

لَا إِلَهَ إِلَّا اللَّهُ

مازنده به آنیم که آرام نکیریم

موجیم که آسودگی ما، عدم ماست

صائب تبریزی



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش لرزه‌شناسی

## تحلیل طیفی تغییرات دامنه امواج لرزه‌ای بازتابی با دورافت (AVO)

نگارنده: حمیدرضا حسین پور

اساتید راهنما:

دکتر امین روشندل کاهو

دکتر محمد رداد

استاد مشاور

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

مهرماه ۱۳۹۹

تقدیم به پدر و مادرم  
که تار و پود زندگی ام،  
از مردانگی پدر و مهر مادرم است.

## تقدیر و قدردانی

بائشکر و قدردانی از آقای دکتر روشندل که با صبوری تمام، راهنمای من در انجام این پژوهش بوده اند و به هیچ طریقی نمی توان زحمات بی ثوابه و بردباری های بزرگ شان را ارج نهاد؛ و همچنین سپاس از آقای دکتر رداد که بدون مشاوره و کمک های ایشان انجام این پژوهش میسر نبود و نیز شکر از آقای دکتر سلیمانی که از مشورت ایشان بهره گرفته شد.

## تعهدنامه

اینجانب حمیدرضا حسین پور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش لرزه شناسی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان “تحلیل طیفی تغییرات دامنه امواج لرزه ای بازتابی با دورافت (AVO)“ تحت راهنمایی دکتر امین روشندل کاهو و دکتر محمد رداد متعهد می شوم:

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

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

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

تحلیل دامنه برحسب دورافت یا AVO Analysis، یکی از مهم‌ترین روش‌های اکتشاف منابع هیدروکربنی است که طی چند دهه اخیر توسط متخصصان حوزه اکتشاف به‌شدت موردتوجه قرار گرفته است، معادلات اساسی AVO که به بررسی تغییرات دامنه امواج لرزه‌ای در فواصل مختلف چشمه و گیرنده (دورافت) می‌پردازند، تقریب‌های متفاوتی از معادلات زوئپرتیس هستند. با ساخت مقاطع مختلف نشانگرهای AVO، اکتشاف محتوای سیال، تخلخل و لیتولوژی یا سنگ‌شناسی امکان‌پذیر می‌گردد. اهمیت این روش از آنجا دوچندان می‌گردد که AVO روشی مطلوب در تفکیک و جداسازی زون‌های حاوی ماسه‌سنگ‌های آبدار و گازدار و به‌خصوص هیدروکربن‌های سبک می‌باشد.

از سوی دیگر امواج یک منبع لرزه‌ای، یک سیگنال باند محدود است که از فرکانس‌های مختلف ایجاد شده است. به دلیل پدیده جذب غیر الاستیک، در طی انتشار امواج لرزه‌ای در زمین، دامنه فرکانس‌ها دچار افت می‌گردند، از طرفی چون زمین مانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند، نرخ افت دامنه (انرژی) در فرکانس‌های بالا نسبت به فرکانس‌های پایین، بسیار بیشتر است. از آنجاکه آنالیز AVO نیازمند دامنه حقیقی و معتبر است، دامنه فرکانس‌های بالای تضعیف‌شده در داده‌های لرزه‌ای، تصاویری از مقاطع نشانگری AVO خواهد داد که تار و محو است، در نتیجه وضوح و کیفیت تفکیک را کاهش می‌دهد. به دلیل اینکه ثابت‌شده است، بیشترین آثار تغییر دامنه موج لرزه‌ای در برابر دورافت در فرکانس‌های کوچک‌تر از فرکانس غالب می‌باشند، در این پایان‌نامه، با انجام تحلیل AVO بر روی مقاطع تک فرکانس در فرکانس‌های پایین و استخراج مقاطع نشانگری از آن‌ها، برای حل مسئله مذکور تلاش شده است. بررسی‌های انجام‌شده بر روی داده‌های واقعی و مصنوعی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مقاطع نشانگری با تحلیل AVO متعارف مبین این بود که مقاطع نشانگری به‌دست‌آمده از تحلیل AVO نشان می‌دهد مقطع تک فرکانس داده لرزه‌ای در محدوده فرکانس‌های پایین، دارای وضوح بهتری در مقاطع نشانگری تحلیل AVO نسبت به داده

با پهنای باند فرکانسی کامل می‌باشد. درنهایت، با مقایسه مقاطع نشانگری از هردو داده طبیعی و واقعی حاصل‌شده، فرکانسی در محدوده فرکانس‌های پایین به دست آمد که به‌عنوان "فرکانس طلایی" نامیده شد، چراکه مقاطع تک فرکانس آن، واضح، دقیق و باکیفیت‌ترین مقاطع نشانگری را در تحلیل AVO می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل AVO، معادلات زوئپریتس، فرکانس غالب، نشانگرهای ژئوفیزیکی، برانبارش

## فهرست

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ۱- فصل اول مقدمه.....                                                               | ۱  |
| ۱-۱ مقدمه و تاریخچه.....                                                            | ۲  |
| ۱-۲ سابقه موضوع و فرض‌های اولیه.....                                                | ۴  |
| ۱-۳ تقریب‌های زوئپریتس.....                                                         | ۷  |
| ۱-۴ ضرورت انجام تحقیق.....                                                          | ۸  |
| ۲- فصل دوم مبانی تئوری AVO.....                                                     | ۱۱ |
| ۲-۱ تقریب‌های زوئپریتس و AVO.....                                                   | ۱۲ |
| ۲-۱-۱ تقریب آکی و ریچارد.....                                                       | ۱۲ |
| ۲-۱-۲ تقریب شوی.....                                                                | ۱۳ |
| ۲-۱-۳ تقریب بورتفیلد.....                                                           | ۱۳ |
| ۲-۲ مقایسه تقریب‌های زوئپریتس در یک مدل خاص.....                                    | ۱۴ |
| ۲-۳ تئوری تحلیل‌های AVO.....                                                        | ۱۶ |
| ۲-۴ کلاس‌های AVO.....                                                               | ۱۸ |
| ۳- فصل سوم تحلیل AVO تک فرکانس.....                                                 | ۲۱ |
| ۳-۱ طیف فرکانسی و لزوم استخراج مقاطع تک فرکانس.....                                 | ۲۲ |
| ۳-۲ پدیده جذب، تضعیف دامنه و تأثیر در طیف فرکانسی.....                              | ۲۴ |
| ۳-۳ استخراج مقاطع تک فرکانس.....                                                    | ۲۶ |
| ۳-۴ مدل مصنوعی.....                                                                 | ۲۸ |
| ۳-۵ مدل طبیعی.....                                                                  | ۳۱ |
| ۴- فصل چهارم استخراج و مقایسه مقاطع نشانگری.....                                    | ۳۳ |
| ۴-۱ استخراج مقاطع نشانگری و مقایسه خروجی‌ها.....                                    | ۳۴ |
| ۴-۲ مقایسه مقاطع نشانگری داده مدل مصنوعی در حالت تمام فرکانس و حالات تک فرکانس..... | ۳۴ |
| الف: نشانگر گرادیان.....                                                            | ۳۴ |
| ب: نشانگر تقاطع.....                                                                | ۳۶ |
| پ: نشانگر حاصل ضرب.....                                                             | ۳۸ |
| ۴-۳ مقایسه مقاطع نشانگری داده واقعی در حالت تمام فرکانس و فرکانس غالب.....          | ۴۰ |
| الف: مقایسه مقاطع نشانگری گرادیان.....                                              | ۴۰ |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| ب: مقایسه مقاطع نشانگری تقاطع.....                         | ۴۰        |
| پ: مقایسه مقاطع نشانگری حاصل ضرب.....                      | ۴۰        |
| ۴-۴ خروجی گرادیان و اینترسپت نرم افزار HampsonRussell..... | ۴۵        |
| الف: نشانگر گرادیان.....                                   | ۴۵        |
| ب: نشانگر تقاطع.....                                       | ۴۶        |
| پ: نشانگر حاصل ضرب.....                                    | ۴۷        |
| <b>۵- فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات.....</b>             | <b>۴۹</b> |
| ۵-۱: نتیجه گیری.....                                       | ۵۰        |
| الف: تحلیل روی مقاطع تک فرکانس با فرکانس پایین.....        | ۵۰        |
| ب: انتخاب فرکانس پایین متناسب با شرایط.....                | ۵۰        |
| پ: استفاده از نشانگرهای مختلف.....                         | ۵۱        |
| ت: پاسخ بهینه در مدل های واقعی.....                        | ۵۱        |
| ۵-۲: پیشنهادات جهت بهبود نتایج تحلیل AVO.....              | ۵۲        |
| الف: تحلیل روی داده ی تک فرکانس.....                       | ۵۲        |
| ب: استخراج بهترین مقطع با تبدیل های مختلف.....             | ۵۲        |
| پ: استفاده از فرکانس های پایین.....                        | ۵۲        |
| ت: استفاده از (Band Pass).....                             | ۵۲        |
| ث: استفاده از فرکانس طلایی.....                            | ۵۲        |

## فهرست اشکال و نمودارها

### فصل اول

شکل (۱-۱) قانون اسنل و کاربر آن در امواج P و S..... ۴

### فصل دوم

شکل (۱-۲) نمودار روند تغییرات ضریب بازتاب..... ۱۵

شکل (۲-۲) نمودار کراس پلات‌های AVO..... ۲۱

### فصل سوم

شکل (۱-۳) نمودار تشکیل هر سیگنال از فرکانس‌های متفاوت..... ۲۴

شکل (۲-۳) نمودار داده مصنوعی بدون نویز..... ۲۵

شکل (۳-۳) نمودار طیف فرکانسی داده مصنوعی حاوی نویز..... ۲۹

شکل (۴-۳) نمودار مدل مصنوعی ساخته‌شده در نرم‌افزار GXII..... ۳۰

شکل (۵-۳) نمودار داده برداشت‌شده توسط نرم‌افزار GXII بعد از اعمال تصحیح NMO..... ۳۲

شکل (۶-۳) مقایسه تغییرات دامنه در برابر دورافت برای ماسه‌سنگ‌های آبدار و گازدار..... ۳۳

شکل (۷-۳) نمودار بخشی از داده برداشت‌شده در عملیات واقعی در CDP های اطراف گمانه..... ۳۴

۴- فصل چهارم استخراج و مقایسه مقاطع نشانگری..... ۳۵

شکل (۱-۴) مقایسه نشانگر گردایان در فرکانس‌های برای داده مصنوعی متفاوت..... ۳۷

- شکل (۲-۴) مقایسه نشانگر تقاطع در فرکانس‌های برای داده مصنوعی متفاوت..... ۳۹
- شکل (۳-۴) مقایسه نشانگر حاصل ضرب در فرکانس‌های برای داده مصنوعی متفاوت..... ۴۱
- شکل (۴-۴) مقایسه مقاطع نشانگری داده واقعی در حالت تمام فرکانس و تک فرکانس غالب ..... ۴۳
- شکل (۵-۴) مقایسه نشانگر گرادیان برای داده واقعی در فرکانس‌های متفاوت..... ۴۴
- شکل (۶-۴) مقایسه نشانگر تقاطع برای داده واقعی در فرکانس‌های متفاوت..... ۴۵
- شکل (۷-۴) مقایسه نشانگر حاصل ضرب برای داده واقعی در فرکانس‌های متفاوت..... ۴۶
- شکل (۸-۴) نشانگر گرادیان برای داده واقعی در نرم‌افزار HampsonRussell..... ۴۷
- شکل (۹-۴) نشانگر تقاطع برای داده واقعی در نرم‌افزار HampsonRussell..... ۴۸
- شکل (۱۰-۴) نشانگر حاصل ضرب برای داده واقعی در نرم‌افزار HampsonRussell..... ۴۹

## فهرست جداول

### فصل اول

جدول (۱-۱) تقریب‌های زوئپریتس ..... ۸

### فصل دوم

جدول (۱-۲) خصوصیات مختلف کلاس‌های تقریب‌های زوئپریتس ..... ۲۰

### فصل سوم

جدول (۱-۳) مشخصات عملیات مصنوعی انجام‌شده ..... ۳۱

فصل اول:

مقدمه

## ۱-۱ مقدمه و تاریخچه:

تحلیل دامنه برحسب دورافت یا AVO<sup>۱</sup> بیش از دو دهه است که به عنوان یکی از بهترین روش های مستقیم شناسایی هیدروکربن شناخته شده است. این تحلیل شامل بررسی تغییرات دامنه امواج لرزه ای در فواصل مختلف چشمه و گیرنده (دورافت<sup>۲</sup>) می باشد (چوپرا و مارفورت<sup>۳</sup>، ۲۰۰۶). تقریب های معادلات زوئپرتیس<sup>۴</sup> اساس معادلاتی است که بنیان تحلیل AVO هستند (آکی و ریچارد<sup>۴</sup>، ۱۹۸۰). استراندر<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۸۲ و ۱۹۸۴) نشان دادند در فرآیند بازتاب امواج لرزه ای از مرز ماسه سنگ و شیل اشباع از گاز، در مقایسه با بازتاب از شیل اشباع از آب، در صورتی که شیل اشباع از گاز دارای نسبت پواسون<sup>۶</sup> کمتری در مقایسه با شیل آبدار باشد، آنگاه این دو حالت دارای رفتار دامنه در مقابل دورافت متفاوتی خواهند بود که از این تفاوت به راحتی می توان برای شناسایی ماسه سنگ های گازی در داده های لرزه ای سطحی استفاده نمود. در ادامه چیبوریس<sup>۷</sup> (۱۹۸۴ و ۱۹۸۷) روشی را ارائه داد که اثر عوامل دیگر به جز ضریب بازتاب را از تغییرات دامنه با دورافت حذف نمود و یک نشانگر<sup>۸</sup> موفق در شناسایی هیدروکربن و به خصوص گاز معرفی نمود. مدل مورد مطالعه آن ها در حضور مقدار کمی از هوا یا گاز درون حفرات سنگ ها باعث کاهش شدید سرعت موج فشارشی (P) می شود. در صورتی که سرعت موج برشی (S) تقریباً بدون تغییر می ماند. این تغییر در نسبت سرعت موج (P) به سرعت موج (S) افزاز انرژی متفاوت برای حالت اشباع از سیال و اشباع از گاز را سبب می شود. حضور گاز در برخی از مخازن باعث افزایش دامنه با دورافت می شود در حالی که در اکثر موارد دامنه بازتاب با دورافت کاهش می یابد. (آلن و پدی<sup>۹</sup>، ۱۹۹۳) فاتی<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۹۴) از تحلیل دامنه برحسب دورافت در شناسایی گاز از روی داده های سه بعدی لرزه ای استفاده کردند.

<sup>1</sup> Amplitude versus Offset (AVO)

<sup>2</sup> Offset

<sup>3</sup> Chopra and Marfort

<sup>4</sup> Aki and Richard

<sup>5</sup> Ostrander

<sup>6</sup> Poisson ratio

<sup>7</sup> Chiburis

<sup>8</sup> Attribute

<sup>9</sup> Allen and Peddy

<sup>10</sup> Fatti

در این پژوهش تحلیل دامنه در برابر دورافت در مقطع فرکانس غالب<sup>۱</sup> و مقاطع تک فرکانس با فرکانس پایین در مقایسه با تحلیل در داده لرزه‌ای اولیه مورد مقایسه قرار گرفته است. مقطع فرکانس-زمان یک مقطع برش داده‌شده از حجمی است که فرکانس‌های مختلف برحسب زمان را در فواصل مختلف دورافت نشان می‌دهد. ترکیب تمامی این فرکانس‌ها روی محور فرکانس، شکل سیگنال داده لرزه‌ای برداشت‌شده و به بیانی دیگر، کل مقطع لرزه‌ای زمان برحسب دورافت را نشان می‌دهد و اثبات می‌شود چنانچه با اعمال فیلتر، بتوان داده اصلی را به فرکانس‌های پایین محدود کرد، نشانگرهای حاصل‌شده از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود. در این پژوهش، برای دو مدل مصنوعی و واقعی علاوه بر استخراج مقاطع نشانگرهای AVO از داده اصلی، مقاطع تک فرکانس در فرکانس غالب و فرکانس‌های پایین‌تر نیز مورد تحلیل AVO قرار گرفته است، با مقایسه مقاطع نشانگری استخراج‌شده از مدل مصنوعی بر آن شدیم تا اثبات کنیم تحلیل AVO در حالتی که داده لرزه‌ای تنها با فرکانس غالب است، می‌توان مقاطع نشانگری واضح‌تری نسبت به داده اصلی استخراج کرد و چنانچه از فرکانس‌های پایین‌تر استفاده گردد کیفیت، وضوح و به‌خصوص تفکیک، در مقاطع نشانگری مطلوب‌تر خواهد بود. به کمک نتایج حاصل‌شده در مرحله قبل، تحلیل AVO بر روی داده طبیعی یک عملیات لرزه‌ای واقعی انجام گردید. در ادامه به مقایسه مقاطع نشانگری هر کدام از این داده‌های تک فرکانس با فرکانس غالب و داده اصلی پرداخته شد و وضوح بهتر در مقاطع نشانگری AVO در محدوده فرکانس‌های پایین، بررسی گردید. در نهایت این پژوهش به دنبال اثبات این موضوع است که چنانچه داده مورد مطالعه، تک فرکانس و با فرکانس پایین‌تر از فرکانس غالب باشد نشانگرهای AVO بیشینه تغییرات را در مقایسه حالاتی که فرکانس‌های دیگر یا داده کامل اولیه (که شامل همه فرکانس‌ها) باشد را نشان خواهد داد. در نتیجه مقاطع نشانگری تحلیل AVO، دارای وضوحی بهینه نسبت به حالت‌هایی که این تحلیل روی داده‌های اولیه انجام شود، خواهند داشت.

---

<sup>1</sup> Dominant Frequency

## ۲-۱ سابقه موضوع و فرض‌های اولیه:

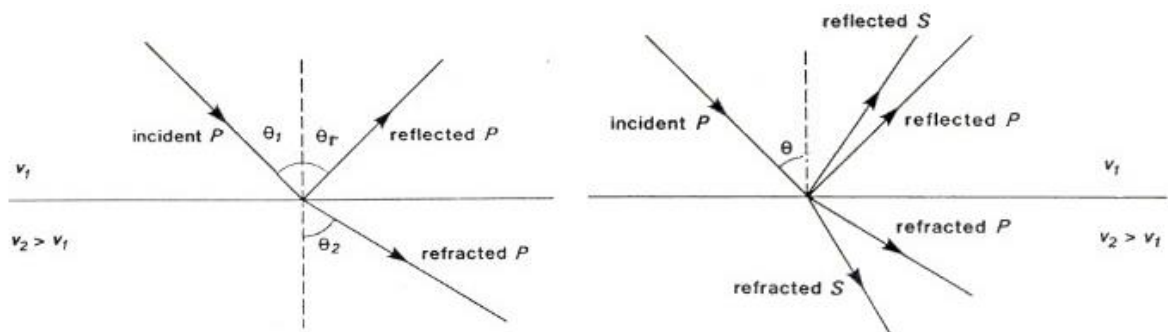
در مطالعات لرزه‌شناسی، انتشار امواج لرزه‌ای انتشاریافته در زمین با نتیجه‌گیری از اصل هویگنس<sup>۱</sup> امواج کروی انتشاریافته در زمین در فواصل دور مانند امواج با جبهه موج تخت در نظر گرفته می‌شوند و برای مطالعه چگونگی انتشار امواج در مدل‌های زمین‌شناسی، شعاع موج که خطی فرضی و عمود بر جبهه موج‌های تخت تعریف می‌شود. به علاوه علم لرزه‌شناسی برای انتشار امواج در زمین سه فرض مهم را در نظر می‌گیرد:

• همسانگرد Isotropic

• همگن Homogeneous

• کشسان Elastic

با در نظر گرفتن فرض‌های یادشده در مکانیک انتشار امواج در لایه‌های زمین و بازتاب و عبور از سطوح بازتابنده توسط قانون اسنل همان‌طور که شکل (۱-۱) نشان می‌دهد، تعریف می‌گردد. ضرایب بازتاب و عبور<sup>۲</sup> که مطالعه تغییرات آن‌ها در زوایای مختلف سرمنشأ آغازین ایجاد و تکامل تئوری AVO است از این قانون استخراج شده است.



