



پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد گرایش ژئو مکانیک نفت

تخمین پارامترهای فیزیکی سنگ با استفاده از داده‌های لرزه‌ای

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

استاد مشاور:

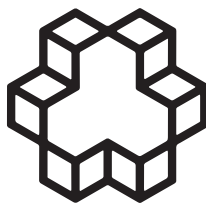
دکتر تکتّم زند

نگارش

حسین لطفی

بہمن ۱۴۰۲

利
利
利
利



۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأیید هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان تخمین و بررسی پارامترهای فیزیکی سنگ با استفاده از داده‌های لرزه‌ای توسط آقای حسین لطفی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد، گرایش ژئومکانیک نفت مورد تأیید قرار می‌دهند.

۱- استاد راهنما آقای دکتر حسن قاسم زاده امضاء

۲- استاد مشاور خانم دکتر تکتّم زند امضاء

۳- ممتحن خارجی آقای دکتر سید هانی عنبران امضاء

۴- ممتحن داخلی خانم دکتر زینب علی آبادیان امضاء

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه آقای دکتر امضاء

دانشکده عمران

تاریخ:



تاسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجو

شماره:

تاریخ:

اینجانب حسین لطفی دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش ژئومکانیک نفت دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان نامه با عنوان تخمین و بررسی پارامترهای فیزیکی سنگ با استفاده از داده‌های لرزه‌ای با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصاله مطالب نگارش شده در این پایان نامه مورد تأیید است، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

شماره:

تاریخ:

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نیست.

ای نهال آرزو خوش زی که بار آورده‌ای
 غنچه بی باد گل بی بهار آورده‌ای
 شاخ و برگ نیکنمی، بیخ و بار سعی و علم
 این هنرها جمله از آموزگار آورده‌ای
 (پروین اعتصامی)

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس خدایی را که لحظه ای بی او هیچم.

شکی نیست که کسی را یاری جبران آنچه مادر متحمل شده، پدر صبوری کرده و استاد با فراست برای آدمی آشکار کرده است، نیست. تشکر و قدردانی تنها تسکین دل است آنجا که توان جبران نیست.

بر خود لازم می‌دانم که از تمامی زحمات، حمایت‌ها و زمان‌هایی که استاد گران‌قدرم سرکار خانم دکتر تکتّم زند به عنوان استاد مشاور برای اینجانب صرف نموده‌اند تا این پژوهش به سرانجام برسد، کمال تشکر و قدردانی را دارم و از خداوند منان برای ایشان از صمیم قلب آرزوی موفقیت و سربلندی می‌کنم.

چکیده

مطالعه تخمین پارامترهای فیزیکی سنگ با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به بررسی دقیق و تفصیلی یک مدل ژئومکانیکی در محدوده‌ای گسترده، با قطعیت مورد قبول می‌پردازد، که تنها با استفاده از داده‌برداری لرزه‌ای و روش‌های وارون‌سازی و تصویرسازی لرزه‌ای کمک فراوانی به بهینه‌سازی مراحل اکتشاف، حفاری، بهره‌برداری و ازدیاد برداشت، تخمین تنش‌های برجا، پیش‌بینی فشار منفذی و تخمین پارامترهای مکانیک سنگ، می‌کند. مدل‌های ژئومکانیکی از دیرباز با صرف زمان و هزینه‌های هنگفت با روش‌های مخرب مغزه‌گیری و چاه‌نگاری و با عدم قطعیت بالا در فواصل دور از چاه محاسبه می‌شود. اما در دهه‌های اخیر، روش‌های غیرمخرب و کم هزینه لرزه‌ای، اطلاعات مفیدی برای گستره‌ای وسیع و عمق مطلوب فراهم می‌کنند، که توجه محققان در حوزه ژئومکانیک را معطوف خود کرده است. شناخت درست از پیش‌بینی رفتار ساختاری سنگ مخزن و نواحی اطراف آن با استفاده از روابط دقیق میان سرعت‌های انتشار امواج فشاری، برشی و مدول‌های کشسان زمین، سبب افزایش دقت و ضریب اطمینان در مدل ژئومکانیکی حاصل از روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای شده است. این پژوهش با هدف، مطالعه روش‌های تولید مدل ژئومکانیکی در ابعاد گسترده محیط مورد مطالعه تا اعماق زیاد با تکیه بر داده‌های ژئوفیزیک لرزه‌ای صورت پذیرفته است. در این راستا ابتدا به معرفی دقیق‌ترین روش وارون‌سازی الاستیک لرزه‌ای موسوم به وارون‌سازی شکل موج کامل که قابلیت بازیابی مدل‌های سرعت فشاری و برشی با دقت بالا را در اختیار قرار می‌دهد، می‌پردازیم. سپس چگونگی به کارگیری پارامترهای مدل زیرسطحی بازیابی شده از این روش را برای تولید مدل ژئومکانیکی مورد بررسی قرار دادیم. برای این منظور، مطالعه گسترده‌ای بر روابط حاکم میان پارامترهای الاستیک با پارامترهای فیزیک سنگ، پتروفیزیکی و به طور خاص ژئومکانیکی نظیر مدول‌های ینگ، بالک، برشی، نسبت پواسون، ضرایب لامه، شاخص شکنندگی، فشار منفذی، فشار موثر و تخلخل انجام دادیم. همچنین نقش هر یک از این پارامترها را در درک ویژگی‌های محیط مورد مطالعه، معرفی و مورد بررسی قرار دادیم. تا در نهایت سازوکار جامعی برای مطالعات ژئومکانیکی با استفاده از روش‌های لرزه‌ای فراهم آوردیم.

