

# تحلیل AVO بر روی مخزن ماسه سنگی غار در میدان هندیجان

محمد طیبی<sup>۱\*</sup>، مجید نبی بیده‌ندی<sup>۲</sup>، بهزاد نظری<sup>۳</sup> و حسین خوشدل<sup>۴</sup>

۱- دانشکده نفت و گاز، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

۲- مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

۳- مدیریت اکتشاف، شرکت نفت فلات قاره ایران، تهران، ایران

۴- مدیریت اکتشاف نفت، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۲۳

## چکیده

استفاده از روش‌های کمی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای به جای روش‌های کیفی در مراحل اکتشاف تا تولید از مخازن نفتی، به مرور زمان جای خود را در صنعت بالا دستی نفت پیدا کرده است. یکی از مهمترین روش‌های کمی، بررسی نحوه تغییر ضرایب بازتاب امواج لرزه‌ای بر حسب تغییر دورافت (AVO) بین گیرنده و چشمه است. با استفاده از ارتباط دامنه در برابر دورافت، روابط زوپریتس و تقریب‌های آن می‌توان نشانگرهای مختلفی استخراج کرد و به کمک آنها محدوده‌های مخزنی را از لحاظ سیال و سنگ شناسی تفکیک نمود. هدف از این مقاله ارزیابی توانایی‌های روش AVO در تشخیص هیدروکربن در میدان هندیجان واقع در منطقه شمال غرب خلیج فارس با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از انبارش می‌باشد. بدین منظور در میدان هندیجان، با استفاده از مدل‌سازی مستقیم، لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از نگارهای چاه پیمایی ایجاد گردید و به کمک آن علت ناهنجاری مشاهده شده بر روی داده‌های لرزه‌ای قبل از برانبارش در مرز بالایی مخزن غار مشخص شد. سپس با تولید منحنی AVO نوع ناهنجاری مربوطه، کلاس اول تشخیص داده شد. روش‌های تحلیل AVO شامل مدل‌سازی مستقیم، مدل‌سازی جانشینی سیال، مطالعه نشانگرها و کراس پلات‌های AVO در محدوده مخزن، انجام گرفت. کارایی این روش به عنوان یک روش جامع برای اکتشاف مخازن ماسه سنگی با هیدروکربن سبک به اثبات رسیده است. این مطالعه با استفاده از داده‌های چاه پیمایی و سری داده‌های سه بعدی دریایی قبل از برانبارش، انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: تغییر دامنه با دورافت، مدل‌سازی مستقیم، مدل‌سازی جانشینی سیال، نشانگر لرزه‌ای، کراس پلات

## مقدمه

روش آنالیز AVO<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۲ میلادی معرفی شد و در سال‌های اخیر، این تکنیک به یک ابزار اصلی در اکتشافات منابع هیدروکربنی تبدیل شده است. به کمک این روش با داشتن درک مناسبی از لایه‌های زیرزمین و دانستن چگونگی به‌کارگیری این تکنولوژی، می‌توان خصوصیات کمی مخزن را مشخص کرد.

تحلیل AVO یک تکنیک لرزه‌ای است که با استفاده از داده‌های پیش از برانبارش<sup>۲</sup>، وجود هیدروکربن در مخزن را مشخص می‌کند. اساس آنالیز AVO بر پایه روابط تئوریک بین ضریب بازتاب، زاویه تابش، تغییرات موج طولی (VP)، سرعت موج برشی (VS) و چگالی ( $\rho$ ) در طول سطح برخورد است. این روابط، به خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها بستگی دارد. به‌خصوص در مرز بین رسوبات متراکم و یا نسبتاً متراکم اشباع از گاز و اشباع از آب، روابط متمایزی بین این پارامترها مشاهده می‌شود.

اولین تحقیقاتی که منجر به منتج شدن معادلاتی در مورد بازتاب و انکسار امواج الاستیکی همساز<sup>۳</sup> در مرز بین دو جامد الاستیکی هموزن و ایزوتروپیک گردید، توسط نات [۱] و زوپریتس [۲] انجام گرفت. اولین کارها جهت درک این معادلات و درک بازتاب‌های لرزه‌ای توسط موسکات و میرس [۳] در سال ۱۹۴۰ انجام شد. آنها نتیجه گرفتند که انرژی بازتابی از سطوح مختلف الاستیکی با افزایش زاویه تابش، کاهش خواهد یافت.

تفکیک انرژی یک موج فرودی به یک سطح بازتابی را می‌توان با چندین دسته معادلات نشان داد که نسبت دامنه امواج فرودی به بازتابی را محاسبه می‌کند. معادلات زوپریتس به توصیف جابه‌جایی ذرات می‌پردازد. حل معادله زوپریتس برای یک بازتابنده خاص به تفاوت میان سرعت موج برشی، سرعت موج تراکمی و چگالی هر دو محیط وابسته است.

کوفود [۴] اولین کسی است که تغییرات ضریب بازتابی با زاویه برخورد را ناشی از تفاوت نسبت پوآسون در عرض یک بازتابنده توصیف کرد. وی پیش‌بینی نمود که تغییرات ضرایب بازتابی را می‌توان برای پیش‌بینی‌های سنگ شناسی به‌کار برد.

تا سال ۱۹۸۲ کارهای اندکی در مورد استفاده از AVO برای تشخیص مستقیم هیدروکربن<sup>۴</sup> موجود است. اُستراندر [۵] شروع به پایه‌گذاری یک مبحث جدید در تفسیرهای لرزه‌ای کرد و در آن زمان در مجمع سالیانه ژئوفیزیکست‌های اکتشافی، AVO را به عنوان یک ابزار اکتشافی جدید معرفی نمود. اُستراندر از شرکت شورون<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۴ استفاده از AVO را برای تشخیص مستقیم گاز در دره ساکرمینتو در کالیفرنیا به چاپ رساند. اُستراندر یک کاربرد عملی از AVO را معرفی نمود. او با به‌کاربردن معادلات زوپریتس، منحنی‌های ضریب بازتاب در مقابل زاویه تابش را برای یک مدل سه لایه‌ای ساده تحلیل کرد.

هدف از این پژوهش، بررسی امکان تشخیص هیدروکربن با استفاده از روش AVO در منطقه شمال غرب خلیج فارس می‌باشد و این مطالعه بر روی مخزن ماسه سنگی غار در میدان هندیجان انجام گرفته است.

## مبانی تئوریک AVO

## معادلات زوپریتس

معادلات زوپریتس ضرایب بازتاب و عبور موج را به صورت تابعی از زاویه تابش مشخص می‌نماید، ولی این معادلات چگونگی تغییرات دامنه با تغییر پارامترهای فیزیکی سنگ را به درستی نشان

1. Amplitude Versus Offset

2. Pre-stack

3. Harmonic

4. Direct Hydrocarbon Indicator (DHI)

5. Chevron

- نشانگر تقاطع<sup>۱</sup> (A): این نشانگر تقریبی از ضریب بازتاب نرمال است که بر روی مقطع برانبارش معمولی نشان داده می‌شود.

- نشانگر گرادیان<sup>۲</sup> (B): این نشانگر مقدار گرادیان AVO را برای هر نقطه میانی مشترک نشان می‌دهد. تغییرات گرادیان وابستگی زیادی به تغییرات نسبت پواسون در بازتابنده دارد. این نشانگر به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده تغییرات دامنه با دورافت باشد، از این رو با نشانگر تقاطع به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماسه‌های گازدار دارای گرادیان و تقاطع منفی تری نسبت به ماسه‌های آبدار می‌باشند.

- نشانگر حاصل ضرب تقاطع در گرادیان (A\*B): این نشانگر از حاصل ضرب نشانگر تقاطع در گرادیان حاصل می‌شود. در مواردی که ضریب بازتاب نرمال، منفی و گرادیان نیز منفی باشد، پاسخ به صورت مثبت ظاهر می‌شود. (کلاس نوع سوم آنومالی AVO). پدیده‌هایی با دامنه فرود نرمال ضعیف، ممکن است در این مقاطع پنهان بماند. این نشانگر اغلب برای تشخیص هیدروکربن نامناسب است، چرا که تنها وقتی که تقاطع و گرادیان هر دو منفی باشد، مثبت و کارآمد است. بنابراین اغلب در تشخیص آنومالی کلاس نوع سوم به کار می‌رود.

