

الله أكبر
الله أكبر
الله أكبر

دانشگاه یزد
دانشکده معدن و متالورژی
گروه اکتشاف معدن

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
اکتشاف معدن

بهینه نمودن تفسیر لرزه‌نگاری با استفاده از
مدل‌سازی پیشرو در یکی از مناطق جنوب غربی
ایران

دکتر احمد قربانی
استادان راهنما:
دکتر عبدالحمید انصاری

استاد مشاور: دکتر سید حسین مجتهدزاده

پژوهش و نگارش: سعید گل‌وردی یزدی

اسفند ماه ۱۳۸۹

تقديم به

ساحت مقدس امام عصر أرواحنا لِتُرابِ مَقَدَمِهِ الفدا (ع)

در اینجا وظیفه خود می‌دانم که از اساتید محترم آقایان دکتر قربانی، دکتر انصاری و دکتر مجتهدزاده اعضاء هیئت علمی دانشکده معدن و متالورژی دانشگاه یزد، جناب آقای دکتر عبداللهی فرد مفسر مدیریت اکتشاف نفت و عضو هیئت مدیره شرکت پتروکاو و جناب آقای مهندس علی عمرانی کارشناس پردازش شرکت تراس پرشیا که با زحمات بی‌دریغشان اینجانب را در این پژوهش یاری نموده‌اند کمال تشکر را داشته باشم.

چکیده

برای تفسیر لرزه‌نگاری انعکاسی درک کامل ساختمان زمین بسیار مهم است. به همین منظور مفسر به مدل سرعتی زمین نیازمند است. در روند معمول پردازش دو مرحله تحلیل سرعت انجام می‌گیرد. مرحله اول تحلیل سرعت بر روی شات‌گذر (Shot gather) و مرحله دوم در مرحله کوچ انجام می‌شود. در مرحله کوچ سرعت‌های حاصل از شات‌گذر به مکان خود برده می‌شوند.

با توجه به فقدان شات‌گذر و در دسترس بودن مقطع لرزه‌ای برانبارش شده زمانی و مقطع لرزه‌ای کوچ یافته عمقی در این پژوهش، برای ایجاد مدل سرعتی زمین از مدل سازی پیشرو استفاده گردید.

برای ایجاد یک مدل مصنوعی جهت مدل‌سازی پیشرو، اطلاعات عمقی حاصل از مقطع لرزه‌ای کوچ یافته عمقی استخراج و به وسیله آن یک مدل مصنوعی عمقی ساخته شد. برای ایجاد تغییرات جانبی سرعت در هر لایه، مدل به زون‌های ۲۵ متری (که همان اندازه نقطه میانی مشترک بود) در جهت افقی تقسیم بندی شد. به هر زون یک سرعت دلخواه داده شد و سپس عملیات ردیابی مسیر پرتو با در نظر گرفتن آرایش ژئوفون‌ها و منابع لرزه‌ای بر روی آن صورت گرفت. نتایج حاصل که مقطع لرزه‌ای زمانی از مدل مصنوعی بود با مقطع لرزه‌ای زمانی حاصل از زمین مقایسه شد و اختلاف دو مقطع بدست آمد. این سرعت‌ها آنقدر تغییر داده شد تا این اختلاف حداقل گردد. در نهایت مدل سرعتی بدون استفاده از روش‌های پردازشی و بدون شات‌گذر بدست آمد.

در نهایت به اهمیت تغییرات جانبی سرعت در هر سازند پی برده شد، چون تغییرات جانبی سرعت در هر لایه بین ۲۲ تا ۳۷ درصد بدست آمد. که این تغییرات با نتایج زمین شناسی انطباق خوبی دارد.

Contents

فصل اول	۹
مقدمه	۹
۱-۱- کلیات	۱۰
۲-۱- اهداف طرح	۱۱
۳-۱- روش انجام کار	۱۲
فصل دوم	۱۵
تئوری سرعت، ردیابی مسیر پرتو و پردازش	۱۵
۱-۲- سرعت و انواع آن	۱۶
۱-۱-۲- سرعت لحظه ای: V_{ins} و یا فقط V	۱۷
۲-۱-۲- زمان سیر قائم: τ	۱۸
۳-۱-۲- سرعت لحظهای به عنوان تابعی از زمان سیر قائم $[V_{ins}(\tau)]$	۲۱
۴-۱-۲- سرعت متوسط: V_{ave}	۲۲
۵-۱-۲- سرعت میانگین: V_{mean}	۲۴
۶-۱-۲- سرعت میانگین ریشه مربعات: V_{rms}	۲۵
۷-۱-۲- سرعت بازه ای: V_{int}	۲۷
۸-۱-۲- سرعت ظاهری: V_z, V_y, V_x	۳۱
۲-۲- مسیر پرتو موج در یک محیط با تغییرات سرعتی نسبت به عمق $V(z)$	۳۶
۱-۲-۲- محاسبه پارامتر پرتو	۳۸
۳-۲- نرم افزار	۴۰
۱-۳-۲- نرم افزار GXII	۴۱
۴-۲- پردازش داده های لرزه نگاری بازتابی	۴۴
۱-۴-۲- ویرایش داده های خام	۴۴
۲-۴-۲- واتسهیم کردن	۴۵

