

ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب «شناخت مطالعات لرزه ای با روش شکست مرزی»



ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب
«شناخت مطالعات لرزه‌ای با روش شکست مرزی»

به نام خدا

پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط ، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از بکارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع ، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب‌ناپذیر ساخته است . نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز ، تهیه ضوابط ، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است .

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از این رو طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور وزارت نیرو در جهت نیل به این هدف با مشخص نمودن رشته‌های اصلی مهندسی آب اقدام به تشکیل مجامع علمی - تخصصی با عنوان کمیته‌ها و زیرکمیته‌های فنی نموده که وظیفه تهیه این استانداردها را به عهده دارند .

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین می‌گردد:

- استفاده از تخصص‌ها و تجارب کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی ، سازمانها ، نهادها ، واحدهای صنعتی ، واحدهای مطالعه ، طراحی و ساخت

- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه ، اجرا ، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره‌کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر موسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

استانداردها ابتدا بصورت پیش‌نویس برای نظرخواهی منتشر شده و نظرات ارسالی پس از بررسی در کمیته تخصصی در نسخه نهایی منظور می‌گردد.

آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحب‌نظرانی که فعالیت آنها با این رشته از مهندسی آب مرتبط می‌باشد موجب امتنان کمیته فنی شماره ۱۳-۲ (ژئوفیزیک) خواهد بود.

ترکیب اعضای کمیته

اعضای کمیته فنی شماره ۱۳-۲ (ژئوفیزیک) طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور که در تهیه و تدوین این

نشریه مشارکت داشته‌اند، به ترتیب الفبا به شرح زیر هستند:

فوق لیسانس ژئوفیزیک	آقای علی اکبر اسلامی
فوق لیسانس زمین شناسی	خانم فیروزه امامی
دکترای ژئوفیزیک	آقای منوچهر بهاور
دکترای فیزیک	آقای حسن حاجب حسینی
فوق لیسانس ژئوفیزیک	خانم وحیده زرگر صالح
لیسانس زمین شناسی - کارشناس ژئوفیزیک	آقای فرهنگ شیروانی
لیسانس زمین شناسی - کارشناس ژئوفیزیک	آقای علی نصیریان
دکترای ژئوفیزیک	آقای غلامحسین نوروزی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه
۱	۱-۱- کلیات
۱	۲-۱- هدف
۲	۳-۱- تاریخچه کاربرد ژئوفیزیک
۴	۴-۱- روشهای لرزه‌ای
۵	۱-۴-۱- روش شکست مرزی
۵	۲-۴-۱- روش بازتاب
۶	۳-۴-۱- روشهای لرزه‌ای درون‌چاهی
۶	۲- شناخت روش شکست مرزی
۶	۱-۲- مبانی نظری
۷	۱-۱-۲- تنجش و تنجیدگی
۷	۲-۱-۲- ثابتهای کشسانی
۸	۱-۲-۱-۲- مدول یانگ
۸	۲-۲-۱-۲- نسبت پواسون
۸	۳-۲-۱-۲- ضریب تراکم‌پذیری
۸	۴-۲-۱-۲- مدول برشی
۹	۳-۱-۲- موجهای لرزه‌ای
۱۲	۱-۳-۱-۲- سرعت انتشار موجهای لرزه‌ای در سنگ
۱۴	۲-۳-۱-۲- نمودارهای زمان - فاصله
۱۶	۲-۲- اندازه‌گیریهای صحرائی
۱۶	۱-۲-۲- راستای خط برداشت
۱۶	۲-۲-۲- طول خط برداشت و عمق مطالعه
۲۱	۳-۲-۲- فاصله پوشش
۲۳	۴-۲-۲- انتخاب محل گیرنده‌ها
۲۴	۵-۲-۲- انتخاب محل چشمه‌ها
۲۴	۱-۵-۲-۲- روش خط برداشت یک طرفه
۲۴	۲-۵-۲-۲- روش خط برداشت دو طرفه

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۲۵	۳-۲ روشهای تفسیر
۲۶	۴-۲ تجهیزات صحرایی
۲۶	۱-۴-۲ چشمه‌های لرزه‌ای
۲۷	۱-۱-۴-۲ میزان انرژی
۲۸	۲-۱-۴-۲ نوع موجک
۲۸	۳-۱-۴-۲ قابلیت تکرار
۲۹	۴-۱-۴-۲ قابلیت حمل و نقل
۲۹	۵-۱-۴-۲ اثر زیست محیطی
۲۹	۶-۱-۴-۲ سهولت کاربرد
۲۹	۲-۴-۲ گیرنده‌های لرزه‌ای
۳۲	۱-۲-۴-۲ میرایی
۳۴	۲-۲-۴-۲ پاسخ فرکانسی
۳۵	۳-۲-۴-۲ حساسیت
۳۶	منابع
۳۷	واژه‌نامه

۱- مقدمه

۱-۱ کلیات

در دو دهه گذشته تحولات وسیع و قابل توجهی در کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مهندسی آب و ژئوتکنیک انجام گرفته است. مطالعه معیارهای مالی (مخارج چنین بررسیهایی در سال) از یکسو و آماری (تعداد کیلومتر خط، تعداد اکیپ ماه، تعداد اندازه‌گیری در سال) و نظایر آن از سوی دیگر، رشد چشمگیر کاربرد روشهای ژئوفیزیکی را در این زمینه نشان می‌دهد. اما برتر از این معیارها، پیشرفتهای کسب شده در این مدت زمان است که بازتاب آن بویژه در عوامل زیر مشهود است:

- طبیعت مسایل طرح شده

- وسایل موجود و توسعه و تکمیل این ابزارها، با توجه به نیازها و برای پاسخگویی به مسایل طرح شده.

- روشهای تفسیر و بهبود و تکامل آنها در مدت زمان کوتاه، با توجه به افزایش حجم داده‌ها.

هرچند تحولات ذکر شده در مورد کاربرد ژئوفیزیک در دیگر شاخه‌های علوم نیز صادق است، اما مقایسه‌ای بین نقش ژئوفیزیک در طرحهای مهندسی در دهه ۱۳۴۰ (۱۹۶۰) و نقش گسترده‌تر امروزی آن در این مورد، روشن می‌کند که تا چه اندازه استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در مهندسی آب و ژئوتکنیک چشمگیر بوده است. برای مثال در دهه ۱۹۶۰، استفاده از ژئوفیزیک در مسایل مهندسی، با حفر تعدادی چاه آزمایشی (اما با هزینه کمتر) یکسان تلقی می‌شد. اما امروزه کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مهندسی آب از حالتی که صرفاً جایگزین چاههای آزمایشی، آن هم در موارد تقلیل هزینه‌ها، باشد و یا اینکه فقط به صورت ابزاری در مسایل پیچیده زمین شناسی مورد توجه واقع شود، بیرون آمده و بعنوان مهم ترین راه حل مسایل موجود در این زمینه، یکی از نیازهای بررسیهای مهندسی است.

۲-۱ هدف

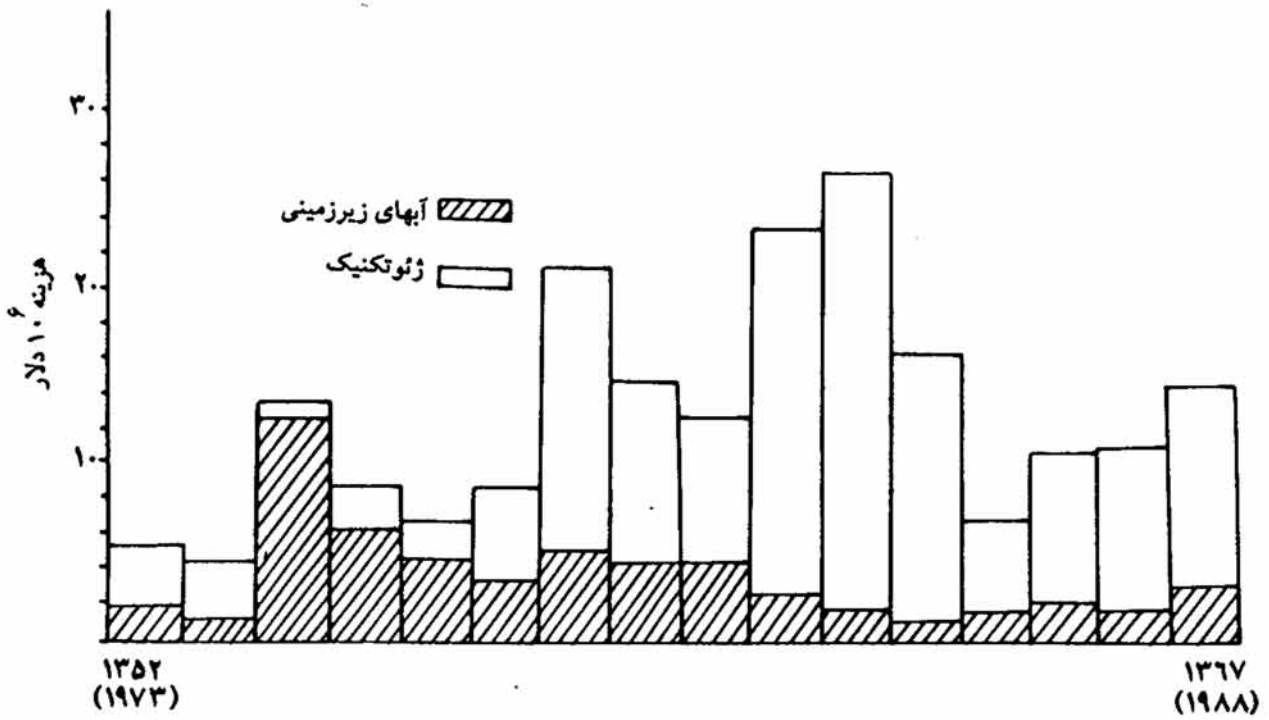
این نشریه به منظور هماهنگی و برداشت یکسان از نشریه "مطالعات لرزه‌ای به روش شکست مرزی" تهیه شده است تا زمینه لازم برای ارائه استانداردها و شرح خدمات این روش را فراهم آورد. استاندارد و شرح خدمات مطالعات لرزه‌ای به روش شکست مرزی به ترتیب در نشریه‌های "استاندارد مطالعات لرزه‌ای به روش شکست مرزی" و "شرح خدمات مطالعات لرزه‌ای به روش شکست مرزی" ارائه شده‌اند، در کلیه نشریه‌ها سعی شده است تا مطلب با توجه به نیازهای جاری کشور، تجربه‌های موجود از مطالعات قبلی و هماهنگی با معیارهای شناخته شده جهانی تهیه شود.

در مقیاس جهانی، طبق گزارش فعالیتهای ژئوفیزیکی انجمن ژئوفیزیکدانهای اکتشافی^۱ (SEG)، در سال ۱۹۵۹ (۱۳۳۸) هیچگونه هزینه‌ای در بررسیهای ژئوتکنیکی یا آبهای زیرزمینی گزارش نشده است.

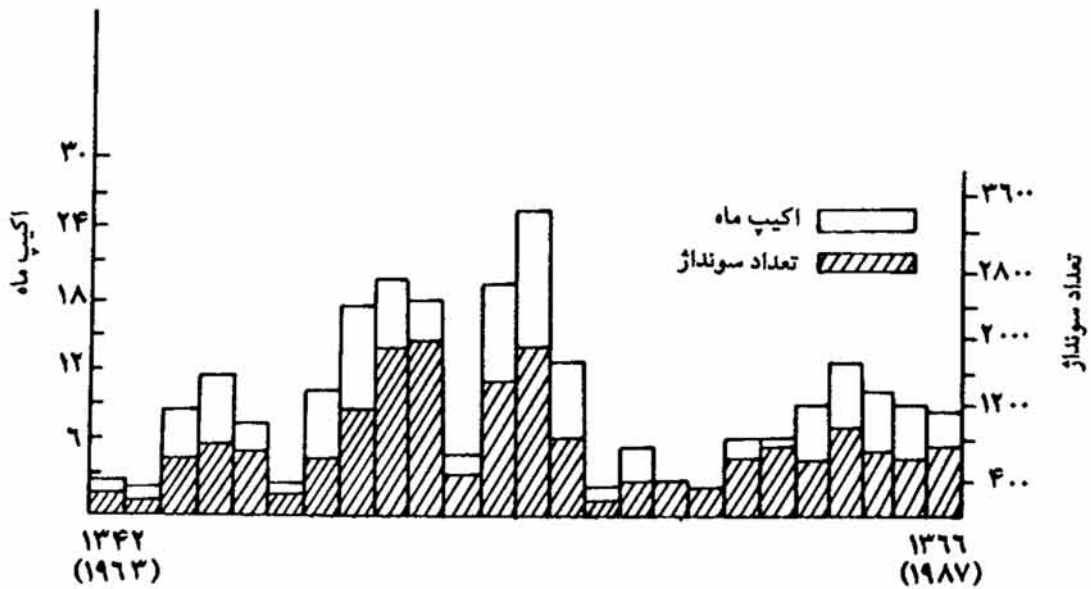
در سال ۱۹۶۹ هزینه سالانه در این زمینه‌ها به ۲۲/۱ میلیون دلار رسید که عامل عمده برای این افزایش فوق‌العاده، تعیین محل و ساختمان طرحهای انرژی هسته‌ای در جهان بوده است. به همین ترتیب هزینه‌ها در سال ۱۹۷۲ تا بیست میلیون دلار گزارش شده است. از این‌رو در این دوره، بررسیهای ژئوفیزیکی در مهندسی آب که بیشتر به منظور تعیین مشخصات لایه‌های زیرزمینی (نظیر ضخامت، آبدار بودن، مدولهای کشسانی و غیره) و پیچیدگیهای ساختاری (نظیر گسلها، حفره‌ها، عوارض کارستی و غیره) صورت می‌گرفت، در جهت پاسخگویی به درخواستهای فوق انجام شده است. با کاهش ساختمانهای انرژی هسته‌ای در بررسیهای ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی پس از سال ۱۹۷۲ (۱۳۵۱) وقفه‌ای بوجود آمد ولی صنایع دیگر براساس طرحهای سازه‌های بزرگ و اکتشاف منابع آب زیرزمینی رونقی به این رشته‌ها دادند. از اواسط دهه ۱۹۷۰ (۱۳۵۰) تاکنون، انواع مسایل غالباً به سمت ژئوفیزیک ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی گرایش یافته‌اند.