کلید واژه: تصویرسازی غیر مخرب؛ مدل‌سازی ژئومکانیکی؛ داده ژئوفیزیک لرزه‌ای؛ پارامترهای فیزیکی سنگ؛ وارون‌سازی لرزه‌ای؛ وارون‌سازی شکل موج کامل؛ پارامترهای الاستیک؛ شاخص شکنندگی؛ فشار منفذی؛ فشار موثر؛ تخلخل؛

فهرست مطالب

۱- فصل اول	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ اهمیت پژوهش	۲
۱-۳ ضرورت پژوهش	۲
۱-۴ اهداف و روند پژوهش	۳
۱-۵ ساختار پژوهش	۳
۲- فصل دوم	۴
۲-۱ پیشینه مطالعات	۵
۲-۲ گراف ها	۷
۳- فصل سوم	۱۰
۳-۱ تعاریف	۱۱
۳-۱-۱ وارون سازی الاستیک لرزه‌ای و تکنیک وارون سازی شکل موج کامل (FWI)	۱۱
۳-۱-۲ چگالی	۱۲
۳-۱-۳ ضرایب لامه	۱۳
۳-۱-۴ ویژگی‌های رئومکانیکی	۱۴
۳-۱-۵ ضریب پواسون	۱۵
۳-۱-۶ مدول یانگ	۱۶
۳-۱-۷ مدول بالک	۱۷

۱۷	۳-۱-۸ مدول برشی
۱۸	۳-۱-۹ شکنندگی
۱۹	۳-۱-۱۰ ضریب کیفیت معکوس مقیاس
۲۰	۳-۱-۱۱ نرخ تنش یا فشار بسته شدن
۲۱	۳-۱-۱۲ فشار هیدرواستاتیک
۲۱	۳-۱-۱۳ فشار روباره
۲۲	۳-۱-۱۴ تخلخل
۲۳	۳-۱-۱۵ فشار سنگ
۲۴	۳-۱-۱۶ فشار منفذی
۲۵	۳-۱-۱۷ فشار موثر
۲۶	۳-۲ روند انجام پژوهش
۲۶	۳-۲-۱ شناخت و بررسی مدل مارموسی (۱ و ۲)
۲۷	۳-۲-۱-۱ اهمیت و ساختار مدل مارموسی
۲۸	۳-۲-۱-۲ تولید داده و تصویر سازی مدل مارموسی
۲۹	۳-۲-۲ تولید داده‌های مصنوعی
۲۹	۳-۲-۳ مدلسازی پارامترهای ژئومکانیکی
۳۰	۳-۲-۴ بررسی توزیع فشار منفذی و موثر
۳۱	۳-۳ فلوچارت
۳۲	فصل چهارم
۳۳	۴-۱ مدلسازی
۳۳	۴-۱-۱ مدلسازی و مقایسه داده‌های لرزه‌ای و چگالی

- ۴-۱-۲ مدلسازی پارامترهای الاستیک و ژئومکانیک ۳۵
- ۴-۱-۳ مدلسازی توزیع فشارمنفذی و موثر ۴۰
- ۴-۲ نتیجه‌گیری و بررسی خواص ژئومکانیکی ۴۵
- ۴-۲-۱ تقابل مدول یانگ و نسبت پواسون ۴۶
- ۴-۲-۲ تقابل پارامترهای LMR ۴۸
- ۴-۲-۳ تقابل نسبت موج‌های فشاری به برشی و $\lambda\rho$ ۴۹
- ۴-۲-۴ بررسی عملکرد فشارهای هیدرواستاتیک، روباره و منفذی ۵۰

فصل پنجم ۵۱

- ۵-۱ نتایج بررسی سنگ شناسی مدل ۵۲
- ۵-۲ نتایج بررسی توزیع مخازن هیدروکربنی ۵۴
- ۵-۳ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۵۵
- ۵-۴ پیشنهادات ۵۶
- ۵-۵ منابع انگلیسی ۵۷
- ۵-۶ منابع فارسی ۶۰

فهرست جداول

- ۳-۱ روابط تحلیلی میان سرعت‌های لرزه‌ای با ویژگی‌های الاستیک و پارامترهای ژئومکانیکی ۱۵
- ۳-۲ مقادیر چگالی و الاستیک معیار از گری مارکوو ۲۳
- ۵-۱ بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی لایه‌های فوقانی و تحتانی مخازن میانی ۵۳
- ۵-۲ بررسی ویژگی‌های ژئومکانیکی مخزن اصلی ۵۴
- ۵-۳ ویژگی‌های ژئومکانیکی مخازن هیدروکربنی ۵۵

فهرست شکل‌ها

- ۳-۱ ساختار زمین شناسی مدل مارموسی ۲۷
- ۳-۲ فلوچارت ۳۱
- ۴-۱ داده‌های لرزه‌ای مشاهده شده از مدل مارموسی ۳۳
- ۴-۲ داده‌های بازیابی شده از وارون سازی شکل موج کامل ۳۴
- ۴-۳ مقایسه و مدل سازی چگالی از داده‌های مشاهده و بازیابی شده ۳۵
- ۴-۴ مدل سازی ضرایب لامه ۳۶
- ۴-۵ مدل سازی روش LMR ۳۷
- ۴-۶ مدل نسبت پواسون ۳۷