۴۵	..... ۳-۴-۲ تصحیح بهره وری دامنه نوسان
۴۵	..... ۴-۴-۲ مقیاس بندی و تساوی نمایی
۴۵	..... ۵-۴-۲ حذف رسیدهای مستقیم و انکساری
۴۶	..... ۶-۴-۲ تصحیحات ایستا
۴۶	..... ۷-۴-۲ واهمامیخت قبل از برانبارش
۴۶	..... ۸-۴-۲ وردادشت نقطه عمق مشترک یا نقطه میانی مشترک
۴۶	..... ۹-۴-۲ تجزیه و تحلیل سرعت
۴۸	..... ۱۰-۴-۲ برانبارش
۴۹	..... ۱۱-۴-۲ واهمامیخت بعد از برانبارش
۴۹	..... ۱۲-۴-۲ عبور داده ها از صافی
۵۰	..... ۱۳-۴-۲ کوچ
۵۲	..... فصل سوم
۵۲	..... زمین شناسی و چینه شناسی منطقه مورد مطالعه
۵۳	..... ۱-۳ سازند فهلیان
۵۴	..... ۲-۳ سازند سروک
۵۵	..... ۱-۲-۳ گسترش سازند سروک در لرستان
۵۵	..... ۲-۲-۳ گسترش سازند سروک در فروافتادگی دزفول و مناطق بلافصل آن
۵۶	..... ۳-۲-۳ گسترش سازند سروک در فارس
۵۷	..... ۳-۳ سازند آسماری
۵۸	..... ۴-۳ سازند گچساران
۵۸	..... ۱-۴-۳ بخش انیدریدی چهل
۵۹	..... ۲-۴-۳ بخش کربناتی - تبخیری چمپه
۵۹	..... ۳-۴-۳ بخش مارنی مول
۵۹	..... ۵-۳ بخش آواری سازند آغاچاری

۶۰	..... بخش لهبری سازند آغاچاری
۶۲	..... فصل چهارم
۶۲	..... مدل سازی پیشرو
۶۳	..... ۱-۴ کلیات
۶۵	..... ۲-۴-تفسیر مقاطع لرزه نگاری
۶۷	..... ۳-۴ ساخت مدل با استفاده از اطلاعات تفسیری
۶۸	..... ۴-۴-تعیین محل قرارگیری فرستنده و گیرنده:
۷۰	..... ۵-۴ ساخت مدل سرعتی قائم و افقی:
۷۱	..... ۶-۴: ردیابی مسیر پرتو:
۷۲	..... ۷-۴: مدل خروجی:
۷۴	..... ۸-۴: تفسیر مدل خروجی:
۷۵	..... ۹-۴: تعیین میزان انحراف:
۷۸	..... ۱۰-۴ تفسیر مدل عمقی:
۸۰	..... ۱۱-۴ تفسیر مدل سرعتی:
۸۳	..... فصل پنجم
۸۳	..... نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۴	..... ۱-۵- نتیجه گیری:
۸۴	..... ۲-۵-پیشنهادات:
۸۶	..... منابع و مآخذ

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات

لرزه‌نگاری از روش‌های متداولی است که از اوایل قرن ۱۹ میلادی جهت پی بردن به ساختمان زمین شناختی زیر زمین که وجود مواد هیدروکربوری در آنها احتمال داده می‌شد مورد استفاده قرار گرفت [۶].

در لرزه‌نگاری سرعت انتشار امواج در زمین بیانگر تغییرات الاستیکی زمین است. تغییرات سرعت برای تفسیر مقاطع لرزه نگاری از اهمیت خاصی برخوردار است. سرعت در پردازش، یکی از عوامل مهم تبدیل زمان به عمق است و در تفسیر، می‌تواند نشان دهنده تغییرات در خواص فیزیکی زمین باشد [۳].