شکل ۱-۱ کلیه هزینه‌های ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی را در سالهای ۱۹۷۳-۱۹۸۸ (بدون در نظر گرفتن تورم) که توسط SEG گزارش شده است نشان می‌دهد. افت سریع از هزینه‌های سال ۱۹۷۲ (حدود ۲۰ میلیون دلار) در سالهای ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۸ و یک پرش فوق‌العاده به تراز قبلی و بالای آن پس از سال ۱۹۷۸ بلافاصله دیده می‌شود. این افت تراز با وقفه عمومی در صنعت انرژی هسته‌ای همخوانی دارد. قسمتی از پرش بین سالهای ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹ ممکن است بدان علت باشد که SEG فرم گزارشهای فعالیتهای ژئوفیزیکی را گسترش داد و پرسشنامه‌هایی را در آن گنجانید که موجب گزارش بیشتری از فعالیتهای ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی گردید. اما قسمت اعظم این پرش را می‌توان در گوناگونی روزافزون کاربردهای کم‌ژرفا جستجو کرد که در بررسیهای دقیق ژئوفیزیکی بسیار موثر بوده‌اند.

در ایران استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در مهندسی آب، بویژه اکتشاف و بررسی منابع آب زیرزمینی، از سال ۱۳۴۰ (۱۹۶۱) توسط بنگاه مستقل آبیاری سابق با همکاری شرکتهای خارجی آغاز شد (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۱ نمودار فعالیت جهانی مطالعات ژئوفیزیکی در زمینه آبهای زیرزمینی و ژئوتکنیک



شکل ۲-۱ نمودار فعالیت مطالعات ژئوفیزیکی (ژئوالکتریک) در زمینه آبهای زیرزمینی ایران

امروزه علاوه بر وزارت نیرو ، سازمانها ، موسسه‌ها و شرکتهای زیر نیز در بررسیهای ژئوفیزیکی در امور آب و مهندسی فعالیت دارند :

- مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

- سازمان زمین شناسی کشور

- شرکت فولاد ایران

- مهندسين مشاور ایرانی

۴-۱ روشهای لرزه‌ای

لرزه‌شناسی با بهره‌گیری از پدیده انتشار امواج کشسان^۱ (الاستیک) در زمین ، اکنون به عنوان یکی از دقیقترین و در عین حال فعالترین شاخه های ژئوفیزیک در مطالعات مهندسی و آب شناخته شده است. اگرچه کاربرد این روشها در مسایل مهندسی مدتها بخاطر نبود تکنولوژی لازم ، چه در زمینه عملیات صحرایی و چه در زمینه پردازش داده‌ها، محدود بود ولی امروزه با بهره‌گیری از این تکنولوژی‌ها قادر است تا با روشهای مختلف و پردازش با رایانه های پیشرفته به بررسی و پاسخگویی به مسایل مطرح شده پردازد .

هدف تمامی روشهای لرزه‌ای، تعیین پارامترهای موثر در انتشار موجهای لرزه ای در زمین و مربوط ساختن تغییرات مشاهده شده در آنها به زمین شناسی محل می باشد . تغییرات چگالی و مدولهای کشسانی^۲ سنگها (بر اثر تراکم ، درزه‌ها، شکافها ، هوازدگی، گسلها، اشباع شدگی و غیره) بر نحوه انتشار موجهای لرزه ای اثر گذاشته و در نتیجه روشهای لرزه ای را قادر می سازد تا با ثبت این تغییرات ، توده های تغییر یافته را مشخص نماید . عموماً روش و هدف مطالعات لرزه ای در مهندسی آب را اشباع شدگی ، عمق پی ، نوع سازه موردنظر و شرایط زمین شناسی محل تعیین می کند . روشهایی که امروزه در مطالعات لرزه ای مهندسی و آب مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از :

- روش شکست مرزی^۳

- روش بازتاب^۴

- روشهای لرزه ای درون چاهی^۵

1 - elastic waves

2- elastic modules

3- refraction method

4 -reflection method

5- in - hole seismic methods

۱-۴-۱ روش شکست مرزی

روش شکست مرزی به دلیل سادگی و هزینه نسبتاً پایین آن، فعالترین شاخه مطالعات لرزه ای را در مهندسی آب تشکیل می دهد. در این روش با مطالعه زمان سیر موجهایی که به صورت شکسته در سطح مشترک لایه ها منتشر می شوند، می توان بررسیهایی را در رابطه با جداسازی و شناخت لایه ها انجام داد. کاربرد این روش را می توان در موارد زیر جستجو کرد:

- تعیین عمق سنگ کف در محدوده احداث سازه ها
- تشخیص گسلها و سایر فرایندهای زمینساختی محلی در سنگها و تشخیص مناطق شدیداً کارستی شده
- تشخیص غارها و حفره های بزرگ زیرزمینی، تونلها و کانالهای قدیمی نیمه پر یا فرونشسته
- تعیین مدولهای کشسانی در جاجت تعیین مقاومت سنگها در محل سازه های بزرگ، پیش و پس از وارد آمدن بار
- تعیین سطح ایستایی
- در مورد برخی ساختمانها از جمله سازه های آبی، تعیین عوارض قدیمی زمین از قبیل بستر رودخانه ها و حوضه های رسوبی از اهمیت خاصی برخوردار است و در اینگونه موارد از روش شکست مرزی می توان در تکمیل اطلاعات سایر روشها استفاده کرد.

با وجود بازدهی نسبتاً خوب در پاسخگویی به مسایل ژئوتکنیک و آب، این روش دارای محدودیتهایی در تشخیص لایه های کم ضخامت عمیق و لایه هایی است که سرعت موج در آنها کمتر از لایه بالایی می باشد.

۱-۴-۲ روش بازتاب

این روش علیرغم کاربرد گسترده اش در حل مسائل اکتشافی، هنوز در حل مسائل مهندسی آب در ایران بخوبی شناخته نشده است. در این روش با مطالعه موجهای دریافتی بازتابیده^۱ از مرز تغییرات فیزیکی در سنگها؛ می توان به تصویر نسبتاً روشنی از زیر سطح زمین دست یافت. کاربرد روش بازتاب در مهندسی آب، برخلاف کاربردهای معمول آن در اکتشاف نفت، به عمقهای کم محدود می گردد. در این روش طول خط برداشت (پروفیل)، برخلاف روش شکست مرزی که چندین برابر عمق نفوذ است، نسبتاً کوتاه می باشد.

روش بازتاب ضمن پاسخگویی به مسائل مطرح شده در روش شکست مرزی و داشتن قدرت تفکیک بیشتر، قادر به

1- reflected

تشخیص لایه های نسبتاً نازک و لایه هایی که در آنها سرعت موج کمتر از لایه های بالایی است ، نیز می باشد .

عوامل محدود کننده این روش عبارتند از : اثر لایه هوازده سطحی بر فرکانسهای بالا ، آشفتگی ناشی از موجهای سطحی^۱ ، دشواری و هزینه نسبتاً سنگین عملیات صحرائی و پردازش داده ها.

۱-۴-۳ روشهای لرزه ای درون چاهی

با استفاده از روشهای مختلف درون چاهی که در آنها گیرنده یا چشمه و یا هر دو برای اندازه گیری در چاه یا گالری قرار داده می شوند، می توان به بررسی مشخصات زمین شناسی توده سنگ واقع بین محل چشمه و گیرنده ها پرداخت. همانگونه که مشخص است ، از ضروریات اساسی این روشها ، در اختیار داشتن چاههای اکتشافی با قطر مناسب یا گالریهایی جهت انجام اندازه گیری می باشد . اگر چه این روشها بتازگی در حل مسائل مهندسی آب بکار گرفته شده اند، ولی با پیشرفت سریع آنها می توان یقین داشت که در آینده ای نه چندان دور، کاربرد آنها بتواند نقش مهمی را در مهندسی آب برعهده گیرد . این روشها در اندازه گیری سرعت موجهای P و S برای تعیین مدولهای دینامیکی در جا^۲ ، تعیین محل تونلها، حفره ها و تشخیص بی هنجاریها در توده سنگ واقع بین محل چشمه و گیرنده ها و همچنین مطالعه آبهای زیرزمینی کاربرد دارند .

۲- شناخت روش شکست مرزی

روش شکست مرزی با توجه به سادگی عملیات و سهولت تفسیر داده های آن، نسبت به سایر روشهای لرزه ای کاربرد گسترده تری در مهندسی آب دارد. در این روش، با استفاده از زمان سیر موجهایی که به صورت شکسته در مرز مشترک لایه ها منتشر می شوند، می توان به مطالعه زمین و تفکیک لایه های آن پرداخت.

۲-۱ مبانی نظری

اصول انتشار امواج لرزه ای به خواص کشسانی سنگها و مواد تشکیل دهنده لایه های زمین بستگی دارد. برای سادگی روابط و بیان مفاهیم، فرض می شود که زمین از لایه های کشسان ، همگن و همسانگرد تشکیل یافته است . منظور از لایه کشسان آن است که مواد متشکله آن در اثر وارد شدن نیرو به آنها تغییر شکل و اندازه می دهند ولی پس از

1- surface waves

2- in-situ dynamic modules

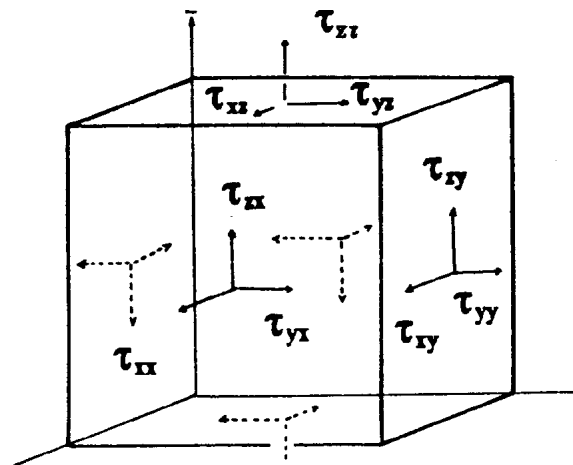
برداشتن اثر نیرو دوباره بحالت اولیه بازگشت پیدا می کنند.

۲-۱-۱ تنش و تنجیدگی^۲

در مسائل مربوط به فیزیک زمین، مسئله اساسی رابطه بین نیروها و تغییرات حاصل از آنهاست که معمولاً "به صورت تغییر شکل یا تغییر اندازه خود نمایی می کند". چنین نیروهایی معمولاً بر سطحها وارد می شوند و بر حسب تعریف برآیند نیروهای وارد بر واحد سطح (F)، وقتی سطح (S) به صفر میل می کند، تنش (τ) و تغییر شکل یا تغییر اندازه جسم در اثر وارد شدن تنش، تنجیدگی نامیده می شود.

$$\tau = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{F}{S}$$

تنجش ممکن است عمودی (تراکمی یا کششی)، مماسی و یا ترکیبی از آنها باشد (شکل ۱-۲). تنجش مماسی را تنجش برشی نیز می نامند.



شکل ۱-۲ مؤلفه های تنش وارد بر یک مکعب بینهایت کوچک

تنجیدگی ممکن است به صورت تغییر طول واحد طول ($\frac{\Delta l}{l}$)، تغییر حجم واحد حجم ($\frac{\Delta V}{V}$) و یا تغییر زاویه ($\Delta\theta$) ظاهر شود. دو تنجیدگی اول ممکن است در اثر تنش تراکمی یا کششی به وجود آیند، در حالی که تغییر زاویه در اثر تنجش برشی ایجاد می شود. تنش یا تنجیدگی که نه عمودی و نه برشی است قابل تجزیه به مؤلفه های عمودی و برشی می باشد.

