی می‌باشد.

۴-۲-۱ نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون

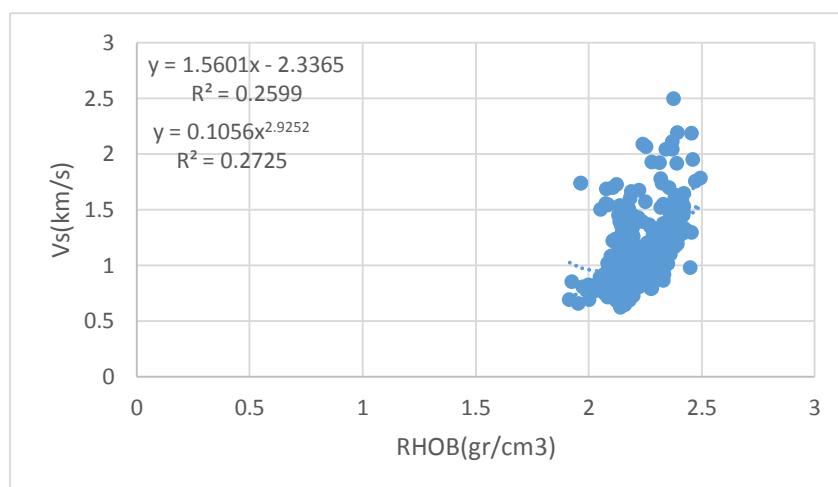
برای انتخاب نگارهای مناسب جهت تخمین سرعت موج برشی، نمودار متقاطع نگار سرعت موج برشی با نگارهای گاما (شکل (۴-۱))، نوترون (شکل (۴-۲))، چگالی (شکل (۴-۳)) و سرعت موج تراکمی (شکل (۴-۴)) رسم شده‌اند. در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴)، ضرایب تعیین این نگارها با سرعت موج برشی با استفاده از روابط خطی و غیرخطی نیز آورده شده است.



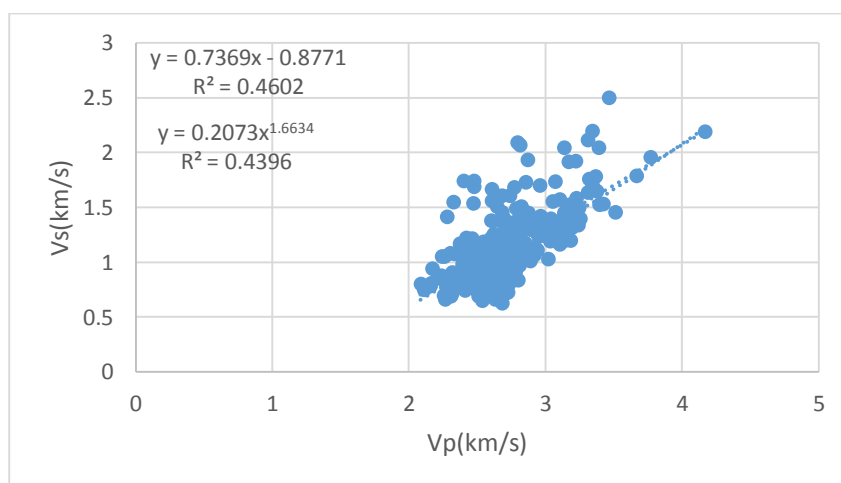
شکل (۴-۱): ارتباط بین نگار گاما و سرعت برشی در چاه W_7.



شکل (۴-۲): ارتباط بین نگار نوترون و سرعت برشی در چاه W_7.



شکل (۴-۳): ارتباط بین نگار چگالی و سرعت برشی در چاه W_7.



شکل (۴-۴): ارتباط بین نگار سرعت تراکمی و سرعت برشی در چاه W_7.

همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین ضریب تعیین مربوط به نگار سرعت موج تراکمی و کمترین ضریب تعیین مربوط به نگار گاما می‌باشد. بنابراین نمی‌توان از رابطه رگرسیونی بین نگار گاما و سرعت موج برشی به درستی استفاده کرد. از اینرو با در نظر گرفتن نگارهای نوترون، چگالی و سرعت موج تراکمی با استفاده از روابط رگرسیون خطی (۴-۴) و غیرخطی (۵-۴) با استفاده از نرم‌افزار اکسل^۱، سرعت موج برشی تخمین زده می‌شود:

$$V_s = -0.73202 + 0.70405RHOB - 2.10163NPHI + 0.388521VP \quad (۴-۴)$$

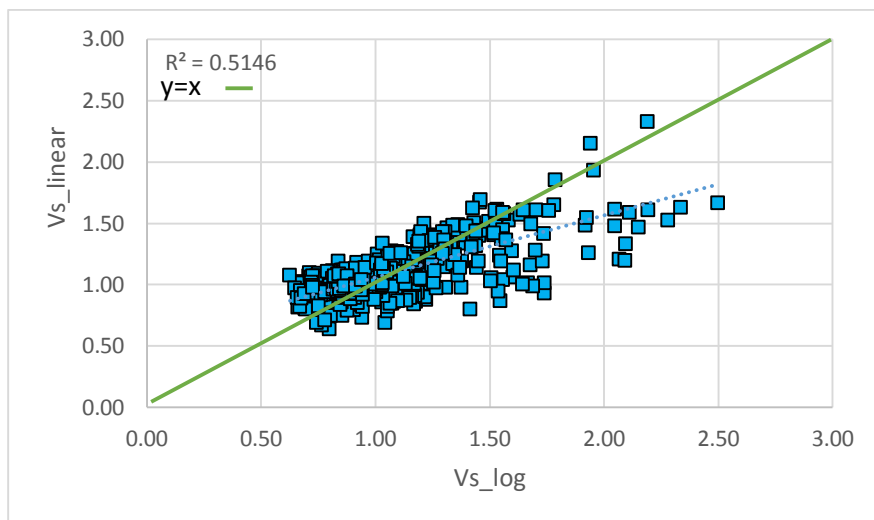
$$V_s = -0.196 + 0.037RHOB^{0.466} - 1.213NPHI^{0.575} + 0.843VP^{0.855} \quad (۵-۴)$$

با توجه به جدول (۱-۴)، رگرسیون غیرخطی ضریب تعیین بالاتر و میانگین مربعات خطای کمتری دارد، بنابراین از روش رگرسیون غیرخطی برای تخمین سرعت موج برشی در سایر چاه‌ها استفاده شده است. شکل (۵-۴) و (۶-۴)، مربوط به سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه رگرسیون خطی و غیرخطی در مقابل سرعت موج برشی واقعی در چاه W-7 می‌باشد. نمودار سرعت موج برشی واقعی و سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی نسبت به عمق، در شکل (۷-۴) نشان داده شده است.

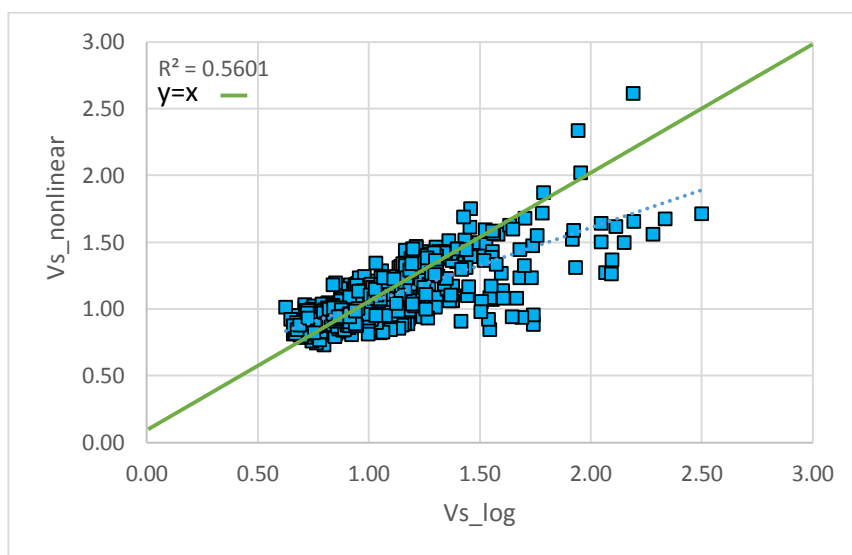
جدول (۱-۴): مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطا رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی در چاه W_7.

	R^2	MSE
رگرسیون خطی	۰/۵۱۴۶	۰/۰۴۹
رگرسیون غیرخطی	۰/۵۶۰۱	۰/۰۴۴

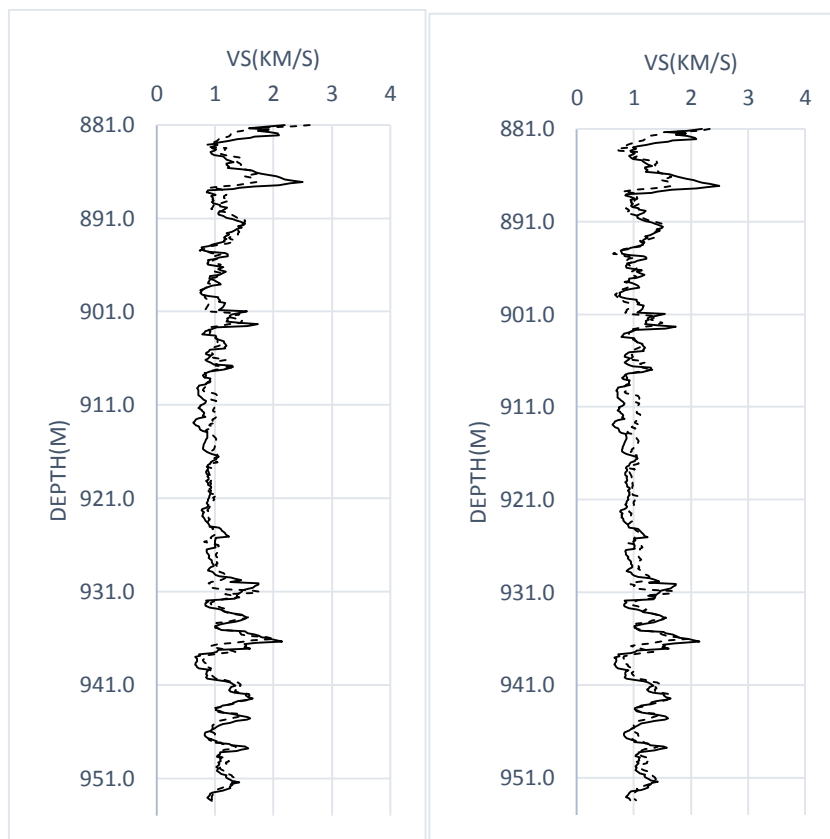
^۱ Excel



شکل (۴-۵): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون خطی در مقابل مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه W_7.



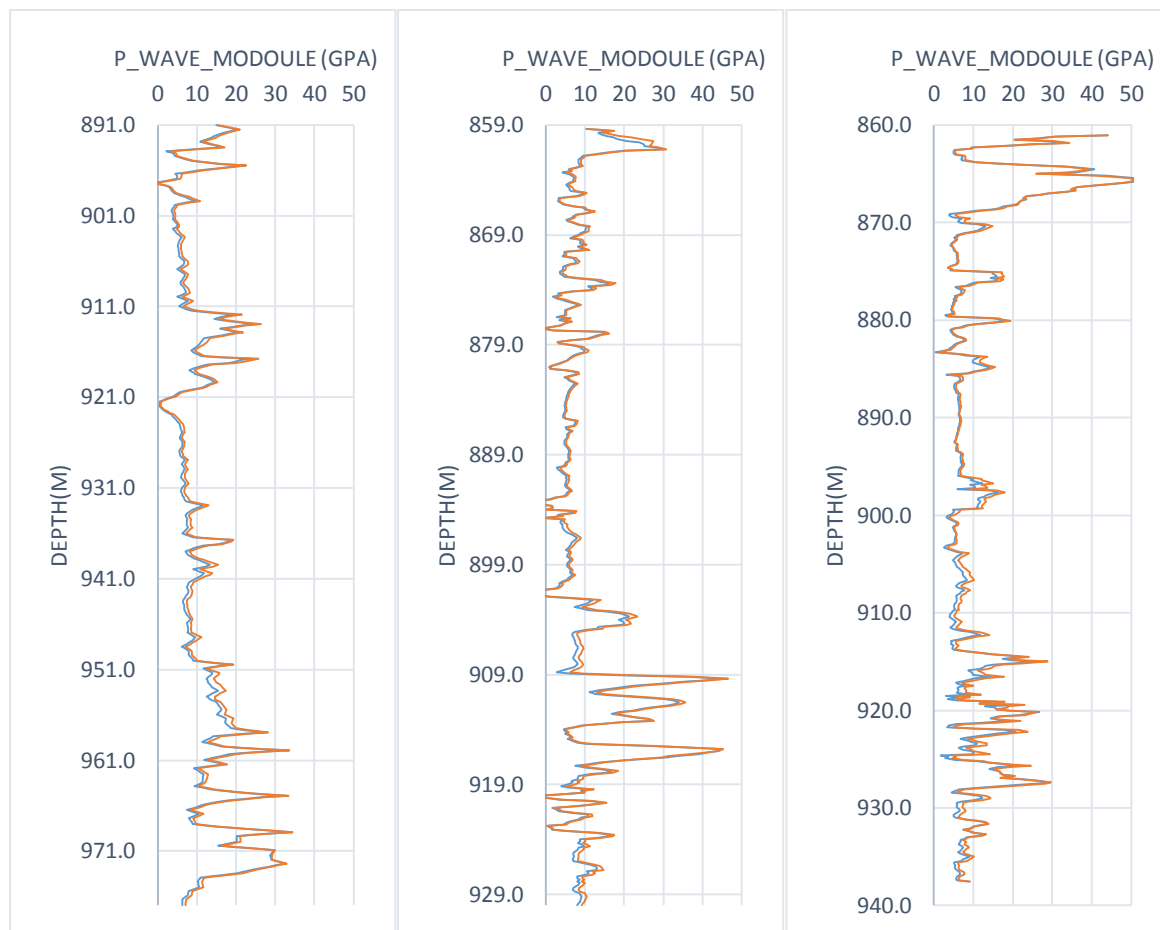
شکل (۴-۶): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون غیرخطی در مقابل مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه W_7.



شکل (۷-۴): نمودار سرعت موج برشی تخمین زده شده (خط چین) و سرعت موج برشی واقعی (خط پر) در مقابل عمق در چاه W_7. شکل سمت چپ مربوط به رگرسیون خطی و شکل سمت راست مربوط به رگرسیون غیرخطی می باشد.

۲-۲-۴ بررسی صحت نگار سرعت موج برشی تخمین زده شده برای سایر چاهها

با استفاده از رابطه (۲-۲۵) که مستقل از سرعت موج برشی و مدول حجمی سنگ خشک می باشد و رابطه گسمن (رابطه (۲-۱)) که وابسته به مدول حجمی سنگ خشک و سرعت موج برشی است، مدول موج تراکمی برای حالت ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد آب برای چاههای W-1، W-2 و W-9 محاسبه گردید. نمودارهای موج تراکمی نسبت به عمق در شکل (۴-۸) برای هر چاه آورده شده است. رنگ آبی و نارنجی به ترتیب مربوط به محاسبه مدول موج تراکمی با استفاده از رابطه (۲-۲۵) و رابطه گسمن (رابطه (۲-۱)) است.



شکل (۴-۸): مدول موج تراکمی برای شرایط اشباع‌شدگی ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد آب با استفاده از رابطه (۲-۲۵) (رنگ آبی) و گسمن (رنگ نارنجی) برای چاه‌های W-1 (سمت راست)، W-2 (وسط) و W-9 (چپ).

جدول (۴-۲)، مربوط به مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطای مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن و رابطه (۲-۲۵) در سه چاه W-1، W-2 و W-9 می‌باشد. اختلاف بسیار کم و ناچیز مدول موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از این دو روش نشان می‌دهد که سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون غیرخطی در چاه W-7، برای سایر چاه‌ها مناسب می‌باشد. نمودار متقاطع مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن در مقابل مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه (۲-۲۵) در سه چاه W-1، W-2 و W-9 در پیوست الف (شکل‌های الف-۵ تا الف-۷) آورده شده است.

جدول (۲-۴): مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطای مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن و رابطه (۲-۲۵) در سه چاه W-1، W-2 و W-9.

چاه	R^2	MSE
W-1	۰/۹۸۷۵	۰/۰۱۳۲
W-2	۰/۹۹۱۳	۰/۰۰۹۹
W-9	۰/۹۹۴۹	۰/۰۰۹۶

۳-۴ مدل سازی فیزیک سنگ

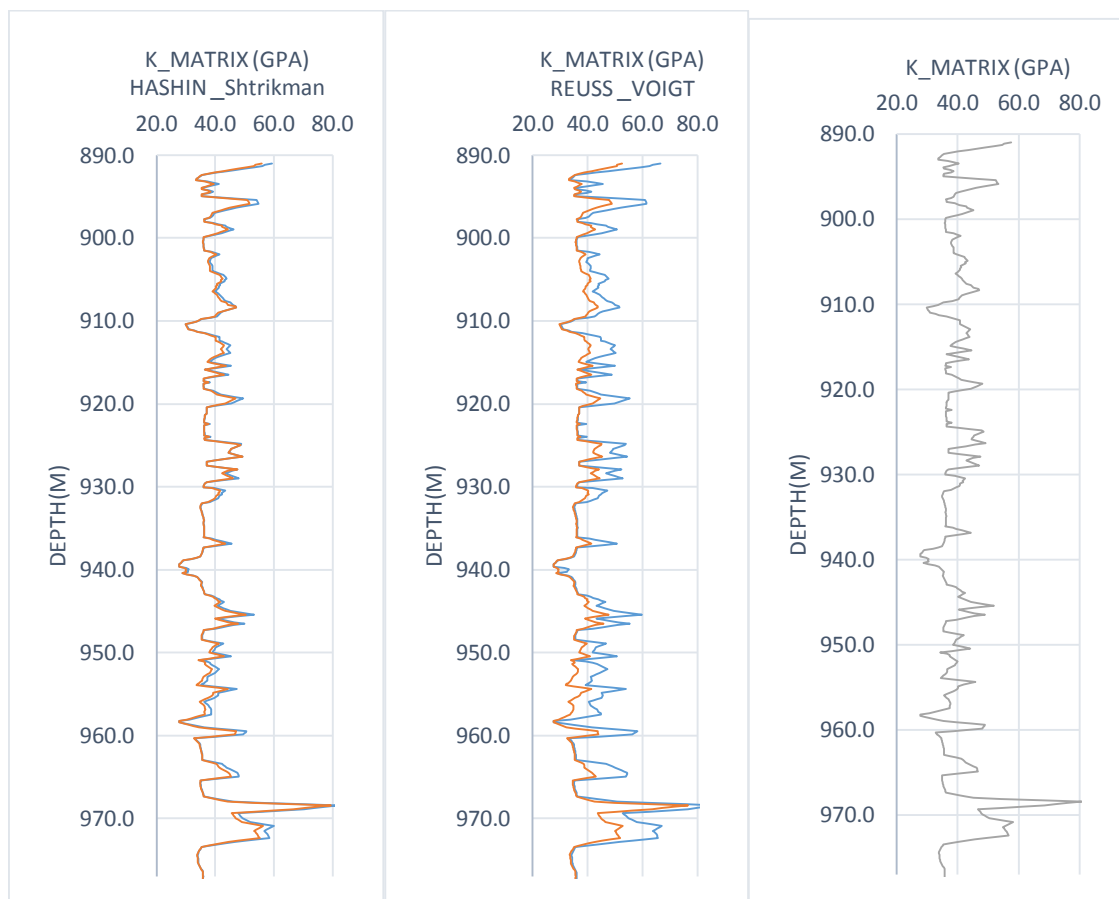
مدل های فیزیک سنگ مورد بررسی در این تحقیق به دو بخش کلی تجربی و تئوری تقسیم می شوند. مدل های تجربی شامل مدل نور و کریف و مدل های تئوری مورد استفاده شامل مدل گسمن و مدل های تماسی (هرتز-میندلین و دیوورکین-نور) می باشند. تمام مدل ها به صورت برنامه کامپیوتری در نرم افزار متلب نوشته شده است. با توجه به اینکه چاه های W_1، W_2 و W_9 در بخش های مختلف میدان قرار گرفته اند، از این سه چاه برای بدست آوردن مدل فیزیک سنگ مخزن استفاده شده است.

جدول (۳-۴)، مربوط به مقادیر پارامترهای الاستیک و چگالی کانی های تشکیل دهنده سنگ و سیال موجود در مخزن می باشد. پارامترهای مربوط به سیال با استفاده از روابط تجربی باتزل و وانگ (۱۹۹۲) محاسبه شده است.

جدول (۳-۴): خواص سیال محاسبه شده با استفاده از روابط تجربی باتزل و وانگ (۱۹۹۲) و خواص کانی های تشکیل دهنده مخزن (ماوکو و همکاران، ۲۰۰۹).

گاز	نفت	آب شور	ایلیت	دولومیت	فلدسپات	انیدریت	کوارتز	
۰/۱	۰/۷۵	۱/۰۹	۲/۷۵	۲/۸۷	۲/۶۲	۲/۹۸	۲/۶۵	چگالی (g/cm3)
۰/۰۲	۱	۲/۳۸	۲۷/۶۶	۹۴/۹۸	۳۷/۵	۵۶/۱	۳۷	مدول حجمی (GPa)
۰	۰	۰	۱۷/۷۴	۴۵	۱۵	۲۹/۱	۴۴	مدول برشی (GPa)

برای استفاده از مدل‌های فیزیک سنگ، پس از محاسبه مدول حجمی و برشی سنگ با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی در شرایط برجای مخزن، باید خواص ماتریکس سنگ را با استفاده از خواص کانی‌های تشکیل دهنده آن، که در جدول (۳-۴) آورده شده است، محاسبه کرد. در شکل (۴-۹) که مربوط به چاه W_9 می‌باشد، به دلیل نزدیک بودن حد بالایی و پایینی مدل هشین-اشتریکمن (سمت چپ) نسبت به حد وویت-رویس (وسط)، از میانگین این دو حد (سمت راست) برای تخمین مدول حجمی ماتریکس سنگ استفاده شده است. در چاه‌های W_1 و W_2 نیز از میانگین حدهای هشین-اشتریکمن برای تخمین مدول حجمی ماتریکس سنگ استفاده می‌شود. مقادیر میانگین خواص ماتریکس سنگ محاسبه شده برای هر چاه در جدول (۴-۴)، آورده شده است.



شکل (۴-۹): حدهای بالایی (آبی) و پایینی (نارنجی) مدول حجمی ماتریکس هشین-اشتریکمن (سمت چپ)، وویت-رویس (وسط) و میانگین حدهای هشین-اشتریکمن (سمت راست) که در مدل‌سازی فیزیک سنگ استفاده شده است (چاه W_9).

جدول (۴-۴): میانگین خواص ماتریکس سنگ.

چاه	W_1	W_2	W_9
مدول حجمی ماتریکس (GPa)	۴۲/۱۸	۴۰/۰۹	۴۱/۱۳
مدول برشی ماتریکس (GPa)	۳۱/۷۹	۳۴/۴۷	۳۲/۸۳
چگالی ماتریکس (g/cm ³)	۲/۷	۲/۶۸	۲/۷
نسبت پواسون ماتریکس	۰/۱۹۱	۰/۱۶۳	۰/۱۸۶

برای محاسبه خواص موثر سیال برجای مخزن با توجه به جدول (۴-۳)، مدول‌های حجمی و چگالی سیالات منفذی با در نظر گرفتن درجات اشباع‌شدگی آن‌ها در هر عمق با استفاده از روابط (۲-۶) و (۲-۷) محاسبه می‌شود. جدول (۴-۵) مقادیر میانگین خواص موثر سیال مخزن را برای هر چاه نشان می‌دهد.

جدول (۴-۵): میانگین خواص موثر سیال مخزن .

چاه	W_1	W_2	W_9
مدول حجمی سیال (GPa)	۱/۸۹	۱/۹۲	۲/۱۵
چگالی سیال (g/cm ³)	۱	۱	۱/۱

۴-۳-۱ بررسی شرایط مخزن به لحاظ تحکیم‌یافتگی و سیمان‌شدگی

برای بررسی تحکیم‌یافتگی و سیمان‌شدگی مخزن، از نمودار متقاطع سرعت موج تراکمی در مقابل تخلخل با استفاده از حد وویت-رویس برای یک ترکیب دوتایی کوارتز و آب استفاده شده است. شکل (۴-۱۰) نمودار متقاطع سرعت موج تراکمی در مقابل تخلخل مربوط به داده‌های ماسه سنگ مطالعه شده توسط یین (۱۹۹۳)، همیلتون (۱۹۵۶) و هان (۱۹۸۶) را نشان می‌دهد. با استفاده از شکل (۴-۱۰) ماسه سنگ‌ها به

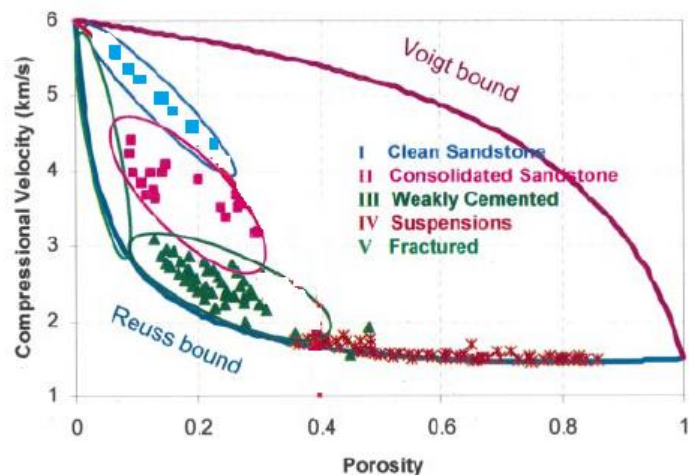
پنج دسته ماسه سنگ تمیز، ماسه سنگ تحکیم‌یافته، ماسه سنگ با سیمان‌شدگی ضعیف، ماسه سنگ بدون اتصال (معلق) و ماسه سنگ ترک‌دار تقسیم می‌شوند (هان و باتزل^۱، ۲۰۰۴).

قبل از بررسی نمودارهای مربوط به هر چاه، لازم به ذکر است که داده‌های بررسی شده مربوط به زون‌های X1، X2 و X3 می‌باشند که در زون نفتی قرار گرفته‌اند و از داده‌های مربوط به زون‌های X4 و X5 که در زون آبی قرار دارند استفاده نشده است. شکل (۴-۱۱)، حد ویت-رویس با داده‌های ماسه سنگ مربوط به چاه W_1 را نشان می‌دهد. برای محاسبه سرعت موج تراکمی سنگ اشباع‌شده با آب، از رابطه گسمن استفاده شده است. با مقایسه شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود که بخش عمده زون X1 (رنگ آبی) مربوط به ماسه سنگ با سیمان‌شدگی ضعیف می‌باشد و بخشی از آن نیز در قسمت ماسه سنگ تحکیم‌یافته قرار گرفته است. علت این امر را می‌توان به دلیل افزایش سیمان و یا حضور میان‌لایه دولومیتی دانست؛ زیرا با توجه به گزارشات زمین‌شناسی، مخزن مورد بررسی تحکیم نیافته می‌باشد. زون X2 (رنگ قرمز) و X3 (رنگ سبز) غالباً از ماسه سنگ با سیمان‌شدگی ضعیف تشکیل شده است. بنابراین بخش ماسه سنگی چاه W_1 سیمان‌شدگی جزئی دارد.

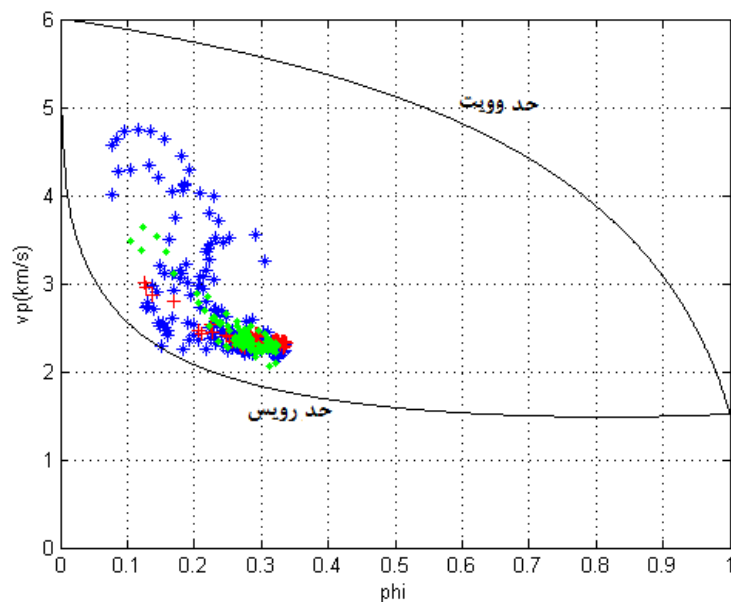
شکل (۴-۱۲)، حد ویت-رویس داده‌های ماسه سنگ اشباع‌شده با آب مربوط به چاه W_2 است. با مقایسه شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۲)، مشاهده می‌شود که تمام زون‌ها غالباً از ماسه سنگ با سیمان‌شدگی ضعیف تشکیل شده است. بخش کمی از زون X1 (رنگ آبی) و X3 (رنگ سبز) که در قسمت ماسه سنگ تحکیم‌یافته قرار گرفته است، به دلیل حضور سیمان دولومیتی می‌باشد. بنابراین بخش ماسه سنگی چاه W_2 نیز سیمان-شدگی جزئی دارد.

¹ Han and Batzle

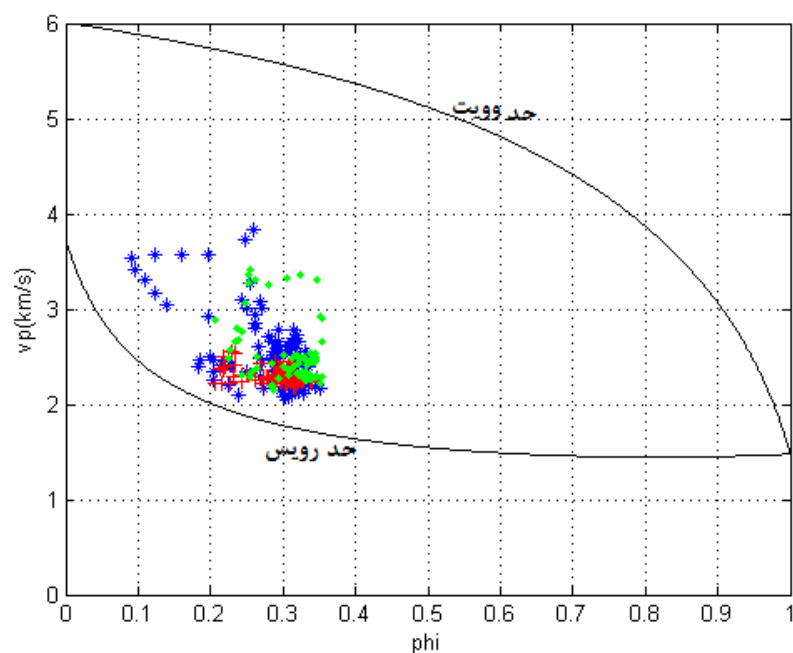
شکل (۴-۱۳)، حد وویت-رویس با داده‌های ماسه سنگ اشباع‌شده با آب مربوط به چاه W_9 را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۳)، مشاهده می‌شود که تمام زون‌ها غالباً از ماسه سنگ با سیمان‌شدگی جزئی تشکیل شده است.



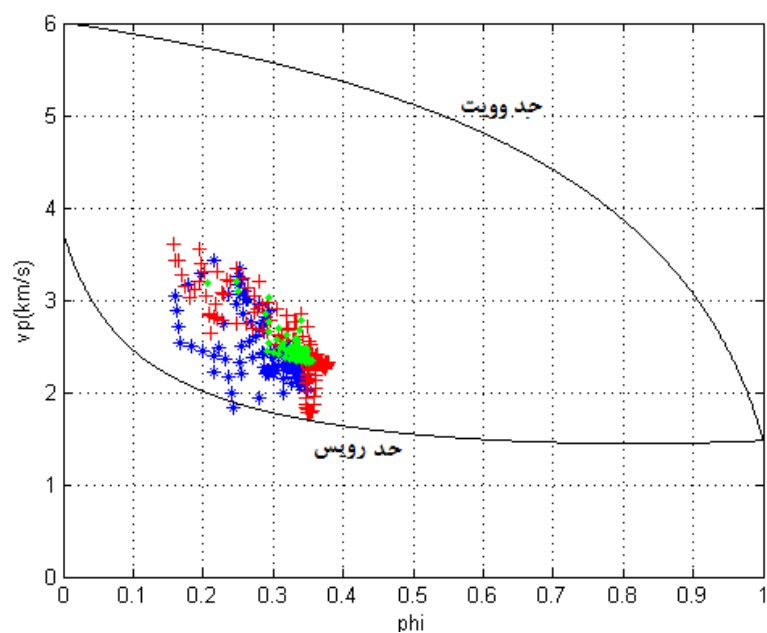
شکل (۴-۱۰): حد وویت-رویس و داده‌های ماسه سنگ مطالعه شده توسط یین (۱۹۹۳)، همیلتون (۱۹۵۶) و هان (۱۹۸۶) (هان و باتزل، ۲۰۰۴).



شکل (۴-۱۱): حد وویت-رویس و داده‌های سرعت موج تراکمی ماسه سنگ اشباع از آب بخش مخزنی چاه W_1. رنگ آبی مربوط به زون X1، رنگ قرمز مربوط به زون X2 و رنگ سبز زون X3 می‌باشد.



شکل (۴-۱۲): حد وویت-رویش و داده‌های سرعت موج تراکمی ماسه سنگ اشباع از آب بخش مخزنی چاه W_2. رنگ آبی مربوط به زون X1، رنگ قرمز مربوط به زون X2 و رنگ سبز زون X3 می‌باشد.

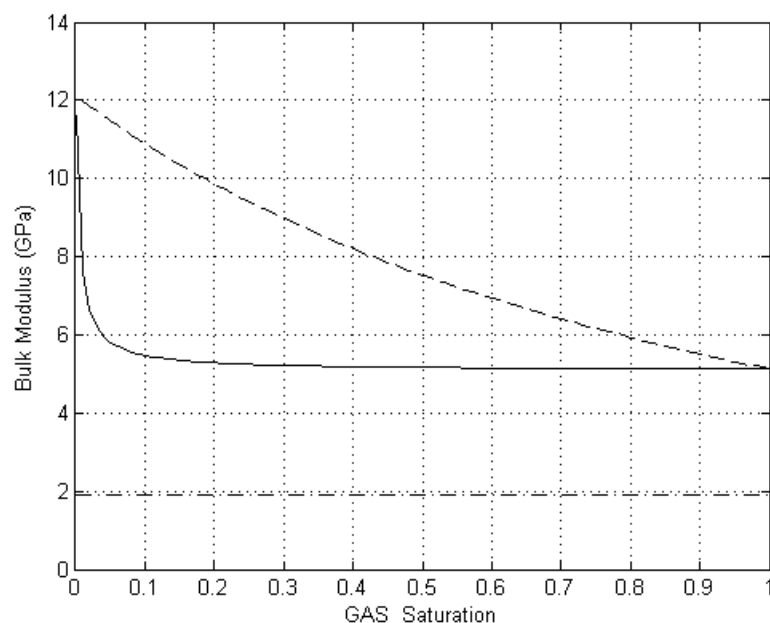


شکل (۴-۱۳): حد وویت-رویش و داده‌های سرعت موج تراکمی ماسه سنگ اشباع از آب بخش مخزنی چاه W_9. رنگ آبی مربوط به زون X1، رنگ قرمز مربوط به زون X2 و رنگ سبز زون X3 می‌باشد.

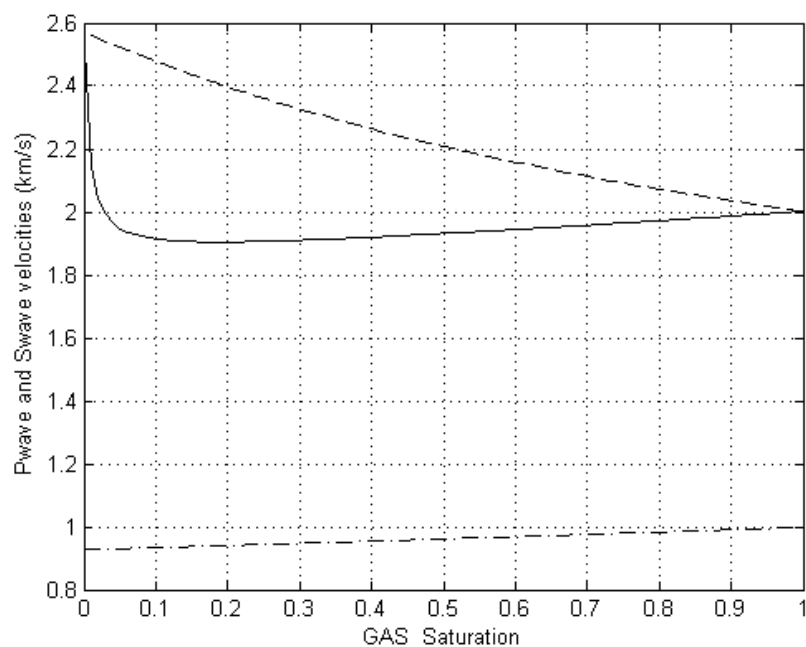
۴-۳-۲ بررسی اثرات نوع اشباع‌شدگی بر خواص الاستیسیته مخزن

شکل (۴-۱۴) نمودار متقاطع مدول حجمی و برشی سنگ نسبت به اشباع گاز و شکل (۴-۱۵) نمودار متقاطع سرعت موج تراکمی و موج برشی نسبت به اشباع گاز را برای چاه W₂ و شرایط برجای مخزن (ماتریکس، سیال و تخلخل میانگین ۲۹/۴٪) نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۴-۱۴) مشاهده می‌شود، در اشباع‌شدگی ناهمگن (خط‌چین) با افزایش گاز مدول حجمی سنگ کاهش تدریجی دارد در صورتی که در اشباع‌شدگی همگن (خط) با افزایش ۱۰ درصد گاز مدول حجمی سنگ به‌صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. مدول برشی سنگ (خط-نقطه) به دلیل اینکه مستقل از سیالات پرکننده منفذی می‌باشد، با تغییر مقادیر اشباع‌شدگی گاز ثابت باقی خواهد ماند.

در شکل (۴-۱۵) مشاهده می‌شود که با افزایش گاز، سرعت موج برشی (خط-نقطه) به دلیل کاهش چگالی سیال، به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد. سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن (خط‌چین) بصورت تدریجی کاهش یافته تا اینکه به کمترین مقدار خود در اشباع‌شدگی ۱۰۰٪ گاز می‌رسد. در اشباع‌شدگی همگن (خط)، سرعت موج تراکمی با افزایش ۱۰ درصد گاز به‌طور ناگهانی کاهش یافته و پس از آن با افزایش اشباع گاز، به دلیل کاهش سریع‌تر چگالی حجمی سنگ نسبت به کاهش مدول حجمی سنگ، به تدریج افزایش می‌یابد. برای مدل‌سازی پاسخ لرزه‌ای سیال در یک درجه اشباع‌شدگی مشخص، عدم قطعیت تخمین سرعت موج تراکمی بین دو مدل اشباع‌شدگی بسیار بالا است. به عبارت دیگر در مقیاس بزرگ، اشباع‌شدگی ناهمگن و در مقیاس کوچک، اشباع‌شدگی همگن حدهای بالایی و پایینی سرعت موج تراکمی خواهند بود و مقادیر صحیح بین این دو اشباع‌شدگی قرار می‌گیرند. بنابراین از هر دو مدل اشباع‌شدگی ناهمگن و همگن برای بدست آوردن سرعت موج تراکمی در شرایط اشباع‌شدگی مختلف استفاده شده است.



شکل (۴-۱۴): مدول حجمی مخزن در شرایط اشباع‌شدگی همگن (خط)، ناهمگن (خط چین) و مدول برشی (خط-نقطه) در شرایط برجای مخزن (ماتریکس، سیال و تخلخل میانگین ۲۹/۴٪) در چاه W_2.



شکل (۴-۱۵): سرعت موج تراکمی مخزن در شرایط اشباع‌شدگی همگن (خط)، ناهمگن (خط چین) و سرعت برشی (خط-نقطه) در شرایط برجای مخزن (ماتریکس، سیال و تخلخل میانگین ۲۹/۴٪) در چاه W_2.

۴-۳-۳ مقایسه و انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب برای مخزن

مدل‌های تجربی و تئوری مورد بررسی، ارائه دهنده رابطه‌ای برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک و مدول برشی می‌باشند. این روابط تابع پارامترهایی هستند که در فصل دوم توضیح داده شده است. مدول‌های برشی ارائه شده در این روابط باید با مدول‌های برشی حاصل از چاه تصحیح شوند، بنابراین بهترین راه برای محاسبه مدول برشی استفاده از نگار چاه‌پیمایی است؛ ضمن اینکه در مسائل جانشینی سیال، مدول برشی مسئله اصلی نیست و موضوع مهم استفاده از روابطی است که بتواند مدول حجمی سنگ خشک را به‌درستی تخمین بزند. بنابراین برای بررسی مناسب بودن مدل‌ها، مدول حجمی سنگ خشک تخمین زده شده با استفاده از مدل‌های تجربی تخلخل بحرانی نور و کریف و مدل‌های تئوری هرتز-میندلین و دیوورکین-نور، با مدول حجمی سنگ خشک که از نگار چاه‌پیمایی و رابطه گسمن بدست می‌آید، مقایسه می‌گردد. لازم به یادآوری است که مدل گسمن، رایج‌ترین و پرکاربردترین مدل فیزیک سنگ در صنعت است که در مسائل جانشینی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

علاوه بر مدل‌های فیزیک سنگ تخلخل بحرانی، کریف، هرتز-میندلین و دیوورکین-نور از مدل‌های فیزیک سنگ دیگری از جمله مدل‌های والتون^۱ (۱۹۸۷)، اسکلت، بهبودیافته تئوری بایوت-گسمن توسط لی^۲ (۲۰۰۳)، بری^۳ (۱۹۹۵) و برنت^۴ (۱۹۵۵) استفاده شده است. سایر مدل‌های استفاده شده، تخمین خوبی از مدول حجمی سنگ خشک ارائه نمی‌دهند. به دلیل محدودیت در حجم پایان‌نامه، برای مقایسه فقط نتایج مربوط به مدل‌های فیزیک سنگ تخلخل بحرانی، کریف، هرتز-میندلین و دیوورکین-نور آورده شده است و از آوردن نتایج مدل‌های دیگر اجتناب شده است.

الف) مدل‌های تجربی تخلخل بحرانی و کریف

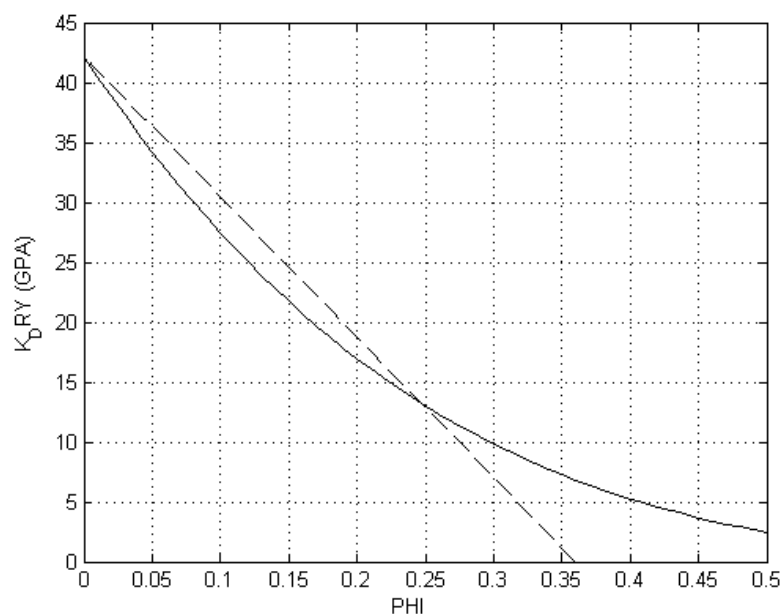
¹ Walton

² Lee

³ Brie

⁴ Brandt

همانطور که در شکل (۱۶-۴) مشاهده می‌شود، مدل کریف (به دلیل ارتباط غیرخطی با تخلخل) برای تخلخل بیشتر از ۰/۲۵، مدول حجمی سنگ خشک را نسبت به مدل تخلخل بحرانی بیشتر تخمین می‌زند؛ از آنجاییکه میانگین تخلخل برای چاه W_2 و W_9 بیشتر از ۰/۲۵ است (چاه W_2 برابر با ۰/۲۵۸ و چاه W_9 برابر با ۰/۲۸۰)، مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک که در جدول (۴-۶) آورده شده است، برای مدل کریف بیشتر از مدل تخلخل بحرانی است، اما در چاه W_1 به دلیل اینکه تخلخل میانگین (برابر با ۰/۲۳۶) کمتر از ۰/۲۵ است، مقادیر این دو مدل به هم نزدیک‌ترند. همچنین به دلیل کمتر بودن مقدار تخلخل میانگین در چاه W_1 نسبت به دو چاه دیگر، مقادیر میانگین مدل‌های تخلخل بحرانی و کریف با توجه به جدول (۴-۶)، بیشتر تخمین زده می‌شود. اما در چاه W_9 مقادیر میانگین این دو مدل به دلیل بیشتر بودن مقدار تخلخل، کاهش یافته و به مقدار میانگین محاسبه شده با استفاده از نگار چاه‌پیمایی نزدیک‌تر می‌شوند.



شکل (۱۶-۴): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل‌های تجربی تخلخل بحرانی (خط چین) و کریف (خط پر) نسبت به تخلخل با استفاده از ماتریکس واقعی مخزن.

جدول (۴-۶): مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک مدل کریف، تخلخل بحرانی و نگار چاه‌پیمایی برای تمام چاه‌ها.