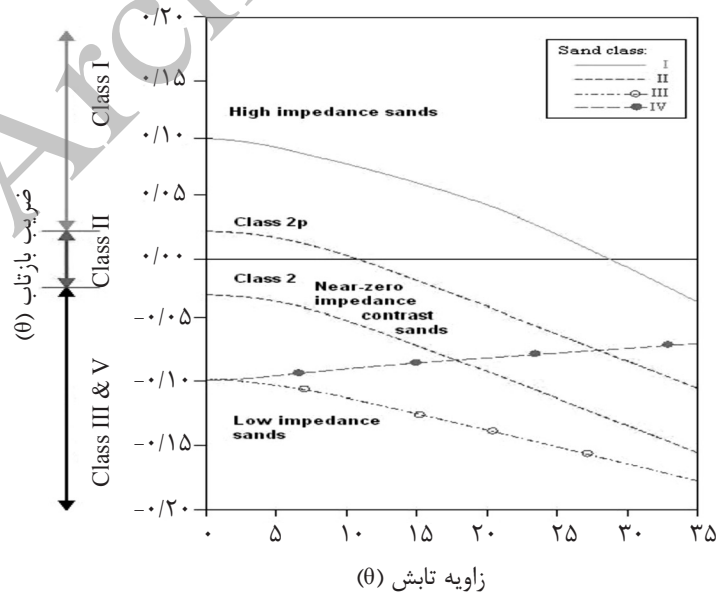
نمی‌دهد. تقریب‌های معادلات زوپریتس نسبت به معادلات کلی، ساده‌تر و عمومی‌تر است. از جمله تقریب‌های مشهوری که برای معادله زوپریتس ارائه گردید، تقریب آکی ریچاردز و فریزر، تقریب شوی و تقریب فاتی و همکاران می‌باشد. به کمک این تقریب‌ها نشانگرهای مختلفی استخراج می‌شود.

#### کلاس بندی پاسخ‌های AVO

رادرفورد و ویلیامز [۶] بر اساس نحوه تغییرات ضریب بازتاب و دامنه نسبت به دورافت، سه کلاس مختلف برای مرز بالایی یک ماسه گازدار در نظر گرفتند. کاستاگانا و همکاران [۷] نیز کلاس چهارمی پیشنهاد نمودند که در آن ضریب بازتاب منفی بوده و با افزایش دورافت، بیشتر می‌شود. کلاس بندی AVO برای مرز بالایی یک ماسه گازدار در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### نشانگرهای AVO

نشانگرها پارامترهایی هستند که به وسیله روابط مختلف استخراج شده و هر کدام قابلیت‌های خاص خود را دارند. برخی از آنها در تشخیص سیال و برخی در تشخیص سنگ‌شناسی توانایی بیشتری دارند. رایج‌ترین نشانگرهای AVO عبارتند از:



شکل ۱- کلاس بندی AVO برای مرز بالایی یک ماسه گازدار [راهنمای نرم افزار همپسون-راسل]

1. Intercept
2. Gradient

اسمیت و گیدلو در سال ۱۹۸۷، به منظور تشخیص ماسه‌های گازدار ارائه شد [۸]. ماسه‌ها و سنگ‌های سیلیسی<sup>۱</sup> اشباع از آب و شیل در مقطع کراس پلات  $V_p$  نسبت به  $V_s$  تقریباً بر روی خط گل-سنگ قرار می‌گیرند. در حالی که ماسه‌های اشباع از گاز سرعت موج تراکمی کمتر و تا حدودی سرعت موج برشی بالاتری دارند و در زون گازدار قرار می‌گیرند. ماسه‌های با تخلخل بالا در قسمت سرعت پایین و ماسه‌های با تخلخل پایین در قسمت سرعت بالا قرار می‌گیرند. آنها به طور تجربی معادله خط گل سنگ را به صورت زیر ارائه دادند:

$$V_p = 1360 + 1.16V_s \quad (6)$$

که مشتق آن به صورت زیر است:

$$\Delta V_p = 1.16 \Delta V_s \quad (7)$$

که می‌تواند به صورت زیر تغییر کند:

$$(\Delta V_p / 2V_p) = 1.16 (V_s / V_p) (\Delta V_s / 2V_s) \quad (8)$$

$$R_p - 1.16(V_s / V_p)R_s = 0 \quad (9)$$

معادله ۹ تنها در طول خط گل-سنگ صحیح می‌باشد، بنابراین فاکتور سیال  $\Delta F$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta F = R_p - 1.16(V_s / V_p)R_s \quad (10)$$

اگر لایه‌های بالا و پایین مرز بازتابش روی خط گل-سنگ قرار گیرد،  $\Delta F = 0$  است. ولی اگر یکی از لایه‌ها شیل یا ماسه اشباع از آب و لایه دیگر ماسه گازدار باشد، ماسه گازدار اندکی در خارج از خط قرار می‌گیرد و در این حال  $\Delta F$  صفر نخواهد بود. بنابراین، می‌توان گفت که مقدار  $\Delta F$  در مرز بالایی و پایینی ماسه‌های گازدار صفر نیست.

## موقعیت جغرافیایی و اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی

### میدان هندیدجان

#### میدان نفتی هندیدجان

میدان نفتی هندیدجان در شمال غربی خلیج فارس و در ناحیه دزفول جنوبی بین میدان‌های ماهشهر و دیلم در خشکی و در دریا در فاصله ۱۰ km شمال شرقی میدان بهرگانسر واقع شده است. ساختمان

- نشانگر  $(\frac{A-B}{P})$ : این نشانگر معادل نشانگر ضریب بازتاب نرمال موج برشی است

$$\frac{A-B}{2} = R_s \quad (1)$$

در رابطه بالا  $R_s$  ضریب بازتاب نرمال موج برشی است

- نشانگر  $(\frac{A+B}{P})$ : با توجه به معادله ۱ این نشانگر می‌تواند تقریب مناسبی از تفاوت ضریب بازتاب موج تراکمی و برشی باشد (معادله ۲). این نشانگر اغلب در مرز بین شیل به ماسه گازی منفی بوده و کارایی آن بیشتر در ماسه‌های گازی با سرعت موج تراکمی پایین می‌باشد. از مزایای این نشانگر نسبت به نشانگرهای دیگر این است که اغلب برای ماسه‌های گازدار نسبت به ماسه‌های آبدار مقدار منفی تری دارد و ممکن است برای ماسه‌های گازی مثبت، صفر و یا منفی باشد.

$$\frac{A+B}{P} = R_p - R_s \quad (2)$$

در رابطه بالا  $R_p$  ضریب بازتاب نرمال موج تراکمی است.

- نشانگر تغییر نسبت پواسون: ضریبی از  $A+B$  با توجه به ساده سازی‌های معادله خطی شوی می‌تواند بیان‌گر تغییرات نسبت پواسون باشد. گرادیان با استفاده از معادله خطی شوی به صورت معادله ۳ نوشته می‌شود:

$$B = R_p A + \frac{\Delta \sigma}{(1-\sigma)^2} \quad (3)$$

به گونه‌ای که:

$$A_0 = C - 2(1+C) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma}$$

$$C = \frac{\Delta V_p / V_p}{\Delta V_p / V_p + \Delta \rho / \rho}$$

$\Delta \sigma$  تغییرات نسبت پواسون در بازتابنده و  $\sigma$  میانگین نسبت پواسون دو محیط است. اگر نسبت  $V_p/V_s$  برابر ۲ باشد، می‌توان گرادیان را به شکل ساده معادله ۴ نوشت:

$$B = -R_p + \frac{E}{9} \Delta \sigma \quad (4)$$

همچنین معادله ۴ را می‌توان بر حسب تغییرات نسبت پواسون به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta \sigma = \frac{A+B}{2.25} \quad (5)$$

- نشانگر فاکتور سیال: مفهوم فاکتور سیال توسط

هندیجان - بهرگانسر استفاده شده است. مساحت تقریبی عملیات برداشت شده حدود  $620 \text{ km}^2$  بود و شامل مناطق خشکی، حدواسط و آب‌های کم عمق باشد که در حدود  $110 \text{ km}^2$  آن در ناحیه خشکی واقع شده است. هنگام برداشت این داده‌ها، مطابق شکل ۳، از سه نوع گیرنده شامل ژئوفون، مارشفون و هیدروفون و همچنین مطابق شکل ۴، از سه نوع چشمه شامل ویراتور، دینامیت و تفنگ بادی استفاده شده است.