۲-۱-۲ ثابتهای کشسانی^۳

1- stress

2- strain

3- elastic constants

خواص کشسانی اجسام را می توان با یک سری شاخصهایی به نام ثابتهای کشسانی نشان داد. این ثابتها در رابطه های مختلفی که بین انواع تنش و تنجیدگی وجود دارد وارد می شوند. این ثابتها برای مواد مختلف متفاوتند. در حالت های ساده که مواد را کشسان، همگن و همسانگرد فرض کنیم، روابط بین تنش و تنجیدگی ساده بوده و ضرایب این رابطه ها را ثابت کشسانی نامند. چند نمونه از این ثابتها عبارتند از:

۱-۲-۱-۲ مدول یانگ^۱. نسبت تنش طولی به تنجیدگی طولی را مدول یانگ (E) گویند که بیانگر مقاومت در مقابل تغییر طول است یعنی:

$$E = (F/S) / (\Delta l/l)$$

واحد این ضریب از نوع فشار است.

۲-۲-۱-۲ نسبت پواسون^۲. اگر در مورد فوق قطر جسم (d) نیز به اندازه Δd تغییر کند نسبت:

$$\sigma = (\Delta d/d) / (\Delta l/l)$$

را نسبت پواسون می نامند.

۳-۲-۱-۲ ضریب تراکم ناپذیری^۳. اگر تنش عمودی به شکل فشار هیدروستاتیکی سبب تغییر حجم شود، ضریب تناسب را تراکم ناپذیری یا مدول بالک^۴ نامند که بیانگر مقاومت در مقابل تغییر حجم است یعنی:

$$K = (F/S) / (\Delta V/V)$$

واحد این مدول از نوع فشار است.

1- Young's modulus

2- Poisson's ratio

3- Incompressibility

4- Bulk modulus

۴-۲-۱-۲ مدول برشی^۱. اگر تغییر شکل در اثر نیروی برشی بر سطح پدیدار شود (تنجش برشی)، تغییر زاویه بوجود می‌آید که منجر به تغییر شکل بدون تغییر حجم می‌شود. در این صورت ضریب مربوطه به نام مدول برشی یا مدول سختی^۲ نامیده می‌شود که بیانگر مقاومت در مقابل تغییر شکل (تغییر زاویه) است و بنابراین:

$$\mu = (F/S) / (\Delta\theta)$$

این ضریب برای مایعات برابر صفر است، یعنی مایعات در مقابل تنجش برشی مقاومتی ندارند. قانون هوک که بیانگر رابطه‌ای خطی بین تنجش و تنجیدگی می‌باشد در حالت کلی پیچیده است ولی در شرایط ساده (زمین همگن و همسانگرد) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\text{تنجش تراکمی} = \lambda \frac{\Delta V}{V} + 2\mu \frac{\Delta l}{l}$$

$$\text{تنجش برشی} = \mu \Delta\theta$$

ضرایب λ و μ ضرایب لامه^۳ می‌نامند.

با اندازه‌گیری سرعت موجهای دریافتی از داخل زمین می‌توان به خصوصیات کشسانی لایه‌ها پی برد. این ضرایب با هم نیز روابطی دارند که مهمترین آنها عبارتند از (تلفورد و دیگران^۴، ۱۹۸۴):

$$K = \frac{E}{3(1-2\delta)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\delta)}$$

$$E = \frac{9K\mu}{3K + \mu}, \quad \delta = \frac{3K - 2\mu}{6K + 2\mu}$$

از معادله آخر نتیجه می‌شود که نسبت پواسون برای مایعات برابر ۰/۵ است، لذا گستره این نسبت عبارت است از:

$$0/5 > \delta > 0$$

۳-۱-۲ موجهای لرزه‌ای

1- shear modulus

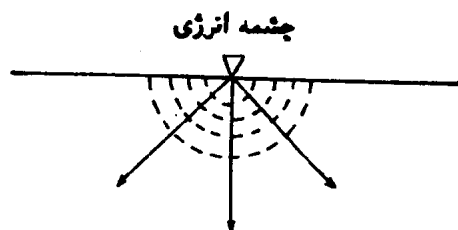
2- rigidity

3- Lamme's coefficients

4- Telford et. al.

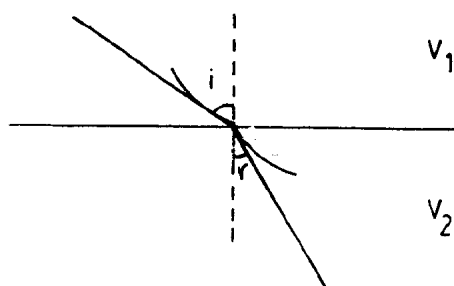
موج لرزه‌ای عبارت است از انتشار انرژی چشمه لرزه‌ای (مانند زمینلرزه، انفجار و یا وارد آوردن ضربه بر محیط با استفاده از پتک یا سقوط وزنه). چشمه‌های انرژی لرزه‌ای به طور معمول یک تب^۱ کوتاه مدت تولید می‌کنند که شامل گستره وسیعی از فرکانسها است (از یک هرتز تا چند صد هرتز).

در یک محیط همگن و همسانگرد، انتشار انرژی لرزه‌ای به صورت قشرهای کروی به مرکز چشمه لرزه‌ای (S) صورت می‌گیرد. مسیر انتشار انرژی در امتداد پرتوهای شعاعی به مرکز چشمه انرژی است. بنابراین می‌توان گفت که انرژی لرزه‌ای از چشمه در تمام جهات منتشر می‌شود.



شکل ۱-۲ انتشار انرژی لرزه‌ای در محیط همگن و همسانگرد

هنگام برخورد انرژی لرزه‌ای به سطح مشترک دو محیط انتشار انرژی از محیط اول با سرعت انتشار v_1 ، به محیط دوم با سرعت انتشار v_2 ، طبق قانون اسنل^۲ صورت می‌گیرد (شکل ۲-۲).

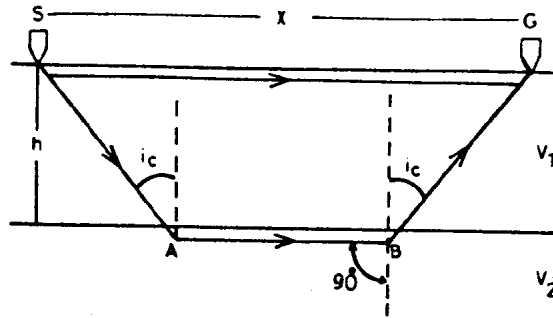


$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

شکل ۲-۲ عبور انرژی لرزه‌ای از سطح مشترک دو محیط و قانون اسنل

در صورتی که $v_1 < v_2$ باشد، تحت زاویه خاص i_c (زاویه بحرانی)، پرتو در محیط دوم به موازات سطح مشترک منتشر خواهد شد ($r = 90$). بنابراین انرژی لرزه‌ای در لایه دوم (لایه با سرعت انتشار بالاتر v_2) به صورت شکسته و در مرز دو لایه منتشر می‌شود (شکل ۳-۲).

$$\text{از قانون اسنل داریم: } \sin i_c = \frac{v_1}{v_2} \text{ یا } i_c = \sin^{-1} \frac{v_1}{v_2}$$



شکل ۳-۲ مسیر انتشار موجهای لرزه‌ای تحت

زاویه بحرانی i_c در یک سطح مشترک افقی

آشفتگیهای ناشی از انتشار موجهای شکست مرزی به صورت موجهایی در لایه اول ظاهر می‌شوند که تحت زاویه i_c به طرف سطح زمین انتشار می‌یابند (شکل ۳-۲).

بر اساس مطالب بالا می‌توان گفت که موج لرزه‌ای برای یک سطح مشترک افقی، فاصله چشمه (S) تا گیرنده (G) را در حالت شکست مرزی در مسیر SABG طی می‌کند (شکل ۳-۲) و زمان سیر آن عبارت است از:

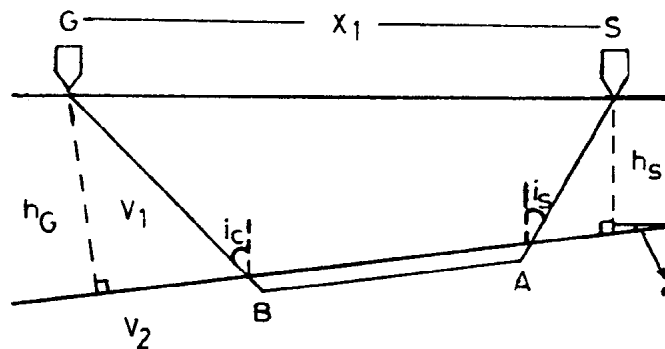
$$t = \frac{x}{v_2} + 2h \frac{\cos i_c}{v_1}$$

که در آن x فاصله گیرنده از چشمه (GS) و h عمق سطح مشترک می‌باشد.

در صورتی که سطح مشترک افقی نباشد، بسته به آنکه انتشار انرژی در جهت فروشیب (SABG) یا فراشیب (GBAS) صورت گیرد، زمان سیر توسط یکی از دو رابطه زیر داده می‌شود (شکل ۴-۲).

$$td = \frac{x}{v_1} \sin(i_c + \alpha) + \frac{2h_s}{v_1} \cos(i_c) : \text{SABG در جهت فروشیب}$$

که در آن td زمان سیر فروشیب، h_s عمق سطح مشترک در محل چشمه (S) و α زاویه شیب لایه می‌باشد.



شکل ۴-۲ مسیر انتشار موجهای لرزه‌ای تحت زاویه بحرانی θ_c در یک سطح مشترک شیبدار

$$tu = \frac{x}{v_1} \sin(i_c - \theta) + \frac{2h_G}{v_1} \cos(i_c)$$

که در آن tu زمان سیر فراشیب h_G عمق سطح مشترک در محل چشمه (G) می باشد.

۱-۳-۱-۲ سرعت انتشار موجهای لرزه‌ای در سنگها

انتشار انرژی لرزه‌ای در سنگها براساس خاصیت کشسانی آنها صورت می‌گیرد. به طور کلی موجهای لرزه‌ای را می‌توان براساس محیط انتشار آنها به دو گروه پیکری و سطحی تقسیم کرد. موجهای پیکری که با توجه به مسیر انتشار خود اطلاعاتی پیرامون درون جسم به همراه دارند، شامل دو گروه موجهای اولیه (P) و ثانویه (S) می‌باشد. سرعت انتشار این دو موج با استفاده از ضرایب کشسانی لانه (μ) و (λ) به ترتیب از رابطه‌های زیر به دست می‌آید.

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + (4/3)\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\sigma) E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)\rho}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$$

که در آن v_p سرعت موج P ، v_s سرعت موج S و ρ چگالی سنگ می‌باشد. با توجه به مثبت بودن مقادیر λ ، μ ، ρ می‌توان نتیجه گرفت که در هر سنگ $v_p > v_s$ و با توجه به اینکه برای مایعات $\mu = 0$ می‌باشد، موج S در مایعات منتشر نمی‌شود. اگرچه نمی‌توان ضوابط خاصی را در مورد اثر پدیده‌های فیزیکی مختلف بر سرعت انتشار این موجها بیان کرد، ولی در حالت کلی می‌توان اظهار داشت که:

- سرعت موج در سنگهای هوازده کمتر از سنگهای سالم است.
- سرعت موج در سنگهای رسوبی کمتر از سنگهای آذرین است.
- سرعت موج در سنگهای متراکم بیش از سنگهای غیرمتراکم است.
- سرعت موج در سنگهای رسوبی با سن و عمق افزایش می‌یابد.