- ۴-۷ مدل‌سازی مدول‌های یانگ و بالک ۳۸
- ۴-۸ مدل فشار بسته شدن ۳۹
- ۴-۹ مدل ضریب شکنندگی ۳۹
- ۴-۱۰ مدل ضریب کیفیت معکوس مقیاس ۴۰
- ۴-۱۱ مدل فشار هیدرواستاتیک ۴۱
- ۴-۱۲ مدل فشار روباره ۴۱
- ۴-۱۳ مدل فشار سنگ ۴۲
- ۴-۱۴ مدل‌سازی از ترکیبات سنگی مدل مارموسی ۴۳
- ۴-۱۵ تخلخل ۴۳
- ۴-۱۶ فشار منفذی ۴۴
- ۴-۱۷ فشار موثر ۴۵
- ۴-۱۸ بررسی خواص الاستیکی و مقاوتی نزدیک مخزن اصلی ۴۶
- ۴-۱۹ تقابل ویژگی‌های ژئومکانیکی (مدول یانگ و نسبت پواسون) ۴۷
- ۴-۲۰ تقابل پارامترهای LMR ۴۸
- ۴-۲۱ تقابل پارامترهای نسبت سرعت موج فشاری به برشی و $\lambda\rho$ ۴۹
- ۴-۲۲ بررسی توزیع فشار هیدرواستاتیک، روباره و منفذی اطراف مخزن اصلی ۵۰
- ۵-۱ نمای کلی از مخازن هیدروکربنی مدل مارموسی ۵۲

فصل اول

۱-۱ مقدمه

اکتشاف مخازن هیدروکربنی به عنوان منابع محدود انرژی، با هزینه، سختی و خطر پذیری زیادی انجام می‌شود. در یافتن مخازن هیدروکربنی جدید، به ناچار باید به دنبال مخازنی با پیچیدگی در اعماق بیشتر بود، که نیازمند ارزیابی سازندهای زیر سطحی بر پایه مطالعات زمین شناسی، پتروفیزیکی، حفاری و ژئوفیزیکی است. هرچند نقش مطالعات زمین شناسی و پتروفیزیکی از باقی روش‌ها پر رنگ‌تر است. اما تلفیق اطلاعات به دست آمده از زمینه‌های مختلف مطالعاتی و تفسیر آنها در کنار یکدیگر می‌تواند، پیچیدگی‌ها را کنترل و خطر پذیری را به حداقل برساند. ویژگی‌های ژئومکانیک سنگ، زیرشاخه‌ای از پارامترهای پتروفیزیکی هستند که به صورت مستقیم از گزارش ابزارهای چاه یا داده‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های سنگ مغزه‌گیری شده و گاهی از منابع اطلاعاتی درون چاهی مانند داده‌های ثبت گل حفاری به بررسی رفتارهای فیزیکی و مکانیکی اطراف چاه می‌پردازند. هدف از این اندازه‌گیری‌ها تمایز بین سنگ‌های مخزنی و غیرمخزنی، تخمین تخلخل سازندها و مقدار تقریبی از هیدروکربن‌های موجود در هر سازند است. اما این اطلاعات تنها محدود به ناحیه اطراف چاه می‌شوند و دور از چاه دارای عدم قطعیت در نتایج هستند. اما از آنجایی که ویژگی‌های ژئومکانیکی ارتباط قوی با سایر ویژگی‌های پتروفیزیکی مانند سرعت انتشار امواج الاستیک دارند، امکان بازیابی این ویژگی‌ها به صورت غیر مستقیم با تکیه بر داده‌های ژئوفیزیکی قابل انتظار است. به کارگیری این اطلاعات در کنار داده‌های مختلف به دست آمده از لرزه نگاری و چاه نگاری و آنالیزهای صورت گرفته امکان اظهار نظر دقیق‌تر در مورد پارامترهای مخزن، تخمین مدل ژئومکانیکی مخزن و در نهایت تصمیم‌گیری معتبرتر در مورد محل حفر چاه‌های جدید را فراهم می‌کند. در دهه‌های اخیر، روش‌هایی که بتوانند در محدوده‌ای وسیع‌تر از محدوده چاه، تخمینی از یک مدل ژئومکانیکی دقیق از زیر سطح ارائه کنند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. که با استفاده از روابط فیزیک سنگ، اطلاعات به دست آمده از داده‌های لرزه‌ای و تخمین مدول‌های الاستیک، پارامترهای ژئومکانیکی معتبری تولید می‌کنند [1, 2]. علم ژئومکانیک در واقع شامل تخمین و مدیریت تغییر شکل سنگ‌ها است. یک مدل ژئومکانیکی را می‌توان به صورت یک توزیع عددی از وضعیت تنش، ویژگی‌های سنگ همچون مقاومت، چگالی، تخلخل و فشار منفذی در فضای مخزن و یا میدان مورد بررسی، تعریف نمود. که عدم توجه به آن، موجب ناپایداری چاه و مشکلاتی از قبیل افزایش هزینه حفاری، توقف تولید و حتی از بین رفتن چاه و مخزن می‌گردد [۳]. به این ترتیب، تخمین دقیق ویژگی‌های الاستیک و ژئومکانیکی سنگ‌های مخزنی برای بسیاری از طراحی‌ها و پیاده‌سازی‌ها در زمینه‌های متعددی مانند حفاری، شکست هیدرولیکی و تکمیل کاربرد دارد [۴, ۵]. به منظور تخمین مدل ژئومکانیکی در گستره‌ای وسیع، مدل‌های سرعت فشاری و سرعت موج برشی اطلاعاتی هستند که می‌بایست از داده‌های لرزه‌ای بازیابی شوند. تخمین هرچه دقیق‌تر سرعت موج فشاری، برشی و چگالی محیط از روی داده‌های لرزه‌ای، دقت در تعیین مدول‌های الاستیک و تخمین پارامترهای فیزیک سنگ و ژئومکانیکی را افزایش می‌دهد [۶]. پس از در اختیار داشتن تخمینی با دقت و تفکیک بالا از سرعت‌های موج لرزه‌ای می‌توان از روابط فیزیک سنگ به عنوان پل ارتباطی بین این سرعت‌ها و مدول‌های الاستیک برای