شکل (۱-۱) قانون اسنل و کاربر آن در امواج P و S (آکی و ریچارد، ۱۹۸۰)

<sup>۱</sup> Huygens Principle

<sup>۲</sup> Transmitted Coefficient

$$T_p + R_p = 1 \quad (1-1)$$

در رابطه اخیر  $T_p$  ضریب عبور و  $R_p$  ضریب بازتاب می‌باشند که این رابطه را تحت زاویه نرمال فقط برای موج P تعریف شده است. با افزایش زاویه، ضرایب بازتاب (ونیز عبور) تغییر خواهند کرد اساس تحلیل AVO شکل می‌گیرد و با رخ دادن پدیده افراز انرژی دیگر نمی‌توان معادله (1-1) را به این شکل نوشت. به این ترتیب سرعت امواج و زاویه تابش مؤلفه‌هایی هستند که تعریف‌کننده ضریب بازتاب امواج می‌باشند. می‌توان گفت اعمال قوانین اسنل<sup>1</sup> در مطالعات رفتار امواج لرزه‌ای آغازی در مطالعه دامنه در امواج لرزه‌ای شد و پس از آن کوفوئد<sup>2</sup> در ۱۹۵۵ با انجام مطالعات گسترده دیگر در این زمینه به مؤلفه‌های مؤثر دیگر در ضریب بازتاب دست‌یافت. با در نظر گرفتن چگالی و نسبت پواسون به عنوان مؤلفه‌های دیگر دخیل در ضریب بازتاب در یک مدل دولایه‌ای به نتایجی دست‌یافت که مهم‌ترین آن‌ها برای یک مدل دولایه‌ای که مشخصات یکسان به جز سرعت موج P بیشتر در لایه زیرین آنگاه:

- در صورت افزایش نسبت پواسون در لایه زیرین با بزرگ‌تر شدن زاویه تابش، ضریب بازتاب افزایش می‌یابد.
- در صورت افزایش نسبت پواسون در لایه بالا با بزرگ‌تر شدن زاویه تابش، ضریب بازتاب کاهش می‌یابد.
- در صورت افزایش نسبت پواسون به‌طور یکسان در هر دولایه، با بزرگ‌تر شدن زاویه تابش، ضریب بازتاب افزایش می‌یابد.

---

<sup>1</sup> Snell's law

<sup>2</sup> Kufoed

پس از کوفوئد مطالعات دانشمندان حوزه اکتشاف با بهره‌گیری از نتایج مطالعات او و استفاده از معادلات زوئپریتس (رابطه شماره ۲)، به شکل‌گیری رسمی و تکامل روش اکتشافی AVO انجامید. روابط زوئپریتس معادلات اساس و پایه روش تحلیل دامنه در برابر دورافت AVO است. سه پارامتر فیزیکی چگالی، سرعت موج P و سرعت موج S، عوامل مؤثر معادلات زوئپریتس می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} R_p \\ R_s \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1) & -\cos(\varphi_1) & \sin(\theta_2) & \cos(\varphi_2) \\ \cos(\theta_1) & -\sin(\varphi_1) & \cos(\theta_2) & -\sin(\varphi_2) \\ \sin(2\theta_1) & \frac{V_{P_1}}{V_{S_1}} \cos(2\varphi_1) & \frac{\rho_2 V_{S_2}^2 V_{P_1}}{\rho_1 V_{S_1}^2 V_{P_2}} \cos(2\varphi_1) & \frac{\rho_2 V_{S_2} V_{P_1}}{\rho_1 V_{S_1}^2} \cos(2\varphi_2) \\ -\cos(2\varphi_1) & \frac{V_{S_1}}{V_{P_1}} \sin(2\varphi_1) & \frac{\rho_2 V_{P_2}}{\rho_1 V_{P_1}} \cos(2\varphi_2) & \frac{\rho_2 V_{S_2}}{\rho_1 V_{P_1}} \sin(2\varphi_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_1) \\ \sin(2\theta_1) \\ \cos(2\varphi_1) \end{bmatrix} \quad (۲-۱)$$

که در این معادله،  $\rho_2, \rho_1, V_{S_2}, V_{P_2}, V_{S_1}, V_{P_1}, \varphi_2, \varphi_1, \theta_2, \theta_1, T_s, T_p, R_s, R_p$  به ترتیب ضرایب تابش و بازتاب موج P و S، زاویه تابش و عبور موج P و S، سرعت موج P و S در لایه بالا و پایین بازتابنده خواهد بود. به دلیل پیچیدگی معادلات زوئپریتس و وابستگی آن به پارامترهای مختلف از جمله چگالی، سرعت امواج P و S، نسبت پواسون و موارد دیگر، تقریب‌هایی ساده‌شده از معادلات زوئپریتس توسط اساتید و کاوشگران حوزه اکتشاف، معرفی و پیشنهاد گردید (شوی، ۱۹۸۵؛ ریچارد، ۱۹۸۰) که محاسبات فراوان در این معادلات را تسهیل می‌نمود. این معادلات که به تقریب‌های زوئپریتس مشهور گردید، هرکدام با استفاده از ساده‌سازی و ثابت در نظر گرفتن بعضی از پارامترها، دامنه یا ضریب بازتاب امواج بازتابی را برحسب زاویه تابش به دست می‌آورند. در جدول ۱-۱ تقریب‌های مورد استفاده، اشاره شده است. هرکدام از مدل‌های تقریبی در بازه زاویه‌ای خاص و در محیط‌های پتروفیزیکی با شرایط مختلف مربوط به آن مدل، نتیجه بهینه می‌دهد.

### ۳-۱ تقریب‌های ژوئپریتس

به دلیل پیچیدگی‌های معادلات ژوئپریتس و وابستگی آن به مؤلفه‌های مختلف، تقریب‌هایی به‌منظور کاهش و آسان شدن محاسبات توسط کاوشگران حوزه اکتشاف، پیشنهاد گردید که متداول‌ترین آن‌ها در جدول نمایش داده‌شده در شکل (۱-۱) دیده می‌شود. در این تقریب‌ها، ضرایب بازتاب و عبور امواج راحت‌تر محاسبه و روند تغییر دامنه امواج، بدون در نظر گرفت چگالی، سرعت، نسبت پواسون و موارد دیگر محاسبه می‌شود. در مهم‌ترین این تقریب‌ها تنها مؤلفه مؤثر، زاویه تابش است.

جدول (۱-۱) تقریب‌های ژوئپریتس

| Approximation        | Equation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| The Bortfeld         | $R(\theta) = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{V_{P_2} \rho_2 \cos(\theta_2)}{V_{P_1} \rho_1 \cos(\theta_1)} \right) + \sin^2(\theta_1) \left( \frac{1}{q_1^2} - \frac{V_{P_2}^2}{V_{P_1}^2 q_2^2} \right) \times \left( 2 + \frac{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1}}{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \ln \left( \frac{V_{P_2} V_{S_1}}{V_{S_2} V_{P_1}} \right)} \right)$ |
| The Aki and Richards | $R(\theta) \approx A + B \sin^2(\theta) + C \tan^2(\theta) \sin^2(\theta)$                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| The Shuey            | $R(\theta) = A + B \sin^2(\theta)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| The Smith and Gidlow | $R(\theta) = L \frac{\Delta V_P}{V_P} + M \frac{\Delta V_S}{V_S}$ <p>where <math>L = \left( \frac{5}{8} + \frac{1}{2} \tan^2(\theta) - \frac{1}{2} \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2(\theta) \right)</math> and <math>M = -4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2(\theta)</math></p>                                                                                     |
| The Fatti et al      | $R(\theta) = \frac{1}{2} (1 + \tan^2(\theta)) \frac{\Delta I_P}{I_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2(\theta) \frac{\Delta I_S}{I_S} - \left[ \frac{1}{2} \tan^2(\theta) - 2 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2(\theta) \right] \frac{\Delta \rho}{\rho}$                                                                                                         |

## ۴-۱ ضرورت انجام تحقیق

AVO روش نوینی در مبحث اکتشاف به وسیله امواج لرزه‌ای است که همواره در حال گسترش و تکامل می‌باشد. نشانگرهای AVO و کراس پلات‌های<sup>۱</sup> مربوط به آن در حال حاضر مهم‌ترین نتایج در اکتشاف مخازن، لیتولوژی یا سنگ‌شناسی، تشخیص نوع سیال و دیگر عوامل مورد نیاز مبحث اکتشاف است. داده‌های لرزه‌ای بازتابی پیش از برانبارش به عنوان داده ورودی در انجام تحلیل AVO استفاده می‌شوند. بدیهی است که هرچه این داده‌ها معتبرتر باشند خروجی‌های نشانگری و کراس پلات‌ها در نهایت به حقیقت نزدیک‌تر خواهند بود؛ اما عواملی روی این داده‌ها که در حقیقت امواج بازتابی ثبت شده هستند اثرگذار است که از کیفیت و دقت آن‌ها را کاهش داده و دامنه امواج را دستخوش تغییر می‌کند. پدیده جذب<sup>۲</sup> (در فرکانس‌های بالا) و نوفه‌های<sup>۳</sup> تصادفی یا غیر تصادفی از این جمله‌اند. با انجام فرایندهایی همچون حذف نویز می‌توان تا حدودی آثار نامطلوب را از داده‌ها حذف کرد؛ اما اثر جذب انرژی فرآیندی است که نمی‌توان به روش‌های معمول در حذف آن عمل کرد. در این پژوهش بر آن شدیم تا به کمک مقاطع تک فرکانس استخراج شده از داده‌های اصلی که در طیف فرکانسی در محدوده فرکانس‌های پایین و پایین‌تر از پیک فرکانسی (فرکانس غالب) هستند و کمتر دچار پدیده جذب می‌شوند تحلیل AVO را انجام دهیم. این داده‌ها از دقت بیشتری برخوردارند به دلیل اینکه پدیده جذب که به عنوان فیلتر پایین گذر طبیعی عمل می‌کند روی آن‌ها اثر کمتری دارد و در نتیجه مقاطع نشانگری و کلیه خروجی‌های AVO حاصل شده نیز از دقت و اعتبار بالاتری برخوردار خواهند بود. هدف این پژوهش یافتن فرکانسی است که به کمک مقطع استخراجی آن بتوان بهترین مقاطع نشانگری را از نظر وضوح و دقت تفکیک، در هر چهار کلاس AVO یافت. در ادامه نشان داده

---

<sup>1</sup> Cross-Plot

<sup>3</sup> Noise

<sup>2</sup> Absorption Phenomenon

می‌شود، مقطع این فرکانس در تقریب‌های دوجمله‌ای زوئپریتس بهتر عمل می‌کنند و تصاویر حاصل شده از مقاطع نشانگری نسبت به بقیه تقریب‌ها و فرکانس‌ها نتیجه بهتری خواهد داد.



فصل دوم:

# مبانی تئوری AVO

## ۲-۱ تقریب‌های زوئپریتس و AVO

تحلیل AVO بر مبنای معادلات زوئپریتس و تقریب‌های آن بنا گردیده است. مهم‌ترین تقریب‌هایی که می‌توان بهترین و واضح‌ترین مقاطع نشانگری را از آن‌ها استخراج نمود در جدول شماره ۱-۱ ذکر شده است. هر کدام از این تقریب‌ها در شرایط مختلف به کار برده می‌شوند به عبارتی با توجه به لیتولوژی منطقه عملیات، پیش‌بینی نوع سیال، نوع داده و توان پردازش آن بهترین مقاطع نشانگری در شرایط مختلف از هر کدام از این تقریب‌ها قابل استحصال است؛ اما تقریب آکی و ریچارد، شوی و بورتفیلد<sup>۱</sup> بیشتر از سایر تقریب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد به این دلیل پیش‌بینی رفتار تغییرات ضریب بازتاب با دورافت یا به بیانی دیگر با زاویه تابش در این سه تقریب، دقیق تر از بقیه تقریب‌های زوئپریتس است؛ که به بیان آن‌ها پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱-۱ تقریب آکی و ریچارد

$$R(\theta) \approx A + B \sin^2(\theta) + C \tan^2(\theta) \sin^2(\theta) \quad (1-2)$$

این تقریب در دو مدل دوجمله‌ای و سه‌جمله‌ای استفاده می‌شود. ضرایب این معادلات نشانگرهای AVO را تشکیل می‌دهند. تقاطع یا عرض از مبدأ (Intercept)، شیب (Gradient) و انحنا (Curvature) نشانگرهای تقریب آکی و ریچارد هستند. البته می‌توان از جمله سوم در زوایای کمتر از ۳۰ درجه صرف نظر کرد زیرا آکی و ریچارد بیان کردند در این زوایا و دورافت‌ها جمله سوم به صفر میل می‌کند. به این ترتیب از این تقریب می‌توان در شرایط خاص یا مناطقی که زمین‌شناسی آن اکتشاف به کمک تحلیل AVO و از طریق تقریب ریچارد مقاطع نشانگری به مراتب بهتر از تقریب‌های دیگر می‌دهد از تقریب دوجمله‌ای یا سه‌جمله‌ای آن استفاده کرد.

---

<sup>1</sup> Shuey and Bortfeld

## ۲-۱-۲ تقریب شوی

$$R(\theta) = A + B \sin^2(\theta) \quad (2-2)$$

این تقریب یک معادله دوجمله‌ای است و برحسب  $\sin^2(\theta)$  به معادله‌ای درجه اول تبدیل می‌شود که نشانگرهای تقاطع یا عرض از مبدأ (Intercept) و شیب (Gradient) از آن‌ها استخراج و با به دست آوردن مقدار نشانگر در تمام CMP یا CDP داده برداشت شده و کنار هم قرار دادن آن‌ها مقطع نشانگری حاصل می‌گردد.

## ۳-۱-۲ تقریب بورتفیلد

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{V_{p_2} \rho_2 \cos(\theta_2)}{V_{p_1} \rho_1 \cos(\theta_1)} \right) + \sin^2(\theta_1) \left( \frac{1}{q_1^2} - \frac{V_{p_2}^2}{V_{p_2}^2 q_2^2} \right) \times \left( 2 + \frac{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1}}{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \ln \left( \frac{V_{p_2} V_{s_1}}{V_{s_2} V_{p_1}} \right)} \right) \quad (3-2)$$

که البته برخلاف دو تقریب قبل که تنها زاویه تابش در آن‌ها مؤثر بود، به دلیل وجود مؤلفه‌های چگالی و سرعت و همچنین فاکتور سیال در آن، می‌توان آن را پیچیده‌تر از دو تقریب آکی-ریچارد و شوی قلمداد نمود؛ اما همین پیچیدگی در نشان دادن تغییرات ضریب بازتاب با دورافت مانند معادلات ژوئپریتس دقیق‌تر عمل می‌کند اما به دست آوردن نشانگرهای لرزه‌ای و مقاطع نشانگری از آن مستلزم داشتن سرعت و چگالی است که با آنالیز سرعت و یا حفر گمانه قابل انجام است و در شرایطی که مؤلفه‌های مذکور در درست باشد،

مانند مناطقی که قبلاً در آن عملیات حفر چاه یا استخراج انجام شده و یا در مناطقی که استخراج سیال و وضعیت مخزن دائماً توسط انجام عملیات، رصد می‌شود و داده‌های فوق در دست است، می‌توان از این تقریب استفاده نمود. در غیر این صورت دو تقریب بالا در تحلیل AVO کاربردی به مراتب بهتر و ساده‌تر خواهند داشت و حصول نتیجه سهل و سریع‌تر خواهد بود.

## ۲-۲ مقایسه تقریب‌های ژوئپریتس در یک مدل خاص

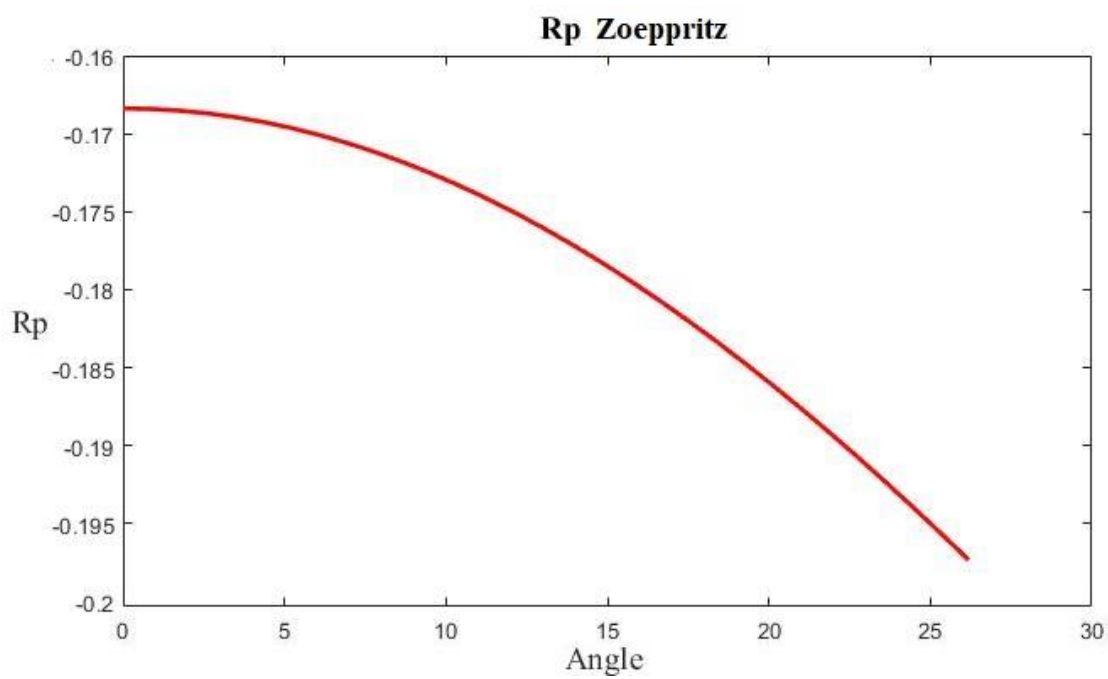
همان‌طور که اشاره شد تقریب‌های متعددی از معادلات ژوئپریتس استخراج شده است که هر کدام در شرایط مختلفی مانند لیتولوژی یا سنگ‌شناسی در محیط مورد مطالعه، سرعت‌های متفاوت موج، ابعاد محیط مورد مطالعه، عمق تخمینی مخزن و زوایای تابش مختلف می‌تواند پاسخی نزدیک‌تر به معادلات ژوئپریتس، به‌عنوان روابط مرجع دهد. در حالت کلی سه تقریب یادشده در بخش اخیر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌عنوان نمونه از یک مدل خاص از کتاب AVO (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴)، در شکل (۱-۲) نمودار سه تقریب یادشده در نرم‌افزار MATLAB رسم گردیده است و در نتیجه مشاهده می‌شود تا زوایای ۳۰ درجه تمایز این تقریب‌ها با نمودار ژوئپریتس چندان قابل لحاظ نیست و تقریب‌های یادشده به پیش‌بینی تغییرات ضریب بازتاب برحسب زاویه در معادلات ژوئپریتس بسیار نزدیک است. به همین دلیل می‌توان در زوایای تابش کم این تقریب‌ها را با اندکی اغماض رفتار ضریب بازتاب یا دامنه امواج لرزه‌ای را با دورافت AVO یا زاویه تابش AVA یکسان در نظر گرفت؛ زیرا در زوایای دور رفتار دامنه در برابر دورافت در این تقریب‌ها متفاوت خواهد بود.