جدول ۱-۲ گستره سرعت انتشار موج P در مواد مختلف

سرعت (متر بر ثانیه)	مواد
۲۰۰ - ۳۰۰	خاک
۶۰۰ - ۱۸۵۰	شن
۱۴۸۰	آب
۲۰۰ - ۳۰۰	گل، سنگ هوازده
	<u>رسوبات متراکم</u>
۲۱۰۰ - ۴۲۰۰	گچ
۱۱۰۰ - ۲۵۰۰	رس
۲۵۰۰ - ۶۹۰۰	دولومیت
۲۰۰۰ - ۳۵۰۰	ژیپس
۳۵۰۰ - ۵۵۰۰	آنیدریت
۳۴۰۰ - ۷۰۰۰	سنگ آهک
۲۰۰۰ - ۴۵۰۰	ماسه سنگ
	<u>سنگهای آذرین</u>
۵۸۰۰ - ۶۶۰۰	دیاباز
۴۸۰۰ - ۶۰۰۰	گرانیت

۲-۳-۱-۲ نمودارهای زمان - فاصله

در بخشهای گذشته مسیر انتشار موجهای لرزه‌ای به صورت شکست مرزی در مدل‌های دو لایه با سطح مشترک افقی (شکل ۲-۳) و شیبدار (شکل ۲-۴) مورد بررسی قرار گرفت و طی آن زمان سیر موج شکست مرزی در مدل دو لایه با سطح مشترک افقی به صورت:

$$t = \frac{x}{v_2} + 2h \frac{\cos i_c}{v_1}$$

در مدل دو لایه با سطح مشترک شیبدار با انتشار در جهت فروشیب به صورت:

$$td = \frac{x}{v_1} \sin(i_c + \alpha) + \frac{2h_s}{v_1} \cos i_c$$

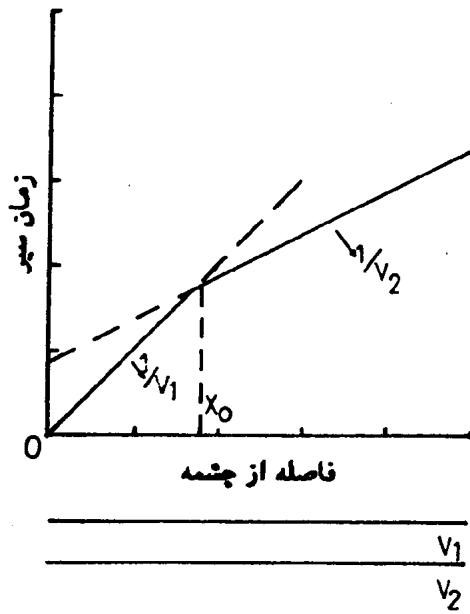
در مدل دو لایه با سطح مشترک شیبدار و انتشار در جهت فراشیب به صورت زیر داده شد:

$$tu = \frac{x}{v_1} \sin(i_c - \alpha) + \frac{2h_g}{v_1} \cos i_c$$

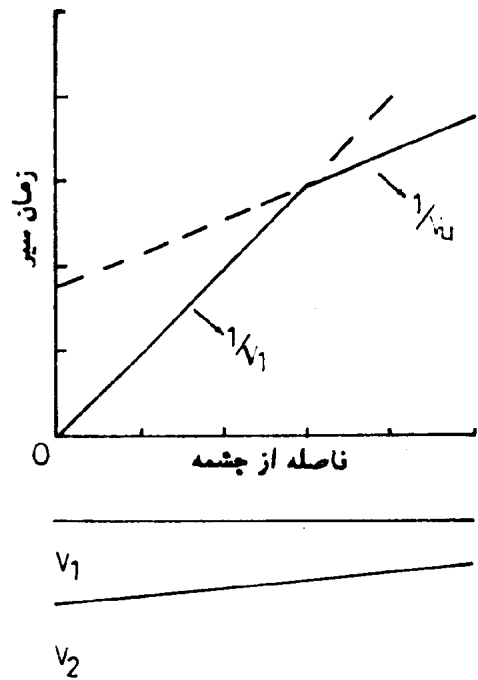
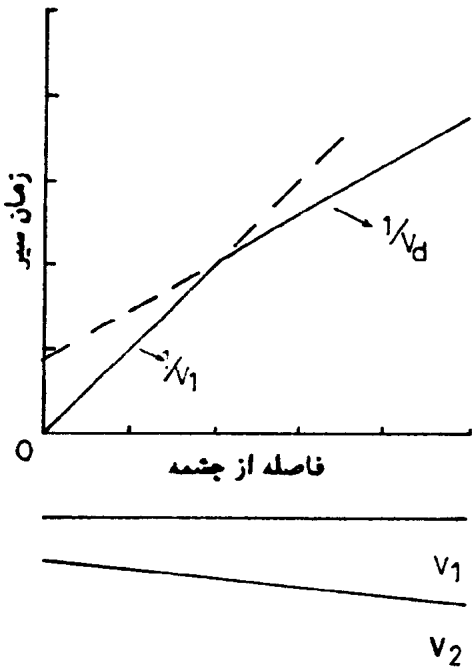
در هر سه مدل بالا موج برای رسیدن به گیرنده G از محل چشمه S مسیر مستقیمی را در لایه اول در راستای خط برداشت اختیار می‌کند که زمان سیر آن عبارت است از:

$$t_x = \frac{x}{v_1}$$

زمانهای سیر یاد شده در بالا را می‌توان به صورت نمودارهای زمان - فاصله که در آن محور افقی نشان‌دهنده فاصله گیرنده از چشمه در امتداد سطح زمین (x) و محور قائم نشان‌دهنده زمان سیر موج باشد نشان داد. این نمودارها اغلب نمودارهای x-t نیز خوانده می‌شوند. شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ به ترتیب نمودارهای زمان - فاصله برای مدل‌های دو لایه با سطح مشترک افقی و شیبدار را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۵ نمودار زمان - فاصله برای مدل دو لایه با سطح مشترک افقی



شکل ۲-۶ نمودار زمان - فاصله برای مدل دو لایه با سطح مشترک شیبدار

با توجه به شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ می‌توان چنین نتیجه گرفت که:

نمودار زمان - فاصله موج مستقیم به صورت خط مستقیمی است با شیب $1/v_1$ که از مبداء $(t = 0, x = 0)$ می‌گذرد.

نمودار زمان - فاصله موج شکست مرزی برای سطح مشترک افقی خط مستقیمی است با شیب $1/v_2$ که از مبداء نمی‌گذرد.

نمودار زمان - فاصله موج شکست مرزی برای سطح مشترک شیبدار خط مستقیمی است با شیب $V_d = \frac{\sin(i_c + \alpha)}{v_1}$ در مسیر فروشیب و $V_u = \frac{\sin(i_c - \alpha)}{v_1}$ در مسیر فراشیب که از مبداء نمی‌گذرند. بنابراین نمودار زمان - فاصله در جهت فراشیب سرعت ظاهری بیشتری (شیب نمودار کمتری) را نشان می‌دهد.

به علت کوتاه‌تر بودن مسیر موج مستقیم در فاصله‌های کوتاه x ، زمان سیر موج مستقیم کمتر از موج شکست مرزی خواهد بود ولی با افزایش x ، چون موج شکست مرزی مسیر طولانی‌تری را در لایه دوم (با سرعت بیشتر v_2) طی می‌کند، بنابراین زمان سیر کوتاه‌تری خواهد داشت.

در فاصله همگذری x_0 (محل تلاقی نمودارهای زمان - فاصله موج مستقیم و شکست مرزی) هر دو موج همزمان به محل گیرنده می‌رسند.

در فاصله‌های کوتاه‌تر از فاصله همگذری (x_0) موج شکست مرزی اولین موج دریافتی نیست.

۲-۲ اندازه‌گیریهای صحرائی

اندازه‌گیری زمان سیر موجهای لرزه‌ای در امتداد خطهای برداشتی صورت می‌گیرد که آرایش آنها براساس هدف مطالعه تعیین می‌شود. پارامترهایی که در این اندازه‌گیریها در نظر گرفته می‌شوند عبارتند از:

۱-۲-۲ راستای خط برداشت

خطهای برداشت معمولاً به صورت مستقیم می‌باشند و نشان‌دهنده امتدادی هستند که اندازه‌گیریها بر روی آنها صورت می‌گیرد. راستای خط برداشت باید به گونه‌ای انتخاب شود تا:

- در حد امکان بر روی نقشه موقعیت به صورت یک خط مستقیم باشد.
- راستای آن عمود بر امتداد لایه‌بندی و یا بی‌هنجاریهای موردنظر باشد.
- تغییرات عوارض زمین در آن راستا تا حد امکان یکنواخت باشد.

۲-۲-۲ طول خط برداشت و عمق مطالعه

به طور کلی طول خط برداشت (فاصله آخرین گیرنده از چشمه) و عمق مطالعه رابطه‌ای مستقیم دارند. چون

اندازه‌گیریهای زمان سیر موجهای لرزه‌ای معمولاً براساس زمان ورود اولین موج صورت می‌گیرد، بنابراین طول خط برداشت باید به گونه‌ای انتخاب شود تا اطلاعات کافی در مورد آن قسمت از نمودار زمان - فاصله که مربوط به لایه مورد نظر است در اختیار قرار گیرد. ضوابط چنین انتخابی را می‌توان به راحتی در مورد مدل دو لایه‌ای با سطح مشترک افقی که در آن هدف مطالعه دو لایه است به صورت زیر به دست آورد.

در فاصله کمتر از فاصله همگذری x_0 (شکل ۲-۵) موج شکست مرزی به عنوان اولین موج دریافت نمی‌شود، بنابراین طول خط برداشت باید بیش از x_0 باشد. برای محاسبه x_0 کافی است زمان سیر موجهای مستقیم و شکست مرزی در این مدل برابر گرفته شود:

$$t = t_x$$

$$x_0 = 2h \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}}$$

$$x_0 = 2h \sqrt{\frac{1 + v_1/v_2}{1 - v_1/v_2}}$$

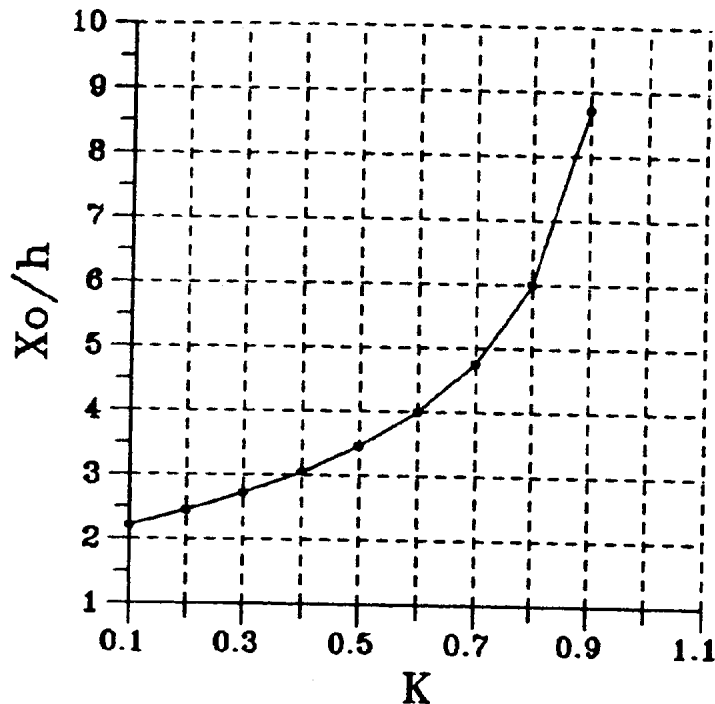
$$x_0 = 2h \sqrt{\frac{1+k}{1-k}}, \quad k = v_1/v_2$$

بنابراین در یک مدل دو لایه با سطح مشترک افقی که نسبت سرعت موج در لایه اول به دوم برابر k است، فاصله همگذری از رابطه بالا به دست می‌آید. با توجه به اینکه شرط ایجاد موج شکست مرزی $v_2 > v_1$ می‌باشد، همواره $k < 1$ خواهد بود (معمولاً مقدار ضریب k بین ۰/۴ تا ۰/۶ متغیر است). جدول ۲-۲ فاصله همگذری (x_0) را برای نسبتهای مختلف سرعت موجهای لرزه‌ای (k) و عمقهای مختلف سطح مشترک (h) در یک مدل دو لایه با سطح مشترک افقی نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲: فاصله همگذری x_0 بر حسب نسبت‌های مختلف سرعت موجهای لرزه‌ای (k) و عمقهای مختلف سطح مشترک (h) در یک مدل دو لایه با سطح مشترک افقی

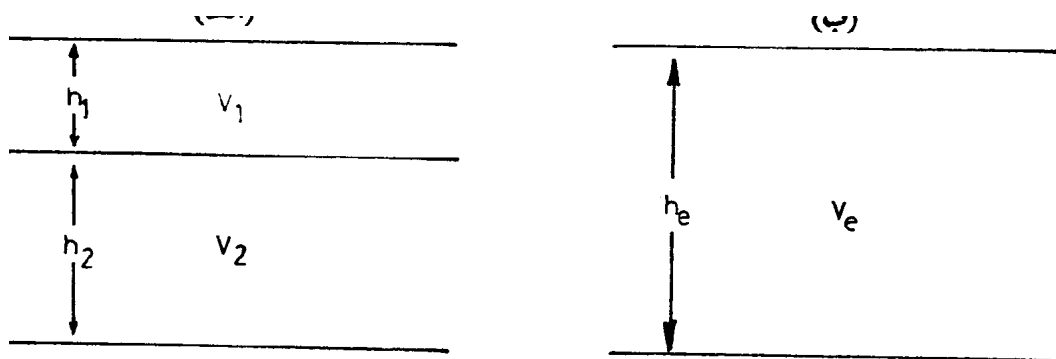
فاصله همگذری $x_0(m)$	عمق سطح مشترک $h(m)$	نسبت سرعت $k= v_1/v_2$
75	25	0.4
155	50	
305	100	
610	200	
915	300	
80	25	0.45
166	50	
325	100	
650	200	
975	300	
85	25	0.5
175	50	
345	100	
690	200	
1040	300	
95	25	0.55
185	50	
370	100	
740	200	
1115	300	
100	25	0.3
200	50	
400	100	
800	200	
1200	300	

شکل ۷-۲ نمودار تغییرات $\frac{x_0}{h}$ را برای نسبت‌های مختلف سرعت لایه اول به دوم (k) نشان می‌دهد. با مراجعه به این نمودار می‌توان به راحتی حداقل طول خط برداشت مورد نیاز برای یک نسبت سرعت خاص را به دست آورد. به طور مثال برای نسبت $k = 0.6$ داریم $\frac{x_0}{h} = 4$ بنابراین در این شرایط، موج شکست مرزی در فاصله کمتر از $4h$ مشاهده نخواهد شد.