تخمین پارامترهای مکانیک سنگ و تخمین مدل ژئومکانیکی استفاده کرد [۷، ۸]. در این پژوهش به شناخت، بررسی کاربردها و پیاده‌سازی روابط حاکم میان پارامترهای الاستیکی و ژئومکانیکی نظیر مدول یانگ، مدول بالک، مدول برشی، نسبت پواسون، ضرایب لامه و شکنندگی که هر کدام از پرکاربردترین پارامترهای مدل‌های ژئومکانیکی هستند، می‌پردازیم. از مهم‌ترین مدل‌هایی که در این پژوهش به تخمین هر چه دقیق‌تر آن متمرکز هستیم، شاخص شکنندگی^۱ و فشار منفذی^۲ است. که با توجه به محاسبه هر دو ویژگی از داده‌های لرزه‌ای به قطعیت و تفکیک بهتری از زون‌های مخزنی و فرآیندهای حفاری دست می‌یابیم.

۲-۱ اهمیت پژوهش

برای بهره‌وری بیشتر از ذخایر هیدروکربنی و پایین آوردن ریسک‌های ناشی از کل عملیات حفر و برداشت، ما نیاز به مطالعه و درک بهتر خواص فیزیکی سنگ مخزن و خواص شیمیایی آن داریم. پارامترهای فیزیک سنگ اطلاعات اساسی مورد نیاز در فرآیند بهینه‌سازی عملیات اکتشاف، حفاری، استخراج و بازیابی نفت را در اختیار ما قرار می‌دهد، که به نوبه خود می‌تواند نقش چشمگیری در کاهش هزینه‌های عملیات داشته باشد. برخی از این مطالعات در شاخه علم ژئومکانیک و ژئوفیزیک انجام گرفته است، زیرا این دو شاخه می‌توانند از ابتدای پیدایش یک مخزن تا پایان عمر آن به صورت مجزا یا کنار هم مقاصد خاصی را برای توسعه و کاهش ریسک و هزینه‌ها پوشش دهند.

۳-۱ ضرورت پژوهش

در کشور ما از آنجایی که اغلب میدان‌های نفتی، نیمه دوم عمر خود را سپری می‌کنند، جهت مانیتورینگ، توسعه و انگیزش مخزن لزوم تخمین پارامترهای فیزیک سنگ و مدل‌سازی ژئومکانیکی در نواحی گسترده میادین نفتی بیش از پیش احساس می‌شود که اهمیت و ضرورت این پژوهش را توجیه می‌کند.

¹ Brittleness

² Pore Pressure

۴-۱ هدف و روش پژوهش

هدف از انجام این پژوهش، مطالعه پارامترهای موثر جهت تولید مدل ژئومکانیکی دقیق با ارائه تصویری با قدرت تفکیک بالا از زیر سطح زمین در محیطی گسترده و اعماق زیاد با تکیه بر داده‌های لرزه‌ای است. جهت تحقق این امر، ابتدا به بررسی دقیق‌ترین روش وارون‌سازی الاستیک لرزه‌ای موسوم به وارون‌سازی شکل موج کامل که قابلیت بازیابی دقیق از مدل‌های سرعت فشاری و برشی را دارد، می‌پردازیم. علاوه بر این به بررسی عوامل موثر در بهبود مدل سرعت برای تخمین خواص الاستیک و ویژگی‌های زیر سطحی بر اساس داده‌های لرزه‌ای کامل پرداخته شده است. روش کار به این صورت است که، چگالی با استفاده از رابطه تجربی گاردنر در گستره میدان تعیین می‌گردد [۹]. سپس روابط تحلیلی میان سرعت‌های حاصل از وارون‌سازی با ضرایب لامه و کاربرد آنها در تخمین سایر ویژگی‌های الاستیک و پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مدول یانگ، بالک، نسبت پواسون، شکنندگی، تخلخل، فشار منفذی و فشار موثر پرداخته می‌شود و در نهایت نیز با اطلاعات حاصل از وارون‌سازی شکل موج کامل و روابط معرفی شده، مدل‌های الاستیک و ژئومکانیک ساخته می‌شود و در جهت شناخت ژئولوژی و خواص ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه، استفاده می‌شود.

۵-۱ ساختار پژوهش

در این پژوهش سعی شد، در پنج فصل به بررسی و شناخت روابط بین داده‌های لرزه‌ای بازیابی شده از روش وارون‌سازی لرزه‌ای و پارامترهای ژئومکانیکی جهت تولید مدل ژئومکانیکی دقیق در گستره‌ای وسیع پرداخته شود. در این راستا خلاصه‌ای از پنج فصل به شرح زیر ارائه می‌شود.

فصل اول و دوم، به بررسی ویژگی‌های اصلی این پژوهش که آن را از سایر پژوهش‌ها متمایز می‌کند، پرداخته می‌شود.

فصل سوم و چهارم، در این فصل به مطالعه و ارائه روش‌های ادغام داده‌های حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و روابط فیزیک سنگ جهت تحلیل و مدلسازی پارامترهای الاستیک و ژئومکانیک نظیر مدول یانگ، بالک، نسبت پواسون، شکنندگی، فشار منفذی و فشار موثر و همچنین تخلخل و توزیع ترکیبات سنگی مدل زمین‌شناسی مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

فصل پنجم، تحلیل و بررسی مدل ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه جهت شناخت مخازن هیدروکربنی و چگونگی دسترسی به این مخازن و افزایش تولید از طریق عملیات حفاری و شکست هیدرولیکی موثر است.