چاه	W_1	W_2	W_9
نگار چاه‌پیمایی	۶/۶۳۵	۶/۱۱۲	۷/۰۹۵
مدل کریف	۱۵/۸۱۳	۱۳/۰۱۸	۱۰/۸۴۹
مدل تخلخل بحرانی	۱۵/۱۰۸	۱۱/۸۱۰	۸/۸۸۴

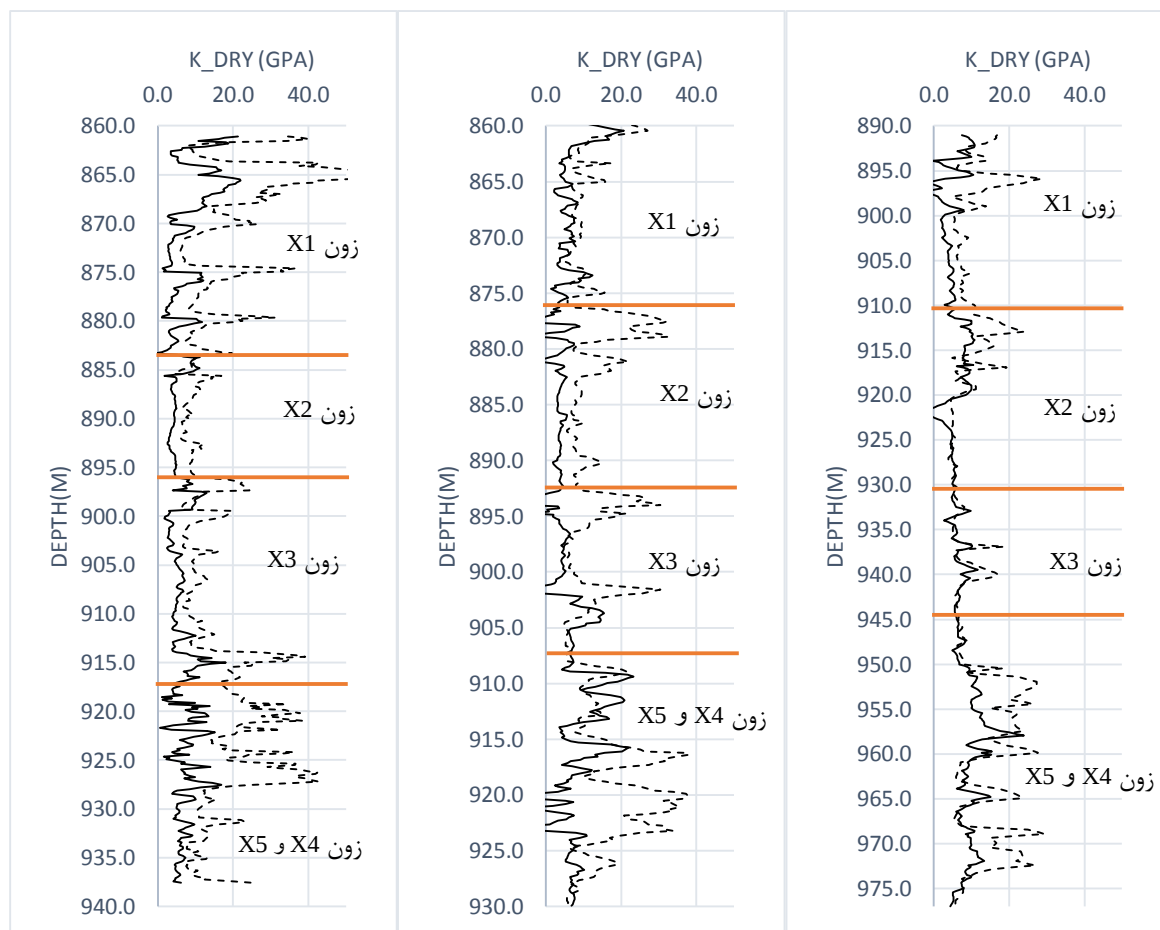
از شکل‌های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) نتایج زیر حاصل می‌شود:

- در تمام زون‌های مربوط به چاه‌های W-1 و W-2، در اعماقی که میان‌لایه و یا سیمان دولومیتی اضافه شده است، هر دو رابطه کریف و تخلخل بحرانی نسبت به مدل گسمن، مدول حجمی سنگ خشک را بیشتر تخمین می‌زند. علت این امر را می‌توان به دلیل بالا بودن مقدار مدول حجمی دولومیت و همچنین کاهش تخلخل ارتباط داد.
- در اعماقی که میان‌لایه و یا سیمان دولومیتی حضور ندارد، مدل تخلخل بحرانی نسبت به مدل کریف انطباق بهتری با مدل گسمن دارد. علت این امر را می‌توان به ضریب بایوت موجود در رابطه کریف که یک رابطه تجربی می‌باشد و ممکن است برای شرایط میدان مورد بررسی مناسب نباشد، ارتباط داد.
- در زون‌های X4 و X5 در چاه‌های W-1 و W-2، مدل‌های تخلخل بحرانی و کریف نسبت به مدل گسمن نتیجه عکس نشان می‌دهند؛ علت این امر را می‌توان به افزایش شیل نسبت داد. رابطه گسمن بهترین نتیجه را برای ماسه‌سنگ‌های تمیز ارائه می‌دهد. در حالی که در این زون‌ها چون مقدار شیل افزایش می‌یابد، مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از رابطه گسمن کاهش یافته است.
- دلیل انطباق بهتر هر دو مدل کریف و تخلخل بحرانی در چاه W-9 را می‌توان به بیشتر بودن مقدار تخلخل آن نسبت به سایر چاه‌ها دانست. اما در این چاه نیز در اعماقی که سیمان دولومیتی افزایش

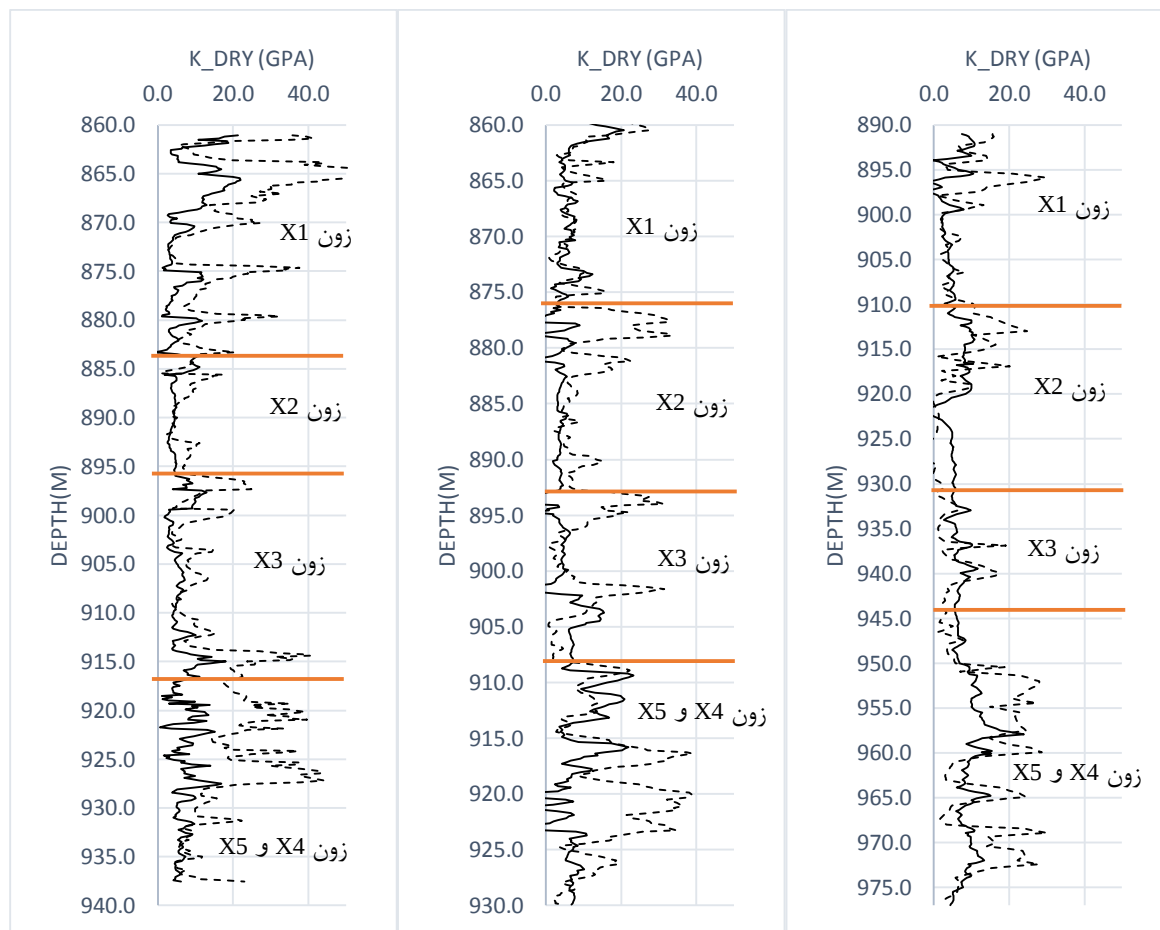
یافته است، به دلیل کاهش تخلخل و افزایش مدول حجمی ماتریکس سنگ، هر دو مدل کریف و تخلخل

بحرانی مقدار بیشتری را نشان می‌دهند (زون X4 و X5).

بنابراین دو مدل تخلخل بحرانی و کریف به دلیل اینکه قابلیت تعمیم در کل مخزن را ندارند، مدل مناسبی برای مخزن نمی‌باشند.



شکل (۴-۱۷): مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از مدل تجربی کریف (خط چین) و نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) برای سه چاه W_1 (چپ)، W_2 (وسط) و W_9 (راست).



شکل (۴-۱۸): مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از مدل تجربی تخلخل بحرانی (نارنجی) و نگار چاه-پیمایی (آبی) برای سه چاه W_1 (چپ)، W_2 (وسط) و W_9 (راست).

مدل کریف و تخلخل بحرانی، هر دو تابعی از تخلخل و مدول حجمی ماتریکس سنگ می‌باشند و درجهایی که به دلیل حضور میان لایه یا سیمان دولومیتی تخلخل کاهش می‌یابد، مدول حجمی سنگ خشک بیش‌تر تخمین زده می‌شود. بنابراین مدل‌های تخلخل بحرانی و کریف برای این مخزن تحکیم‌نیافته مناسب نمی‌باشند.

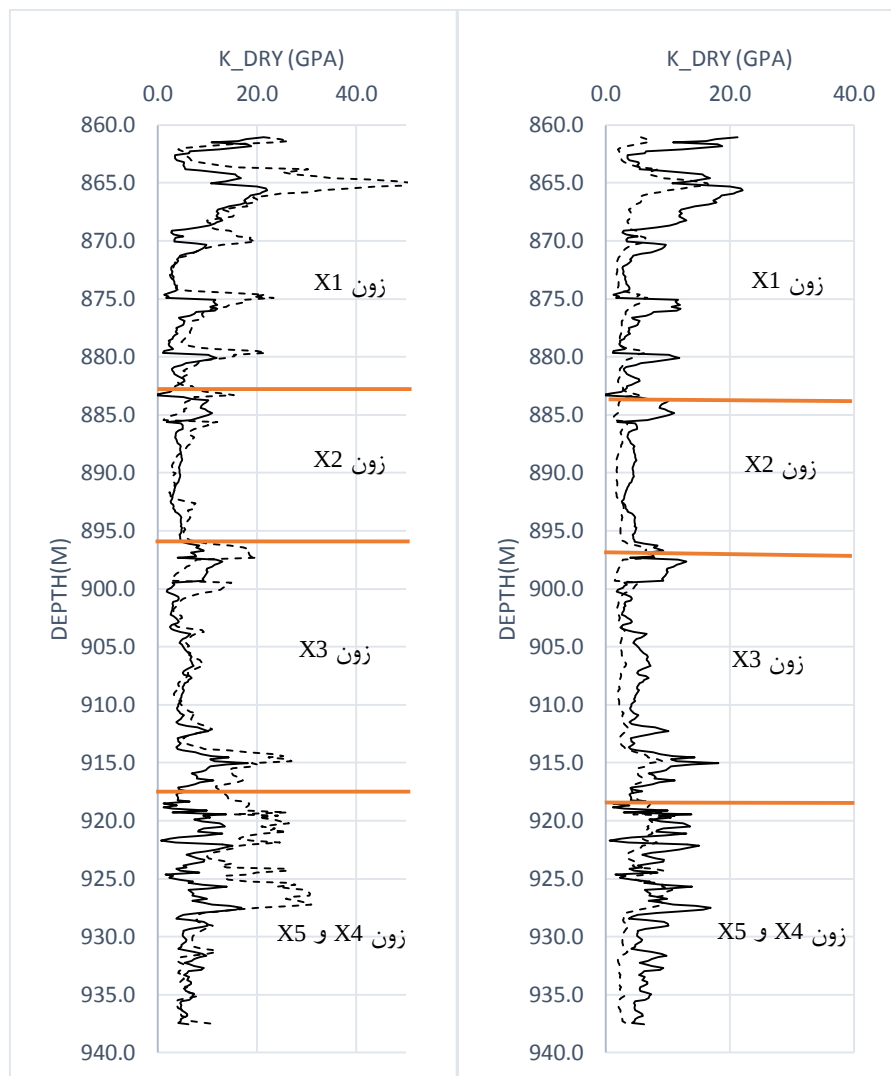
ب) مدل هرتز-میندلین

مدل هرتز-میندلین، یک مدل تئوری وابسته به فشار موثر است. با در نظر گرفتن فشار موثر ۹/۵۱ مگاپاسکال بر اساس گزارشات موجود و عدد کنوردیناسیون ۹، مدول حجمی سنگ خشک در تخلخل بحرانی (۰/۳۶)

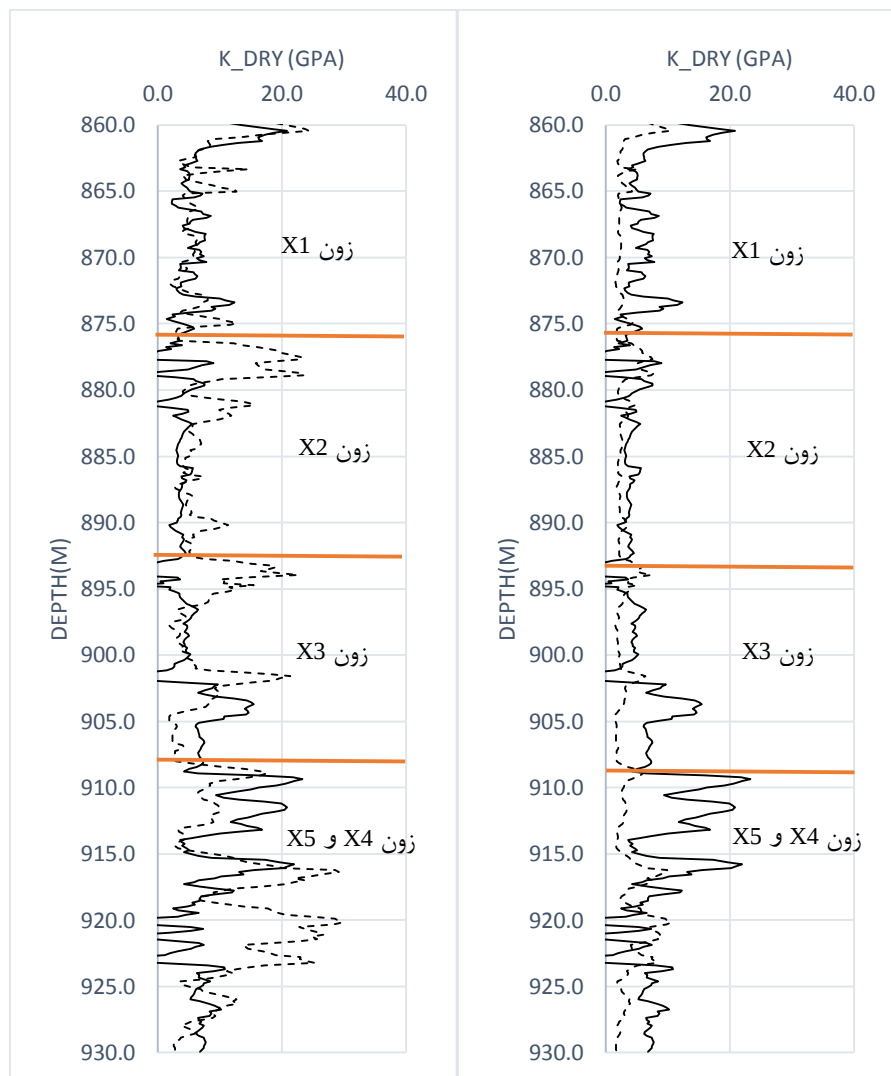
با استفاده از مدل هرتز-میندلین محاسبه می‌شود. به دلیل اینکه اطلاعاتی از نتایج آزمایشگاهی مربوط به تعیین عدد کئوردیناسیون موجود نمی‌باشد، این عدد بر اساس آزمون و خطا و نتایج مربوط به آزمایش اسمیت و همکاران (۱۹۲۹) در جدول (۴-۷)، برای تخلخل بحرانی در نظر گرفته شده است. مقدار تخلخل بحرانی برای ماسه‌سنگ‌ها بین ۰/۳۶-۰/۴۰ می‌باشد (نور و همکاران، ۱۹۹۸). مقادیر میانگین بیشینه تخلخل برای چاه‌های W-1، W-2 و W-9 برابر با ۰/۳۵۹ است. همچنین در مدل‌های تماسی که در فصل دوم (بخش ۲-۴-۳-ب) توضیح داده شده است، عدد کئوردیناسیون ۹ و تخلخل بحرانی ۰/۳۶ در نظر گرفته شده اند. بنابراین برای محاسبات مربوط به مدل‌های تماسی هرتز-میندلین و دیوورکین-نور از عدد کئوردیناسیون ۹ و تخلخل بحرانی ۰/۳۶ استفاده می‌شود. سپس با استفاده از حدهای بهبودیافته بالا و پایین هشین-اشتریکمن، مدول حجمی سنگ خشک برای تخلخل مخزن محاسبه می‌گردد. همانطور که در شکل‌های (۴-۱۹) تا (۴-۲۰) مشاهده می‌شود، در بعضی از اعماق مدل سیمانی شده با استفاده از حد بهبودیافته بالایی هشین-اشتریکمن (به عنوان مثال ۸۶۰ تا ۸۷۵ متری چاه W_2) و در بعضی از اعماق نیز مدل سیمانی نشده با استفاده از حد بهبودیافته پایینی هشین-اشتریکمن مناسب می‌باشند. بر اساس نتایج حاصل از شکل‌های (۴-۱۱) تا (۴-۱۳)، مخزن مورد مطالعه مخزنی با سیمان‌شدگی جزئی می‌باشد؛ بنابراین به دلیل تغییر درجه سیمان‌شدگی مخزن در اعماق مختلف، برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک از میانگین حدهای بهبود یافته هشین-اشتریکمن استفاده شده است. این میانگین‌گیری، تخمین بهتری از مدول حجمی سنگ خشک مخزن ارائه می‌دهد.

جدول (۴-۷): داده‌های مربوط به یک مجموعه کروی ایده‌آل توسط اسمیت و همکاران (۱۹۹۲).

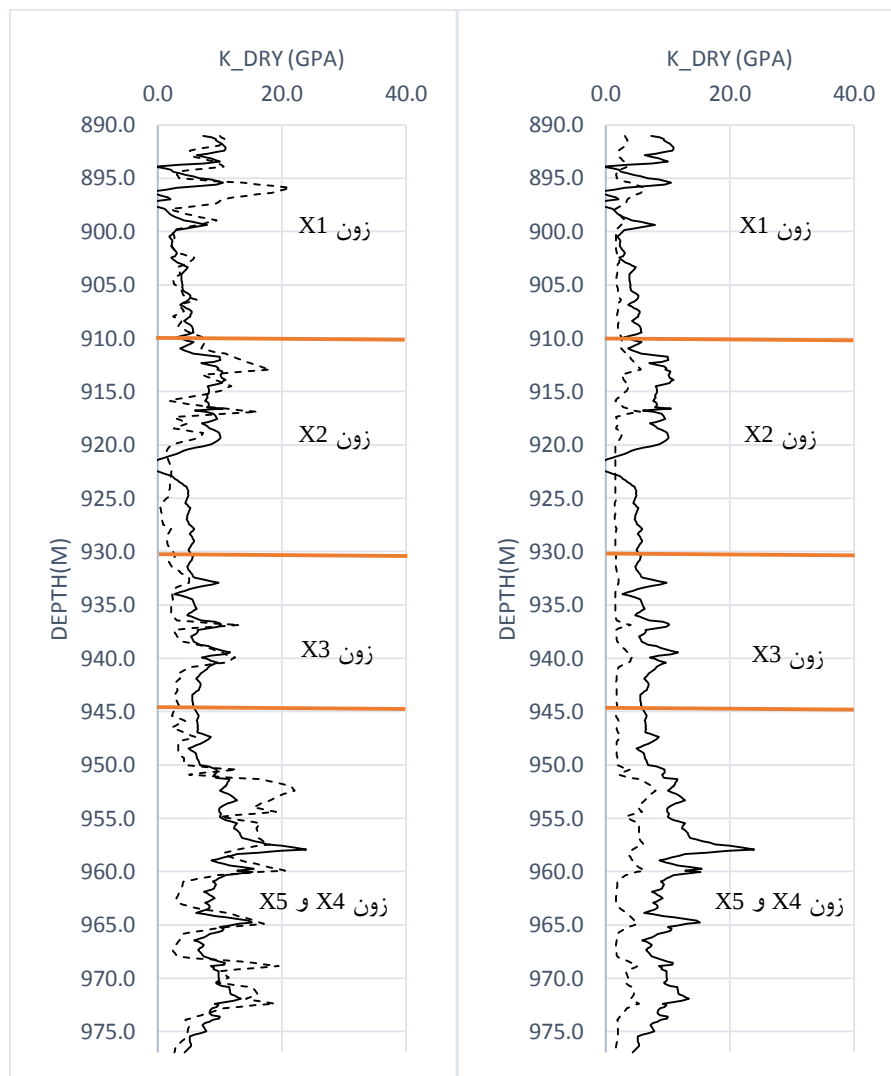
تخلخل	۰/۴۴۷	۰/۴۴۰	۰/۴۲۶	۰/۳۷۲	۰/۳۵۹
عدد کئوردیناسیون	$6/87 \pm 1/05$	$7/25 \pm 1/16$	$8/05 \pm 1/17$	$9/57 \pm 2/02$	$9/05 \pm 1/78$



شکل (۴-۱۹): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرتز-میندلین (خط چین) سیمانی شده (چپ) و سیمانی نشده (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه پیمایی (خط پر) (چاه W_1).



شکل (۴-۲۰): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرتز-میندلین (خط چین) سیمانی شده (چپ) و سیمانی نشده (راست) و مدول حجمی سنگ محاسبه شده از نگار چاه پیمایی (خط پر) (چاه W_2).



شکل (۴-۲۱): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل هرتز-میندلین (خط چین) سیمانی شده (چپ) و سیمانی نشده (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط پر) (چاه W_9).

جدول (۴-۸)، مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک را برای مدل هرتز-میندلین سیمانی شده، سیمانی نشده، میانگین این دو مدل و نگار چاه‌پیمایی نشان می‌دهد. میانگین مدل سیمانی شده و سیمانی نشده، تخمین بهتری از مدول حجمی سنگ خشک ارائه می‌دهد.

جدول (۴-۸): مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک مدل هرتز-میندلین سیمانی شده، مدل هرتز-میندلین سیمانی - نشده، نگار چاه‌پیمایی برای تمام چاه‌ها.

چاه	W_1	W_2	W_9
نگار چاه‌پیمایی	۶/۶۳۵	۶/۱۱۲	۷/۰۹۵
مدل هرتز-میندلین سیمانی شده	۱۱/۰۶۴	۸/۹۶۱	۱۰/۸۵۹
مدل هرتز-میندلین سیمانی نشده	۳/۷۷۳	۳/۲۵۳	۳/۰۷۲
مدل هرتز-میندلین (میانگین)	۷/۴۳۸	۶/۱۰۷	۶/۹۶۵

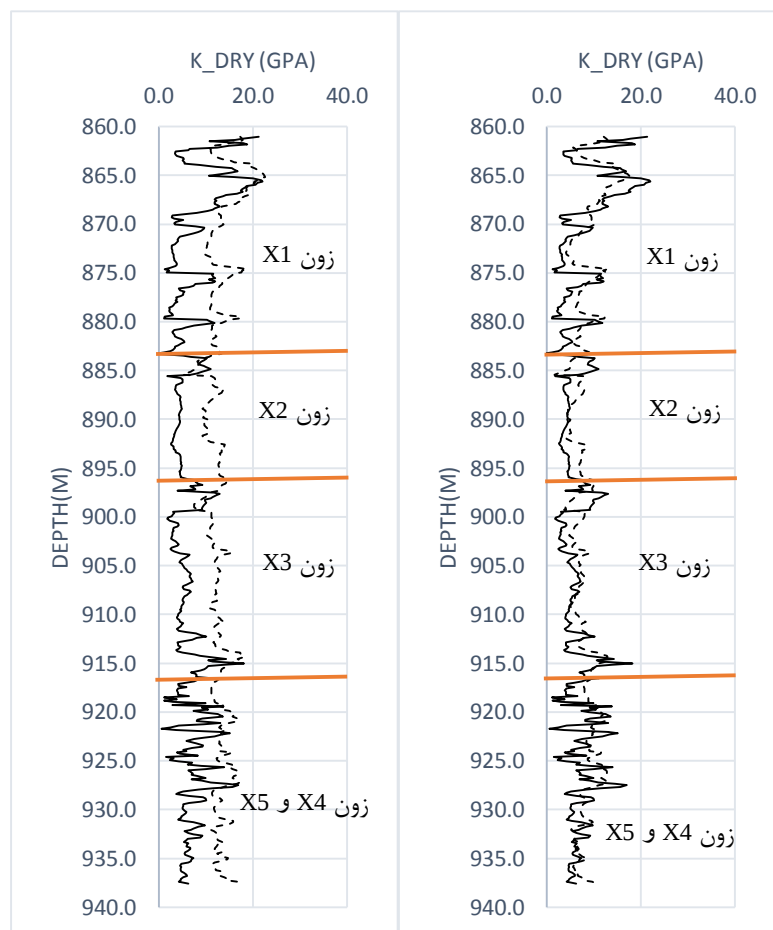
پ) مدل دیوورکین-نور

مدل مستقل از فشار دیوورکین-نور، اجازه محاسبه مدول حجمی سنگ خشک که سیمان در سطح دانه‌ها و یا سطح تماس بین دانه‌ها رسوب کرده است را می‌دهد. با در نظر گرفتن عدد کثوردیناسیون ۹ و تخلخل بحرانی ۰/۳۶، مدول حجمی سنگ خشک با استفاده از مدل دیوورکین-نور برای هر دو حالت مربوط به قرارگیری سیمان در سطح تماس بین دانه‌های سنگ (طرح یک) و دور از سطح تماس دانه‌های سنگ (طرح دو) محاسبه می‌شود. در شکل‌های (۴-۲۲) تا (۴-۲۳) مشاهده می‌شود که نوع سیمان‌شدگی مخزن، غالباً از نوع طرح دو می‌باشد؛ یعنی سیمان‌شدگی جزئی، دور از سطح تماس بین دانه‌ها رسوب کرده است.

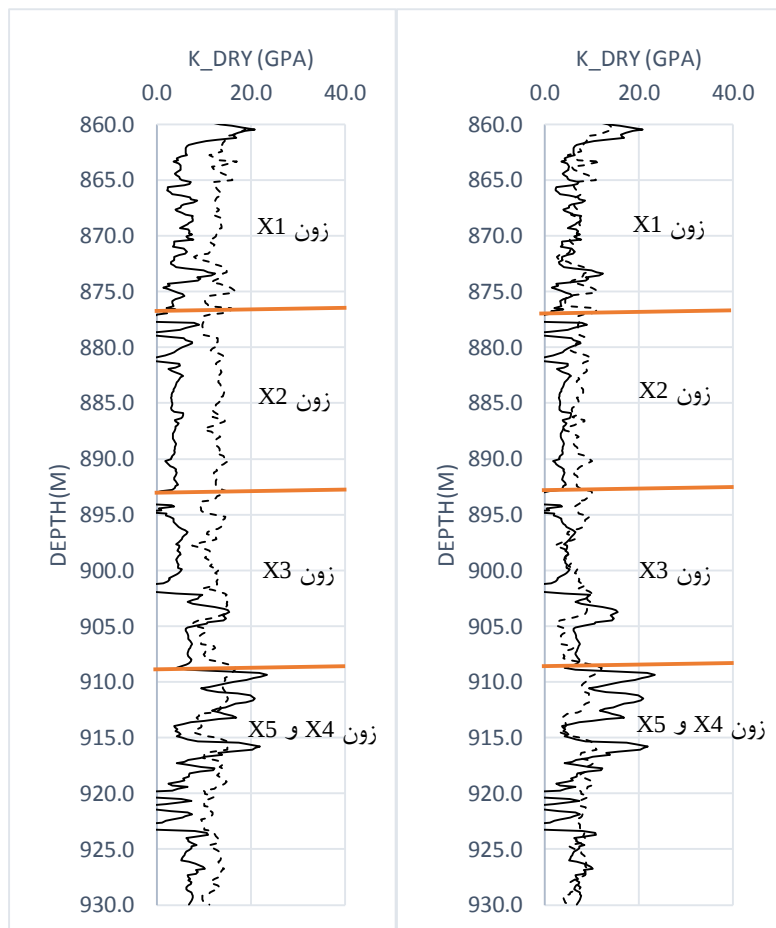
جدول (۴-۹)، مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک برای مدل دیوورکین-نور طرح یک، طرح دو و نگار چاه‌پیمایی، برای تمام چاه‌ها را نشان می‌دهد. براساس این جدول نیز مشاهده می‌شود که مقادیر میانگین طرح دو تخمین بهتری از مدول حجمی سنگ خشک ارائه می‌دهد.

جدول (۴-۹): مقادیر میانگین مدول حجمی سنگ خشک مدل دیوورکین-نور طرح یک، طرح دو و نگار چاه پیمایی برای تمام چاه‌ها.

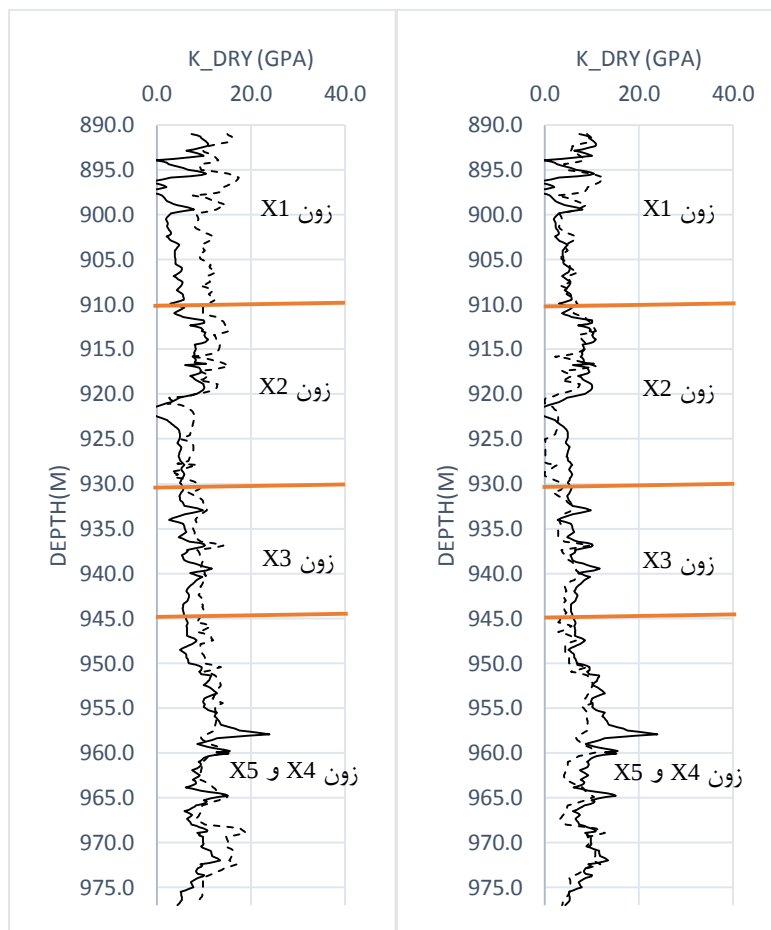
چاه	W_1	W_2	W_9
نگار چاه پیمایی	۶/۶۳۵	۶/۱۱۲	۷/۰۹۵
مدل دیوورکین-نور (طرح یک)	۱۲/۸۶۱	۱۲/۵۷۶	۱۰/۷۶۱
مدل دیوورکین-نور (طرح دو)	۸/۰۲۸	۷/۳۲۸	۵/۸۲۲



شکل (۴-۲۲): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل دیوورکین-نور (خط‌چین) طرح یک (چپ) و طرح دو (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه پیمایی (خط‌پر) (چاه W_1).



شکل (۴-۲۳): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل دیوورکین-نور (خطچین) طرح یک (چپ) و طرح دو (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خطپر) (چاه W_2).



شکل (۴-۲۴): مدول حجمی سنگ خشک مربوط به مدل دیوورکین-نور (خطچین) طرح یک (چپ) و طرح دو (راست) و مدول حجمی سنگ خشک محاسبه شده از نگار چاه‌پیمایی (خط‌پر) (چاه W_9).

۴-۳-۴ نتیجه‌گیری و انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب برای جانشینی سیال

با توجه به نتایج حاصل از سه مدل گسمن (محاسبه مدول سنگ خشک با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی)، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و مدل دیوورکین-نور که در شکل (۴-۲۵) برای چاه‌های مختلف نشان داده شده است، مشخص می‌شود که هر سه مدل تقریباً نتایج مشابهی ارائه می‌دهند. برای جانشینی سیال از دو مدل گسمن و میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین استفاده می‌شود. دلیل این انتخاب این است که مدل گسمن بطور رایج در صنعت برای جانشینی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب

مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین، به این دلیل است که نسبت به مدل دیوورکین-نور وضعیت حضور و یا عدم حضور سیمان‌شدگی را در نظر می‌گیرد. از طرفی ممکن است در صورت محاسبه اشتباه هریک از پارامترهای تخلخل، خواص ماتریکس، سرعت، خواص سیال و اشباع‌شدگی، خطای تجمعی حاصل از این پارامترها منجر به محاسبه اشتباه مدول حجمی سنگ خشک با استفاده از رابطه گسمن شود؛ بنابراین از هر دو مدل برای مدل‌سازی لرزه‌ای استفاده می‌شود. در نهایت الگوریتمی که می‌تواند به عنوان مدل فیزیک سنگ مخزن برای جانشینی سیال در نظر گرفت، به شرح زیر معرفی شده است:

۱- محاسبه فشار موثر مخزن، تخلخل، مدول حجمی، مدول برشی و نسبت پواسون ماتریکس سنگ. معمولاً عدد کئوردیناسیون ۹ و تخلخل بحرانی در ماسه سنگ‌ها برابر با 0.36 در نظر گرفته می‌شود.

۲- محاسبه مدول حجمی سنگ خشک در تخلخل بحرانی به عنوان تابعی از عدد کئوردیناسیون، تخلخل بحرانی، نسبت پواسون ماتریکس سنگ و فشار موثر مخزن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین.

۳- محاسبه مدول حجمی سنگ خشک در مقادیر کمتر از تخلخل بحرانی (تخلخل مخزن) با استفاده از حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن به عنوان تابعی از عدد کئوردیناسون، تخلخل و تخلخل بحرانی، مدول حجمی سنگ خشک در تخلخل بحرانی، مدول حجمی ماتریکس سنگ و مدول برشی محاسبه شده با استفاده از نگار چاه‌پیمایی.

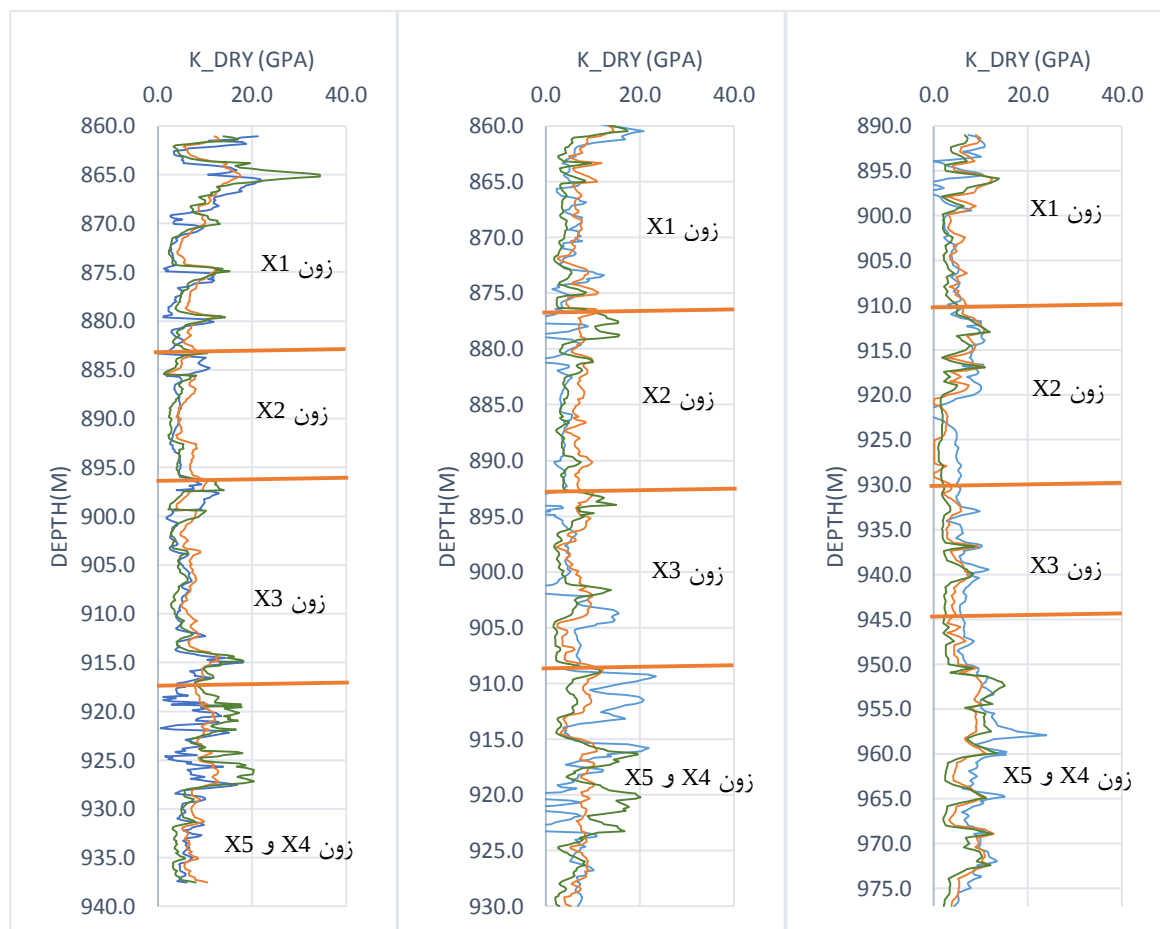
۴- میانگین‌گیری بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن به عنوان مدل مناسب برای محاسبه مدول حجمی سنگ خشک مخزن مورد مطالعه.

۵- محاسبه خواص سیال (چگالی، مدول حجمی و اشباع‌شدگی).

۶- محاسبه مدول حجمی و چگالی سنگ در شرایط اشباع‌شدگی جدید با استفاده از خواص سیال

تعیین شده در مرحله ۵. مدول حجمی سنگ اشباع‌شده با استفاده از رابطه گسمن محاسبه می‌شود.

۷- محاسبه سرعت تراکمی و سرعت برشی در شرایط اشباع‌شدگی جدید.



شکل (۴-۲۵): مقایسه مدول‌های حجمی سنگ خشک محاسبه شده با استفاده از رابطه گسمن (رنگ آبی)، میانگین بهبودیافته‌های بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز میندلین (رنگ سبز) و مدول دوورکین نور طرح دو (رنگ نارنجی) برای چاه‌های W_1 (چپ)، W_2 (وسط) و W_9 (راست).

۴-۳ جانشینی سیال و تغییرات سرعت و چگالی سنگ

تولید نفت باعث آزاد شدن مقداری از گاز همراه نفت و نفوذ گاز موجود در پوش سنگ به بخش مخزنی می‌شود. همچنین ممکن است آب موجود در زیر سطح تماس نفت-آب، جانشین نفت تولید شده شود.

نتیجه این جانشینی سیال، تغییر سرعت لرزه‌ای و چگالی سنگ خواهد بود. از آنجایی که خواص آب و نفت نزدیک به هم می‌باشند، جانشینی نفت با آب تغییرات زیادی را در سرعت لرزه‌ای ایجاد نمی‌کند. با استفاده از مدل‌های فیزیک سنگ گسمن و میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرترز-میندلین برای هر دو حالت اشباع‌شدگی همگن و ناهمگن و برای دو سناریو جانشینی سیال، تغییرات سرعت تخمین زده شده است. سناریوهای زیر برای جانشینی سیال در نظر گرفته شده‌اند:

سناریو A: به ازای ۱۵ درصد تولید نفت، ۱۰ درصد گاز و ۵ درصد آب جانشین نفت می‌شود.

سناریو B: به ازای ۲۰ درصد تولید نفت، ۲۰ درصد گاز جانشین نفت می‌شود.

لازم به توضیح است که به دلیل در دسترس نبودن مقدار نفت تولید شده از میدان مورد بررسی، سناریوهای در نظر گرفته شده با توجه به برداشت صیانتی از مخازن می‌باشند. بنابراین مقدار تولید نفت از مخازن در مدت سه تا چهار سال اول تولید، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد خواهد بود.

جانشینی سیال در دو چاه W_1 و W_2 انجام شده است. برای اختصار فقط نمودارهای مربوط به تغییرات سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی مدل گسمن در بخش مخزنی و با استفاده از سناریو A در چاه W_1 در شکل (۴-۲۶) نمایش داده شده است. نتایج مربوط به چاه W_2، سناریو B و مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرترز-میندلین در چاه W_1، در پیوست ب (شکل‌های ب-۱ تا ب-۵) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت موج تراکمی و چگالی بعد از جانشینی سیال بیشتر از تغییرات سرعت موج برشی می‌باشد و این تغییرات بصورت کاهشی است. سرعت موج برشی در اثر جانشینی گاز به دلیل کاهش چگالی سنگ، مقدار بسیار کمی افزایش می‌یابد که این تغییرات قابل مشاهده نمی‌باشد. لازم به توضیح است که جانشینی سیال در بخش نفتی و بخش‌هایی که میزان حجم شیل کم‌تر از ۵۰ درصد است، انجام شده است. تغییرات سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی همگن با توجه به شکل (۴-۱۵)، در صورت جانشینی ۱۰ درصد گاز با نفت

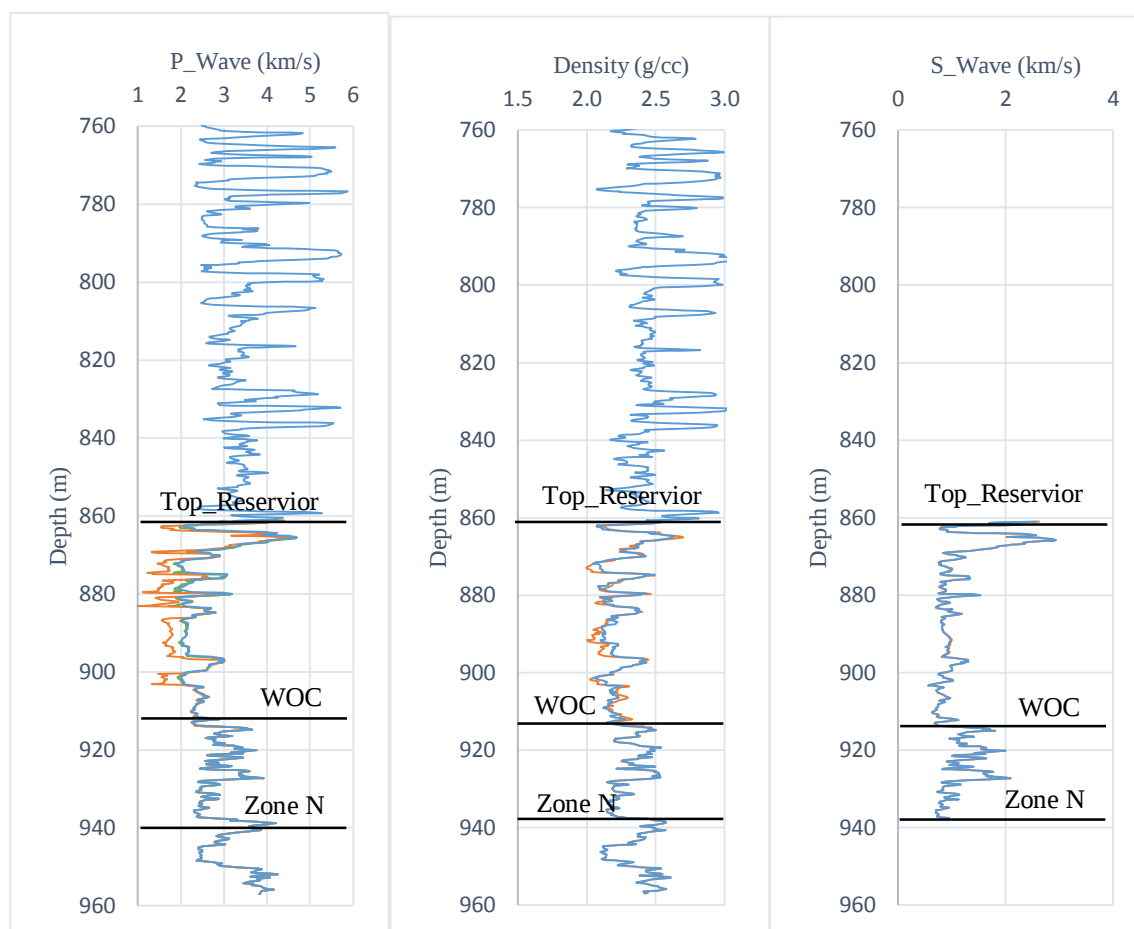
می‌باشد. در صورتی که این تغییر سرعت برای وضعیت اشباع‌شدگی ناهمگن بصورت تدریجی است و به ازای جانشینی ۱۰۰٪ گاز با نفت بیشترین افت سرعت را خواهد داشت. بنابراین همانطور که در شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود، در اشباع‌شدگی همگن تغییرات سرعت موج تراکمی بطور محسوسی مشاهده می‌شود ولی در اشباع‌شدگی ناهمگن این تغییرات بسیار ناچیز است و قابل مشاهده نمی‌باشد.

نمودار متقاطع سرعت موج تراکمی محاسبه شده بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در مقابل مدل گسمن و همچنین نمودار این دو سرعت نسبت به عمق در پیوست ب (شکل‌های ب-۶ تا ب-۸) آورده شده است. مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطا، که در پیوست ب آورده شده است (جدول ب-۱)، در چاه W_1 به ترتیب برابر با ۰/۸۲۵ و ۰/۰۸۹ و در چاه W_2 به ترتیب برابر با ۰/۶۹۶ و ۰/۱۱۳ می‌باشند. بنابراین مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین، مدل مناسبی برای این مخزن می‌باشد.

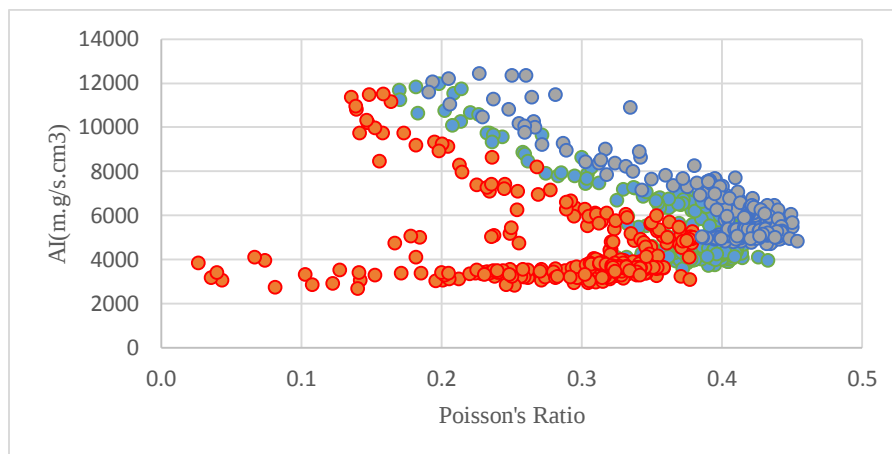
نمودار متقاطع مقاومت صوتی در مقابل نسبت پواسون، می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای شناسایی ماسه‌های گازی و آب شور استفاده شود (کاستاگنا و سوان^۱، ۱۹۹۷). در شکل (۴-۲۷) برای حالت اشباع از آب شور و سناریو B، با استفاده از رابطه گسمن برای دو حالت اشباع‌شدگی همگن و ناهمگن، مقادیر مقاومت صوتی در مقابل نسبت پواسون در چاه W_1 نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ماسه سنگ‌های اشباع از آب شور و ماسه سنگ‌های بعد از اعمال سناریو B، در هر دو حالت اشباع‌شدگی ناهمگن و همگن از هم تفکیک شده‌اند. به دلیل بالا بودن مقادیر مدول حجمی و چگالی آب شور نسبت به نفت و گاز، مقادیر مقاومت صوتی و نسبت پواسون برای حالت اشباع از آب شور نسبت به حالت اشباع‌شدگی

¹ Swan

همگن و ناهمگن سناریو B، بیشتر می‌باشد. همچنین مقادیر نسبت پواسون و مقاومت صوتی برای اشباع-شدگی همگن نسبت به حالت اشباع‌شدگی ناهمگن به دلیل کاهش ناگهانی سرعت موج تراکمی و در نتیجه نسبت پواسون و مقاومت صوتی، کمتر می‌باشد.



شکل (۴-۲۶): شکل سمت چپ مربوط به مدل‌های اشباع‌شدگی ناهمگن (به رنگ سبز)، همگن (نارنجی) و برجا (آبی) برای مدل گسمن در چاه W_1 برای سناریو A می‌باشد. شکل وسط مربوط به چگالی بعد از جان‌شینی سیال با سناریو A (با رنگ نارنجی) و شرایط برجا (آبی) می‌باشد. شکل سمت راست مربوط به سرعت برشی بعد از جان‌شینی سیال با سناریو A (با رنگ نارنجی) و شرایط برجا (آبی) می‌باشد.



شکل (۴-۲۷): نمودار متقاطع مقاومت صوتی در مقابل نسبت پواسون مربوط به چاه W_1. ماسه‌های مربوط به سناریو B، از ماسه‌های اشباع از آب شور (رنگ آبی) در هر دو حالت اشباع‌شدگی ناهمگن (سبز) و همگن (قرمز) تفکیک شده‌اند.

فصل پنجم

مدل سازی لرزه‌ای و نشانگرهای لرزه‌ای

۵-۱ مقدمه

در این فصل، با ساخت مدل الاستیک یک بعدی با استفاده از نگارهای چاه پیمایی برای شرایط قبل و بعد از جانشینی سیال، خواص مربوط به هر لایه شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی به عنوان ورودی مدل سازی پیشرو لرزه ای، محاسبه می گردد. سپس به منظور بررسی اثرات جانشینی سیال بر روی دامنه امواج لرزه ای، با استفاده از روش ردیابی پرتو و به کمک نرم افزار GXII، مدل لرزه ای مصنوعی ساخته می شود. در نهایت با استفاده از نرم افزار پترل، نشانگرهای لرزه ای بر روی مدل های لرزه ای مصنوعی اعمال می شود تا نشانگر مناسبی که تغییرات دامنه را بخوبی نشان می دهد، انتخاب گردد.