شکل ۷-۲ نمودار $\frac{x_0}{h}$ بر حسب نسبت‌های مختلف سرعت در لایه اول به سرعت در لایه دوم (k)

مطالب گفته شده در مورد حداقل فاصله مورد نیاز از چشمه لرزه‌ای برای مشاهده موج شکست مرزی به عنوان اولین موج دریافتی را می‌توان به همین ترتیب به مدل‌های دارای بیش از دو لایه افقی نیز تعمیم داد. برای این منظور، به طور مثال در مورد مدل سه لایه‌ای شکل ۸-۲ الف، کافی است تا دو لایه اول را با یک لایه معادل با ضخامت h_e و سرعت V_e (شکل ۸-۲ ب) جایگزین کنیم.



شکل ۸-۲ الف) مدل سه لایه با مرز مشترک افقی، ب) مدل دو لایه معادل V_3

در مدل معادل (شکل ۲-۸-ب) ضخامت (h_e) و سرعت در لایه اول (v_e) عبارتند از:

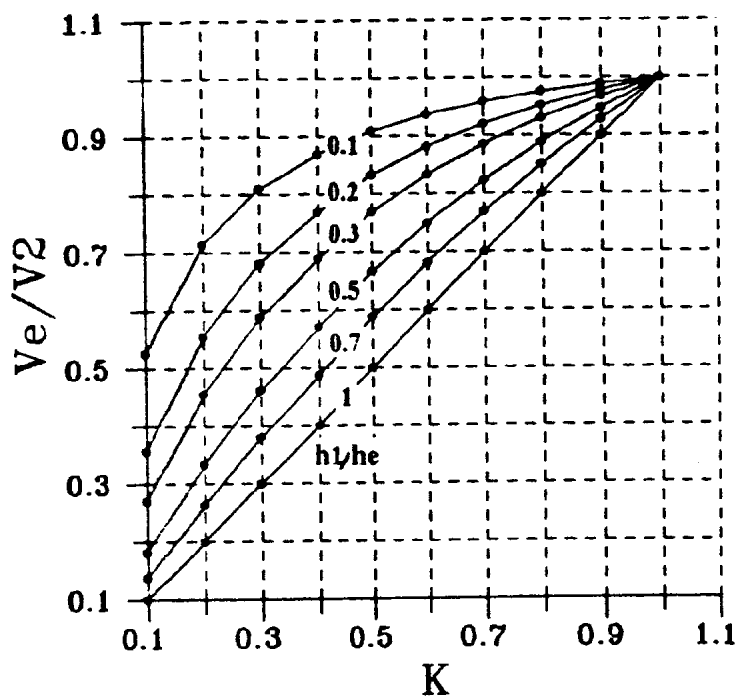
$$h_e = h_1 + h_2$$

$$\frac{h_e}{v_e} = \frac{h_1}{v_1} + \frac{h_2}{v_2} \implies v_e = \frac{h_e}{\frac{h_1}{v_1} + \frac{h_2}{v_2}} = \frac{h_e}{\frac{h_1}{v_1} + \frac{h_e - h_1}{v_2}}$$

بنابراین نسبت سرعت لایه معادل به سرعت لایه دوم عبارت خواهد بود از:

$$\frac{v_e}{v_2} = \frac{1}{1 + \frac{h_1}{h_e} \left(\frac{1-k}{k} \right)}$$

شکل ۲-۹ نمودار نسبت $\frac{v_e}{v_2}$ بر حسب k را برای نسبت‌های مختلف $\frac{h_1}{h_e}$ نشان می‌دهد. با مراجعه به این نمودار می‌توان نسبت $\frac{v_e}{v_2}$ برای مدل سه لایه‌ای مورد نظر را به دست آورد و سپس با مراجعه به نمودار شکل ۲-۷ حداقل فاصله لازم از چشمه لرزه‌ای برای دریافت موج شکست مرزی را می‌توان محاسبه کرد. حداقل فاصله برای مدل‌های بیش از سه لایه را نیز می‌توان به همین ترتیب به دست آورد.

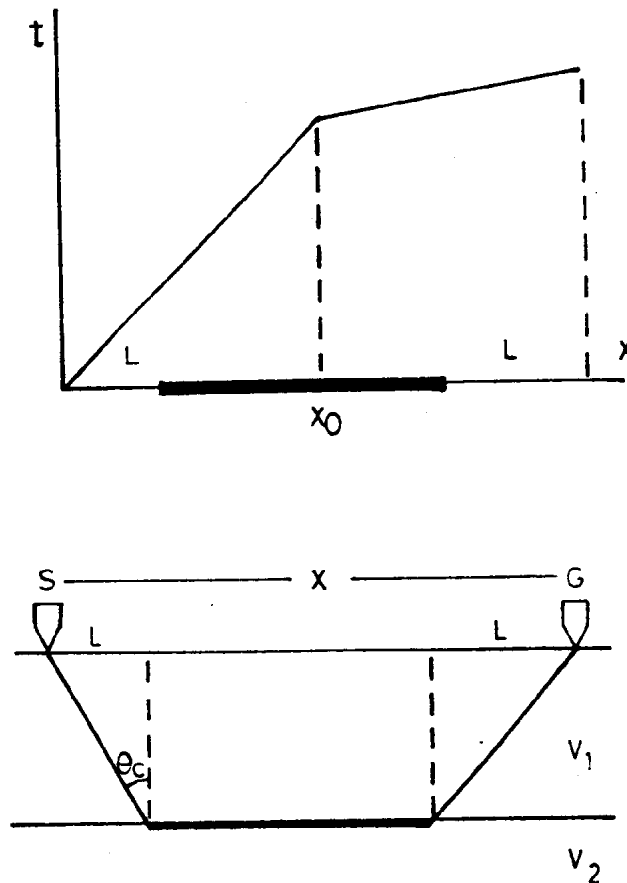


شکل ۲-۹ نمودار نسبت $\frac{v_e}{v_2}$ بر حسب k برای نسبت‌های مختلف $\frac{h_1}{h_e}$ مدل شکل ۲-۸ ب

برای مدل‌هایی با لایه‌های شیب‌دار قابل ذکر است که با توجه به اینکه سرعت ظاهری در جهت فراشیبی بیش از سرعت ظاهری در جهت فروشیبی می‌باشد، بنابراین فاصله همگذری در جهت فراشیبی بیش از فاصله همگذری در جهت فروشیبی خواهد بود.

۳-۲-۲ فاصله پوشش

با توجه به هندسه مسیر موج شکست مرزی در مدل دو لایه افقی (شکل ۱۰-۲) چنین برمی‌آید که علیرغم گسترش خط برداشت تا فاصله x از سرچشمه انرژی، تنها قسمتی از مرز مشترک لایه‌ها که طول آن کمتر از طول خط برداشت است توسط موجهای شکست مرزی پیموده خواهد شد و طول کل مسیر پیموده شده به میزان $2L$ کوتاهتر از طول خط برداشت می‌باشد. در این مدل L فاصله‌ای از چشمه است که در آن زاویه تابش برابر زاویه بحرانی θ_c می‌گردد. بنابراین شروع و انتهای این مسیر به اندازه L از آغاز و انتهای خط برداشت واقع خواهد شد. با توجه به هندسه مسیر موج، طول L به صورت زیر محاسبه می‌شود.



شکل ۱۰-۲ مدل دو لایه افقی و منحنی زمان - فاصله مربوط که نشان‌دهنده مسیر

تحت پوشش توسط این آرایش می‌باشد

$$\tan \theta_c = \frac{L}{h}$$

$$\sin \theta_c = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \tan \theta_c = \frac{\frac{v_1}{v_2}}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}}$$

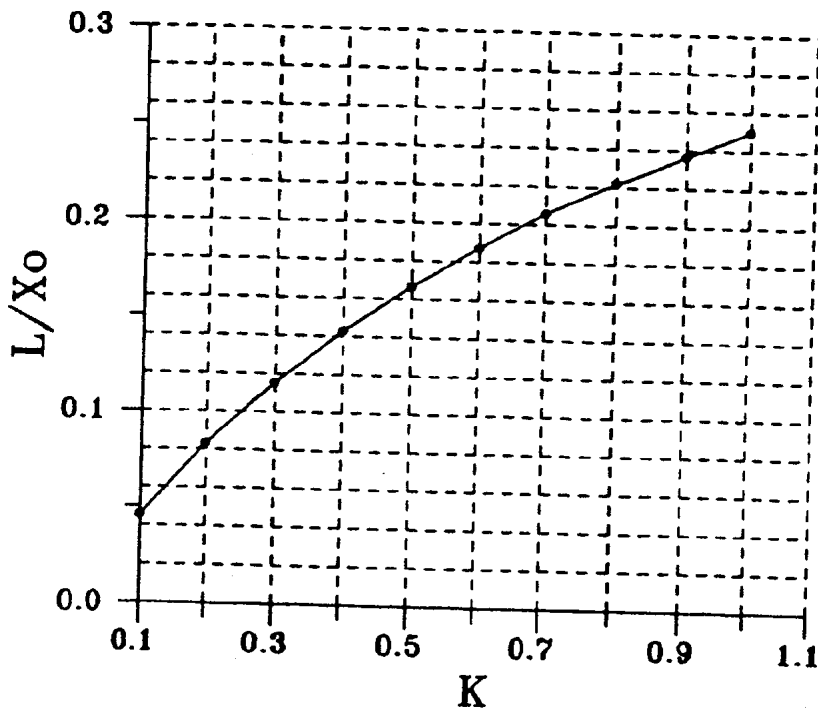
$$x_c = 2h\sqrt{\frac{1+k}{1-k}} ; k = \frac{v_1}{v_2}$$

$$L = \frac{x_c}{2} \times \frac{1}{\frac{1}{k} + 1}$$

$$L/x_0 = \frac{1}{2(1 + \frac{1}{k})}$$

شکل ۱۱-۲ نمودار نسبت L/x_0 را برای نسبت‌های مختلف سرعت در لایه اول به سرعت در لایه دوم (k) نشان می‌دهد. با مراجعه به این نمودار مشاهده می‌شود که به طور مثال:

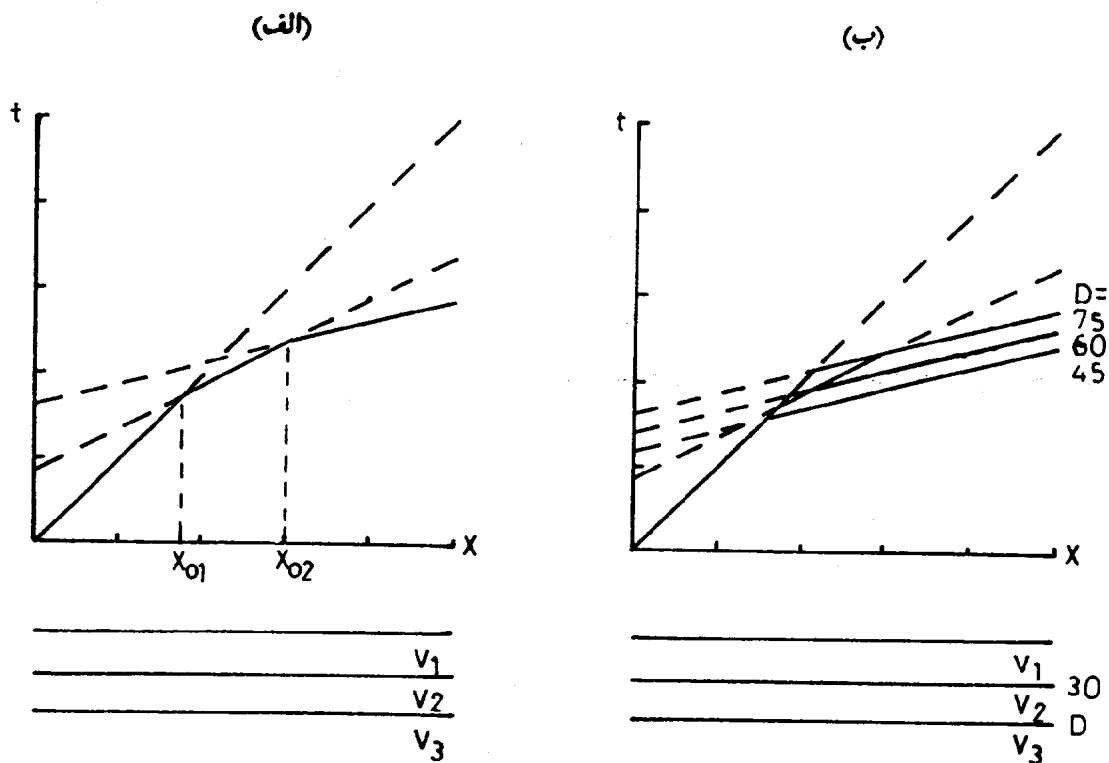
$$k = \frac{v_1}{v_2} = 0.5 \quad \text{و} \quad L = \frac{x_0}{6}$$



