

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه کشور

# مستندات و مبانی فنی دستورالعمل مطالعات ژئوفیزیکی در پروژه‌های راه‌سازی ضابطه شماره ۲-۷۰۲

وزارت راه و شهرسازی  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی  
پژوهشکده حمل و نقل  
[bhrc.ac.ir](http://bhrc.ac.ir)

معاونت فنی و توسعه امور زیربنایی  
امور نظام فنی و اجرایی  
[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

۱۳۹۶





## خواننده گرامی

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هر گونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را بصورت زیر گزارش فرمایید:

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را بصورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این امور، نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان دانشسرا، سازمان برنامه و بودجه کشور، امور  
نظام فنی و اجرایی - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱  
Email: [nezamfanni@mporg.ir](mailto:nezamfanni@mporg.ir)  
web: [nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)





## باسمه تعالی

### پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل تهیه طرح، اجرا، بهره‌برداری و نگهداری طرح‌های عمرانی به لحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، کیفیت طراحی و اجرا (عمرمفید) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. نظام فنی و اجرایی کشور به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری از طرح‌ها را مورد تأکید جدی قرار داده است.

بنا بر مفاد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه، سازمان برنامه و بودجه کشور، موظف به تهیه و ابلاغ ضوابط، مشخصات فنی، آیین‌نامه‌ها و استانداردهای اجرایی مورد نیاز طرح‌های عمرانی کشور می‌باشد. با توجه به تنوع و گستردگی طرح‌های عمرانی، طی سالهای اخیر سعی شده است در تهیه و تدوین این گونه مدارک علمی از مراکز تحقیقاتی و توان فنی دستگاه‌های اجرایی ذیربط استفاده شود. از این رو ضوابط فنی مربوط به مطالعات ژئوفیزیکی در پروژه‌های راه‌سازی در دو جلد با عنوان‌های " دستورالعمل مطالعات ژئوفیزیکی در پروژه‌های راه‌سازی (ضابطه شماره ۱-۷۰۲) " و " مستندات و میانی فنی دستورالعمل مطالعات ژئوفیزیکی در پروژه‌های راه‌سازی (ضابطه شماره ۲-۷۰۲) " با همکاری پژوهشکده حمل و نقل مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و بهره‌مندی از توان علمی و تخصصی جمعی از کارشناسان باتجربه کشور تهیه شده است.

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردیده، معهذ این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پربار شدن این آیین‌نامه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن ضابطه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق سایت اینترنتی معاونت برای بهره‌برداری عموم اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در سمت میانی بالای صفحات ضابطه، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در



صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ به روزرسانی آن نیز اصلاح خواهد شد. از این رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

بدینوسیله از تلاش و جدیت رئیس و کارشناسان امور نظام فنی و اجرایی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ناظرین و مجری محترم پروژه و همچنین از تمام عزیزان متخصص همکار در امر تهیه و نهایی کردن این ضابطه تشکر و قدردانی می‌شود و از ایزد منان توفیق روز افزون همه این بزرگواران را آرزومند است.

**غلامرضا شافعی**

**معاون فنی و توسعه امور زیربنایی**

**تابستان ۱۳۹۶**



# تهیه و کنترل "مستندات و مبانی فنی دستورالعمل مطالعات ژئوفیزیکی در پروژه‌های راه‌سازی" [ضابطه شماره ۲-۷۰۲]

## اعضای گروه مجری:

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	دکترای علوم زمین - ژئوفیزیک	ابراهیم حق شناس
پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی	دکترای زمین شناسی مهندسی	هادی گریوانی
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	دکترای زلزله شناسی مهندسی	محمد رضا قائم مقامیان
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	کارشناس ارشد اکتشاف معدن	سعید قاضی نژاد

## اعضای گروه نظارت:

مهندسین مشاور و خدمات زمین فیزیک	دکترای مهندسی ژئوفیزیک	جعفر کیمیاقلم
شرکت ساخت و توسعه زیربناهای حمل و نقل کشور	کارشناس ارشد زمین شناسی	مهرداد نیاسری فرد

## اعضای گروه ارزیاب:

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک	سید محمد منصورزاده
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای عمران سازه	کیومرث عماد

## اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه:

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناس ارشد عمران ژئوتکنیک	سید محمد منصورزاده
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای عمران سازه	کیومرث عماد
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای عمران راه و ترابری	محمد رضا سلیمانی کرمانی
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	دکترای عمران سازه‌های هیدرولیکی	امیر محبوب
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	کارشناس ارشد عمران سازه	زهرا گواشیری
سازمان برنامه و بودجه کشور	معاون امور نظام فنی و اجرایی	علیرضا توتونچی
سازمان برنامه و بودجه کشور	رئیس گروه امور نظام فنی و اجرایی	طاهر فتح‌اللهی
سازمان برنامه و بودجه کشور	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی	زینب سقایی







## فهرست مطالب

پیشگفتار

### فصل اول: مرور ادبیات فنی

- ۱-۱- مقدمه ۳
- ۱-۲- مروری کلی بر منابع علمی و فنی موجود ۳
- ۱-۳- دستورالعمل منتشره توسط اداره بزرگراه‌های ایالت متحده (FHWA): کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مسائل مرتبط با بزرگراهها ۵
- ۱-۴- گزارش مرکز تحقیقات حمل و نقل آکادمی ملی ایالات متحده: استفاده از روشهای ژئوفیزیک در پروژه‌های حمل و نقل ۱۲
- ۱-۵- راهنمای تهیه گزارشهای ژئوفیزیکی برای مطالعات زیست محیطی و زمین شناسی مهندسی- شورای ثبتی ( Board of Registration of) زمین شناسان و ژئوفیزیسیان در ایالت کالیفرنیا ۱۵
- ۱-۶-۱- نتایج حاصل از بررسی منابع علمی و فنی ۱۷
- ۱-۶-۱-۱- انواع روشهای ژئوفیزیکی متداول در صنعت راهسازی ۱۸
- ۱-۶-۱-۲- موارد کاربرد روشهای ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی ۱۸

### فصل دوم: وضعیت استفاده از ژئوفیزیک در پروژه های راهسازی کشور

- ۱-۲- مقدمه ۲۹
- ۲-۲- دستورالعمل ها و راهنماهای مهم کشور در خصوص مطالعات ژئوفیزیکی ۲۹
- ۱-۲-۲- ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات الکتریک با روش مقاومت ویژه ۲۹
- ۲-۲-۲- ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات لرزه‌نگاری با روش شکست مرزی ۳۰
- ۳-۲-۲- شرح خدمات مطالعات ژئوفیزیکی ۳۰
- ۳-۲- روش تعریف و انجام پروژه‌های ژئوفیزیکی در مطالعات راهسازی در کشور ۳۱
- ۴-۲- پرسشنامه ارزیابی وضعیت موجود در کشور ۳۵

### فصل سوم: تشریح روشهای ژئوفیزیکی متداول در راهسازی

- ۱-۳- مقدمه ۴۳
- ۲-۳- روش لرزه‌ای شکست مرزی ۴۳
- ۱-۲-۳- کاربردها ۴۳
- ۲-۲-۳- مفاهیم اولیه و تئوری حاکم بر روش ۴۳
- ۳-۲-۳- تجهیزات برداشت داده ها ۴۵
- ۴-۲-۳- طراحی برداشت داده‌ها و کنترل کیفیت داده‌ها ۴۵
- ۵-۲-۳- عمق و قدرت تفکیک مورد انتظار ۴۷
- ۶-۲-۳- پردازش داده ها ۴۸
- ۷-۲-۳- تفسیر داده‌ها ۴۹
- ۱-۷-۲-۳- ترسیمه های زمان-فاصله ۴۹



۵۰	۲-۷-۲-۳- روش زمان تقاطع
۵۱	۸-۲-۳- ارتباط نتایج روش لرزه‌ای شکست مرزی با دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی
۵۳	۳-۳- روش های ژئوفیزیکی لرزه ای گمانه‌ای
۵۴	۱-۳-۳- روش لرزه‌ای تک گمانه‌ای
۵۶	۲-۳-۳- روش لرزه‌ای بین گمانه ای
۵۸	۳-۳-۳- روش توموگرافی لرزه ای
۵۸	۱-۳-۳-۳- کلیات نظری توموگرافی لرزه ای
۵۹	۲-۳-۳-۳- برداشت داده ها
۶۰	۳-۳-۳-۳- پردازش داده ها
۶۱	۴-۳-۳-۳- مزایا و محدودیت ها
۶۱	۴-۳- روش مقاومت الکتریکی
۶۱	۱-۴-۳- کاربردها
۶۱	۲-۴-۳- مفاهیم پایه در روش مقاومت الکتریکی
۶۶	۳-۴-۳- تجهیزات مورد استفاده
۶۶	۴-۴-۳- برداشت و آماده سازی داده‌ها
۶۶	۱-۴-۴-۳- برداشت گمانه های الکتریکی الکتریکی
۶۸	۲-۴-۴-۳- پروفیل زنی افقی
۶۹	۵-۴-۳- تفسیر نتایج
۶۹	۱-۵-۴-۳- تفسیر نتایج سونداژ الکتریکی
۷۳	۲-۵-۴-۳- تفسیر نتایج پروفیل زنی الکتریکی
۷۵	۵-۳- روش رادار نفوذی
۷۵	۱-۵-۳- کاربردها
۷۶	۲-۵-۳- مفاهیم پایه در روش رادار نفوذی
۷۷	۳-۵-۳- تاثیر خصوصیات مواد و مصالح سازنده زمین بر نتایج روش GPR
۷۹	۴-۵-۳- تجهیزات برداشت داده‌ها در روش GPR
۸۰	۱-۴-۵-۳- سیستم آنتن‌ها در GPR
۸۲	۲-۴-۵-۳- تجهیزات جانبی و کمکی
۸۳	۵-۵-۳- طراحی برداشت داده‌ها
۸۳	۱-۵-۵-۳- کلیات برداشت داده ها در روش GPR
۸۸	۲-۵-۵-۳- برداشت داده های GPR در پیمایش های جاده ای
۹۱	۶-۵-۳- پردازش داده‌های GPR
۹۴	۷-۵-۳- تفسیر داده‌های GPR
۹۶	۸-۵-۳- محدودیت های روش GPR
۹۶	۶-۳- روشهای الکترومغناطیس
۹۶	۱-۶-۳- مقدمه
۹۷	۲-۶-۳- اصول و مبانی روش الکترومغناطیس
۹۸	۳-۶-۳- عمق نفوذ میدانهای الکترومغناطیس