هان<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) نشان داد آفست‌های دور و نزدیک برای داده‌های تک فرکانسی مختلف، رفتار متفاوتی دارند و خود می‌تواند نشانگری<sup>۲</sup> برای مخازن هیدروکربنی باشد.

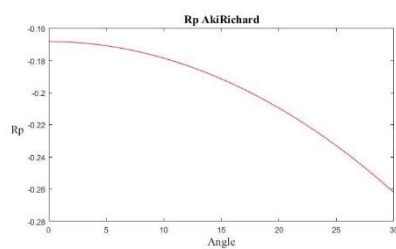
---

<sup>۱</sup> Chris Han

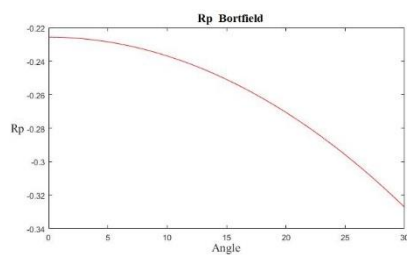
<sup>۲</sup> FN AVO Attribute



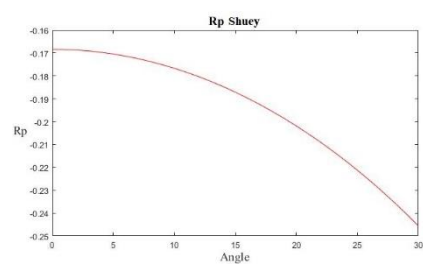
الف



پ



ب



الف

شکل (۱-۲) نمودار روند تغییرات ضریب بازتاب در معادلات زوئپریتس و

مقایسه با سه تقریب مهم آن: الف شوی، ب بورتفیلد، پ آکی ریچارد

## ۲-۳ تئوری تحلیل AVO

همان‌طور که بیان شد، اساس آنالیز AVO ضرایب تقریب‌های معادلات زوئپریتس می‌باشد. تقریب‌هایی همچون آکی ریچارد (رابطه ۱-۲) یا تقرب شوی (رابطه ۲-۲) معادلاتی هستند که ضرایب این معادلات نشانگرهای AVO را بیان می‌کنند. برحسب این روابط می‌توان گفت معادله ضریب بازتاب برحسب توان دوم سینوس زاویه تابش، یک معادله درجه اول می‌باشد. پس می‌توان یک تقریب نهایی استخراج‌شده از سه تقریب مهم زوئپریتس (آکی-ریچارد، شوی و بورتفیلد) که پیش‌ازاین بیان شدند را با معادله (۲-۴) بیان نمود:

$$R(\theta) = I + G \sin^2(\theta) \quad (۲-۴)$$

در یک برداشت لرزه‌ای آنچه ثبت می‌شود دامنه امواج بازتابی در سمپل‌های زمانی<sup>۱</sup> است. مقدار دامنه ثبت‌شده در هر سمپل اطلاعاتی است که از افقی که اگر به‌عنوان بازتابنده‌ای فرضی در نظر گرفته شود، به دست می‌آید. با توجه به زمان رفت‌و برگشت و سرعت موج (که به روش آنالیز سرعت، حفر گمانه، اطلاعات پیشین و روش‌های دیگر قابل محاسبه است)، مکان این افق با محاسبات قابل پیش‌بینی است و مقدار دامنه موج است که قدرت بازتابندگی را به‌عنوان یک سطح بازتابنده معرفی می‌کند. همان‌طور که از تقریب‌های فوق مشاهده می‌شود می‌توان ضریب بازتاب امواج لرزه‌ای (به عبارتی دامنه امواج) را برحسب زاویه تابش با یک معادله ریاضی بیان نمود. پس از برداشت داده و با انجام NMO و تحلیل چگونگی تغییرات دامنه امواج بازتابی ثبت‌شده و برازش منحنی ضرایب تقریب به دست می‌آید. تقریب نهایی استخراج‌شده از سه تقریب مهم زوئپریتس (معادله شماره ۶) برحسب  $\sin^2(\theta)$  یک معادله خطی است که با برازش منحنی تغییرات دامنه دریافتی امواج بازتابی برحسب توان دوم سینوس زاویه تابش دو مؤلفه خواهیم داشت که همان ضرایب

---

<sup>۱</sup> Time Samples

معادلات هستند به عنوان مثال همان طور که در تقریب شوی ضریب I نشانگر تقاطع یا عرض از مبدأ - (Intercept Attribute) و ضریب G نشانگر شیب یا گرادیان (Gradient Attribute) می باشند. طی فرآیند تابش امواج لرزه‌ای تحت زوایای بازتاب مختلف، ضریب بازتاب هر سطح از یک ماده پتروفیزیکی خاص دارای تغییرات دامنه در برابر دورافت خاص خود و در نتیجه دارای نشانگرهای مختص به خود است و به این ترتیب با رسم مقاطع نشانگری می توان تصویری از منطقه مورد مطالعه یا مخزن هیدروکربنی که عملیات برداشت داده روی آن انجام شده است، به دست آورد. به دلیل وابستگی ضریب بازتاب و دامنه امواج به پارامترهای مختلف از جمله زاویه تابش، چگالی، سرعت امواج P و S، نسبت پواسون و عوامل دیگر، مقدار نشانگرهای AVO در هر CMP<sup>1</sup> برای هر افق (به بیان بهتر، هر عمق)، به عنوان یک بازتابنده فرضی، مقادیر منحصر به فرد خود را نسبت به دیگر CMP ها (نقاط دیگر مقطع برداشت) و سایر اعماق، خواهد داد. پس هر نوع منبع هیدروکربنی با توجه به خواص ذاتی و پتروفیزیکی، خلل و فرج، مقدار وجود سیال و نوع سیال یا گاز موجود در آن، نشانگرهای AVO منحصر به خود را خواهد داشت.

نتیجه آنالیز AVO یا AVA استخراج نشانگرها در دورافت‌ها یا زوایای بازتاب مختلف هر CMP یا CDP<sup>2</sup> است. یک مقطع نشانگری، تصویری از مدل لرزه‌ای برداشت شده است که با استخراج نشانگرهای AVO در CMP یا CDP و عمق‌های متوالی به دست می آید. با برازش منحنی تغییرات دامنه امواج دریافتی بر حسب دورافت به عنوان یک معادله درجه اول، همان طور که تقریب نهایی در رابطه (۲-۴) بیان می کند، مقدار این تغییرات بر حسب  $\sin^2(\theta)$  ضرایب G و I که نشانگرهای اصلی یا اولیه مورد نظر هستند، به دست می آیند. برای محاسبه مهم ترین نشانگرهای دیگر از این دو نشانگر استفاده می شود و در نهایت با به دست آوردن این نشانگرها در هر CMP (برای مدل مصنوعی) و هر CDP (در مدل طبیعی)، در هر عمق به عنوان یک بازتابنده فرضی، یک مقطع نشانگری کامل حاصل می شود.

<sup>1</sup> Common mild Point

<sup>2</sup> Common depth point

## ۲-۴ کلاس‌های AVO

منابع هیدروکربنی یا لیتولوژی‌های متفاوت، به‌عنوان مثال ماسه‌های گازدار یا آبدار در مرز بازتابی، پاسخ‌های متفاوتی به تحلیل دامنه در برابر دورافت و نشانگرهای آنان می‌دهند. به همین منظور برای تفکیک نوع تحلیل، برای منبع مورد مطالعه رادرفورد و ویلیامز<sup>۱</sup> (۱۹۸۳)، طبقه‌بندی اولیه‌ای برای تفکیک نوع آنومالی‌های هیدروکربنی گازدار یا آبدار برحسب امپدانس صوتی<sup>۲</sup> ماسه‌سنگ و شیل آن ارائه دادند؛ و پس‌از آن کاستاگنا<sup>۳</sup> (۱۹۸۹)، کلاس چهارمی بر آن‌ها افزود.

- کلاس I: در کلاس اول مقاومت ماسه‌سنگ در برابر شیل اطراف بسیار بالاتر است. ضریب بازتاب زاویه نرمال، مثبت و با افزایش زاویه مقدار ضریب بازتاب کاهش می‌یابد به حدی که ممکن است قطبیت بازتاب را تغییر دهد.

- کلاس IIp در کلاس دوم امپدانس ماسه‌سنگ و شیل تقریباً برابر است. در این کلاس رفتار نمودار ضریب بازتاب پیچیده است چون که پاسخ‌ها در این مدل ممکن است دو منحنی متفاوت را تولید کند. منحنی با مقدار ضریب بازتاب در دورافت صفر، مقدار کوچک مثبت و شیب تغییرات آن با دورافت منفی است. در زوایای کوچک یا دورافت‌های کم مقدار ضریب بازتاب کاهش می‌یابد و در دورافت‌های بزرگ پس از تغییر فاز، شاهد افزایش اندازه ضریب بازتاب یا دامنه موج خواهیم بود که البته به‌سختی قابل مشاهده است.

- کلاس II<sub>N</sub>: در نوع دوم از کلاس دوم AVO ضریب بازتاب در دورافت صفر مقدار کوچک منفی و کماکان شیب تغییرات آن با دورافت منفی است و طبعاً با افزایش دورافت، مقدار آن افزایش می‌یابد.

---

<sup>1</sup> Rutherford and Williams

<sup>3</sup> Castagna

<sup>2</sup> Impedance

- کلاس III: در این کلاس ماسه‌ها دارای امپدانس صوتی بسیار کمتری نسبت به شیل هستند. ضریب بازتاب نرمال در آن‌ها منفی است، شیب تغییرات آن با دورافت نیز منفی می‌باشد پس با افزایش دامنه نیز میزان آن منفی‌تر می‌گردد.
- کلاس IV: در این حالت که توسط کاستاگنا و همکارانش به طبقه‌بندی AVO اضافه گردید. ضریب بازتاب نرمال دارای مقدار بزرگ و منفی است و با افزایش دورافت مقدار آن نیز افزایش می‌یابد.

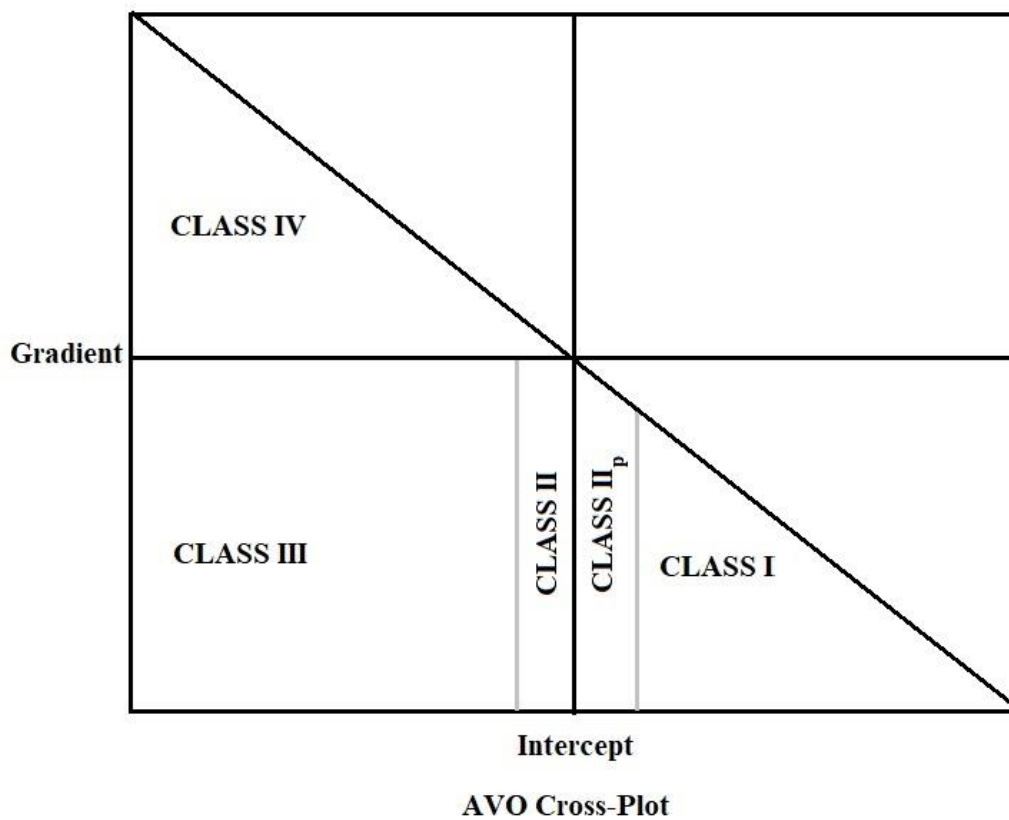
خصوصیات تفاوت امپدانس در کلاس‌های مختلف، علامت گرادیان، شیب و مکان کلاس‌ها در جدول (۱-۲) و مکان کلاس‌ها در نمودار کراس پلات شکل (۲-۲) به‌اجمال ذکر گردیده است.

جدول (۱-۲) خصوصیات مختلف کلاس‌های AVO (چوپرا، ۲۰۱۴)

| کلاس AVO | نسبت امپدانس                                    | ناحیه در نمودار کراس-پلات | P | G |
|----------|-------------------------------------------------|---------------------------|---|---|
| 1        | ماسه‌سنگ با امپدانس بالا                        | چهارم                     | + | - |
| 2P       | تفاوت مقدار امپدانس شیل و ماسه‌سنگ نزدیک به صفر | سوم                       | - | - |
| 2n       | تفاوت مقدار امپدانس شیل و ماسه‌سنگ نزدیک به صفر | چهارم                     | + | - |
| 3        | ماسه‌سنگ با امپدانس پایین                       | سوم                       | - | - |
| 4        | ماسه‌سنگ با امپدانس پایین                       | دوم                       | - | + |

به‌این ترتیب علاوه بر مقاطع نشانگری، می‌توان با رسم نمودارهای نشانگرهای G و I یا نشانگرهای دیگر برحسب یکدیگر، کراس-پلات‌هایی به دست آورد که تجمع نقاط در این نمودار می‌توان کمک شایانی به پی بردن به نوع کلاس منبع هیدروکربنی مخزن مورد مطالعه، کند. تأکید این پژوهش بر چگونگی افزایش کیفیت خروجی مقاطع نشانگری و تفکیک لایه‌ها است هرچه کیفیت تفکیک لایه‌ها بالاتر رود در مراحل

بعد آنالیز AVO که رسم کراس-پلاتها و تعیین نوع کلاس و سیال است، با اطمینان و دقت بیشتر انجام خواهد گرفت و در نتیجه می توان از نتایج این تئوری در هر چهار کلاس AVO بهره برد.



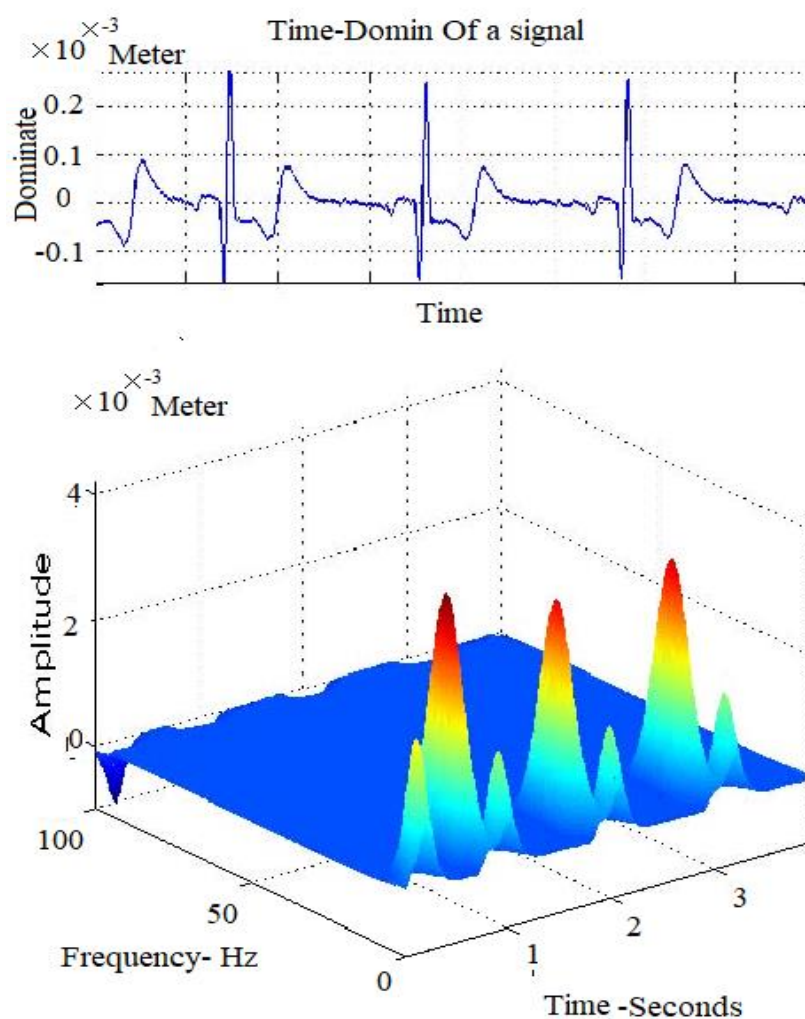
شکل (۲-۲) نمودار کراس پلاتهای AVO (چوپرا، ۲۰۱۴)

فصل سوم:

# تحلیل AVO تک فرکانس

### ۱-۳ طیف فرکانسی و لزوم استخراج مقاطع تک فرکانس

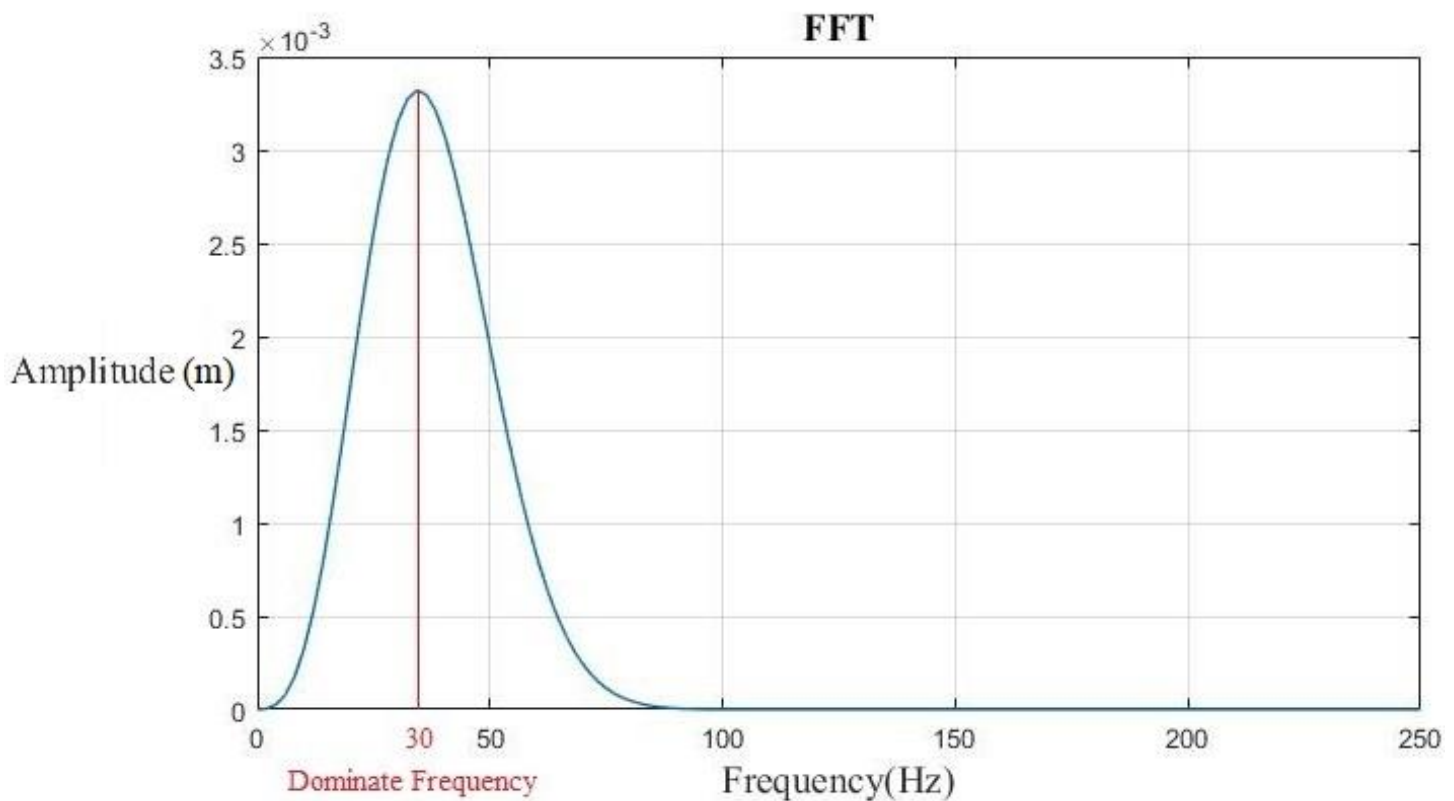
داده‌های لرزه‌ای شامل طیف فرکانسی مختلفی هستند که بسته به نوع و قدرت چشمه، باند فرکانسی می‌تواند فرکانس‌های متفاوتی را شامل شود، شکل ۱-۳ به خوبی نشان می‌دهد ترکیب تمامی فرکانس‌ها (شکل پایین)، نمایی از سیگنال لرزه‌ای دریافت شده خروجی (شکل بالا) می‌باشد.



شکل (۱-۳) نمودار تشکیل هر سیگنال از فرکانس‌های متفاوت (سید احمد<sup>۱</sup>، ۲۰۰۶)

<sup>۱</sup> Seedahmed

تغییر دامنه که در مقدمه به آن اشاره شد برای دامنه فرکانس‌های مختلف در این طیف فرکانسی در طی فرآیند انتشار در زمین و عبور بازتاب از سطوح بازتابنده رفتار یکسان ندارد. نمودار (۲-۳) داده مصنوعی مورد استفاده در این پژوهش را بدون نویز نمایش می‌دهد.



شکل (۲-۳) نمودار داده مصنوعی مورد استفاده در حالت بدون نویز

## ۲-۳ پدیده جذب، تضعیف دامنه و تأثیر در طیف فرکانسی

اثری که به عنوان پدیده جذب دامنه‌های فرکانس‌های بالا شناخته می‌شود مختص زمین‌شناسی و امواج لرزه‌ای نیست و با شناخت این پدیده می‌توان درک بهتری از مکانیک امواج و میرایی به دست آورد. دامنه موج که معرف انرژی آن است در کلیه امواج مکانیکی و در فرکانس‌های بالا دچار افت دامنه می‌شوند (هان، ۲۰۱۹). سرعت موج خاصیت ذاتی و وابسته به محیط انتشار و فرکانس آن وابسته به چشمه است، در نتیجه این دو مؤلفه در هر محیط ثابت است پس می‌توان طی رابطه سرعت، فرکانس و طول موج نتیجه گرفت طی یک رابطه عکس افزایش طول موج به کاهش فرکانس می‌انجامد.

$$V=\lambda f \quad (۱-۳)$$

به عنوان یک مثال و به منظور درک بهتر، در نت‌های موسیقی، نت‌های "زیر" که به دلیل فیزیک ساز زهی در پرده یا آکوردهای پایین، ایجاد طول موج کوتاه در سیم می‌نمایند و در نتیجه با توجه به رابطه (۱-۳)، فرکانس این صداها در طیف فرکانسی خود بالا محسوب می‌شود و برعکس، زخمه‌های نواخته شده "بم" با طول موج‌های بلند تولید فرکانس پایین می‌نمایند و نکته اینجاست که زمان به گوش رسیدن تا سکوت یک زخمه نواخته شده نت "بم" نسبت به نت‌های "زیر" بیشتر طول می‌کشد. این پدیده مبین این است روند کاهش دامنه و میرایی فرکانس‌های بالای یک نت "زیر" در اثر پدید ای مانند جذب بیشتر از فرکانس کوتاه یک نت "بم" است و به همین دلیل است که زودتر از شدت (دامنه و انرژی) صدای آن کاسته شده و در نهایت زودتر از نت "بم" به سکوت می‌انجامد. امواج انتشار یافته در زمین نیز دقیقاً مشابه همین اثر عمل می‌کنند. از آنجاکه زمین مانند یک فیلتر پایین گذر کلیه دامنه امواج لرزه‌ای عمل کرده و دامنه فرکانس‌های بالا را جذب می‌نماید (لاوری، ۱۹۹۸) و یا به عبارتی می‌توان گفت دامنه فرکانس‌های بالاتر از پیک فرکانسی (فرکانس غالب)، به دلیل لیتولوژی خاص زمین بیشتر دچار پدیده جذب گردیده و فیلتر

می‌شوند و اثر آن در داده‌های خروجی تأثیرگذار خواهد بود. چراکه دامنه موج حاوی انرژی تغییر یافته‌ای است که در اثر برخورد به بازتابنده به وجود آمده و در نتیجه اطلاعاتی است که پردازش آن در تحلیل AVO مقاطع نشانگری و وجود و نوع سیال و تفکیک مرزها و کلاس‌ها را در پی دارد. از آنجاکه در طیف فرکانسی سیگنال لرزه‌ای، فرکانس غالب دامنه بیشتری نسبت به بقیه فرکانس‌ها دارد نتایج این پژوهش اثبات نمود تحلیل دامنه در برابر دورافت روی مقاطع تک فرکانس غالب، به دلیل نزدیک‌تر بودن به فرکانس‌های پایین در طیف فرکانسی و به دلیل پایین‌تر بودن مقدار آن نسبت به فرکانس‌های بالا، نتیجه بهتری نسبت به داده اولیه خواهد داد. چنانچه مقاطع تک فرکانسی، از فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس غالب باشد، البته در صورت برخورد از میزان انرژی (دامنه) کافی، می‌تواند نتیجه بسیار بهتر و قابل تمایز از لحاظ کیفیت و تفکیک، در تصاویر مقاطع نشانگری نسبت به داده اصلی داشته باشد، چراکه فرکانس‌های پایین دریافتی مورد استفاده در تحلیل AVO، باید دارای دامنه‌ای به توان به حد کافی قوی، برای انجام تحلیل AVO داشته باشد (هان، ۲۰۱۹). با توجه به شکل نمودار ۳-۱ در طیف فرکانسی یک داده لرزه‌ای دامنه انرژی فرکانس‌های پایین‌تر (بالا‌تر) از فرکانس غالب (که بیشینه دامنه، انرژی و یا توان را در طیف فرکانسی دارا است) هر چه از فرکانس غالب بیشتر (کمتر) باشد، کاهش می‌یابد این بدان معناست که پایین‌ترین فرکانس در طیف فرکانسی برای انجام تحلیل AVO دارای یک حد پایین می‌باشد که دامنه آن فرکانس این حد را معلوم می‌نماید. به عبارتی، به‌رغم اینکه فرکانس‌های پایین نتیجه بهتری در تحلیل AVO می‌دهند، اما نمی‌توان هر فرکانس پایین را برای انجام این تحلیل استفاده نمود به این دلیل که انرژی یا توان آن فرکانس، اطلاعاتی است که موج بازتابی در آن فرکانس دارد و هرچه انرژی این فرکانس کمتر باشد اطلاعات دریافتی از مرز بازتابنده، با دقت پایین، غیرقابل استناد و ضعیف خواهد بود. در نتیجه الزام‌آور است، برای استخراج مقطع تک فرکانس در محدوده

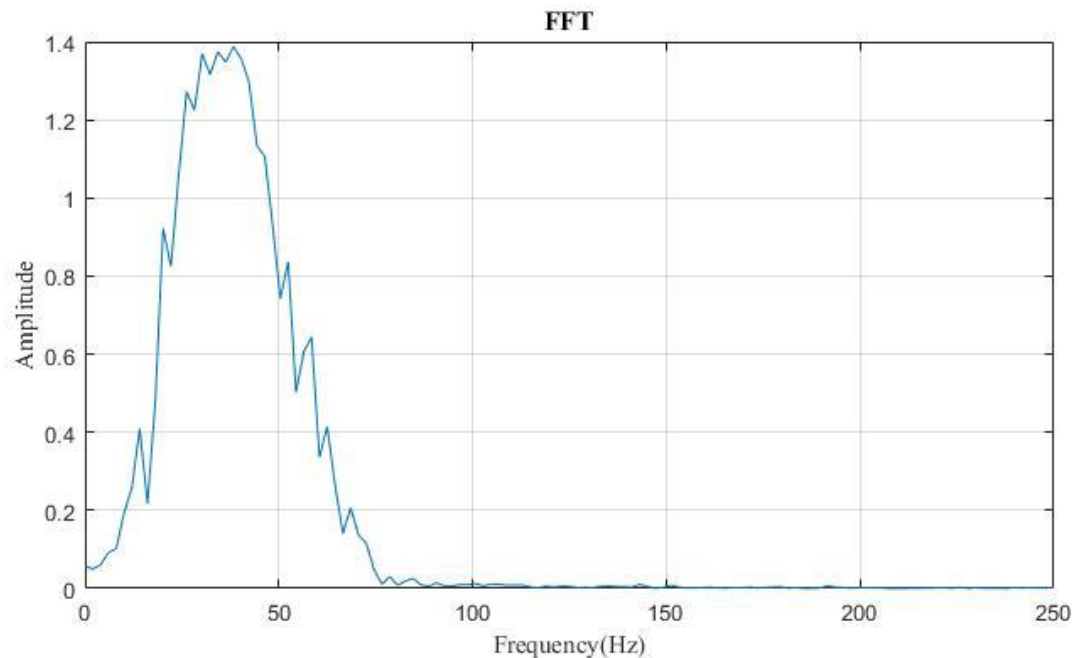
فرکانس‌های پایین، فرکانسی انتخاب شود که دامنه آن برای تحلیل AVO و استخراج نشانگر به حد کافی قوی داشته باشد (هان، ۲۰۱۹).

تحلیل فرکانس‌ها و انجام تحلیل AVO در محدود فرکانس‌های کوتاه تأکید این پژوهش بر چگونگی افزایش کیفیت خروجی مقاطع نشانگری است و از نتیجه آن می‌توان برای رسم دقیق‌تر کراس-پلاتها و تعیین نوع سیال و لیتولوژی با اطمینان و دقت بیشتر در تمام کلاس‌های AVO بهره برد. به این منظور، در این پژوهش دو داده مصنوعی و واقعی مورد تحلیل AVO قرار گرفت.

### ۳-۳ استخراج مقاطع تک فرکانس

الف: هر دو داده مصنوعی و طبیعی به کمک نرم‌افزار MATLAB مورد تحلیل فرکانسی قرار گرفته است، برای داده طبیعی برای به دست آوردن فرکانس غالب با رسم طیف فرکانسی به کمک تبدیل فوری، FFT، پیک این طیف که مبین فرکانس غالب است به مقدار ۳۵ Hz محاسبه گردید است و برای داده مصنوعی نیز فرکانس غالب در این داده هنگام ساخت مدل و برداشت مصنوعی توسط نرم‌افزار GXII، پس از آزمایش و خطاهای گوناگون، ۳۰ هرتز در نظر گرفته شد. روش‌های گوناگونی مانند تبدیل موجک یا تبدیل S و... نیز می‌تواند مقطع تک فرکانس در هر فرکانس دلخواه را از داده اصلی استخراج کند و باید دید با توجه به شرایط داده ابعاد و دیگر مؤلفه‌های مؤثر، کدام تبدیل بهترین و باکیفیت‌ترین مقطع تک فرکانس را به دست می‌آورد. در این پژوهش داده‌های به دست آمده با اعمال فیلتر فرکانس به کمک تبدیل فوری زمان کوتاه، STFT، از حالت زمان به حالت فرکانس برده شده و مقطع تک فرکانس داده‌های واقعی از داده اولیه استخراج گردیده است. داده جدید به دست آمده برای تحلیل AVO بر روی مقطع تک فرکانس غالب و برای داده مصنوعی علاوه بر مقطع تک فرکانس سه مقطع دیگر که به ترتیب ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درصد (حدوداً) از دامنه فرکانس غالب را دارا است، در محدوده فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس غالب را شامل می‌شود. شکل (۲-۳) طیف فرکانسی داده مصنوعی به وضوح نشانگر این مطلب است. به این ترتیب با اضافه کردن نویز طبق

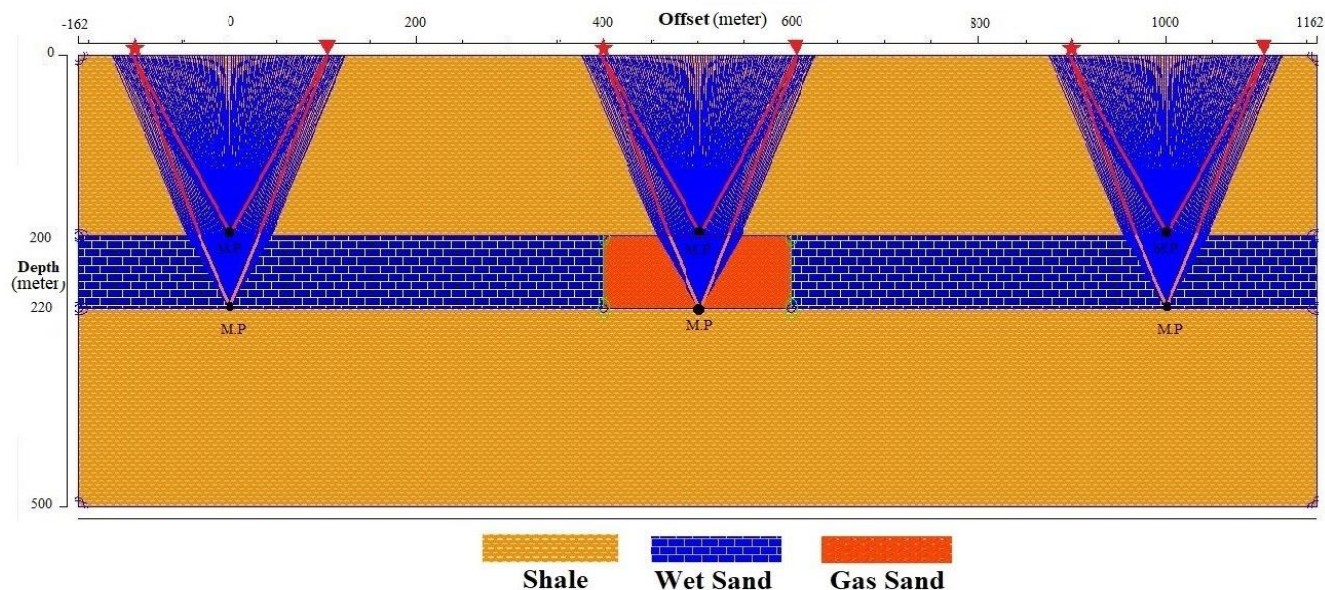
شکل (۳-۳)، داده‌های لرزه‌ای برای آنالیز دامنه در برابر دورافت آماده می‌گردند که در مرحله اول برای داده مصنوعی، مقطع تک فرکانس غالب (۳۰ هرتز) به همراه سه مقطع تک فرکانس ۱۵، ۲۰ و ۲۵ هرتز که به ترتیب ۲۰، ۶۰ و ۸۰ درصد (حدوداً) دامنه بیشینه فرکانس (فرکانس غالب) را دارا است. با استفاده از این نتیجه در مرحله بعد، داده کامل یک برداشت واقعی لرزه‌ای و متشکل از تمامی فرکانس‌های آن است که در آنالیز AVO مقاطع نشانگری آن با مقطع تک فرکانس غالب همین داده مقایسه شد و نهایتاً تفاوت وضوح تصاویر حاصل شده از مقاطع نشانگری در فرکانس‌های متفاوت باهم مقایسه و بهترین مقطع تک فرکانس برای آنالیز AVO معلوم می‌گردد.



شکل (۳-۳) نمودار طیف فرکانسی داده مصنوعی حاوی نویز

### ۴-۳ مدل مصنوعی

در این پژوهش ابتدا فرآیند تحلیل AVO روی داده‌های حاصل از برداشت از یک مدل مصنوعی انجام شده است. بخشی از خروجی SEG-Y برداشت شده در شکل شماره (۴-۳) قابل مشاهده است. این مدل، با استفاده از نرم‌افزار GXII، با الگوگیری از مدل‌های آنالیز AVO از کتاب AVO (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴) و رساله دکتری با عنوان بهبود داده‌های زمان فرکانس در مطالعه داده‌های لرزه‌ای (روشندل، ۱۳۸۸) ایجاد گردید. مدل مصنوعی به طول عملیاتی ۱۰۰۰ متر و عمق ۵۰۰ متر و شامل سه لایه، لایه بالا و پایین شیل و لایه نازک میانی خود از سه قسمت تشکیل شده است که در دو طرف ماسه‌سنگ گازدار و در وسط ماسه‌سنگ آبدار، قرار دارد.