شکل ۱۱-۲ نمودار $\frac{L}{x_0}$ بر حسب نسبت سرعت لایه اول به دوم ($k = \frac{v_1}{v_2}$)

براساس مطالب بخشهای گذشته در مورد مسیر موجهای شکست مرزی در مدل‌هایی با لایه‌بندی افقی و شیبدار، در یک جمع‌بندی می‌توان گفت که :

- فاصله چشمه از اولین گیرنده (x_1) تعیین‌کننده اولین موج دریافتی خواهد بود. در فاصله‌های کمتر از فاصله همگذری ($x_1 < x_0$) اولین موج دریافتی از نوع شکست مرزی خواهد بود. بنابراین در صورتی که بررسی سرعت موج در لایه اول در نظر نباشد، می‌توان با انتخاب x_1 بیش از x_0 تنها به مطالعه موجهای شکست مرزی از مرز مشترک لایه‌ها پرداخت.
- فاصله سرچشمه تا آخرین گیرنده که طول خط برداشت را مشخص می‌کند، تعیین‌کننده فاصله پوشش و همچنین عمق مطالعه خواهد بود. بدیهی است که طول خط برداشت باید بیش از فاصله همگذری مربوط به سطح مشترک لایه‌های آخر و ماقبل آخر در عمق موردنظر باشد (برای مثال، بیش از x_{02} در مدل سه لایه شکل ۲-۱۲-الف).
- فاصله نقاط برداشت (دو گیرنده متوالی) تعیین‌کننده تعداد نقاطی خواهد بود که از هر قطعه نمودار زمان - فاصله حاصل خواهد شد. به این ترتیب با انتخاب فاصله کم بین دو گیرنده متوالی می‌توان تعداد نقاط تشکیل دهنده هر قسمت نمودار زمان - فاصله را افزایش داده مقدار این افزایش را امکانات تجهیزاتی و اقتصادی طرح تعیین خواهد کرد. با توجه به اینکه در فاصله کمتر از فاصله همگذری اول (x_{01}) نمودار زمان - فاصله مربوط به لایه سطح بین فاصله همگذری اول تا دوم ($x_{02} > x > x_{01}$) نمودار زمان - فاصله مربوط به مرز مشترک لایه سطحی و لایه دوم بین فاصله همگذری دوم تا سوم ($x_{03} > x > x_{02}$) نمودار زمان - فاصله مربوط به سطح مشترک لایه دوم و سوم، و غیره به دست می‌آید، بنابراین با توجه به اینکه با کاهش ضخامت هر لایه طول قطعه نمودار زمان - فاصله مربوط به آن لایه کاهش پیدا خواهد کرد (شکل ۲-۱۲-ب)، بنابراین فاصله کوچکتری بین نقاط برداشت برای تمیز دادن لایه نازکتر مورد نیاز خواهد بود. البته باید در نظر داشت که چنانچه لایه مورد بحث بیش از اندازه نازک باشد، موجهای شکست مرزی مربوط به آن بدون توجه به فاصله بین گیرنده‌ها هیچگاه به عنوان اولین موج دریافت نخواهد شد (شکل ۲-۱۲-ب برای $D = 45 \text{ m}$).



شکل ۲-۱۲ نمودارهای زمان فاصله برای مدل سه لایه افقی (الف) و بر حسب عمق (D) لایه سوم (ب)

۵-۲-۲ انتخاب محل چشمه‌ها

محل چشمه‌ها در حالت کلی بستگی به روش انتخابی برای محاسبه مشخصات لایه مورد نظر خواهد داشت. در زیر به گروهی از متداول‌ترین روشها اشاره خواهد شد.

۱-۵-۲-۲ روش خط برداشت یک‌طرفه

در صورتی که براساس اطلاعات حفاری، زمین‌شناسی و یا مطالعات ژئوفیزیکی قبلی افقی بودن لایه‌ها محرز باشد، در این صورت با توجه به اینکه شیب خط‌های نمودار زمان - فاصله، سرعت حقیقی لایه را در اختیار قرار خواهد داد (شکل ۲-۵)، بنابراین با قراردادن چشمه تنها در یک طرف خط برداشت (آرایش یک‌طرفه) می‌توان به اطلاعات مورد نیاز لایه‌ها دست یافت.

۲-۵-۲-۲ روش خط برداشت دو‌طرفه

در صورت حضور لایه‌های شیب‌دار، با توجه به اینکه نمودارهای زمان - فاصله تنها سرعت ظاهری لایه‌ها را در

اختیار قرار خواهند داد (شکل ۲-۶)، بنابراین لازم است تا با قراردادن چشمه یکبار در یک طرف و بار دیگر در طرف دیگر خط برداشت اقدام به اندازه‌گیری سرعت در دو جهت فراشیب و فروشیب نمود تا به کمک اطلاعات به دست آمده بتوان پارامترهای لایه‌ها را محاسبه کرد.

لازم به تذکر است که معمولاً توصیه می‌شود که تحت همه شرایط از خط‌های برداشت دو طرفه استفاده شود تا در صورت به دست آوردن سرعت فروشیب و فراشیب یکسان، عدم شیب لایه‌ها محرز گردد.

۳-۲ روشهای تفسیر

انتخاب روش تفسیر داده‌های صحرائی معمولاً به هدف بررسی، اطلاع از شرایط زمین‌شناسی موجود و تجربه مفسر بستگی دارد. در مواردی که لایه‌ها تخت، افقی و یا شیبدار هستند استفاده از منحنی‌های زمان - فاصله به منظور محاسبه سرعت موج در لایه‌ها و ضخامت لایه‌ها کاملاً متداول است ولی معمولاً در شرایط بیابانی حضور عوارض زمین‌شناختی، مسیلهای قدیمی پر شده و همچنین سنگ کف ناهموار می‌تواند کاربرد روشهای کلاسیک را محدود سازد. روشهای بسیاری برای شرایط مختلف زمین‌شناختی مطرح شده است که هر یک در شرایط خاص می‌توانند باعث افزایش دقت محاسبات شوند. از آن جمله می‌توان به روشهای زیر اشاره کرد:

- روشهای مبتنی بر رسم نمودارهای جبهه موج که در آنها می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج رسم شده از محل چشمه و جبهه موجهایی که از محل گیرنده‌ها رسم می‌شوند ضخامت لایه و سرعت انتشار موج در آن را حساب کرد. کاربرد و چگونگی این روش‌ها به طور مشروح توسط افراد مختلف مورد بحث قرار گرفته است (Thornburgh, 1930; Hagedoorn, 1959; Rockwell, 1967; Schenck, 1967).

- روش تحلیلی هاگیوارا برای مدل‌های دو لایه که در آن می‌توان ضخامت لایه اول را در محل چشمه و گیرنده‌ها محاسبه کرد (Hagiwara, 1983).

- روش زمان تأخیر که برای محاسبه عمق سطح مشترک لایه‌ها با استفاده از نمودارهای زمان - فاصله مناسب می‌باشد (Gardner, 1939).

- روش ترسیمی که برای محاسبه سرعت موج در لایه‌ها و عمق سطح مشترک به کار می‌رود (Hales, 1958).

- روش به علاوه - منها که براساس روش جبهه موج در بازسازی سطح مشترک لایه‌ها به کار می‌رود (Hagedoorn, 1959).

- روش دو جانبه که برای محاسبه سطح مشترک ناهموار با استفاده از زمان تأخیر کاربرد دارد (Hawkins, 1961).

- روش دو جانبه تعمیم‌یافته که ترکیبی است از روش دو جانبه و روش زمان تأخیر و برای سطح مشترک ناهموار و شیبدار با حداکثر شیب ۲۰ درجه بسیار مناسب می‌باشد (Palmer, 1980).

همان‌طور که در بالا گفته شد، تأکید می‌شود که برای کاربرد این روشها قانون و دستورالعمل مشخصی وجود ندارد و تنها اطلاع از شرایط زمین‌شناسی منطقه و تجربه مفسر می‌تواند رهنمونی برای انتخاب هر کدام از این روشها در یک مورد خاص باشد.

۴-۲ تجهیزات صحرائی

علاوه بر لوازم مورد نیاز معمول برای انجام عملیات صحرائی، تجهیزات ویژه‌ای که برای انجام عملیات لرزه‌ای مورد نیاز است عبارتند از:

- چشمه‌های انرژی
 - گیرنده‌ها
 - دستگاههای نگاشت بردار
 - کابل‌های صحرائی
- که در زیر ویژگیهای هر یک مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱-۴-۲ چشمه‌های لرزه‌ای

در حال حاضر در ایران سه نوع چشمه انرژی در مطالعات لرزه‌ای مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان آنها را از نظر نحوه ایجاد انرژی لرزه‌ای به دو گروه تقسیم کرد:

چشمه‌های انفجاری: مانند دینامیت.

چشمه‌های ضربه‌ای: مانند چکش دستی و چکشهای مکانیکی.

چشمه‌های انفجاری یکی از اولین چشمه‌های مورد استفاده در عملیات لرزه‌ای به حساب می‌آیند. این نوع چشمه‌ها معمولاً سیگنالی با دامنه‌ای مطلوب، بسته به میزان خرج به کاررفته، ایجاد می‌کنند. چشمه‌های ضربه‌ای از طریق وارد آوردن ضربه به سطح زمین باعث ایجاد موجهای لرزه‌ای می‌شوند. امروزه چکش دستی به عنوان یکی از متداولترین نوع چشمه‌های لرزه‌ای در مطالعات مهندسی و چکشهای مکانیکی به عنوان چشمه‌های مؤثر برای مطالعات عمیق‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

انتخاب نوع چشمه معمولاً براساس هدف پروژه، عمق مطالعه، امکانات موجود و غیره صورت می‌گیرد. در هر حال به هنگام انتخاب چشمه لرزه‌ای مناسب، باید به عوامل زیر توجه داشت:

- میزان انرژی
- نوع موجک

- قابلیت تکرار
- قابلیت حمل و نقل
- اثر زیست محیطی
- سهولت کاربرد

۲-۴-۱-۱ میزان انرژی

میزان انرژی مورد نیاز برای انجام عملیات لرزه‌ای بستگی به طول خط برداشت دارد. بدیهی است که هر چه طول خط برداشت بلندتر باشد، میزان انرژی مورد نیاز بیشتر خواهد بود. برد تقریبی چشمه‌های لرزه‌ای (دینامیت، چکش دستی و چکشهای مکانیکی) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

دینامیت	۳۰۰ تا بیش از ۱۰۰۰ متر
چکشهای مکانیکی	حدود ۲۰۰ متر
چکش دستی	کمتر از ۱۰۰ متر

البته همانطور که گفته شد، ارقام بالا تقریبی هستند و برد واقعی این چشمه‌ها بستگی به عوامل مختلفی چون سطح نوفه در منطقه، حساسیت دستگاههای نگاشت‌بردار، جنس لایه‌ها و میزان انرژی به کارگرفته شده دارد.

در مورد دینامیت، میزان خرج به کارگرفته شده نقش بسیار مهمی در تعیین برد آن دارد. معمولاً استفاده از چندین گرم دینامیت قادر است فاصله‌ای حدود ۱۰۰ متر، و استفاده کمتر از یک کیلوگرم دینامیت قادر است فاصله‌ای بیش از ۵۰۰ متر را تحت پوشش قرار دهد. عامل بسیار مهم دیگر در تعیین برد چشمه‌های انفجاری چگونگی کارگذاری آنها است، به طوری که با کارگذاری صحیح چشمه‌های انفجاری می‌توان با میزان خرج کمتر، برد بیشتری را به دست آورد. چشمه‌های انفجاری معمولاً در سطح زمین و یا در داخل چاهکهایی که به این منظور حفر شده، کار گذاشته می‌شوند. کارگذاری در سطح زمین معمولاً زمانی صورت می‌گیرد که به علت نبود امکانات، تهیه چاهکهای انفجاری مقدور نباشد. در این شرایط برای آنکه بتوان حداکثر انرژی را به داخل زمین منتقل کرد، لازم است چاله‌هایی به عمق ۵/۰ تا ۱ متر با دست حفر شود و پس از قراردادن مواد منفجره در آنها، برای اطمینان از جفت‌شدگی چشمه به زمین، چاله با خاک پرو تحکیم شود. در صورت استفاده از چاهکهای انفجاری، که معمولاً تا عمق بیشتری حفر می‌شوند، پرکردن بخشی از چاهک، پس از قراردادن چشمه انفجاری در آن، و عمل تحکیم در انتقال انرژی بسیار مفید خواهد بود.

در چکشهای مکانیکی از نوع تخلیه هوا شدت ضربه بستگی به میزان خلاء ایجاد شده در آنها دارد. به هنگام استفاده از این چشمه‌ها لازم است تا با مراجعه به کتاب راهنمای مربوط، در مورد میزان خلاء مورد نیاز تصمیم‌گیری شود.