### تحلیل AVO بر روی مخزن غار

در این مقاله برای تحلیل AVO، روش‌های مدل‌سازی مستقیم، جان‌شینی سیال، استخراج نشانگرهای مختلف و ترسیم کراس پلات بر روی مخزن ماسه سنگی غار اعمال گردید تا امکان استفاده از روش AVO در تشخیص هیدروکربن‌های سبک در منطقه شمال غرب خلیج فارس بررسی شود. این مطالعه بر روی داده‌های لرزه‌ای سه بعدی و سه حلقه چاه میدان هندیجان، انجام می‌گیرد.

نگارهای چاه پیمایی شامل نگار چگالی، سرعت موج S و سرعت موج P که برای مدل‌سازی مستقیم لازم است، در این چاه‌ها برداشت شده است.

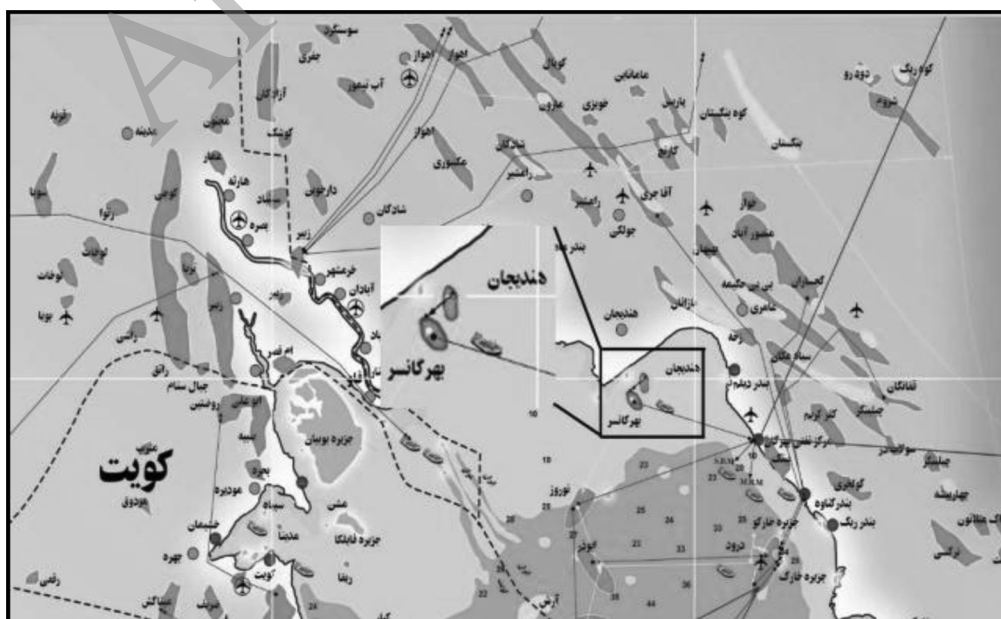
هندیجان یک تاقدیس با روند ساختمانی شمالی - جنوبی در محدوده جزر و مد دریا واقع شده و عمق آب حداکثر ۴ m می‌باشد. این میدان در سال ۱۹۶۸ توسط شرکت شد سیرپ، کشف شد و با حفر ۵ حلقه چاه در بخش دریایی ساختمان هندیجان وجود نفت در چهار افق، بخش ماسه سنگی غار، آسماری کربناته، سروک و در ماسه سنگ نهر-امر به اثبات می‌رسید (شکل ۲). در این تحقیق از سه چاه که دارای کامل‌ترین نگاره‌های برداشت شده بودند، استفاده شد.

### مخزن ماسه سنگی غار در میدان هندیجان

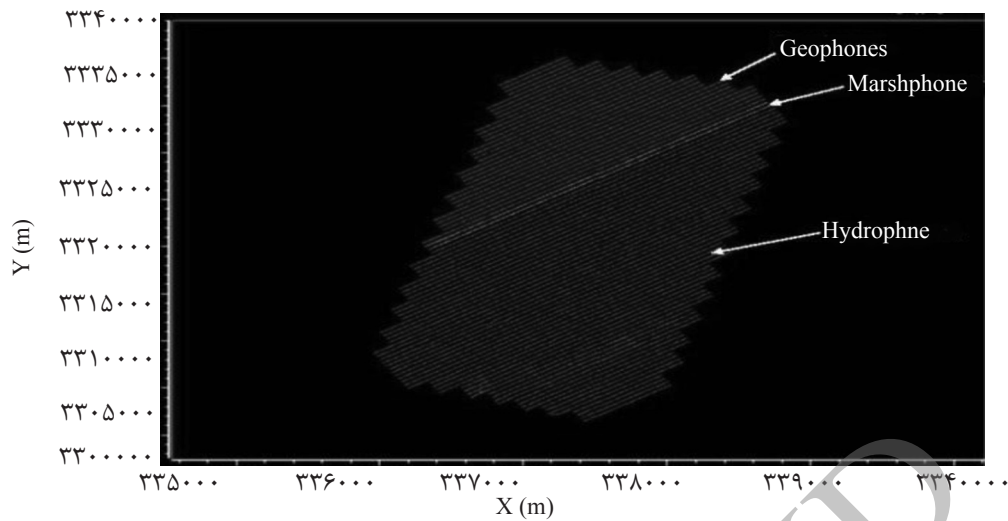
این بخش از نظر سنی، معادل بخش ماسه سنگی اهواز می‌باشد و یکی از بخش‌های مخزنی شناخته شده ناحیه خلیج فارس را تشکیل می‌دهد که عمدتاً از ماسه سنگ‌های کوارتزی ریز دانه با سیمان دولومیتی همراه با لایه‌های نازکی از دولومیت‌های ریز بلور ماسه‌ای گاهی فسیل دار قهوه‌ای کم رنگ و همچنین تکه‌هایی از ندول‌های انیدریتی به انضمام لایه‌های نازکی از شیل سبز رنگ تشکیل شده است. از قسمت میانی به پایین بر مقدار دولومیت‌های ماسه‌ای و همچنین شیلی افزوده می‌شود.

### داده‌های لرزه‌ای سه بعدی میدان هندیجان

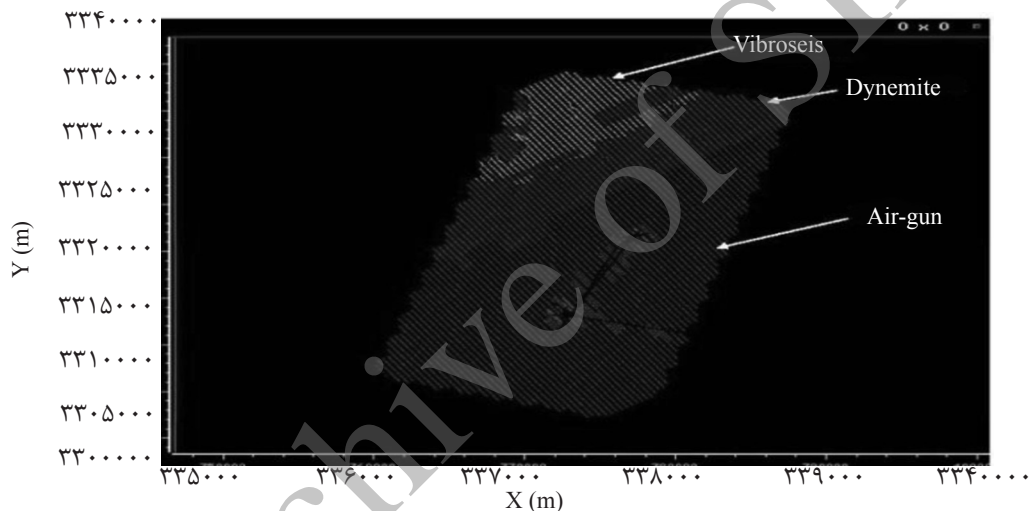
در این تحقیق، از داده‌های سه بعدی پیش از برانبارش



شکل ۲- نقشه میداین نفت و گاز در شمال غربی خلیج فارس و موقعیت جغرافیایی میدان هندیجان



شکل ۳- سه نوع گیرنده شامل ژئوفون، مارشفون و هیدروفون استفاده شده در عملیات لرزه‌نگاری