شکل (۴-۳) مدل مصنوعی ساخته شده در نرم‌افزار GXII

مشخصات و مؤلفه‌های عملیات انجام شده روی این مدل مصنوعی در جدول ۱-۳ مشاهده می‌شود. به دلیل اینکه داده‌های لرزه‌ای واقعی حاوی نوفه می‌باشند، می‌توان با اضافه کردن اندکی نوفه به داده مصنوعی نتیجه را به برداشت واقعی نزدیک‌تر کرد. با توجه به این که داده برداشت شده از عملیات روی مدل مصنوعی،

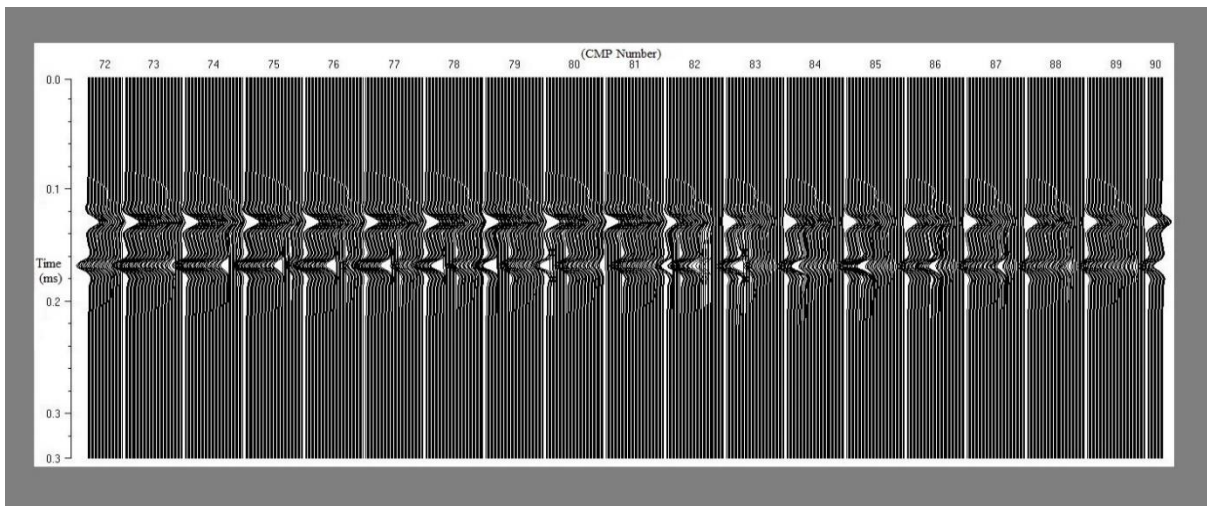
به روش CMP است، در شکل تعداد سه CMP به عنوان نمونه برای نشان دادن چگونگی عملیات برداشت و همچنین درک بهتر از هندسه بازتاب امواج لرزه‌ای مدل طراحی شده قرار داده شده است.

جدول (۱-۳) مشخصات عملیات مصنوعی انجام شده

|                    |      |                    |    |
|--------------------|------|--------------------|----|
| First CMP Number   | 1    | CMP Separation     | 5  |
| First CMP Location | 0    | First Trace Offset | 0  |
| Last CMP Number    | 201  | Offset Increment   | 5  |
| Last CMP Location  | 1000 | Number Of Offset   | 51 |

در این نوع برداشت با توجه به ضخامت لایه‌ها، فرکانس چشمه و از همه مهم‌تر تفاوت در رفتار تغییرات دامنه در برابر دورافت در مرزهای بالا و پایین امکان تداخل امواج بازتابی از دو مرز بازتابنده بالا و پایین لایه‌نازک میانی وجود دارد. به این منظور و برای اینکه فاصله مرزهای بازتابنده در امواج بازتابی باعث تداخل نباشد و از بین رفتن وضوح نشود، با آزمایش و خطا چندین مدل مختلف با ضخامت‌های لایه‌نازک میانی متفاوت با سرعت‌های مختلف هر لایه و همچنین فرکانس‌های چشمه گوناگون، یک مدل نزدیک به ایدئال از نظر ابعاد لایه‌ها، سرعت آن‌ها و مکان بازتابنده‌ها برای تحلیل AVO طراحی شده است تا در آن امواج بازتابی از تفکیک واضحی برای بازتابنده‌ها برخوردار باشد و بتوان نشانگرهای AVO به روش برازش منحنی

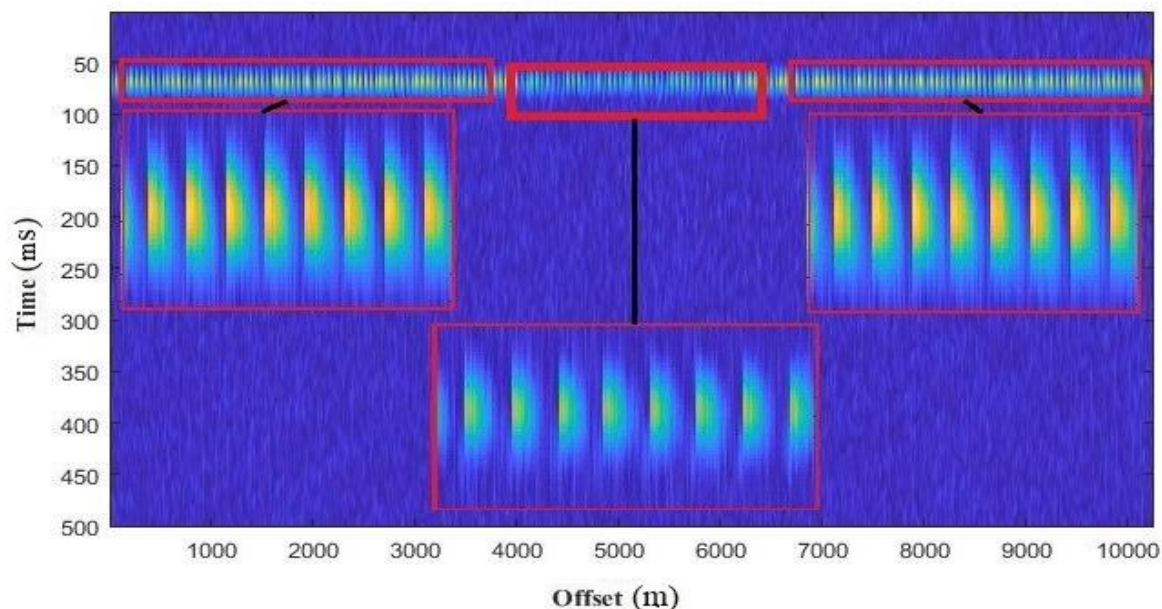
که شرح آن بیان شد، استخراج گردد. مؤلفه‌های عملیات برداشت مصنوعی توسط نرم‌افزار GXII همان‌طور که در جدول (۳-۱) به آن اشاره شده است تعداد ۲۰۰ CMP در طول عملیاتی ۱۰۰۰ متر در دورافت‌های صفر تا ۵۰ متر و با گام ۵ متر و طول زمان عملیات برداشت ۱ ثانیه است و هر بازه نمونه‌برداری ۲ ms، داده‌ای استخراج می‌شود که در ۳-۳ مشاهده می‌شود.



شکل (۳-۵) داده برداشت‌شده در عملیات مصنوعی توسط نرم‌افزار GXII بعد از اعمال تصحیح

مبرهن است که وجود دو قله در شکل امواج دریافتی حاکی از وجود دو مرز بازتابنده است، اما نکته مهم که شکل تغییر میزان این پیک‌ها در طول دورافت‌هاست حتی اینکه بازتابنده مرز بالا و یا پایین باشد نیز شکل تغییر دامنه با دورافت را تغییر می‌دهد. به‌منظور اطمینان بیشتر کلیه مقاطع نشانگری حاصل‌شده را با خروجی‌های نشانگری نرم‌افزار HampsonRussell که داده طبیعی، داده اصلی دموئی این نرم‌افزار است و مقاطع نشانگری و خروجی‌های گرفته‌شده طی عملیات مربوط به این داده به صحت نتایج حاصل‌شده از تحلیل روی دو داده مصنوعی و بعد طبیعی کاملاً به اثبات کامل می‌رسد. ابتدا با نتایج حاصل‌شده از داده مصنوعی مشاهده می‌شود مقاطع نشانگری حاصل‌شده از مقاطع تک فرکانس در فرکانس غالب و فرکانس‌های پایین‌تر، وضوح، کیفیت و دقت بهتری را نسبت به مقاطع نشانگری حاصل از داده اولیه تمام

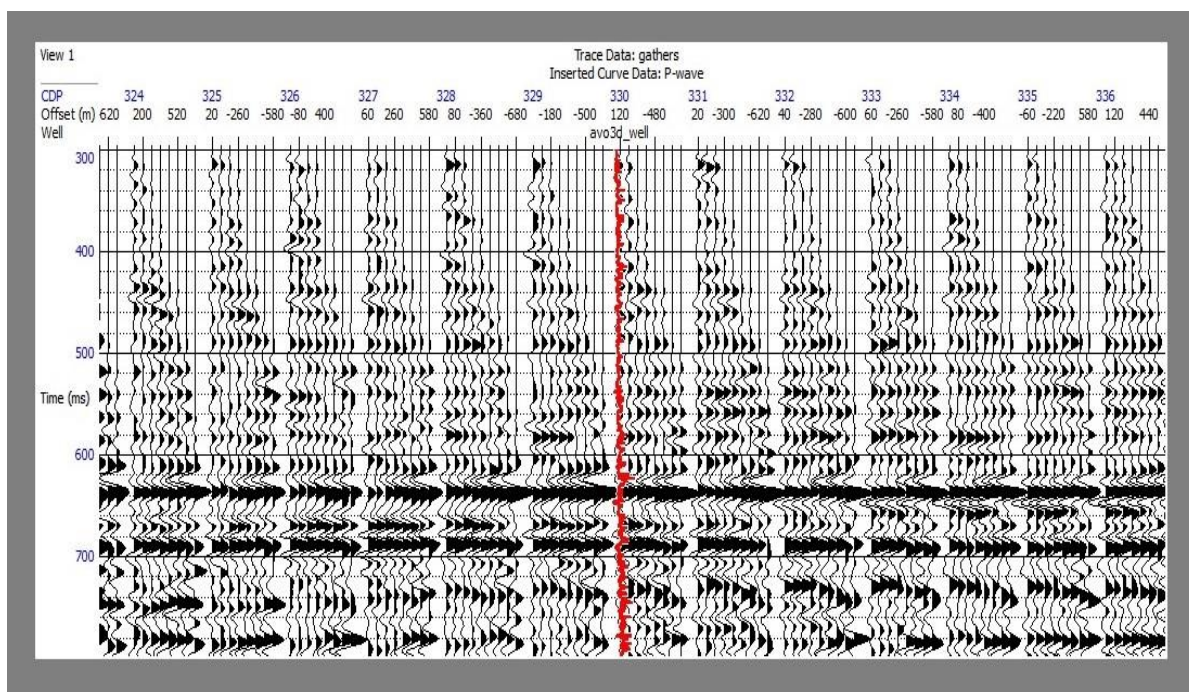
فرکانس پی خواهد داشت با استفاده از این نتیجه و انجام تحلیل AVO روی داده طبیعی برداشت شده اولیه و همچنین تحلیل روی مقاطع تک فرکانس استخراج شده از مدل اولیه و استخراج مقاطع نشانگری آن صحت این ایده به اثبات می‌رسد.



شکل (۳-۶) مقایسه تغییرات دامنه در برابر دورافت برای ماسه‌سنگ‌های آبدار و گازدار

### ۳-۵ مدل طبیعی

داده واقعی مورد استفاده در این تحقیق داده‌های دموئی نرم‌افزار HampsonRussell و مربوط به عملیات برداشت در میدان نفتی واقع در کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا، می‌باشد. برای آماده‌سازی داده در HampsonRussell ابتدا CDP های شماره ۲۶۰ تا ۳۹۰ از داده اولیه استخراج شده است تا تحلیل AVO روی این قسمت انجام گردد. تریس‌هایی که نویز بالا داشته و یا نسبت سیگنال به نویز کمی داشته‌اند توسط نرم‌افزار حذف گردیده‌اند، با توجه به این نکته، بدیهی خواهد بود که تمام CDP ها تعداد فولد برابر نخواهند داشت. در شکل (۳-۶) قسمتی از داده دریافتی در CDP های اطراف CDP شماره ۳۳۰ که مکان حفر چاه نمونه‌برداری است، قابل مشاهده است.



شکل (۷-۳) بخشی از داده لرزه‌ای دریافت شده در حوالی گمانه

ابتدا با نتایج حاصل شده از داده مصنوعی مشاهده می‌شود، مقاطع نشانگری حاصل شده از مقاطع تک فرکانس در فرکانس غالب و فرکانس‌های پایین‌تر، وضوح، کیفیت و دقت بهتری را نسبت به مقاطع نشانگری حاصل از داده اولیه تمام فرکانس پی خواهد داشت با استفاده از این نتیجه و انجام تحلیل AVO روی داده طبیعی برداشت شده اولیه و همچنین تحلیل روی مقاطع تک فرکانس استخراج شده از مدل اولیه و استخراج مقاطع نشانگری آن صحت این ایده به اثبات می‌رسد.

فصل چهارم:

استخراج

و

مقایسه مقاطع نشانگری

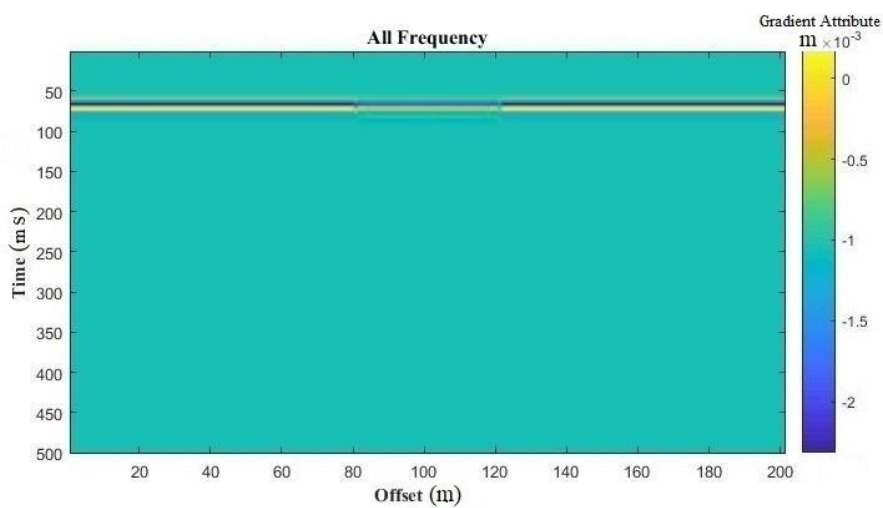
#### ۴-۱ استخراج مقاطع نشانگری و مقایسه خروجی ها

با استفاده از تقریب نهایی استخراج شده از تقریب های آکی-ریچارد دوجمله ای و تقریب شوی، داده های اولیه اصلی و داده های تک فرکانس استخراج شده از آن ها، به تفکیک و جداگانه مورد تحلیل دامنه در برابر دورافت قرار گرفته است و نشانگرهای گرادیان (G) و اینترسپت (I) و (I\*G) که مهم ترین مقاطع نشانگری هستند، از آن ها استخراج و تصویر گردید. با مقایسه مقاطع نشانگری برای داده تک فرکانس و داده تمام فرکانس، همان طور که پیش از این اشاره شد، تحلیل AVO به ترتیب ابتدا بر روی داده مصنوعی انجام می گردد و با استفاده از نتایج آن تصاویر استخراجی از مقاطع نشانگری داده واقعی مورد تحلیل قرار می گیرد تا صحت ایده به اثبات برسد. همچنین با مقایسه مقاطع نشانگری استخراجی از نرم افزار HampsonRussell و تشابه آن با مقاطع نشانگری استخراج شده وسیله نرم افزار MATLAB، به درستی نتایج و ایده آنالیز AVO در فرکانس پایین، به دست آمده صحه می گذارد.

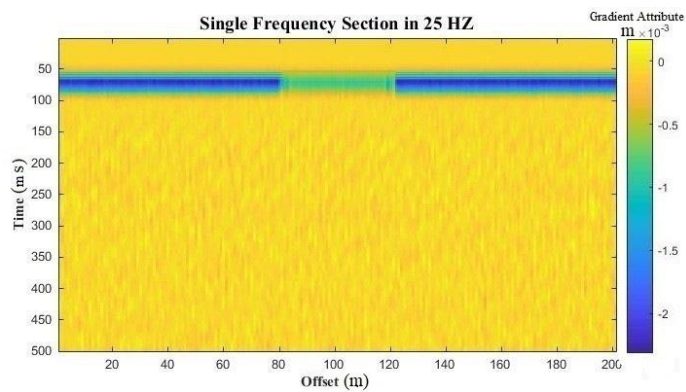
#### ۴-۲ مقایسه مقاطع نشانگری داده مدل مصنوعی در حالت تمام فرکانس و حالات تک فرکانس

مقایسه مقاطع نشانگری استخراج شده توسط نرم افزار MATLAB نتایج زیر را در بردارد.

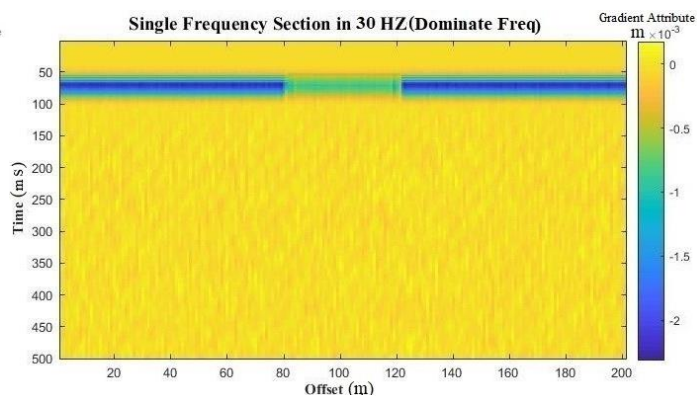
**الف: نشانگر گرادیان:** شکل های (۴-۱) - الف مقطع نشانگری گرادیان برای مدل مصنوعی اولیه برداشت شده است و تفاوت آن با شکل های (۴-۱) - ب که مقطع نشانگری روی فرکانس غالب استخراجی از همان داده می باشد، به خوبی واضح و آشکار است. با توجه به شکل های (۴-۱) - ب تا (۴-۱) - ث با کاهش فرکانس، وضوح و کیفیت در مرزهای بازتابنده در مقطع نشانگری گرادیان افزایش می یابد. اگرچه کماکان نمی توان نقش کاهش تضعیف انرژی فرکانس کمتر را نادیده انگاشت، اما وضوح مرزهای بازتابنده در مقطع نشانگری گرادیان با کاهش فرکانس شدیداً افزایش می یابد.