۹۹	۳-۶-۴- روشهای اندازه گیری صحرائی الکترومغناطیس
۹۹	۳-۶-۴-۱- روش های اندازه گیری زاویه تیلت
۱۰۰	۳-۶-۴-۲- سیستمهای اندازه گیری فاز
۱۰۱	۳-۶-۵- مزایا و معایب
۱۰۱	۳-۷-۷- روشهای ژئوفیزیکی مبتنی بر تحلیل امواج سطحی
۱۰۱	۳-۷-۱- تحلیل طیفی امواج سطحی
۱۰۲	۳-۷-۱-۱- مفاهیم پایه
۱۰۳	۳-۷-۲- برداشتهای میدانی
۱۰۳	۳-۷-۳- استخراج منحنیهای پاشندگی
۱۰۵	۳-۷-۴- معکوس سازی منحنی پاشندگی
۱۰۵	۳-۷-۲- روش تحلیل چند کاناله امواج سطحی
۱۰۶	۳-۷-۱- برداشت داده
۱۰۷	۳-۷-۲- پردازش دادهها
۱۰۸	۳-۷-۳- تفسیر دادهها
۱۰۸	۳-۷-۳- روش شکست مرزی میکروترمر (ReMi)
۱۰۸	۳-۷-۱- مفاهیم پایه
۱۱۲	۳-۷-۲- تجهیزات و روش برداشت دادهها
۱۱۵	۳-۷-۴- تحلیل آرایهای نوفه‌های محیطی (Array Analysis of Ambient Noises)
۱۱۶	۳-۷-۴-۱- روش خود همبستگی مکانی (Spatial AutoCorrelation; SPAC)
۱۱۸	۳-۷-۴-۲- روش فرکانس- عدد موج (Frequency- wave number; F-K)
۱۱۸	۳-۷-۵- وارون سازی منحنی پراکندگی و برآورد پروفیل سرعت موج برشی
۱۲۰	۳-۸- روشهای نسبت طیفی استاندارد و نسبت طیفی مولفه افقی به قائم
۱۲۱	۳-۸-۱- روش نسبت طیفی استاندارد
۱۲۲	۳-۸-۲- روش نسبت طیفی مولفه افقی به قائم (H/V)
۱۲۶	۳-۹- روش گرانی سنجی
۱۲۶	۳-۹-۱- مقدمه
۱۲۷	۳-۹-۲- برداشت داده های گرانی سنجی
۱۲۸	۳-۹-۳- پردازش داده‌های گرانی سنجی
۱۲۸	۳-۹-۱- تصحیحات گرانی سنجی
۱۲۸	۳-۹-۲- فیلترها
۱۳۱	۳-۹-۴- تعبیر و تفسیر

#### فصل چهارم: مثالهایی از کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در پروژه های راهسازی

۱۳۵	۴-۱- مقدمه
۱۳۵	۴-۲- مثال اول: مطالعات ژئوفیزیکی در تونلهای بخش غربی کنارگذر شمالی کورک
۱۳۶	۴-۲-۱- توصیف محل و وضعیت زمین شناسی
۱۳۶	۴-۲-۲- تجهیزات مورد استفاده و برداشت داده ها



۱۳۹	۳-۲-۴- پردازش داده ها و تفسیر نتایج
۱۴۰	۴-۲-۴- نتایج
۱۴۳	۳-۴- مثال دوم: مطالعات ژئوفیزیکی برای شناسایی‌های زمین شناسی در پروژه بزرگراهی دهانه خلیج Ise (ژاپن)
۱۴۴	۱-۳-۴- وضعیت زمین‌شناسی و اهداف بررسیهای ژئوفیزیکی
۱۴۶	۲-۳-۴- توصیف روشهای ژئوفیزیکی بکار رفته و نتایج حاصله
۱۵۱	۴-۴- مثال سوم: شناسایی لایه‌های نازک رس با استفاده از روش القای الکترومغناطیس
۱۵۱	۱-۴-۴- مقدمه
۱۵۱	۲-۴-۴- مطالعه موردی شناسایی رسهای در بزرگراه Natchez Trace Parkway
۱۵۶	۵-۴- مثال چهارم: ارزیابی ضخامت و کیفیت روسازی راههای استان فارس با استفاده از GPR
۱۵۶	۱-۵-۴- برداشت داده ها
۱۵۶	۱-۱-۵-۴- خودروی برداشت داده ها
۱۵۶	۲-۱-۵-۴- تجهیزات مورد استفاده
۱۶۰	۳-۱-۵-۴- کالیبراسیون مسافت سنج
۱۶۱	۴-۱-۵-۴- پیش پردازش های قبل از برداشت
۱۶۴	۵-۱-۵-۴- آغاز برداشت داده ها
۱۶۴	۲-۵-۴- پردازش و تفسیر داده ها

### فصل پنجم: علامتها و مشخصه‌های نقشه‌ها و مقاطع ژئوفیزیکی

۱۷۳	۱-۵- مقدمه
۱۷۳	۲-۵- مشخصه‌های کلی نقشه‌های ژئوفیزیکی
۱۷۳	۱-۲-۵- نقشه موقعیت (Location Map)
۱۷۳	۲-۲-۵- مقطع های ژئوفیزیکی (Geophysical Sections)
۱۷۳	۳-۲-۵- نقشه‌ها و مقطع‌های پربندی داده های ژئوفیزیکی (Contour Map and Sections)
۱۷۴	۴-۲-۵- نمودارها (Diagrams)
۱۷۴	۵-۲-۵- راهنمای نقشه‌ها (legend)
۱۷۴	۱-۵-۲-۵- بخش بالایی
۱۷۴	۱-۵-۲-۵- بخش میانی
۱۷۴	۱-۵-۲-۵- بخش پایینی
۱۷۵	۳-۵- استاندارد علامتها و مشخصه های نقشه ها، مقطعه‌ها و نمودارهای الکتریک
۱۷۵	۱-۳-۵- نقشه موقعیت
۱۷۶	۲-۳-۵- نقشه هم مقاومت ویژه ظاهری
۱۷۷	۳-۳-۵- نقشه های هم عمق سنگ کف، هم ارتفاع سنگ کف و هم ضخامت رسوبات آبرفتی
۱۷۸	۴-۳-۵- نقشه هم مقاومت عرض (RT)
۱۷۹	۵-۳-۵- مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری
۱۸۰	۶-۳-۵- مقطع ژئوالکتریک
۱۸۰	۷-۳-۵- نمودارهای پروفیل زنی
۱۸۲	۸-۳-۵- مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری قطبی- قطبی و یا دوقطبی- دوقطبی



۱۸۲	۹-۳-۵- راهنمای نقشه ها
۱۸۵	۴-۵- استاندارد علامتها و مشخصه های نقشه ها، مقطعها و نمودارهای لرزه ای
۱۸۵	۱-۴-۵- نقشه موقعیت برداشت های سطحی
۱۸۶	۲-۴-۵- نقشه موقعیت برداشتهای درون گمانه ای
۱۸۶	۳-۴-۵- نگار سرعت لرزه ای
۱۸۷	۴-۴-۵- مقطع لرزه ای
۱۸۸	۵-۴-۵- راهنمای نقشه ها
۲۱۷	<b>منابع و مأخذ</b>