فصل دوم

۲-۱ پیشینه مطالعات

روش وارون سازی داده های لرزه ای امروزه تا حدی پیشرفت و توسعه یافته است که به عنوان ابزاری مطمئن برای بسیاری از محققین جهت بازیابی ویژگی های فیزیکی، مکانیکی سنگ و همچنین سیالات در فواصل دور، تبدیل شده است. به گونه ای که در اکثر مطالعات مربوط به بررسی مخازن هیدروکربنی از مرحله اکتشاف، بهره برداری تا ازدیاد برداشت، توجهات زیادی را معطوف خود کرده است. با توجه به اهمیت صنعت نفت در اقتصاد جهانی و میدان های نفتی کشور ایران که بسیاری از آنها نیمه دوم عمر خود را سپری می کنند، لزوم تخمین پارامترهای فیزیک سنگ و مدل سازی ژئومکانیکی پیش از پیش احساس می شود. در بررسی تخمین این پارامترها به دو رویکرد مهم در مطالعات برخورد می کنیم. رویکرد قدیمی تر، مربوط به داده های درون چاهی و بین چاهی است که حجم زیادی از مطالعات مربوط به مخازن هیدروکربنی را به خود اختصاص می دهد و رویکرد نوین، مربوط به داده های لرزه ای به دست آمده از یک میدان وسیع مطالعاتی با عمقی مطلوب و بدون تخریب ساختار مورد مطالعه است. در مطالعات مربوط به محدوده چاه ابتدا به بررسی نگارهای چاهی حاصل از ابزار پتروفیزیکی و عوامل موثر بر سرعت امواج لرزه ای در مقیاس آزمایشگاهی و درون چاهی می پردازند. این عوامل شامل؛ چگالی و خواص الاستیک ذرات تشکیل دهنده سنگ، سیمان شدگی ذرات، چگالی و فشار سیال موجود در خلل و فرج، دما، فشارهای خارجی، تراکم پذیری سیال، ریز ترک ها، ویژگی های درزه و شکاف (زبری یا ناهمواری و مواد پر کننده درز)، عمق، سن زمین شناسی، دگرگونی و ناهمسانگردی که نیاز به اطلاعات میکروسکوپی مانند ترک ها و اثرات فشار دارد، است. که با استفاده از این عوامل و مدلسازی پتروفیزیک حاصل از نگارهای چاه ها سعی می شود، شبیه سازی درستی از رفتار فیزیکی و مکانیکی محیط مورد بررسی در جهت شناخت مخازن ارائه شود [۱۰]. به علت اینکه روابط تجربی وابسته به رئولوژی ناحیه چاه هستند، نمی توان از آن برای تخمین پارامترهای الاستیکی و ژئومکانیکی در کل منطقه مطالعاتی استفاده کرد. در بسیاری از پژوهش ها در این حوزه، سرعت موج برشی یکی از مهم ترین پارامترهای داده های لرزه ای برای تخمین خواص ژئومکانیکی شناخته می شود. اما به دلیل وجود محدودیت هایی در استخراج این داده از چاه ها، با کمک روابط تجربی و سرعت موج فشاری بازیابی شده از وارون سازی آکوستیک لرزه ای، تخمین تجربی از سرعت موج برشی ارائه می شود. که در نهایت هر دو سرعت موج در تخمین سایر پارامترهای ژئومکانیکی به کار برده می شوند [۱۱]. به این ترتیب سرعت موج برشی و سایر پارامترهای وابسته به آن، محدود به ناحیه چاه و در فواصل دورتر از چاه با افزایش عدم قطعیت مواجه است. در رویکرد نوین، راه حل افزایش قطعیت در کل گستره مورد مطالعه، تخمین هم زمان با استفاده از سرعت موج برشی و فشاری حاصل از وارون سازی الاستیک داده های لرزه ای است. از دهه های گذشته، صنعت اکتشاف به طور گسترده از ابزارهای تصویر برداری لرزه ای برای شناسایی ساختارهای زیر سطحی بالقوه، حاوی نفت خام و گاز طبیعی استفاده می کند. از جمله این ابزارها، روش توموگرافی زمان سیر