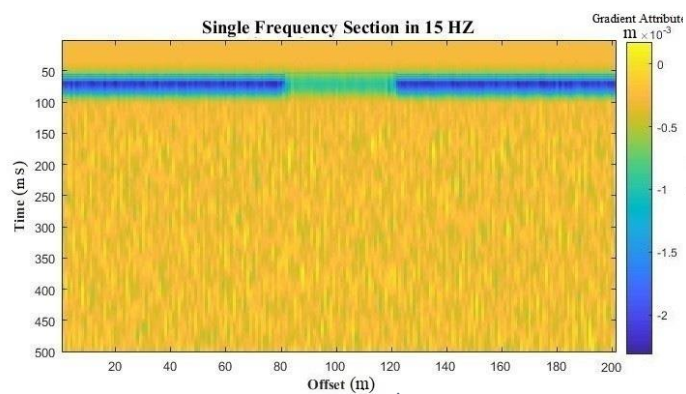
الف



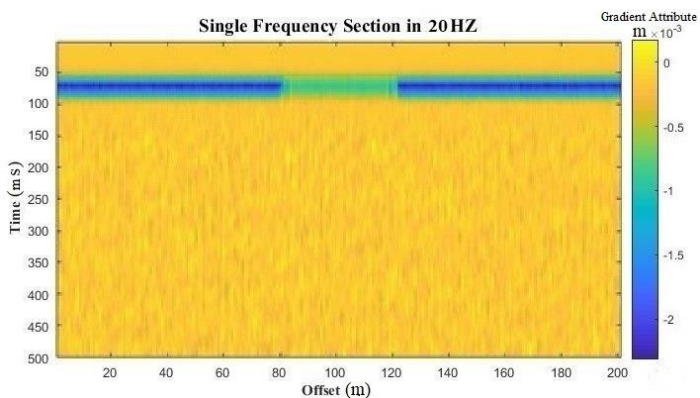
پ



ب



ث

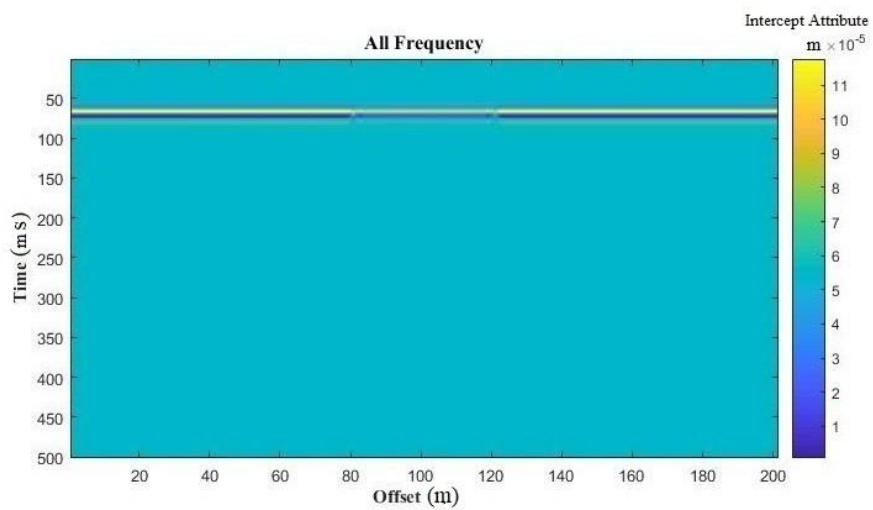


ت

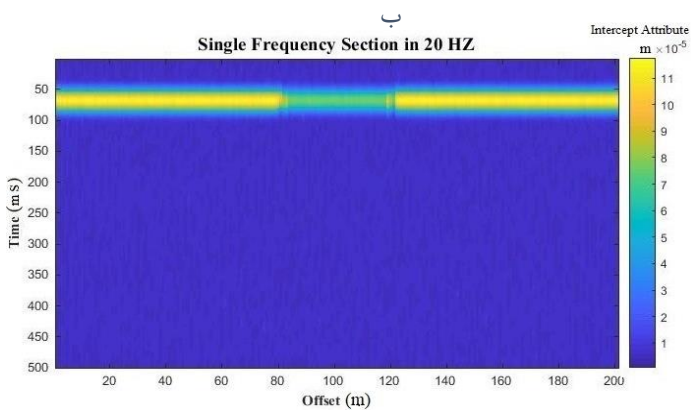
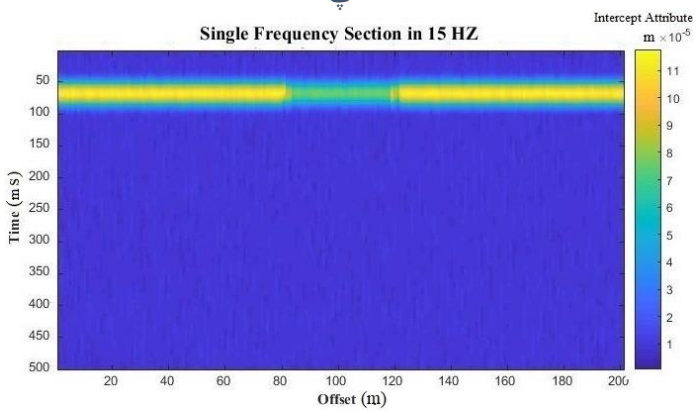
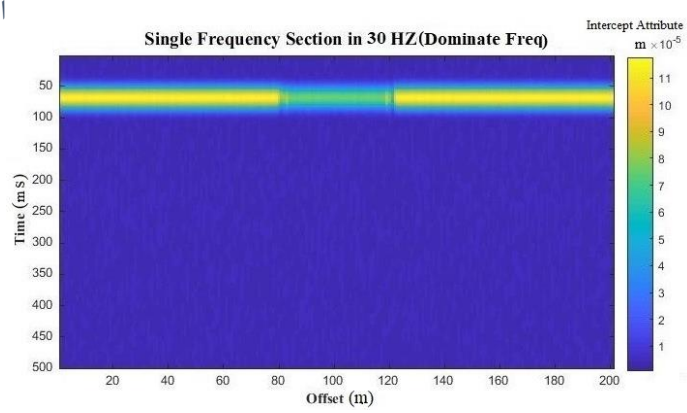
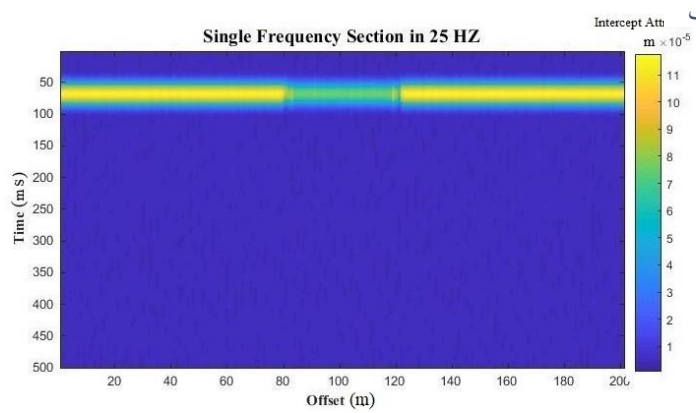
شکل (۴-۱) مقایسه نشانگر گردایان در فرکانس‌های برای داده مصنوعی

میزان بهبود کیفیت این وضوح، برای زون‌های آبدار و گازدار متفاوت است. بهبود وضوح بازتابنده‌ها در مقاطع نشانگری، با کاهش فرکانس در ماسه‌سنگ‌های گازدار (وسط) نسبت به ماسه‌سنگ‌های آبدار (دو طرف)، اثر بیشتری دارد. این نتیجه دقیقاً با نکته‌ای که در مقدمه به آن اشاره شد منطبق است. چیبوریس (۱۹۸۴ و ۱۹۸۷) اشاره داشتند مدل در حضور مقدار کمی از هوا یا گاز درون حفرات سنگ‌های متخلخل، باعث کاهش شدید سرعت موج فشارشی  $P$  می‌شود. در صورتی که سرعت موج برشی  $S$  تقریباً بدون تغییر می‌ماند. این تغییر در نسبت سرعت موج  $P$  به سرعت موج  $S$  افزاز انرژی متفاوت برای حالت اشباع از سیال و اشباع از گاز را سبب می‌شود.

**ب: نشانگر تقاطع:** فرایند تحلیل AVO مانند مورد الف اما برای نشانگر تقاطع در شکل‌های ۷-الف تا ۷-ب انجام شد؛ اما تصویر مقاطع نشانگری در این مورد مبین این موضوع است که کیفیت و وضوح با کاهش فرکانس اگرچه بهبود پیدا می‌کند، اما این افزایش وضوح و تغییرات در میزان اندازه نشانگرهای AVO به شدت بهبود کیفیت مقطع نشانگری گرادیان نیست. وضوح مرزهای بازتابنده با کاهش فرکانس اثر اندکی در وضوح دارد؛ اما کماکان افزایش کیفیت مشهود است.



الف

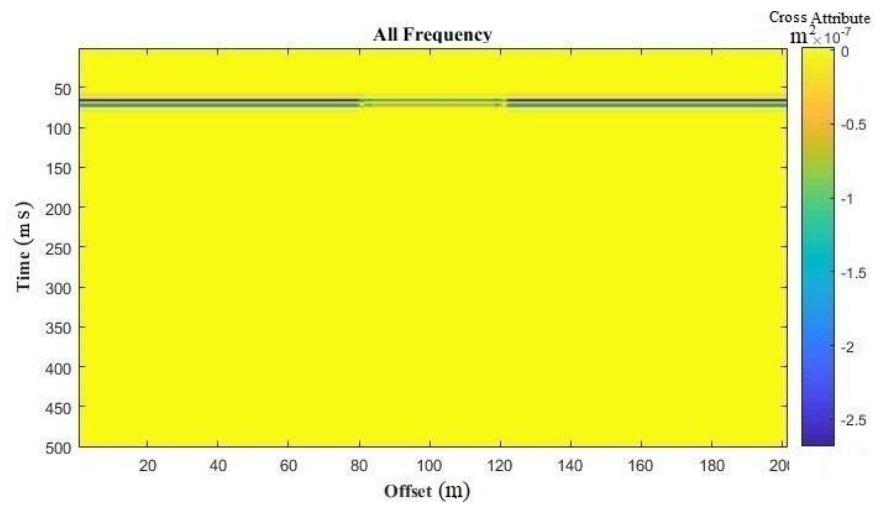


ب

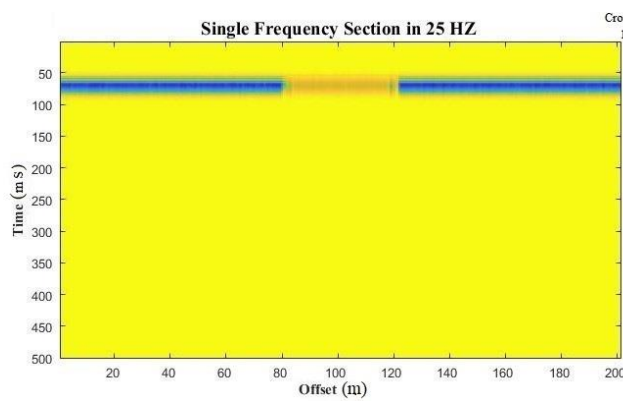
ج

شکل (۴-۲) مقایسه نشانگر تقاطع در فرکانس‌های پایین

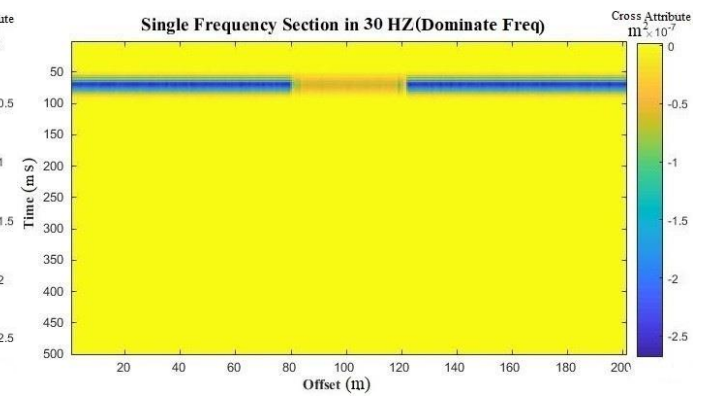
**پ: نشانگر حاصل ضرب:** در مقایسه نتیجه مقاطع نشانگری حاصل ضرب، شکل‌های (۳-۴) بخش الف تا شکل ث نشان می‌دهد مرزهای بازتابنده و آنومالی‌های دیگر با کاهش فرکانس نسبت به مقاطع نشانگری تقاطع، بهتر نشان داده می‌شوند. تفکیک زون‌های ماسه‌سنگی آبدار و گازدار در این حالت تقریباً بهتر از دو نشانگر دیگر است. این تفاوت در شکل‌های صفحه بعد مشاهده شده است. دلیل این نتیجه این است مدل استفاده شده مصنوعی از یک طرف، یک مدل شارپ با لایه‌های افقی و مخازن آبدار و گازدار با شکل هندسی واضح و از طرفی در لایه‌های عمیق با یک سرعت در نظر گرفته شده است یا به عبارت بهتر تغییرات سرعت با عمق در این مدل در نظر گرفته نشده است که در حالت واقعی این امر وجود ندارد. از آنجاکه نشانگر حاصل ضرب مورد تأثیر دو نشانگر گرادیان و تقاطع است، لذا این نشانگر از هردوی این نشانگرها تأثیر می‌گیرد. در یک مدل طبیعی نشانگرهای مختلف پاسخ‌های متفاوتی می‌دهند. چنانچه یکی از نشانگرهای گرادیان یا تقاطع مقطع واضح و روشنی و با کیفیت قابل قبولی نتیجه ندهد نشانگر حاصل ضرب تحت تأثیر قرار گرفته و کیفیت این مقطع نشانگری کاهش خواهد یافت. به همین دلیل این نشانگر بیشتر باید در مدل‌هایی به کار رود که هردو نشانگر گرادیان و تقاطع مقاطع نشانگری واضحی از آنالیز AVO بدهند تا نشانگر حاصل ضرب نیز کیفیت و وضوح لازم را در تفکیک مقاطع نشانگری ارائه دهد.



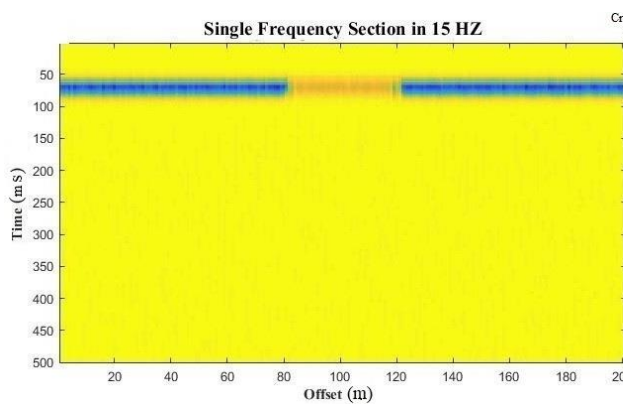
الف



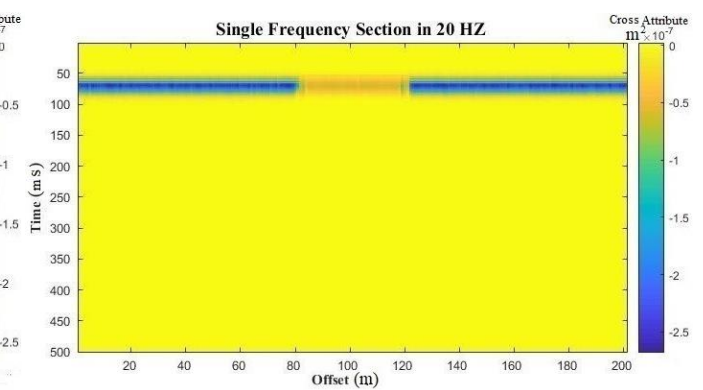
ب



ب



ث



ت

شکل (۳-۴) مقایسه نشانگر حاصل ضرب در فرکانس‌های متفاوت

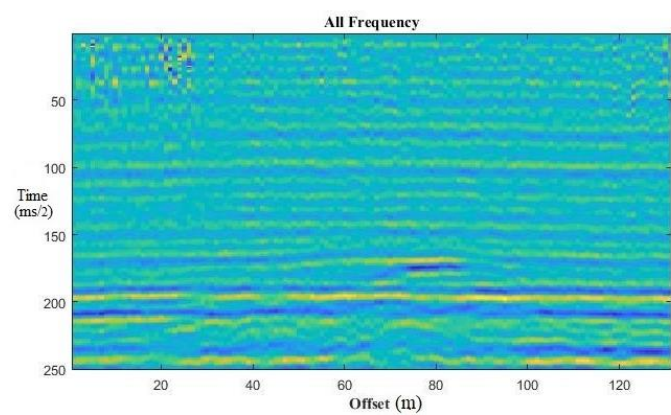
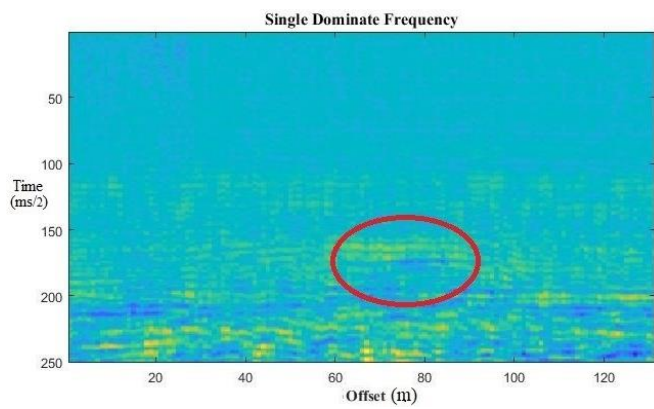
#### ۴-۳ مقایسه مقاطع نشانگری داده واقعی در حالت تمام فرکانس و فرکانس غالب و پایین تر از آن

به وسیله نرم افزار MATLAB خروجی تصاویر مقاطع نشانگری تحلیل بر روی داده واقعی نتایج زیر به دست آمد.

**الف: مقایسه مقاطع نشانگری گرادیان:** از مقایسه شکل های شماره (۴-۴) الف وب می توان نتیجه گرفت، نشانگر گرادیان در داده ی فرکانس غالب مقطع دقیق تری نسبت به داده اولیه را به دست می دهد. به عنوان مثال می توان بیان کرد در نمونه برداری زمانی تقریبی ۱۷۰ و دورافت ۸۰ وضوح بهتری برای آنومالی لرزه ای احتمال، نسبت به مقطع داده ی لرزه ای تمام فرکانس داریم.

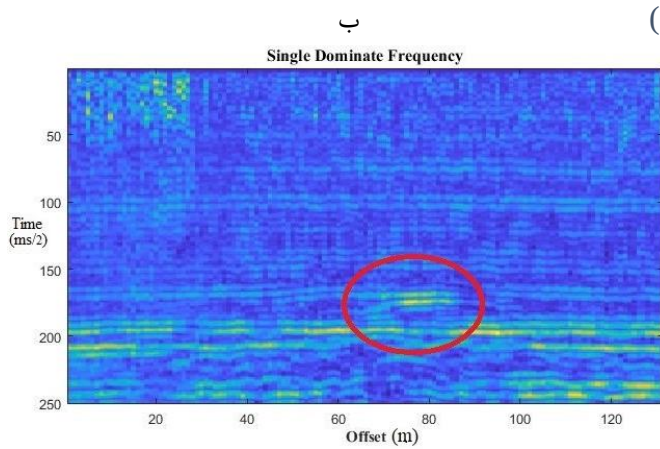
**ب: مقایسه مقاطع نشانگری تقاطع:** مقایسه شکل های شماره (۴-۴) پ و (۴-۴) ت نشان می دهد، کیفیت و وضوح نشانگر تقاطع (Intercept) در داده فرکانس غالب نسبت به مقطع داده ی لرزه ای تمام فرکانس از وضوح کامل بیشتری برخوردار است. کیفیت تفکیک لایه های زیرین و آنومالی یادشده در مورد الف مبین این موضوع می باشد.