### فهرست اشکال

۱۳	میزان رضایتمندی کاربران از روشهای ژئوفیزیکی	شکل ۱-۱
۱۳	اطلاع از دستورالعمل FHWA و داشتن یک نسخه از این دستورالعمل	شکل ۲-۱
۱۴	میزان استفاده از روشهای ژئوفیزیکی و طول زمان استفاده از این روشها	شکل ۳-۱
۱۴	درصد استفاده از روشهای ژئوفیزیکی و درصد کاربردهای این روشها	شکل ۴-۱
۱۴	مزایای استفاده از روشهای ژئوفیزیکی و معایب و موانع استفاده از آنها	شکل ۵-۱
۳۳	میزان استفاده از روشهای ژئوفیزیکی مختلف	شکل ۱-۲
۳۳	میزان استفاده از هر یک از روشهای ژئوالکتریک	شکل ۲-۲
۳۳	میزان استفاده از هر یک از روشهای لرزه‌ای	شکل ۳-۲
۳۴	میزان استفاده از هر یک از روشهای گرانی سنجی	شکل ۴-۲
۳۴	نوع کاربرد روشهای مختلف ژئوفیزیکی در شرکتهای مورد تحقیق	شکل ۵-۲
۴۴	نمایی شماتیک از روشی شکست مرزی بر روی یک سطح جدایش دو لایه‌ای شیبدار، نشان‌دهنده سیستم لرزه‌نگاری و نقاط چشمه لرزه‌ای	شکل ۱-۳
۴۸	نمونه‌ای از منحنی‌های زمان مسافت در بررسی یک ترانشه آبگذر برای یک جاده با استفاده از یک لرزه‌نگار ۱۲ کاناله	شکل ۲-۳
۵۰	مثالی از یک ترسیمه زمان	شکل ۳-۳
۵۲	رابطه قابلیت شکافت‌پذیری و سرعت موج تراکمی برای بلدوزرهای با اندازه مختلف (۲۴۵D7) در گرانیت و کنگلومرا	شکل ۴-۳
۵۲	رابطه سرعت موج تراکمی و عدد آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) برای ۲۰ محل در جنوب غرب آمریکا	شکل ۵-۳
۵۲	رابطه سرعت موج تراکمی در عمق حدود ۳/۵ متری و میانگین اندازه ذرات D50 برای نهشته‌های خوب دانه‌بندی شده بستر رودخانه برای ۲۰ محل در جنوب غربی آمریکا	شکل ۶-۳
۵۲	رابطه سرعت موج تراکمی و مقدار RQD برای سه پروژه بزرگراهی و یک پروژه هتل در محدوده سنگهای گرانیتی در آریزونا	شکل ۷-۳
۵۳	رابطه بین سرعت موج تراکمی و مدول‌های یانگ و برشی در حالت کرنش کم	شکل ۸-۳
۵۴	شمای کلی از سه روش لرزه‌ای گمانه‌ای	شکل ۹-۳
۵۵	شمای کلی از دو نوع برداشت لرزه‌ای تک گمانه‌ای	شکل ۱۰-۳
۵۵	منحنی زمان حرکت براساس آزمایش چاه پایین در ناحیه خلیج سانفرانسیسکو	شکل ۱۱-۳
۵۶	آزمایش امواج لرزه‌ای عبوری	شکل ۱۲-۳
۵۷	شمای کلی مسیرهای مختلف عبور احتمالی امواج درآزمایش امواج لرزه‌ای بین چاهی	شکل ۱۳-۳
۵۹	نمایش شماتیک یک مقطع سلول بندی شده و مسیر شاخص برای پرتو از چشمه به گیرنده	شکل ۱۴-۳



۵۹	تصویر شماتیک فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و مسیر امواج در روش توموگرافی لرزه‌ای	شکل ۳-۱۵
۶۰	مقطع سرعت موج تراکمی به دست آمده به روش توموگرافی لرزه‌ای در گالری‌های جناح راست سد بختیاری	شکل ۳-۱۶
۶۲	نمای شماتیک از یک برداشت مقاومت سنجی	شکل ۳-۱۷
۶۴	نمای شماتیک برخی از آرایه‌های مورد استفاده در روش مقاومت الکتریکی	شکل ۳-۱۸
۶۵	آرایش روش پروفیل ترکیبی مقاومت ویژه ظاهری (C.R.P)	شکل ۳-۱۹
۶۵	روش پروفیل ترکیبی بر روی یک گسل مدفون	شکل ۳-۲۰
۷۰	منحنی استاندارد دولایه برای آرایه شلومبرژه	شکل ۳-۲۱
۷۲	چهار نوع منحنی تیپیک برای زمین سه لایه ای	شکل ۳-۲۲
۷۴	پروفیل افقی مقاومت ظاهری برای آرایه ونر در عرض یک گسل قائم	شکل ۳-۲۳
۷۴	پروفیل مقاومت افقی برای آرایه ونر در عرض یک فروچاله پرشده	شکل ۳-۲۴
۷۵	۲۵: پروفیل تئوریک ونر در عرض یک ساختار استوانه‌ای	شکل ۳-۲۵
۷۷	نمای شماتیک از فرستنده، گیرنده و مسیر امواج الکترومغناطیس در روش GPR	شکل ۳-۲۶
۸۰	یک سیستم GPR برای پیمایش جاده ای	شکل ۳-۲۷
۸۲	سیستم‌های مختلف GPR و پیکربندی های مختلف آنتن‌های مورد استفاده در پیمایش‌های راه‌سازی	شکل ۳-۲۸
۸۴	خودروی برداشت GPR در حال عملیات در جاده برای شناسایی عمق‌های کم	شکل ۳-۲۹
۸۵	تیم برداشت و تجهیزات برداشت با آنتن‌های زمینی برای برداشت عمق‌های بیشتر	شکل ۳-۳۰
۸۶	نمایش شماتیک روشهای برداشت جابجایی مشترک و نقطه میانی مشترک	شکل ۳-۳۱
۸۷	نمایش شماتیک از پروفیل زنی GPR به شیوه جابجایی مشترک	شکل ۳-۳۲
۹۰	آزمایش کالیبراسیون آنتن GPR مربوط به قبل و بعد از برداشت داده‌ها	شکل ۳-۳۳
۹۲	نمونه‌ای از نمایش داده‌های GPR (سیگنالها و نمایش گرافیکی پروفیل)	شکل ۳-۳۴
۹۴	شکل مقاطع بازتابش GPR برای شرایط نمایش داده شده در شکل ۳	شکل ۳-۳۵
۹۵	تصویر شماتیک از یک سری از هدف‌های مورد شناسایی	شکل ۳-۳۶
۹۵	نگاشت واقعی GPR برداشت شده بر روی یک مجرای آب، لوله و دو تونل نشان	شکل ۳-۳۷
۹۷	نمای شماتیک از روش الکترو مغناطیس	شکل ۳-۳۸
۹۸	سیم پیچ فرستنده با ایجاد میدان اولیه باعث تولید جریان های Eddy در توده رسانا	شکل ۳-۳۹
۹۹	چرخاندن سیم پیچ گیرنده حول محور افقی موازی با میدان	شکل ۳-۴۰
۹۹	بیضی پلاریزان و زاویه تیلت $\theta$ و میدانهای اولیه و ثانویه	شکل ۳-۴۱
۱۰۰	بردار دیاگرام نشان دهنده روابط بین دامنه و فاز میدان های الکترومغناطیس اولیه و ثانویه	شکل ۳-۴۲
۱۰۳	نمای شماتیک برداشت صحرائی در روش SASW	شکل ۳-۴۳

۱۰۴	نمونه‌ای از تابع همگونی و اطلاعات فاز بدست آمده از روش SASW	شکل ۳-۴۴
۱۰۵	نمونه‌ای از منحنی پاشندگی بدست آمده از روش SASW	شکل ۳-۴۵
۱۰۶	نمای شماتیک نشان‌دهنده روش برداشت داده‌ها در تکنیک MASW	شکل ۳-۴۶
۱۰۷	مراحل سه‌گانه پردازش داده‌ها در روش MASW	شکل ۳-۴۷
۱۰۹	شمای کلی نحوه ایجاد نقشه دوبعدی سرعت موج برشی از تحلیل چندکاناله امواج سطحی	شکل ۳-۴۸
۱۱۰	تعریف آرایش چشمه - گیرنده و جابجایی بین دو برداشت متوالی در روش MASW	شکل ۳-۴۹
۱۱۳	تحلیل سرعت موج برشی در عمق کم در نزدیکی فرودگاه Reno/Tahoe با استفاده از داده‌های میکروترمر	شکل ۳-۵۰
۱۱۴	نمایش داده‌های میکروترمر ثبت شده توسط یک آرایه خطی ۲۰۰ متری با استفاده از ژئوفونهای ۸ هرتز	شکل ۳-۵۱
۱۲۱	پروفیل سرعت موج برشی توسط روش معکوس سازی مستقیم خردلرزه ها	شکل ۳-۵۲
۱۲۲	شمای کلی روش نسبت طیفی استاندارد	شکل ۳-۵۳
۱۲۳	شمای کلی روش نسبت طیفی افقی به قائم با استفاده از نگاشتهای زلزله	شکل ۳-۵۴
۱۲۵	شمای کلی محاسبه نسبت طیفی افقی به قائم با استفاده از نگاشتهای ارتعاشات محیطی سه مولفه‌ای	شکل ۳-۵۵
۱۲۶	مقایسه نتایج حاصل از روش H/V داده‌های ارتعاشات محیطی با روش نسبت طیفی استاندارد داده‌های زلزله	شکل ۳-۵۶
۱۳۷	موقعیت برداشت های شکست مرزی و مقاوت الکتریکی در تونلهای ۱، ۳ و ۴	شکل ۴-۱
۱۴۱	نمونه ای از پروفیل های دو بعدی ژئوالکتریک و تفسیر زمین شناسی آن در تونل ۱	شکل ۴-۲
۱۴۲	منحنی زمان	شکل ۴-۳
۱۴۵	نقشه تکتونیکی منطقه دهانه خلیج Ise	شکل ۴-۴
۱۴۶	موقعیت برداشت‌های ژئوفیزیکی	شکل ۴-۵
۱۴۸	(a) مقطع زمانی و پروفیل عمقی تفسیر شده در طول خط برداشت بازتابی چندکاناله A	شکل ۴-۶
۱۴۹	ساختارهای سرعت در طول خطوط برداشت شکست مرزی ساحلی	شکل ۴-۷
۱۴۹	نقشه شدت آنومالی مغناطیسی در منطقه دهانه Ise Bay	شکل ۴-۸
۱۵۰	چاه نگاری ترکیبی به دست آمده در گمانه ساحلی A	شکل ۴-۹
۱۵۲	محدوده مسیرهای مورد مطالعه در راه Natchez Trace Parkway	شکل ۴-۱۰
۱۵۳	سیستم Em31	شکل ۴-۱۱
۱۵۴	نقشه های هدایت پذیری ظاهری برای ارزیابی میزان رس در سه عمق مختلف	شکل ۴-۱۲
۱۵۵	نمونه ای از مقطع الکترومغناطیس در طول بخشی از مسیر مورد مطالعه	شکل ۴-۱۳
۱۵۷	خودروی ون، در حال برداشت داده های GPR در استان فارس	شکل ۴-۱۴