۵-۲ مراحل کار

مراحل کار و نرم افزارهای مورد استفاده در این فصل، بطور خلاصه و به ترتیب در زیر آورده شده است:

۱- اعمال چکشات در محل چاه ها به منظور انتقال داده ها از حوزه عمق به زمان با استفاده از بخش

ایلاگ^۱ نرم افزار همپسون- راسل^۲، رسم افق های لرزه ای با استفاده از بخش استراتا^۳ نرم افزار همپسون-

راسل، استخراج موجک با استفاده از بخش ایلاگ نرم افزار همپسون- راسل.

۲- ساخت مدل الاستیک یک بعدی قبل و بعد از جانشینی سیال بر روی نگارهای سرعت موج تراکمی،

سرعت موج برشی و چگالی بر اساس حدهای زمین شناسی و تغییرات عمده در روند نگار سرعت موج

تراکمی در محل چاه.

۳- مدل سازی پیشرو لرزه ای بر اساس مدل الاستیک یک بعدی با استفاده از نرم افزار GXII.

¹ eLog

³strata

²Hampson-Russell software (HRS)

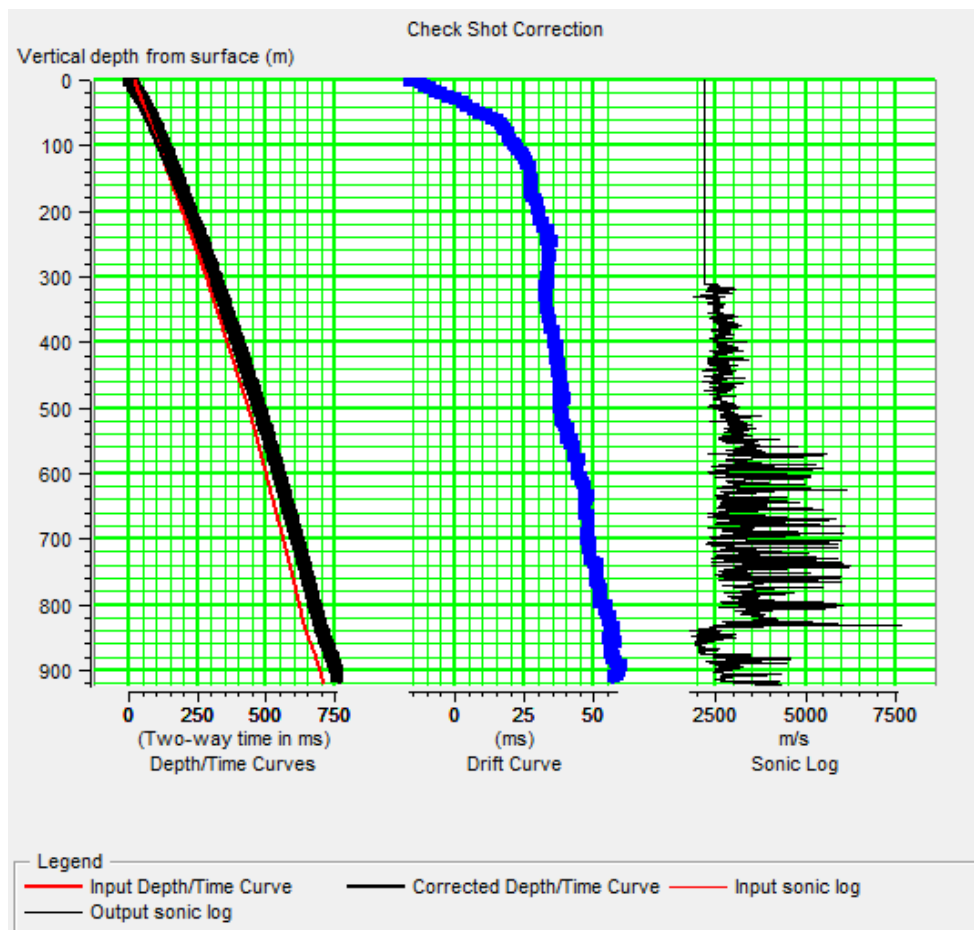
۴- اعمال کردن نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با پارامتر مخرنی اشباع سیال بر روی نتایج مدل‌سازی پیشروی لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار پترل.

۵-۳ وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار همپسون-راسل و اعمال چک‌شات

ابتدا به ترتیب داده‌های مربوط به موقعیت چاه‌ها، هندسه چاه‌ها، نگارهای چاه‌پیمایی، چک‌شات، اطلاعات سرسازندها و داده‌های لرزه‌ای فراخوانی می‌شوند. بعد از فراخوانی داده‌ها به منظور ساختن ردلرزه مصنوعی با استفاده از نگارهای چگالی و سرعت در محل چاه، ابتدا باید این نگارها و مقطع لرزه‌ای هم حوزه شوند. بنابراین با استفاده از چک‌شات، نگارهای سرعت، چگالی و سرسازندها از حوزه عمق به زمان انتقال داده می‌شوند. شکل (۵-۱)، مربوط به تصحیح چک‌شات چاه W-2 بر روی نگار صوتی می‌باشد. در هر نقطه عمقی، z ، سرعت $v(z)$ مربوط به نگار صوتی معلوم می‌باشد. با استفاده از رابطه (۵-۱) می‌توان زمان مربوط به عمق z ، $t(z)$ را محاسبه کرد که در صورت وجود نگار صوتی، نرم‌افزار بصورت خودکار، نگار رابطه زمان-عمق را مطابق رابطه (۵-۱) محاسبه می‌کند (راهنمای نرم‌افزار همپسون راسل، ۱۹۹۹):

$$t(z) = \int_{z_0}^z \frac{dz}{v(z)} \quad (5-1)$$

در شکل (۵-۱) با استفاده از درونیایی منحنی دریافت (به رنگ آبی) که مربوط به اختلاف بین منحنی زمان-عمق محاسبه شده با استفاده از رابطه (۵-۱) (به رنگ قرمز) و چک‌شات می‌باشد، چک‌شات تصحیح شده و منحنی زمان-عمق مربوط به آن (به رنگ مشکی) محاسبه می‌شود.



شکل (۵-۱): تصحیح چک‌شات چاه W-2.

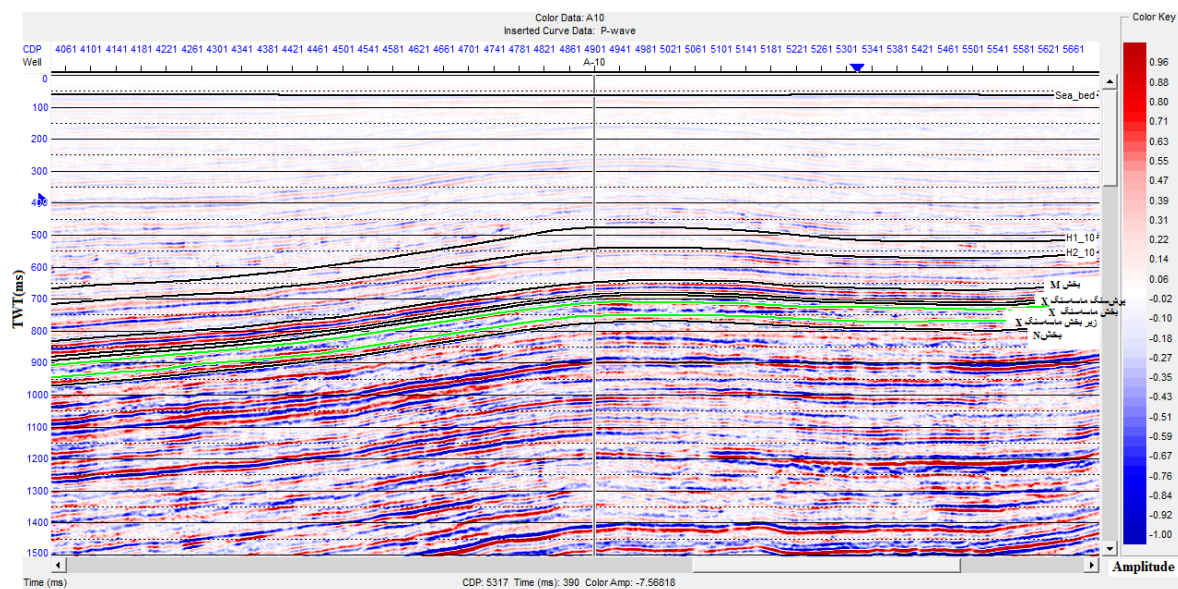
۴-۵ رسم افق‌های لرزه‌ای

پس از اعمال چک‌شات و به منظور مشخص شدن سرسازندها بر روی مقطع لرزه‌ای، افق‌های لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار همپسون-راسل رسم شده‌اند. شکل (۵-۲) مقطع لرزه‌ای و افق‌های لرزه‌ای انتخاب شده در مقطع لرزه‌ای نزدیک به چاه W-1 را نشان می‌دهد.

۵-۵ استخراج موجک

به‌منظور انجام مدل‌سازی لرزه‌ای لازم است که ابتدا یک موجک مناسب انتخاب شود. از بین چهار چاه موجود، از دو چاه W-1 و W-2 برای استخراج موجک استفاده شده است. با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و

نگارهای چاه، یک موجک لرزه‌ای با فاز ۱۸۰ درجه، فرکانس غالب ۴۵ هرتز و طول موجک ۱۰۰ میلی‌ثانیه با ضریب هبستگی ۸۹/۸٪ استخراج شده است. مراحل استخراج موجک لرزه‌ای در پیوست پ آورده شده است.

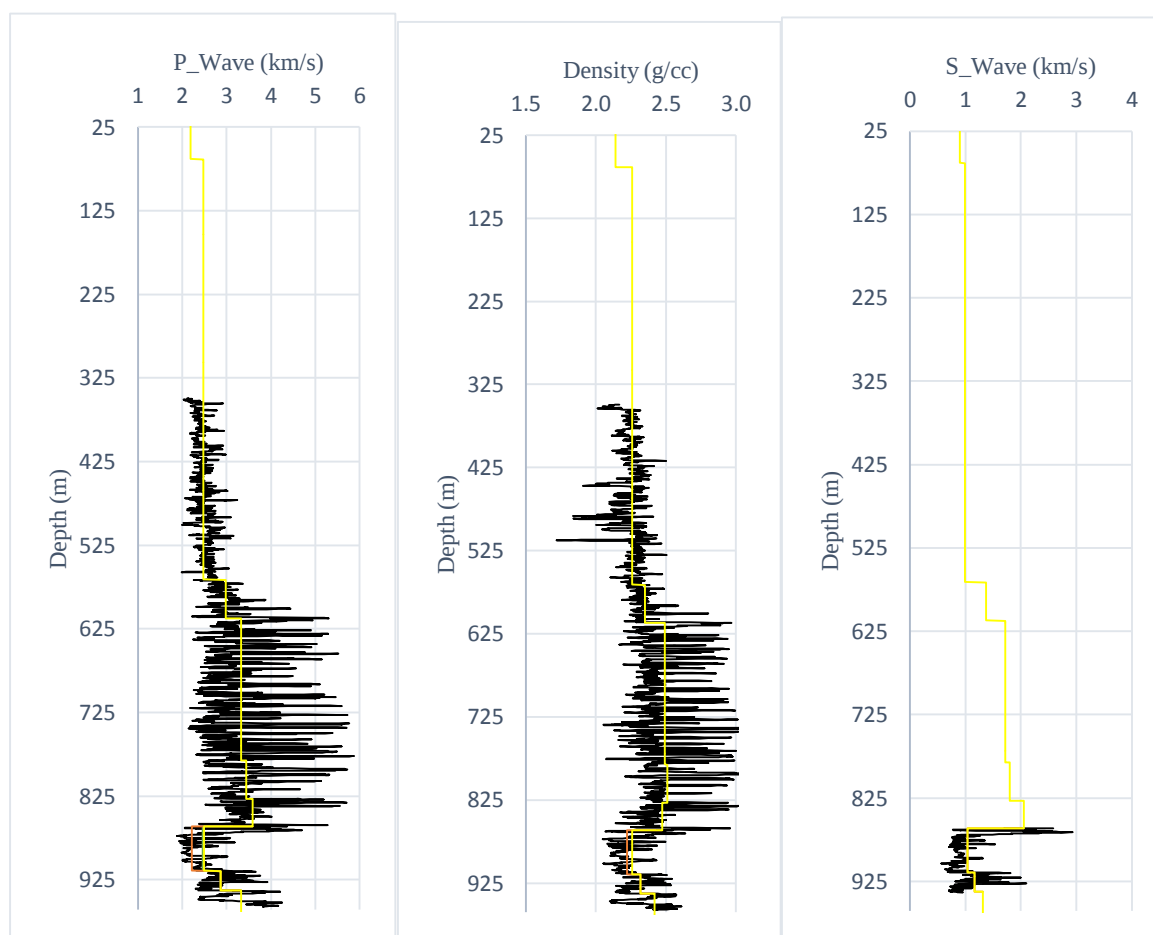


شکل (۵-۲): رسم افق‌های لرزه‌ای بر روی مقطع لرزه‌ای عبوری از نزدیکی چاه W-1.

۵-۶ مدل‌سازی الاستیک یک بعدی

مدل یک بعدی بلوک‌بندی شده بر روی نگرارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی، بر اساس حدهای زمین‌شناسی و تغییرات ناگهانی بر روی روند نگار سرعت موج تراکمی صورت گرفته است. این مدل بلوک‌بندی شده برای شرایط قبل و بعد از جانشینی سیال، با استفاده از دو مدل فیزیک سنگ گسمن و میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و شرایط اشباع‌شدگی همگن و ناهمگن بدست آمده است. شکل (۵-۳)، مربوط به مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو A (خطوط نارنجی) بر روی نگرارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه

W-1 می‌باشد. بر روی نگار سرعت موج تراکمی، مدل گسمن برای اشباع‌شدگی همگن به رنگ نارنجی و برای اشباع‌شدگی ناهمگن به رنگ سبز می‌باشد که به دلیل درصد کم تغییرات سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی تکه‌ای این حالت مشهود نیست. مدل‌های بلوک‌بندی شده مربوط به سناریو B، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و چاه W-2 در پیوست آورده شده است.



شکل (۳-۵): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو A (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-1. بر روی نگار سرعت موج تراکمی، مدل گسمن برای اشباع همگن به رنگ نارنجی و برای اشباع ناهمگن به رنگ سبز است که به دلیل درصد کم تغییرات سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن این حالت مشاهده نمی‌شود.

جدول (۵-۱)، مقادیر میانگین سرعت و چگالی در بخش‌های غیرمخزنی و جدول (۵-۲) مقادیر میانگین سرعت و چگالی در بخش مخزنی را قبل و بعد از جانشینی سیال نشان می‌دهد. جدول (۵-۳)، مربوط به درصد تغییرات سرعت موج تراکمی در اثر جانشینی سیال نسبت به شرایط برجا می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، درصد تغییرات سرعت موج تراکمی برای حالت اشباع‌شدگی ناهمگن بسیار ناچیز است. علت این امر کاهش تدریجی سرعت موج تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن با افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصد گاز می‌باشد. تغییرات سرعت موج تراکمی در سناریو A و B نسبت به هم، کمتر از یک درصد است. این مسئله نشان می‌دهد که تغییرات عمده سرعت موج تراکمی در شرایط اشباع‌شدگی همگن در جانشینی ۱۰ درصد گاز با نفت می‌باشد.

جدول (۵-۱): میانگین سرعت و چگالی در تمام چاه‌ها برای بخش‌های غیر مخزنی بکار برده شده در مدل‌سازی لرزه‌ای.

چگالی (g/cm ³)	سرعت برشی (km/s)	سرعت تراکمی (km/s)	لایه
۲/۱۴	۰/۹	۲/۱۸۵	۱
۲/۲۵۹	۰/۹۹۳	۲/۴۷۴	۲
۲/۳۵۰	۱/۳۶۹	۲/۹۷۷	۳
۲/۴۹۱	۱/۷۱۶	۳/۳۲۶	۴
۲/۵۰۹	۱/۸۰	۳/۴۴۷	۵
۲/۴۷۴	۲/۰۵۵	۳/۵۸۴	۶
-	-	-	۷ (مخزن)
۲/۴۱۹	۱/۳۲۰	۳/۳۲۶	۸

جدول (۲-۵): میانگین سرعت و چگالی قبل و بعد از جانشینی سیال در بخش مخزنی (زون نفتی) (لایه شماره ۷).

		سرعت تراکمی (km/s)		سرعت برشی (km/s)		چگالی (g/cm ³)	
مدل		W_1	W_2	W_1	W_2	W_1	W_2
A	گسمن، اشباع‌شدگی همگن، سناریو	۲/۲۳۱	۲/۱۱۰	۱/۰۴۱	۰/۹۵۱	۲/۲۳۶	۲/۲۱۳
	گسمن، اشباع‌شدگی همگن، سناریو B	۲/۲۱۴	۲/۰۹۴	۱/۰۴۴	۰/۹۵۴	۲/۲۲۳	۲/۱۹۸
A	گسمن، اشباع‌شدگی ناهمگن، سناریو	۲/۴۸۷	۲/۳۶۵	۱/۰۴۱	۰/۹۵۱	۲/۲۳۶	۲/۲۱۳
	گسمن، اشباع‌شدگی ناهمگن، سناریو B	۲/۴۸۰	۲/۳۶۳	۱/۰۴۴	۰/۹۵۴	۲/۲۲۳	۲/۱۹۸
A	هرتز-میندلین، سناریو	۲/۳۰۹	۲/۰۹۳	۱/۰۴۱	۰/۹۵۱	۲/۲۳۶	۲/۲۱۳
	هرتز-میندلین، سناریو B	۲/۲۹۶	۲/۰۷۹	۱/۰۴۴	۰/۹۵۴	۲/۲۲۳	۲/۱۹۷
برجا	زون نفتی	۲/۴۸۸	۲/۳۷۶	۱/۰۳۴	۰/۹۴۴	۲/۲۶۰	۲/۲۴۸
	زون آبی	۲/۸۶۶	۲/۹۷۵	۱/۱۷۲	۱/۲۸۱	۲/۳۱۶	۲/۳۳۷

جدول (۳-۵): درصد تغییرات سرعت موج تراکمی در اثر جانشینی سیال در مقایسه با شرایط برجا (این تغییرات بصورت کاهشی می‌باشد).

مدل	W_1	W_2
گسمن، اشباع‌شدگی همگن، سناریو A	۱۰/۳۳	۱۱/۱۹
گسمن، اشباع‌شدگی همگن، سناریو B	۱۱/۰۱	۱۱/۸۷
گسمن، اشباع‌شدگی ناهمگن، سناریو A	۰/۰۴	۰/۴۶
گسمن، اشباع‌شدگی ناهمگن، سناریو B	۰/۳۲	۰/۵۵
هرتز-میندلین، سناریو A	۷/۱۹	۱۱/۹۱
هرتز-میندلین، سناریو B	۷/۷۸	۱۲/۵

۵-۷ مدل سازی پیشرو لرزه‌ای با استفاده از روش ردیابی پرتو

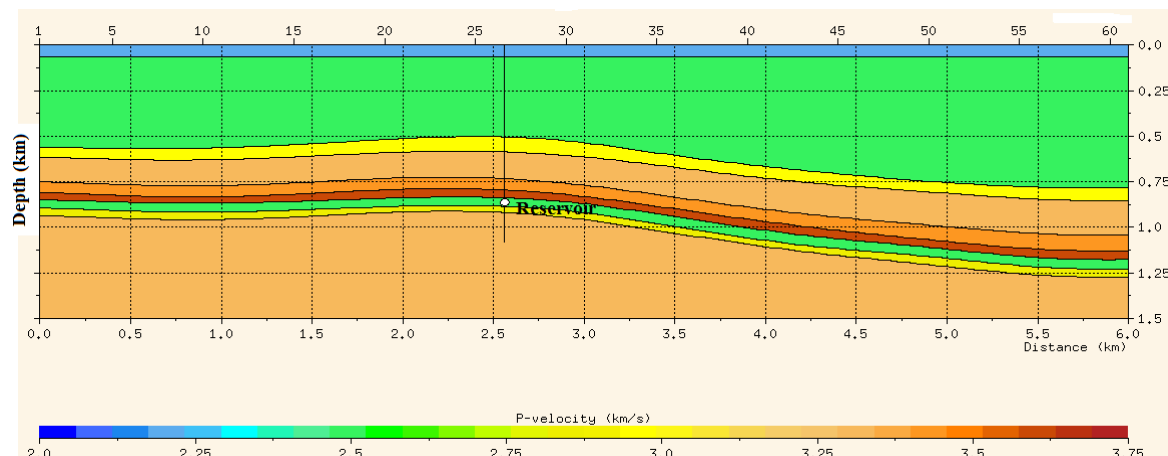
لازم به توضیح است که کلیه مراحل مربوط به ساخت مدل پیشرو لرزه‌ای و همچنین اعمال نشانگرها، برای هر دو چاه W-1 و W-2 انجام شده است ولی با توجه به نتایج حاصل از جدول (۵-۳) به دلیل اینکه تفاوت بین دوسناریو جانشینی سیال در هر دو مدل فیزیک سنگ و شرایط اشباع‌شدگی همگن و ناهمگن کمتر از یک درصد می‌باشد، برای اختصار نتایج مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای و اعمال نشانگرها برای سناریو A و چاه W-1 آورده شده است. نتایج مدل‌سازی مربوط به چاه W-2 در پیوست ث (شکل‌های (ث-۲) تا (ث-۸)) آورده شده است.

برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای، ابتدا افق‌های لرزه‌ای منطبق با نگارهای بلوک‌بندی شده از حوزه زمان به حوزه عمق منتقل می‌شوند. سپس افق‌های عمقی در نرم‌افزار GXII فراخوانی شده و خواص مربوط به هر لایه (شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی قبل و بعد از جانشینی سیال) مطابق جدول (۵-۲) اعمال می‌شود. به دلیل اینکه اطلاعاتی درمورد بستگی ساختمانی مخزن در دسترس نمی‌باشد، اثرات جانشینی سیال در کل لایه مخزن اعمال شده است؛ اگر جانشینی سیال در بخشی از مخزن صورت بگیرد، تغییرات سیگنال لرزه‌ای در آن بخش به‌همین صورت خواهد بود و در سایر بخش‌های مخزن تغییر سیگنال لرزه‌ای ایجاد نمی‌شود. شکل‌های (۵-۴) تا (۵-۷)، مربوط به مدل‌های سرعت موج تراکمی ورودی در مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای در شرایط برجا و سناریو A با استفاده از هر دو مدل فیزیک سنگ و اشباع‌شدگی-های همگن و ناهمگن در چاه W-1 می‌باشند.

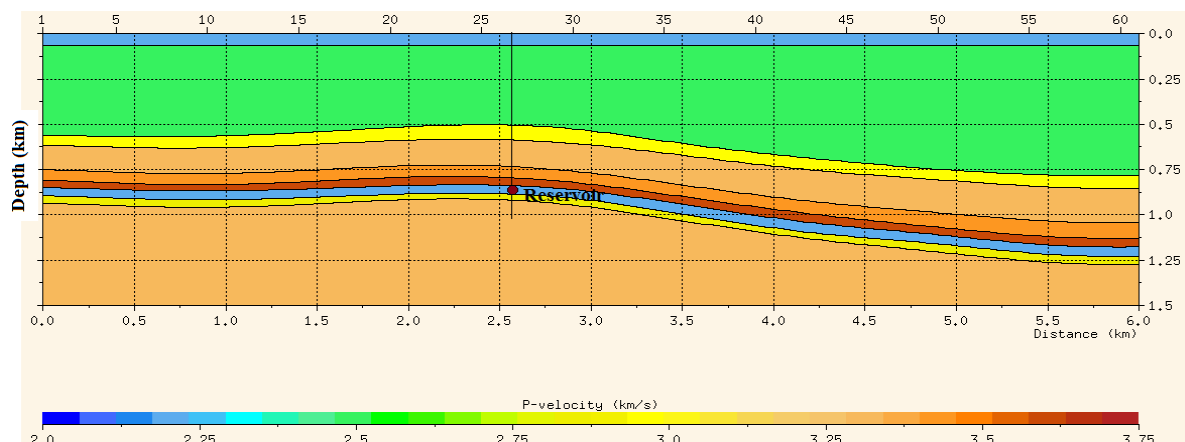
مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای در نرم‌افزار GXII و با استفاده از روش ردیابی پرتو با دورافت صفر و روش پرتو تصویری^۱ انجام شده است. پارامترهای مربوط به هندسه مدل در جدول (۵-۴) آورده شده است. با انتخاب

^۱Image Ray

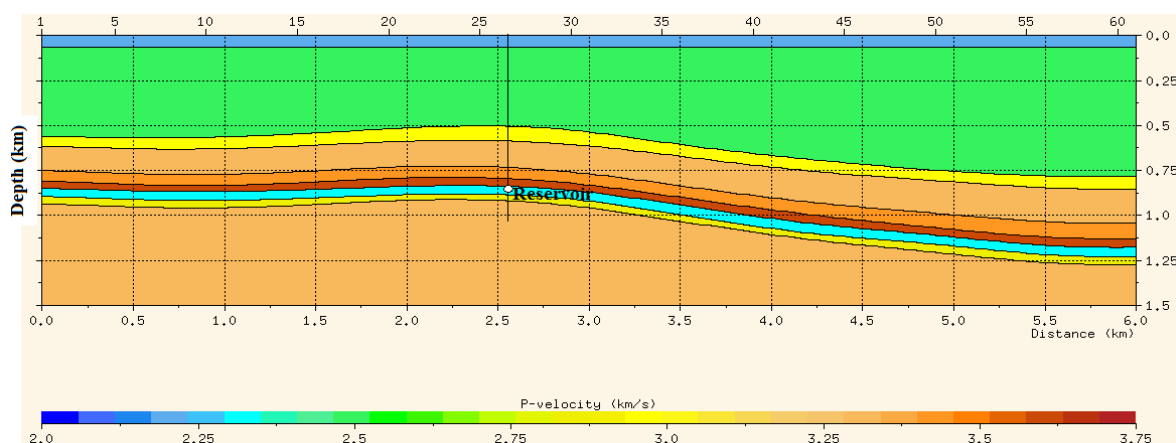
فواصل نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه، چشمه موج تراکمی با فرکانس غالب ۴۵ هرتز و طول موج ۱۰۰ میلی-
ثانیه، مدل دو بعدی لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده است. مدل حاصل، ساده و بدون بازتاب چندگانه می‌باشد.



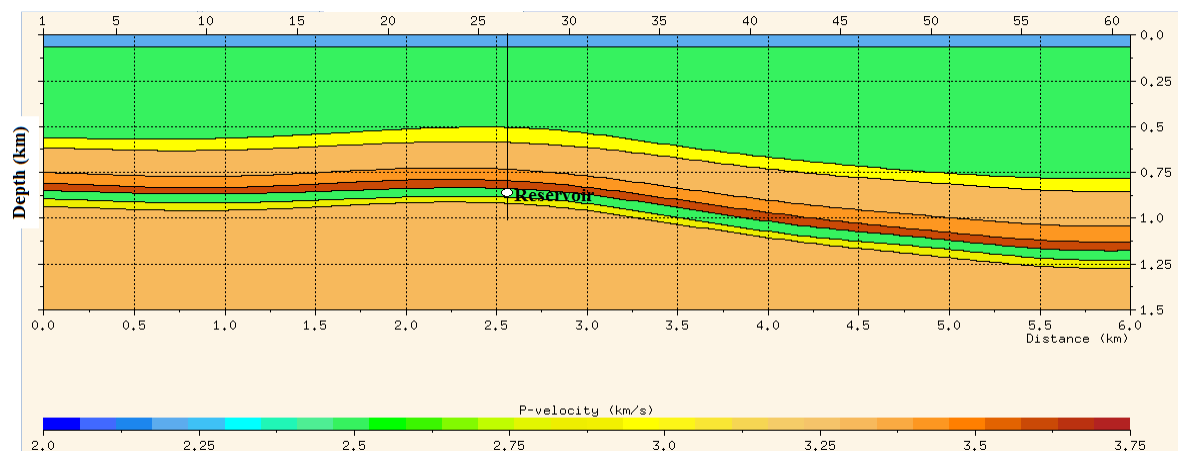
شکل (۴-۵): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 در شرایط برجا.



شکل (۵-۵): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 مربوط به سناریو A، مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن.



شکل (۶-۵): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 مربوط به سناریو A، مدل هرتز-میندلین.

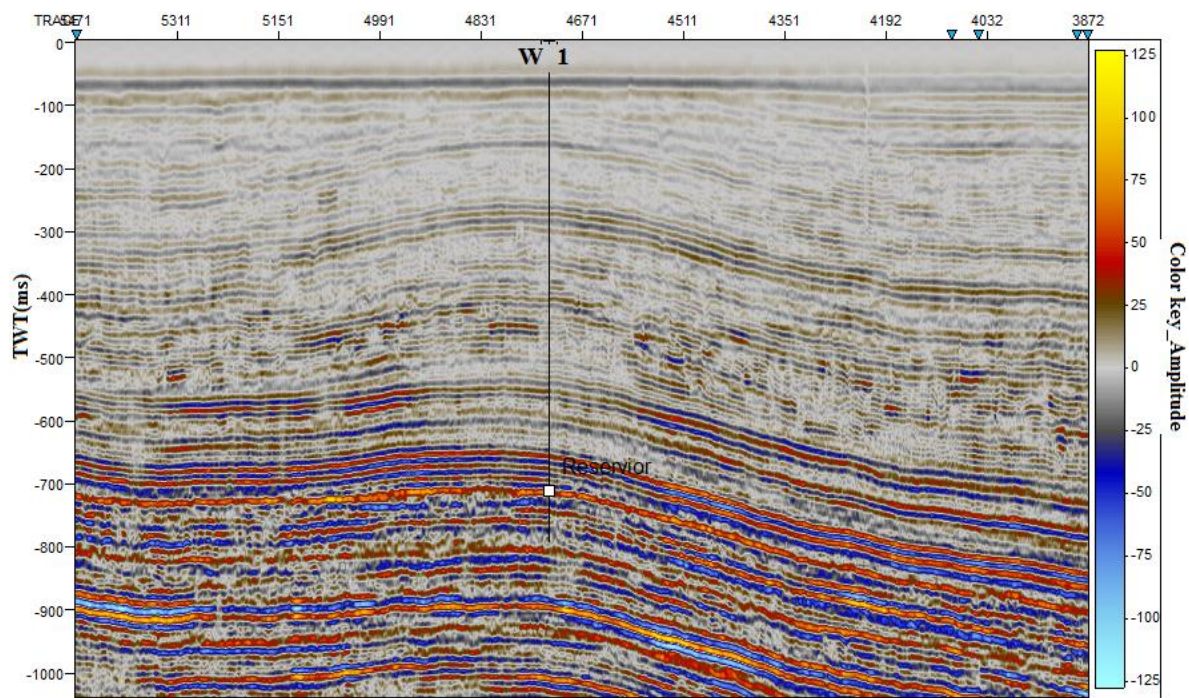


شکل (۵-۷): مدل سرعت موج تراکمی مربوط به چاه W_1 مربوط به سناریو A، مدل گسمن با اشباع‌شدگی ناهمگن.

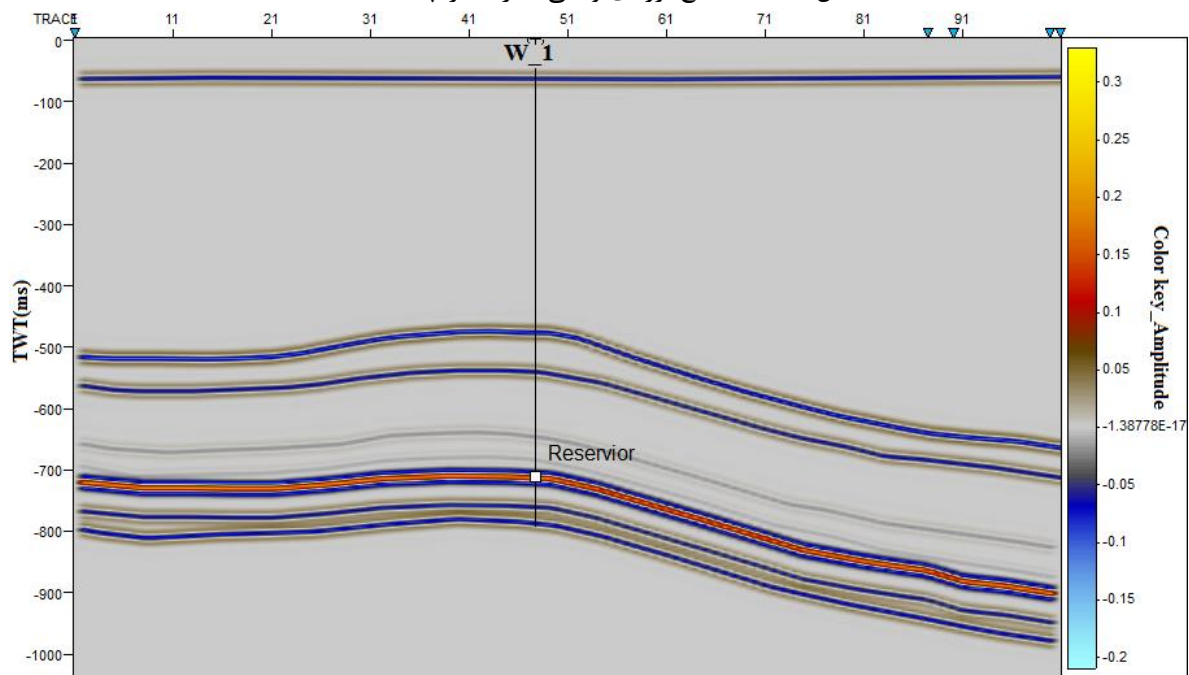
جدول (۵-۴): پارامترهای انتخاب شده مربوط به موقعیت چشمه/گیرنده در چاه W_1.

محدوده مدل (متر)	X1	۱۰۰۰
	X2	۳۰۰۰
	Z1	.
	Z2	۱۵۰۰
شماره اولین جفت چشمه/گیرنده (متر)		۱
مکان اولین جفت چشمه/گیرنده (متر)		۱۰۰۰
شماره آخرین جفت چشمه/گیرنده (متر)		۱۰۱
مکان آخرین جفت چشمه/گیرنده (متر)		۳۰۰۰
فواصل بین هر جفت چشمه/گیرنده (متر)		۲۰۰

شکل (۵-۸) مربوط به مقطع لرزه‌ای نزدیک به چاه W_1 می‌باشد. شکل (۵-۹) مدل پیشرو لرزه‌ای ساخته شده برای شرایط برجا در چاه W_1 را نشان می‌دهد. شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) مربوط به نتایج مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای برای مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A می‌باشند.



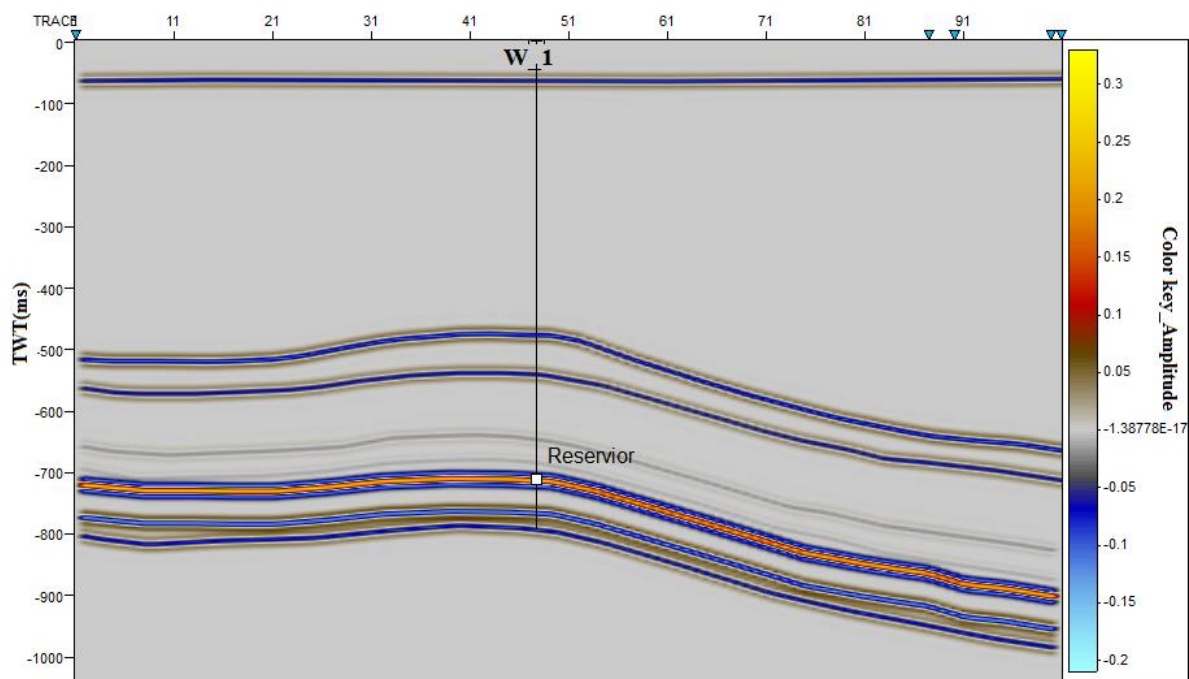
شکل (۸-۵): مقطع لرزه‌ای واقعی گذرنده از چاه W_1.



شکل (۹-۵): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده در شرایط برجا مربوط به چاه W_1.

از مقایسه شکل (۹-۵) و (۱۰-۵) این نتیجه حاصل می‌شود که در اثر جانشینی نفت موجود در مخزن با در نظر گرفتن سناریو A، مدول حجمی و چگالی موثر سیال مخزن به دلیل حضور گاز کاهش یافته است که

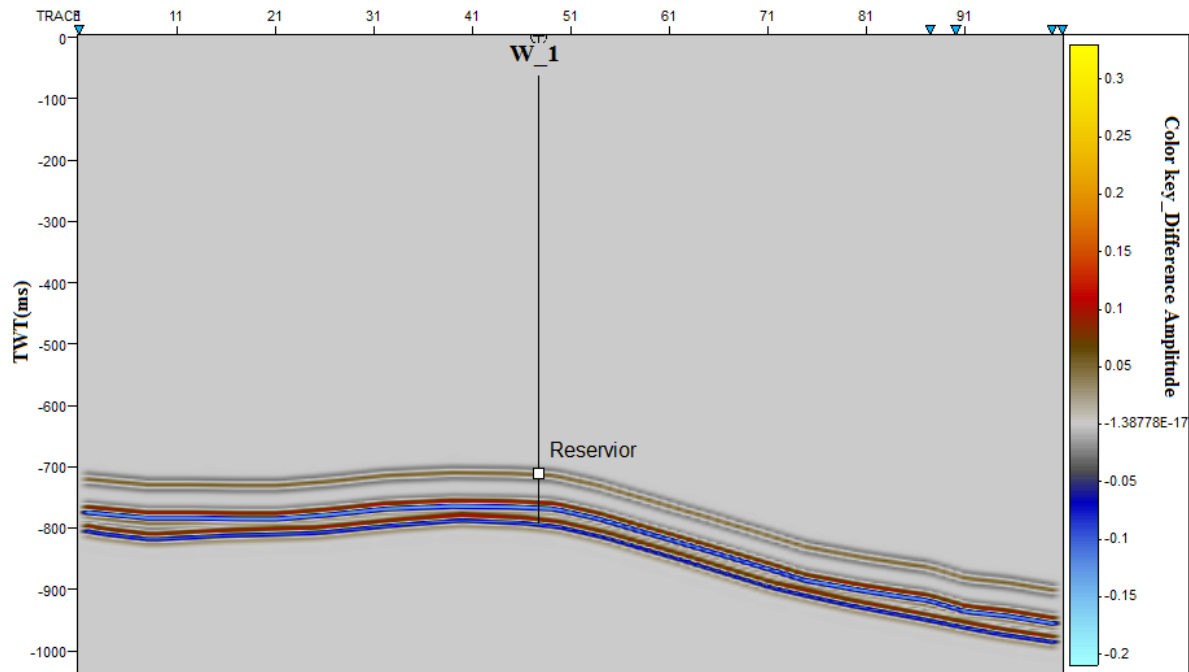
منجر به کاهش ناگهانی سرعت موج تراکمی با درنظر گرفتن اشباع‌شدگی همگن می‌شود. علاوه بر سرعت موج تراکمی، چگالی حجمی سنگ نیز کاهش یافته است. بنابراین کاهش مقاومت صوتی حاصل از جانشینی سیال، باعث افزایش ضریب بازتاب و دامنه سیگنال لرزه‌ای می‌شود که در شکل (۵-۱۰) این افزایش دامنه مشاهده می‌شود. همچنین کاهش سرعت در بخش مخزنی، باعث افزایش زمان سیر در لایه‌های زیرین مخزن شده است.



شکل (۵-۱۰): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

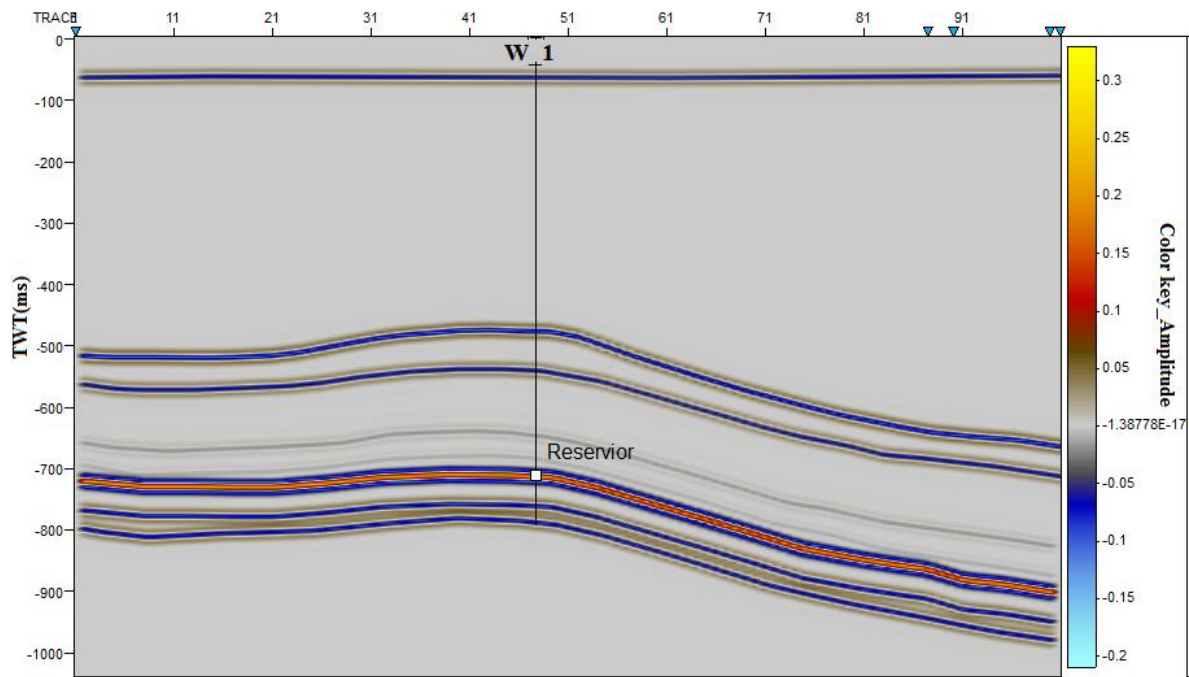
شکل (۵-۱۱)، مربوط به تفاضل بین دامنه مدل لرزه‌ای مصنوعی شکل (۵-۹) در شرایط برجا و شکل (۵-۱۰) در شرایط بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A می‌باشد. این تفاضل دامنه نشان می‌دهد که حضور گاز باعث افزایش دامنه در بخش مخزنی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات دامنه فقط محدود به بخش مخزنی نمی‌باشد و در لایه‌هایی که در اعماق پایین‌تر

از مخزن قرار گرفته‌اند نیز ایجاد می‌شود. افزایش زمان سیر موج در بخش‌های عمیق‌تر مخزن، باعث کاهش سرعت و در نتیجه تغییر ضریب بازتاب و دامنه در این بخش‌ها شده است.

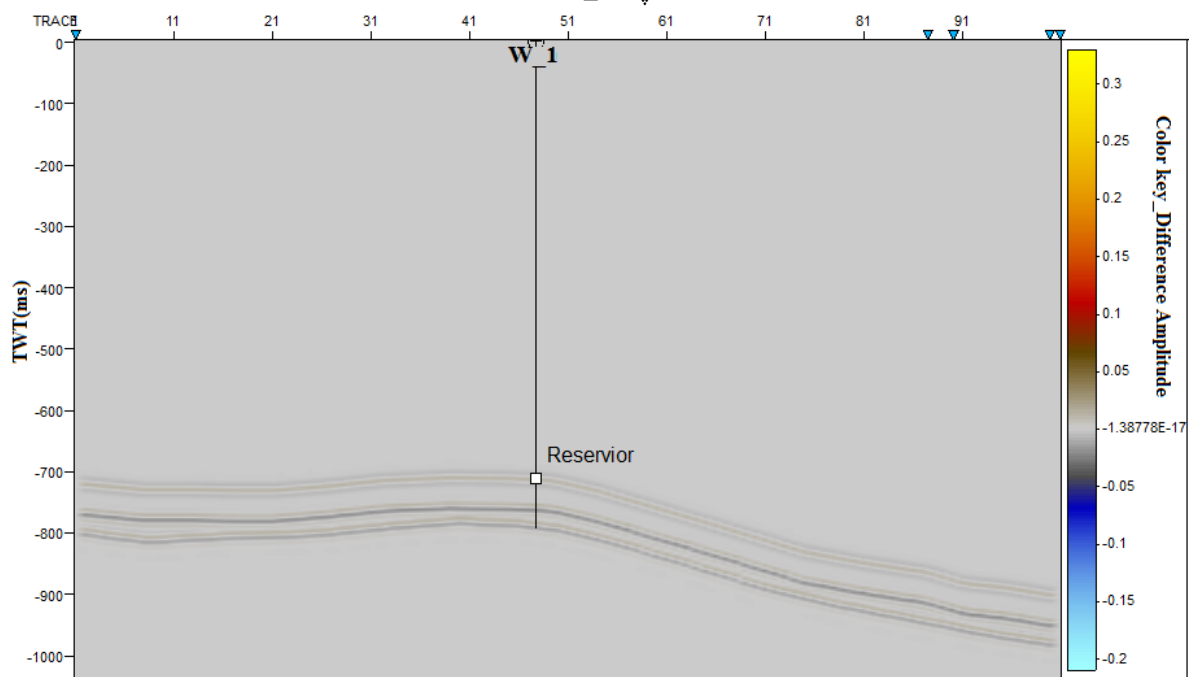


شکل (۵-۱۱): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع-شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

شکل (۵-۱۲) مربوط به نتایج مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای برای مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A می‌باشد. شکل (۵-۱۳) مربوط به تفاضل بین دامنه مدل لرزه‌ای مصنوعی شکل (۵-۹) در شرایط برجا و شکل (۵-۱۲) در شرایط بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A را نشان می‌دهد. در صورتی که اشباع‌شدگی مخزن از نوع ناهمگن باشد، همانطور که در بخش‌های قبل به تفصیل توضیح داده شده است، تغییرات سرعت موج تراکمی به صورت تدریجی بوده و کاهش مقاومت صوتی و ضریب بازتاب بسیار کم می‌باشد. در نتیجه مقدار افزایش دامنه در بخش مخزنی و همچنین لایه‌هایی که در اعماق پایین‌تر از مخزن قرار گرفته‌اند، بسیار ناچیز خواهد بود.