در روند عادی پردازش داده‌های لرزه‌نگاری، دو بار تحلیل سرعت انجام می‌گیرد. یک دفعه ایجاد مدل سرعتی برای برانبارش است و بار دیگر ایجاد مدل سرعتی برای کوچ داده‌ها می‌باشد. سرعت کوچ همان سرعت واقعی زمین است یا به عبارتی همان سرعتی است که به وسیله آن می‌توان مقاطع زمانی را به مقاطع عمقی تبدیل کرد.

در مواردی مدل عمقی زمین و داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده موجود است و برای تفسیر بهتر به فایل سرعتی نیاز می‌باشد. برای این موارد می‌توان یک مدل مصنوعی را ایجاد کرد که پاسخ لرزه‌ایی مشابه پاسخ لرزه‌ای زمین داشته باشد. این رویه همان مدل‌سازی پیشرو است که در علوم مختلف کاربرد دارد. روش مدل‌سازی پیشرو قبلاً نیز برای داده‌های لرزه‌نگاری انعکاسی به کار رفته است. در سال ۱۹۸۸ می و گوی روشی را با استفاده از متد معکوس ردیابی مسیر پرتو برای محاسبه ساختار زمین شناسی ارائه دادند. در این روش با استفاده از تابع سرعت و تغییرات انعکاس دهنده بر روی مقطع نقطه میانی مشترک^۱ برانبارش شده و مدل دو بعدی منحنی انعکاس دهنده-ها را می‌توان داشت. در روش مذکور دگرشیبی و گسل‌ها می‌توانست مشخص شود البته در صورتی که تفسیر تغییرات انعکاسی از این رخداد به درستی درک شده باشد. در ۱۹۸۸ زلت و ایس روشی برای ردیابی مسیر پرتو و محاسبه دامنه در دو بعدی را برای یک مدل سرعتی رفتارمند توسعه دادند. در ۱۹۹۸ اندرسون و کاردیمونا برای درک بهتر مدل زمین شناسی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، مدل دو بعدی مصنوعی لرزه‌ای را به وسیله مدل‌سازی پیشرو از روش ردیابی مسیر پرتو

ایجاد کردند و آن را با مدل حاصل از روش GPR مقایسه کردند. در این مدل از یک سرعت متوسط برای هر لایه استفاده شد و در مکانی بررسی شد که لایه‌ها دارای تغییرات بسیار ساده‌ای برخوردار بودند. در سال ۲۰۰۰ میلادی کارنی مدل سرعتی را به وسیله ردیابی مسیر پرتو در یک مطالعه موردی با شیب زیاد، ایجاد کرد. بهارا و همکاران در سال ۲۰۰۲ میلادی ساختار کم عمق یک گرaben را با مدل‌سازی پیشرو به وسیله زمان‌های اولین رسید ایجاد کردند. مبنای کار آن‌ها ردیابی مسیر پرتو در دو بعد بود. بگات و همکارانش در سال ۲۰۰۴ میلادی مدل سرعتی را با ردیابی مسیر پرتو بدست آوردند و نتیجه را با مدل سرعتی حاصل از دو روش دیگر مقایسه کردند. در ۲۰۰۶ کامرون و همکاران سرعت لرزه‌ای را محاسبه کردند، سپس با استفاده از سرعت بدست آمده و تصویر زمانی کوچ یافته تبدیل زمان به عمق را ایجاد کردند. در سال ۲۰۰۸ میلادی ون پنگ و همکارانش مدل سازی پیشرو را برای بهبود انرژی حاصل از برداشت لرزه ای به کار گرفت. در ۲۰۱۰ میلادی جونز با استفاده از مدل سازی معکوس مدل سرعتی را بر مبنای ردیابی مسیر پرتو انجام داد.

۲-۱- اهداف طرح

در مراحل اولیه لازم است مشخص گردد تعیین سرعت به چه منظور صورت می‌گیرد و از این رو نیاز است تا اهداف مدل‌سازی و نحوه بازگشتی و پیش رو بودن مدل به وضوح روشن گردد. در همین راستا با در نظر گرفتن اهداف کلی برای دستیابی به مدلی بهینه از مدل‌سازی پیشرو استفاده شده است تا بتوان با ایجاد یک سیکل برگشتی مجددا پارامترها را تعیین و مدل را بهبود بخشید. این طرح به طور موردی، منطقه‌ای را در ایران مورد بررسی قرار داده است که سرعت‌های مدل شده بر روی لایه‌های سطحی، آسماری و گچساران انجام گرفته است. با توجه به اهمیت و پیچیدگی‌های موجود در این سازندها، تعیین روشی جهت بدست آوردن سرعت بهینه و دستیابی به بهینه مقاطع کوچ یافته برای مفسر بسیار حائز اهمیت است. در این پروژه به ارائه روشی برای دستیابی به اهداف ذکر شده پرداخته شده است. در نهایت با استفاده از این روش و سرعت تعیین شده از آن مفسر می‌تواند مقاطع کوچ یافته را مورد بررسی قرار داده و مطابق دیدگاه تفسیر تغییرات سرعتی را اعمال نماید. در مجموع می‌توان اهداف زیر را برای این پروژه در نظر گرفت:

- ✓ تعیین سرعت کوچ با استفاده از مقطع شات گذر
- ✓ تهیه مدل سرعتی بدون استفاده نرم افزارهای پردازشی با تکیه بر تفسیر مقاطع کوچ نیافته و مدل عمقی حاصل از چاه

✓ بهینه سازی تفسیر مقاطع کوچ یافته با استفاده از سرعت حاصله از مدل موجود

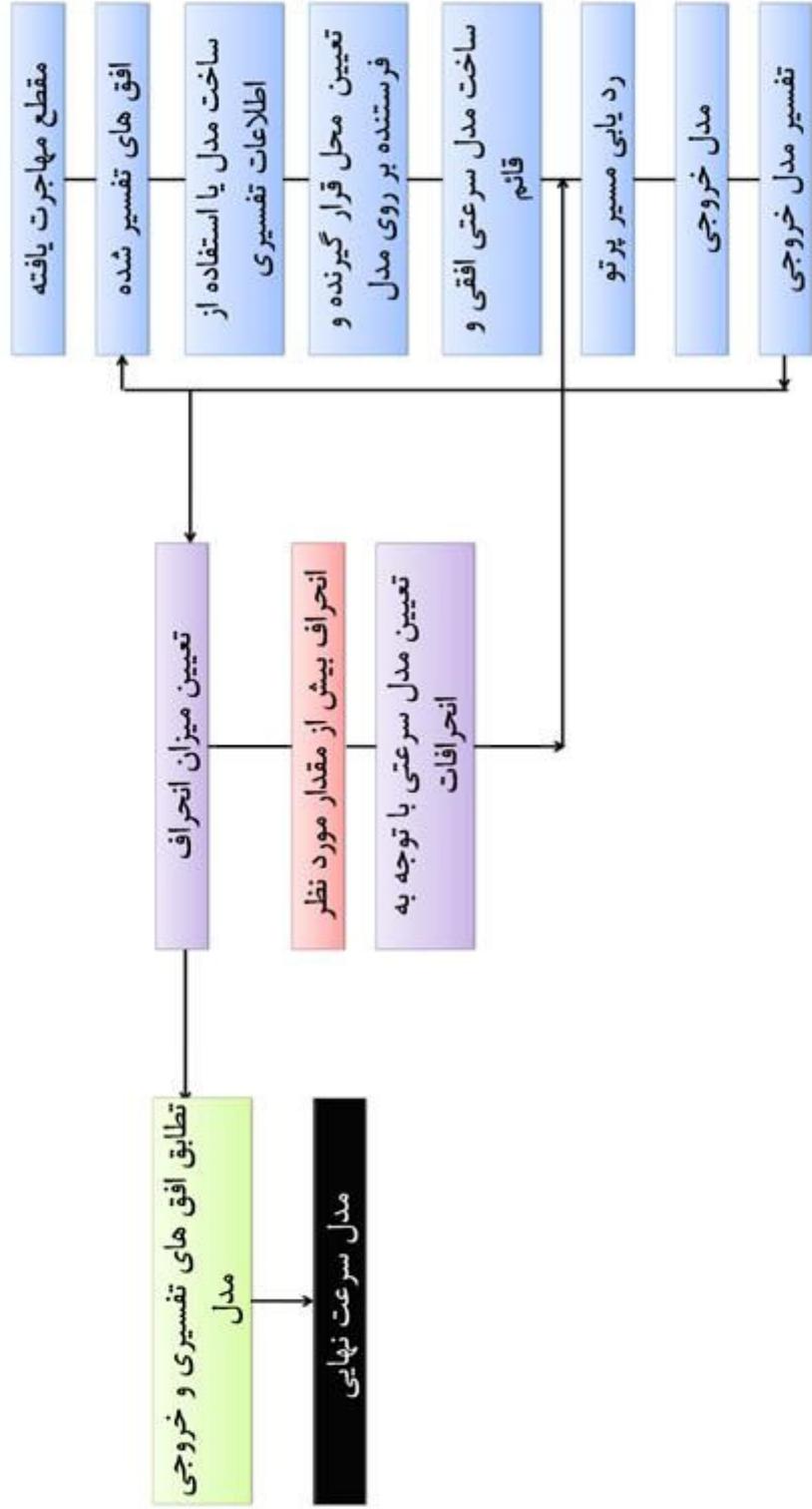
۱-۳- روش انجام کار

با توجه به لزوم تعیین صحیح سرعت در تمامی پروژه‌های پردازش داده‌های لرزه‌نگاری و نیاز به دقت در تخمین این پارامتر، در این رساله سعی شده است تا روش کار به صورت عام بیان شود به گونه‌ای که در سایر موارد مشابه به منظور تعیین سرعت و بهبود مقاطع کوچ یافته بتوان از راهکارهای ارائه شده استفاده نمود. علاوه بر این در هر پروژه پردازش داده‌های لرزه‌نگاری امکان کنترل مدل سرعتی تعیین شده به منظور اعمال کوچ وجود داشته و می‌تواند به عنوان پارامتری کنترلی مورد استفاده قرار گیرد.

در این پروژه در ابتدا مقاطع کوچ یافته تفسیر شده و افق‌های مورد نظر به صورت مجزا به عنوان داده‌های اولیه مدل مورد استفاده قرار گرفته است. افق‌ها بعد از تغییر فرمت به نرم‌افزار وارد شده و پیکر بندی مدل انجام شده است.

به دلیل اینکه مدل‌های سرعتی به صورت جانبی و عمقی تعیین می‌شود در اینجا علاوه بر اعمال تغییرات سرعتی بر روی لایه‌ها بر حسب عمق، تغییرات سرعتی به صورت جانبی نیز با اعمال محدوده‌هایی با ابعاد هر نقطه میانی مشترک محاسبه شده است.

پس از اعمال تغییرات نهایی بر روی مدل پارامترهای مربوط به آرایه‌های برداشت و فواصل گیرنده و فرستنده تعیین و اعمال شده و مدل‌سازی انجام می‌شود. نتایج حاصل از این مدل در حوزه زمانی افق مورد نظر می‌باشد که در نرم افزار تفسیر مجدداً تفسیر شده و با افق‌های برداشت شده مورد استفاده در مدل اولیه مقایسه می‌شود. تفاوت حاصل از این دو مدل تنها ناشی از مدل سرعتی اعمال شده است. با اعمال تغییرات بر روی مدل سرعت در محدوده‌های با تفاوت مشاهده شده، مجدداً مدل دیگری را ساخته و در این چرخه تغییرات را به حداقل می‌رساند. مدل سرعتی حاصل از تغییرات بدست آمده، سرعت مناسب جهت بهینه‌سازی مدل سرعتی کوچ خواهد بود. در شکل (۱-۱) شمای کلی مراحل پروژه نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: نحوه دستیابی به سرعت بهینه را در این پروژه نمایش می دهد