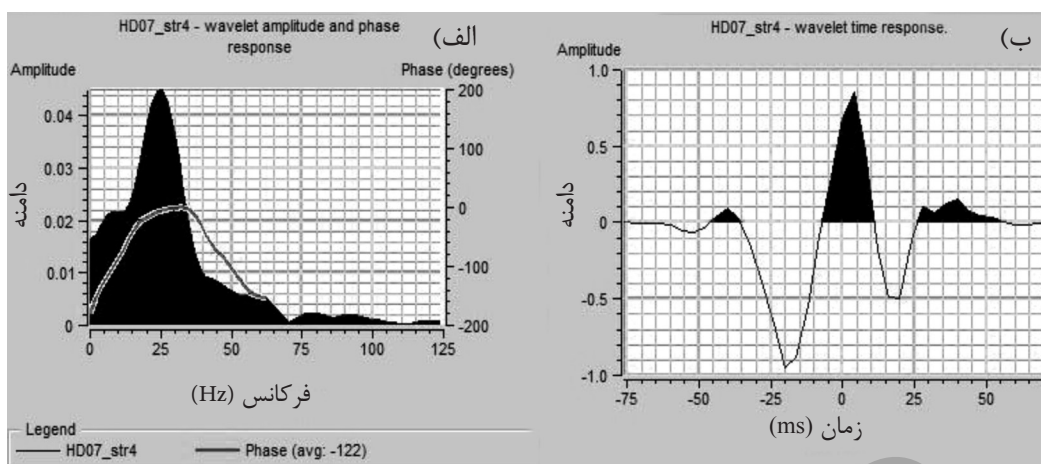
شکل ۴- سه نوع چشمه شامل ویراتور، دینامیت و تفنگ بادی به کار گرفته شده در عملیات لرزه‌نگاری

به صورت پیک نمایان است و در مرز پایین‌تری نسبت به بازتاب مربوطه بر روی لرزه‌نگاشت مصنوعی چاه قرار دارد. برای تطابق لرزه‌نگاشت مصنوعی و ردلرزه‌ای در محل چاه، بازتاب‌های مشخص بر روی لرزه‌نگاشت مصنوعی جابه‌جا می‌شود. پس از این مرحله، موجک مناسب با روش همبستگی چاه و داده لرزه‌ای استخراج می‌شود (شکل ۵) که با استفاده از آن، لرزه‌نگاشت مصنوعی مجدداً تولید می‌شود. لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در این مرحله تطابق بیشتری با داده لرزه‌ای واقعی دارد. ضریب تطابق برای چاه‌های HD-07، HD-06 و HD-01 به ترتیب به بیش از ۷۹٪ (شکل ۶)، ۷۲٪ و ۸۶٪ می‌رسد.

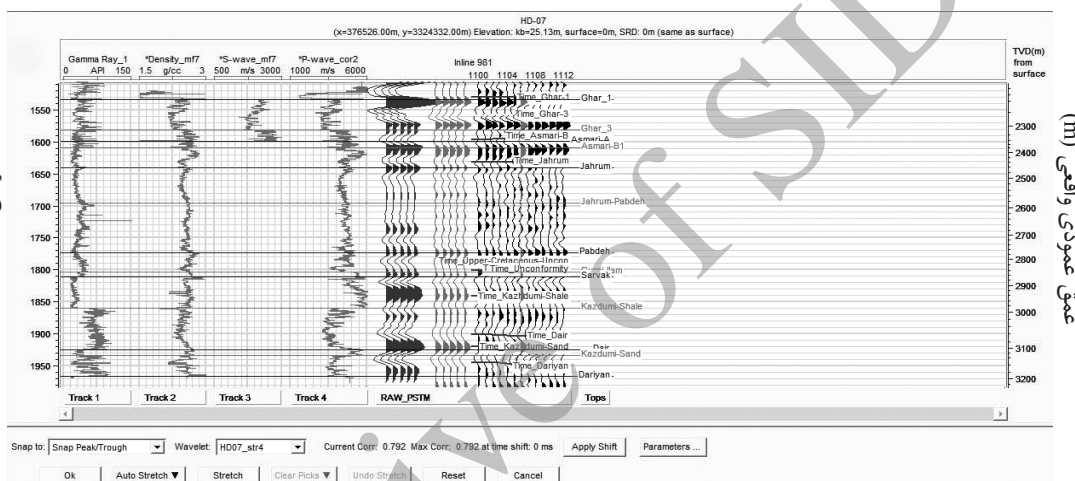
مراحل انجام کار به شرح ذیل می‌باشد:

#### مدل‌سازی مستقیم

مدل‌سازی AVO به منظور مشخص نمودن چگونگی تغییرات دامنه با دورافت و تعیین پارامترهای ایجاد کننده این تغییرات انجام می‌شود. با کمک نگارهای موجود و با استفاده از معادله زوپریتس و ردیابی پرتو، لرزه‌نگاشت مصنوعی حاصل از چاه تولید می‌شود. به منظور از بین بردن اسپایک‌های شدید در نگارهای چاه پیمایی از یک فیلتر مدین ۷<sup>۲</sup> استفاده شد. همچنین نگارها در محدوده‌های ۱۰ m بلوک‌بندی می‌شوند. پس از ایجاد لرزه‌نگاشت مصنوعی اولیه، بازتاب‌های مشخص بر روی داده لرزه‌ای واقعی و لرزه‌نگاشت مصنوعی چاه مقایسه می‌شود. بازتاب مربوط به مرزبالایی ماسه سنگ غار بر روی داده‌های لرزه‌ای



شکل ۵- موجک استخراج شده از تطابق بین چاه HD-07 و داده لرزه‌ای واقعی



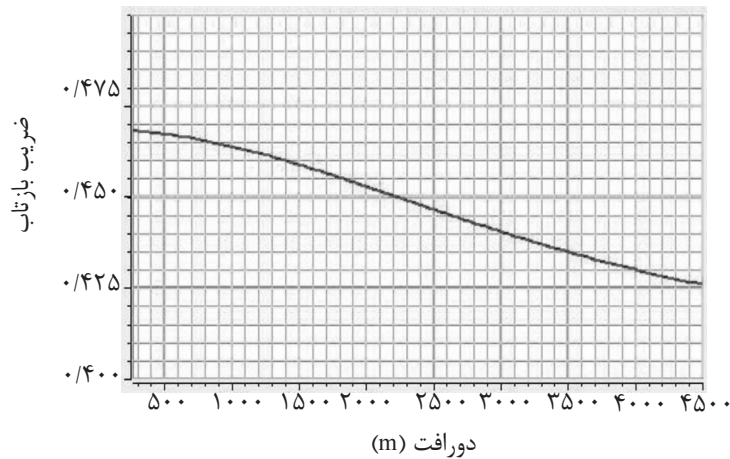
شکل ۶- تطابق داده لرزه‌ای واقعی و لرزه نگاشت مصنوعی با استفاده از موجک استخراج شده از چاه HD-07 (ضریب تطابق بیش از ۰.۷۹)

محل چاه که به صورت تغییرات دامنه نسبت به دورافت مرتب شده، نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل نمایان است، بر روی CDP واقعی نیز دامنه‌ها با افزایش دورافت، کاهش می‌یابد که دلیلی بر ناهنجاری AVO کلاس اول می‌باشد.

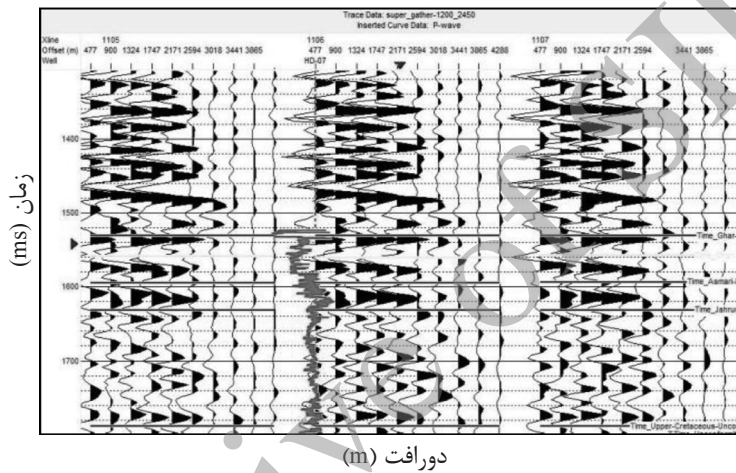
#### مدل‌سازی جانشینی سیال

در این مرحله به منظور تأیید اینکه ناهنجاری AVO مربوط به بخش غار ناشی از سیال بوده و بیشتر متأثر از گاز می‌باشد یا خیر، از مدل‌سازی جانشینی سیال در چاه HD-07 استفاده می‌گردد. به کمک مدل‌سازی جانشینی سیال، بهترین نشانگرها برای تشخیص مرز بالای ماسه سنگ غار مشخص می‌شود. این نشانگرها تا حد زیادی به سیال درون منفذی وابسته می‌باشند.