اولین رسید^۳، به عنوان روش تصویرسازی لرزه‌ای کلاسیک است. که برای سال‌های متمادی پایداری و کاربرد آن اثبات و نتایج خوبی را ارائه داده است. این روش حتی در محیط‌های ناهمگن به علت مجموعه داده‌های کم، که تنها شامل اولین ورود زمانی است، سریع و کارآمد است. با این حال، روش توموگرافی زمان سیر اولین رسید، فقط به طول موج‌های بلند محیط حساس است که موجب محدودیت قدرت تفکیک در مدل نهایی می‌شود [۱۲]. به مرور، روش‌های توسعه یافته زیادی از جمله تحلیل ضرایب بازتاب، تحلیل تغییرات دامنه بر حسب فاصله گیرنده از چشمه (AVO)^۴ و فیلتر تحلیل سرعت گسترش یافته (EVAF)^۵ جهت افزایش دقت و سهولت در تخمین خواص ژئومکانیکی و تحقیقات مخزنی ارائه شد [۱۳، ۱۴]. همچنین روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای نیز پیشرفت کردند، که یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها، وارون‌سازی الاستیک جبهه موج کامل بر روی داده‌های لرزه‌ای پیش از انبارش است، که برای بازیابی سرعت‌های موج فشاری و برشی از الگوریتم پیشرفته‌ای بهره می‌گیرد [۱۵]. روش وارون‌سازی شکل موج کامل (FWI)^۶، یک تکنیک وارون‌سازی بر اساس حل معادله موج غیر خطی است، که برای تخمین مدل‌های سرعت حتی در شرایط زمین‌شناسی پیچیده به کار گرفته می‌شود. این روش با بهره‌گیری از تمام اطلاعات امواج ثبت شده روی سطح، قوی‌ترین و دقیق‌ترین روش وارون‌سازی است که به کارگیری نتایج حاصل از آن به جهت تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی زیر سطحی با جزئیات بالا پیشنهاد می‌شود. این تکنیک به صورت هم‌زمان از اطلاعات دامنه، زمان سفر و فاز (شکل موج) برای معکوس کردن پارامترهای مدل استفاده می‌کند و با مدیریت ویژگی‌های پیچیده مانند گسل و مرزهای نامنظم، تخمین دقیق‌تری از ویژگی‌ها را ارائه می‌دهد [۱۶]. روش وارون‌سازی شکل موج کامل، یک روش تکرار را برای به حداقل رساندن تفاوت بین داده‌های مشاهده شده و داده‌های پیش‌بینی شده برای حل معادله موج کامل به کار می‌گیرد که به یک مسئله بهینه‌سازی فراگیر، غیرخطی، بد وضع و پیچیده منجر می‌شود که برای محیط سه بعدی نیز محاسبات بسیار سنگینی را تحمیل می‌کند. از چالش‌های عمده این روش، حساسیت به دقت در مدل اولیه و محتوای فرکانسی داده و گیرافتادن فرآیند بهینه‌سازی در کمینه‌های محلی است. دستیابی به مدل اولیه‌ای با دقت بالا عمدتاً دشوار است و اگر خطا در مدل اولیه به میزانی باشد که داده پیش‌بینی شده بیش از نصف کمترین طول موج دچار خطا در زمان سیر شود، الگوریتم بهینه‌سازی به یک کمینه محلی، همگرا شده و منجر به یک مدل سرعت نهایی نادرست خواهد شد. برای مقابله با این چالش که موسوم به پرش چرخه^۷ است، به طور معمول وارون‌سازی جبهه موج کامل را بر روی فرکانس‌های پایین‌تر (طول موج‌های بزرگتر) از داده آغاز می‌کنند و به صورت دوره‌ای با افزایش دقت در مدل سرعت بازیابی شده، فرکانس‌های بالاتر داده را وارد فرآیند

³ First arrival travel time tomography

⁴ Amplitude Versus Offset

⁵ Extended Velocity Analysis Filter

⁶ Full waveform inversion

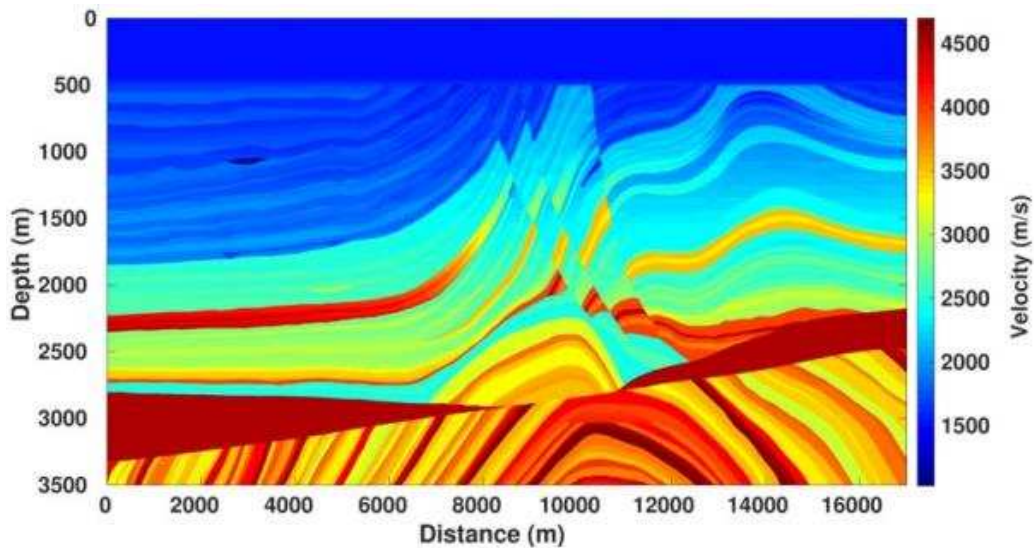
⁷ Cycle skipping

وارون‌سازی می‌کنند. با توجه به تمام چالش‌ها و پیچیدگی‌های این روش، سالانه مطالعات پیشرفته بسیاری برای بهبود الگوریتم وارون‌سازی برای این روش صورت می‌پذیرد [۱۷]. در کل روش FWI را می‌توان هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس پیاده‌سازی کرد. اما در نهایت با وجود تمامی چالش‌های اشاره شده، مدل‌های بازیابی شده سرعت توسط این روش در دقت و قدرت تفکیک سرآمد هستند. به همین سبب در این مطالعه نیز این روش معرفی و نتایج آن برای تخمین و بررسی روابط بین مدول‌های الاستیک، پارامترهای فیزیکی سنگ و به خصوص مدل‌سازی ژئومکانیکی نظیر شاخص‌های مهم شکنندگی و فشار منفذی به کار گرفته شده است تا با مطالعه بر مدل‌های استخراج شده به شناخت و اثر بخشی نقش هر یک از پارامترها در بررسی ویژگی‌های محیط مورد مطالعه مانند: نواحی شکننده در ازدیاد برداشت و نواحی پر خطر جهت حفاری ایمن، پرداخته شود. اما مهم است که در نظر داشته باشیم، سایر مطالعات صورت گرفته و روابط معرفی شده در ادامه این پژوهش مستقل از روش ژئوفیزیکی به کار گرفته شده برای بازیابی مدل‌های سرعت هستند. لذا مدل‌های سرعت اگر از سایر روش‌های کلاسیک همچون توموگرافی زمان سیر یا آنالیز سرعت نیز بدست آیند، بر روند تولید سایر پارامترها و مدل ژئومکانیکی اثری ندارند و تنها دقت نتایج نهایی افت خواهد کرد.