۱۵۷	دوربین های نصب شده روی خودرو جهت عکسبرداری از محور های مورد نظر	شکل ۴-۱۵
۱۵۸	نمایی از لپ تاپ و واحد کنترل برداشت GPR	شکل ۴-۱۶
۱۵۸	نمایی از ورودی های مختلف به واحد کنترل SRI20	شکل ۴-۱۷
۱۵۸	بسته تجهیزات مربوط به دستگاه مسافت سنج	شکل ۴-۱۸
۱۵۹	نحوه اتصال آنتن به سپر تعبیه شده	شکل ۴-۱۹
۱۵۹	نحوه اتصال کابل های مهار کننده به بدنه خودرو	شکل ۴-۲۰
۱۶۰	نمایی از نصب مسافت سنج و دیسک مربوط به آن	شکل ۴-۲۱
۱۶۰	نحوه یک نصب صحیح دستگاه مسافت سنج	شکل ۴-۲۲
۱۶۱	نمایی از تنظیم دستگاه برای کالیبراسیون مسافت سنج	شکل ۴-۲۳
۱۶۲	مثالی از سیگنال دریافتی بدون حضور موج مستقیم، بازتاب نشان داده شده مربوط به سطح آسفالت می باشد	شکل ۴-۲۴
۱۶۲	یک نمونه از دریافت امواج قبل از موج مستقیم که جهت برداشت مناسب نمیباشد	شکل ۴-۲۵
۱۶۳	مثالی از دریافت مناسب سیگنال های بازتابی از ساختار های تشکیل دهنده راه	شکل ۴-۲۶
۱۶۳	مقطع برداشت شده از راه که دارای نوفه های الکترومغناطیسی می باشد	شکل ۴-۲۷
۱۶۵	نمونه ای از یک فایل کالیبراسیون آنتن (۱ گیگاهرتز) که در هنگام تکانش تهیه شده است	شکل ۴-۲۸
۱۶۵	داده های خام برداشت شده قبل از اعمال تصحیحات استاتیکی	شکل ۴-۲۹
۱۶۵	داده های برداشت شده، بعد از اعمال تصحیحات استاتیکی و شناسایی بازتاب ها	شکل ۴-۳۰
۱۶۶	نمایی از یک آبرو که توسط دوربین های سیستم ثبت شده است	شکل ۴-۳۱
۱۶۶	مقطع برداشت شده پیش از اعمال صافی مهاجرت، بر روی آبرو نشان داده شده در شکل ۳۱	شکل ۴-۳۲
۱۶۶	نمایی از تنظیمات صافی مهاجرت بر روی داده های دریافتی از آبرو مشاهده شده	شکل ۴-۳۳
۱۶۷	مقطع برداشت شده پس از اعمال صافی مهاجرت	شکل ۴-۳۴
۱۶۷	نمایی از تحلیل لایه های روسازی و زیرسازی محور های استان فارس با ۴ بازتابنده مشخص	شکل ۴-۳۵
۱۶۸	نمایی از تحلیل لایه های روسازی و زیرسازی محور های استان فارس با ۳ بازتابنده مشخص	شکل ۴-۳۶
۱۶۸	نمایی از تحلیل لایه های روسازی و زیرسازی محور های استان فارس با ۲ بازتابنده مشخص	شکل ۴-۳۷
۱۶۹	نمونه ای از نتایج نهایی گزارش شده تعیین قطعه های همگن مربوط به ساختار راه	شکل ۴-۳۸
۱۶۹	نمونه ای از مقطع نهایی نشان دهنده تغییرات ضخامت لایه های روسازی و زیرسازی راه	شکل ۴-۳۹
۱۷۵	فرمت راهنمای نقشه های ژئوفیزیکی	شکل ۵-۱
۱۷۹	یک مقطع هم مقاومت ژئوالکتریک	شکل ۵-۲
۱۸۰	یک مقطع ژئوالکتریک	شکل ۵-۳
۱۸۱	یک نمودار پروفیل زنی الکتریکی	شکل ۵-۴
۱۸۱	نمودار پروفیل زنی ترکیبی (C.R.P)	شکل ۵-۵



۱۸۲	یک مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری	شکل ۵-۶
۱۸۴	راهنمای نقشه در روشهای ژئوالکتریکی	شکل ۵-۷
۱۸۷	یک نگار سرعت لرزه ای	شکل ۵-۸
۱۸۸	یک مقطع لرزه ای	شکل ۵-۹
۱۸۹	راهنمای نقشه در روشهای لرزه ای	شکل ۵-۱۰



## فهرست جداول

۶	راهنماها و دستورالعمل‌هایی که به تشریح روشهای ژئوفیزیکی مختلف، کاربرد آنها، چگونگی بکارگیری آنها می‌پردازند	جدول ۱-۱
۷	استانداردها و شرح خدماتهای منتشر شده به منظور تشریح فنی چگونگی انجام روش های مختلف ژئوفیزیکی	جدول ۲-۱
۱۱	راهنماها و استانداردهای موجود در خصوص نحوه تنظیم گزارش و نحوه ارائه نتایج مطالعات ژئوفیزیک	جدول ۳-۱
۱۱	خلاصه محتوای بخش اول دستورالعمل FHWA و روشهای مختلف ژئوفیزیکی مورد استغاده در مسائل مختلف مرتبط با بزرگراهها	جدول ۴-۱
۱۹	دوازده روش ژئوفیزیکی متداول در شناسایی های ژئوتکنیکی	جدول ۵-۱
۲۰	بعضی از کاربردهای بالقوه روشهای ژئوفیزیکی متداول	جدول ۶-۱
۲۴	انتخاب روش مناسب ژئوفیزیکی بر حسب مورد استفاده	جدول ۷-۱
۷۹	خصوصیات الکترومغناطیس مواد و مصالح سازنده زمین	جدول ۱-۳
۸۵	محدودیت دقت تفکیک (متر) برای فرکانس آنتن‌های مختلف و نفوذپذیری الکتریکی	جدول ۲-۳
۱۰۶	مقادیر بهینه پارامترهای اندازه‌گیری در روش MASW	جدول ۳-۳
۱۳۸	موقعیت تونل‌های در نظر گرفته شده برای ساخت	جدول ۱-۴
۱۳۸	مشخصات برداشت های مقاومت الکتریکی	جدول ۲-۴
۱۳۸	مشخصات برداشت های شکست مرزی	جدول ۳-۴
۱۳۹	موقعیت پروفیل های مقاومت الکتریکی دو بعدی	جدول ۴-۴
۱۴۳	خلاصه خصوصیات ژئوفیزیکی لایه‌های زمین در تونل ۱	جدول ۵-۴
۱۴۶	مسائل زمین شناسی مطرح در بخشهای مختلف مسیر مورد مطالعه و روشهای ژئوفیزیکی به کار رفته برای حل آنها	جدول ۶-۴





# فصل اول

---

## مرور ادبیات فنی





## ۱-۱- مقدمه

مطابق با قاعده کلی حاکم بر هر طرح پژوهشی تهیه دستورالعمل مطالعات ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی نیاز به بررسی سوابق موجود در این زمینه در ایران و جهان وجود داشت. به این منظور با جستجوی گسترده در منابع موجود، دستورالعمل‌ها و استانداردهای تهیه شده در زمینه مطالعات ژئوفیزیک در پروژه‌های مهندسی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. فصل حاضر به تشریح نتایج این بررسی می‌پردازد و فهرست جامعی از منابع مورد بررسی در بخش منابع و مراجع ارائه می‌گردد. در ابتدا تاریخچه منابع علمی انتشار یافته در ارتباط با ژئوفیزیک مرور خواهد گردید. سپس چند نمونه از مراجع با تناسب بیشتر با اهداف پژوهش حاضر تشریح گردیده و در آخر جمع‌بندی از مرور منابع علمی بررسی شده ارائه خواهد گردید.

## ۱-۲- مروری کلی بر منابع علمی و فنی موجود

منابع متعددی در رابطه با ژئوفیزیک و کاربردهای آن وجود دارد، که یا بطور مطلق به تئوری روشهای مختلف و اصول فیزیکی حاکم بر آنها، یا به کاربرد ژئوفیزیک در موضوعی خاص اشاره دارند. Sirles (۲۰۰۶) تاریخچه نسبتاً جامعی در رابطه با سیر ادبیات فنی منتشره در ژئوفیزیک را بیان می‌کند. اولین مراجع جامع منتشر شده در رابطه با ژئوفیزیک کارهای تلفورد و همکاران (۱۹۷۶) و دبرین (۱۹۷۶) هستند که هنوز هم به عنوان دو مرجع مهم به عنوان کتاب درسی پایه در این رابطه در دانشگاه‌های مختلف تدریس می‌گردند. تقاضا برای ژئوفیزیک مهندسی منجر به انتشار کتاب مرجع دوجلدی ژئوفیزیک مهندسی؛ یکی با موضوع روشهای لرزه‌ای و دیگری روشهای ژئوالکتریک (Mooney, 1984 a&b) در سالهای میانی دهه ۱۹۸۰ گردید و قبل از آن مراجع کاربردی در این زمینه کمتر به چشم می‌خورد. دهه ۱۹۹۰ زمان بروز نیاز به وجود کتابهای ژئوفیزیکی کاربرد محور در زمینه‌های خاص منجر به انتشار چند مجموعه مروری (State of the art) در زمینه ژئوفیزیک و تکنیکهای مختلف آن گردید که دو مجموعه بویژه مورد توجه کاربران قرار گرفت. نخست انجمن ژئوفیزیکدان‌های اکتشافی مجموعه سه جلدی ژئوفیزیک ژئوتکنیکی و محیطی (Ward, 1990) منتشر ساخت که یکی از نخستین کتابهایی است که به ژئوفیزیک کم-عمق پرداخته است. مجموعه دیگر در سال ۱۹۹۵ توسط بخش مهندسی ارتش آمریکا با عنوان "طراحی مهندسی - اکتشافات ژئوفیزیکی برای بررسی‌های مهندسی و محیطی" به بازار عرضه گردید. در تدوین این دو مرجع از محققین مختلف خواسته شد هر کدام فصلی در رابطه با یک کاربرد خاص از ژئوفیزیک را براساس تجربه‌های کاری خود ارائه کنند. این دو مرجع به عنوان منابع کلیدی در شروع کاربردهای ژئوفیزیک در مسائل مربوط به عمق کم و مطالعات محیطی شناخته می‌شوند.