در این مرحله منحنی زمان-عمق چاه تصحیح و لرزه نگاشت مصنوعی با داده‌های لرزه‌ای کالیبره می‌گردد. در ادامه بر روی لرزه نگاشت مصنوعی ایجاد شده در محل چاه HD-07، برای مرز بالای ماسه سنگ غار (زمان ۱۵۳۴/۴ میلی ثانیه)، منحنی AVO که تغییرات ضریب بازتاب را نسبت به دورافت نشان می‌دهد، استخراج می‌گردد. منحنی مربوطه تأکید می‌کند که ناهنجاری AVO مرز بالای ماسه سنگ غار از نوع کلاس اول است، یعنی دارای گرادیان منفی و تقاطع مثبت می‌باشد (شکل ۷). در این کلاس ماسه‌ها نسبت به محیط اطراف دارای مقاومت بالاتری بوده و معمولاً در سنگ‌های سخت از جمله ماسه‌های بالغ با فشردگی متوسط تا زیاد قابل رؤیت است. شکل ۸ ناهنجاری AVO در مرز بالایی ماسه سنگ غار را بر روی CDP واقعی در



شکل ۷- منحنی AVO در مرز بالای بخش غار در چاه HD-07 که ناهنجاری AVO کلاس نوع اول را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمایش داده‌های لرزه‌ای در حوزه دورافت

است. تغییراتی که در نگارها در حالت‌های مختلف ایجاد می‌شود به شرح ذیل است:

۱- حالت ۱۰۰٪ اشباع آب: نگار موج S تغییر نکرده ولی نگار سرعت موج P بیشتر و نگار چگالی نیز مقدار بیشتری را نشان می‌دهد

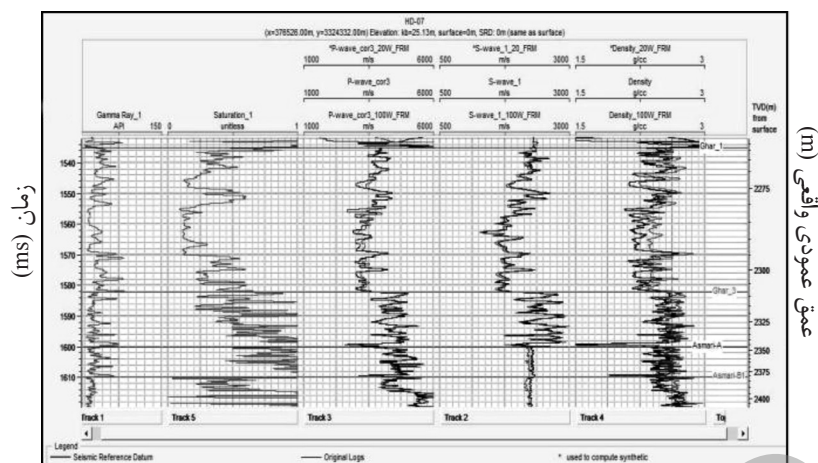
۲- حالت ۲۰٪ اشباع آب و ۸۰٪ اشباع گاز: نگار موج S و P تغییر نکرده و نگار چگالی، مقدار خیلی کمی تغییر را نشان می‌دهد.

در ادامه نشانگرهای مختلف بر روی لرزه نگاشت‌های حاصل از مدل‌سازی جان‌نشینی سیال، استخراج گردید تا مشخص شود کدام نشانگرها نسبت به تغییر سیال حساسیت بیشتری دارد. از بین نشانگرهای استخراج شده، نشانگرهای تغییرات ضریب پواسون، تقاطع، تقاطع در علامت گرادیان<sup>۱</sup> و تقاطع در گرادیان، نسبت به تغییر سیال در مرز بالایی مخزن غار (محدوده بیضی قرمز رنگ) مقدار کمی حساسیت نشان دادند (شکل‌های ۱۱ تا ۱۴).

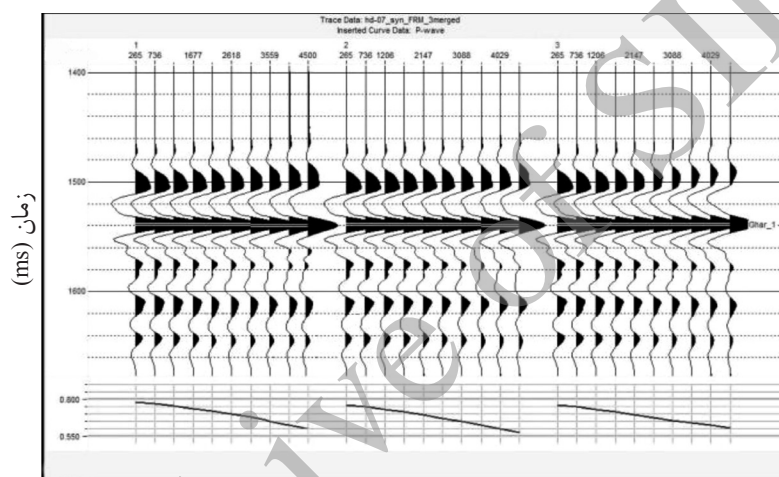
اساس جان‌نشینی سیال بر معادله گاسمن استوار است. برای این منظور در محدوده هیدروکربنی مخزن در محل چاه، نگارهای سرعت موج P، سرعت موج S و چگالی در سه حالت مختلف (حالت واقعی موجود، حالت اشباع ۱۰۰٪ آب و حالت اشباع ۸۰٪ گاز و ۲۰٪ آب- شکل ۹) محاسبه و لرزه‌نگاشت مصنوعی مربوط به سه حالت محاسبه گردید. در شکل ۱۰، CDP های مصنوعی برای چاه در سه حالت سیال مختلف رسم شده است. از چپ به راست مربوط به حالت اشباع ۱۰۰٪ آب، حالت اشباع ۸۰٪ گاز و ۲۰٪ آب و حالت واقعی می‌باشند. منحنی‌های زیر هر CDP، تغییرات دامنه نسبت به دورافت را نشان می‌دهد. حالت واقعی موجود بسیار نزدیک به حالت ۲۰٪ آب و ۸۰٪ گاز می‌باشد. ولی با توجه به تغییراتی که در نگار چگالی در حالت ۲۰٪ آب و ۸۰٪ گاز نسبت به حالت واقعی موجود ایجاد می‌گردد (کاهش در چگالی)، می‌توان نتیجه گرفت که مرز بالایی مخزن غار دارای گاز با درجه اشباع کمتر از ۸۰٪

1. A\*signB



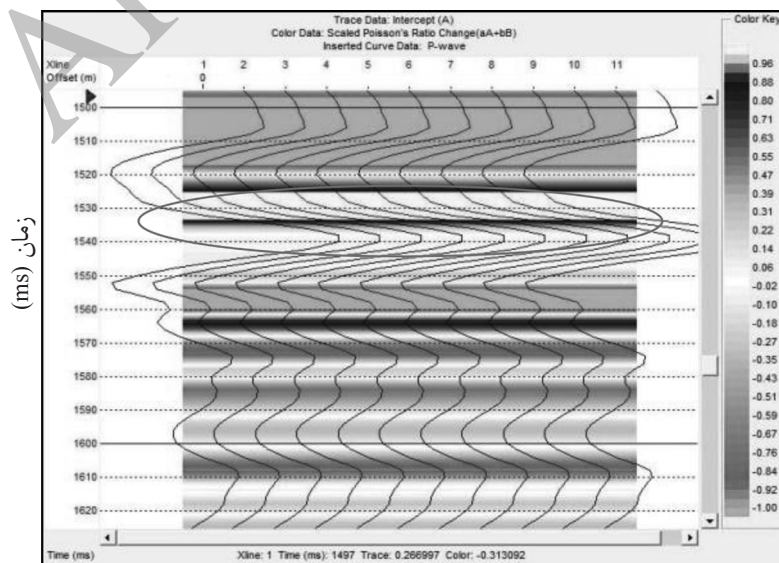


شکل ۹- نگارهای ایجاد شده در سه حالت (اول: حالت اشباع ۱۰۰٪ آب و دوم: حالت اشباع ۸۰٪ گاز و ۲۰٪ آب و سوم: حالت واقعی موجود)