برای چکشهای دستی، وزن چکش یکی از عوامل تعیین‌کننده میزان انرژی است. استفاده از چکش‌های ۳ کیلوگرمی در اکثر موارد کافی است ولی استفاده از چکش‌های ۶ یا ۱۲ کیلوگرمی در برخی موارد برای ایجاد انرژی بیشتر ترجیح داده می‌شود. باید توجه داشت که استفاده از چکش‌های سنگین‌تر به بهای پایین‌آمدن احتمالی راندمان بر اثر خستگی کارگران تمام خواهد شد.

۲-۴-۱-۲ نوع موجک

موجک عبارت است از یک تپ لرزه‌ای که برای مدت زمانی کوتاه ادامه داشته باشد. چشمه‌های لرزه‌ای نوع موجک نشان‌دهنده نحوه ایجاد آشفتگی وارد بر زمین، با زمان می‌باشد. با توجه به اینکه در اکثر روش‌های تفسیر داده‌های لرزه‌ای شکست‌مرزی، زمان ورود اولین موج مورد استفاده قرار می‌گیرد، بدیهی است که هرچه این زمان مشخص‌تر باشد دقت تفسیر و نتایج آن بیشتر خواهد بود. در یک چشمه لرزه‌ای ایده‌آل، کل انرژی در یک لحظه تخلیه می‌شود و در نتیجه موجک حاصل از این چشمه به صورت یک ضربه خواهد بود. البته چشمه‌های فیزیکی در عمل قادر به انجام این کار نیستند و در نتیجه کل انرژی را در یک مدت زمان محدود تخلیه می‌کنند. بنابراین برای آنکه این چشمه‌ها به حالت ایده‌آل نزدیک‌تر باشند، لازم است تا تخلیه انرژی نه به صورت تدریجی بلکه به صورت ناگهانی صورت پذیرد. در عمل این امر به صورت واردآمدن ضربه سریع و مستقیم در چشمه‌های ضربه‌ای خواهد بود. به هنگام استفاده از این‌گونه چشمه‌ها، مثلاً چکش دستی، بهتر است که چکش با یک ضربه سریع و عمود بر سطح موردنظر وارد شود.

۲-۴-۱-۳ قابلیت تکرار

از آنجا که در عملیات لرزه‌ای شکست‌مرزی اغلب برای بالابردن کیفیت داده‌های ثبت شده به تکرار یک آرایش خاص نیاز است، بنابراین قابلیت تکرار چشمه انرژی، یعنی ایجاد همان موجک قبلی، شرطی اساسی خواهد بود. بدیهی است که در مورد چشمه‌های انفجاری معمولاً به خاطر غیرقابل استفاده بودن مجدد چاله‌ها یا چاهک‌های انفجاری و یا به علت تغییرات به وجود آمده در آنها، قابلیت تکرار این نوع چشمه‌ها محدود است. ولی از طرفی به خاطر میزان انرژی بیشتر این چشمه‌ها، معمولاً نیاز کمتری به تکرار است.

قابلیت تکرار چشمه‌های ضربه‌ای، بخصوص چکش دستی، بستگی زیادی به شخص واردکننده ضربه دارد. این چشمه‌ها به طور کلی در صورت واردآمدن ضربه‌های یکنواخت از قابلیت تکرار بسیار خوبی برخوردارند.

۴-۱-۴-۲ قابلیت حمل و نقل

قابلیت حمل و نقل چشمه‌های لرزه‌ای تأثیر به‌سزایی در کارآیی عملیات صحرایی خواهد داشت. چشمه‌های انفجاری به لحاظ امکانات خاصی که برای حمل و نقل و انبارکردن نیاز دارند از قابلیت حمل و نقل بسیار پایینی برخوردار هستند. ولی از آنجاکه کارگذاری آنها در محل‌هایی که استفاده از سایر چشمه‌ها به دشواری امکان‌پذیر است مقدور می‌باشد، بر سایر چشمه‌ها برتری دارند.

چکشهای مکانیکی معمولاً باید همراه یک وسیله نقلیه یدک کشیده شوند. بنابراین استفاده از آنها در محل‌هایی که قابل دسترسی توسط وسایل نقلیه نیست مقدور نمی‌باشد. چکش دستی کماکان به عنوان یکی از قابل حمل و نقل‌ترین چشمه‌های انرژی لرزه‌ای مهندسی شناخته می‌شود. از این‌رو امروزه در اکثر مطالعات لرزه‌ای و تقریباً همیشه در فاصله‌های کوتاه چشمه - گیرنده از این چشمه لرزه‌ای استفاده می‌شود.

۵-۱-۴-۲ اثر زیست محیطی

اثر زیست محیطی یک چشمه لرزه‌ای خاص یکی از عوامل تعیین‌کننده کاربرد آن چشمه در مطالعات مهندسی می‌باشد. در مورد چشمه‌های لرزه‌ای شاید تنها چشمه‌های انفجاری از نظر زیست محیطی قابل تامل باشند، به همین لحاظ امروزه کاربرد این‌گونه چشمه‌ها در عملیات صحرایی محدود شده است.

۶-۱-۴-۲ سهولت کاربرد

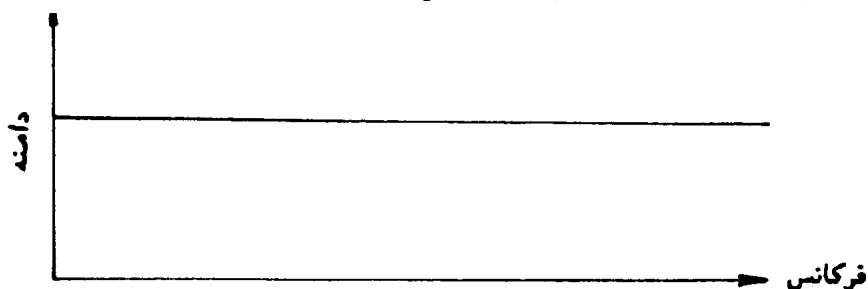
با توجه به شرایط دشوار عملیات صحرایی و اکثراً نیاز به استفاده از افراد محلی برای انجام عملیات صحرایی، لازم است ابزار و تجهیزات صحرایی از نظر نحوه استفاده تا حد امکان ساده باشند. چشمه‌های انفجاری و مکانیکی معمولاً به کاربرانی متخصص و با تجربه نیاز دارند. چکش دستی به عنوان یک چشمه لرزه‌ای که نیاز چندانی به تجربه و تخصص برای استفاده ندارد شناخته شده است.

۲-۴-۲ گیرنده‌های لرزه‌ای

نقش گیرنده‌های لرزه‌ای در عملیات صحرایی تبدیل لرزشهای زمین به جریان الکتریکی متناسب با آن و قابل دریافت توسط دستگاههای نگاشت‌بردار است. یک گیرنده ایده‌آل ویژگیهای زیر را دارا می‌باشد:

- جفت‌شدگی کامل به محیط به گونه‌ای که مانند جزیی از آن عمل کند.

- قدرت تبدیل خطی انرژی مکانیکی به الکتریکی (متناسب بودن جریان با میزان حرکت محیط).
- کوتاه‌ترین و مطمئن‌ترین طریق ممکن برای ارتباط با دستگاه نگاشت بردار (برای کاهش نوفه خط انتقال).
- پاسخ فرکانسی تخت در باند صفر تا بی‌نهایت (شکل ۱۴).

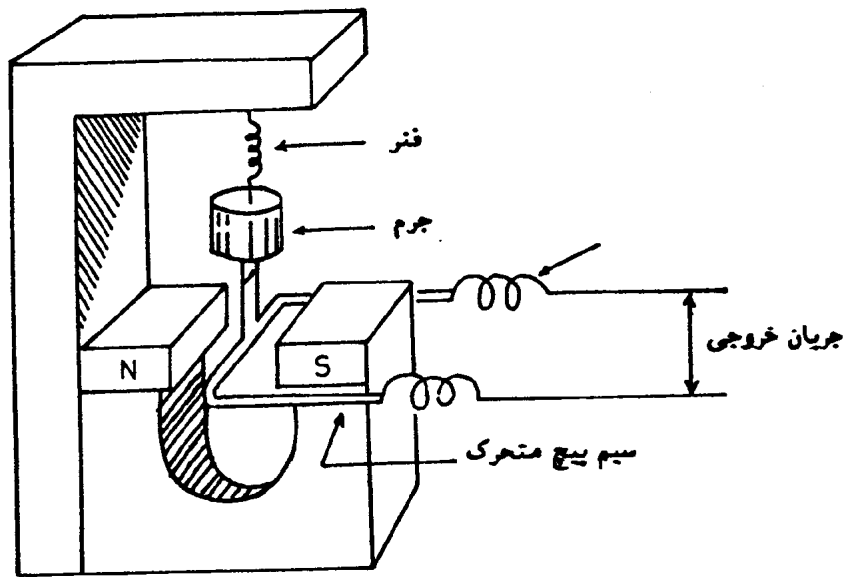


شکل ۳-۱۴ پاسخ دامنه یک گیرنده ایده‌آل

برای ثبت موجهای لرزه‌ای، بسته به محیط، معمولاً از ژئوفون (برای دریافت موجهای در خشکی) و یا هیدروفون (برای دریافت موجها در آب) استفاده می‌شود.

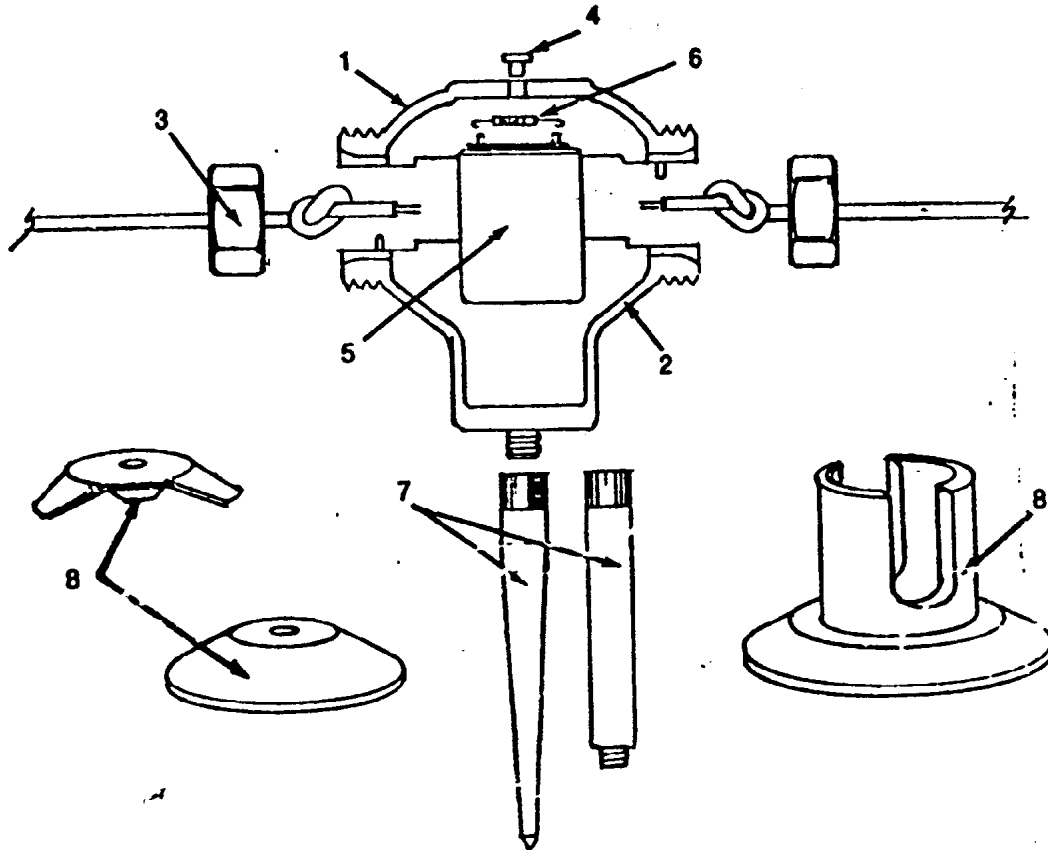
ژئوفون به عنوان گیرنده موجهای لرزه‌ای در خشکی به کار می‌رود. ژئوفونها امروزه از نوع الکترومغناطیسی می‌باشند و از این جهت قسمتهای اصلی آنها شامل یک سیم پیچ و یک آهنربا است (شکل ۲-۱۵). برای ثبت موجهای لرزه‌ای باید یکی از این دو قسمت به نحوی، کاملاً به زمین جفت شود تا با رسیدن موجهای لرزه‌ای همراه با زمین به حرکت درآید.

قسمت دیگر باید توسط فنری از محفظه ژئوفون آویزان باشد تا به هنگام حرکت زمین به خاطر لختی^۱ خود ثابت بماند. در نتیجه حرکت نسبی این دو قسمت بر اثر موجهای لرزه‌ای باعث القای جریانی می‌شود که اختلاف پتانسیل حاصل از آن با سرعت جابجایی زمین متناسب خواهد بود.