پس از انتشار این دو مرجع بود که منابع منتشر شده بعدی بیش از پیش تخصصی و به کاربرد ویژه روشهای ژئوفیزیکی در موضوعات خاص مهندسی معطوف گردیدند. یکی از این نمونه کتابها با عنوان "ژئوفیزیک مدرن در زمین-شناسی مهندسی" توسط انجمن زمین‌شناسی لندن انتشار یافت (McCann, 1997).

اداره فدرال بزرگراه در ایالات متحده (FHWA) در سال ۲۰۰۳ راهنمایی با عنوان کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مسائل مرتبط با بزرگراه‌ها منتشر ساخت که بطور ویژه برای استفاده توسط بخش‌های حمل و نقل و مهندسیین دست‌اندر کار در پروژه‌های بزرگراهی در مواقعی که نیاز به استفاده از ژئوفیزیک دارند طراحی شده است.

از جدیدترین منابع جامع منتشر شده در زمینه‌های کاربرد روشهای ژئوفیزیک، کتابی با عنوان کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مسائل مهندسی و محیطی توسط انجمن ژئوفیزیکدان‌های اکتشافی ژاپن است که نوع‌آوریهای تکنولوژی برای ۱۷ روش ژئوفیزیکی را ارائه می‌کند.

علاوه بر موارد فوق بایستی از مجموعه مقالات منتشر شده از کنفرانسهای تخصصی متعددی که در رابطه با کاربرد روشهای ژئوفیزیکی بصورت ادواری برگزار گردیده است نیز یاد کرد که رجوع به آنها می‌تواند نقش مهمی در آشنایی با نوآوریها در این رابطه، بویژه در زمینه کاربردی داشته باشد. از کنفرانسهای مرتبط با کاربرد ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی اولین و دومین کنفرانس بین‌المللی کاربرد روشهای ژئوفیزیک و آزمونهای غیر مخرب در پروژه‌های حمل و نقل برگزاری شده در سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲ توسط FHWA قابل ذکر هستند.

در راستای بررسی منابع علمی و فنی، بسیاری از منابع فوق مورد رجوع قرار گرفت. این بررسی‌ها نشان داد که منابعی که اختصاصاً به بکارگیری روشهای ژئوفیزیکی در مطالعات راه پرداخته باشند بویژه در بحث مربوط به تدوین آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها زیاد نیستند. شاید بتوان گفت تنها گزارشی که در قالب دستورالعمل در این رابطه ارائه شده است همان دستورالعمل فوق‌الذکر منتشر شده توسط اداره فدرال بزرگراههای ایالات متحده (FHWA) اشاره شده در بالا است. که در بخشهای بعدی بطور مفصل‌تر تشریح خواهد گردید.

میزان توجه مشاوران و کارشناسان درگیر در پروژه‌های راهسازی، به این دستورالعمل در برنامه‌های تحقیقاتی تحت عنوان برنامه ملی همکاری تحقیقات بزرگراهی (NCHRP) اجرا شده توسط کمیته اجرایی بورد تحقیقات حمل و نقل آمریکا مورد سنجش قرار گرفت. گزارش این پروژه توسط Sirles در سال ۲۰۰۶ تحت عنوان "استفاده از ژئوفیزیک برای پروژه‌های حمل و نقل" منتشر شده است. طبق این سنجش که در بخش‌های حمل و نقل ایالتی در آمریکا و کانادا صورت گرفت مشخص شد که تا آن مقطع زمانی تقریباً ۳۵ درصد آژانسهای مرتبط از وجود این دستورالعمل مطلع نیستند. ۵۰ درصد آنرا نداشتند یا مطمئن نبودند که دارند و ۴۵ درصد از آن استفاده‌ای نکرده بودند.

از گزارشهای دیگر منتشر شده در این رابطه در ایالات متحده می‌توان به گزارش تحقیقاتی ادواری حمل و نقل منتشر شده توسط بورد تحقیقات حمل و نقل تحت عنوان "روش‌های ژئوفیزیکی متداول در شناسایی‌های ژئوتکنیکی" در سال ۲۰۰۸ اشاره نمود (Anderson et al, 2008).

جدای از سه مرجع فوق که مستقیماً به بحث ژئوفیزیک در مطالعات راهسازی می‌پردازند، سایر منابع موجود به بررسیهای ژئوفیزیکی در مفهومی عامتر و یا به کاربرد آن در انواع دیگر از پروژه‌های عمرانی می‌پردازند که در عین حال می‌توانند در مطالعه حاضر مفید باشند و مورد توجه قرار گرفته‌اند.

این منابع در چهار دسته کلی قابل تقسیم بندی هستند که عبارتند از:

- ۱- کتب و مکتوبات پایه و مرجع که به بعضی از آنها در بالا اشاره شد.
- ۲- راهنماها و دستورالعمل‌هایی که به تشریح روشهای ژئوفیزیکی مختلف، کاربرد آنها، چگونگی بکارگیری آنها می‌پردازند (جدول ۱-۱). این راهنماها با هدف بکارگیری روشهای ژئوفیزیکی در مباحث مختلف مطرح در مهندسی عمران طراحی شده‌اند و ضمن تشریح قابلیت‌ها و محدودیتهای کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در کاربرد خاص مدنظر در هر دستورالعمل به تشریح روشهای مفید در زمینه مربوطه پرداخته‌اند. از جمله این راهنماها، دستورالعمل منتشر شده توسط FHWA است که به کاربرد روشهای ژئوفیزیک در پروژه‌های بزرگراهی می‌پردازد. این راهنما به همراه گزارش پروژه تحقیقاتی انجام شده توسط مرکز تحقیقات حمل و نقل آکادمی ملی ایالات متحده به لحاظ ارتباط



مستقیمی که با پروژه‌های راهسازی دارند در ادامه بطور مختصر تشریح می‌گردند. علاوه بر این، انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM) نیز نشریاتی را در راستای معرفی روشهایی ژئوفیزیکی مناسب برای مطالعات مهندسی سنگ پیشنهاد نموده است که در جدول (۱-۱) ارائه شده‌اند.

۳- استانداردها (جدول ۱-۲): این دسته مکتوباتی از قبیل سری استانداردهای منتشره توسط ASTM در این زمینه را شامل می‌شوند. ASTM از سال ۱۹۹۵ پانزده سند در زمینه برداشت داده‌های ژئوفیزیکی و پردازش آنها (هم روشهای سطحی و هم روشهای گمانه‌ای) منتشر کرده است که در جدول ۱-۲ آورده شده‌اند. از این میان تنها ۲ مورد به معنای واقعی بصورت روش استاندارد آزمایش طراحی شده‌اند (استاندارد D4428 مربوط به روش بین‌چاهی و استاندارد G57 مربوط به روش مقاومت الکتریکی). ۱۳ مورد باقی‌مانده در واقع بصورت راهنماهای استاندارد تهیه شده‌اند که سختگیری دو مورد قبلی را ندارند و انعطاف‌پذیری بیشتری را در اختیار کاربران قرار می‌دهند تا بتوانند براساس اهداف مورد نظر و ویژگیهای محل مورد مطالعه به طراحی عملیات برداشت مناسب بپردازند. استاندارد D6429 به عنوان یک راهنما در انتخاب روش مناسب ژئوفیزیک سطحی بکار می‌رود. در داخل کشور استانداردهایی در زمینه بکارگیری روشهای ژئوفیزیکی در در صنعت آب توسط تهیه شده که بصورت نشریه‌هایی توسط وزارت نیرو (شرکت سهامی مدیریت منابع آب) انتشار یافته است که در فصل دوم پیوست حاضر مورد اشاره قرار خواهند گرفت.

۴- راهنماها و دستورالعمل‌هایی که به نحوه تنظیم گزارش و نحوه ارائه نتایج مطالعات ژئوفیزیک می‌پردازند (جدول ۱-۳).