این تحقیق در پنج فصل تهیه گردیده است. در فصل بعد تئوری ردیابی مسیر پرتو، سرعت و انواع آن گفته می‌شود. همچنین کلیاتی در مورد پردازش و نرم افزارهای مورد استفاده در این پژوهش و دلیل استفاده از آنها ذکر می‌شود. در فصل سوم برای آشنایی بیشتر از سازندهای موجود در ناحیه مورد مطالعه خلاصه‌ای از چینه شناسی و زمین شناسی سازندهای مورد مطالعه بیان می‌شود. در فصل چهارم روند مدل سازی پیشرو در این پژوهش بیان می‌شود. در پایان این فصل با توجه به مدل سرعتی بدست آمده از مدل سازی پیشرو و اطلاعات عمقی موجود تفسیر صورت می‌گیرد. در فصل آخر نتایج و پیشنهاداتی ارائه می‌گردد.

فصل دوم

تئوری سرعت، ردیابی مسیر پرتو و پردازش

۲-۱- سرعت و انواع آن

لرزه‌شناسی اکتشافی به معنای واقعی با واژه‌های مختلف سرعت انتشار امواج در ارتباط است. به طور مثال، می‌توان به سرعت بازه‌ای، سرعت لحظه‌ای، سرعت ظاهری، سرعت rms^1 ، سرعت متوسط، سرعت میانگین، سرعت برانبارش، سرعت افقی، سرعت قائم، سرعت فاز، سرعت گروه، سرعت موج فشاری، سرعت موج برشی، سرعت مهاجرت و ... اشاره کرد. در ابتدا باید گفت که تفاوت اساسی بین سرعت‌های فیزیکی^۲ و اندازه‌گیری‌های سرعت^۳ وجود دارد. بعضی از سرعت‌ها مانند سرعت لحظه‌ای، سرعت فاز و سرعت موج فشاری و برشی اشاره به سرعتی دارد که موج فیزیکی با آن منتشر می‌شود. در صورتی که اندازه‌گیری‌های سرعت نوعاً کمیت‌هایی هستند که از تحلیل داده‌هایی با ابعاد فیزیکی سرعت بدست می‌آید ولی به سرعت‌های فیزیکی در بعضی از جهات مرتبط هستند، مانند سرعت‌های متوسط، میانگین و rms ، سرعت برانبارش، سرعت بازه‌ای سرعت ظاهری و سرعت مهاجرت. در مقایسه با سرعت‌های فیزیکی در واقع با یکی از سرعت‌های اندازه‌گیری شده که همان سرعت لحظه‌ای می‌باشد، منتشر می‌شود [۱۴].

استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده برای تحلیل سرعت و کاربرد تصحیح داده‌ها که به سرعت‌ها بستگی دارد، اساس پردازش داده‌های لرزه‌ای می‌باشد. سرعت، همراه با هندسه لرزه‌ای مورد استفاده و شکل بازتابنده‌ها، ویژگی شکل منحنی زمان سیر (مثلاً هذلولی) را در داده‌ها تعیین می‌کند. تغییرات فضایی در سرعت باعث ایجاد واپیچیدگی‌هایی از شکل‌های ساده و متداول می‌شود، و این واپیچیدگی‌ها باید در پردازش منظور گردند. گاهی اوقات اطلاعات سرعت از داده‌هایی به دست آمده از چاه‌نگاری، ارزیابی‌های چاه‌های آزمایشی سرعت^۴، داده‌های انکساری برداشت شده در منطقه و نقشه‌های زمین‌شناسی نتیجه می‌شوند. اما این اطلاعات ذاتاً با توجه به پوشش داده‌های لرزه‌ای، پراکنده می‌باشند. این به عنوان تحلیل سرعت شناخته می‌شود و سر منشا بعضی از محاسبات سرعت نظیر سرعت‌های برانبارش و مهاجرت می‌باشد [۱۶].

به همین منظور درک بهتر مفاهیم سرعت تعاریف و انواع سرعت‌ها در زیر ذکر شده است:

-
- 1-Root-mean-squares
 - 2-Physical velocities
 - 3-Velocity measures
 - 4-Check shot

۲-۱-۱- سرعت لحظه‌ای^۱: V_{ins} و یا فقط V

سرعت لحظه‌ای در حالت کلی به سرعت انتشار موج‌های لرزه‌ای در زمین اطلاق می‌گردد. کلمه «لحظه‌ای» به سرعت موضعی موج در آن جایی که موج از یک لحظه زمانی به زمان دیگر حرکت می‌کند، بر می‌گردد. سرعت لحظه‌ای برای هر نوع موجی مانند موج فشاری، موج برشی، سطحی و غیره کاربرد دارد [۱۴].

مانند اغلب سرعت‌های لحظه‌ای، V_{ins} نیز معمولاً یک کمیت برداری نمی‌باشد. به بیان دقیق‌تر، سرعت لحظه‌ای به عنوان اندازه بردار سرعت در نظر گرفته می‌شود [۱۴].

برای آزمایشات لرزه‌ای، V_{ins} به صورت تابعی متغیر با موقعیت زمین تعیین می‌گردد. در اکثر مواردی که زمین یک محیط غیر همگن است جهت بردار سرعت اهمیت دارد که در اینجا از آن صرف نظر شده است. سرعت لحظه‌ای تابعی از زمان نیست، هرچند نشان می‌دهد که خواص زمین در طول آزمایش لرزه‌ای تغییر می‌کند. به ندرت می‌توان سرعت لحظه‌ای را در مختصات فضایی ثابت فرض کرد، اما اغلب تغییرات آن فقط در یک جهت مشخصی است [۱۴].

عموماً در حوضه‌های رسوبی سرعت به شدت با عمق تغییر می‌کند، اما تغییرات آن در جهت افقی ناچیز می‌باشد.

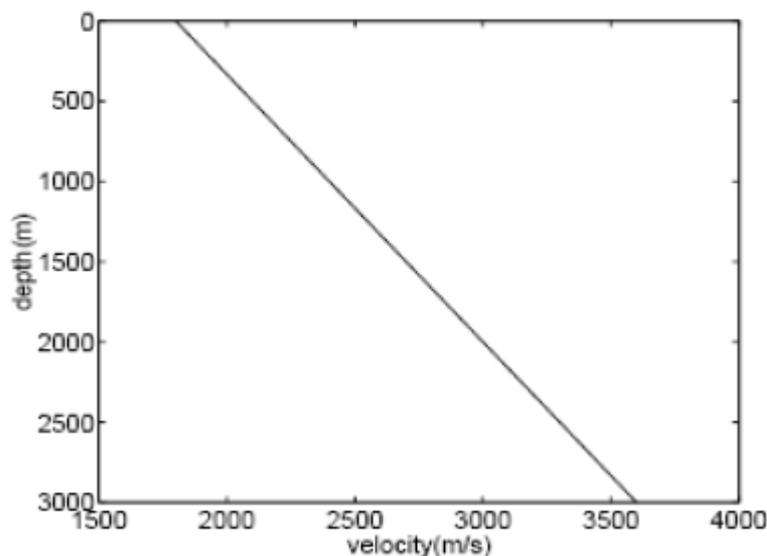
فرض کنید تابع سرعت لحظه‌ای با عمق Z نسبت خطی داشته باشد:

$$V_{ins} = V_0 + cz \quad (1-2)$$

به این تابع، تابع سرعت جهانی^۲ (عمومی) اطلاق می‌گردد. وقتی که $V_0 = 1800 \text{ m/s}$ و $c = 0.6 \text{ sec}^{-1}$ باشد شکل (۱-۲) این تابع را برای تابع دامنه عمقی صفر تا ۳۰۰۰ متر نشان می‌دهد.

^۱ - Instantaneous velocity

^۲ - Universal velocity function



شکل (۱-۲): تابع سرعت جهانی با عمق تغییرات خطی دارد [۱۴]

۲-۱-۲- زمان سیر قائم^۱: τ

با داشتن مشخصات کامل سرعت‌های لحظه‌ای به عنوان تابعی از مکان $V_{ins}(x,y,z)$ ، می‌توان زمان سیرها را بر روی هر مسیری محاسبه نمود. از آنجایی که بین دو نقطه می‌توان بی‌نهایت مسیر ممکن را در نظر گرفت (البته تمام آنها مسیرهای پیرو قانون اسنل نیستند اما تمام آنها مسیرهای ممکن برای عبور و پخش انرژی می‌باشند)، غیر منطقی است این انتظار را داشت که رابطه واضح و روشنی بین زمان سیر و عمق وجود داشته باشد. ولی اگر یک مسیر دلخواه انتخاب شود، به هر حال یک رابطه‌ای را می‌توان برای آن در نظر گرفت. به همین منظور، معمولاً در طول یک مسیر قائم از صفر تا z ارتباطی را بین عمق و زمان سیر پیدا می‌کنیم. این زمان سیر قائم یک کمیت قابل استفاده و مفیدی است، که در مرتبه اول، مختصات زمانی "مقاطع برانبارش نهایی"^۲ و در مرحله بعدی مختصات زمانی "مقاطع زمانی مهاجرت یافته"^۳ می‌باشد. حتی با وجود اینکه V_{ins} یک تابع مکانی کلی می‌باشد، برای محاسبه زمان سیر قائم فقط آن را وابسته به عمق z در نظر می‌گیریم، زیرا محاسبه در (x,y) غیر مستقل می‌باشد. بنابراین سرعت لحظه‌ای را به

¹ - Vertical traveltime

² - Final stacked section

³ - Migrated time section

صورت $V_{ins}(z)$ می توان نوشت با این توضیح که محاسبات برای هر (x,y) قابل تعمیم می- باشد [۱۴].

برای محاسبه زمان سیر قائم، یک بازه عمقی کوچک (dz) را در نظر می گیریم. dz تقسیم V_{ins} را می توان تقریباً ثابت فرض کرد. در این صورت زمان سیر قائم را در این بازه می توان به سادگی به صورت زیر نوشت:

$$d\tau = \frac{dz}{V_{ins}(z)} \quad (2-2)$$

زمان سیر کلی یک طرفه از سطح تا عمق z ، به صورت جمع چند زمان سیر مشابه به بالا می باشد. با گرفتن حد از dz و تبدیل آن به انتگرال وقتی $dz \rightarrow 0$ می توان نوشت:

$$\tau(z) = \int_0^z \frac{\tilde{dz}}{V_{ins}(\tilde{z})} \quad (3-2)$$

وابستگی به z فقط در حد بالایی انتگرال دیده می شود در حالی که \tilde{z} فقط یک متغیر نمایشی انتگرال است. به همین صورت، $\tau(z)$ تابعی است که به طور یکنواخت با عمق z افزایش می یابد. همچنین به صورت برعکس نیز می توان عمل کرد، یعنی با داشتن $\tau(z)$ می توان $z(\tau)$ را نیز تعیین کرد و بالعکس. تابع $z(\tau)$ به عنوان منحنی زمان- عمق شناخته می شود و برای پیدا کردن عمق با داشتن زمان سیر و زمان با داشتن عمق مفید می باشد [۱۴].