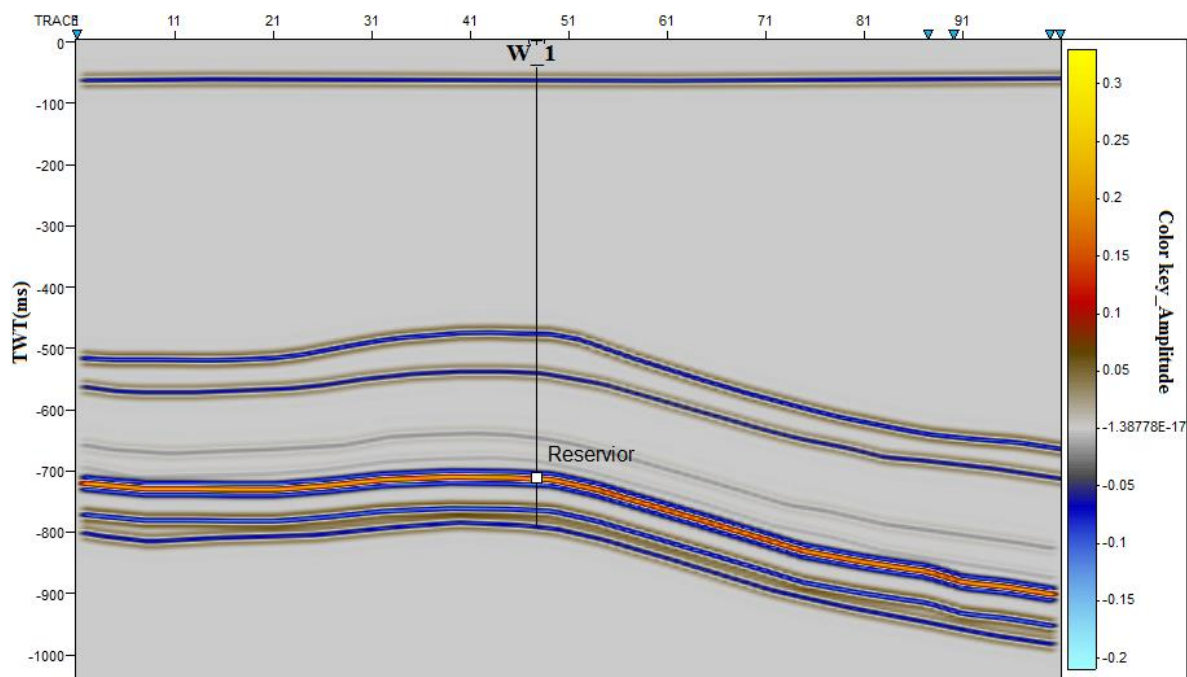


شکل (۵-۱۲): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

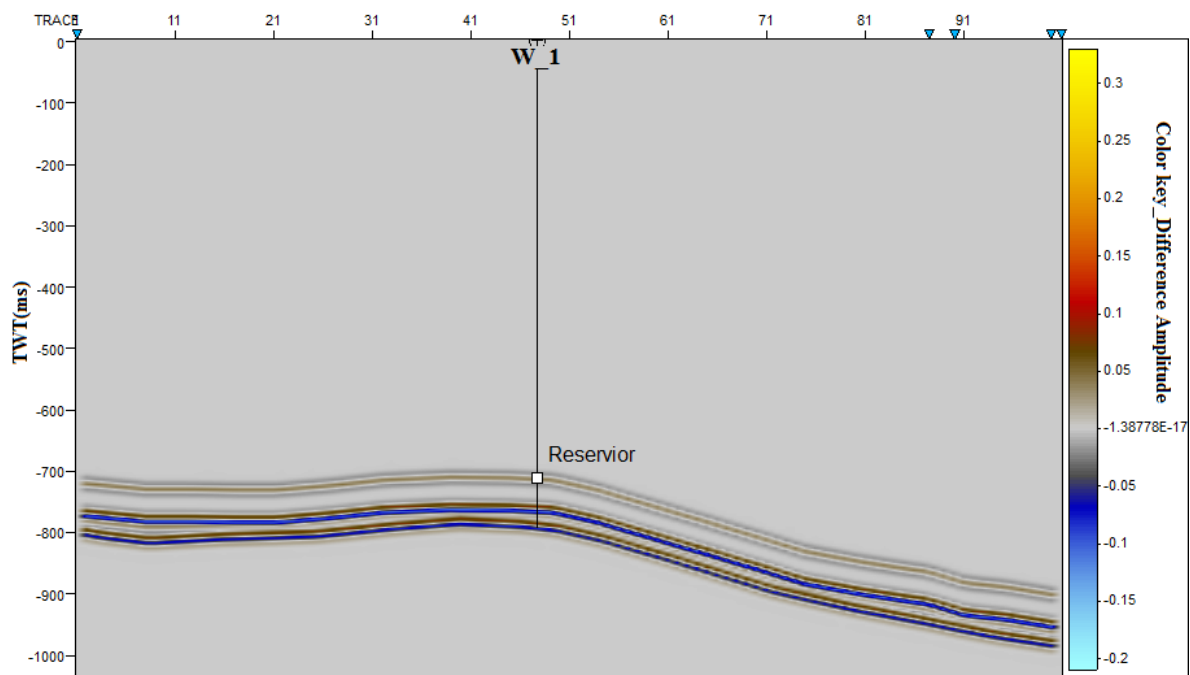


شکل (۵-۱۳): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع-شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

شکل (۵-۱۴) مربوط به نتایج مدل سازی پیشرو لرزه ای برای مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A می باشد. شکل (۵-۱۵)، مربوط به تفاضل بین دامنه مدل لرزه ای مصنوعی شکل (۵-۹) در شرایط برجا و شکل (۵-۱۴) در شرایط بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A را نشان می دهد. به دلیل کاهش مقاومت صوتی در بخش مخزنی و همچنین افزایش زمان سیر موج لرزه ای در لایه های زیرین مخزن، مقدار دامنه در هر دو بخش افزایش یافته است. تفاضل دامنه (شکل (۵-۱۵)) نیز، تغییرات دامنه بعد از جانشینی سیال در این دو بخش را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۴): مقطع لرزه ای مصنوعی ساخته شده مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.



شکل (۵-۱۵): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتر-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.

بر اساس نتایج حاصل از بخش مدل‌سازی لرزه‌ای می‌توان نتیجه گرفت زمانی که میزان تولید نفت از مخزن به مقدار ۱۵ درصد حجم برجای آن برسد، در صورتیکه حداقل ۱۰ درصد گاز جانشین نفت شود، ضرایب بازتاب و دامنه سیگنال لرزه‌ای در بالای مخزن به دلیل کاهش سرعت موج تراکمی افزایش یافته و می‌توان مجدداً از میدان برداشت لرزه‌ای انجام داد. البته این امکان در صورتی فراهم خواهد شد که توزیع سیال در مخزن بصورت همگن باشد. در غیر اینصورت اگر اشباع‌شدگی مخزن از نوع ناهمگن باشد، به ازای تولید بیشتری از نفت امکان مجدد برداشت لرزه‌ای از میدان فراهم خواهد شد و با این مقدار تولید تغییری در دامنه سیگنال لرزه‌ای ایجاد نمی‌شود. با فرض اینکه مدل گسمن به عنوان مدل فیزیک سنگ مناسب برای مخزن می‌باشد، از مقایسه شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۴) (همچنین شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۵)) این نتیجه حاصل می‌شود که تغییرات دامنه با استفاده از مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-

اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین بسیار مشابه مدل گسمن است. بنابراین این مدل می‌تواند به عنوان مدلی مناسب برای بررسی اثرات جانشینی سیال در این میدان در نظر گرفته شود.

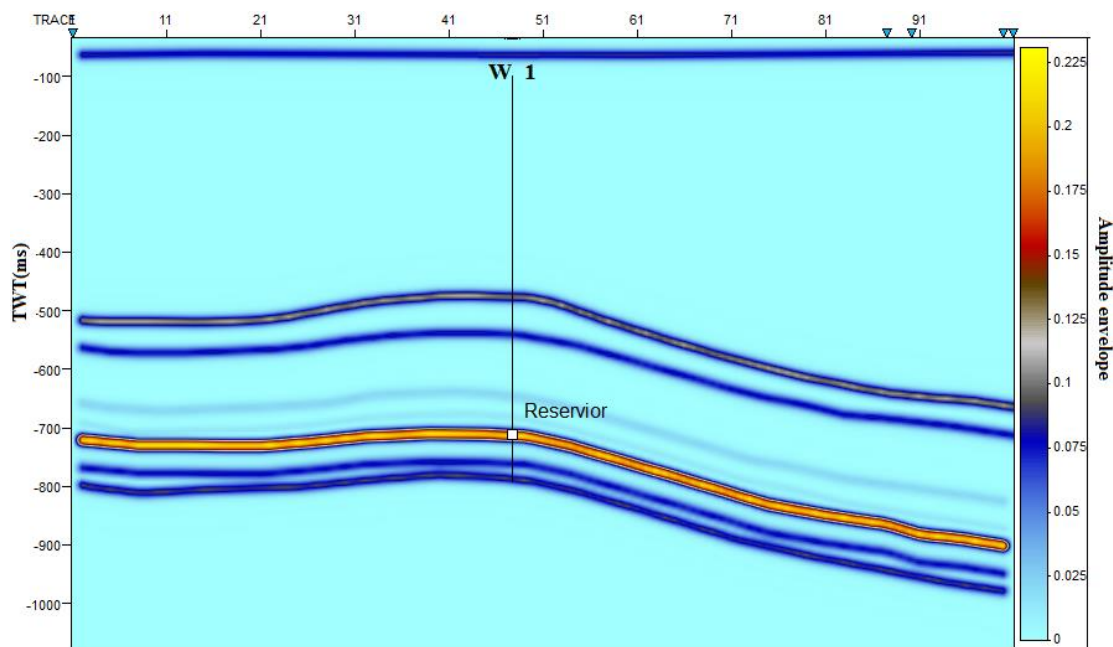
۵-۸ استفاده از نشانگرها

به منظور انتخاب نشانگرهای مناسب برای شناسایی جانشینی سیال، از برخی نشانگرهای دامنه مانند نشانگرهای پوش دامنه، مشتق اول زمانی پوش دامنه، مشتق دوم زمانی پوش دامنه، دامنه لحظه‌ای تربیعی و نرمی استفاده شده است. برای اختصار و با توجه به نتایج حاصل از بخش قبل، نشانگرهای لرزه‌ای فقط برای چاه W-1 و سناریو A، بر روی مدل‌های لرزه‌ای مصنوعی اعمال شده است.

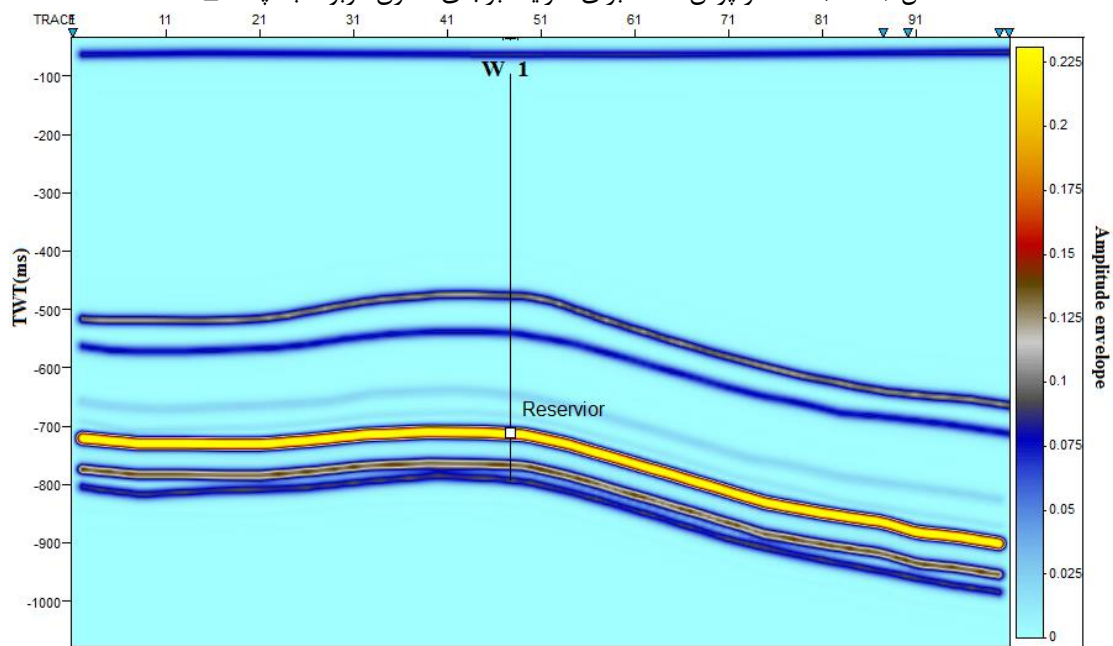
۵-۸-۱ نتایج مربوط به نشانگر پوش دامنه

از جمله نشانگرهای مناسبی که برای بازتاب‌پذیری و شناسایی لکه‌های روشن مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشانگر پوش دامنه است. این نشانگر نشان‌دهنده انرژی لحظه‌ای ردلرزه و متناسب با مقدار دامنه حاصل از ضریب بازتاب می‌باشد. همانطور که در شکل (۵-۱۶) مشاهده می‌شود، این نشانگر مقدار پوش دامنه را در بخش مخزنی بیشتر از سایر لایه‌ها نشان می‌دهد. از مقایسه شکل (۵-۱۶) و شکل (۵-۱۷) که مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی یکنواخت و سناریو A می‌باشد، مشاهده می‌شود که در شکل (۵-۱۷) مقدار پوش دامنه بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. همچنین لایه‌هایی که در زیر مخزن قرار گرفته‌اند، همانطور که قبلاً هم بررسی شد، در اثر جانشینی سیال مقدار پوش دامنه در آن‌ها افزایش یافته است. از مقایسه شکل (۵-۱۶) و (۵-۱۸) که مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که نشانگر پوش دامنه تغییراتی نشان نمی‌دهد. شکل (۵-۱۹)، نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A را نشان می‌دهد. تغییرات پوش دامنه در بخش مخزنی در این مدل نیز (در مقایسه با شکل (۵-۵)

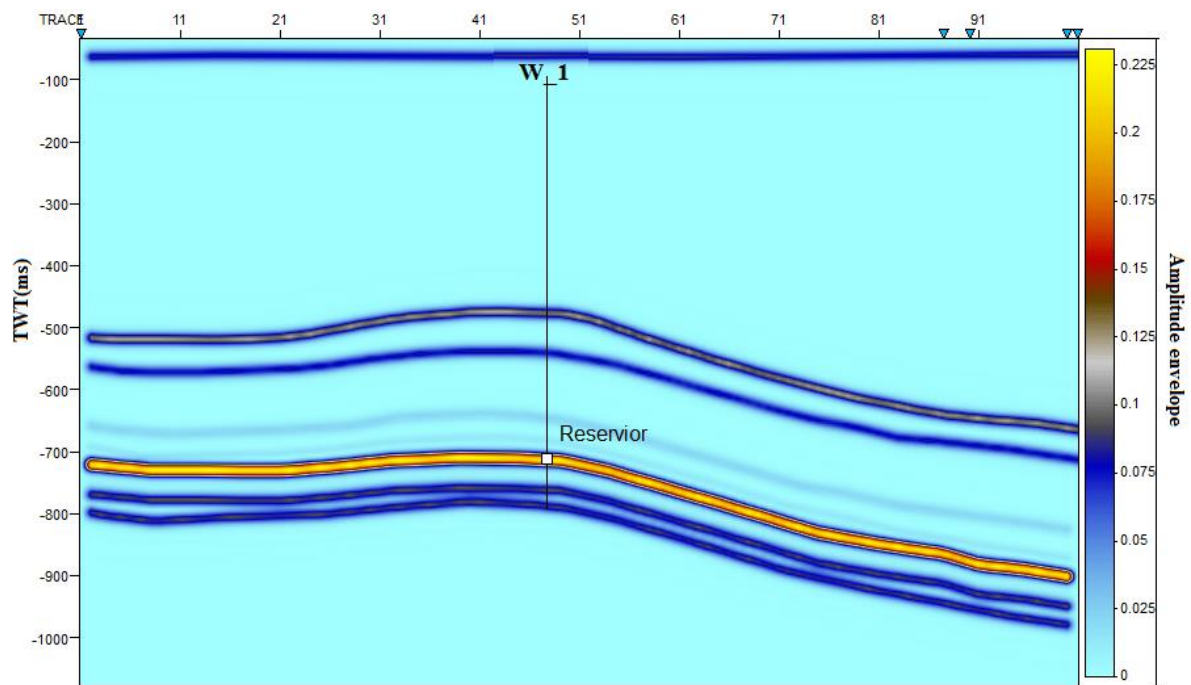
(۱۶) مشهود می‌باشد. همچنین مقایسه بین دو مدل گسمن در اشباع‌شدگی یکنواخت و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن، نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. بنابراین این نشانگر برای بررسی اثرات جانشینی سیال مناسب می‌باشد.



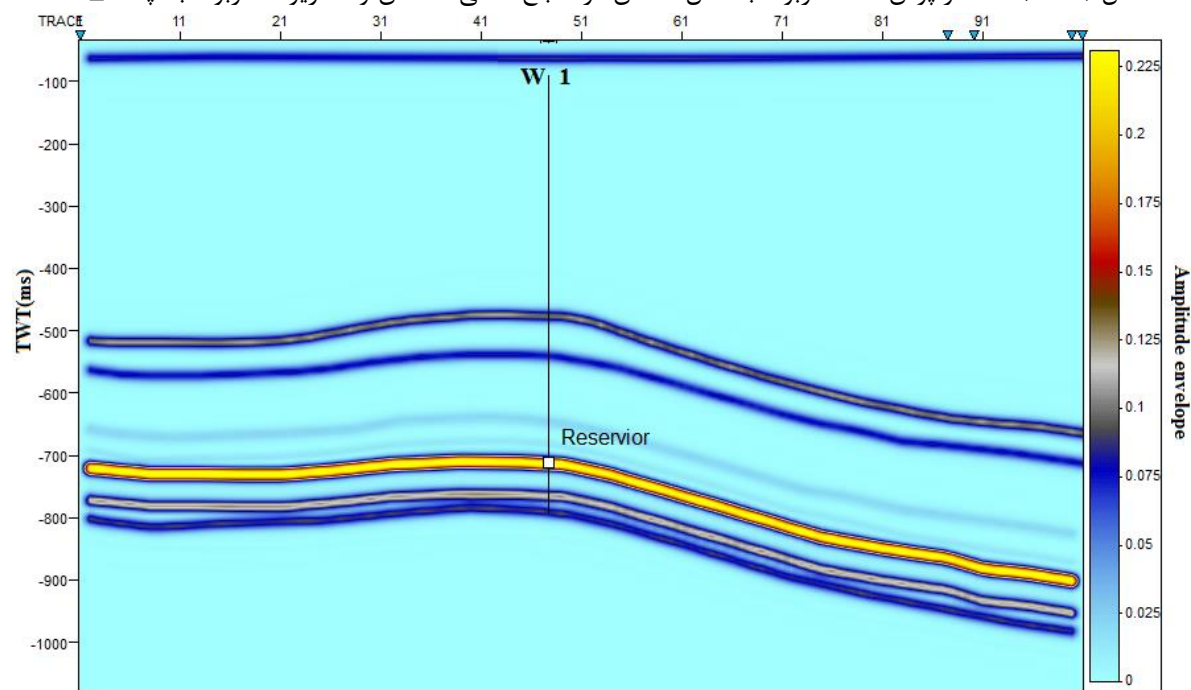
شکل (۵-۱۶): نشانگر پوش دامنه برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1



شکل (۵-۱۷): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.



شکل (۵-۱۸): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

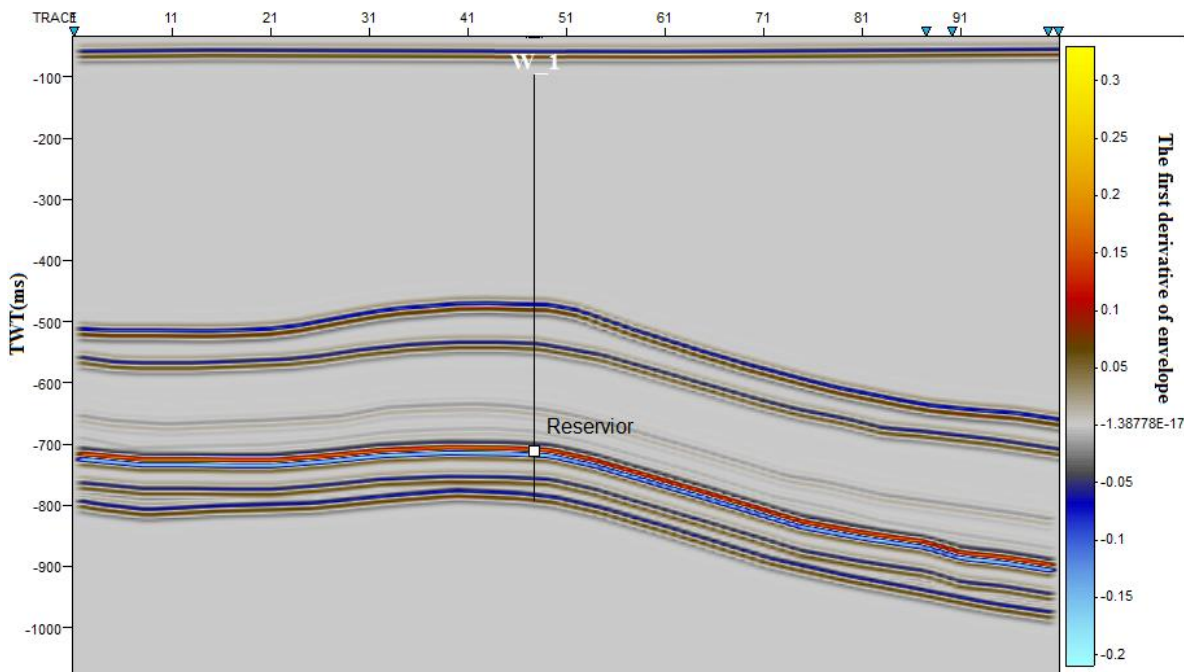


شکل (۵-۱۹): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.

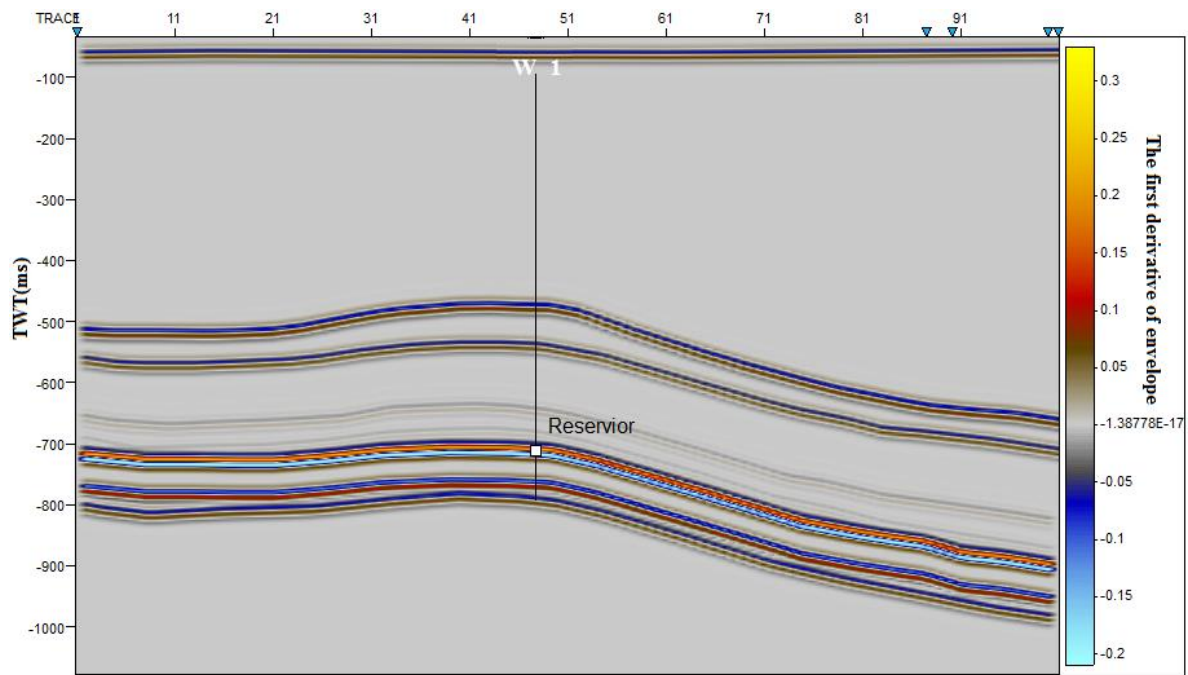
۵-۸-۲ نتایج مربوط به نشانگرهای مشتق اول زمانی پوش دامنه، مشتق دوم زمانی پوش دامنه و دامنه

لحظه‌ای تریبیعی

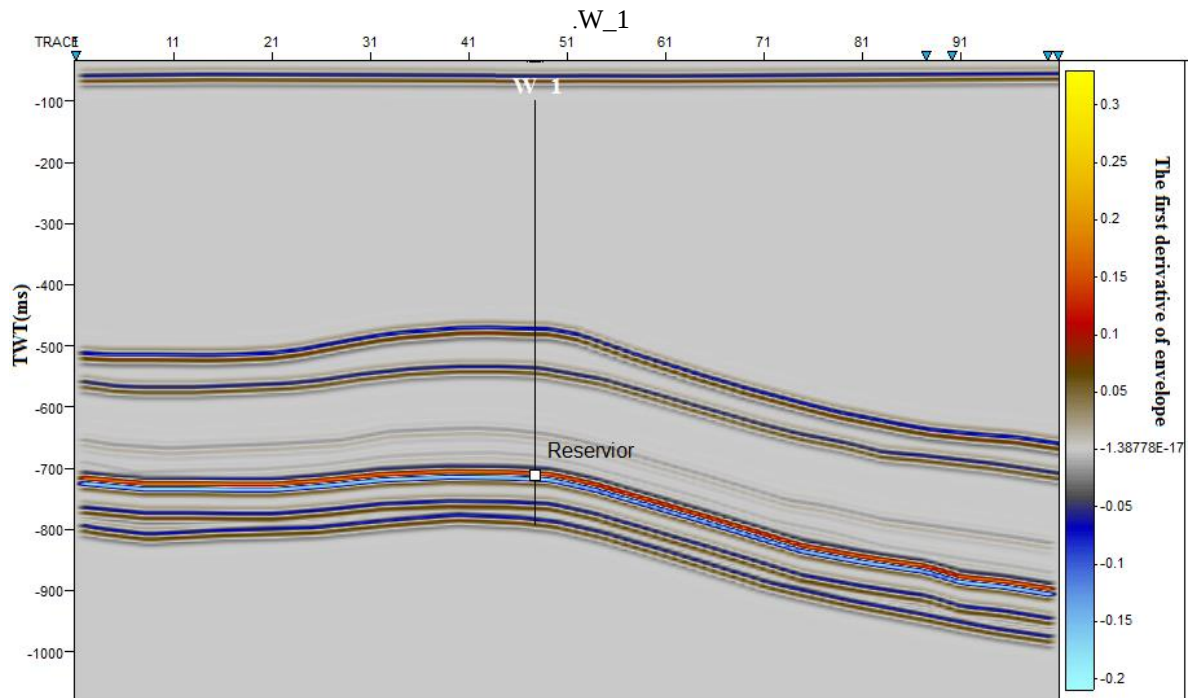
مشتق اول زمانی پوش دامنه، تغییر در بازتاب‌پذیری به دلیل جذب انرژی در بخش مخزنی را نشان می‌دهد. از مقایسه شکل (۵-۲۰) مربوط به شرایط برجای مخزن با شکل‌های (۵-۲۱) و (۵-۲۳) که به ترتیب مربوط به مدل گسمن با اشباع‌شدگی یکنواخت و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین می‌باشند، جذب انرژی ناشی از حضور گاز هم در بخش مخزنی و هم در لایه‌هایی که در اعماق پایین‌تر از مخزن قرار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود. مقایسه شکل (۵-۲۰) و شکل (۵-۲۲) که مربوط به مدل گسمن با اشباع‌شدگی ناهمگن است، به دلیل اینکه حضور گاز تغییر زیادی در مقاومت صوتی و در نتیجه بازتاب‌پذیری ایجاد نکرده است، مقدار جذب انرژی بسیار جزئی خواهد بود و این نشانگر نیز تغییراتی را نشان نمی‌دهد.



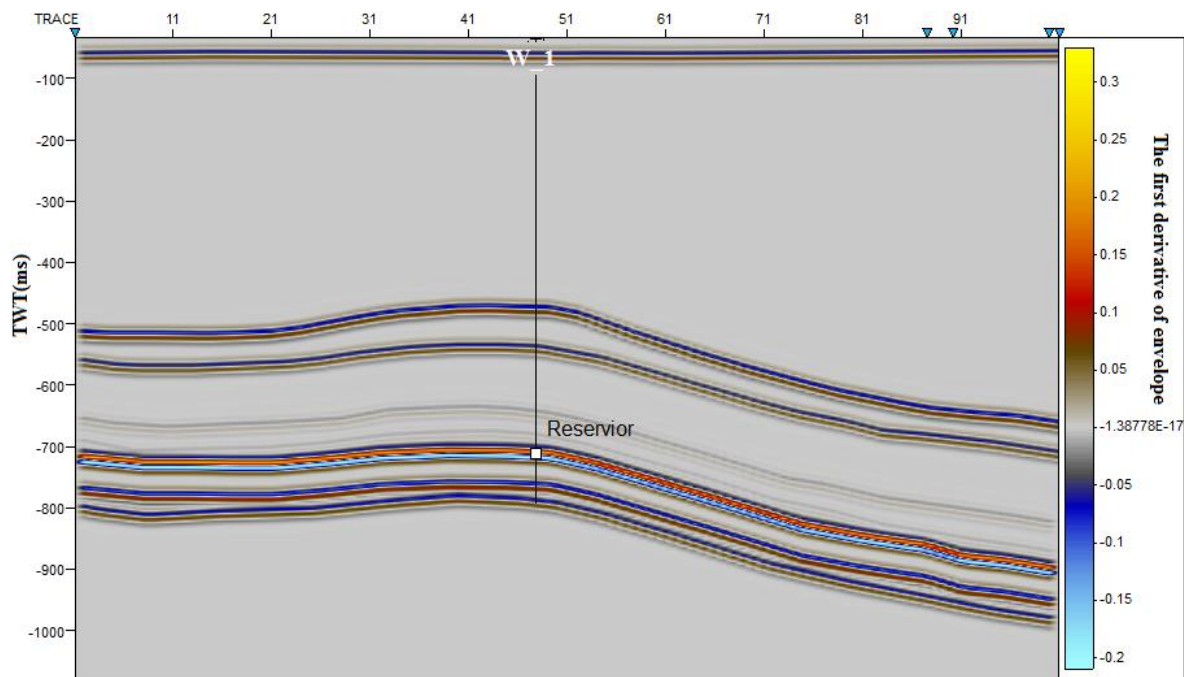
شکل (۵-۲۰): نشانگر مشتق اول زمانی پوش برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1.



شکل (۵-۲۱): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه

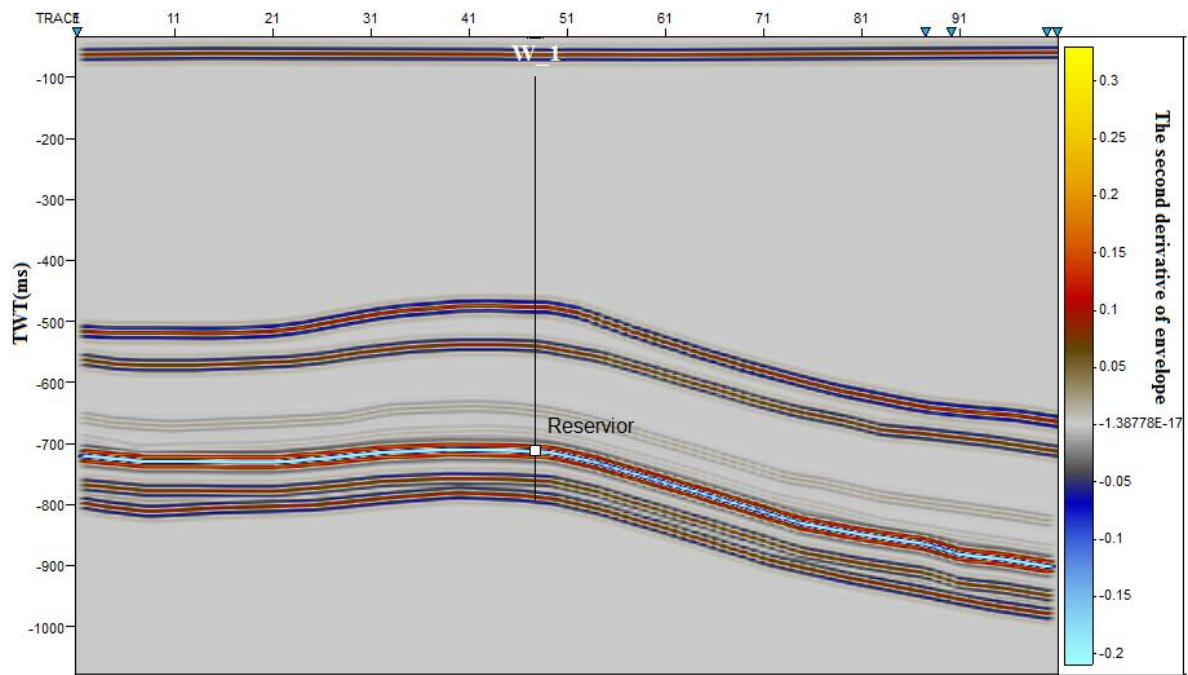


شکل (۵-۲۲): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه

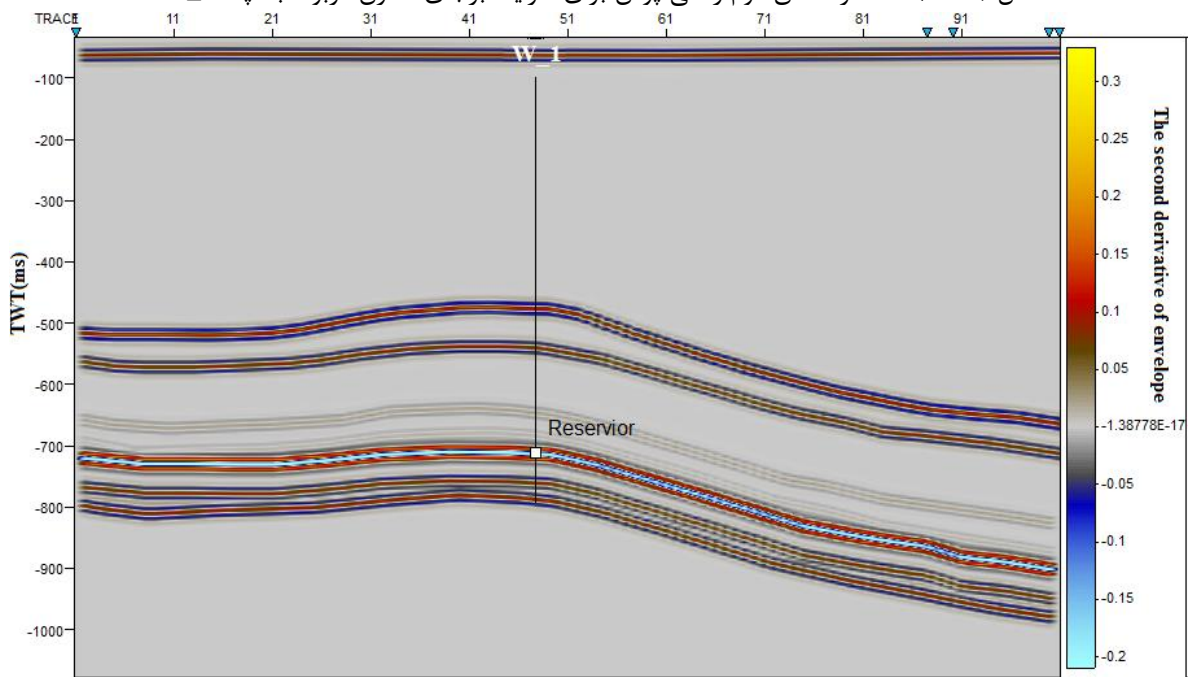


شکل (۵-۲۳): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.

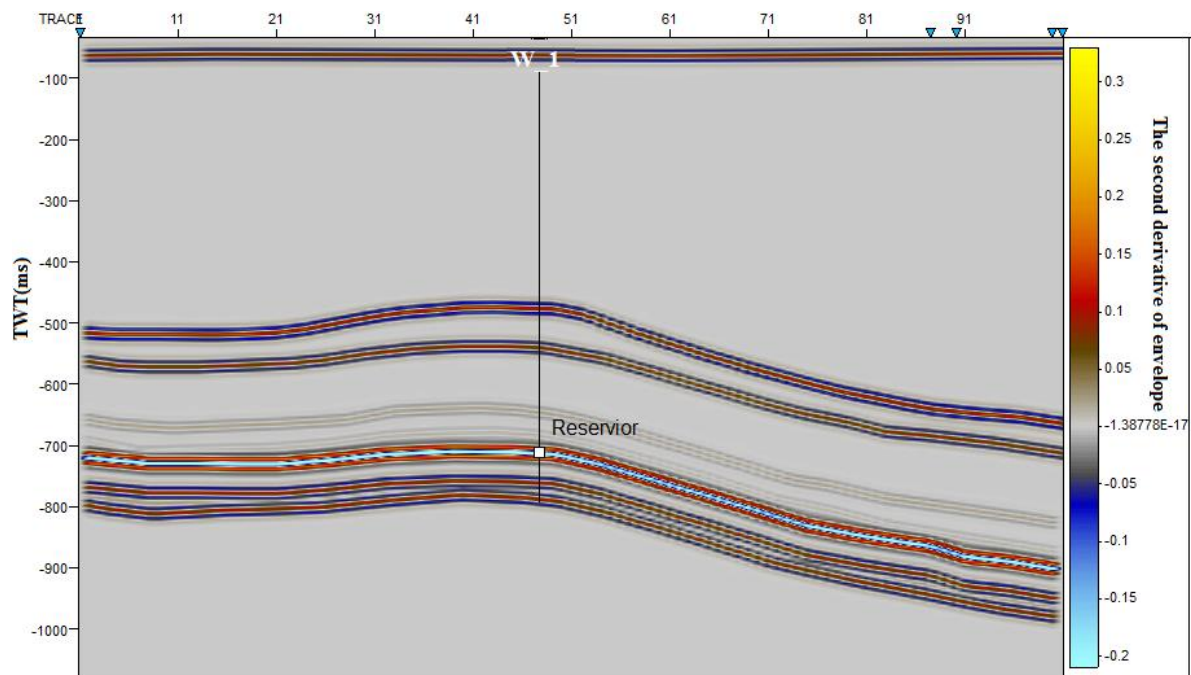
نشانگر مشتق دوم زمانی پوش دامنه، تغییرات ناشی از جانشینی سیال را در شکل‌های (۵-۲۵) و (۵-۲۷)، که به ترتیب مربوط به مدل گسمن با اشباع‌شدگی یکنواخت و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین می‌باشند، در مقایسه با شرایط برجا (شکل (۵-۲۴)) در بخش مخزنی به‌خوبی نشان می‌دهد. این نشانگر نیز تغییراتی در مدل اشباع‌شدگی تکه‌ای که در شکل (۵-۲۶) آورده شده است، نشان نمی‌دهد.



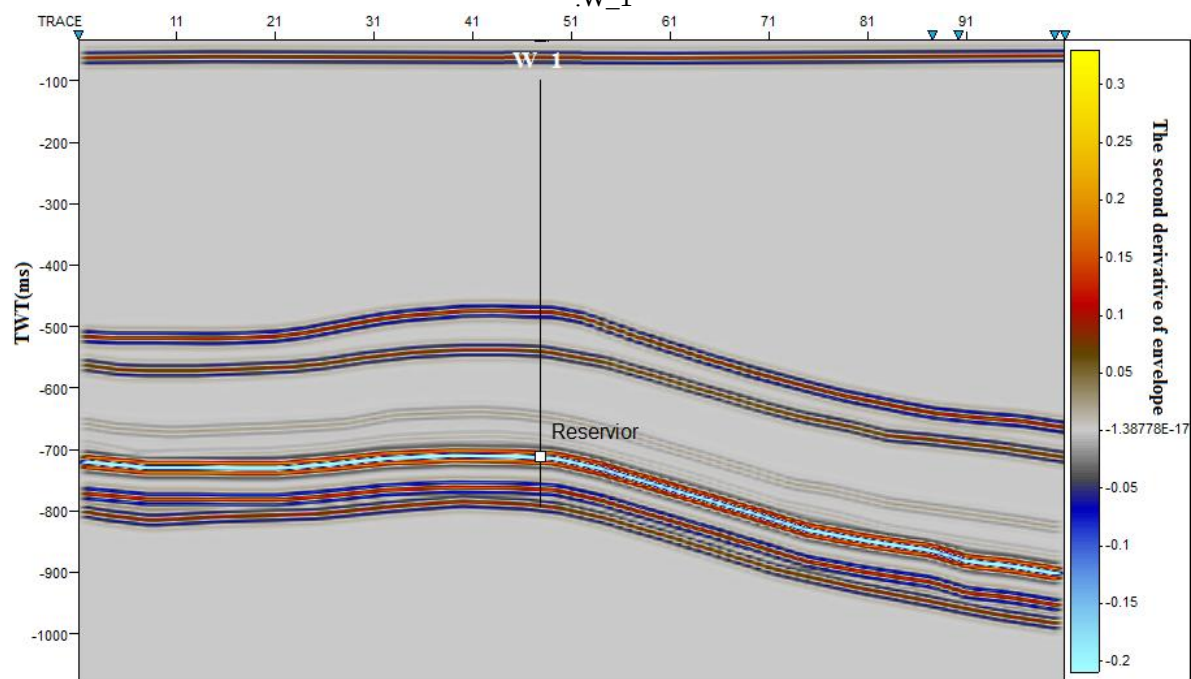
شکل (۲۴-۵): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1.



شکل (۲۵-۵): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

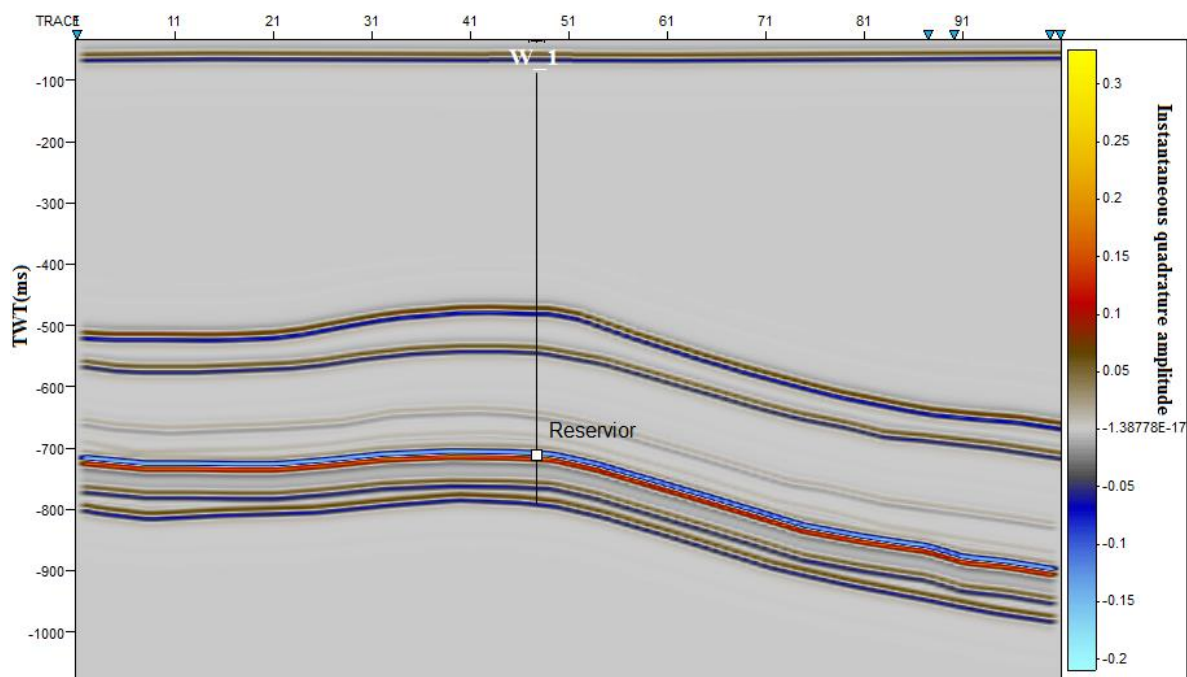


شکل (۵-۲۶): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.

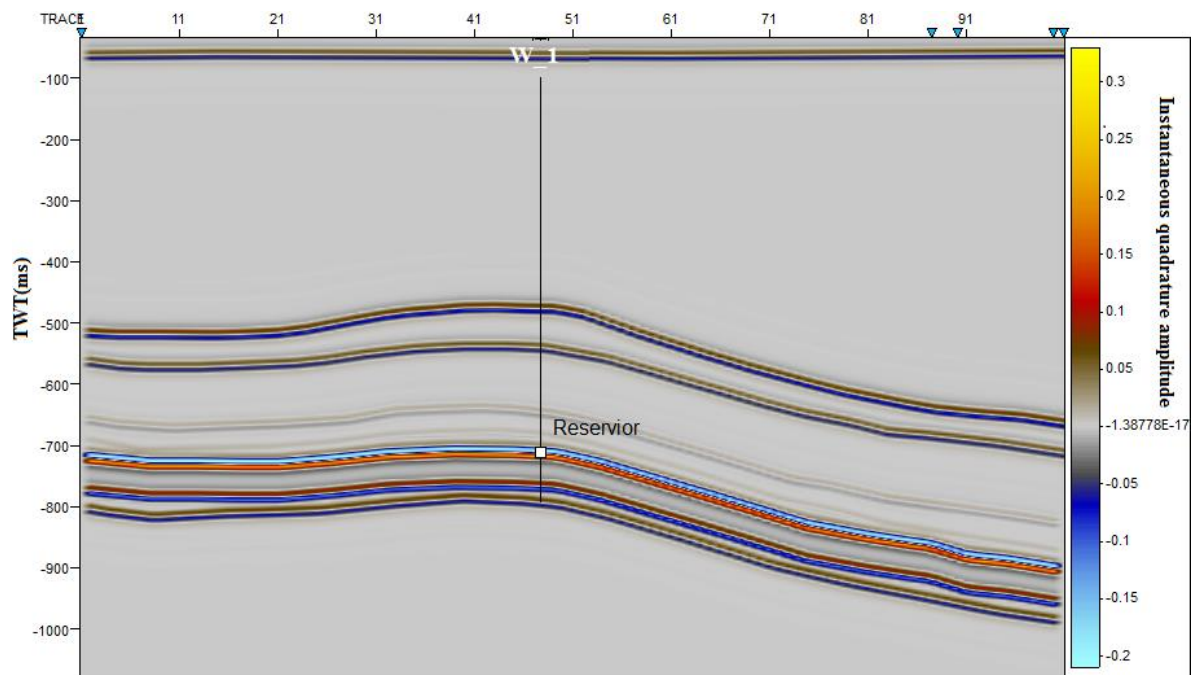


شکل (۵-۲۷): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.

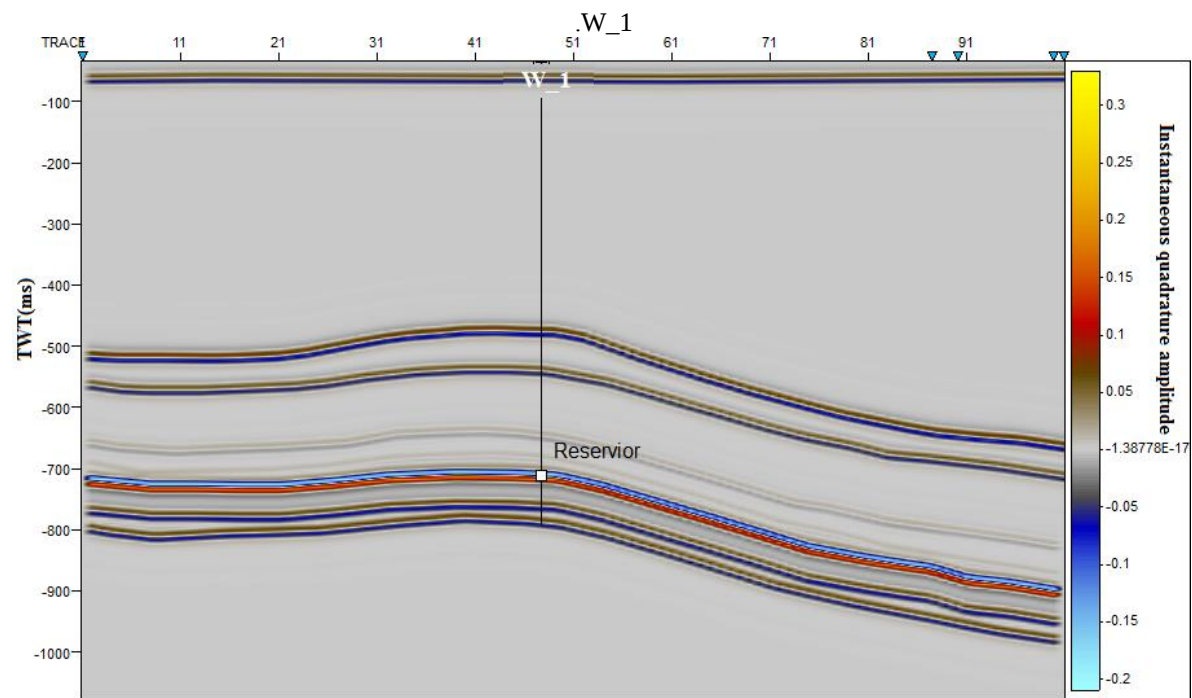
نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی که از چرخش فاز -90° درجه بر روی ردلرزه ورودی حاصل شده است، برای شرایط برجا در شکل (۵-۲۸) نشان داده شده است. در اثر جانشینی سیال هم در بخش مخزنی و هم در لایه‌های زیرین مخزن، مقدار این نشانگر افزایش یافته است که در شکل‌های (۵-۲۹) و (۵-۳۱)، که به ترتیب مربوط به مدل گسمن با اشباع‌شدگی یکنواخت و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین می‌باشد، مشاهده می‌شود. در شکل (۵-۳۰) که مربوط به اشباع‌شدگی ناهمگن است، این نشانگر تغییراتی را در اثر جانشینی سیال از خود نشان نمی‌دهد. هر سه نشانگر مشتق اول زمانی پوش دامنه، مشتق دوم زمانی پوش دامنه و نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی تغییرات سیال را نسبت به نشانگر پوش دامنه با قدرت کمتری نشان می‌دهند.