### ۳-۱- دستورالعمل منتشره توسط اداره بزرگراههای ایالت متحده (FWHA): کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مسائل مرتبط با بزرگراهها

هدف از ارائه این دستورالعمل از طرف ارائه دهندگان آن فراهم کردن اطلاعاتی پایه از روشهای ژئوفیزیکی و آزمایش‌های غیرمخرب برای مهندسين بزرگراهها است تا در طی شناسایی‌های ژئوتکنیکی راه، احداث و نگهداری راهها برای حل مسائل مهندسی مورد استفاده قرار دهند. این دستورالعمل برای تربیت مهندسان متخصص در ژئوفیزیک تهیه نشده است اما اطلاعاتی را در اختیار مهندسان قرار می‌دهد تا با توجه به آن روشهای ژئوفیزیکی و آزمایش‌های غیرمخرب مناسب را برای ارزیابی مسائل مرتبط با طراحی، برنامه‌ریزی، احداث و تعمیرات راه انتخاب نموده و مورد استفاده قرار دهند.

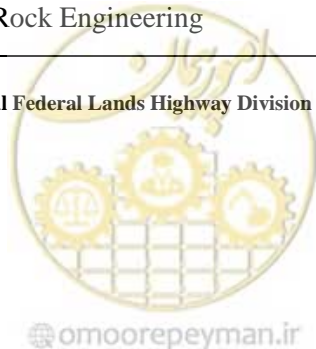
این دستورالعمل انتخاب روش مناسب از طریق یک ماتریس انتخاب راه حل پیشنهاد می‌کند و بر مبنای سایت اینترنتی (Web-base) طراحی شده است (<http://www.cflhd.gov/geotechnical>)، اگرچه نسخه‌هایی در فرمت‌های word و pdf نیز ارائه نموده است.



جدول (۱-۱) راهنماها و دستورالعمل‌هایی که به تشریح روشهای ژئوفیزیکی مختلف، کاربرد آنها، چگونگی بکارگیری آنها می‌پردازند

ردیف	نام سند	نام سند در زبان اصلی	تهیه کننده	سال انتشار
۱	کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در مسائل مرتبط با بزرگراهها	Application of Geophysical methods to highway Related Programs	*US Department of Transportation- FHWA-CFLHD	2003
۲	دستورالعمل شناسایی‌های زیرسطحی	Manual on Subsurface Investigations	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	1988
۳	گزارش تحقیقاتی ادواری حمل و نقل: روش‌های ژئوفیزیکی متداول در شناسایی‌های ژئوتکنیکی	Transportation Research Circular: Geophysical Methods Commonly Employed for Geotechnical Site Characterization	Transportation Research Board of the National Academies (Washington, DC)	2008
۴	برداشت‌های ژئوفیزیکی در ارزیابی-های صحرایی باستان شناسی	Geophysical survey in archaeological field evaluation	English Heritage society	1995
۵	راهنمایی برای ثبت داده‌های ژئوفیزیکی مطابق با قانون ۲۰۰۰ نفتی جنوب استرالیا	Guidelines for submission of geophysical data as required under the South Australian Petroleum Act 2000	South Australian Petroleum	2006 و 2008
۶	راهنمایی برای برداشت‌های ژئوفیزیکی هوایی برای جستجوی کانیها	GUIDELINES FOR REGIONAL AIRBORNE GEOPHYSICAL SURVEYING FOR MINERALS	Exploration and mining division of Ireland	بازبینی شده در 2008
۷	روشهای پیشنهادی ISRM برای چاه نگاری ژئوفیزیکی	ISRM suggested methods for geophysical logging boreholes	International Society of Rock Mechanics (ISRM)	1981
۸	روش پیشنهادی ISRM برای آزمایشات لرزه ای بین گمانه‌ها	ISRM suggested methods for Seismic Testing Within and Between Boreholes	International Society of Rock Mechanics (ISRM)	1988
۹	روشهای پیشنهادی ISRM برای ژئوفیزیک سطحی در مهندسی سنگ	ISRM suggested methods for Land Geophysics in Rock Engineering	International Society of Rock Mechanics (ISRM)	2004
۱۰	روشهای پیشنهادی ISRM برای ژئوفیزیک درون چاهی در مهندسی سنگ	ISRM suggested methods Borehole Geophysics in Rock Engineering	International Society of Rock Mechanics (ISRM)	2006

\*US Department of Transportation: Central Federal Lands Highway Division (CFLHD), Federal Highway Administration (FHWA)



جدول (۱-۲) استانداردها و شرح خدماتهای منتشر شده به منظور تشریح فنی چگونگی انجام روش های مختلف ژئوفیزیکی

سال انتشار	تهیه کننده	نام سند در زبان اصلی	نام سند	ردیف
2002	ASTM-D6429	Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods	راهنمای استاندارد برای انتخاب روشهای ژئوفیزیکی سطحی	۱
2002	ASTM-D5753	Standard Guide for Planning and Conducting, Borehole Geophysical Logging	راهنمای استاندارد برای برنامه ریزی و تهیه لاگهای ژئوفیزیکی درون گمانه‌ای	۲
1996	*ASTM-D5777	Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation	راهنمای استاندارد برای استفاده از روش انکساری در شناسایی‌های زیرزمینی	۳
1996	ASTM-D4428	Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing	روشهای استاندارد آزمایش لرزه‌ای بین چاهی	۴
1996	ASTM-G57	Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method	روش آزمایش استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک با استفاده از روش چهار الکترودی و نر	۵
1996	ASTM-D6820	Standard Guide for Using the Time Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations	راهنمای استاندارد برای روش الکترومغناطیس در حوزه زمان در شناسایی‌های صحرایی	۶
2002	ASTM-D6727	Standard Guide for Conducting Borehole, Geophysical Logging—Neutron	راهنمای استاندارد برای تهیه لاگهای نوترونی درون گمانه‌ای	۷
2002	ASTM-D6726	Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging—Electromagnetic Induction	راهنمای استاندارد برای تهیه لاگهای الکترومغناطیسی درون گمانه‌ای	۸
2002	ASTM-D6639	Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations	راهنمای استاندارد برای استفاده از روش الکترومغناطیس در حوزه فرکانس در شناسایی‌های زیرسطحی	۹
2002	ASTM-D6432	Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation	راهنمای استاندارد برای استفاده از روش رادار نفوذکننده در شناسایی زیرسطحی	۱۰
2002	ASTM-D6431	Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation	راهنمای استاندارد برای استفاده از مقاومت الکتریکی جریان مستقیم در شناسایی زیرسطحی	۱۱
2002	ASTM-D6430	Standard Guide for Using the Gravity Method for Subsurface Investigation	راهنمای استاندارد برای استفاده از روش گرانی-سنجی در شناسایی زیرسطحی	۱۲



ادامه جدول (۱-۲) استانداردها و شرح خدماتهای منتشر شده به منظور تشریح فنی چگونگی انجام روش های مختلف ژئوفیزیکی

ردیف	نام سند	نام سند در زبان اصلی	تهیه کننده	سال انتشار
۱۳	راهنمای استاندارد برای برنامه ریزی و تهیه لاگهای ژئوفیزیکی درون گمانه‌ای- لاگ گاما	Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging—Gamma	ASTM-D6274	2002
۱۴	راهنمای استاندارد برای برنامه‌ریزی و تهیه لاگهای ژئوفیزیکی درون گمانه‌ای- قطرسنجی مکانیکی	Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging: Mechanical Caliper	ASTM-D6167	2002
۱۵	استاندارد اجرایی برای استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی	Practice Standard For Use Of Geophysical Data	Canadian Association of Petroleum Landmen	2006
۱۶	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات ژئوالکتریک با روش مقاومت ویژه		سازمان برنامه و بودجه- وزارت نیرو	۱۳۷۵
۱۷	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات لرزه ای با روش شکست مرزی		سازمان برنامه و بودجه- وزارت نیرو	۱۳۷۷
۱۸	شرح خدمات مطالعات ژئوفیزیکی		معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری	۱۳۸۷
۱۹	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: معرفی روشها		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۵
۲۰	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: شناخت روشهای چاه نگاری		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۶
۲۱	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: روش گرانی سنجی		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۷
۲۲	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: شناخت روش مغناطیسی		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۷
۲۳	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: شناخت روش زمین گرایی		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۷
۲۴	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: شناخت روش خود پتانسیل (S.P.)		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۸
۲۵	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: شناخت روش قطبش القایی (IP)		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۷۸

\*American Society for Testing and Materials



ادامه جدول (۲-۱) استانداردها و شرح خدماتهای منتشر شده به منظور تشریح فنی چگونگی انجام روش های مختلف ژئوفیزیکی

ردیف	نام سند	نام سند در زبان اصلی	تهیه کننده	سال انتشار
۲۶	ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: روشهای چاه نگاری در هیدروژئولوژی و راهنمای آنها در مطالعات مکانیک سنگ و ژئوتکنیک		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۸۲
۲۷	شرح خدمات مطالعات مرحله اول و دوم تونل		سازمان برنامه و بودجه	۱۳۶۲
۲۸	شرح خدمات مطالعات پل		سازمان برنامه و بودجه	۱۳۵۱

جدول (۳-۱) راهنماها و استانداردهای موجود در خصوص نحوه تنظیم گزارش و نحوه ارائه نتایج مطالعات ژئوفیزیکی

ردیف	نام سند	نام سند در زبان اصلی	تهیه کننده	سال انتشار
۱	راهنمایی برای تدوین گزارشهای ژئوفیزیکی در مطالعات زیست محیطی و زمین شناسی مهندسی	GUIDELINES FOR GEOPHYSICAL REPORTS FOR ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING	California Division of Mines and Geology	1998
۲	راهنمایی برای گزارش داده های زمین شناسی و ژئوفیزیکی در اکتشافات هیدروکربنی	Guidelines for the Reporting of Geophysical and Geological Data Acquired in Permit/License Areas for Hydrocarbon Exploration	*LBEG, LANU, BSU and GdFB	2008
۳	راهنمایی برای برنامه ریزی، اجرا و تهیه گزارش مطالعات ژئوفیزیکی و زمین شناسی در ناحیه نووا اسکوتیا.		بورد نفت دریایی نووا اسکوتیا- کانادا	
۴	راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی، زمین شناسی، زیست محیطی و ژئوتکنیکی	GEOPHYSICAL, GEOLOGICAL, ENVIRONMENTAL AND GEOTECHNICAL PROGRAM GUIDELINES	The Canada-Newfoundland and Labrador Offshore Petroleum Board	2008
۵	استاندارد علامتها و مشخصه های نقشه های ژئوفیزیکی		شرکت سهامی مدیریت منابع آب	۱۳۸۴