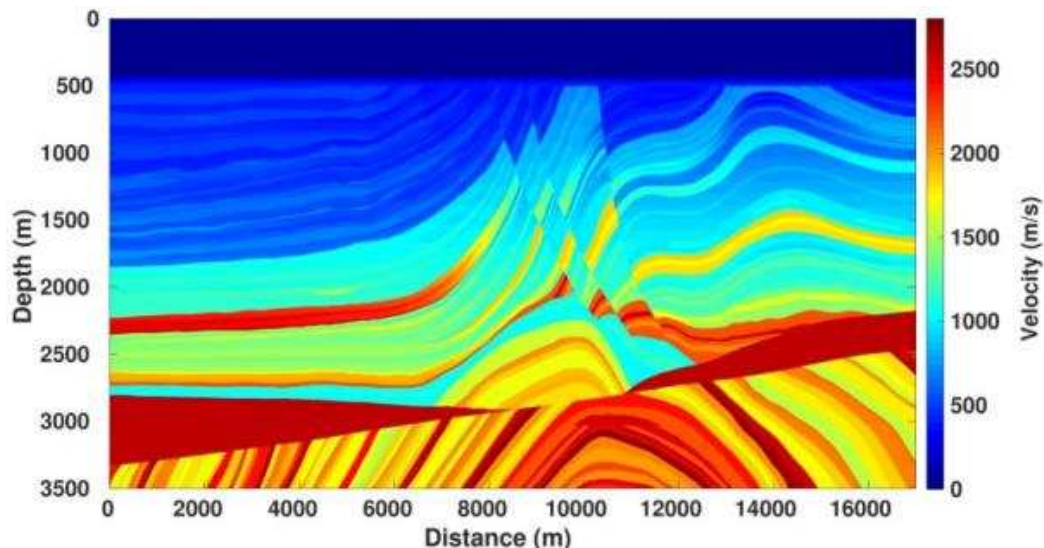
۲-۱-۱ بررسی مطالعات مشابه

در برخی از مطالعات ژئوفیزیکی برای بررسی دقت و کیفیت روش‌های لرزه‌ای مختلف از مدل‌های مصنوعی که دارای شباهت نزدیک به پیچیدگی‌های زمین است، استفاده می‌کنند. این مدل‌ها و داده‌های مصنوعی تولید شده در آنها شرایط خوبی را برای بررسی دقیق روش‌های لرزه‌ای از قبیل روش‌های وارون‌سازی و روش‌های تخمین پارامترهای الاستیکی و ژئومکانیکی فراهم می‌کنند که در صورت میزان شباهت مورد قبول پارامترهای تخمین زده شده زیر سطحی نظیر مدول‌های الاستیک و ویژگی‌های ژئومکانیکی با مقادیر حاصل از مدل‌های سرعت و چگالی اصلی می‌توان دقت روش‌های به کار گرفته شده برای وارون‌سازی و تخمین سایر پارامترهای را تایید کرد. نمونه‌ای از پژوهش‌های مارتین و همکارانش که به بررسی تویع فشار منفذی پرداخته است [۱۸] را می‌توان به صورت زیر مشاهده کرد که بر روی مدل مصنوعی یکسانی با این پژوهش صورت پذیرفته است.

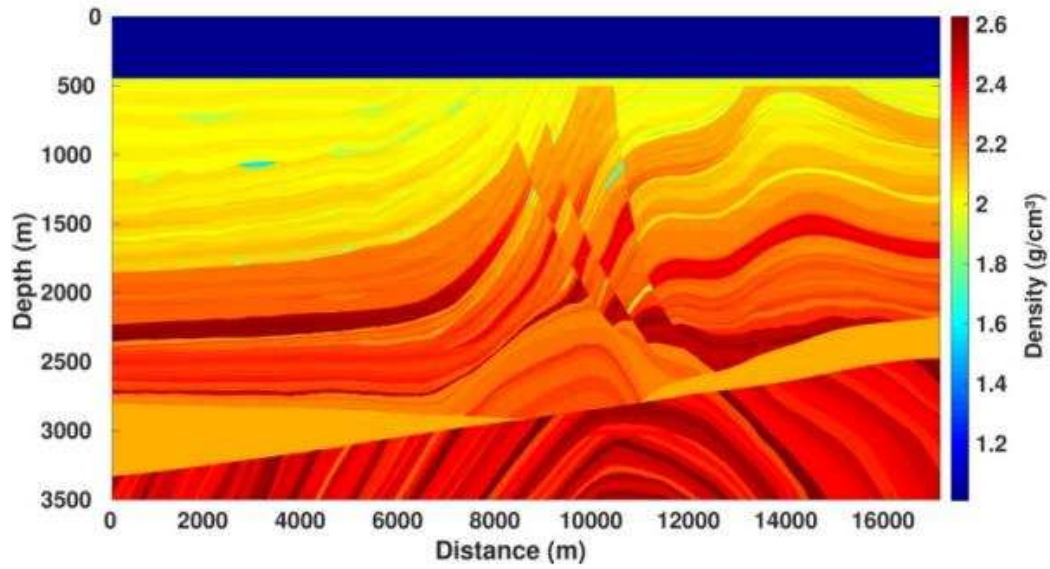
در این نمونه از پژوهش مارتین و همکارانش از توزیع سرعت موج‌های لرزه‌ای فشاری (V_p) و برشی (V_s) در شکل (۱-۲) و همچنین چگالی (شکل ۲-۳) برای محاسبه فشارهای سنگ، منفذی و موثر جهت توصیف مناطق بالقوه برای انباشت نفت و گاز استفاده کردند. به این صورت که با استفاده از سرعت‌های لرزه‌ای و چگالی به بررسی توزیع سنگ شناسی در مدل مورد مطالعه و بررسی فشارهای مختلف نظیر هیدرو استاتیک، روباره و همچنین سنگ جهت مدل‌سازی فشار منفذی که یک پارامتر مهم در جهت تحلیل مخزن و حفاری است، پرداختند که مدل نهایی این پارامتر را می‌توان در شکل ۲-۴ مشاهده کرد [۱۸].