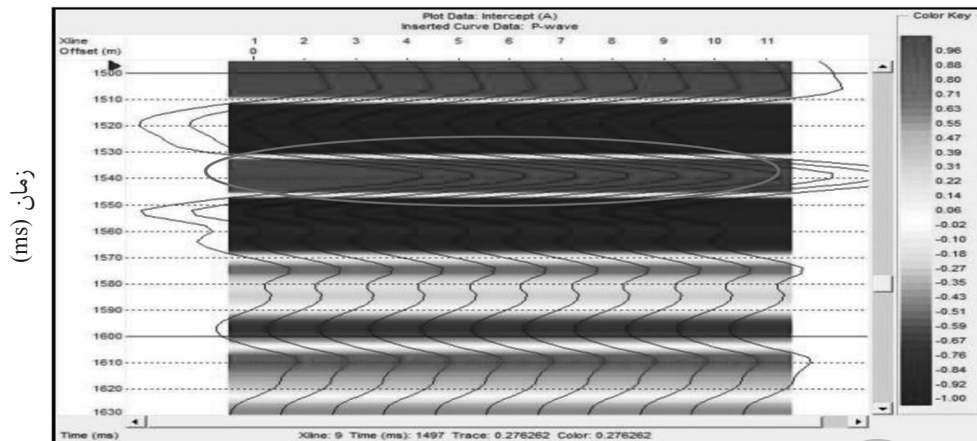
دورافت (m)

شکل ۱۰- لرزه نگاشت‌های مصنوعی چاه HD-07 در سه حالت مختلف (به ترتیب از چپ به راست مربوط به حالت اشباع ۱۰۰٪ آب، حالت اشباع ۸۰٪ گاز و ۲۰٪ آب و حالت واقعی)

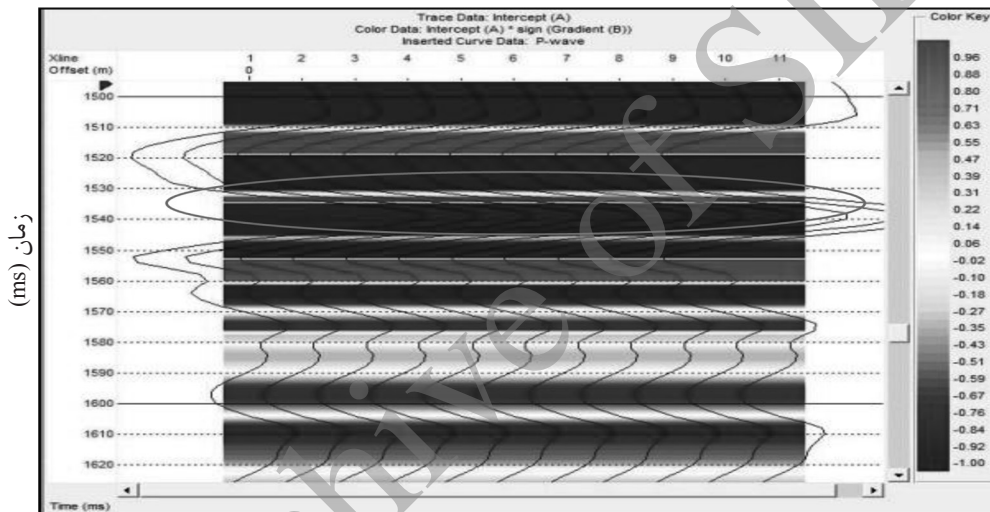


دورافت (m)

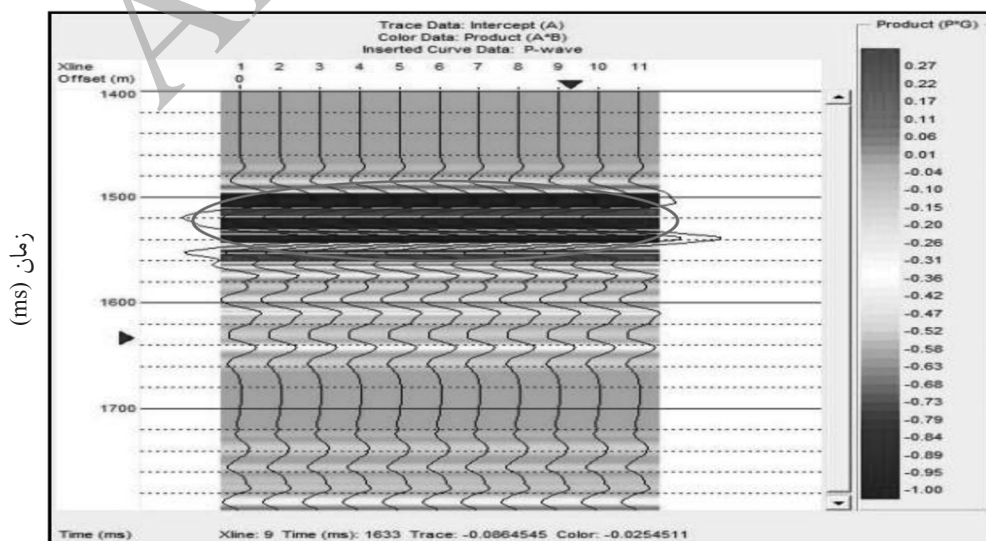
شکل ۱۱- نشانگر تغییرات نسبت پواسون



دورافت (m)  
شکل ۱۲- نشانگر تقاطع



دورافت (m)  
شکل ۱۳- نشانگر تقاطع در علامت گرادیان



دورافت (m)  
شکل ۱۴- نشانگر تقاطع در گرادیان

مخزن غار دارای تغییرات کمی است. قسمت‌هایی از مخزن که تغییرات ضریب پواسون زیادتری را نشان می‌دهد، دارای تخلخل بالاتری است. نشانگر گرادیان نیز در شکل ۱۷ نشان داده شده که بر روی آن مرز بالایی ماسه سنگ غار دارای مقادیر منفی است. این نتایج با نتایجی که پیشتر از بررسی نشانگرها در مدل‌سازی جانشینی سیال به‌دست آمده، هماهنگی دارد. به منظور تشخیص راحت‌تر ناهنجاری‌ها بر روی مقاطع نشانگرها بهتر است مقیاس رنگی تغییر داده شود تا نقاط ناهنجار که دارای مقادیر بیشترین و یا کمترین هستند، بر روی مقاطع بهتر نمایان شوند.

### کراس پلات

کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان با استفاده از لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از چاه

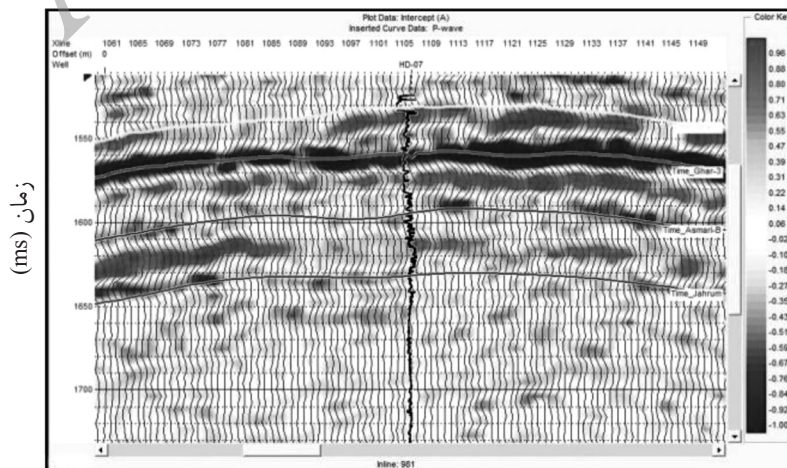
کراس پلات‌ها ابزار قدرتمندی برای تفکیک زون‌های مختلف از لحاظ سیال و سنگ‌شناسی می‌باشند. می‌توان کراس پلات ناشی از داده‌های تقاطع را نسبت به داده‌های گرادیان در تفسیر ناهنجاری‌های AVO به کار برد. کراس پلات یک ابزار تشخیصی برای دسته‌بندی پاسخ‌های AVO و تشخیص رسوبات هیدروکربنی می‌باشد. با مرتبط کردن پارامترهای فیزیک سنگ، مدل‌سازی AVO و رسم کراس پلات، می‌توان قطبیت ناهنجاری‌های AVO را تحلیل کرد.