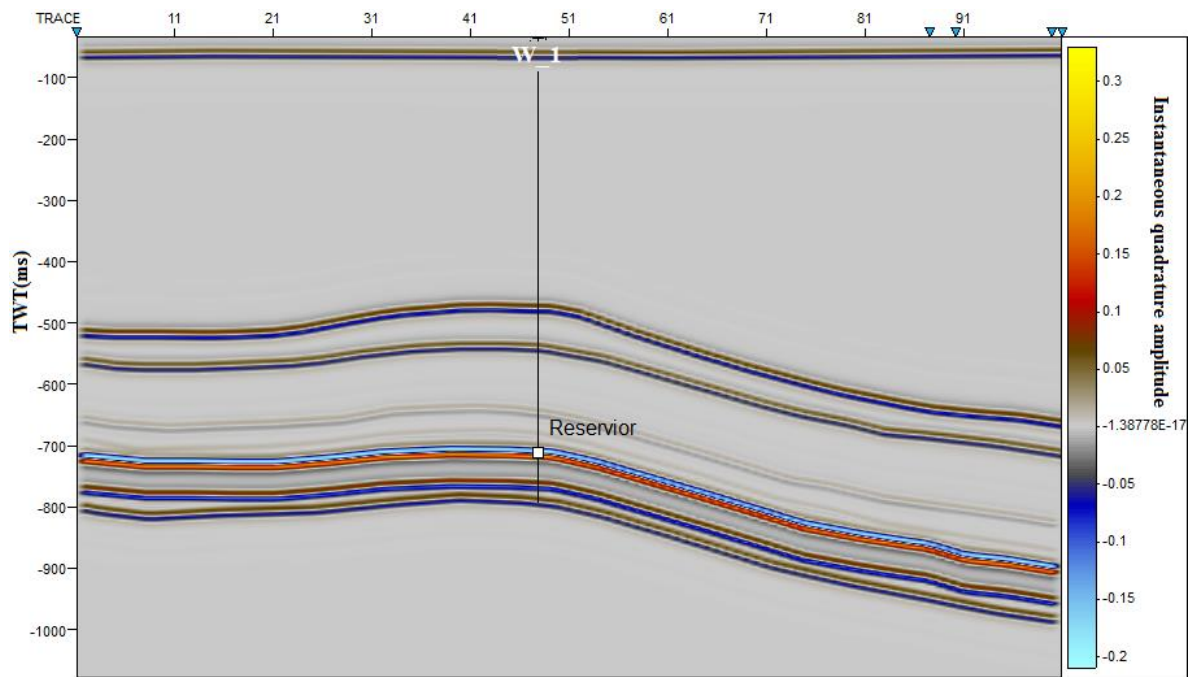
شکل (۵-۲۸): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی برای شرایط برجا در مخزن مربوط به چاه W_1.



شکل (۵-۲۹): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه



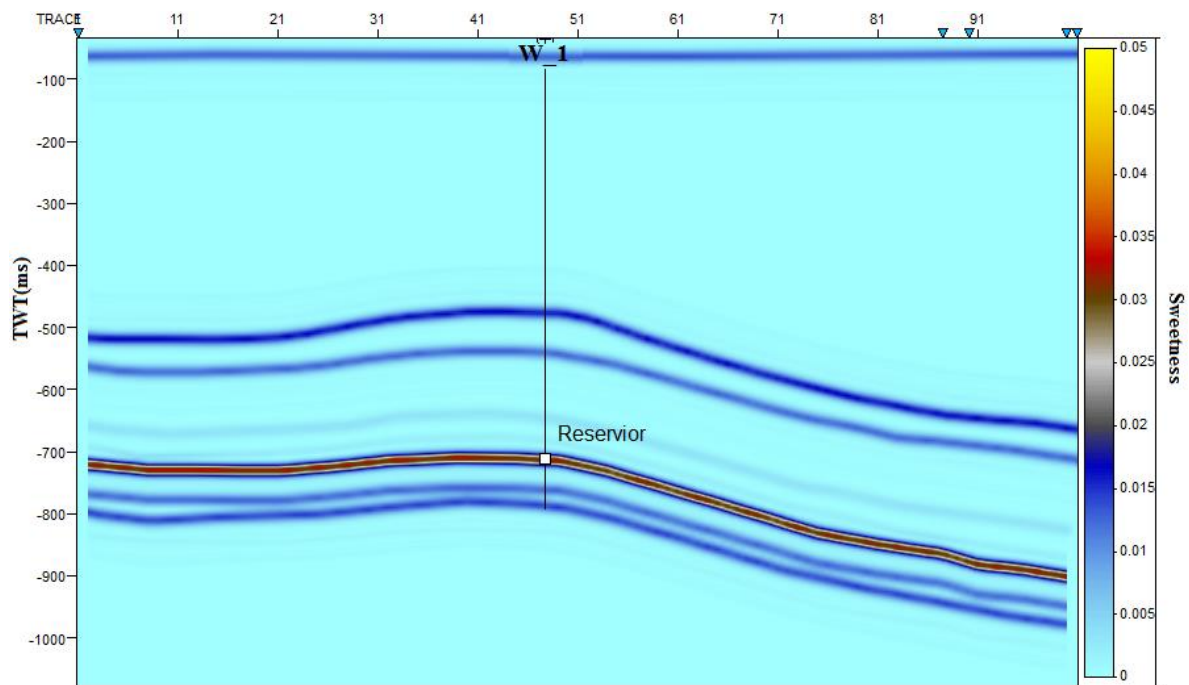
شکل (۵-۳۰): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1



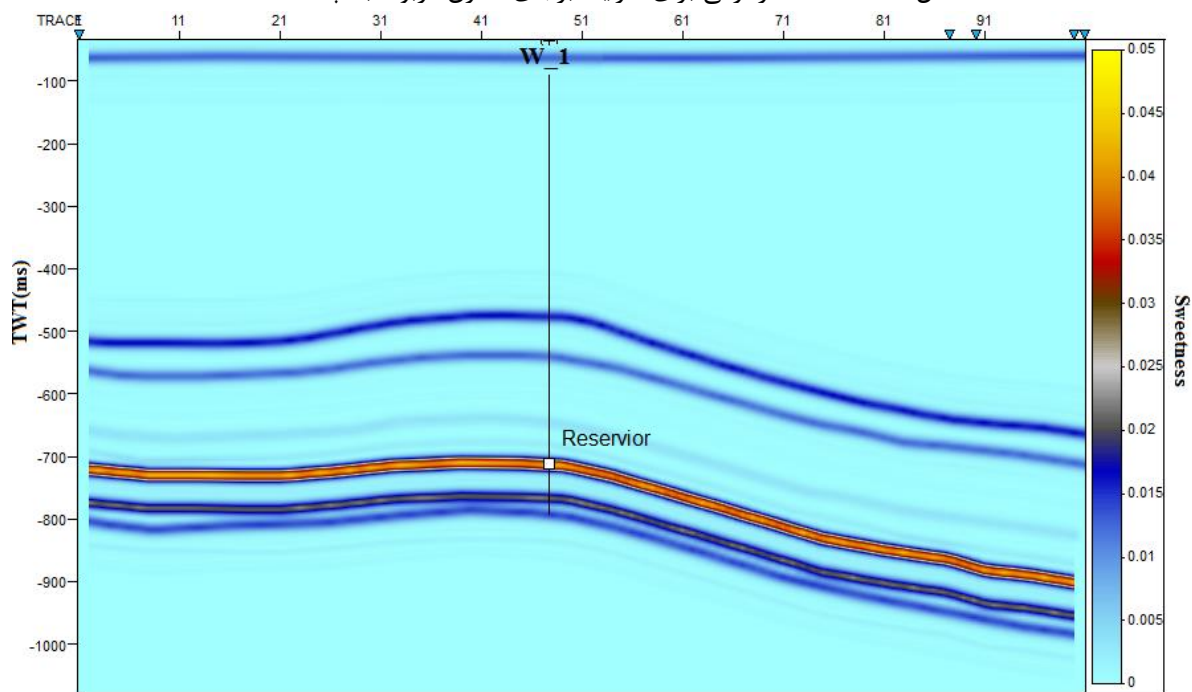
شکل (۵-۳۱): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.

۵-۸-۳ نتایج مربوط به نشانگر نرمی

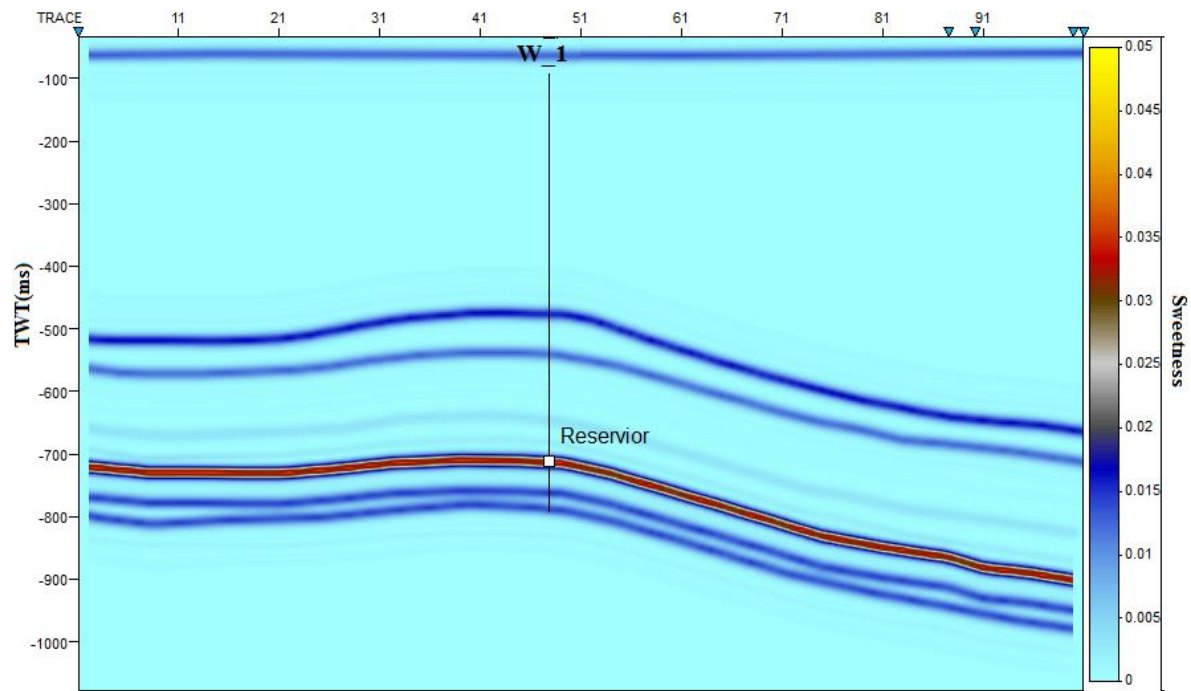
این نشانگر شدت بازتاب‌پذیری در بخش مخزنی را به دلیل حضور گاز به خوبی نشان می‌دهد. از مقایسه شکل (۵-۳۲)، که مربوط به شرایط برجای مخزن می‌باشد، با شکل‌های (۵-۳۳) و (۵-۳۵)، که به ترتیب مربوط به مدل گسمن با اشباع‌شدگی یکنواخت و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین می‌باشند، نشانگر نرمی هم در بخش مخزنی و هم در لایه‌هایی که در بخش زیرین مخزن قرار گرفته‌اند افزایش یافته است. مقایسه شکل‌های (۵-۳۲) و (۵-۳۴)، که مربوط به مدل گسمن با اشباع‌شدگی ناهمگن است، به دلیل افزایش نیافتن دامنه و شدت بازتاب‌پذیری، تغییراتی در نشانگر نرمی نشان نمی‌دهند.



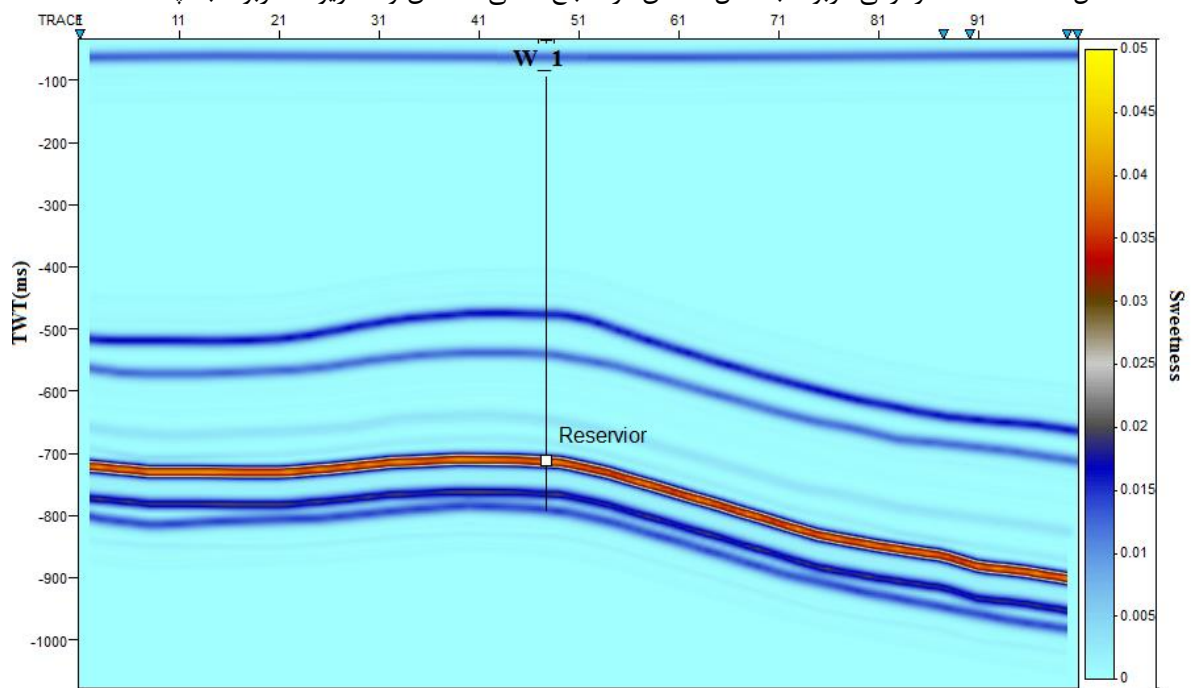
شکل (۳۲-۵): نشانگر نرمی برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_1.



شکل (۳۳-۵): نشانگر نرمی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.



شکل (۵-۳۴): نشانگر نرمی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_1.



شکل (۵-۳۵): نشانگر نرمی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_1.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری

در این مطالعه که به منظور انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای به تغییرات سیال در یکی از مخازن نفتی واقع در خلیج فارس صوت گرفته است، نتایج زیر حاصل شد:

- به دلیل اینکه زمان گذر موج برشی در سه چاه W_1 ، W_2 و W_9 میدان مورد مطالعه اندازه‌گیری نشده است، با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و روش‌های تجربی گرینبرگ-کاستاگنا (۱۹۹۲) و بروچر (۲۰۰۵، ۲۰۰۸)، سرعت موج برشی در چاه W_7 که زمان گذر موج برشی اندازه‌گیری شده است، تخمین زده شد. مقدار ضریب تعیین بین سرعت موج برشی در چاه W_7 و سرعت‌های تخمین زده شده با روش رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی، گرینبرگ-کاستاگنا قبل از بهبود رابطه، گرینبرگ-کاستاگنا بعد از بهبود رابطه و بروچر به ترتیب برابر با ۰/۵۱۴۶، ۰/۵۶۰۱، ۰/۵۲۷۳، ۰/۵۴۴۹ و ۰/۵۰۸۲ می‌باشد. مقدار میانگین مربعات خطا نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۴۹، ۰/۰۴۴، ۰/۱۱۷، ۰/۰۴۹ و ۰/۰۰۷ است. از اینرو روش انتخاب شده برای تخمین سرعت موج برشی با توجه به ضریب تعیین و خطا، رگرسیون غیرخطی می‌باشد.

- در چاه‌های W_1 ، W_2 و W_9 با استفاده از رابطه (۲-۲۵) که مستقل از سرعت موج برشی و مدول حجمی سنگ خشک می‌باشد و رابطه متداول گسمن که وابسته به مدول حجمی سنگ خشک و سرعت موج برشی است، مدول موج تراکمی برای حالت ۲۰ درصد گاز و ۸۰ درصد آب محاسبه گردید. اختلاف بسیار کم و ناچیز مدول موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از این دو روش نشان می‌دهد که سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون غیرخطی در چاه W_7 ، برای سایر چاه‌ها مناسب می‌باشد.

- با توجه به گزارشات زمین‌شناسی، مخزن مورد نظر با فشار موثر ۹/۵۱ مگاپاسکال از تحکیم‌یافتگی ضعیفی برخوردار است و دارای سیمان‌شدگی جزئی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از سه مدل گسمن

(محاسبه مدول سنگ خشک با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی)، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و مدل دیوورکین-نور که برای چاه‌های W_1 ، W_2 و W_9 انجام شده است، هر سه مدل تقریباً نتایج مشابهی ارائه می‌دهند.

- برای جانشینی سیال از دو مدل گسمن و میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین استفاده شده است. دلیل انتخاب این است که مدل گسمن بطور رایجی در صنعت برای جانشین سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین که نسبت به مدل دیوورکین-نور هر دو شرایط سیمانی‌بودن و غیرسیمانی‌بودن را در نظر می‌گیرد، مناسب می‌باشد. از طرفی در صورت محاسبه اشتباه هریک از پارامترهای تخلخل، خواص ماتریکس، سرعت، خواص سیال و اشباع‌شدگی خطای تجمعی حاصل از این پارامترها ممکن است منجر به محاسبه اشتباه مدول حجمی خشک سنگ با استفاده از رابطه گسمن شود؛ بنابراین از هر دو مدل برای مدل‌سازی لرزه‌ای استفاده شده است.
- در صد تغییرات سرعت موج تراکمی در اثر جانشینی سیال در مدل گسمن با اشباع‌شدگی یکنواخت در هر دو چاه تولیدی W_1 و W_2 و در هر دو سناریو A و B بیش از ۱۰ درصد می‌باشد. در حالیکه این تغییرات در اشباع‌شدگی ناهمگن کمتر از یک درصد است. بنابراین در صورتیکه اشباع‌شدگی مخزن از نوع ناهمگن باشد، انتظار می‌رود در اثر جانشینی سیال تغییرات سرعت موج تراکمی مشاهده نشود. ولی این تغییرات در اشباع‌شدگی همگن مشهود است.
- مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین نیز در اثر جانشینی سیال تغییرات سرعت موج تراکمی را در هر دو چاه W_1 و W_2 و در هر دو سناریو A و B بیش از ۷ درصد نشان می‌دهند.

- مقادیر ضرایب تعیین بین سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل گسمن و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین بعد از جانشینی سیال در دو چاه W_1 و W_2 به ترتیب برابر با ۰/۸۲۵ و ۰/۶۹۶ می باشد. همچنین مقادیر میانگین مربعات خطا در این دو چاه نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۸۹ و ۰/۱۱۳ است. بنابراین مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین، مدل مناسبی برای این مخزن می باشد.
- تغییرات بین سناریوهای A و B در مدل گسمن با اشباع‌شدگی همگن و مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین کمتر از یک درصد می باشد و علت این امر را می توان اینگونه توجیه کرد که تغییرات سرعت موج تراکمی در اثر افزایش بیش از ۱۰ درصد گاز بسیار کم است و بیشترین مقدار افت سرعت موج تراکمی با افزایش ۱۰ درصد گاز می باشد، در نتیجه تغییرات بین دو سناریو بسیار ناچیز خواهد بود.
- با استفاده از نگار چاه و مقطع لرزه‌ای، موجک لرزه‌ای با ضریب همبستگی ۹۰ درصد با استفاده از دو چاه W_1 و W_2 تخمین زده شد. از موجک لرزه‌ای تخمین زده شده برای مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی پیشرو لرزه‌ای نشان می‌دهد که تغییرات دامنه در اشباع-شدگی ناهمگن به دلیل تغییرات ناچیز سرعت در اثر جانشینی سیال، هم در بخش مخزنی و هم در اعماق پایین‌تر بسیار کم است، اما در اشباع‌شدگی همگن با استفاده از رابطه گسمن و همچنین مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین، این تغییرات بصورت بارزی مشاهده می‌شود.
- بر اساس نتایج حاصل از بخش مدل‌سازی لرزه‌ای می‌توان نتیجه گرفت زمانی که میزان تولید نفت از مخزن به مقدار ۱۵ درصد حجم برجای آن برسد، در صورتیکه حداقل ۱۰ درصد گاز جانشین نفت شود،

ضرایب بازتاب و دامنه سیگنال لرزه‌ای در بالای مخزن به دلیل کاهش سرعت موج تراکمی افزایش یافته و می‌توان مجدداً از میدان برداشت لرزه‌ای انجام داد. البته این امکان در صورتی فراهم خواهد شد که توزیع سیال در مخزن بصورت همگن باشد. در غیر اینصورت اگر اشباع‌شدگی مخزن از نوع ناهمگن باشد، به ازای تولید بیشتری از نفت امکان مجدد برداشت لرزه‌ای از میدان فراهم خواهد شد و با این مقدار تولید تغییری در دامنه سیگنال لرزه‌ای ایجاد نخواهد شد.

- نتایج حاصل از نشانگرهای لرزه‌ای برای شناسایی جانشینی سیال نشان می‌دهد که از بین نشانگرهای پوش دامنه، مشتق اول زمانی پوش دامنه، مشتق دوم زمانی پوش دامنه، دامنه لحظه‌ای تربیعی و نرمی، دو نشانگر پوش دامنه لرزه‌ای و نرمی تغییرات حاصل از جانشینی سیال را بهتر نشان می‌دهند.

۶-۲ پیشنهادات

- از جمله عواملی که در تخمین صحیح مدل گسمن بسیار تاثیرگذار است، می‌توان به مدول حجمی ماتریکس سنگ اشاره کرد. در صورت تهیه مقاطع نازک و انجام مطالعات XRD می‌توان درصد و نوع کانی‌ها را با دقت بیشتری در محاسبات لحاظ کرد و نتایج را بهبود داد.
- بهتر است در صورت دسترسی به مقدار تولید نفت و همچنین انجام مطالعه چهار بعدی از میدان، مدل‌سازی فیزیک سنگ و مدل‌سازی لرزه‌ای برای شرایط واقعی انجام شود و نتایج حاصل از آن با نتایج مطالعه چهار بعدی به منظور اعتبارسنجی مقایسه گردد. در اینصورت نوع اشباع‌شدگی مخزن نیز به لحاظ همگن و یا ناهمگن بودن مشخص خواهد شد.
- پیشنهاد می‌شود بعد از برداشت مجدد داده لرزه‌ای در فواصل زمانی مختلف، بر روی داده‌های لرزه‌ای دو بعدی مربوط به امتداد پروفیل بررسی شده، به طور همزمان وارون‌سازی لرزه‌ای انجام شود و نتایج حاصل از آن با نتایج وارن‌سازی لرزه‌ای مربوط به شرایط فعلی، مقایسه گردد. با این کار تاثیرات ناشی

از جانشینی سیال بر روی خواص الاستیسیته سنگ، با استفاده از تغییرات مربوط به مقاومت صوتی آنها در بازه مخزنی بررسی می‌شود.

منابع

خسروی، م.، امینی، ن.، غلامی، ع.، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد، "بهینه‌سازی عملکرد شرایط کرانه‌های جاذب در حل تفاضل متناهی معادله موج آکوستیک در حیطه فرکانس"، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

قلاوند، ه.، پولادزاده، م.، مهدیپور، ض.، ارزانی، ع.، (۱۳۸۸)، کاربرد لرزه‌نگاری در توسعه مخازن هیدروکربوری، **اکتشاف و تولید**، شماره ۵۹، دوره ۲۳، ص ۲۰-۲۳.

- Alaei, B., (2012). Seismic Modeling of Complex Geological Structures, *Seismic Waves - Research and Analysis*, 218-225.
- Alimoradi, A., Moradzadeh, A., and Bakhtiari, M., (2014). Improved Gassmann Velocity Equation to Determine the Effect of Pores Sizes in Carbonate Reservoirs Characterization. *Universal Journal of Geoscience*, 2, 6, 161-171.
- Amir, A., (2011), PhD, Thesis, "Correlations between the effective permeability and seismic anisotropy of fractured reservoirs", Department of Earth Science, University of Bergen, Norway.
- Anderson, N., and Cardimona, S., (2002). "Forward seismic modeling: The key to understand reflection seismic and ground penetrating radar (GPR) techniques". The 2nd Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, California, USA.
- Avseth, P.A., Mukerji, T., and Mavko, G. (2005). Quantitative seismic interpretation: Applying Rock Physics Tool to Reduce interpretation Risk (First Edition). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Barnes, A.E., (2007). A tutorial on complex seismic trace analysis, *Geophysics*, 6, 72, 33-43.
- Barnes. A.E., (2001). Seismic attributes in your facies, *CSEG*, 41-47.
- Batzle, M., and Wang, Z., (1992). Seismic properties of pore fluids. *Geophysics*, 57, 1396-1408.
- Berryman, J. G., (1999). Origin of Gassmann's equations. *Geophysics*, 64, 1627-1629.
- Berryman, J. G., and Milton, G. W., (1991). Exact results for generalized Gassmann's equation in composite porous media with two constituents. *Geophysics*, 56, 1950-1960.
- Berryman, J.G., (1995). Mixture theories for rock properties, pp 205-228, In "*Rock Physics and Phase Relations: a Handbook of Physical Constants*". Ahrens, T.J. Washington, DC: American Geophysical Union.
- Brandt, H., (1955). A study of the speed of sound in porous granular media. *Appl. Mech*, 22, 479-486.
- Brie, A., (1995). Shear Sonic Interpretation in Gas-Bearing Sands. "SPE Annual Technioal Conferenoe", 701-710, Dallas, U.S.A.

- Brocher, T.M., (2005). Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the earth's crust. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 2081– 2092.
- Brocher, T.M., (2008). Key elements of regional seismic velocity models for long period ground motion simulations. *J. Seismol.* 12 (2), 217– 221.
- Carcione, J. M., Herman, G. C., and Kroode, P. E., (2002). Y2K Review Article Seismic Modeling. *Geophysics*, 67, 1304.1325.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L., and Eastwood, R.L., (1985). Relationship between compressional and shear wave velocities in silicate rocks, *Geophysics*, 50, 571–581.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., and Kan, T. K., (1993). Rock physics-the link between rock properties and AVO response, in Castagna, J. P. and Backus, M. M., Eds., Offsetdependent reflectivity—theory and practice of AVO analysis. *Society of Exploration Geophysicists (SEG)*, No 8, 131–171.
- Castagna, J.P., and Swan, H.W., (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 16, 337–342.
- Chi, X., and Han, D., (2009). Lithology and fluid differentiation using rock physics. . *The Leading Edge*, 1424-1428.
- Dewar, J., and Pickford, S., (2001). Rock Physics for the rest of US-an informal discussion, a core laboratories company, Calgary.
- Domenico, S. N., (1976). Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir, *Geophysics*, 41, 882-894.
- Dvorkin, J., and Nur, A., (1996). Elasticity of high-porosity sandstones: theory for two North Sea data sets. *Geophysics*, 5, 61, 1363–1370.
- Eid, R., Ziolkowski, A., Naylor, M., and Pickup, G., (2014). The detectability of free-phase migrating CO₂: A rock physics and seismic modelling feasibility study. *Energy Procedia*, 63, 4449 – 4458.
- Emre, A.F, (2005). M.S thesis, Reservoir characterization using intelligent seismic inversion, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University.
- Gassmann, F. (1951). Über die elastizität poröser medien. *Vier. der Natur: Gesellschaft in Zürich*, 96, 1–23.
- Graebner, R., and Wason, H. M., (1981). Three dimensional methods in seismic exploration: *Science*, 211, 535-540.
- Greenberg, M.L., and Castagna, J.P., (1992). Shear wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications, *Geophys.* 40, 195–209.
- GX Technology Corporation, Theory and Guide, (October 1998).
- Hamilton, E. L., (1956). Low sound velocities in high porosity sediments, *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 16–19.
- Hampson Russell Software Manual, (1999).

- Han, D., (1986), Ph.D. thesis, “Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments”, dissertation, Stanford University.
- Han, D., Batzle, M., (2004). Gassmann’s equation and fluid-saturation effects on seismic velocities, *Geophysics*, 2, 69, 398-405.
- Hardage, B. A., (1987), Seismic stratigraphy. Elsevier, Amsterdam, pp 432.
- Hashin, Z., Shtrikman, S., (1963). A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials, pp 127–140, In:”*The Rock Physics Handbook*”, 2, Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin. Cambridge University Press, USA.
- Hill, R., (1963). Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 11, 357–372.
- Huang, F., Juhlin, C., Kempka, T., Norden, B., and Zhang, F., (2015). Modeling 3D time-lapse seismic response induced by CO₂ by integrating borehole and 3D seismic data – A case study at the Ketzin pilot site, Germany. *Geophysics*, 36, 66-77.
- Kazemeini, H., Julin, C., and Fomel, S., (2010). Monitoring CO₂ response on surface seismic data; a rock physics and seismic modeling feasibility study at the CO₂ sequestration site, Ketzin, Germany. *Geophysics*, 71, 109-124.
- Krebs, E. S., (2004). Seismic forward modeling. *Geophysics (SEG)*, 28–39.
- Krief, M., Garat, J., Stellingwerff, J., and Ventre, J., (1990). A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform sonic). *The Log Analyst*, 31, 355-369.
- Landrø, M., (2011). Seismic Data Acquisition and Imaging. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Lee, M.W., (2008). Comparison of the Modified Biot-Gassmann Theory and the Kuster-Toksöz Theory in Predicting Elastic Velocities of Sediments, *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008–5196*, 14 p.
- Ma, Y., (2003). M.Sc. Thesis, “Reflectivity Seismic Modeling in Stratified Earth Models with Applications in Gas Hydrate Exploration”, Queen's University (Canada).
- Maleki, Sh., Moradzadeh, A., Ghavami Riabi, R., and Gholami, R., (2014). Prediction of shear wave velocity using empirical correlations and artificial intelligence methods, *Astronomy and Geophysics*, 3, 70-81.
- Mavko, G., Chan, C., and Mukerji, T., (1995). Fluid substitution: estimating changes in VP without knowing VS. *Geophysics*, 6, 60, 1750–1755.
- Mavko, G., and Mukerji, T., (1998). Bounds on low-frequency seismic velocities in partially saturated rocks. *Geophysics*, 3, 63, 918–924.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, (2009). :”*The Rock Physics Handbook*”, Cambridge University Press. pp 281-282.
- McCain, W. D., (1990). The Properties of petroleum fluids. PennWell Books.

- Milovac, J., (2009). M.Sc. Thesis, “Rock physics modeling of an unconsolidated sand reservoir“, Department of Earth and Atmospheric Sciences University of Houston.
- Mindlin, R.D., (1949). Compliance of elastic bodies in contact, pp 246-248, In:”*The Rock Physics Handbook*”, 2, Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin. Cambridge University Press, USA.
- Misaghi, A., Negahban, S., LandarØ, M., and Javaherian, A., (2010). A comparison of rock physics models for fluid substitution in carbonate rocks, *Geophysics*, 41, 146-154.
- Moatazedian I., Rahimpour-Bonab H., Kadkhodaie-Ilkhchi A., and Rajoli M.R., (2011). Prediction of shear and Compressional Wave Velocities from petrophysical data utilizing genetic algorithms technique: A case study in Hendijan and Abuzar fields located in Persian Gulf, *Journal of Geopersta*, 1,1,1-17.
- Nur, A., Mavko, G., Dvorkin, J., and Galmudi, D., (1998). Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks. *The Leading Edge*, 17, 357- 362.
- Paradigm, Rock and Fluid Canvas, Geolog.7.1, (2011).
- Petrel, Sesmic-to-simulation software, Schlumberger Public, (2009).
- Raymer, L.L., Hunt, E.R., and Gardner, J.S., (1980). An improved sonic transit time-to-porosity transform. *Society of Professional Well LogAnalysts*, 21st Ann. Logging Symp.
- Seather, O. P., (2013). M.Sc. Thesis, “Seismic Forward Modeling of Deltaic Sequences”, Norwegian University of Science and Technology.
- Sengupta, M., and Mavko, G., (2003). Impact of flow-simulation parameters on saturation scales and seismic velocity, *Geophysics*, 68, 1267–1280.
- Skelt, C., (2004). Fluid substitution in laminated sands. *The Leading Edge*, 23,485-489.
- Smith, W.O., Foote, P.D., and Busand, P.G., (1929). Packing of homogeneous spheres, *Phys. Rev.*,34(2), 1271–1274.
- Smith, T., Sondergeld, C., and Rai, C., (2003). Gassmann fluid substitutions: A tutorial. *Geophysics*, 2, 68, 430-440.
- Subrahmanyam, D., and Rao, P.H., (2008). “Seismic Attributes- A Review”, 7th Intrenational Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, P398, India.
- Taner, M. T., (2000). Attributes Revisited. Technical Publication, Rock Solid Images, Inc, Houston, Texas.
- Taner, M. T., Koehler, F., and Sheriff, R. E. (1979). Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44, 6, 1041-1063.
- Thomson, W. T., (1950). Transmission of elastic waves through a stratied solid medium. *Journal of Applied Physics*. 21,2, 89.93.
- Wang, Z., (2001). Fundamentals of seismic rock physics. *Geophysics*, 66, 398–412.
- Walton, K., (1987). The effective elastic moduli of a random packing of spheres .*Mech. Phys. Solids*, 35, 213–226.

- Yin, H., (1993), Ph.D. Thesis, “Acoustic Velocity and Attenuation of Rocks: Isotropy, Intrinsic Anisotropy, and Stress-induced Anisotropy”, dissertation, Stanford University.
- Zhang, Y., (2006), Ph.D. Thesis, “A case study: time-lapse seismic monitoring of a thin heavy oil reservoir”, Department of Physics, University of Alberta.
- Zhang, Z., McConnell, D., and Han, D., (2012). Rock physics-based seismic trace analysis of unconsolidated sediments containing gas hydrate and free gas in Green Canyon 955, Northern Gulf of Mexico. *Geophysics*, 34, 119-133.
- Zhu, X., and McMechan, G. A., (1990). Direct estimation of the bulk modulus of the frame in fluid saturated elastic medium by Biot theory. *Geophysics*, 60, 787–790.

پیوست الف:

تخمین سرعت موج برشی با استفاده از روش‌های

تجربی

الف-۱ مقدمه

در این بخش ابتدا مقدمه‌ای از روش‌های تجربی گرینبرگ-کاستاگنا و بروچر بیان می‌شود، سپس نتایج حاصل از هر روش در چاه W_7، مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که برای استفاده از روابط تجربی گرینبرگ-کاستاگنا و بروچر، باید اثر سیال حذف شود؛ زیرا این روابط برای سنگ‌های کاملاً اشباع شده با آب ارائه شده‌اند. با این کار، شرایط مشابهی برای کل ضخامت مخزن از نظر سیال در نظر گرفته می‌شود. برای حذف اثر سیال از رابطه (۲-۲۴) استفاده شده است.

الف-۲ گرینبرگ-کاستاگنا

کاستاگنا (۱۹۸۵) یک روش تجربی برای تخمین سرعت موج برشی با استفاده از سرعت موج تراکمی در سنگ‌های تک‌کانه‌ای و اشباع از آب شور، ارائه کرد. ضرایب رگرسیون و مقادیر همبستگی این رابطه در جدول (الف-۱) آورده شده است. در این راستا، سرعت موج برشی در سنگ‌شناسی‌های متشکل از چند کانی و اشباع از آب شور، توسط گرینبرگ-کاستاگنا (۱۹۹۲) با استفاده از رابطه (الف-۱) معرفی شد.

جدول (الف-۱): ضرایب رگرسیون برای لیتولوژی خالص ارائه شده توسط کاستاگنا و همکاران (۱۹۹۳).

سنگ‌شناسی	a_{i2}	a_{i1}	a_{i0}	R^2
ماسه‌سنگ	۰	۰/۸۰۴۱۶	-۰/۸۵۵۸۸	۰/۹۸۳۵۲
سنگ آهک	-۰/۵۵۰۸	۱/۰۱۶۷۷	-۱/۰۳۰۴۹	۰/۹۹۰۹۶
دولومیت	۰	۰/۵۸۳۲۱	-۰/۰۷۷۷۵	۰/۸۷۴۴۴
شیل	۰	۰/۷۶۹۶۹	-۰/۸۶۷۳۵	۰/۹۷۹۳۹

$$V_s = \frac{1}{2} \left\{ \left[\sum_{i=1}^L X_i \sum_{j=0}^{N_i} a_{ij} V_p^j \right] + \left[\sum_{i=1}^L X_i \left(\sum_{j=0}^{N_i} a_{ij} V_p^j \right)^{-1} \right]^{-1} \right\}$$

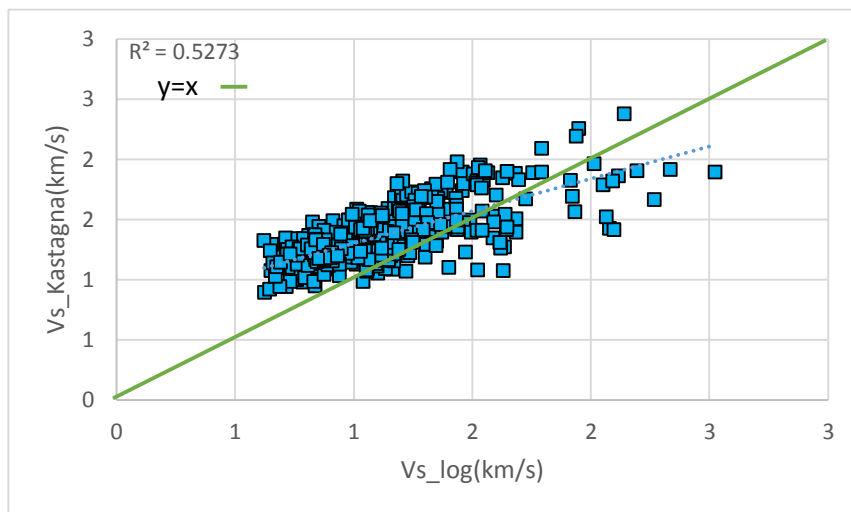
$$\sum_{i=1}^L X_i = 1 \quad (\text{الف-۱})$$

که L تعداد سنگ‌شناسی موجود در سازند، X_i درصد سنگ‌شناسی مورد نظر نسبت به حجم کل، a_{ij} ضریب رگرسیون، N_i درجه چند جمله رگرسیون برای سنگ‌شناسی مورد نظر، V_p سرعت موج تراکمی و V_s سرعت موج برشی بر حسب کیلومتر بر ثانیه می‌باشد.

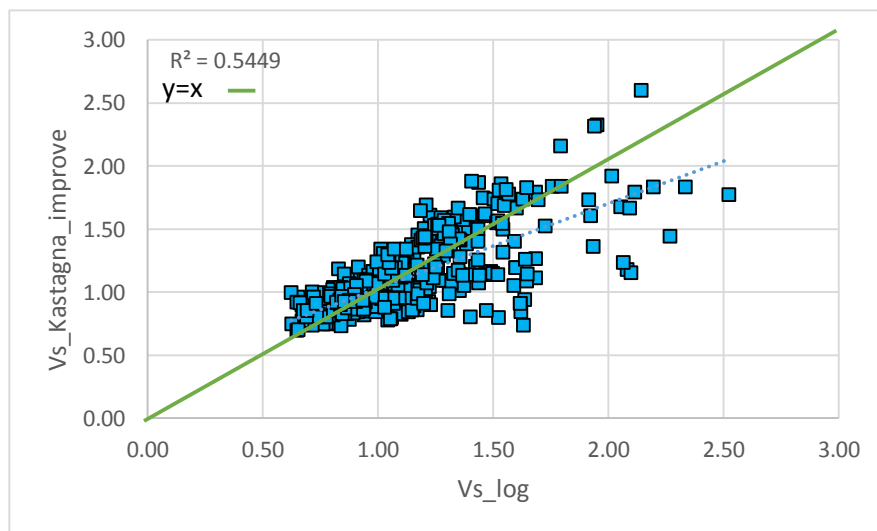
• نتیجه حاصل از رابطه گرینبرگ - کاستاگنا

شکل (الف-۱) مربوط به سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گرینبرگ - کاستاگنا در مقابل سرعت موج برشی واقعی در چاه W_7 می‌باشد. به دلیل اینکه این رابطه تجربی بوده و برای تمام مخازن قابل تعمیم نمی‌باشد، ضرایب آن باید اصلاح شود. برای این منظور در بخش‌هایی از مخزن که حجم دولومیت و ماسه‌سنگ در آن بالای ۷۰ درصد بوده، ضریب رگرسیون آن‌ها تصحیح شده است. برای بخش شیلی به دلیل کمبود لایه‌های خالص شیلی تصحیحات صورت نگرفته و از همان ضرایب رگرسیون گرینبرگ - کاستاگنا استفاده شده است. شکل (الف-۲)، سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه بهبود یافته گرینبرگ - کاستاگنا را نسبت به سرعت موج برشی واقعی نشان می‌دهد. نمودار سرعت موج برشی واقعی و سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گرینبرگ - کاستاگنا و بهبود یافته رابطه گرینبرگ - کاستاگنا نسبت به عمق در شکل (الف-۳) آورده شده است. جدول (الف-۲) مربوط به ضرایب رگرسیون اصلاح شده بعد از اعمال تصحیحات می‌باشد. جدول (الف-۳)، مقادیر ضرایب همبستگی و میانگین

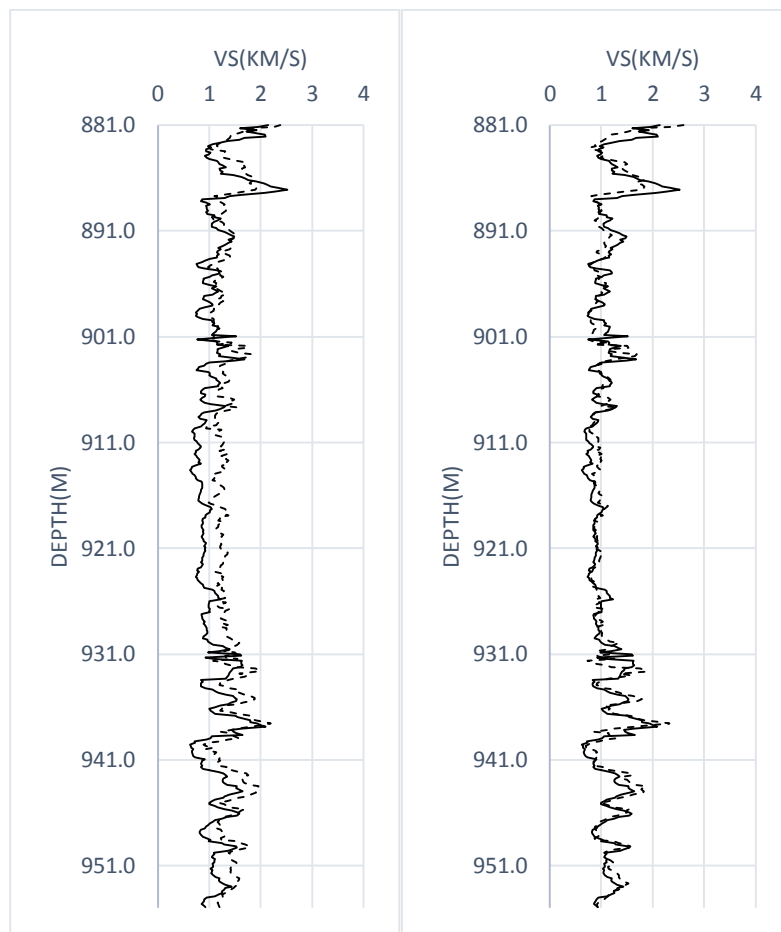
مربعات خطا برای رابطه اصلی گرینبرگ-کاستاگنا و بهبود یافته آن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، رابطه بهبود یافته همبستگی بیشتری با سرعت موج برشی واقعی دارد.



شکل (الف-۱): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گرینبرگ-کاستاگنا در مقابل مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه W_7.



شکل (الف-۲): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه بهبود یافته گرینبرگ-کاستاگنا در مقابل مقادیر واقعی سرعت موج برشی در چاه W_7.



شکل (الف-۳): نمودار سرعت موج برشی تخمین زده شده (خط چین) و سرعت موج برشی واقعی (خط پر) در مقابل عمق در چاه W_7. شکل سمت چپ مربوط به رابطه اصلی گرینبرگ-کاستاگنا و شکل سمت راست مربوط به رابطه بهبود یافته گرینبرگ-کاستاگنا می باشد.

جدول (الف-۲): ضرایب رگرسیون اصلاح شده رابطه گرینبرگ-کاستاگنا.

لیتولوژی	a_{i2}	a_{i1}	a_{i0}	R^2
ماسه سنگ	۰/۵۷۳۸	-۲/۵۰۸۴	۳/۵۰۱۴	۰/۳۴۰۶
سنگ آهک	-۰/۵۵۰۸	۱/۰۱۶۷۷	-۱/۰۳۰۴۹	۰/۹۹۰۹۶
دولومیت	۰	۱/۰۱۹۵	-۱/۶۲۶	۰/۸۵۸۸
شیل	۰	۰/۷۶۹۶۹	-۰/۸۶۷۳۵	۰/۹۷۹۳۹

جدول (الف-۳): مقادیر ضرایب همبستگی و میانگین مربعات خطا رابطه اصلی گرینبرگ-کاستاگنا و بهبود یافته آن در چاه W_7.

رابطه	R^2	MSE
گرینبرگ-کاستاگنا	۰/۵۲۷۳	۰/۱۱۷
بهبود یافته گرینبرگ-کاستاگنا	۰/۵۴۴۹	۰/۰۴۹

الف-۳ بروچر

بروچر (۲۰۰۵، ۲۰۰۸) با بررسی هزاران داده سرعت برای یک محدوده وسیعی از سنگ‌شناسی‌ها از رسوبات تحکیم‌نیافته، سنگ‌های آذرین با تخلخل خیلی پایین، توف‌های آتشفشانی و سنگ‌های متامورفیک با فشردگی خیلی بالا، یک معادله غیرخطی بدست آورد (مالکی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴):

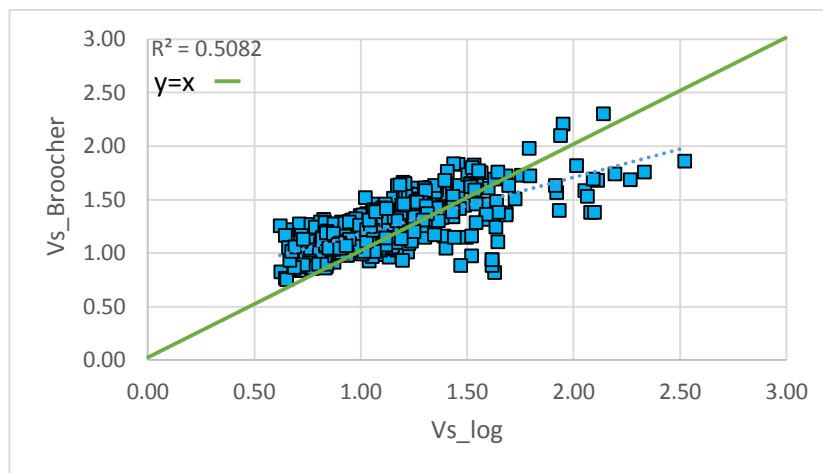
$$V_s = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4 \quad (\text{الف-۲})$$

رابطه (الف-۲) برای سرعت‌های تراکمی بین ۱/۵ تا ۸/۵ کیلومتر بر ثانیه، معتبر است.

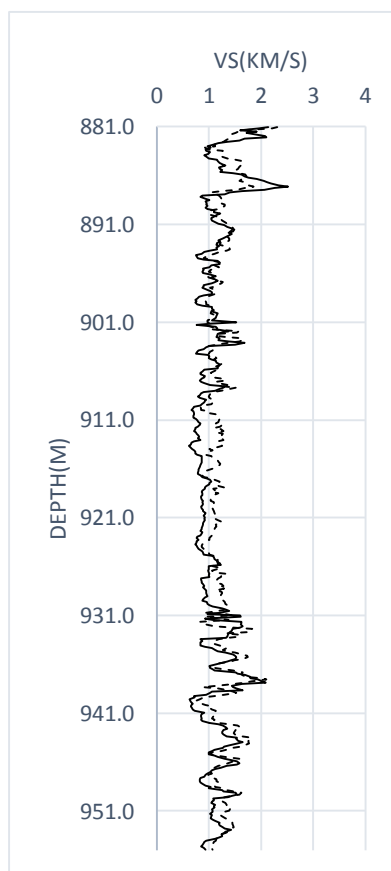
• نتیجه حاصل از رابطه بروچر

شکل (الف-۴) سرعت موج برشی تخمین‌زده شده با استفاده از رابطه بروچر در مقابل سرعت موج برشی واقعی در چاه W-7 را نشان می‌دهد. شکل (الف-۵)، نمودار سرعت موج برشی واقعی و سرعت موج برشی تخمین‌زده شده نسبت به عمق با استفاده از رابطه بروچر است. جدول (الف-۴)، مربوط به مقادیر ضرایب همبستگی و میانگین مربعات خطای رابطه بروچر می‌باشد.