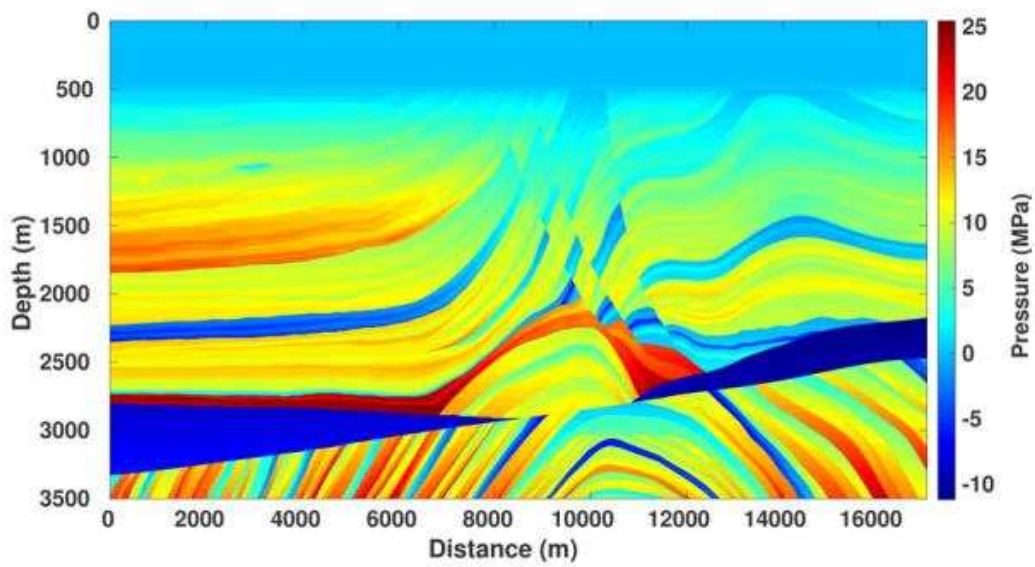
شکل (۱-۲): مدل سرعت موج فشاری V_p [18]



شکل (۲-۲): مدل سرعت موج برشی V_s [18]



شکل (۲-۳): مدل چگالی بازیابی شده [18]



شکل (۲-۴): مدل فشار منفذی حاصل از تنش سنگ در یک محیط (VTI) [18]

فصل سوم

۳-۱ تعاریف

۳-۱-۱ وارون سازی الاستیک لرزه‌ای و تکنیک وارون سازی شکل موج کامل (FWI)

روش وارون سازی جبه موج کامل، یکی از موثرترین و دقیق‌ترین روش‌های بازیابی ویژگی‌های زیر سطحی در مطالعات ژئوفیزیکی است. هدف این روش، حل معادله موج جهت تخمین ویژگی‌های زیر سطحی است به طوری که داده لرزه‌ای تولید شده از آن تا حد ممکن داده‌های برداشت شده در واقعیت را شرح دهند. از آنجایی که معادلات حاکم بر این روش، غیرخطی است و برخلاف روش‌های خطی به صورت مستقیم قابل حل نیستند، روش‌های تکراری برای حل آنها به کارگرفته می‌شود. این روش‌های تکراری به صورت معمول با کمینه‌سازی فاصله اقلیدسی بین داده برداشت شده و داده پیشبینی شده به پارامترهای مدل همگرا می‌شوند. البته به صورت کلی این خطی‌سازی‌ها را می‌توان بر اساس رویکردهای مختلفی مانند خطی سازی تکراری یا مسئله معکوس معرفی کرد. در رویکرد خطی سازی تکراری، معادله غیرخطی اولیه در هر تکرار خطی می‌شود و سپس معادلات خطی شده حل می‌شوند تا یک پاسخ به روز شده به دست آید. این روند تا رسیدن به پاسخ مطلوب تکرار می‌شود. از سوی دیگر، رویکرد مسئله معکوس است که معادلات غیرخطی را با بهینه‌سازی برخی تابع‌های غیرخطی که نشانگر اختلاف بین داده‌های مصنوعی و واقعی است، جایگزین می‌کند. سپس به کمینه کردن تابع هدف می‌پردازد [۱۹]. معادله کمینه‌سازی برای این روش به صورت یک تابع کمینه‌سازی کم‌ترین مربعات روی داده‌های مشاهده شده و پیشبینی شده نوشته می‌شود، به شرط اینکه داده‌های پیش بینی شده از حل معادله انتشار موج با توجه به پارامترهای مدل به دست آیند که به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۰].

$$\text{minimize}_{m,u} \|Pu - d_{obs}\|_2^2$$

(۱-۳)

$$A(m)u = b^*$$

که در آن P عملگر نمونه برداری از میدان موج در محل گیرنده‌ها، u میدان موج منتشر شده، d_{obs} داده‌های مشاهده شده، m پارامترهای مدل (مدل سرعت انتشار موج برشی و فشاری یا ضرایب لامه)، b^* چشمه تولید موج و A عملگر انتشار موج منطبق بر حل معادله موج آکوستیک یا الاستیک است. در اغلب روش‌ها به رابطه بالا یک تابع منظم سازی بر اساس اطلاعات اولیه، روی پارامترهای مدل نیز اضافه می‌شود تا حل رابطه بالا را پایدارتر کند.