\*Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig Holstein, Geologischer Dienst (LANU), Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Geologisches Landesamt Hamburg (BSU), Geologischer Dienst für Bremen (GdFB)



این دستورالعمل طیف گسترده‌ای از روشهای عملی، شامل تمام روشهای ژئوفیزیکی متداول را پوشش می‌دهد و به شکلی تدوین شده است که راه‌حل‌های ویژه برای مسائل مختلفی که در حمل و نقل وجود دارد، فراهم آورده است. برای مثال روشهای متداول ژئوفیزیکی، برای ارزیابی خواص فیزیکی خاک و سنگ بکار می‌روند، مانند روش‌های لرزه‌ای که از آنها برای تعیین عمق سنگ بستر و تعیین محل حفرات زیرزمینی استفاده می‌گردد. همین روشهای لرزه‌ای در آزمونهای غیر مخرب برای کنترل‌های بعد از ساخت تطبیق داده شده‌اند که حاصل آن ابداع روش اولتراساایز میک بوده است. در این روش انتقال انرژی اکوستیک از سازه بتنی بجای زمین طبیعی و بازتابهای آن از سطح زیرین سازه، مانند پی پل‌ها یا از زونهای معیوب در سازه ساخته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور مشابه روش رادار نفوذ کننده (GPR)، که در ابتدا برای تصویربرداری زیرسطحی با قدرت تفکیک بالا ابداع گردیده است امروزه بصورت معمول برای ارزیابی روسازی راه، دالهای بتنی و دیوارها بکار می‌رود. این نوع بررسیهای ژئوفیزیکی آزمونهای غیر مخرب در سیستم‌های حمل و نقل و سازه‌های زیربنایی برای ارزیابی روشهای جدید تضمین کیفیت (Quality Assurance, QA) و کنترل کیفیت (Quality Control, QC) و مسائل حقوقی سازه‌های موجود بکار می‌روند.

این دستورالعمل در دو بخش تنظیم شده است. بخش اول بر محور مسائل مورد انتظار در یک پروژه راهسازی تنظیم شده است و در آن برای مسائل مختلف جاری در مطالعه، ساخت و نگهداری بزرگراه‌ها، روش یا روشهای مناسب معرفی شده و توضیح مختصری در خصوص آن روش ارائه شده است. همچنین چگونگی دستیابی به اطلاعات، پردازش و تفسیر داده‌ها، مزایا و معایب هر روش همراه با مشخص کردن اینکه برای حل چه مساله‌ای مناسب‌اند، بحث شده است. جدول ۴-۱ موضوعات و روشهای بحث شده در فصول مختلف این بخش را به صورت خلاصه ارائه می‌نماید. بخش دوم روشها و تکنیکهای ژئوفیزیکی را بطور مفصلتر تشریح نموده و مبانی تئوری آنها را ارائه می‌کند.

در این بخش سه موضوع عمده مورد بحث قرار گرفته است. موضوع اول کمیت‌های ژئوفیزیکی است که در آن خصوصیات و کمیت‌های فیزیکی برای درک ژئوفیزیک و روشهای ژئوفیزیکی مورد توجه قرار گرفته است. بخش دوم به روشهای ژئوفیزیکی سطحی شامل گرانی‌سنجی، لرزه‌ای، الکتریکی، الکترومغناطیس و روشهای هسته‌ای پرداخته است. در انتهای این بخش روشهای ژئوفیزیکی درون چاهی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

مزایای برشمرده برای روشهای ژئوفیزیکی در این دستورالعمل عبارتند از:

- این روشها شناسایی غیرمخرب بخشهای زیرسطح زمین، روسازی راه، عرشه پل و سایر سازه‌ها را ممکن می‌سازد.
- می‌توانند در میانبایی اطلاعات حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی در قسمتهای حفاری نشده مابین آنها بکار گرفته شوند.
- امکان گردآوری اطلاعات در محدوده‌ای گسترده و در زمانی بسیار کمتر از روشهای مخرب را فراهم می‌کنند.
- در مقایسه با سایر روشها هزینه کمتری دارند.
- داده‌هایی دقیق و به موقع برای طراحی و اجرا فراهم می‌کنند.

علیرغم این امتیازات توجه به این نکته ضروری است که معمولاً برای داده‌های ژئوفیزیکی برداشت شده بیش از یک تفسیر می‌توان ارائه نمود و لذا برای درک صحیح از شرایط زمین، استفاده همزمان از چند روش ممکن است توصیه گردد. لذا، این دستورالعمل توصیه می‌نماید پیش از شروع برداشتهای ژئوفیزیکی کلیه اطلاعات و گزارشهای ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و آبشناسی در محل سایت و مناطق اطراف گردآوری شده و مورد بررسی قرار گیرد.

جدول (۴-۱) خلاصه محتوای بخش اول دستورالعمل FHWA و روشهای مختلف ژئوفیزیکی مورد استغاده در مسائل مختلف مرتبط با

## بزرگراهها

مسائل مهندسی راه	کاربرد	راه حل ژئوفیزیکی / آزمونهای غیر مخرب
فصل دوم: بخشهای پایه، کوله و ستون پل	عمق ناشناخته پی ها	پاسخ ضربه یا بازتاب صوت، اولتراسایز میک، لرزه نگاری بازتابی، ارتعاش اجباری، لرزه نگاری موازی، میدان القایی، پاسخ دینامیکی پی، چاه پیمایی، رادار درون چاهی، لرزه نگاری درون-چاهی،
	آزمون یکپارچگی در پی و سازه (Integrity Testing)	چاه پیمایی صوتی بین چاهی، توموگرافی صوتی بین چاهی، دانسیته گاما-گاما، چاه نگاری صوتی تک گمانه‌ای، پاسخ ضربه یا بازتاب صوتی، اولتراسایز میک، سرعت پالس فراصوتی، بازتابش ضربه ای، رادار نفوذی، تحلیل طیفی امواج سطحی، تشعشع آکوستیک، رادیوگرافی
	کیفیت آرماتوربندی (Rebar Quality and Bonding)	پتانسیل نیم سلول، مقاومت قطبش خطی، روش پالس گالوانوستاتیک، نوپز الکتروشیمیایی، تشعشع آکوستیک، آشفتگی میدان مغناطیسی،
	آب شستگی پی	انعکاس سنجی حوزه زمان، لرزه نگاری موازی، رادار نفوذی، پروفیل زنی لرزه‌ای بازتابی پیوسته، ژرفا سنج (Fathometer).
فصل سوم: بخشهای عرشه، دکل و سیستم‌های معلق سازی پل	پایداری عرشه پل عرشه های جدید ارزیابی سطح اساس عرشه های موجود	رفتار سنجی ارتعاشی، رادار نفوذی، الکترومغناطیس، بازتابش ضربه‌ای، نقشه برداری پتانسیل خوردگی نیم سلول، تحلیل طیفی امواج سطحی و امواج سطحی فرا صوتی، حرارت سنجی مادون قرمز

ادامه جدول (۱-۴) خلاصه محتوای بخش اول دستورالعمل FHWA و روشهای مختلف ژئوفیزیکی مورد استفاده در مسائل مختلف مرتبط با

## بزرگراهها

مسائل مهندسی راه	کاربرد	راه حل ژئوفیزیکی / آزمونهای غیر مخرب
فصل چهارم: روسازی	کنترل کیفیت روسازی‌های جدید بررسی روسازی‌های موجود	رادار نفوذی، بازتابش ضربه ای، تحلیل طیفی امواج سطحی، امواج سطحی فراصوتی (USW)، تحلیل چندکاناله امواج سطحی (MASW)
فصل پنجم: فرونشست جاده	نقشه برداری حفرات، فروچاله ها، معادن متروکه و غارها	گرانی سنجی، رادار نفوذی، مقاومت الکتریکی، لرزه‌ای انکساری، لرزه‌ای بازتابی، امواج ریلی ثبت شده با یک آرایه با جابجایی یکسان، توموگرافی لرزه‌ای بین چاهی.
	مشکلات ناشی از رسه‌های موجود در بستر راه	اندازه گیری قابلیت هدایت الکتریکی (Conductivity Measurement)، اندازه گیری مقاومت الکتریکی، سونداژ الکترومغناطیس حوزه زمان، قطبش القایی
فصل ششم: خصوصیات زیرسطحی	تهیه نقشه سنگ کف، سنگ شناسی، نهشته‌های ماسه‌ای و شنی، سطح آب زیرزمینی و جریان آن	رادار نفوذکننده، لرزه نگاری انکساری، لرزه‌ای بازتابی امواج برشی و تراکمی، مقاومت الکتریکی، الکترومغناطیس حوزه زمان، اندازه گیری قابلیت هدایت الکتریکی، تحلیل طیفی امواج سطحی، گرانی سنجی، الکترومغناطیس با فرکانس بسیار پایین (VLF)، تصویربرداری درون گمانه‌ای، تشدید مغناطیس هسته‌ای، قطبش القایی، چاه پیمایی گاما و هییدروفیزیکال، پتانسیل خودزا، سائزموالکترونیک
	تعیین خصوصیات مهندسی و قابلیت حفاری سنگها و خاکها	لرزه نگاری انکساری، تشدید مغناطیس هسته‌ای، رادار نفوذی، تحلیل طیفی امواج سطحی، چاه پیمایی تعلیقی، چاه پیمایی صوتی موج کامل، لرزه‌ای بین چاهی
	تعیین موقعیت تجهیزات، تشخیص مخازن زیرزمینی، شناسایی آلاینده‌ها و مهمات عمل نکرده	مغناطیس سنجی، الکترومغناطیس، رادار نفوذکننده، آشکارساز لوله‌ها، آشکارساز فلزات، مقاومت الکتریکی، قطبش القایی، لرزه نگاری انکساری
فصل هفتم: اندازه گیری ارتعاشات	ارتعاشات ناشی از ترافیک، ساخت و ساز و انفجار	ارتعاش سنجی (Vibration Monitoring)