¹ Maleki



شکل (الف-۴): سرعت موج برشی تخمین زده شده با استفاده از رابطه بروچر در مقابل مقادیر واقعی سرعت برشی در چاه W_7.



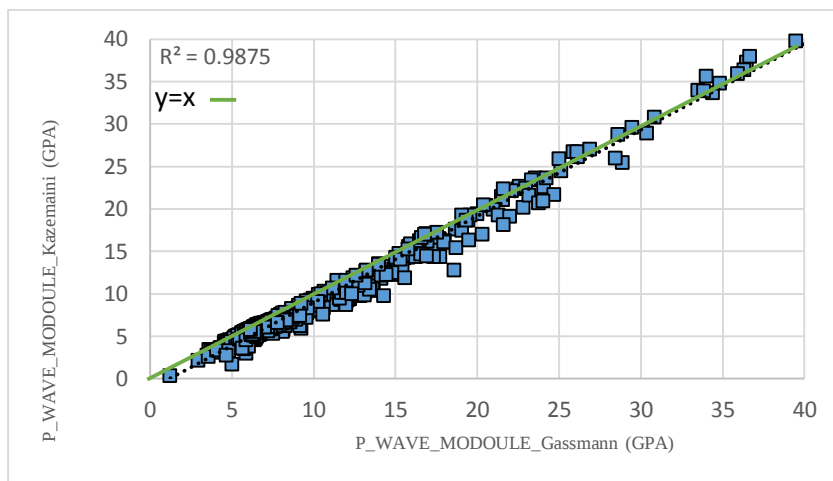
شکل (الف-۵): نمودار سرعت موج برشی تخمین زده شده (خطچین) با استفاده از رابطه بروچر و سرعت موج برشی واقعی (خطپر) در مقابل عمق در چاه W_7.

جدول (الف-۴): مقادیر ضرایب همبستگی و میانگین مربعات خطا رابطه بروچر در چاه W_7.

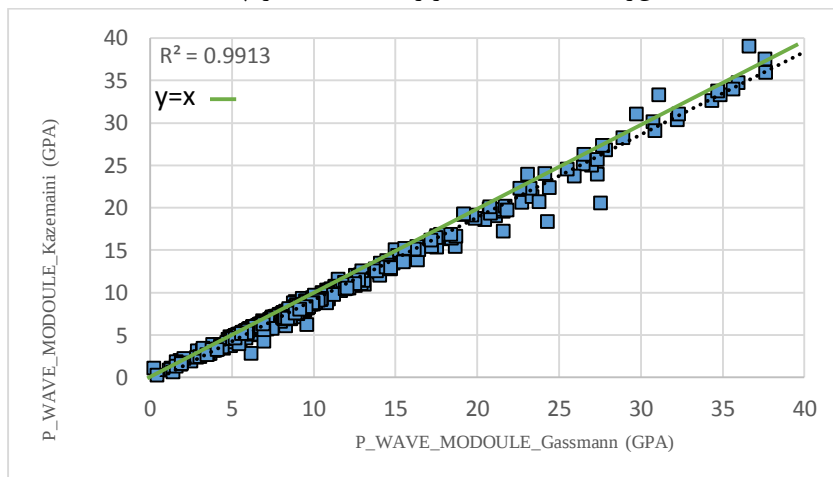
رابطه	R^2	MSE
بروچر	۰/۵۰۸۲	۰/۰۷۰

الف-۴ نمودار متقاطع مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن در مقابل

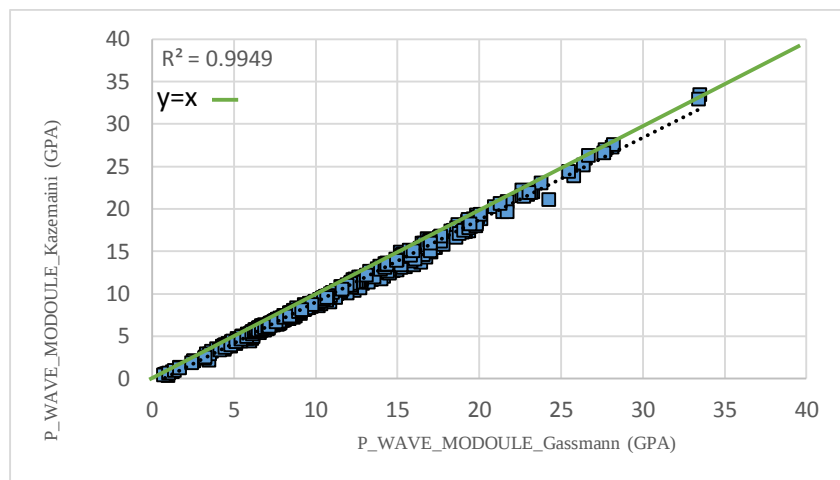
مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه (۲-۲۵)



شکل (الف-۵): نمودار متقاطع مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن در مقابل مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه (۲-۲۵) در چاه W_1.



شکل (الف-۶): نمودار متقاطع مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن در مقابل مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه (۲-۲۵) در چاه W_2.



شکل (الف-۷): نمودار متقاطع مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه گسمن در مقابل مدول موج تراکمی تخمین زده شده با استفاده از رابطه (۲-۲۵) در چاه W_9.

پیوست ب:

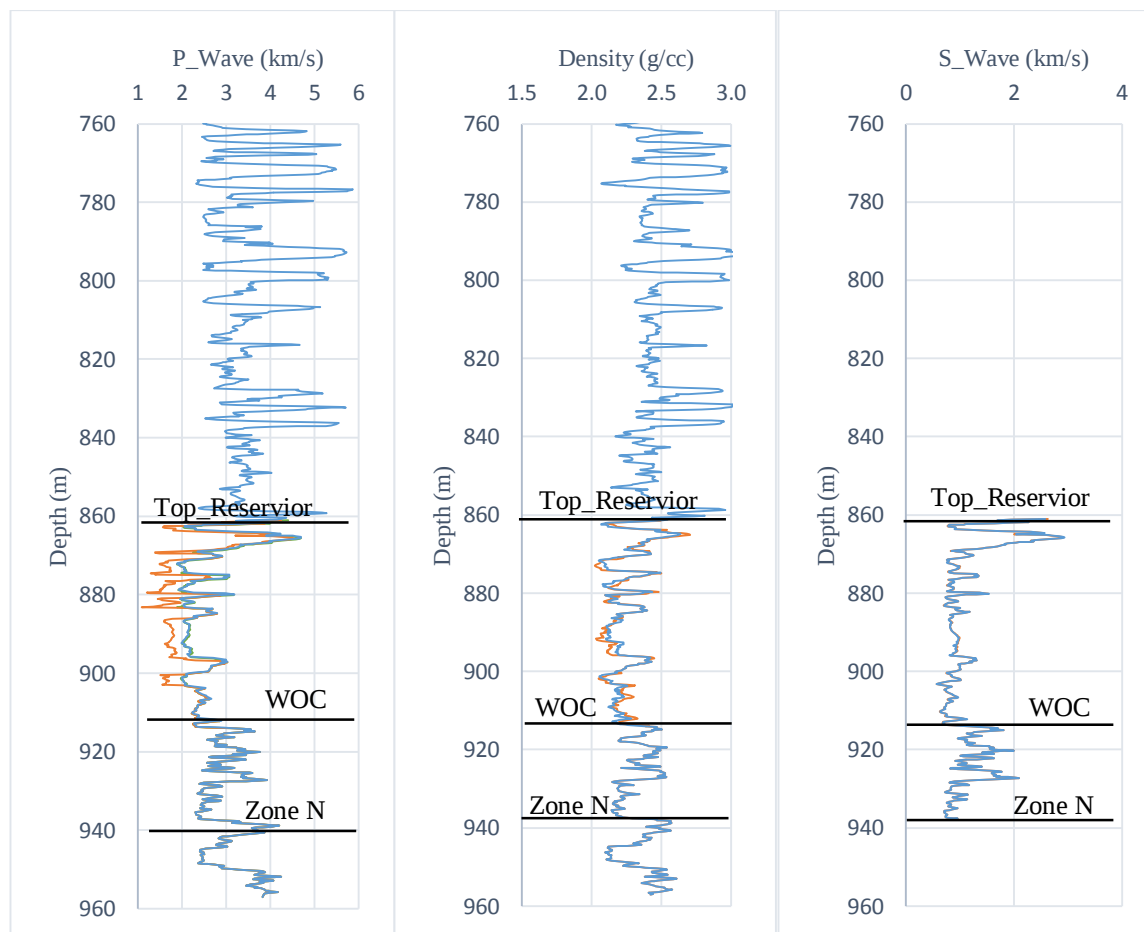
نمودارهای مربوط به تغییرات سرعت و چگالی بعد از

جانشینی سیال و مقایسه بین سرعت‌های موج

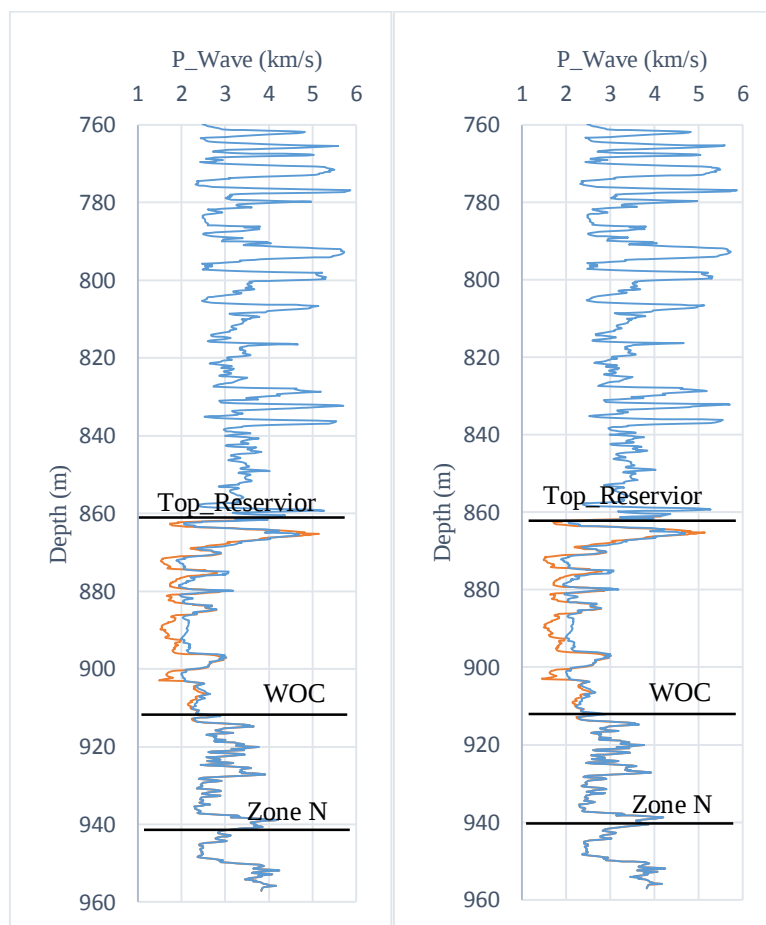
تراکمی محاسبه شده با استفاده از دو مدل فیزیک

سنگ

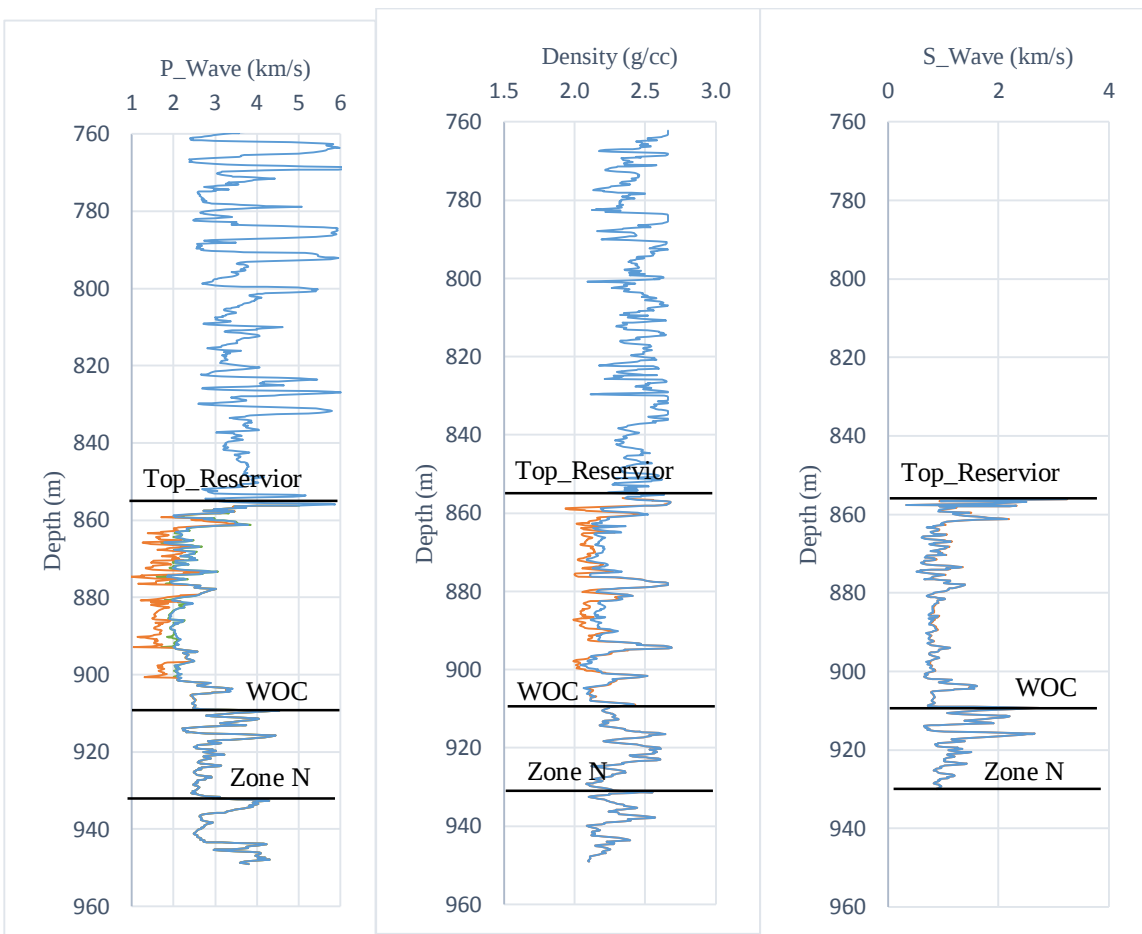
ب-۱ جانشینی سیال و تغییرات سرعت و چگالی سنگ در بخش مخزنی



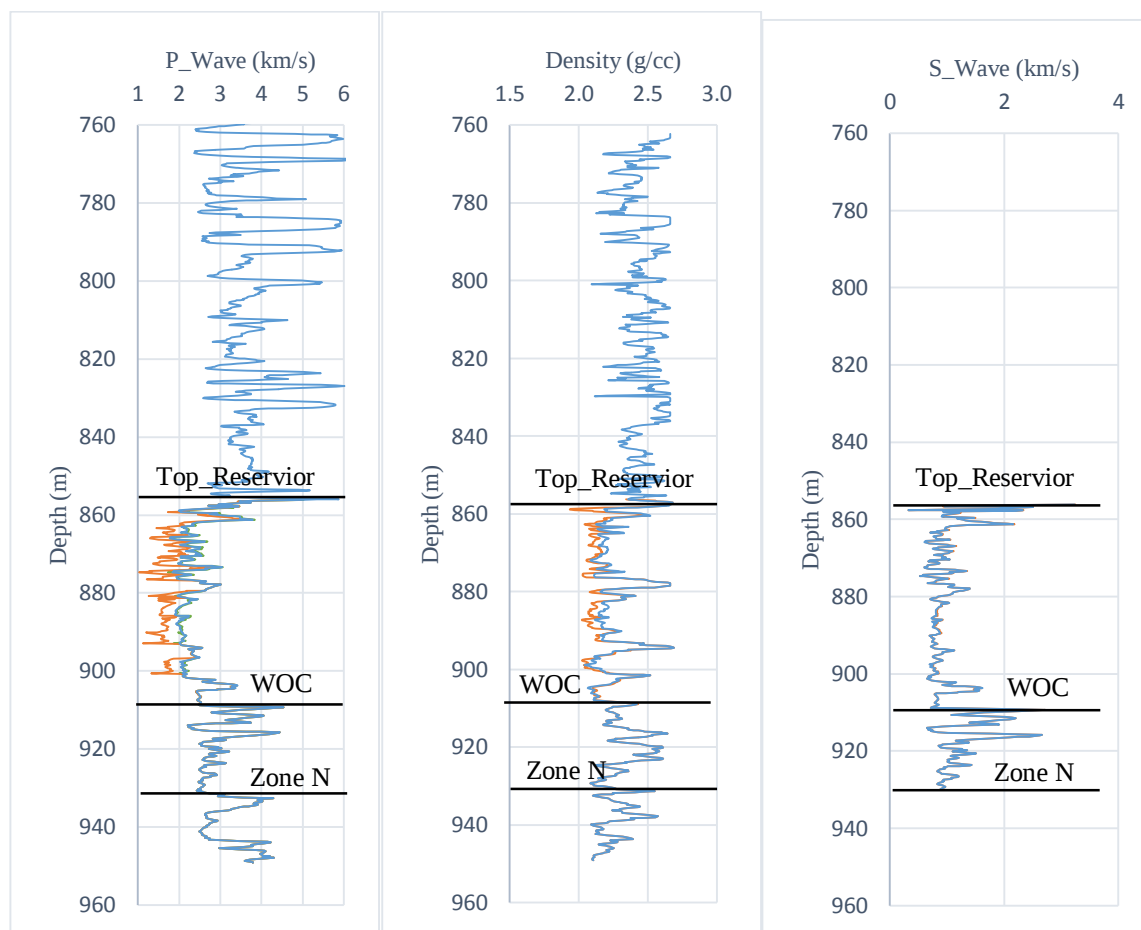
شکل (ب-۱): شکل سمت چپ مربوط به مدل‌های اشباع‌شدگی ناهمگن (به رنگ سبز)، همگن (نارنجی) و درجا (آبی) برای مدل گسمن در چاه W_1 برای سناریو B می‌باشد. شکل وسط مربوط به چگالی بعد از جانشینی سیال با سناریو B (با رنگ نارنجی) و شرایط درجا (آبی) می‌باشد. شکل سمت راست مربوط به سرعت برشی بعد از جانشینی سیال با سناریو B (با رنگ نارنجی) و شرایط درجا (آبی) می‌باشد.



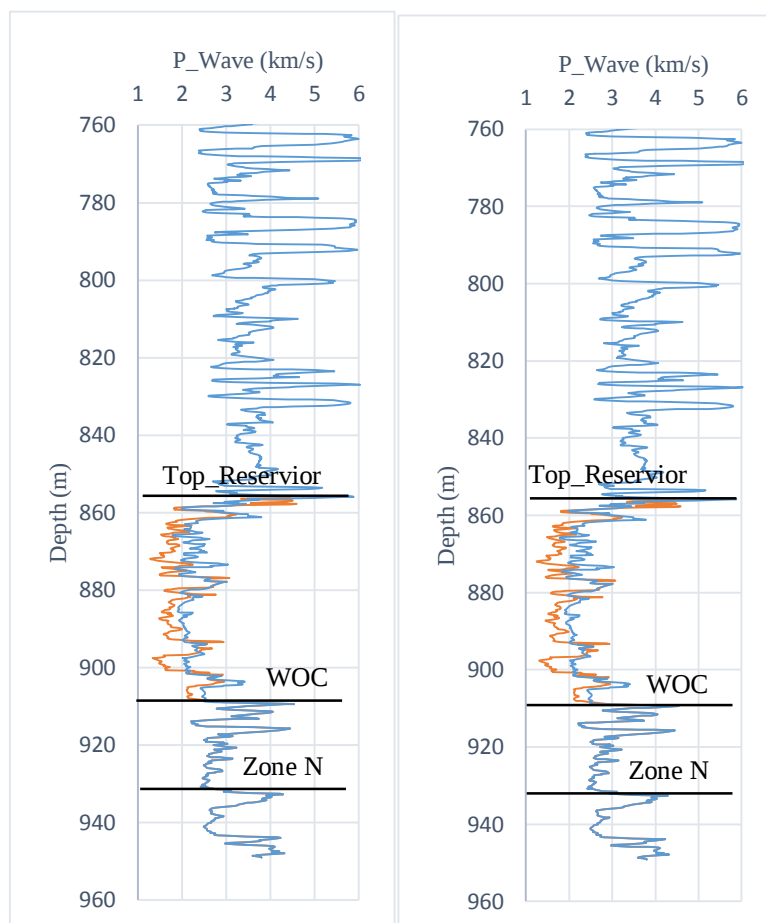
شکل (ب-۲): مدل اشباع‌شدگی همگن (نارنجی) و درجا (آبی) برای مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در چاه W_1 برای سناریو B (شکل سمت راست) و سناریو A (شکل سمت چپ) می‌باشد.



شکل (ب-۳): شکل سمت چپ مربوط به مدل های اشباع شدگی ناهمگن (به رنگ سبز)، همگن (نارنجی) و درجا (آبی) برای مدل گسمن در چاه W_2 برای سناریو B می باشد. شکل وسط مربوط به چگالی بعد از جانشینی سیال با سناریو B (با رنگ نارنجی) و شرایط درجا (آبی) می باشد. شکل سمت راست مربوط به سرعت برشی بعد از جانشینی سیال با سناریو B (با رنگ نارنجی) و شرایط درجا (آبی) می باشد.

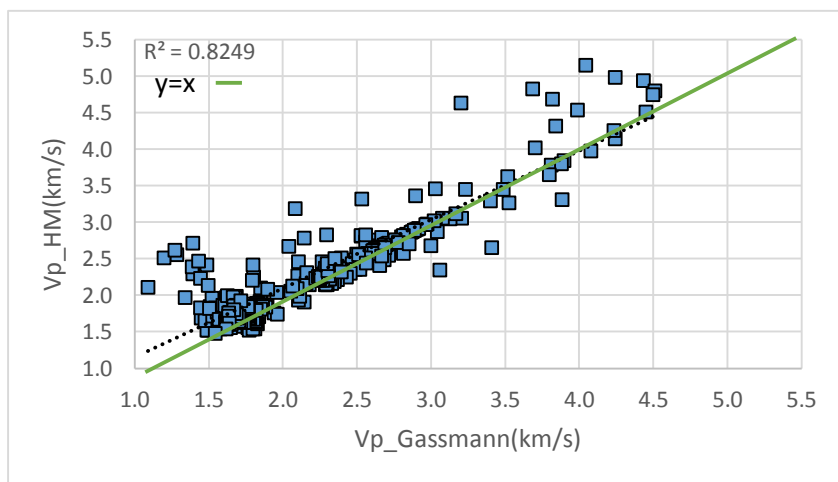


شکل (ب-۴): شکل سمت چپ مربوط به مدل‌های اشباع‌شدگی ناهمگن (به رنگ سبز)، همگن (نارنجی) و درجا (آبی) برای مدل گسمن در چاه W_2 برای سناریو A می‌باشد. شکل وسط مربوط به چگالی بعد از جانشینی سیال با سناریو A (با رنگ نارنجی) و شرایط درجا (آبی) می‌باشد. شکل راست مربوط به سرعت برشی بعد از جانشینی سیال با سناریو A (با رنگ نارنجی) و شرایط درجا (آبی) می‌باشد.

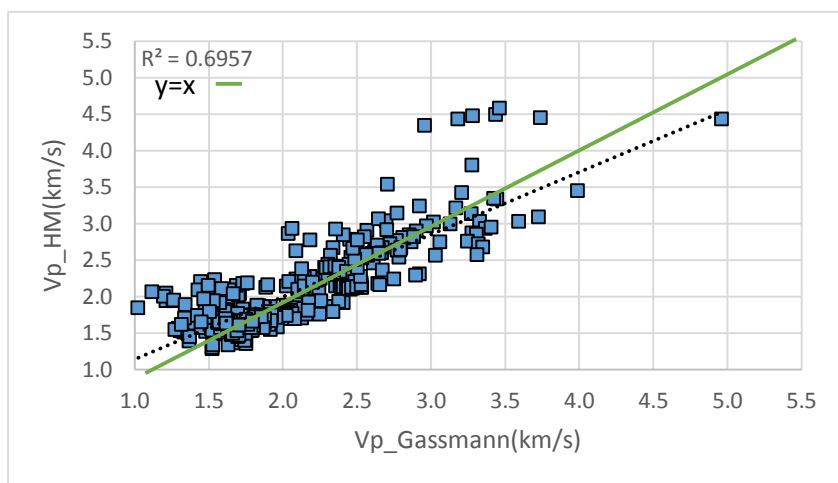


شکل (ب-۵): مدل اشباع‌شدگی همگن (نارنجی) و برج (آبی) برای مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در چاه W_2 برای سناریو B (شکل سمت راست) و سناریو A (شکل سمت چپ) می‌باشد.

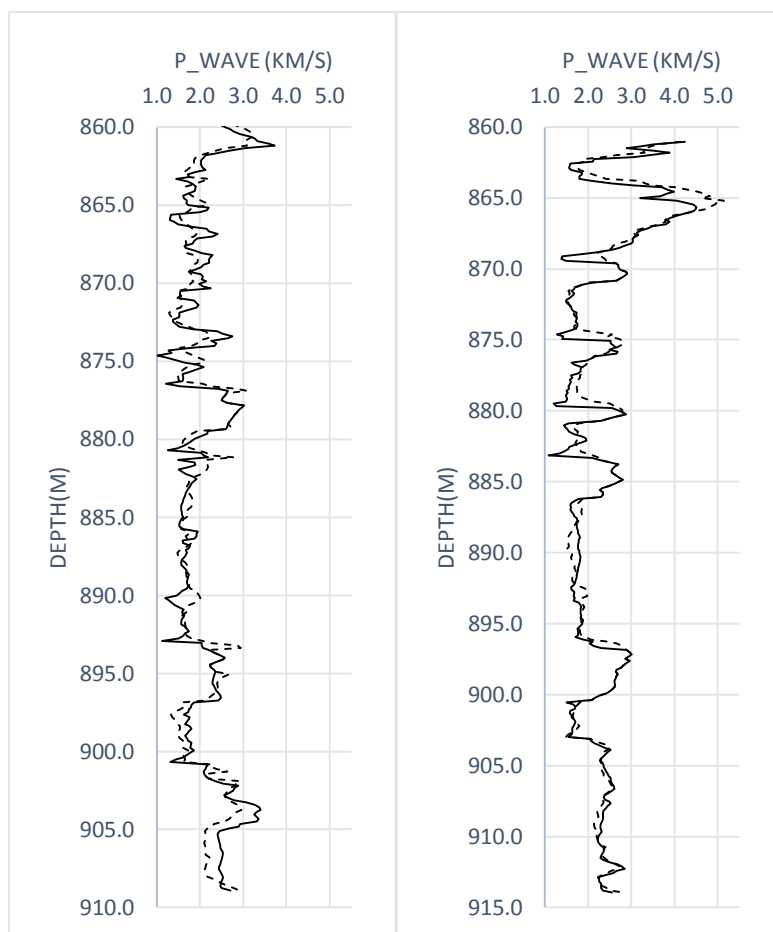
ب-۲ مقایسه بین سرعت‌های موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از دو مدل فیزیک سنگ



شکل (ب-۶): سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در مقابل سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل گسمن در چاه W_1 بعد از جانشینی سیال با سناریو A.



شکل (ب-۷): سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در مقابل سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل گسمن در چاه W_2 بعد از جانشینی سیال با سناریو A.



شکل (ب-۸): سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین (خط چین) و مدل گسمن (خط پر) در چاه W_1 (سمت راست) و W_2 (سمت چپ) بعد از جانشینی سیال با سناریو A.

جدول (ب-۱): مقادیر ضرایب تعیین و میانگین مربعات خطای سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل فیزیک سنگ میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در مقابل سرعت موج تراکمی محاسبه شده با استفاده از مدل گسمن بعد از جانشینی سیال با سناریو A.

چاه	R^2	MSE
W_1	۰/۸۲۵	۰/۰۸۹
W_2	۰/۶۹۶	۰/۱۱۳

پیوست پ:

استخراج موجک لرزه‌ای

پ-۱ مراحل استخراج موجک لرزه‌ای

۱- با استفاده از روش آماری و بر اساس اطلاعات مربوط به پردازش داده‌های لرزه‌ای، برای هر چاه طیف

فاز ثابت ۱۸۰ درجه اعمال شده و موجک لرزه‌ای مربوط به روش آماری حاصل می‌شود.

۲- پس از انطباق دادن ردلرزه واقعی و ردلرزه مصنوعی حاصل از هم‌امیخت سری بازتاب مربوط به

نگارهای چاه و موجک لرزه‌ای حاصل از روش آماری، با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نگارهای

سرعت و چگالی برای هر چاه بصورت مجزا یک موجک لرزه‌ای استخراج می‌شود. ضرایب همبستگی

مربوط به چاه‌های W-1 و W-2 به ترتیب برابر با ۷۸/۵٪ و ۹۵/۹٪ می‌باشند. به دلیل متفاوت بودن

پارامترهای مورد استفاده برای تخمین موجک لرزه‌ای در هر چاه، به کمک داده‌های لرزه‌ای و

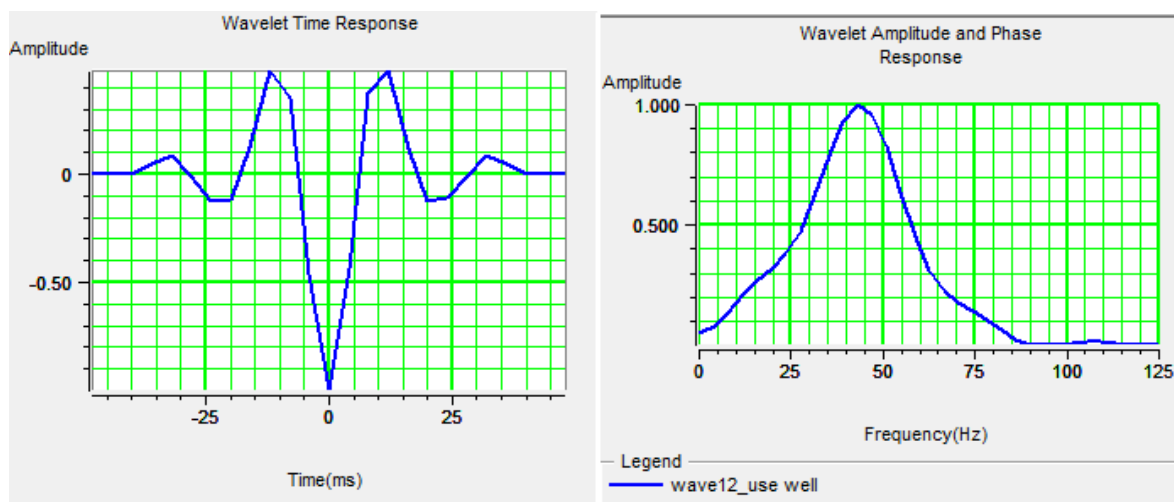
نگارهای هر دو چاه یک موجک لرزه‌ای تخمین زده می‌شود.

شکل (پ-۱)، موجک لرزه‌ای نهایی در حوزه زمان و فرکانس را نشان می‌دهد. شکل‌های (پ-۲) و (پ-۳)،

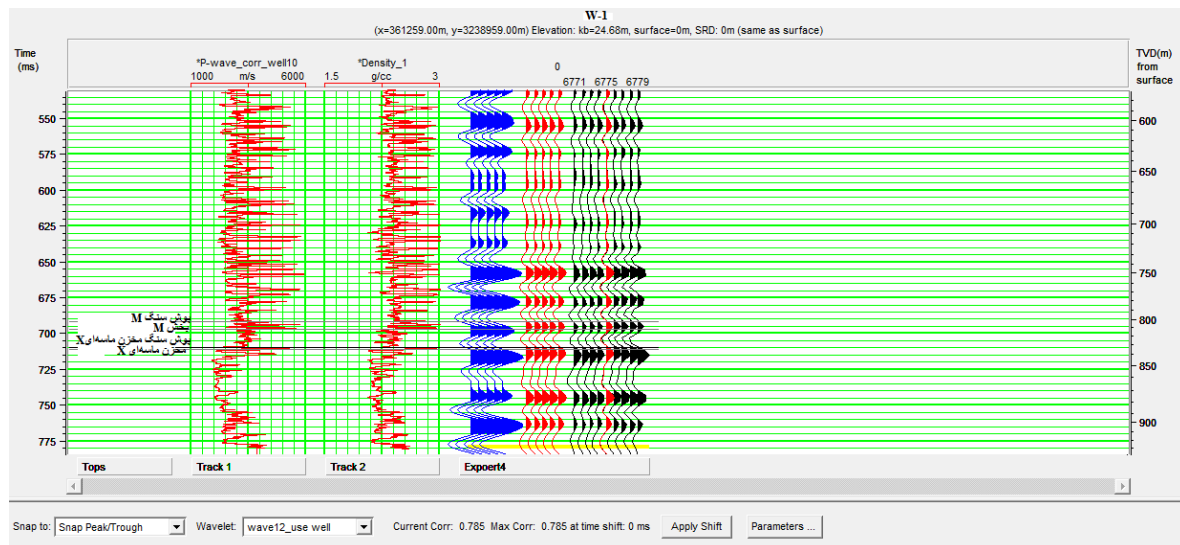
ردلرزه‌های واقعی (رنگ قرمز) و مصنوعی (رنگ آبی) ساخته شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نگارهای

چاه را نشان می‌دهد. شکل (پ-۴)، مربوط به مقادیر همبستگی بین ردلرزه واقعی و مصنوعی هر چاه می‌باشد.

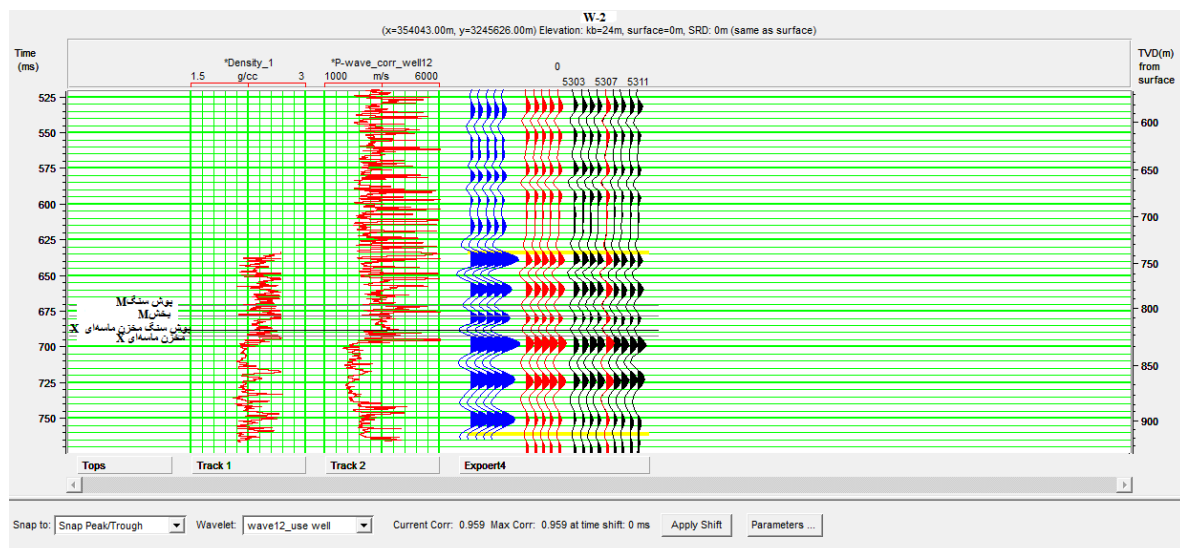
همبستگی کلی تقریباً برابر با ۹۰ درصد است.



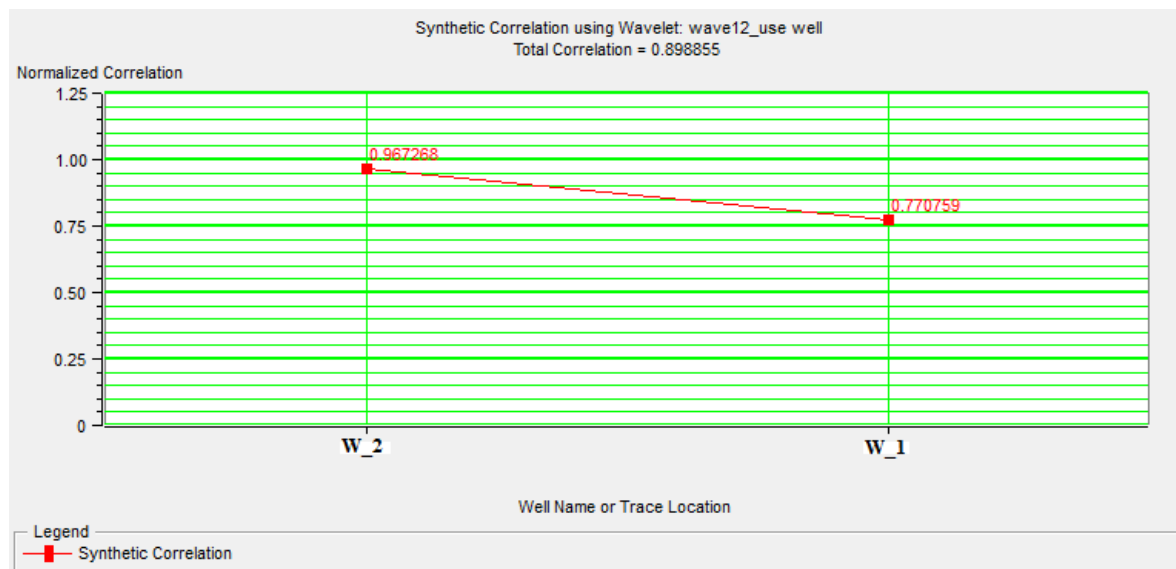
شکل (پ-۱): موجک نهایی استخراج شده با استفاده از اطلاعات هر دو چاه و داده‌های لرزه‌ای در حوزه زمان و فرکانس.



شکل (پ-۲): مقایسه بین ردلرزه واقعی اطراف چاه W-1 (رنگ قرمز) و ردلرزه مصنوعی حاصل شده از همامیخت موجک لرزه‌ای استخراج شده با ضریب بازتاب اطراف چاه W-1 (رنگ آبی).



شکل (پ-۳): مقایسه بین ردلرزه واقعی اطراف چاه W-2 (رنگ قرمز) و ردلرزه مصنوعی حاصل شده از همامیخت موجک لرزه‌ای استخراج شده با ضریب بازتاب اطراف چاه W-2 (رنگ آبی).



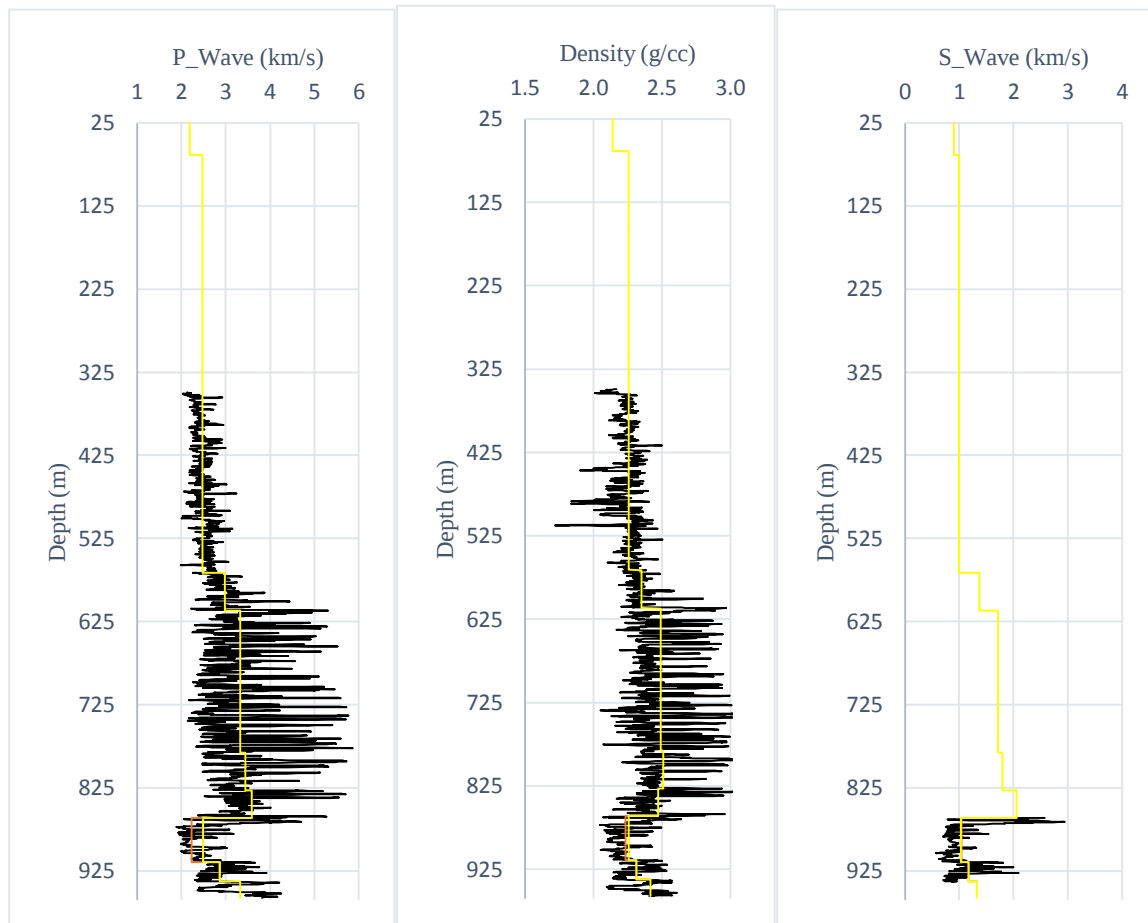
شکل (پ-۴): مقادیر همبستگی بین داده‌های لرزه‌ای واقعی و داده‌های لرزه‌ای مصنوعی با استفاده از موجک استخراج شده از تمام چاه‌ها.

پیوست ت:

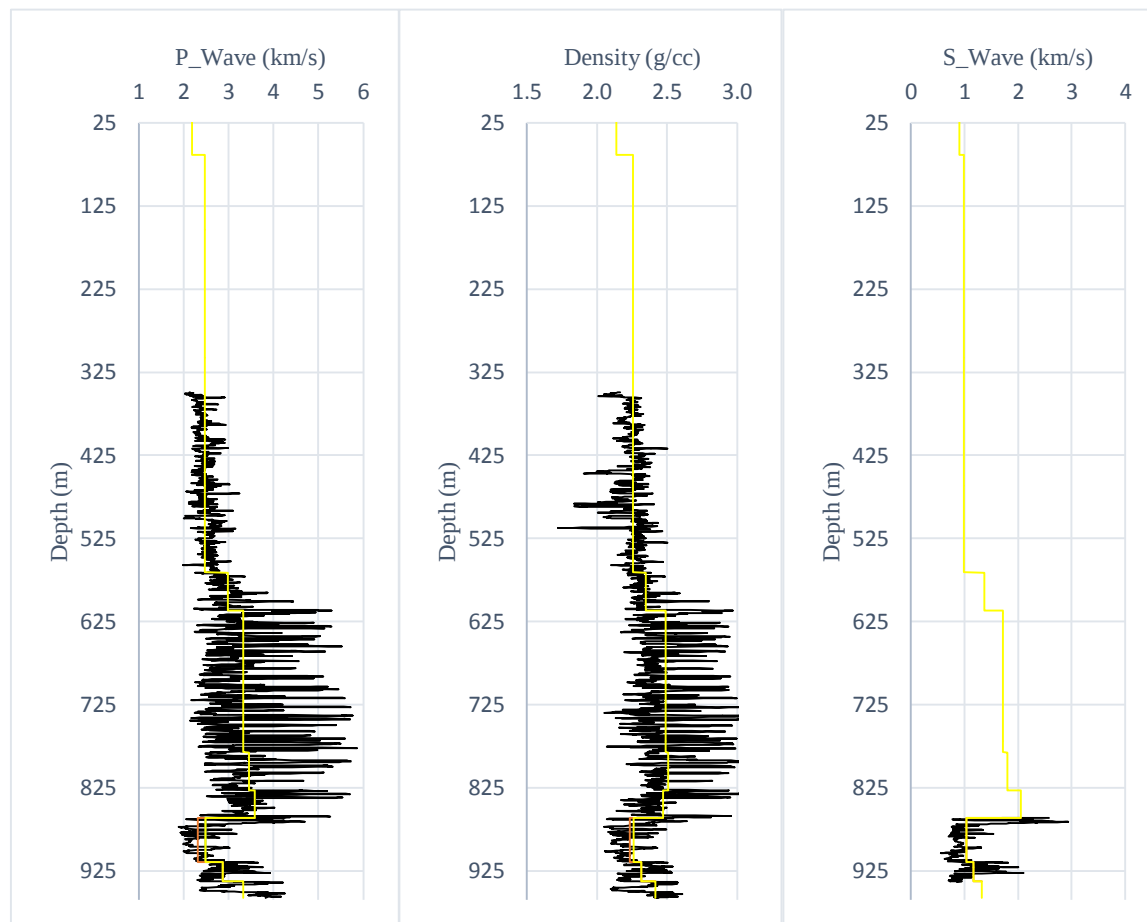
نمودارهای مربوط به مدل سازی الاستیک یک بعدی

ت-۱ مدل سازی یک بعدی

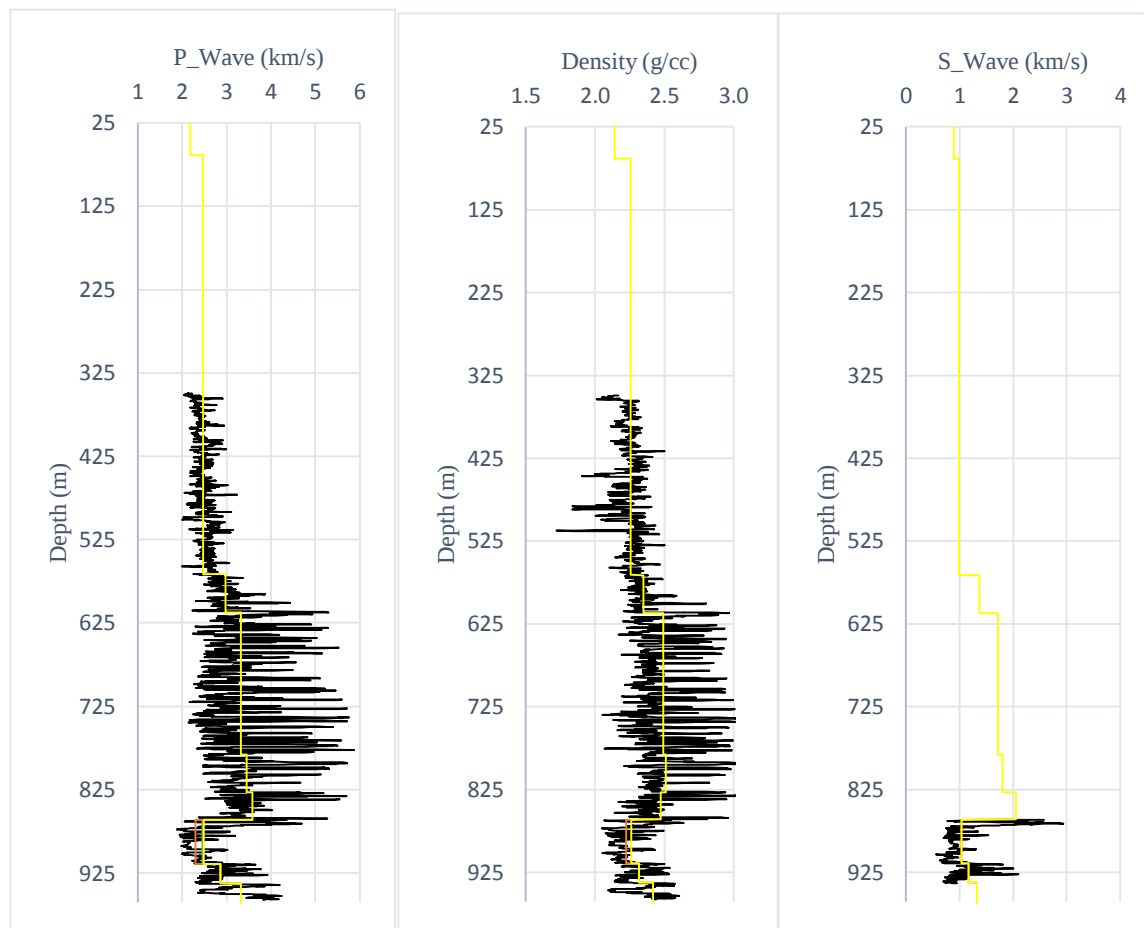
مدل های بلوک بندی شده مربوط به چاه W_2 و سناریو B و مدل فیزیک سنگ میانگین بهبود یافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین در چاه W_1، در شرایط قبل و بعد از جانشینی سیال در شکل های (ت-۱) تا (ت-۷) آورده شده است.