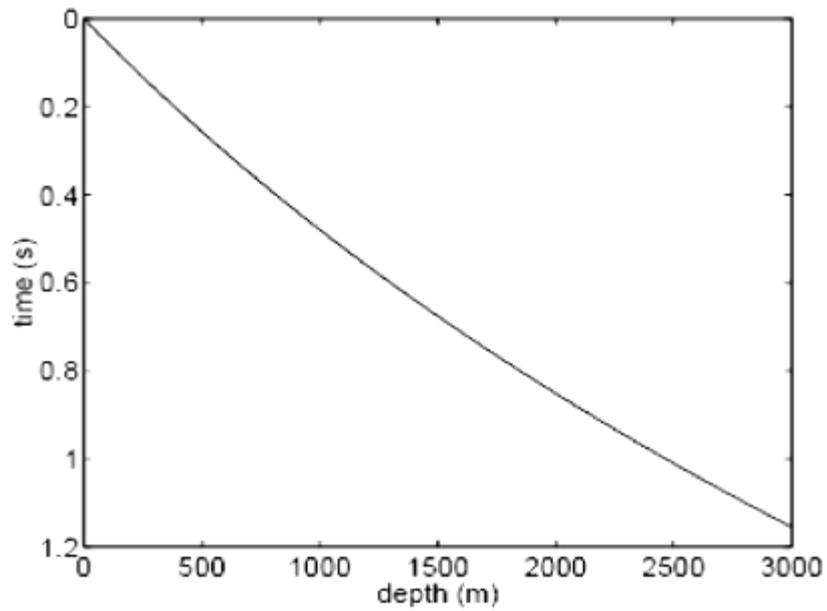
با استفاده از تابع سرعت جهانی معادله (۱-۲) زمان سیر قائم معادله (۳-۲) به صورت زیر می شود:

$$\tau(z) = \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{V(\tilde{z})} = \frac{1}{c} \int_{V_0}^{V_0+cz} \frac{d\delta}{\delta} = \frac{1}{c} \ln \left[1 + \frac{cz}{c_0} \right] \quad (4-2)$$

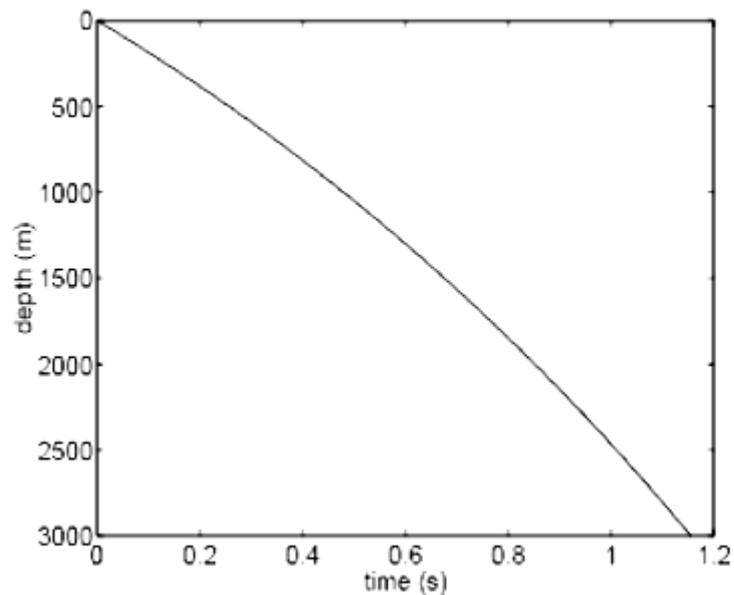
بنابراین تغییرات خطی سرعت با عمق منجر به منحنی زمان- عمق لگاریتمی می شود. همچنین می توان نتیجه گرفت :

$$z(\tau) = \frac{V_0}{c} [e^{c\tau} - 1] \quad (5-2)$$

برای تابع سرعت جهانی، منحنی های $\tau(z)$ و $z(\tau)$ در شکل های (۲-۲) و (۳-۲) نشان داده شده است. نمودار $z(\tau)$ معکوس نمودار $\tau(z)$ می باشد.



شکل (۲-۲): منحنی زمان- عمق $\tau(z)$ از معادله (۲-۴) برای حالت $V_0 = 1800 \text{ m/s}$ و $c = 0.6 \text{ sec}^{-1}$ [۱۴]



شکل (۲-۳): منحنی زمان- عمق $z(\tau)$ از معادله (۲-۵) برای حالت $V_0 = 1800 \text{ m/s}$ و $c = 0.6 \text{ sec}^{-1}$ [۱۴]