شکل ۲-۱۵ نمایشی از ساختمان درونی یک ژئوفون

شکل ۲-۱۶ قسمتهای مختلف یک ژئوفون را نشان می‌دهد. در این شکل قسمت اصلی گیرنده (شماره ۵) در یک محفظه ضدآب (شماره‌های ۱ و ۲) قرار داده شده است. بهره‌گیری از پایه‌های مختلف برای جفت شدن به محیط (شماره‌های ۷ و ۸)، امکان استفاده از ژئوفون را در شرایط مختلف فراهم می‌سازد.



شکل ۱۶-۲ قسمتهای تشکیل دهنده یک ژئوفون

مشخصه‌های مهم یک ژئوفون که به هنگام انتخاب ژئوفون مناسب برای انجام عملیات صحرائی باید در نظر گرفته شود عبارتند از:

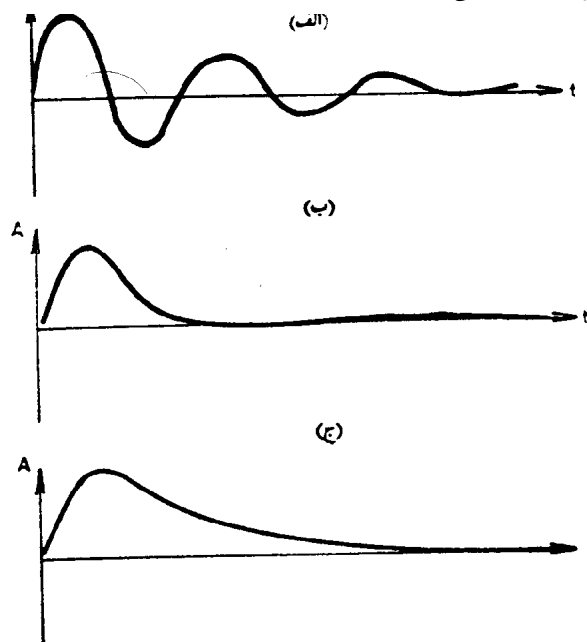
۱-۲-۴-۲ میرایی

اگر زمین ناگهان بالا یا پایین برود و در همان وضعیت ثابت بماند، و محفظه ژئوفون و آهنربای درون آن به خاطر

جفت‌شدگی کامل با زمین این حرکت را کاملاً دنبال کنند، سیم پیچ داخل محفظه به جرم m که توسط یک فنر با ضریب سختی k از آن آویزان است، مانند یک سیستم ارتعاشی شروع به نوسان می‌کند. فرکانس طبیعی f_0 این سیستم ارتعاشی عبارت خواهد بود از:

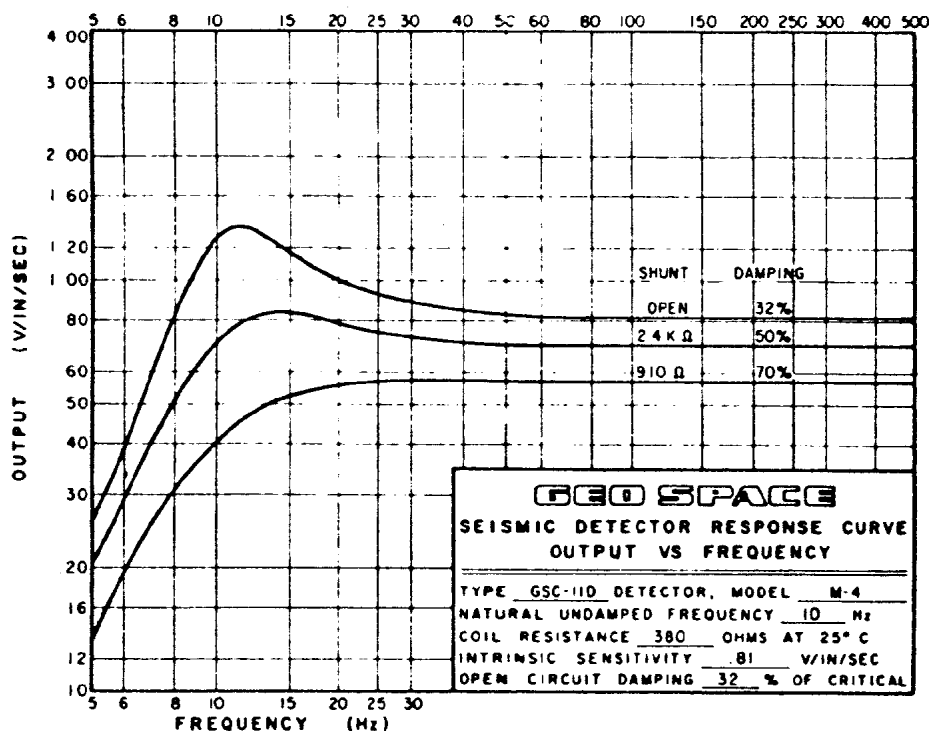
$$f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

بر اثر حرکت سیم پیچ در میدان مغناطیسی آهنربا، جریانی در سیم پیچ القاء خواهد شد که در واقع پاسخ ژئوفون به حرکت اعمال شده به آن می‌باشد. حرکت نوسانی سیم پیچ در محفظه به خاطر انرژی که صرف جابجا کردن هوای درون محفظه ژئوفون می‌کند به تدریج میرا خواهد شد. سازندگان ژئوفون برای آنکه ژئوفون بتواند حرکت زمین را به صورت واقعی، نه به صورت نوسانی، شبیه‌سازی کند، مغزه‌های سیم پیچ را طوری طراحی می‌کنند تا جریان القاء شده در سیم پیچ جریان مخالفی را در مغزه القاء کند که باعث میرایی مطلوب حرکت آن شود. برای کنترل میزان میرایی، یک مقاومت شانت^۱ (شکل ۲-۱۶ قسمت ۶) در دو سر مغزه ژئوفون قرار داده می‌شود. بدیهی است که کاهش میزان مقاومت شانت باعث کاهش تعداد نوسانهای سیم پیچ به هنگام وارد آمدن یک ضربه خواهد شد. شکل ۲-۱۷ خروجی یک ژئوفون را تحت میرایی‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۷-الف شرایط فرو بحرانی را که در آن میرایی لازم برای جلوگیری از حرکت نوسانی ایجاد نشده است، شکل ۲-۱۷-ب شرایطی را که در آن بر اثر وارد آمدن یک ضربه، سیم پیچ تنها یک حرکت بدون نوسان انجام می‌دهد (میرایی بحرانی) و شکل ۲-۱۷-ج شرایط فرا بحرانی را که در آن میرایی بیش از اندازه وجود دارد و باعث می‌شود تا حرکت بازگشتی وزنه به کندی صورت گیرد را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۷ خروجی یک ژئوفون تحت میرایی‌های مختلف

میرایی یک ژئوفون معمولاً به صورت درصدی از میرایی بحرانی آن بیان می‌شود (شکل ۲-۱۷). میرایی ۷۰٪ اکثراً به عنوان میرایی مطلوب در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۱۷ پاسخ فرکانسی یک ژئوفون با میرایی‌های مختلف

۲-۲-۴-۲ پاسخ فرکانسی

نمودار میزان خروجی یک ژئوفون برای فرکانسهای مختلف پاسخ فرکانسی ژئوفون خوانده می‌شود (شکل ۲-۱۷). همان‌طور که گفته شد، برای یک ژئوفون ایده‌آل خروجی برای تمام فرکانسها یکسان است (شکل ۲-۱۴). در عمل، ژئوفونها تنها برای فرکانسهای بیش از فرکانس طبیعی خود چنین ویژگی را نشان می‌دهند (شکل ۲-۱۷)، به همین خاطر فرکانس طبیعی ژئوفون مشخص‌کننده فرکانسی است که بیش از آن پاسخ فرکانسی ژئوفون تخت خواهد بود. شکل ۲-۱۷ پاسخ فرکانسی یک ژئوفون ۱۰ هرتز را نشان می‌دهد. درصد میرایی ژئوفون (مقاومت شانت) باید به گونه‌ای انتخاب شود تا در این باند فرکانسی پاسخ ژئوفون در حد امکان تخت باشد (مقاومت شانت ۹۱ اهم با درصد میرایی ۷۰ درصد برای ژئوفون ۱۰ هرتز شکل ۲-۱۷).

۳-۲-۴-۲ حساسیت

حساسیت یک ژئوفون نشان‌دهنده میزان ولتاژ خروجی آن ناشی از لرزاندن ژئوفون با یک سرعت مشخص می‌باشد. این کمیت معمولاً توسط ضریب تبدیل و بر حسب جذر مقاومت سیم‌پیچ (R_C) بیان می‌گردد. بنابراین حساسیت ژئوفون را می‌توان برای هر مقاومت سیم‌پیچ محاسبه کرد. جدول ۳-۲ مشخصات فنی یک ژئوفون ۱۰۰ هرتز را نشان می‌دهد. برای این ژئوفون ضریب تبدیل ۰/۳۷٪ ولت بر اینچ بر ثانیه است. بنابراین در صورت استفاده از سیم‌پیچ با مقاومت ۲۳۰۰ اهم، حساسیت ژئوفون ۱/۸ ولت بر اینچ بر ثانیه یا ۰/۷۱ ولت بر سانتیمتر بر ثانیه خواهد بود.

باید توجه داشت که چون نوفه حاصل از میدانهای مغناطیسی متناسب با پایداری^۱ الکتریکی ژئوفون و حساسیت ژئوفون متناسب با $\sqrt{R_C}$ است، بنابراین معمولاً بهتر است از ژئوفونهایی با مقاومت سیم‌پیچ پایین‌تر استفاده شود.

جدول ۳-۲ مشخصات فنی یک نوع ژئوفون ۱۰۰ هرتز

100Hz \pm 5Hz	فرکانس طبیعی
600, 975, 1550, 2300 ohms	مقاومت سیم‌پیچ در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد
To 650Hz	باندگذر (باند عبوری)
1.80 V/in/sec (0.71 V/cm/sec)	حساسیت مولدی با سیم‌پیچ ۲۳۰۰ اهمی
0.037 RC	ضریب تبدیل (V/in/sec)
0.2 oz (6g)	جرم متحرک
0.04in (.10cm)	حالت متداول حرکت نسبی سیم‌پیچ P-P

- Gardner, L.W., 1939. An Areal Plan of mapping subsurface Structure by refraction shooting : Geophysics, V.4, P.247-259.
- Hagedoorn, J.G., 1959. The plus - minus method of interpreting seismic refraction sections: Geophysics, V.7, p.158-182.
- Hagiwara, T., 1983. Practical analysis for two - layer structure: Masuda H., Ed., Technical Note TN - 10, OYO corporation, Japan, P.9-1 to 9-6.
- Hawkins, L.V., 1961. The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations : Geophysics, V.26, p.806 - 819.
- Palmer, D., 1980. The generalized reciprocal methods of seismic refraction interpretation : SEG, Tulsa.
- Rockwell, D.W., 1967. A general wavefront method : seismic refraction prospecting, Musgrave A.W., Ed., SEG, Tulsa, p.363 - 415.
- Shenck, F.L., 1961. Refraction solutions and wavefront targeting : seismic refraction prospecting, Musgrave A.w., Ed., SEG, Tulsa, p.416 - 425.
- Thornburgh, H.R., 1930. Wavefront diagrams in seismic intergretation : AAPG, Bull., V.14, p.185 - 200.

فارسی - انگلیسی

reflected	بازتابیده
pulse	تپ
incompressibility	تراکم‌ناپذیری
stress	تنجش
strain	تنجیدگی
elastic constants	ثابتهای کشسانی
reflection method	روش بازتاب
refraction method	روش شکست مرزی
in - hole seismic methods	روشهای لرزه‌ای درون چاهی
rigidity	سختی
lamme's coefficients	ضرایب لامه
Snell's law	قانون اسنل
Bulk modulus	مدول بالک
shear modulus	مدول برشی
Young's modulus	مدول یانگ
in - situ dynamic modules	مدولهای دینامیکی درجا
elastic modules	مدولهای کشسانی
shunt	مقاومت شانت
surface waves	موجهای سطحی
elastic waves	موجهای کشسانی
poison's ratio	نسبت پواسون

انگلیسی - فارسی

Bulk modulus	مدول بالک
elastic constants	ثابتهای کشسانی
elastic modules	مدولهای کشسانی
elastic waves	موجهای کشسانی
incompressibility	تراکم ناپذیری
in - hole seismic methods	روشهای لرزه‌ای درون چاهی
in - situ dynamic modules	مدولهای دینامیکی درجا
lamme's coefficients	ضرایب لامه
poison's ratio	نسبت پواسون
pulse	تپ
reflected	بازتابیده
reflection method	روش بازتاب
refraction method	روش شکست مرزی
rigidity	سختی
shear modulus	مدول برشی
shunt	مقاومت شانت
strain	تنجیدگی
stress	تنجش
surface waves	موجهای سطحی
Young's modulus	مدول یانگ