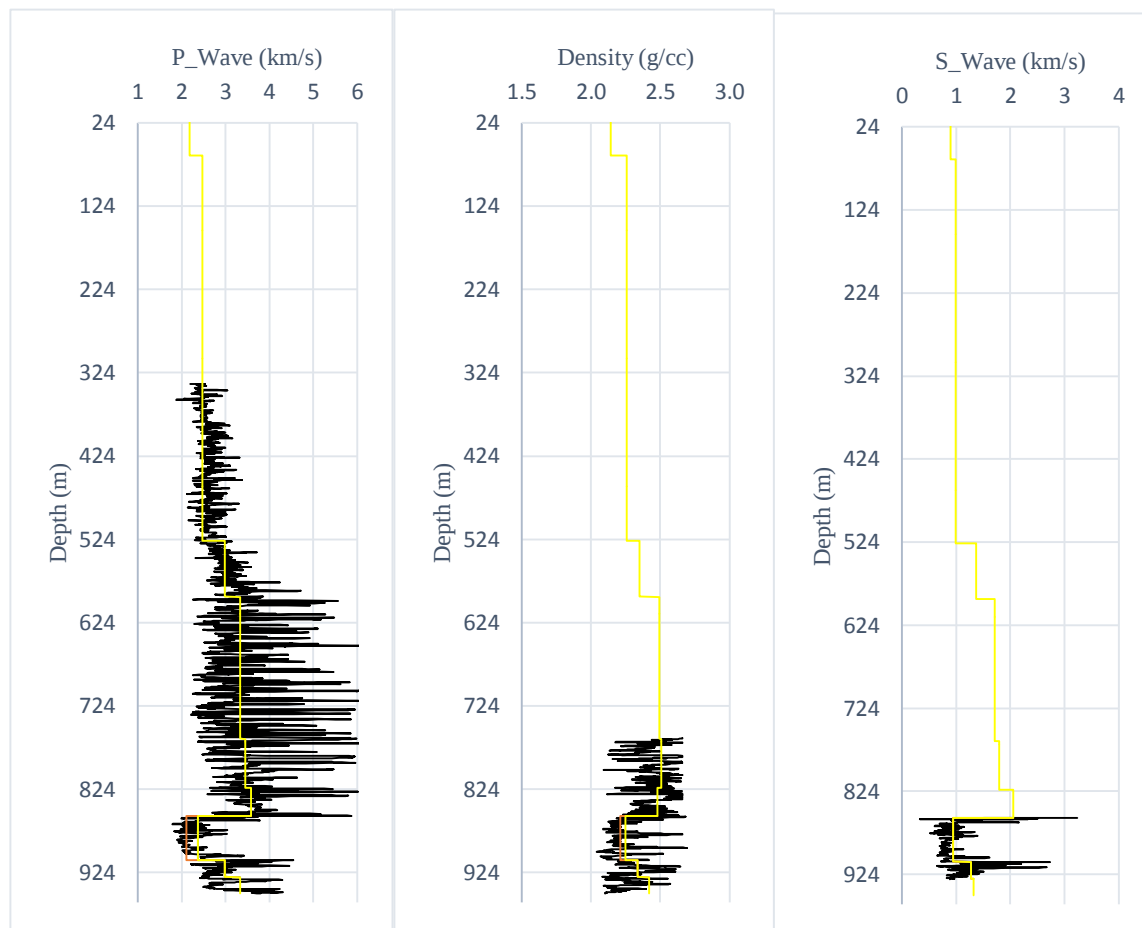
شکل (ت-۱): مدل های بلوک بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو B (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-1. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل گسمن برای اشباع همگن به رنگ نارنجی و برای اشباع ناهمگن به رنگ سبز است که به دلیل درصد کم تغییرات سرعت تراکمی در اشباع شدگی ناهمگن این حالت مشاهده نمی شود.



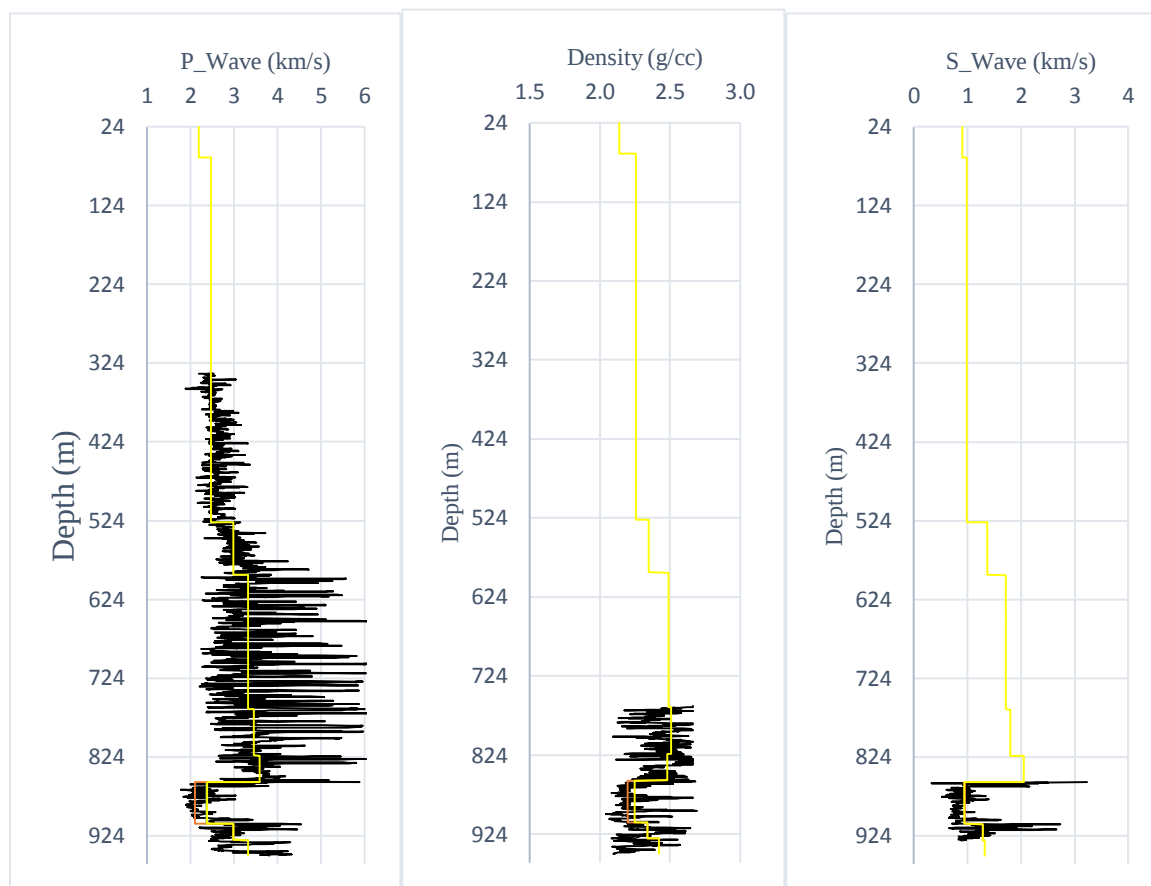
شکل (ت-۲): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو A (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-1. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین برای اشباع همگن به رنگ نارنجی می‌باشد.



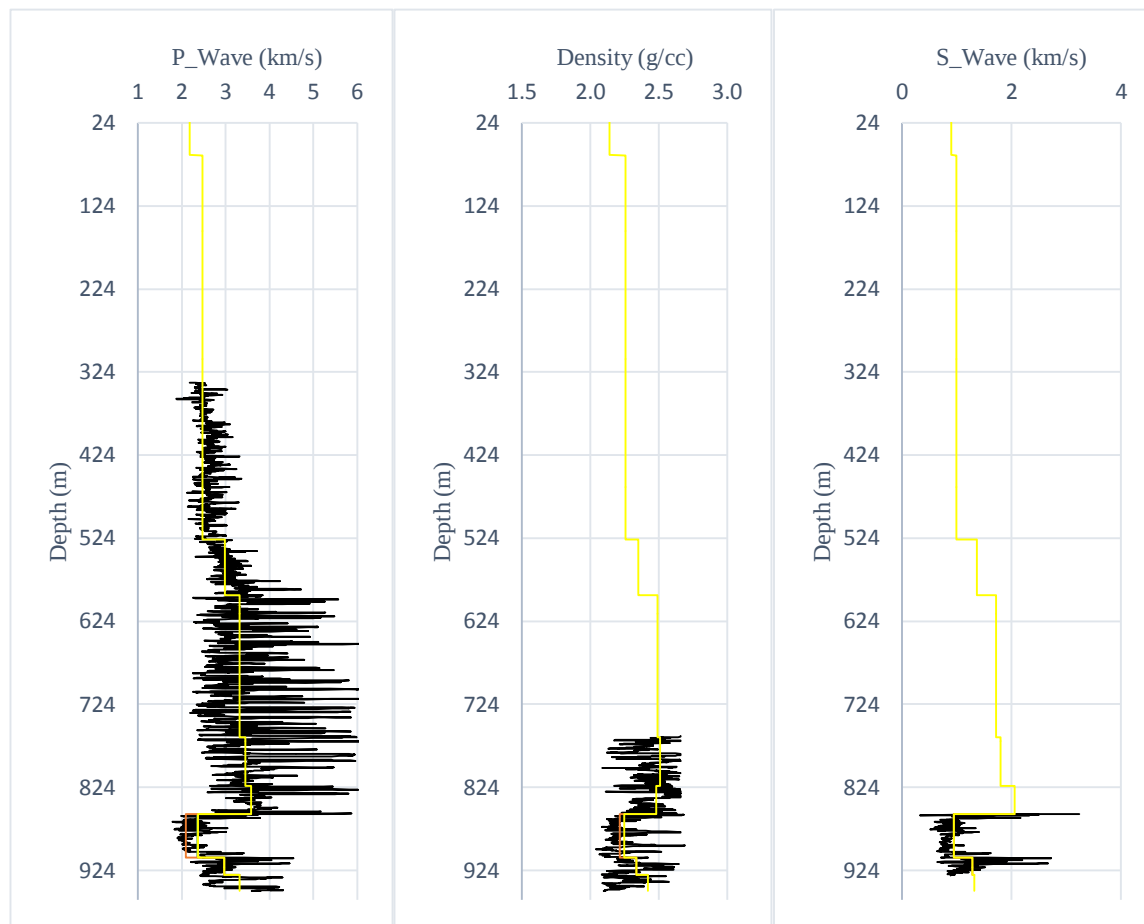
شکل (ت-۳): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو B (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-1. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین برای اشباع همگن به رنگ نارنجی می‌باشد.



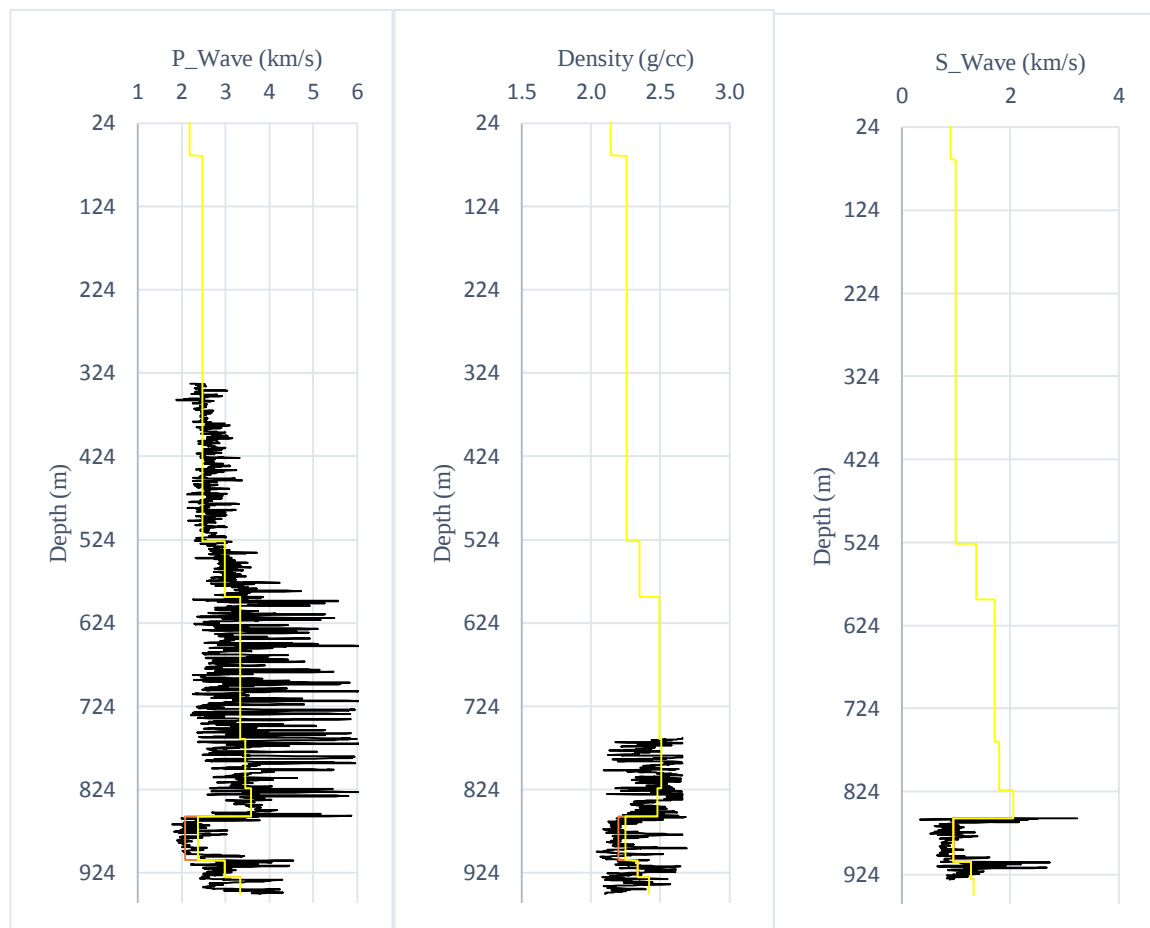
شکل (ت-۴): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو A (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-2. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل گسمن برای اشباع همگن به رنگ نارنجی و برای اشباع ناهمگن به رنگ سبز است که به دلیل درصد کم تغییرات سرعت تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن این حالت مشاهده نمی‌شود.



شکل (ت-۵): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو B (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-2. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل گسمن برای اشباع همگن به رنگ نارنجی و برای اشباع ناهمگن به رنگ سبز است که به دلیل درصد کم تغییرات سرعت تراکمی در اشباع‌شدگی ناهمگن این حالت مشاهده نمی‌شود.



شکل (ت-۶): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو A (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-2. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین برای اشباع همگن به رنگ نارنجی می‌باشد.



شکل (ت-۷): مدل‌های بلوک‌بندی شده قبل از جانشینی سیال (خطوط زرد) و بعد از جانشینی سیال با استفاده از سناریو B (خطوط نارنجی) بر روی نگارهای سرعت تراکمی، سرعت برشی و چگالی اندازه‌گیری شده (منحنی مشکی) در محل چاه W-2. بر روی نگار سرعت تراکمی، مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین برای اشباع همگن به رنگ نارنجی می‌باشد.

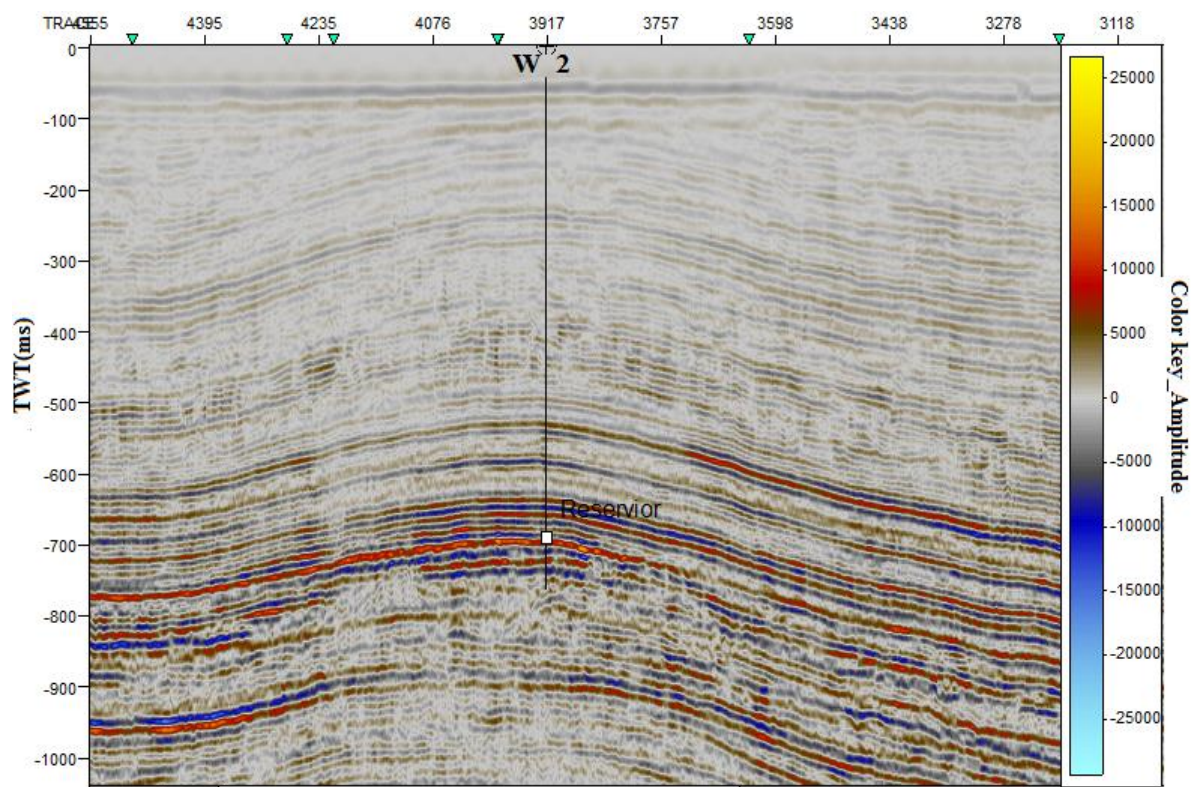
پیوست ث:

نتایج مربوط به مدل سازی پیشرو لرزه‌ای و اعمال

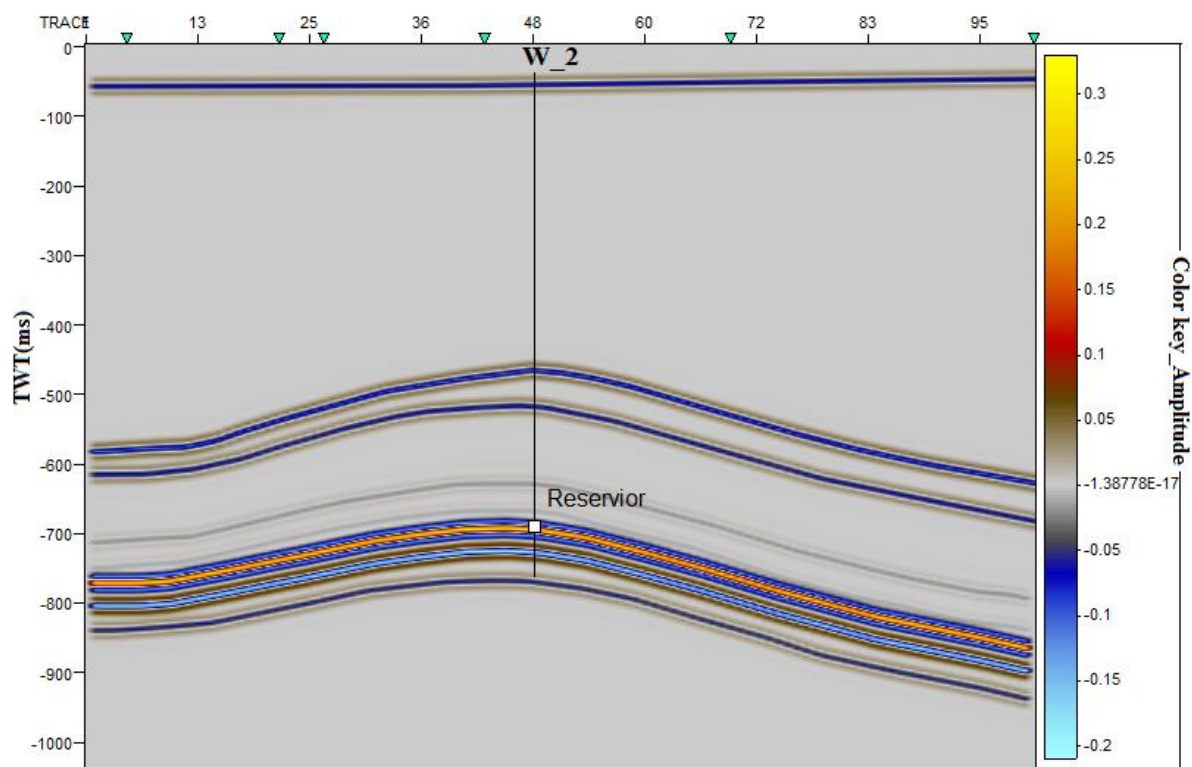
نشانگرها در چاه W-2

ث-۱ نتایج مربوط به مدل سازی پیشرو لرزه‌ای در حالت برجا و بعد از جانشینی سیال در چاه W-

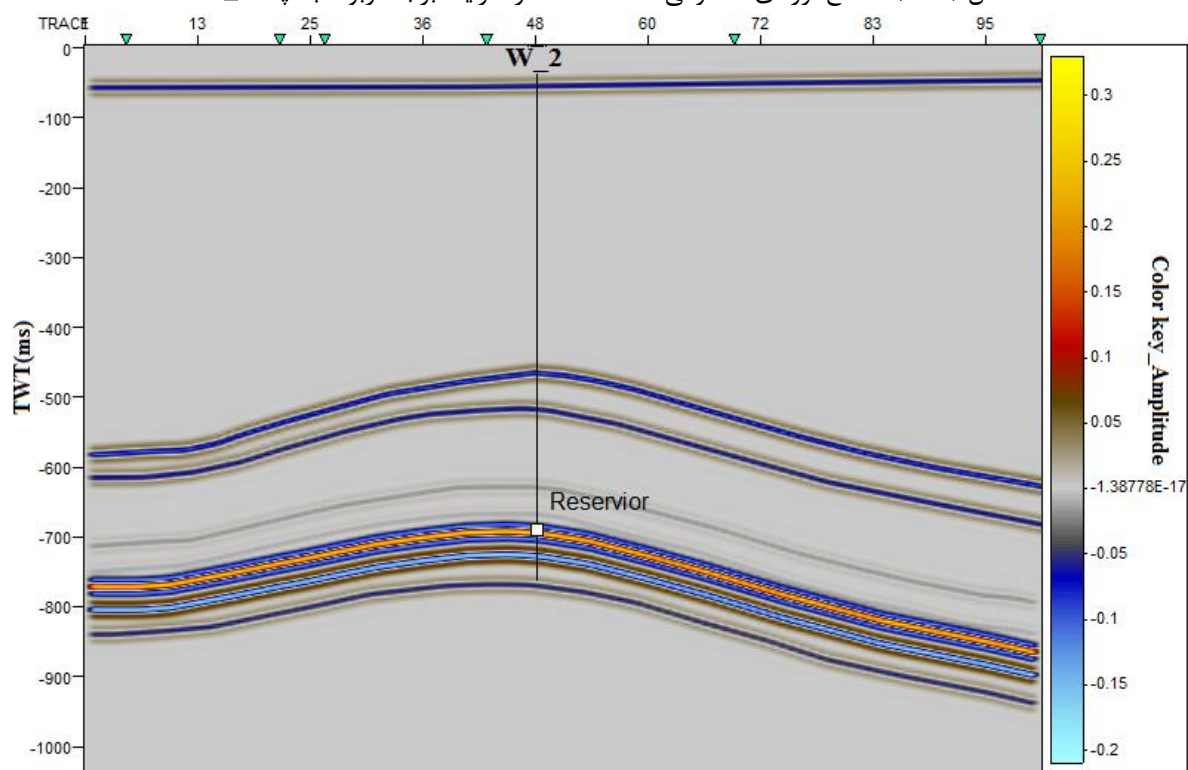
2



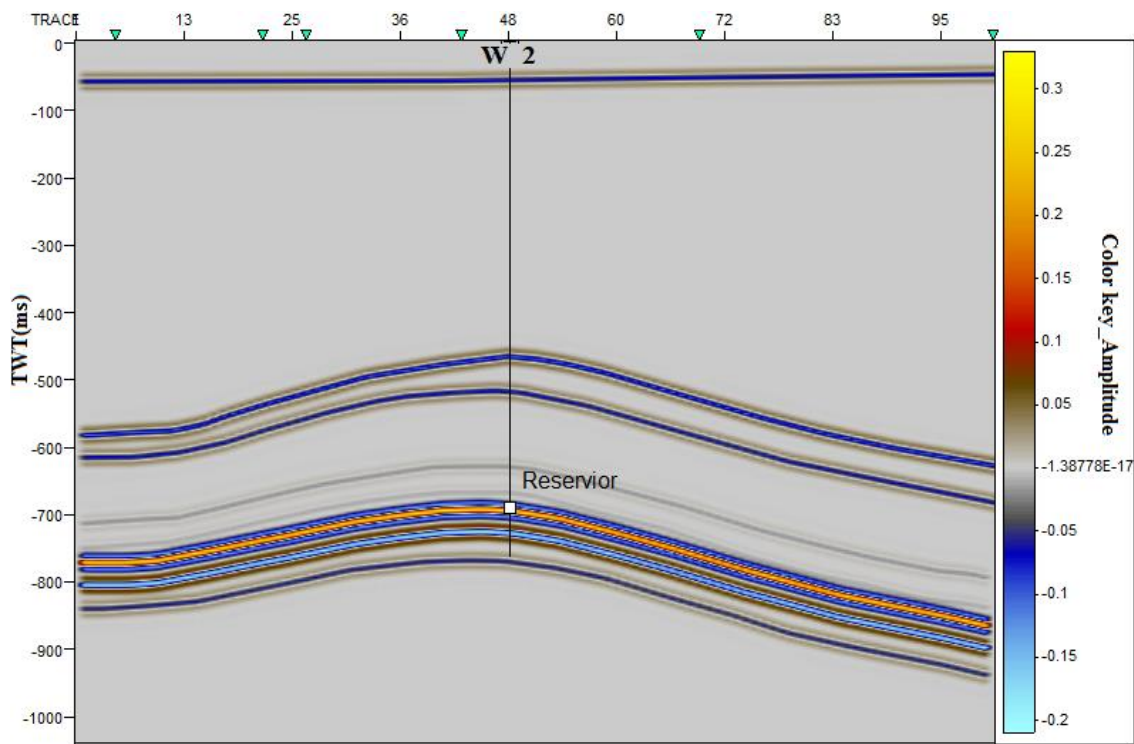
شکل (ث-۱): مقطع لرزه‌ای واقعی گذرنده از چاه W_2.



شکل (ث-۲): مقطع لرزه‌ای مصنوعی ساخته شده در شرایط برجا مربوط به چاه W_2.

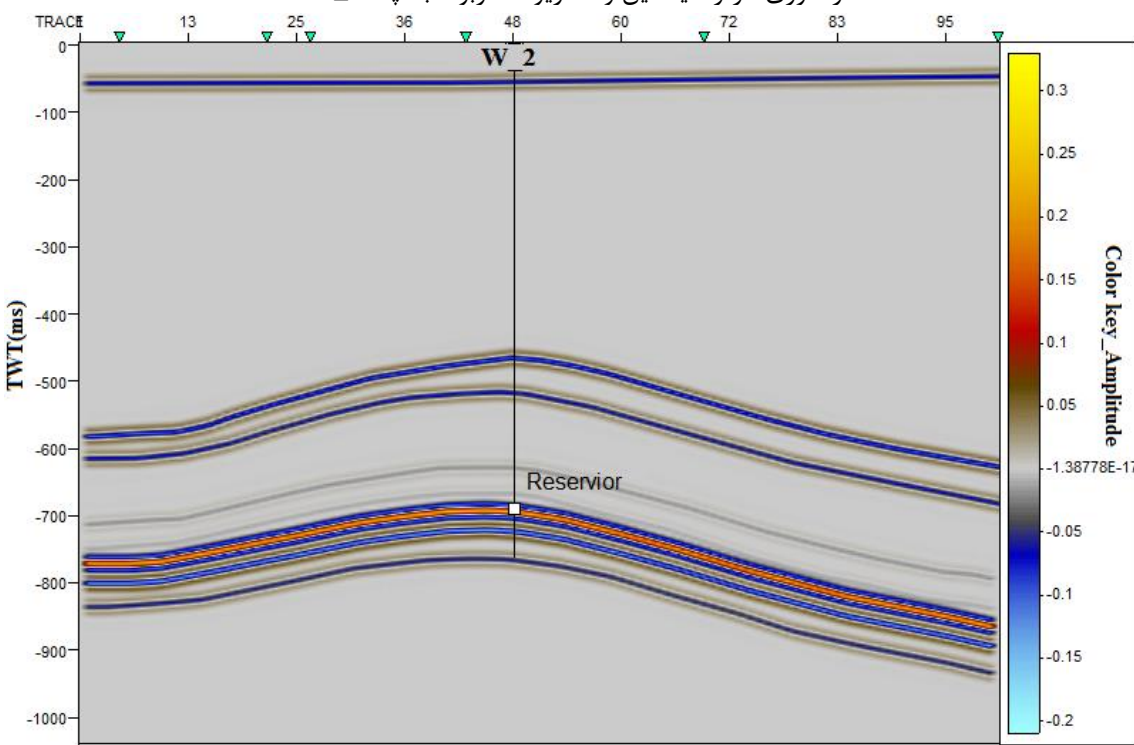


شکل (ث-۳): مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.



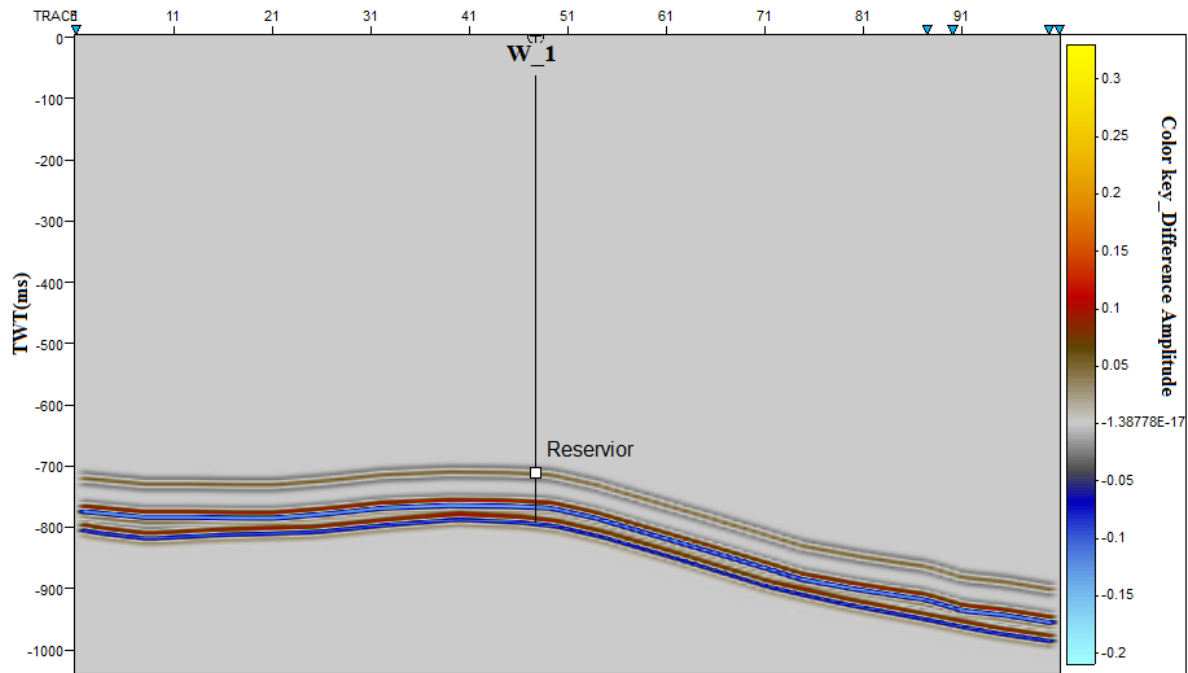
شکل (ث-۴): مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده

از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.

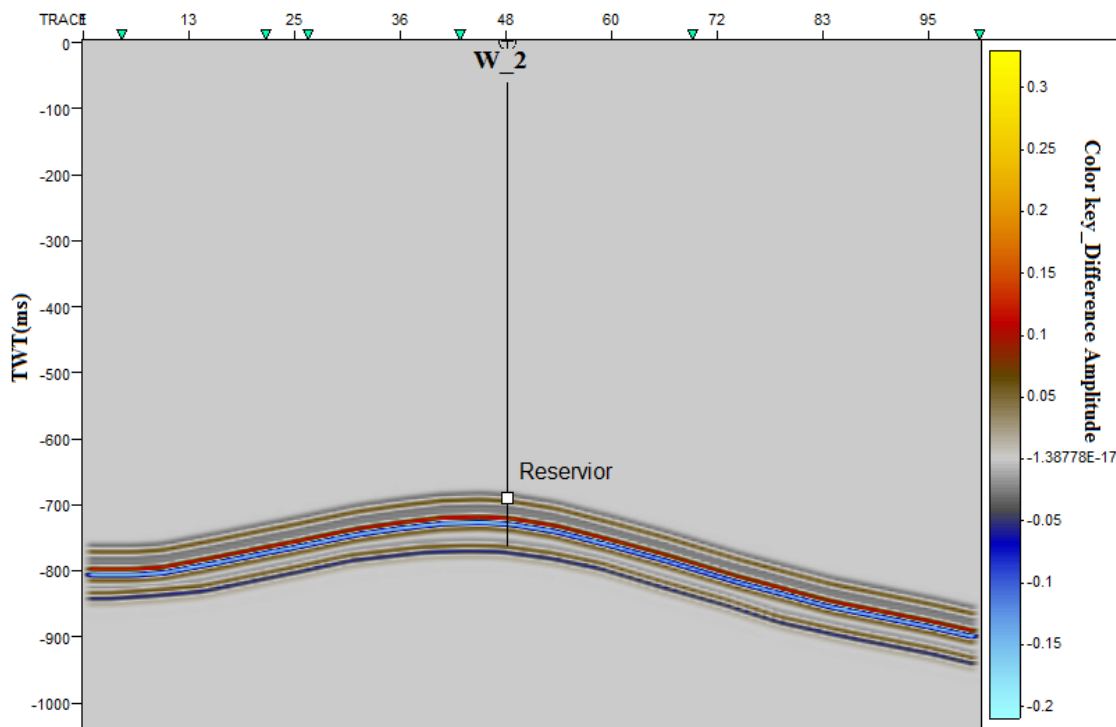


شکل (ث-۵): مقطع لرزه‌ای مصنوعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

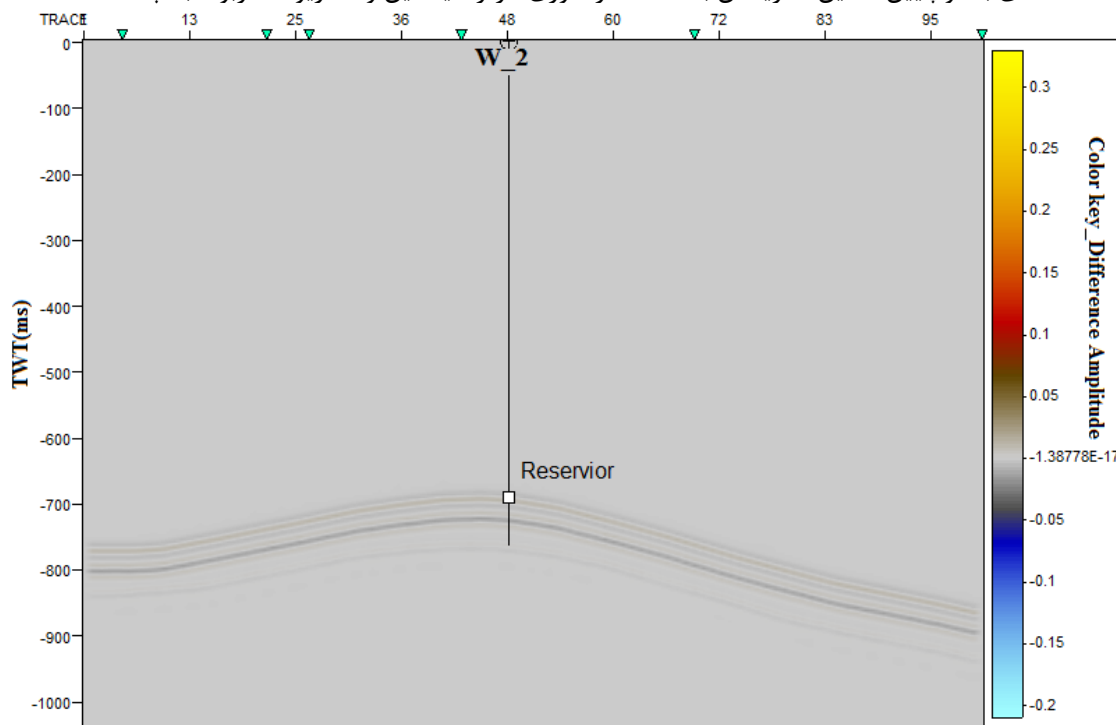
ث-۲ نتایج مربوط به تفاضل بین مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال در چاه W-2



شکل (ث-۶): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط برجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع-شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

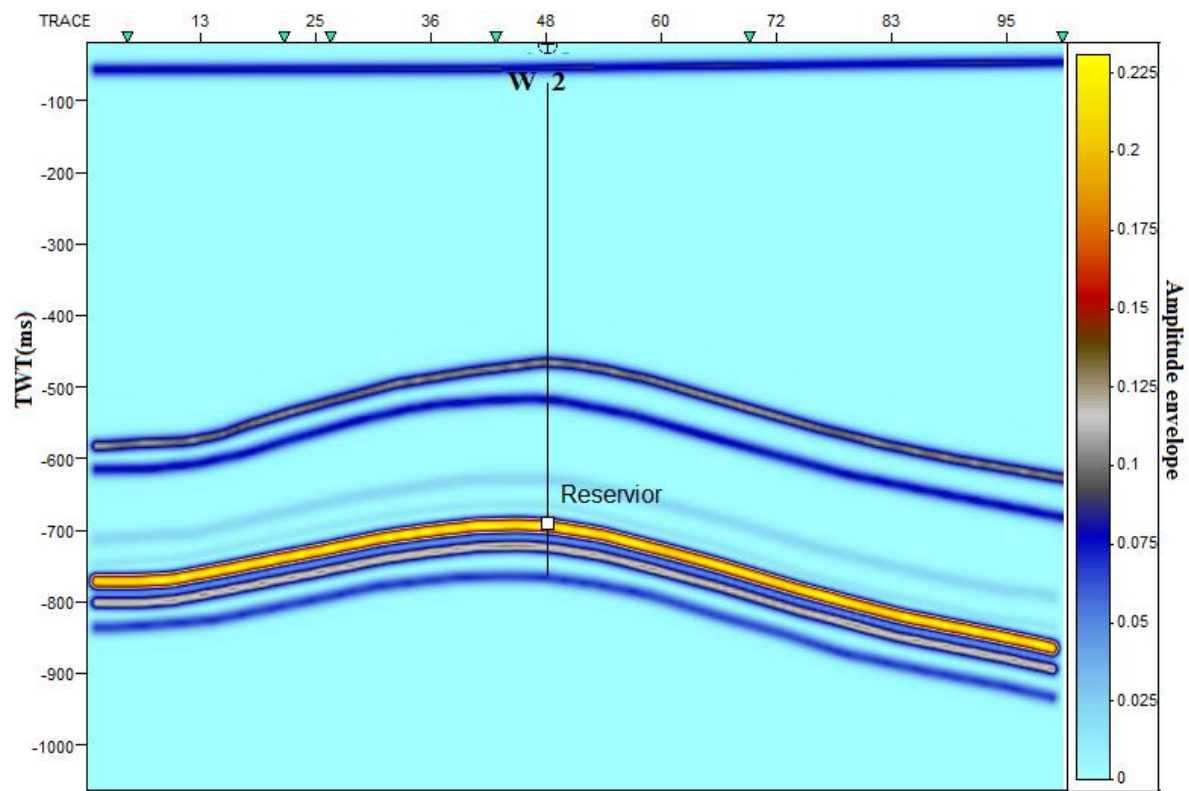


شکل (ث-۷): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط درجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل میانگین بهبودیافته
 حدهای بالا و پایین هشین-اشریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.

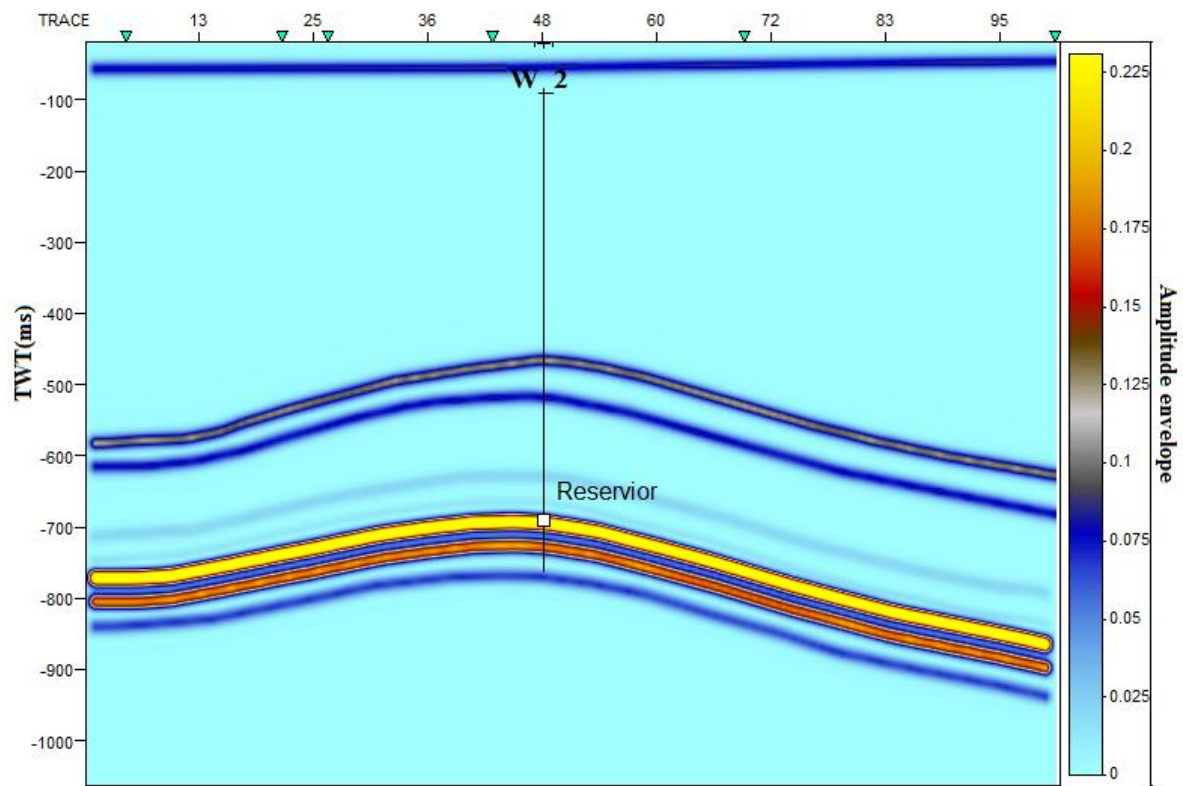


شکل (ث-۸): تفاضل مدل لرزه‌ای مصنوعی در شرایط درجا و بعد از جانشینی سیال با استفاده از مدل گسمن در اشباع-
 شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

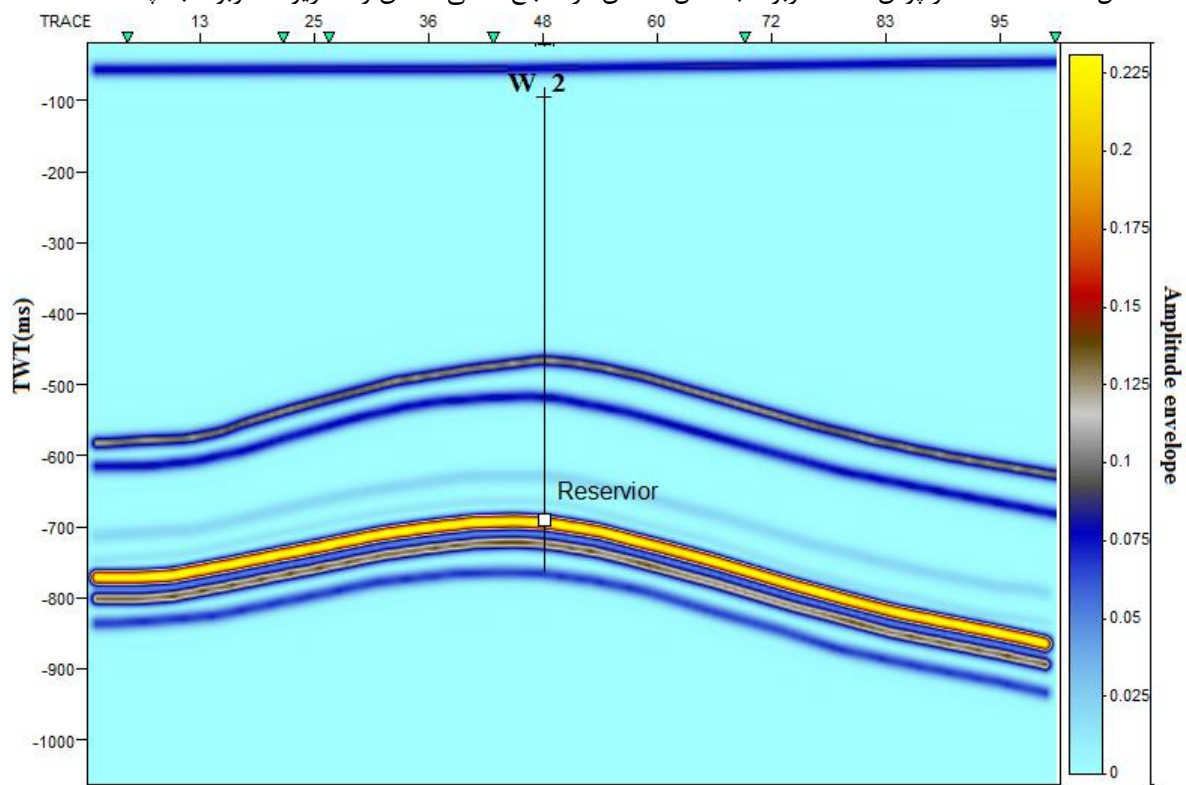
ث-۳ نتایج مربوط به نشانگر پوش دامنه در چاه W_2



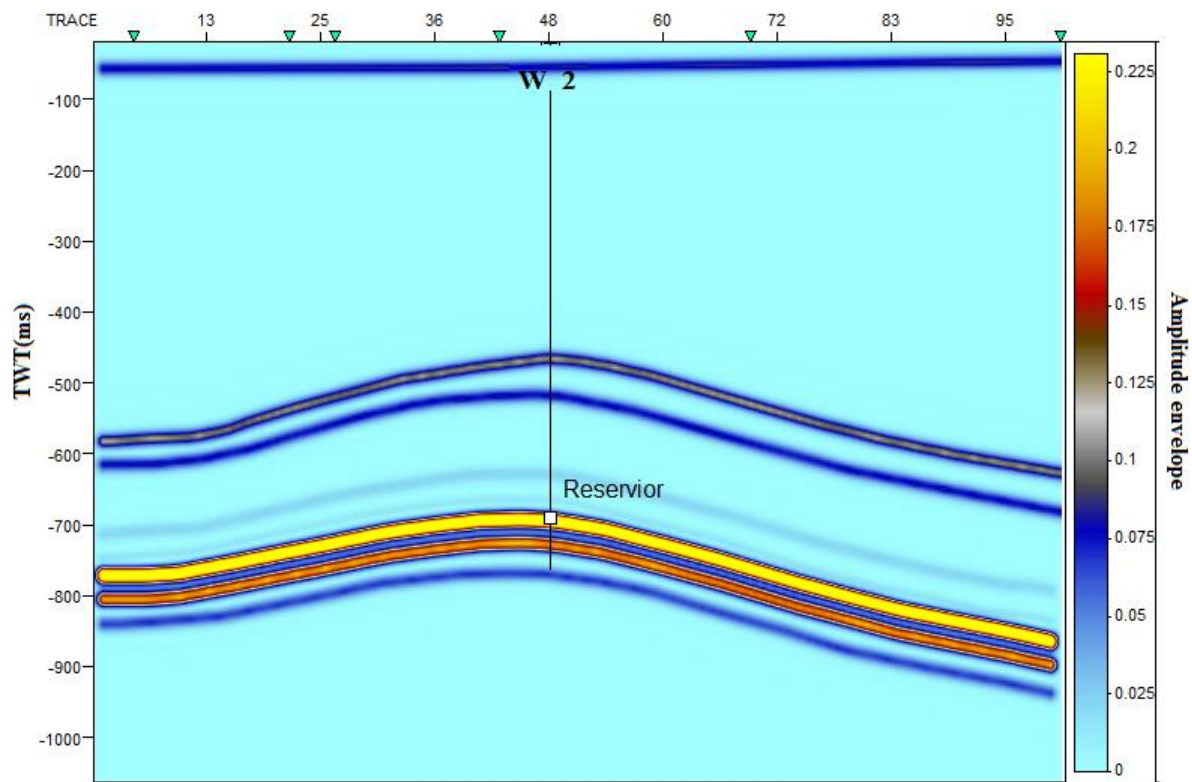
شکل (ث-۹): نشانگر پوش دامنه برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_2.