همان‌طور که انتظار می‌رفت نشانگر تقاطع، مقادیر مثبت و نشانگر تقاطع در گرادیان مقادیر منفی را نشان می‌دهند.

### بررسی نشانگرهای AVO بر روی داده‌های لرزهای

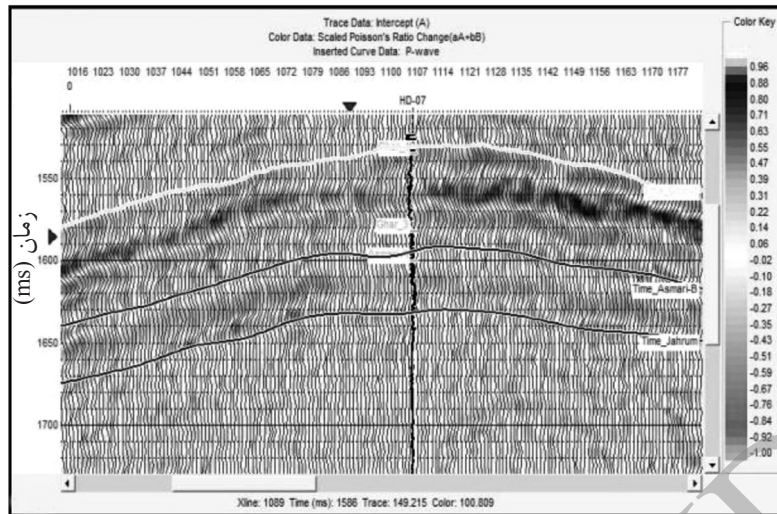
مقطع زمانی نشانگرهای AVO با استفاده از داده‌های لرزهای واقعی به منظور تشخیص بهتر ناهنجاری‌های AVO استخراج گردید. از جمله این نشانگرها، می‌توان به نشانگرهای گرادیان، تقاطع و تغییرات ضریب پواسون اشاره کرد.

از آنجایی که مرز بالایی ماسه سنگ غار در میدان هندیمان دارای ناهنجاری AVO کلاس اول (تقاطع مثبت و گرادیان منفی) بوده و متأثر از تغییرات لیتولوژی است، تغییرات سیال تأثیر ناچیزی بر روی آنها می‌گذارد. بنابراین، نشانگرهای AVO بر روی داده‌های لرزهای تغییرات زیادی نشان نمی‌دهد که عواملی مانند ضعف کیفیت اطلاعات برداشت شده، پایین بودن نسبت سیگنال به نویز، تغییر در نوع چشمه و گیرنده، وجود گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان در منطقه و عدم وجود نگارهای موج P و موج S در بالای مخزن غار، باعث تضعیف بیشتر نشانگرهای AVO شده است. در شکل ۱۵ نشانگر تقاطع بر روی مقطع تقاطع نشان داده شده است که در بخش مخزن به رنگ قرمز می‌باشد و نشان‌دهنده مقادیر مثبت است. همچنین در شکل ۱۶ مقطع تغییرات ضریب پواسون نشان داده شده که در آن مرز بالایی



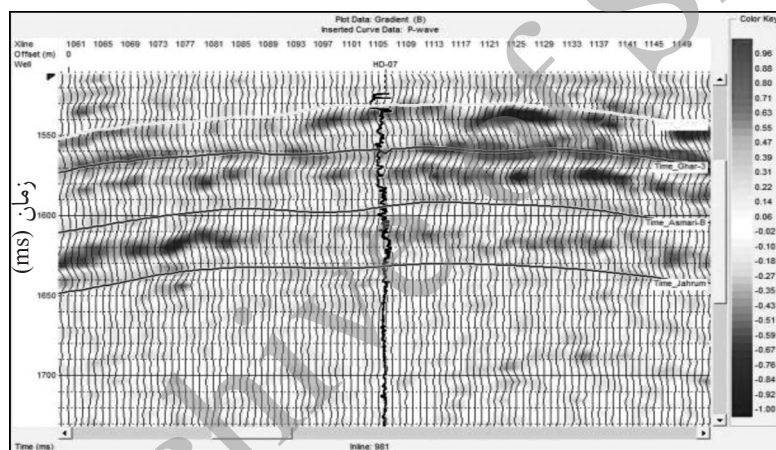
دورافت (m)

شکل ۱۵- نشانگر تقاطع بر روی مقطع تقاطع



دورافت (m)

شکل ۱۶- نشانگر تغییرات نسبت پواسون بر روی مقطع تقاطع



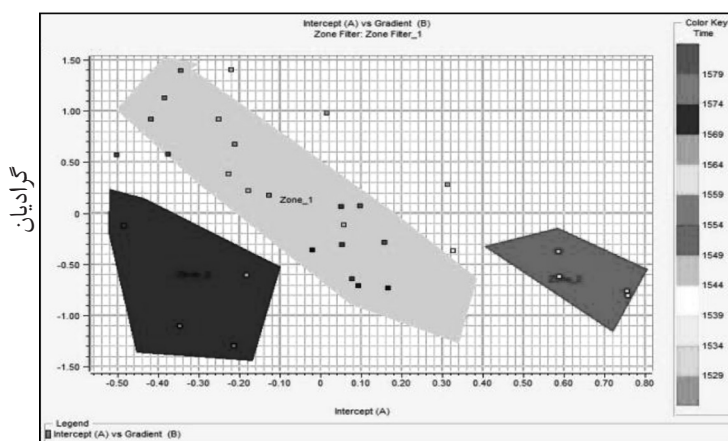
دورافت (m)

شکل ۱۷- نشانگر گرادیان بر روی مقطع گرادیان

کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان استفاده گردد. شکل ۱۸ کراس پلات به دست آمده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، اکثر نقاط به دست آمده یک روند آبدار را نشان می‌دهد (در جهت ربع دوم و چهارم) و برخی نقاط نیز در ربع سوم و چهارم قرار گرفته‌اند که مربوط به نواحی هیدروکربنی است. بر روی کراس پلات به دست آمده محدوده خاکستری رنگ مربوط به نقاط آبدار، محدوده خاکستری کم رنگ مربوط به نقاط بالای مخزن با هیدروکربن سبک (احتمالاً گاز) و محدوده رنگ خاکستری تیره مربوط به نقاط هیدروکربن دار در پایین مخزن است که به احتمال زیاد مربوط به محدوده نفت‌دار می‌باشد. به دلیل اینکه منحنی AVO از نوع اول است، زون گازی در ربع چهارم قرار می‌گیرد.

کراس پلات در اواخر سال ۱۹۹۰ بر مبنای طرح رادرفورد و ویلیامز [۴] توسعه یافت. تحت شرایط مختلف زمین‌شناسی، مقادیر گرادیان و تقاطع در ماسه‌های آبدار و شیل از یک روند مشخص زمینه پیروی می‌کند. آنومالی AVO به صورت انحراف از این روند زمینه مشخص می‌گردد که می‌تواند مربوط به فاکتورهای سنگ شناسی یا حضور هیدروکربن باشد.