**پ: مقایسه مقاطع نشانگری حاصل ضرب:** مقایسه شکل های شماره (۴-۴) ث و (۴-۴) ج نشانگر حاصل ضرب گرادیان و تقاطع ( $I*G$ ) در هر دو داده تک فرکانس و داده واقعی اولیه از وضوح و کیفیت تقریبی یکسانی برخوردار است که البته قدرت تفکیک لایه ها و نمایش آنومالی های لرزه ای، همچنان در خروجی های تک فرکانس قدرت به شکل بهتری عمل کرده است. پیش بینی می شود، کاهش فرکانس و انجام تحلیل AVO در فرکانس های کمتر این قدرت تفکیک بیشتر خواهد شد.



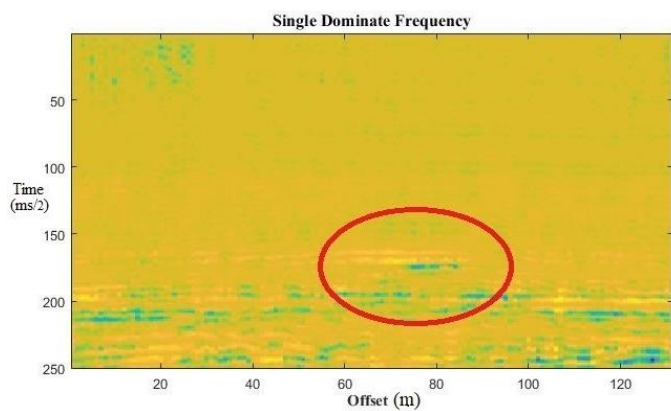
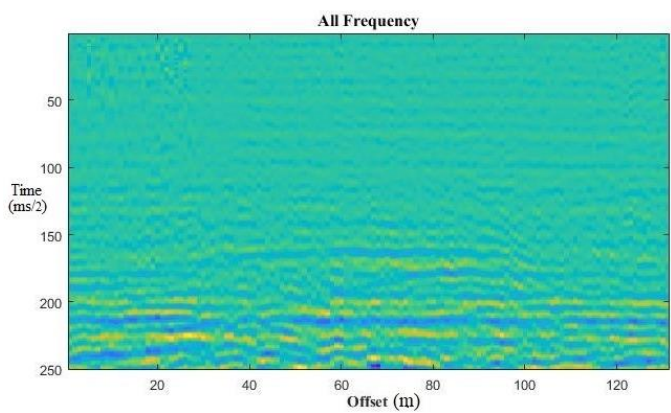
نشانه گرادیان (G)

الف



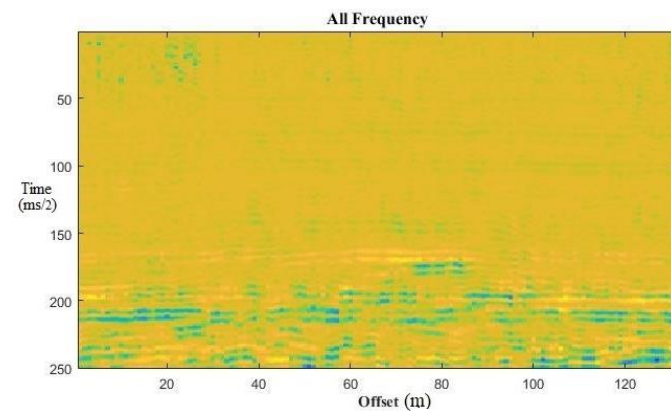
نشانه تقاطع (I)

ب

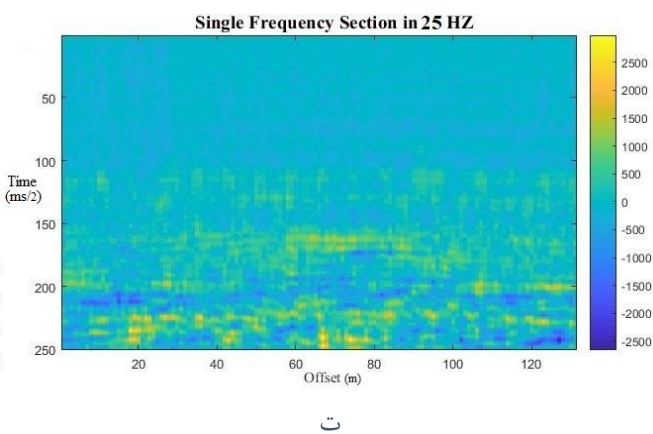
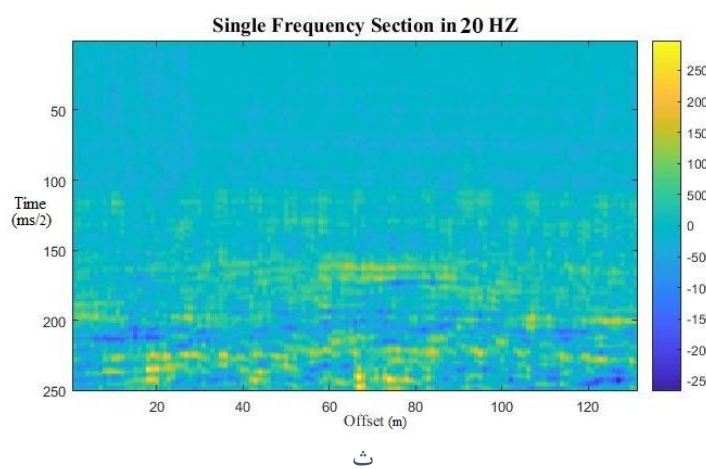
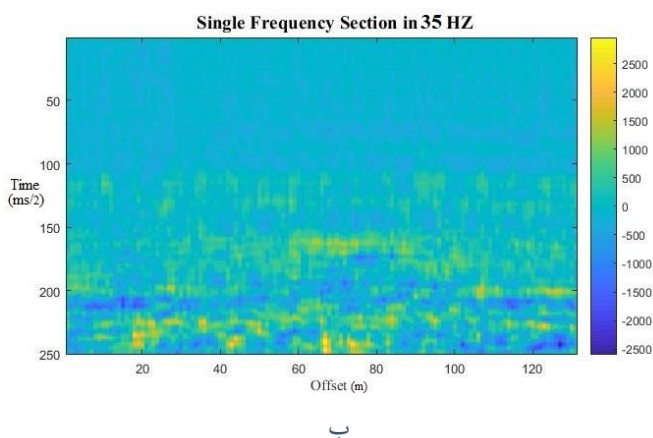
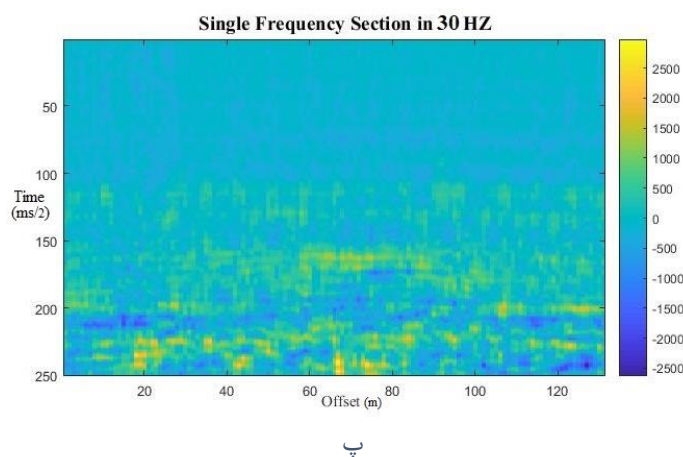
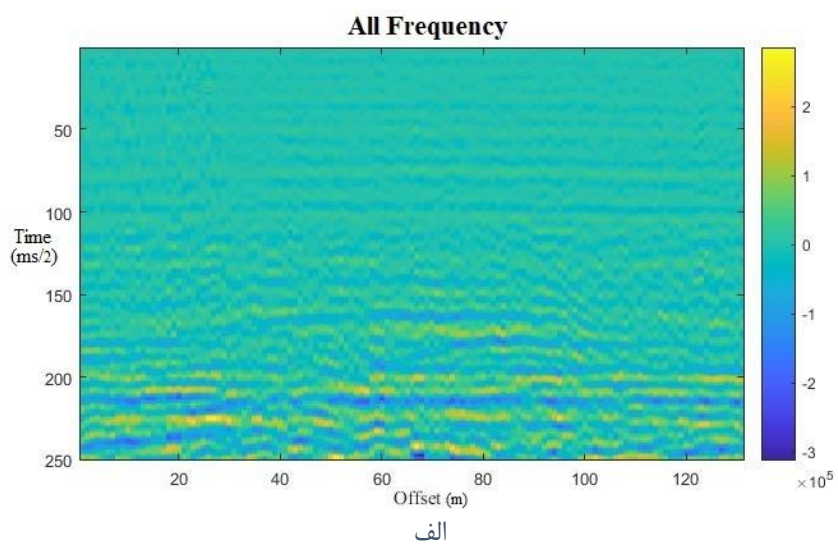


نشانه حاصل ضرب (G\*I)

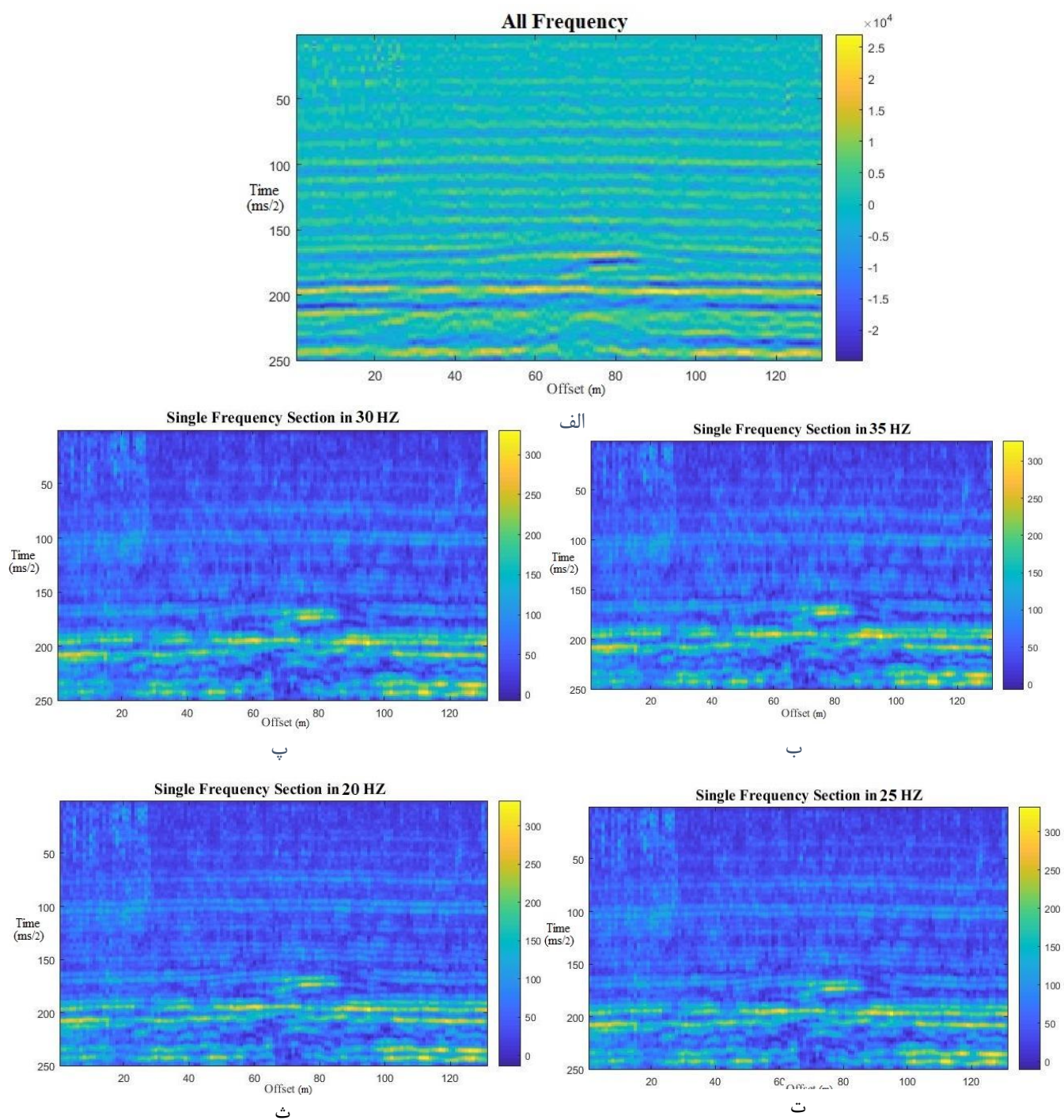
ت



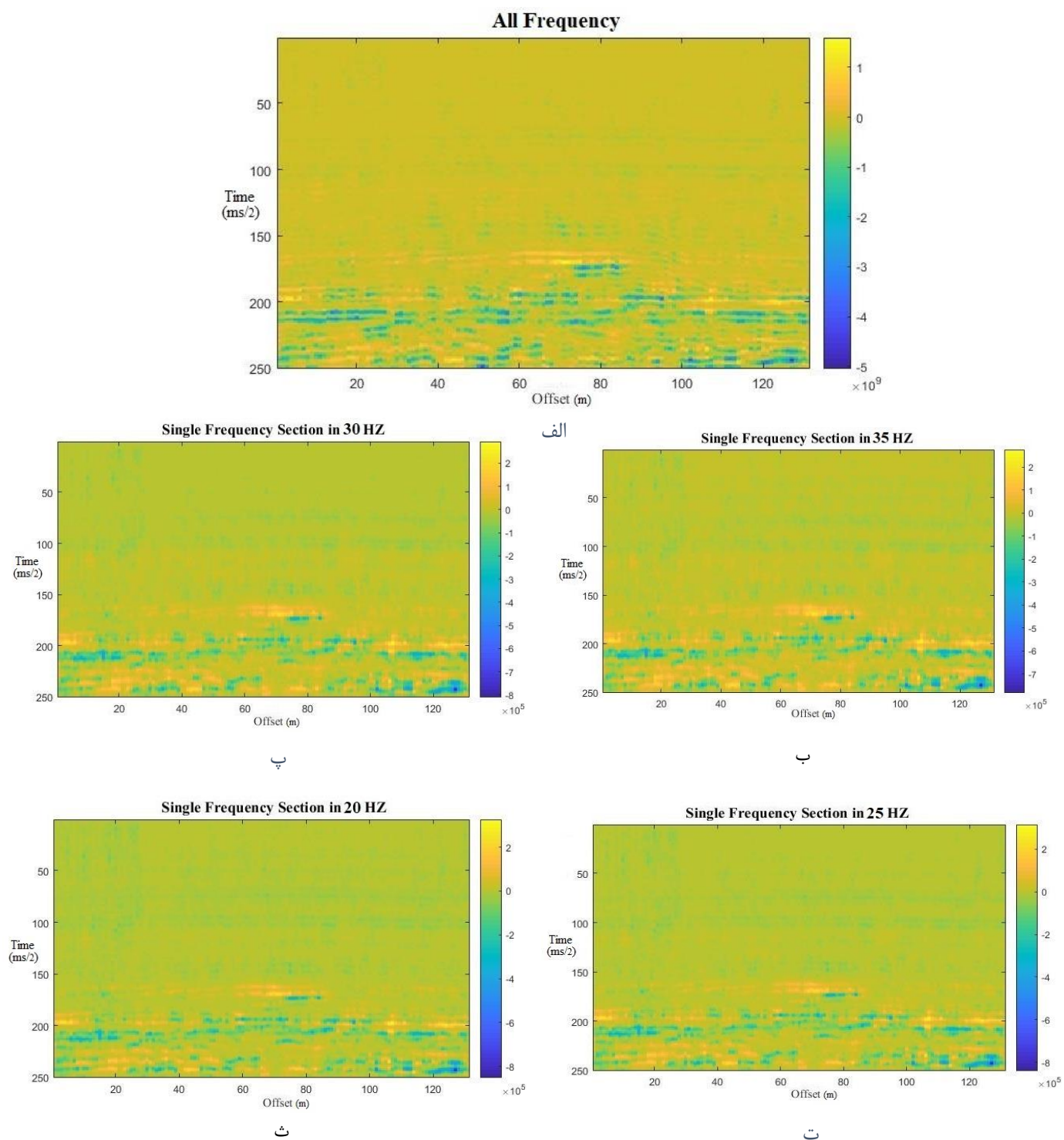
شکل (۴-۴) مقایسه مقاطع نشانه‌گری داده واقعی در حالت تمام فرکانس و تک فرکانس غالب



شکل (۴-۵) نشانگر گردایان برای داده واقعی در فرکانسهای متفاوت



شکل (۴-۶) نشانگر تقاطع برای داده واقعی در فرکانسهای متفاوت



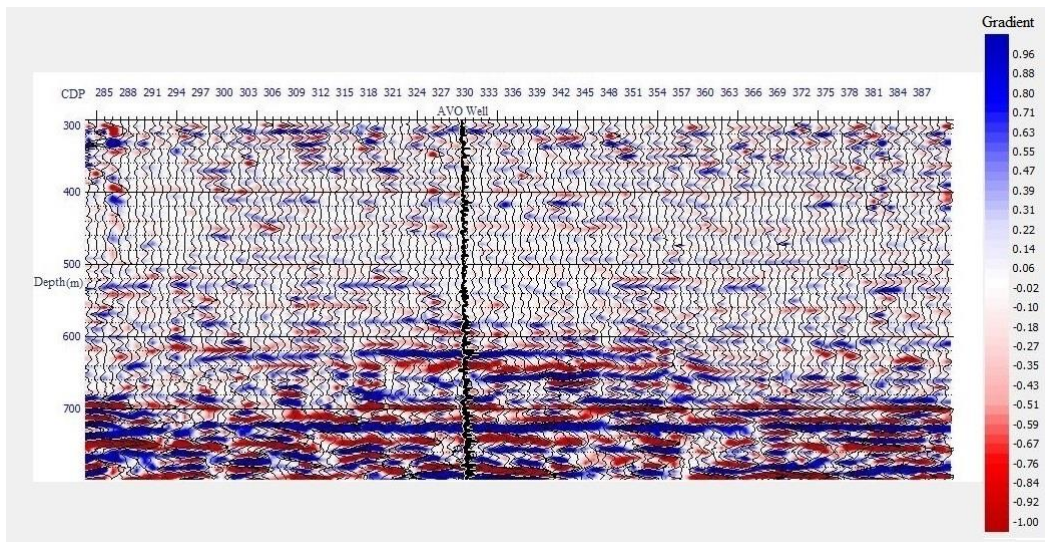
شکل (۴-۷) نشانگر حاصل ضرب برای داده واقعی در فرکانس‌های متفاوت

#### ۴-۴ خروجی گرادیان و اینترسپت نرم افزار HampsonRussell

با مقایسه خروجی‌های گرفته‌شده از داده‌ها کامل و داده‌های تک فرکانس استخراج‌شده از دو مدل مصنوعی و طبیعی تأثیر فرکانس‌های پایین، در وهله اول صحت مقاطع نشانگری حاصل‌شده از مدل طبیعی و سپس در کیفیت مقاطع نشانگری در فرکانس‌های متفاوت را ثابت کرد. این داده‌ها که با کمک نرم‌افزار MATLAB کد نویسی و حاصل‌شده بود با خروجی نهایی نرم‌افزار HampsonRussell نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

#### الف: نشانگر گرادیان

در شکل (۴-۸) نشانگر گرادیان داده واقعی از نرم‌افزار HampsonRussell استخراج‌شده است.