شکل (ث-۱۰): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

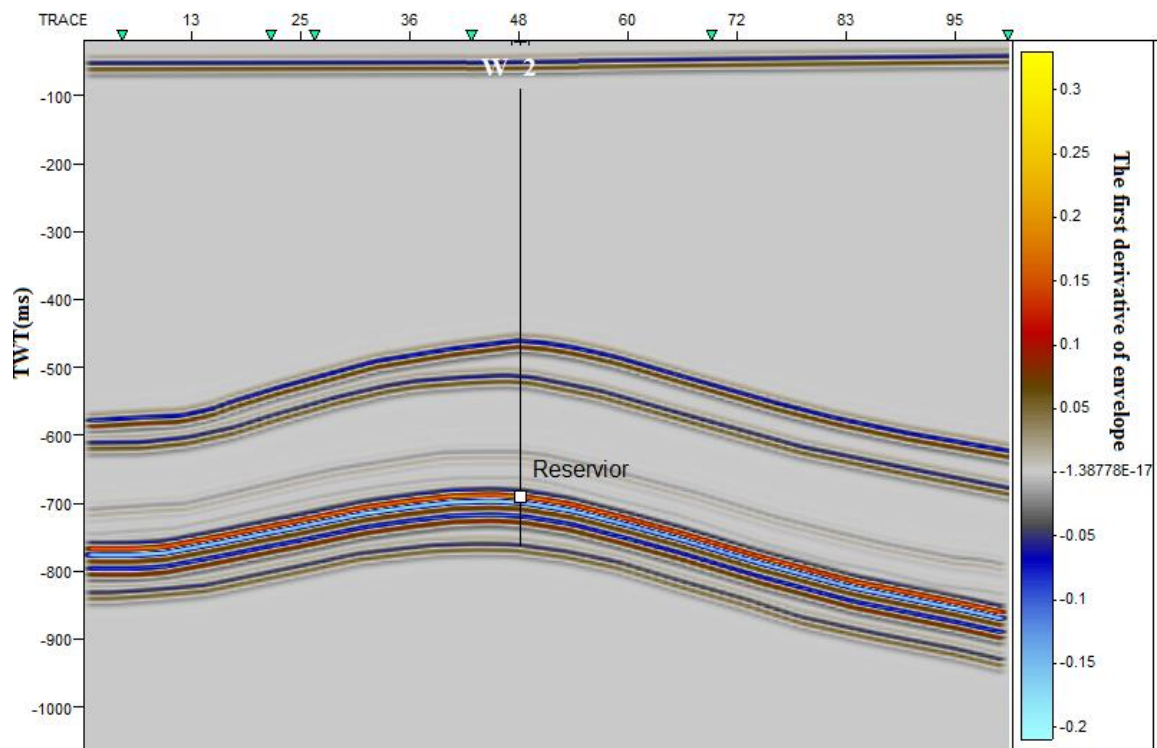


شکل (ث-۱۱): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

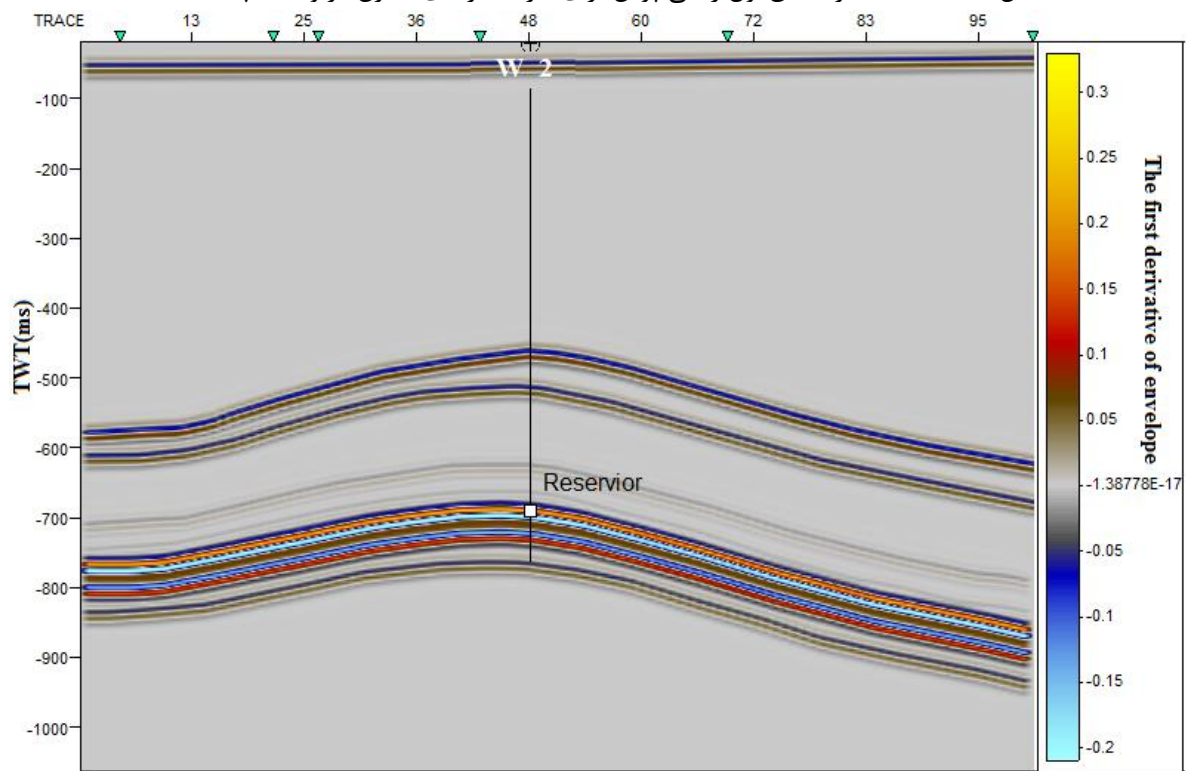


شکل (ث-۱۲): نشانگر پوش دامنه مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.

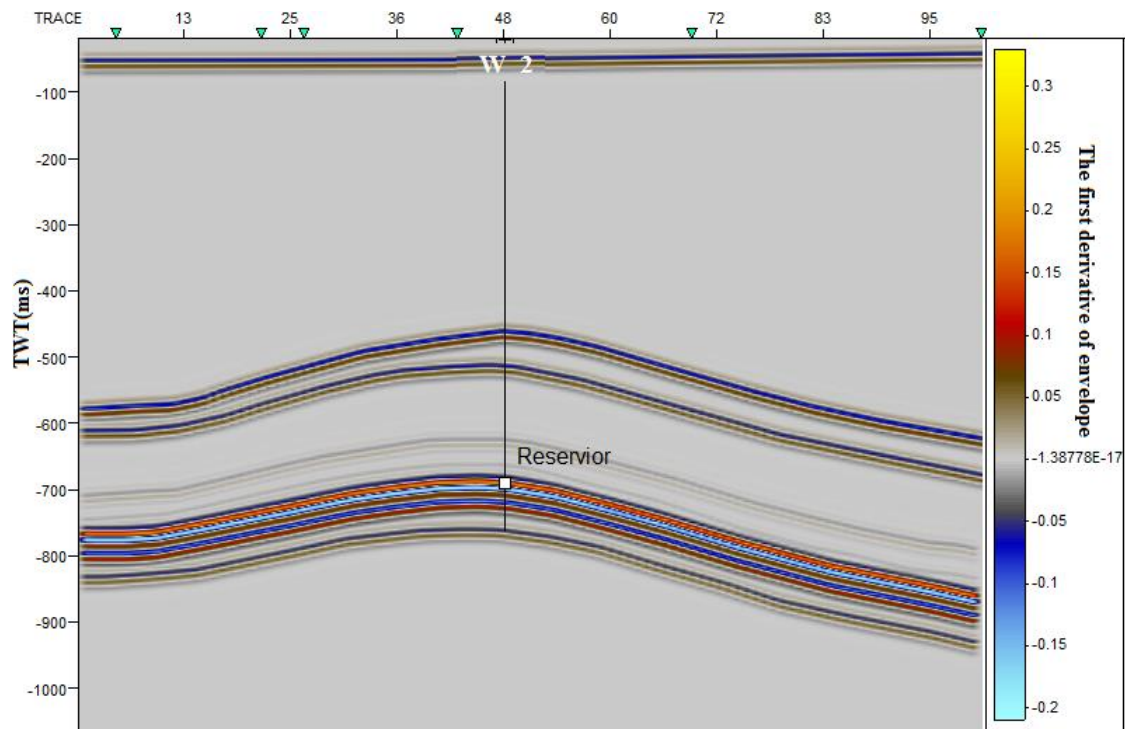
ث-۴ نتایج مربوط به نشانگر مشتق اول زمانی پوش، مشتق دوم زمانی پوش و مجذور دامنه در چاه W_2



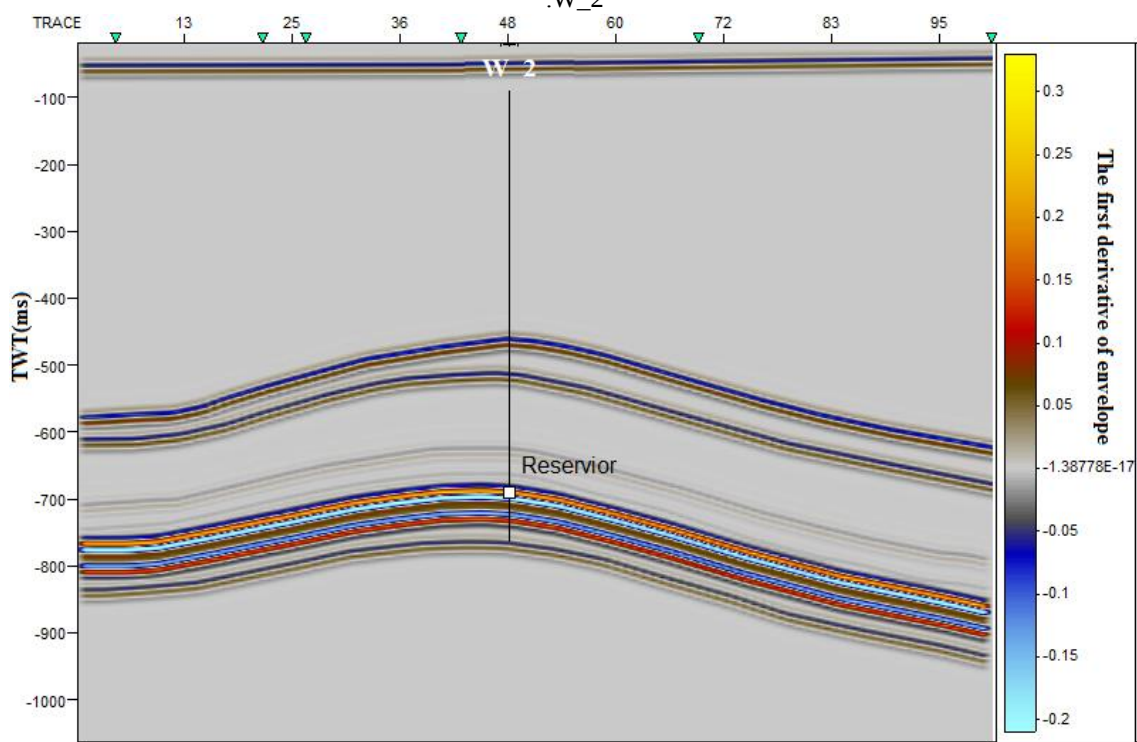
شکل (ث-۱۳): نشانگر مشتق اول زمانی پوش برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_2.



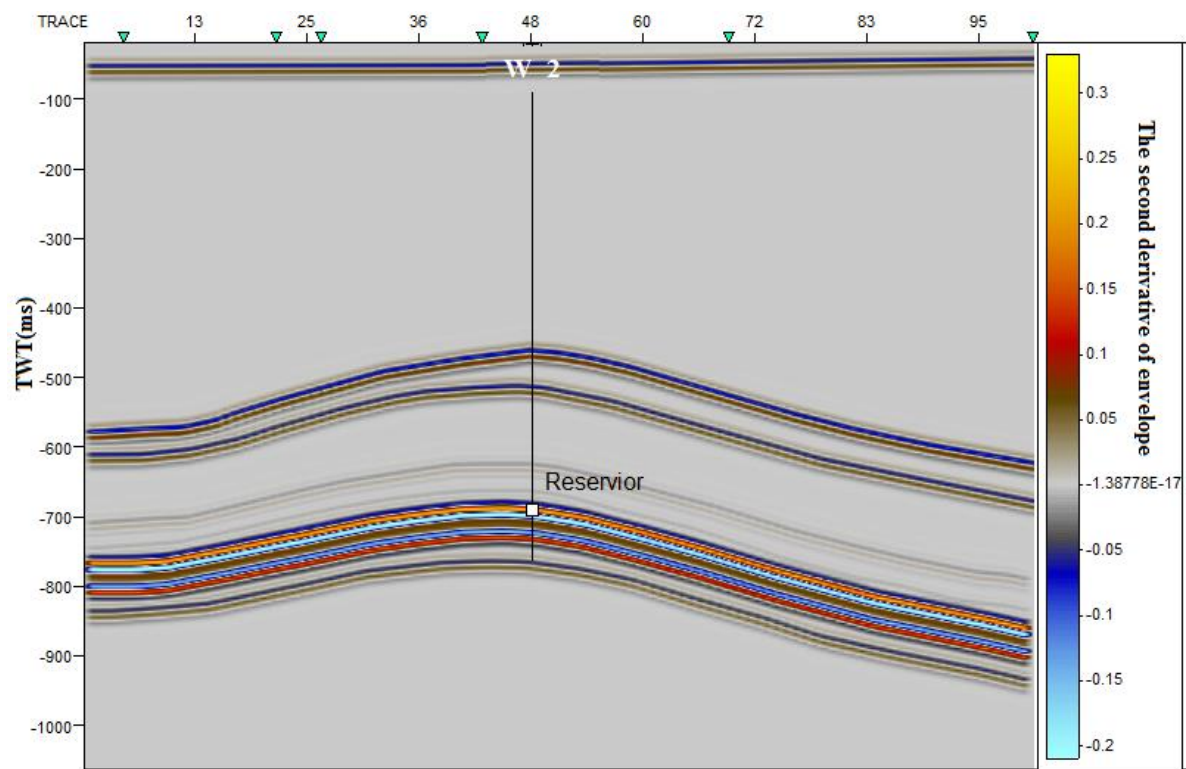
شکل (ث-۱۴): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.



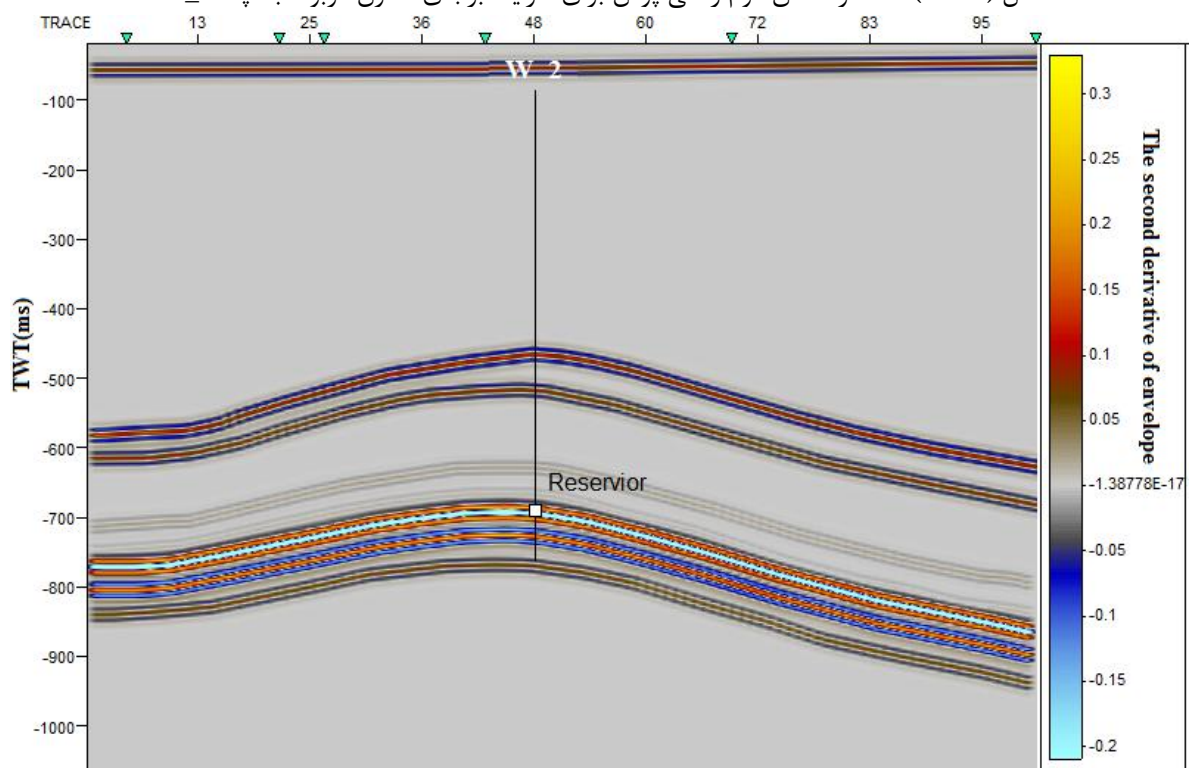
شکل (ث-۱۵): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.



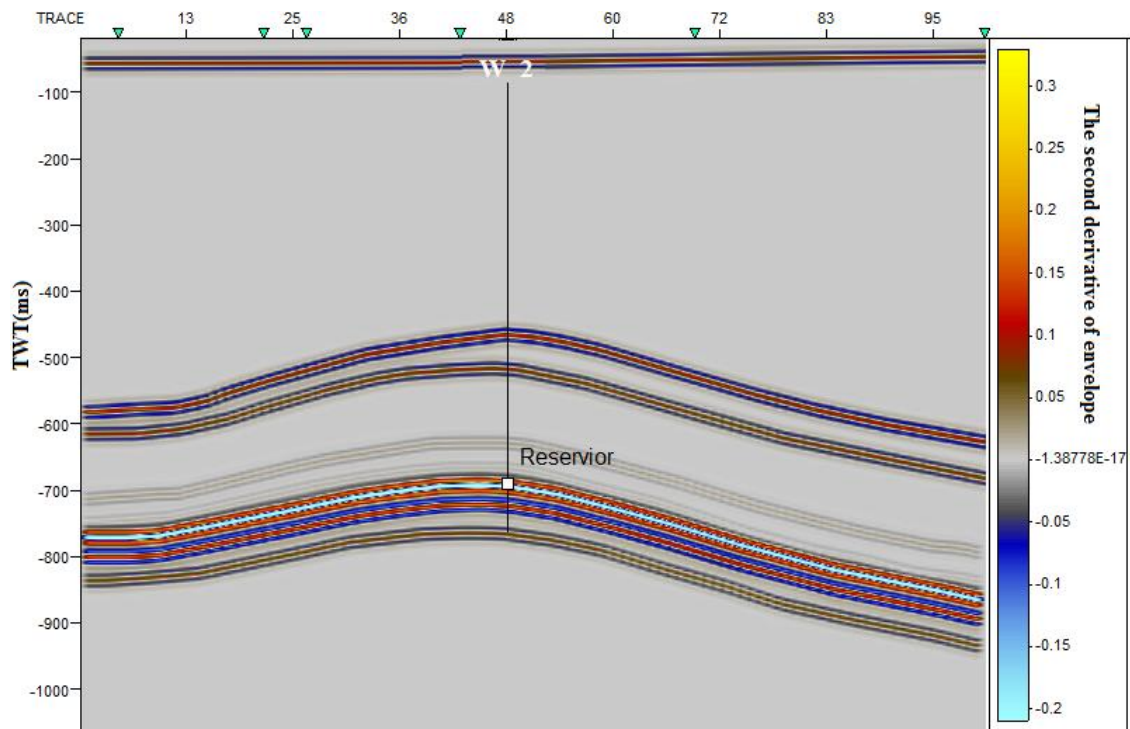
شکل (ث-۱۶): نشانگر مشتق اول زمانی پوش مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.



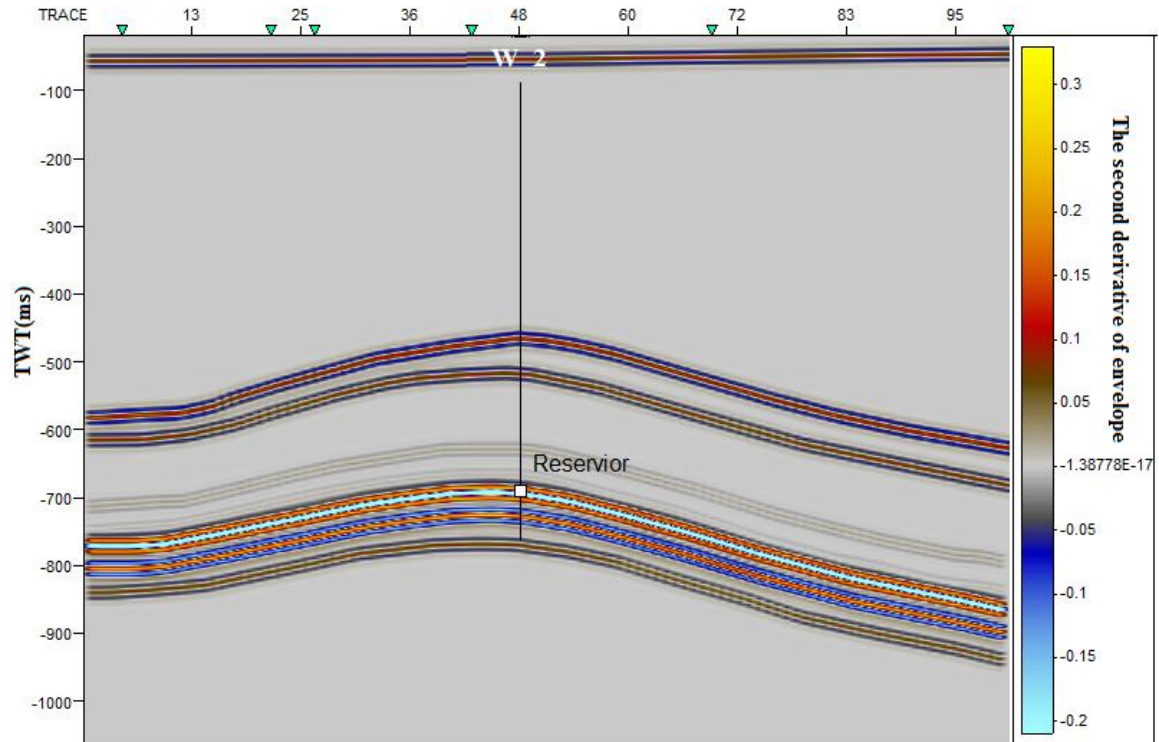
شکل (ث-۱۷): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_2.



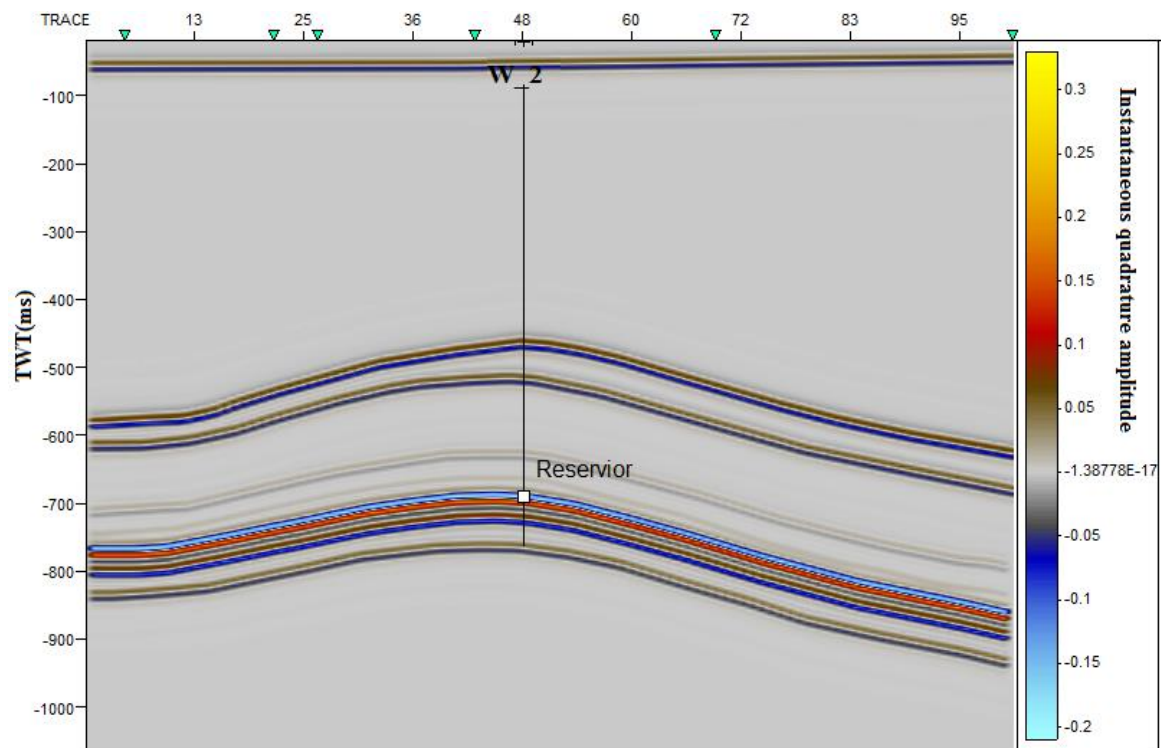
شکل (ث-۱۸): نشانگر مشتق دوم پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2



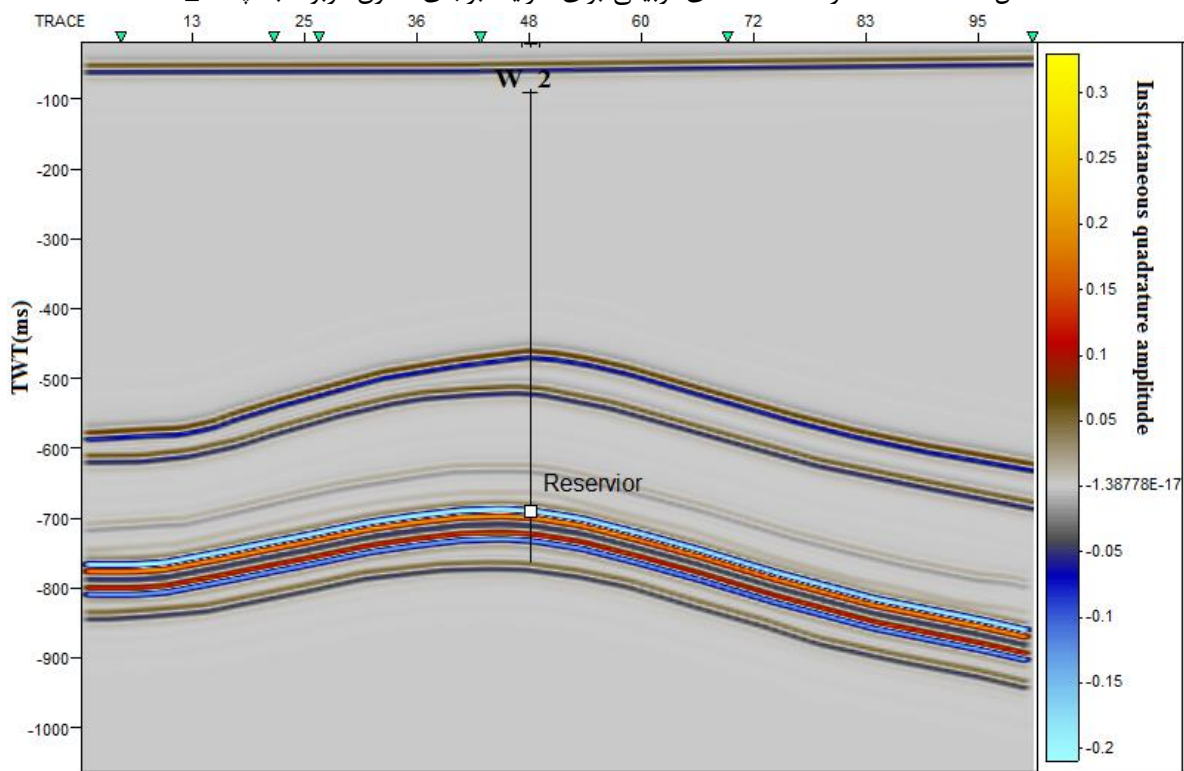
شکل (ث-۱۹): نشانگر مشتق دوم پوش مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.



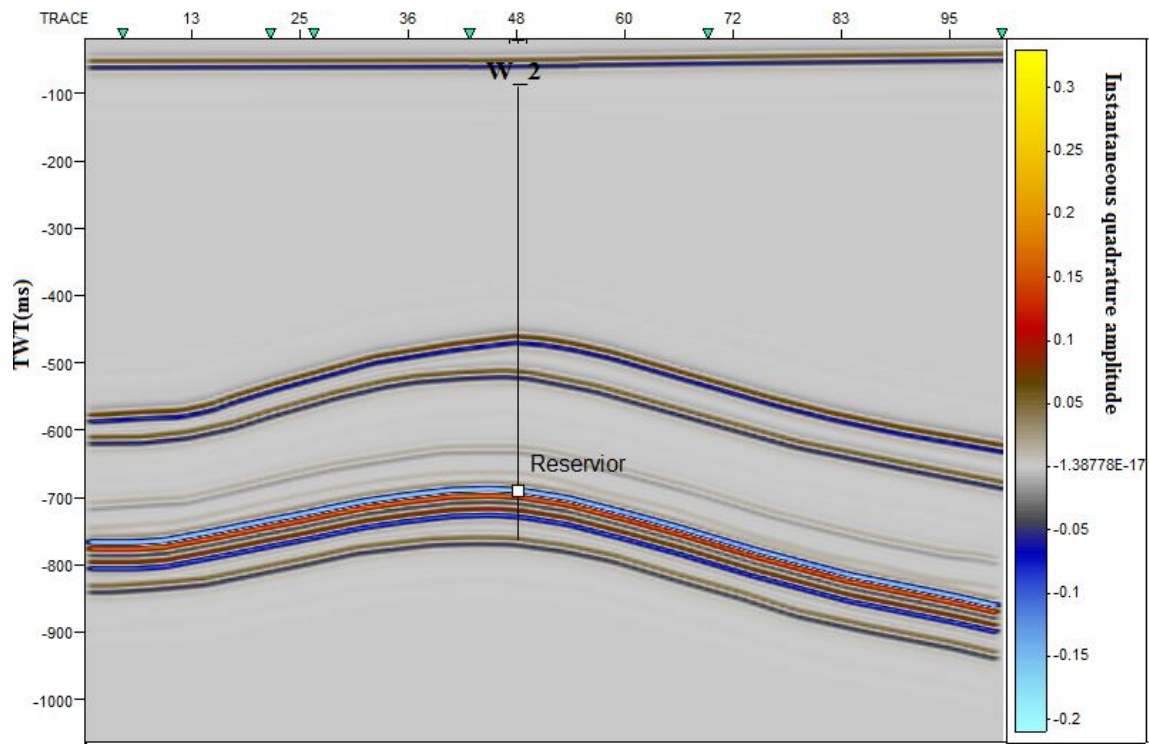
شکل (ث-۲۰): نشانگر مشتق دوم زمانی پوش مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.



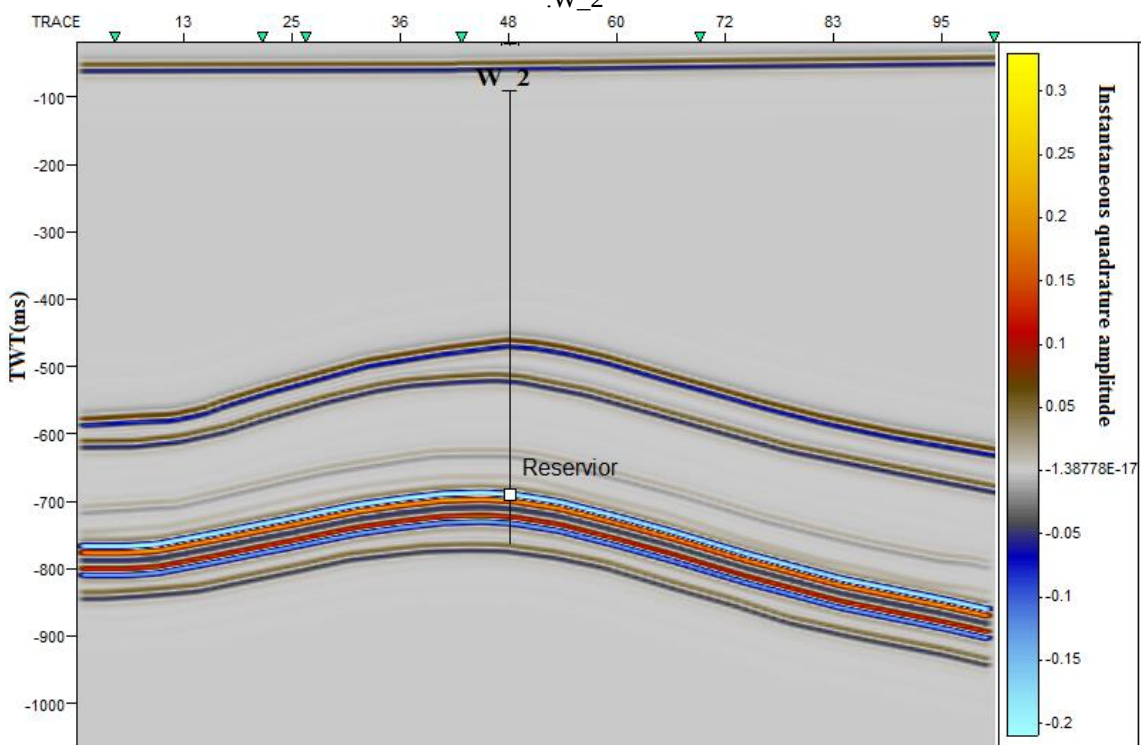
شکل (ث-۲۱): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_2.



شکل (ث-۲۲): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

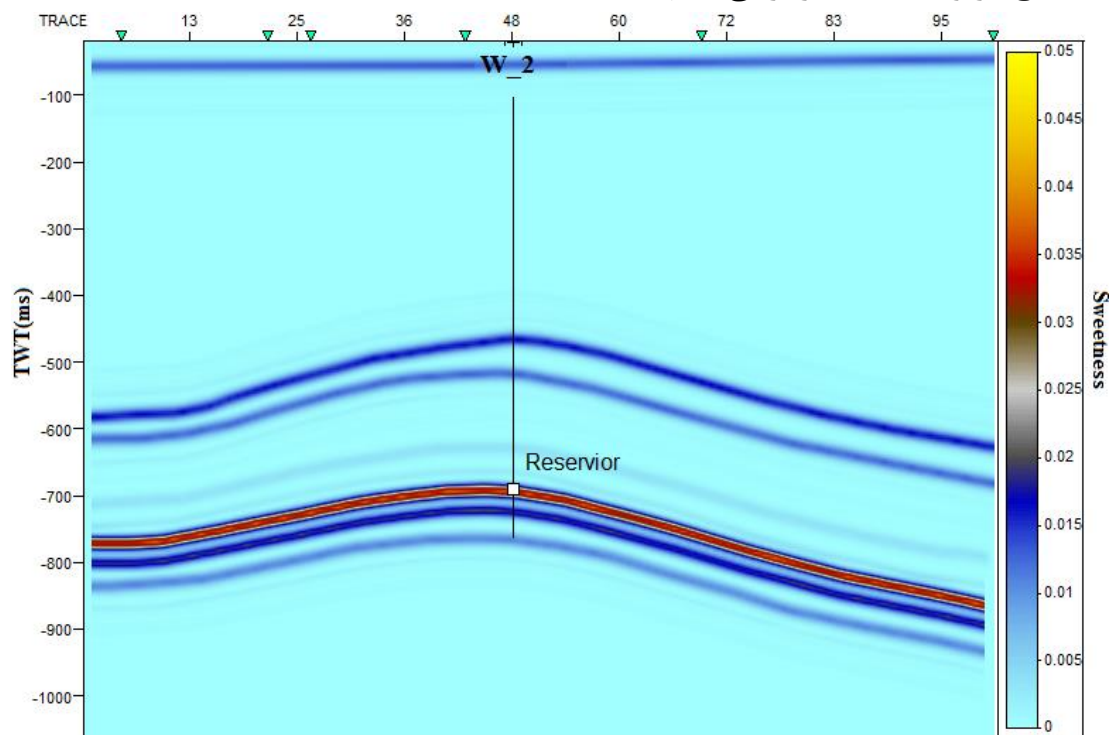


شکل (ث-۲۳): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.

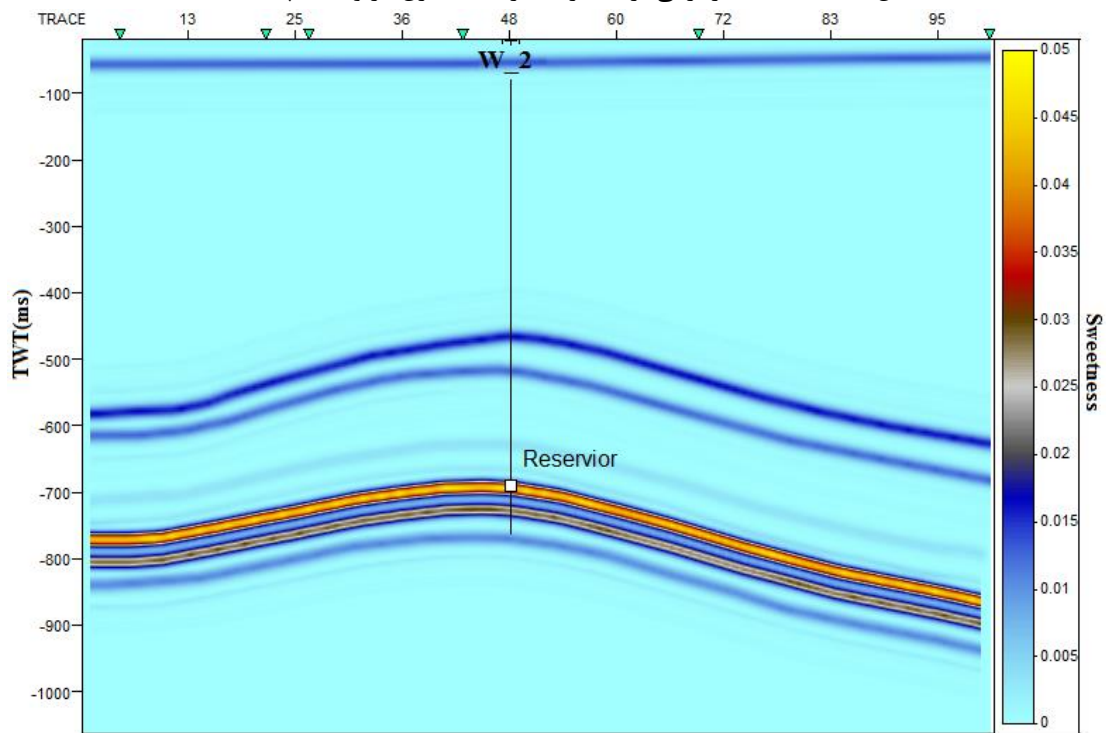


شکل (ث-۲۴): نشانگر دامنه لحظه‌ای تربیعی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته حدهای بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-میندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.

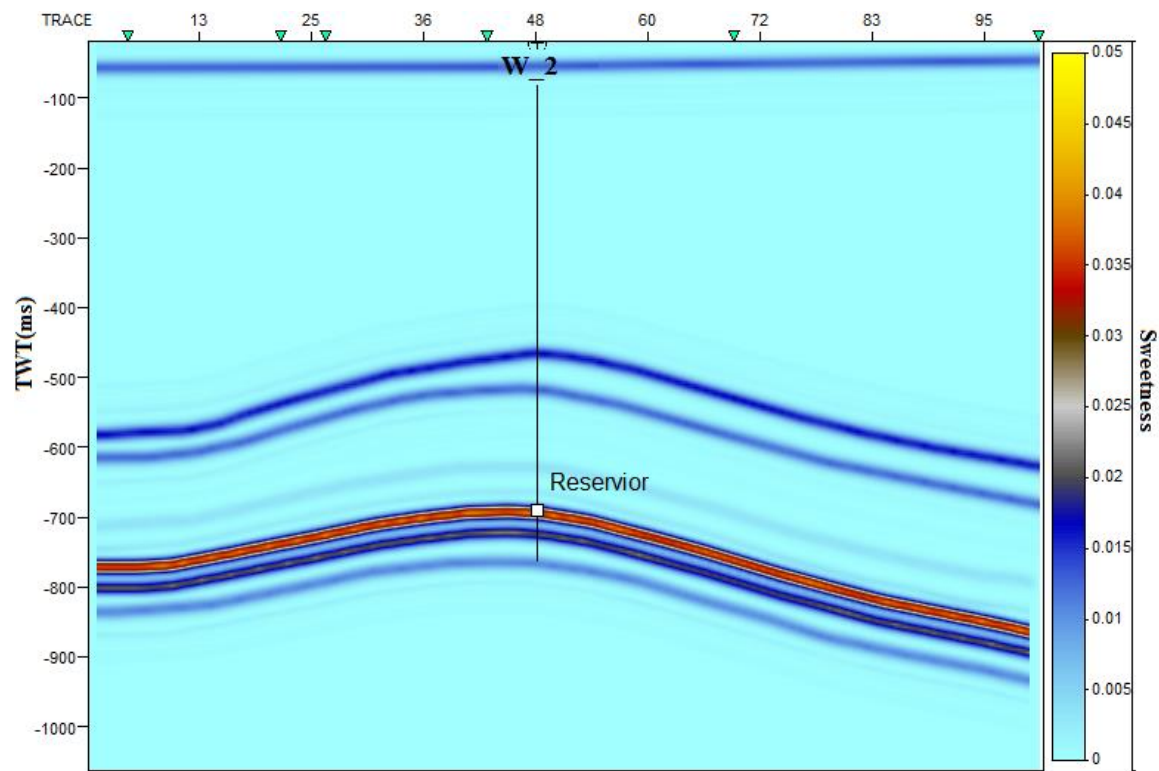
ث-۵ نتایج مربوط به نشانگر نرمی در چاه W_2



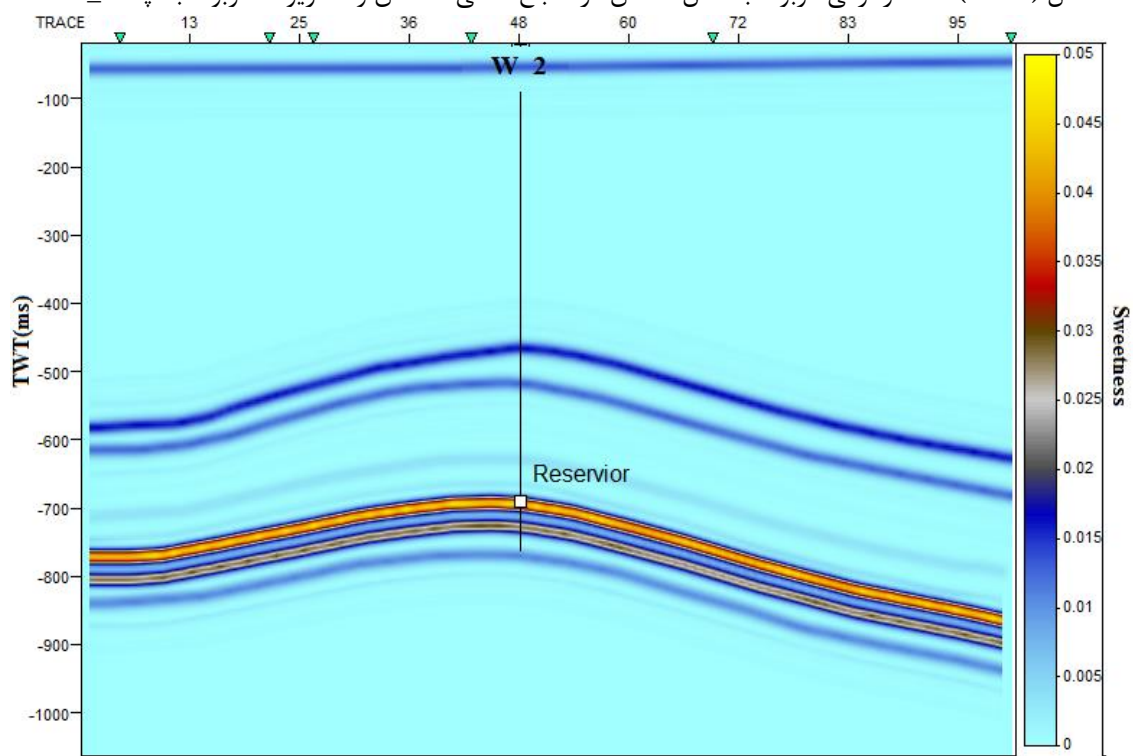
شکل (ث-۲۵): نشانگر نرمی برای شرایط برجای مخزن مربوط به چاه W_2.



شکل (ث-۲۶): نشانگر نرمی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی همگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.



شکل (ث-۲۷): نشانگر نرمی مربوط به مدل گسمن در اشباع‌شدگی ناهمگن و سناریو A مربوط به چاه W_2.



شکل (ث-۲۸): نشانگر نرمی مربوط به مدل میانگین بهبودیافته ده‌های بالا و پایین هشین-اشتریکمن با استفاده از تئوری هرتز-مپندلین و سناریو A مربوط به چاه W_2.

Abstract

The variation of seismic signal properties which depends on the amount of oil production and fluid replacement in reservoir, can provide re-measurement of seismic data. The objectives of this study is to investigate the relationship between different rock physics models for one of the oil fields in the Persian Gulf sandstone reservoir. Then the effects of fluid substitution on compressional wave velocity, shear wave velocity and density are calculated. Finally the changes of seismic signal properties in seismic forward modeling is studied.

The results of this study indicate that the Gassmann rock physics model and the improved lower and upper boundaries of Hashin-Shtrikman average model, can be taken as an appropriate rock physics models for calculating of the dry bulk modulus of the selected reservoir. In addition, the results show the fluid substitution in two different scenarios is more than 10 percent change in compressional wave velocity for the Gassmann model of homogeneous saturation, while it is less than 1 percent in heterogeneous saturation for both wells of W_1 and W_2. The determination coefficient between compressional wave velocity values of the Gassmann and the improved lower and upper boundaries of Hashin-Shtrikman models in W_1 and W_2 wells was determined 0.825 and 0.696 respectively. The mean square error was also estimated 0.089 and 0.113 respectively for these wells. So it is concluded that the average of the upper and lower boundaries of the improved Hashin-Shtrikman model based on the Hertz-Mindlin theory is an appropriate model for this reservoir.

According to the considered scenarios for fluid substitution and the results of seismic modeling, it can be concluded while the amount of reservoir oil production reaches to the 15 percent of its insitu value and when 10 percent gas is substituted for the produced oil, the seismic signal amplitude at the top of the reservoir can be increased due to the reduction of the compressional wave velocity and due to this effect seismic survey can be done again. It will be possible when reservoir fluid distribution is homogenous. Otherwise, if reservoir saturation is heterogeneous type, for more oil production, the seismic operation will be provided other time.

The results of seismic attributes for fluid substitution indicated that among the amplitude envelope, the first derivative of amplitude envelope, the second derivative of amplitude envelope, the quarter amplitude and the sweetness attributes, the sweetness and the amplitude envelope attributes are able to show the fluid substitution adequately.

Keywords: Rock physic, seismic forward modeling, seismic attributes, fluid substitution.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

**A comparison of rock physics models with seismic responses related
to the fluid change in one of the Iranian sandstone oil reservoirs**

Bahareh Fereidooni

Supervisors:

Dr. Ali Moradzadeh

Dr. Amin Roshandel Kahoo

Advisers:

Dr. S. Hesam Kazemeini

February 2016