تکنیک کراس پلات برای تفکیک سیالات محدوده مخزن بر روی داده‌های واقعی و لرزه نگاشت حاصل از چاه انجام می‌شود. بر روی لرزه نگاشت مصنوعی در محدوده مخزن غار یک پنجره زمانی به ضخامت ۷۰ میلی ثانیه در نظر گرفته می‌شود تا از نقاط مربوط به این محدوده برای ترسیم



تقاطع

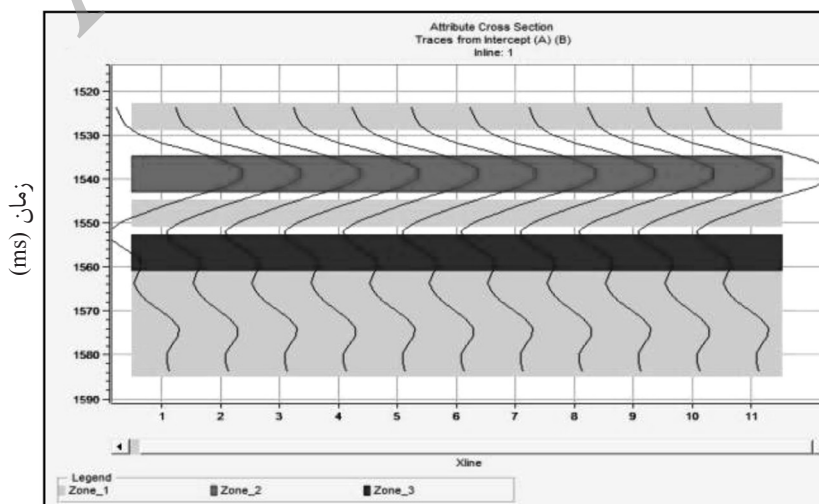
شکل ۱۸- کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان در چاه HD-07

دقیق مخزنی، ترسیم کراس پلات بر روی ناحیه‌ای در اطراف خط لرزه‌ای که چاه HD-07 بر روی آن واقع گردیده، انجام گرفته است. کراس پلات‌های مورد نظر در یک پنجره زمانی ۵۰ ms که نسبت به زمان ۱۵۳۴ ms (محدوده زمانی مرز بالای ماسه سنگ غار) حالت تقارن دارد، ترسیم شده‌اند. این کراس پلات توانایی زیادی در تفکیک محدوده مخزنی دارد، اما همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، قادر به جداسازی زون گازدار نیست که علت آن به ترکیب عوامل کیفیت اطلاعات (پایین بودن نسبت سیگنال به نویز و وجود شکستگی‌های فراوان) و پیچیدگی نوع منحنی AVO مربوط می‌شود. شکل ۲۰ کراس پلات به دست آمده را نشان می‌دهد. تمام نقاط به دست آمده بر روی روند آبدار (در جهت ربع دوم و چهارم) قرار دارند و نمی‌توان نواحی مربوط به هیدروکربنی را تشخیص داد.

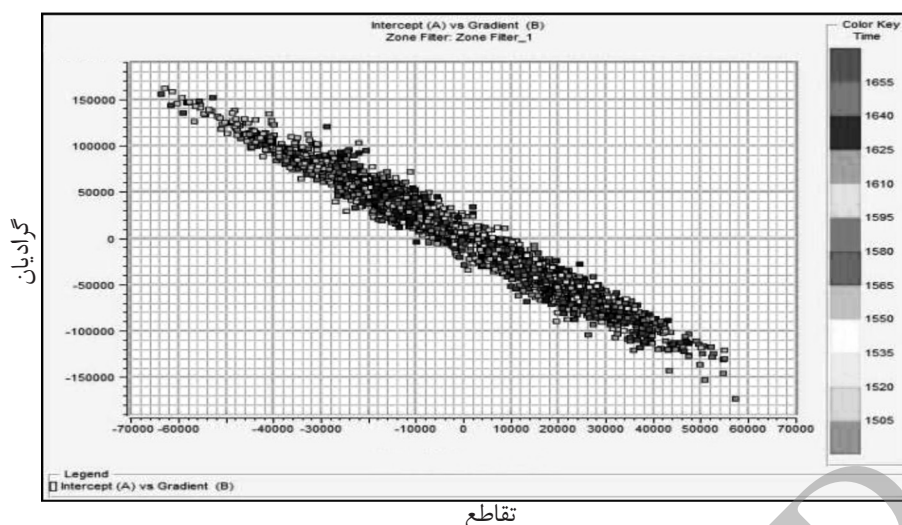
با جدا کردن زون‌های مختلف بر روی کراس پلات، می‌توان بر روی لرزه نگاشت مصنوعی نیز محدوده‌های تفکیک شده را نمایش داد. شکل ۱۹ زون‌های تفکیک شده را بر روی لرزه نگاشت مصنوعی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد، بین زون‌های هیدروکربنی تفکیک شده یک زون جداگانه وجود دارد که نقاط آن بر روی کراس پلات در محدوده رنگ خاکستری تیره قرار گرفته است. با توجه به اینکه این زون نمی‌تواند زون آبدار باشد (به علت قرارگیری بین هیدروکربن)، به عنوان زون شیلی در نظر گرفته می‌شود.

### کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای واقعی

برای به دست آوردن نتایج دقیق‌تر و شناسایی محدوده



شکل ۱۹- تفکیک زون‌های آبدار (رنگ خاکستری) و هیدروکربن دار بر اساس کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان در چاه HD-07



شکل ۲۰- کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان (امکان تفکیک زون‌های مختلف وجود ندارد)

در علامت گرادیان و تقاطع در گرادیان نسبت به تغییر سیال در مرز بالایی مخزن غار، حساسیت کمی از خود نشان دادند.

در ادامه کراس پلات تقاطع نسبت به گرادیان حاصل از لرزه نگاشت مصنوعی چاه در محدوده مخزن رسم شد و به کمک آن دو محدوده هیدروکربنی در بالا و پایین مخزن تفکیک گردید. نشانگرهای AVO که قادر به تشخیص محدوده مخرنی بودند، بر روی داده‌های لرزه‌ای واقعی بررسی شدند و مشاهده شد که با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی مستقیم همخوانی ندارند. دلیل این اختلاف به عواملی همچون ضعف کیفیت اطلاعات برداشت شده و پایین بودن نسبت سیگنال به نویز، تغییر در نوع چشمه و گیرنده، وجود گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان در منطقه و عدم وجود نگار P و S در بالای مخزن غار مربوط می‌گردد.

### تشکر و قدردانی

با تشکر از شرکت نفت فلات قاره ایران و به خصوص بخش پژوهش و توسعه آن شرکت که با انجام این طرح موافقت نموده و داده‌های مورد نیاز را در اختیار قرار دادند.

### نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله ارزیابی توانایی‌های روش AVO در تشخیص هیدروکربن در میدان هندیجان واقع در منطقه شمال غرب خلیج فارس با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از انبارش می‌باشد. بدین منظور در میدان هندیجان، با استفاده از مدل‌سازی مستقیم، لرزه نگاشت مصنوعی حاصل از نگارهای چاه پیمایی ایجاد گردید و به کمک آن علت ناهنجاری مشاهده شده بر روی داده‌های لرزه‌ای قبل از برانبارش در مرز بالایی مخزن غار مشخص شد. همچنین با تولید منحنی AVO نوع ناهنجاری مربوطه، کلاس اول تشخیص داده شد.

در مرحله مدل‌سازی مستقیم، نگارهای چاه‌پیمایی به صورت مصنوعی با استفاده از مدل‌سازی جانشینی سیال تولید گردید و به کمک لرزه نگاشت مصنوعی در سه حالت متفاوت سیالات (حالت واقعی موجود، حالت ۲۰٪ آب و ۸۰٪ گاز و حالت ۱۰۰٪ آب)، نشانگرهای مختلف استخراج شد تا مشخص شود کدام نشانگرها نسبت به تغییر سیال حساسیت بیشتری دارند. از بین نشانگرهای استخراج شده، نشانگرهای تغییرات ضریب پواسون، تقاطع، تقاطع

### منابع

- [1]. Knott C. G., "Reflection and refraction of elastic waves with seismological applications," Phil. Mag., 1899.
- [2]. Zeoppritz K., Erdbebenwellen VIII b, "On the reflection and penetration of seismic waves through unstable layers," Gottinger Nachr., 1, pp. 66-84, 1919.
- [3]- Muskat. M. and Meres, M. W., "Reflection and transmission coefficient for plane waves in clastic media : Geo-

physics," 5, pp. 115-148, 1940.

[4]. Koefoed O., "On the effect of Poisson's ratio of rock strata on the reflection coefficient of plane wave," Geophys. Prosp., 4, pp. 381-387, 1955.

[5]. Ostrander W. J., "Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence," Geophysics, 49, pp. 1637-1648, 1984.

[6]. Rutherford S. R. and Williams R. H., "Amplitude versus offset variation in gas sands," Geophysics, Vol. 54, pp. 686-688, 1989.

[7]. Castagna J. P. and Swan H. W., "Principles of AVO cross plotting", The Leading Edge 16(4), pp. 337-342, 1997.

[8]. Smith G. C. and Gidlow P. M., "Weighted stacking from rock property estimation and detection of gas", Geophys. Prosp., 35, pp. 993-1014, 1987.

Archive of SID