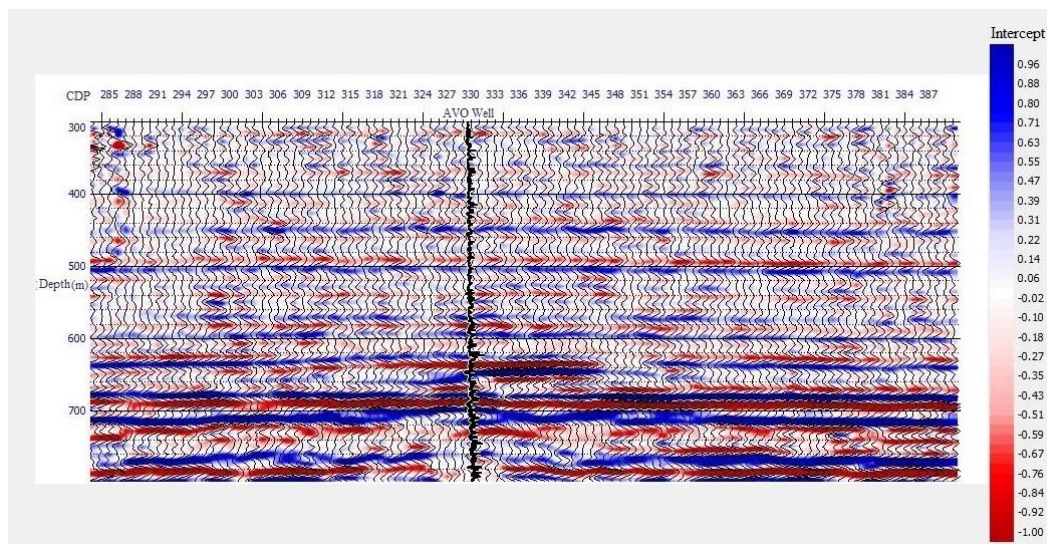
شکل (۴-۸) نشانگر گرادیان برای داده واقعی در نرم‌افزار HampsonRussell

الگوریتم استخراج نشانگر در این نرم‌افزار بر مبنا و مختص لرزه‌نگاری اکتشافی و به‌خصوص AVO ساخته‌شده است با روند این پژوهش که این نشانگرها در نرم‌افزار MATLAB استخراج شد قطعاً متفاوت است و شکل کیفیت و وضوح مقاطع استخراجی در این دو نرم‌افزار یکسان نمی‌باشد. به عبارتی نشانگر

گرایان در مدل طبیعی، مقطع نشانگری مناسبی را توسط MATLAB نمی‌دهد و استفاده از نشانگرهای دیگر بهتر باشد، اما بازتابنده‌ها، آنومالی‌ها و لیتولوژی به شکل یکسان شناسایی قابل است.

### ب: نشانگر تقاطع

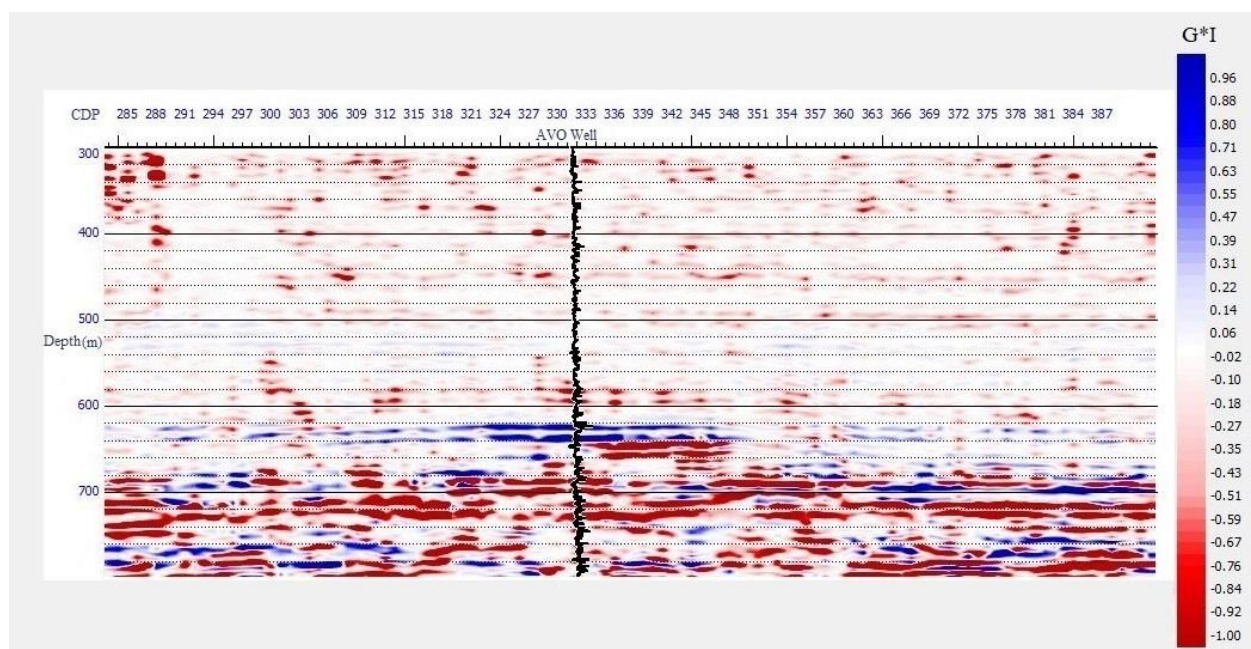
شکل (۹-۴) خروجی نشانگر تقاطع را در نرم‌افزار HampsonRussell نشان می‌دهد و می‌توان در مقایسه با شکل (۴-۶) خروجی‌های نشانگر تقاطع حاصل‌شده از داده اولیه و از مقاطع تک فرکانس و مطابقت کامل دارد.



شکل (۹-۴) نشانگر تقاطع برای داده واقعی در نرم‌افزار HampsonRussell

پ: نشانگر حاصل ضرب

مانند نشانگرهای گرادینان و تقاطع این نشانگر نیز با خروجی نرم افزار HampsonRussell مطابقت کامل دارد.



شکل (۴-۱۰) نشانگر حاصل ضرب برای داده واقعی در نرم افزار HampsonRussell



فصل پنجم:

نتیجه‌گیری

و

پیشنهادات

## ۵-۱ نتیجه گیری

**الف: تحلیل روی مقاطع تک فرکانس با فرکانس پایین:** با توجه به مقایسه مقاطع نشانگری حاصل از تحلیل AVO در نتیجه پژوهش، با توجه به اینکه تحلیل دامنه در برابر دورافت برای داده‌های لرزه‌ای که فقط شامل فرکانس غالب یا فرکانس‌های پایین چشمه باشد تغییرات نشانگرهای AVO در افق‌های عمقی متوالی را با روند واضح‌تری نسبت به داده تمام فرکانس نشان می‌دهد، در نتیجه مقطع نشانگری حاصل که تصویری دوبعدی از منطقه برداشت لرزه‌ای است واضح‌تر و کیفیت و کمیت آنومالی و نوع هیدروکربن و شکل پتروفیزیک منطقه موردنظر به واقعیت نزدیک‌تر است. اگرچه بر این واقعیت باید همچنان تأکید می‌شود که با دور شدن از فرکانس غالب دامنه انرژی فرکانس موردنظر کاهش می‌یابد، به عبارتی اطلاعات داده دریافتی کمتر است و این موضوع را در انتخاب فرکانس پایین موردنظر باید لحاظ نمود. زمین به عنوان یک فیلتر پایین گذر عمل می‌کند فرکانس‌های بالا در داده‌های دریافتی بیشتر دستخوش تغییر یا کاهش دامنه می‌شوند و از طرفی اثر نویزهای پتروفیزیکی روی آن‌ها بیشتر است، بنابراین با انجام آنالیز AVO در مقاطع تک فرکانس شامل فرکانس‌های پایین می‌توان یک مقطع نشانگری واضح‌تر به دست آورد.

**ب: انتخاب فرکانس پایین متناسب با شرایط:** با مقایسه مقاطع نشانگری حاصل شده از داده لرزه‌ای مصنوعی اولیه و مقاطع تک فرکانس با فرکانس غالب و سه مقطع تک فرکانس با فرکانس پایین‌تر از فرکانس غالب، می‌توان نتیجه گرفت چنانچه تحلیل AVO روی مقطع تک فرکانس غالب انجام شود، مقاطع نشانگری حاصل، از کیفیت و وضوح بهتری نسبت به انجام تحلیل AVO بر روی داده اصلی است و چنانچه این فرآیند در فرکانس‌های پایین‌تر انجام گیرد (البته با توجه به میزان دامنه انرژی این فرکانس) مقاطع نشانگری، مرزهای بازتابنده و نوع آنومالی‌های حاوی ماسه‌سنگ آبدار یا گازدار، با وضوح و کیفیت بهتر از حالات قبل خواهد بود. این مدل در کلاس اول AVO ساخته شده است و باید در نظر گرفت کلاس‌های مختلف AVO

پاسخ‌های متفاوت در مقاطع هر نشانگر خاص دارند و هدف از این تحقیق صرفاً بالا بردن کیفیت، وضوح تصویری مقطع نشانگری است و نتیجه این پژوهش برای دیگر کلاس‌های AVO نیز قابل استفاده است.

**پ: استفاده از نشانگرهای مختلف:** باید توجه داشت نشانگرهای متفاوت، پاسخ‌های مختلفی در این روش (فرکانس‌های پایین) می‌دهند و باید با توجه به نوع هیدروکربن مورد اکتشاف به‌عنوان مثال در این تحقیق، مخازن آبدار یا گازدار، از نشانگر مناسب برای تهیه مقطع نشانگری استفاده نمود که به‌عنوان یک نمونه، در مقاطع نشانگری Intercept مرزهای بازتابنده زون‌های آبدار و گازدار در فرکانس‌های پایین‌تر شارپ‌تر (به عبارتی با رزولوشن بالاتر) و مرزها و لبه‌ها بیشتر است.

**ت: پاسخ بهینه در مدل‌های واقعی:** مدل مصنوعی ایجادشده در این پژوهش یک مدل با شکل هندسی متقارن و فاقد آنومالی‌های معمول است و فقط مرزهای بازتابنده و فواصل را از نظر هندسی شامل می‌شود؛ اما در داده‌های برداشتی از مخزن‌های هیدروکربنی با توجه به اینکه AVO در محدوده فرکانس پایین انجام می‌شود، به دلیل اینکه فرکانس خاصیت ذاتی چشمه است و به نوع محیط و جنس و فیزیک آن وابسته نیست، ضرایب لایه و سرعت امواج P و S تعیین‌کننده طول موج تابیده‌شده است و اندازه طول موج، رزولوشن و ابعاد آنومالی‌های اکتشافی را مشخص می‌کند؛ بنابراین در مدل‌های واقعی که زمین حاوی آنومالی و حفره‌ها و تخلخل‌ها و خواص طبیعی دیگر است تحلیل AVO قطعاً پاسخ بهتری نسبت به مدل‌های متقارن مصنوعی می‌دهد.

## ۵-۲ پیشنهادها جهت بهبود نتایج تحلیل AVO

با توجه به موارد بیان شده در بخش نتیجه گیری، موارد زیر برای استخراج نتایج بهتر در انجام تحلیل دامنه در برابر دورافت پیشنهاد می گردد.

**الف: تحلیل روی داده‌ی تک فرکانس:** تحلیل AVO روی داده‌ی تک فرکانس به جای تحلیل بر روی داده کامل.

**ب: استخراج بهترین مقطع با تبدیل‌های مختلف:** استخراج داده‌های تک فرکانس به کمک تبدیل STFT از داده برداشت شده ابتدایی در پنجره‌ای که طول آن بهترین رزولوشن مکان-زمان را با توجه ب اصل عدم قطعیت هایزنبرگ به دست دهد. می توان مقطع تک فرکانس را با تبدیل‌های دیگر، نظیر تبدیل موجک نیز حاصل کرد. باید مدنظر داشت چه نوع تبدیلی هر نوعی از داده‌های لرزه‌ای با ویژگی خاص خود را با بهترین کیفیت و حفظ اصالت داده‌های اولیه را استخراج می کند.

**پ: استفاده از فرکانس‌های پایین:** استفاده از مقطع‌های داده تک فرکانس (فرکانس‌های پایین) تا حدی که فرکانس دارای اندازه دامنه قابل قبولی برای انجام آنالیز AVO باشد. طبق نتایج پژوهش فرکانس‌های پایین مقطع‌های نشانگری باکیفیت تری ارائه می دهند.

**ت: استفاده از (Band Pass):** پیش‌بینی می شود استفاده از یک محدوده (Band Pass) فرکانس‌های پایین به جای مقطع تک فرکانس می تواند نتیجه بهتری دهد، (با توجه به دلایل مطرح شده درباره طول موج فرکانس‌های مختلف و ابعاد آنومالی‌های مختلف).

**ث: استفاده از فرکانس طلایی<sup>۱</sup>:** تفاوت کلاس‌های مختلف AVO در تفاوت امپدانس صوتی مرزها است، فرکانس‌های مختلف و (طول موج‌های متفاوت و مؤلفه‌های مؤثر دیگر) زیرا هر کلاس می تواند نتیجه‌ای

---

<sup>1</sup> Golden Frequency

متفاوت را در تهیه مقاطع نشانگری در پی داشته باشد. با این توضیح، انتخاب بهترین فرکانس یا پهنای باند در محدوده فرکانس‌های پایین در هر کلاس (البته بازهم با توجه به انرژی آن فرکانس) می‌تواند بهترین نتیجه را در آن کلاس برای به دست آوردن مقاطع نشانگری به دست دهد. نتیجه تمامی محاسبات این پژوهش و تصاویر مقاطع نشانگری حاصل شده مبین آن است، دامنه فرکانسی که مقطع نشانگری استخراجی از آن بهترین وضوح را در مقاطع نشانگری می‌دهد بین ۶۵ تا ۷۵ درصد از دامنه پیک فرکانسی یا فرکانس غالب است. در نتیجه‌ی این پژوهش، می‌توانیم این فرکانس را فرکانس طلایی بنامیم زیرا نتایجی که مقاطع نشانگری آن می‌دهد نسبت به داده اولیه یا تمامی مقاطع استخراجی از آن دارای وضوح و کیفیت و قدرت تفکیک بهتر و بالاتر می‌باشد.



## منابع

### منابع فارسی

نظری، ب، (۱۳۹۴)، "اکتشاف هیدروکربن با استفاده از تکنیک AVO در داده‌های لرزه‌نگاری"، چاپ اول، موسسه انتشاراتی ستایش

### منابع لاتین

[1] Aki K. and Richards P. G. (1980), **"Quantitative seismology"**, Vol. 1, University Science Books, USA.1, pp 254

[2] Boashash, B. (2015), **"Time-frequency signal analysis and processing"** J.of. Academic Press is an imprint of Elsevier. 59,9 pp 1367

[3] Fatti J.L. Smith G.C. (1994), Vali, P.J., Strauss, P.J. and Levitt, P.R., **"Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis"** a 3-D seismic case history using the geostack

[4] Gassmann F. (1951), **"Elastic wave through apacking of spheres"**: Geophysics, 16(4), V673-V685.

[5] Han C., 2019, **"Spectral Decomposition AVO attributes for identifying potential hydrocarbon-related frequency anomalies"**, First Break 37(5):V89-V97

[6] Hampson D. Russell B., and Bankhead, B.,(2018) , “**Simultaneous inversion of pre-stack seismic data**”, SEG, Expanded abstracts

[7] Koefoed O., (1955), “**On the effect of Poisson’s ratio of rock strata on the reflection coefficient of plane wave**”, Geophysic, 3(4), V381-V387

[8] Lowrie W. (1998), “**Fundamentals of Geophysics**”, Cambridge University Press

[9] Mayne W. H., 1962, “**Common reflection point horizontal data stacking techniques**”, Geophysics, 27(6), V753-V1027

[10] Ostrander W.J., 1984, “Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incident”, Geophysics, 49(10), V1580-V1813

[11] Rutherford S.R., and Williams, R.H. 1989, “Amplitude-versus-offset variations in gas sands”, Geophysic, 54(6), V680-V689

[12] Yilmaz O., (2001), “Seismic data analysis”, Society of exploration geophysicists Press.

[13] Sheriff, R. E., and Geldart, L. P.,(1995), “Exploration seismology”, Cambridge university Press

## **ABSTRACT**

Amplitude Variation with Offset (AVO) is one of the most important methods of hydrocarbon exploration that has been widely used by geophysicists in recent decades. The basic equations of AVO, which investigate how changes in the reflection coefficients of seismic waves in terms of offset, are different approximations of the Zoeprits equations. By generating the AVO attributes sections, it is possible to find out the pore fluid content and lithology. This method becomes more important because AVO analysis is a good method for separation of gas sand zones from wet sand zones.

The seismic source wavelet is a band limited signal and composed of different frequencies. Due to the anelastic absorption during the wave propagation through the earth, the frequencies of seismic source wavelet are attenuated. The attenuation rate at high frequencies is much higher than at low frequencies, because earth acts like as a lowpass filter.

Since AVO analysis requires the true amplitude, the attenuated amplitude of high frequencies in seismic data can blurry the AVO attributes sections. It has also been proven that the most effects of amplitude of seismic wave on offset are on frequencies smaller than the dominant frequency. In this dissertation, by performing AVO analysis on iso-frequency section at low frequencies and extracting attributes sections from them, an attempt has been made to solve the mentioned problem. The investigation performed on the real and the synthetic data and comparison the obtained results with the conventional AVO analysis showed that attribute sections obtained from AVO analysis in data with low frequency content have better resolution than attribute sections of analysis from AVO analysis in data with full frequency bandwidth.

In the end by comparing all attribute sections obtained from both real and the synthetic data a frequency in the low frequency range was obtained which we called the "golden frequency" because its single sections will give the highest quality, resolution, accuracy, clarity of the attribute sections that are extracted in AVO analysis.

Key words:

AVO Analysis, Zoeppritz Equation, Dominant Frequency, AVO Attribute, Stacking



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering Petroleum and Geophysics

M.Sc Thesis in Geophysics Seismology

# **Spectral Analysis of Changes in the Amplitude of Reflected Seismic Waves with Offset, (AVO)**

By: HamidReza HosseinPour

Supervisors:

Dr. Amin Roshandel Kahoo

Dr. Mohammad Rdad

Advisor:

Dr. Mehrdad Soleymani

October, 2020