## ۱-۴- گزارش مرکز تحقیقات حمل و نقل آکادمی ملی ایالات متحده: استفاده از روشهای ژئوفیزیک در پروژه‌های حمل و نقل

این گزارش به منظور بررسی وضعیت استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در صنعت حمل و نقل ایالات متحده و کانادا در سال ۲۰۰۶ توسط Sirles تدوین شده است. استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در پروژه‌های ژئوتکنیکی توسط شرکت‌های ژئوفیزیکی ایالات متحده و کانادا در حال افزایش است با این وجود، میزان استفاده از این روشها در شرکت‌های مختلف متفاوت است. این گزارش بنا به دلایل زیر تهیه شده است:

- بازبینی وضعیت دانش ژئوفیزیک
- ارزیابی میزان استفاده و نوع روشهای ژئوفیزیکی مورد استفاده و همچنین نوع کاربران و چگونگی کاربرد از روشهای ژئوفیزیکی
- مشخص کردن روشها و تکنیکهای ژئوفیزیکی با استفاده مداوم
- مشخص کردن زمینه‌های مهندسی با بیشترین کاربرد روشهای ژئوفیزیکی
- ارزیابی میزان بودجه سالیانه اختصاص یافته به روشهای ژئوفیزیکی
- شناسایی رویکردهایی انتخاب روش ژئوفیزیکی و مسئول انتخاب آن در شرکتها
- مشخص کردن روشهای معمول انعقاد قراردادها و واگذاری مطالعات ژئوفیزیکی
- ارزیابی میزان اعتماد به این روشها در میان کاربران نهایی
- پاسخ به این سوال که آیا نیازی به برگزاری دوره‌های آموزشی وجود دارد یا نه؟

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، ژئوفیزیک به صورت کاربرد اصول فیزیکی برای مطالعات زمین‌شناسی و مواد سازنده زمین تعریف شده و بر روی کاربرد این روشها در مسائل ژئوتکنیکی تمرکز شده است.

اطلاعات مورد نیاز برای این تحقیق از منابع متعددی شامل بررسی گزارشها و منابع موجود، تهیه پرسشنامه‌ها و تحقیق میدانی به منظور تکمیل آنها، انجام مصاحبه و درخواست مستقیم اطلاعات از شرکتها و موسسات، گردآوری شده است. پرسشنامه‌های تهیه شده برای ۷۰ شرکت، بخشهای مهندسی ژئوتکنیک دپارتمانهای ایالتی حمل و نقل (DOTs)، بیشتر ادارات حمل و نقل کانادا و ناحیه کلمبیا و ۷ اداره فدرال درگیر در پروژه‌های حمل و نقل ارسال گردیده است. در کل ۶۳ پرسشنامه تکمیل شده دریافت گردیده که معادل ۹۰ درصد مجموع پرسشنامه‌های ارسالی است. ۴ پاسخ دیگر اضافه بر پرسشنامه‌های ارسالی از دپارتمانهای ایالتی دریافت شده و در نتیجه مجموعاً ۶۷ پاسخ مورد آنالیز قرار گرفت. تنها ۹ مورد از ۶۷ مورد اعلام کرده‌اند که از روشهای ژئوفیزیکی استفاده نمی‌کنند بنابراین داده‌های ارائه شده در این گزارش براساس ۵۸ مورد باقی مانده تنظیم شده است.

تقریباً ۵۰ درصد موارد عنوان داشته‌اند که استفاده از روشهای ژئوفیزیکی را در ۱۰ سال اخیر (نسبت به سال انتشار این گزارش یعنی ۲۰۰۴) شروع کرده‌اند. بنابراین برای بسیاری از موسسات، روشهای ژئوفیزیکی، روش شناسایی نوینی به شمار می‌آیند. تنها تعدادی معدودی از موسسات مورد تحقیق توانایی و امکانات انجام برداشتهای ژئوفیزیکی را داشته‌اند و تنها ۲ مورد از ۵۸ مورد عنوان داشته‌اند که بودجه سالیانه به مطالعات ژئوفیزیکی اختصاص می‌دهند. اکثریت موسسات، شناسایی‌های ژئوفیزیکی را از طریق بخش طراحی خود تامین اعتبار نموده و کار را از طریق قرارداد با شرکت‌های معماری و مهندسی به عنوان بخشی از شناسایی‌های ژئوتکنیکی یا واگذاری به صورت یکجا و با قیمت مشخص، در قالب یک قرارداد فرعی، انجام می‌دهند.

در بیش از نیمی از موارد، تعداد مطالعات ژئوفیزیکی از ۱ تا ۵ مورد در سال متغییر است. ارزش قراردادها برای هر



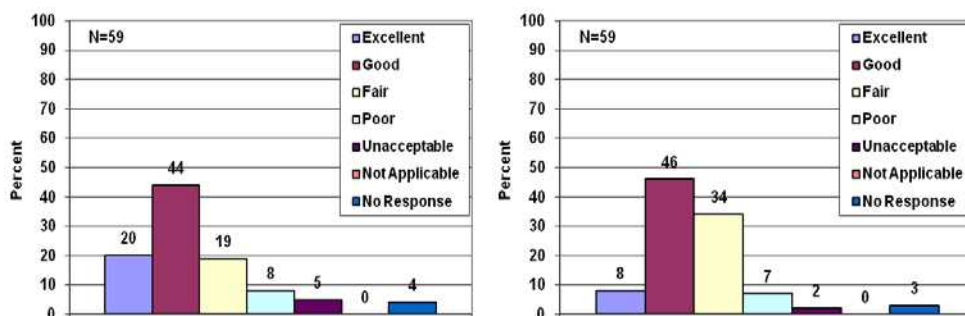
مطالعه ژئوفیزیکی کمتر از ۱۰۰۰۰ دلار بوده است، با این وجود موسساتی وجود داشته‌اند که به طور منظم، سالیانه بیش از ۱۰۰۰۰۰ دلار برای مطالعات ژئوفیزیکی هزینه کرده‌اند. این موسسات ترجیح می‌دهند خدمات مورد نیاز خود را در قالب قراردادهای سالیانه یا چند ساله واگذار نمایند. قراردادهای این چنین از ۳۰۰۰۰۰ دلار در سال تا ۵ میلیون برای ۳ سال متغیر بوده است.

بین ۵۰ تا ۶۰ درصد موارد، تجربه و رضایتمندی خود از روشهای ژئوفیزیکی را به صورت "خوب" و "عالی" گزارش کرده‌اند (شکل ۱-۱). با این وجود چند عامل به عنوان عوامل محدود کننده روشهای ژئوفیزیکی مطرح گردیده است که عبارتند از: مشکلات موجود در زمینه تجهیزات صحرائی و نرم‌افزارهای تفسیر داده‌ها، کیفیت پائین خدمات ارائه شده توسط موسسات خدمات ژئوفیزیک و یگانه نبودن تفسیرها و وابسته بودن نتایج به شرایط. بیشتر موسسات مورد مطالعه، درک نادرست و و فقدان دانش کافی از روشهای ژئوفیزیکی را بزرگترین محدودیت عنوان نموده‌اند.

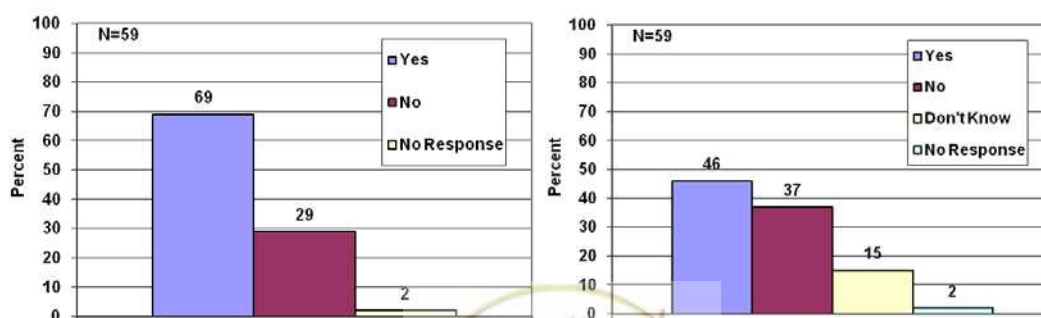
مورد دیگری که در تحقیقات پرسشنامه‌ای مورد سوال قرار گرفته است میزان اطلاع و استفاده شرکتها از دستورالعمل منتشره توسط FHWA در سال ۲۰۰۳ است. این بررسی نشان داد نزدیک ۳۵ درصد از موسسات بطور کلی از انتشار آن بی‌اطلاع بودند. بیش از نیمی از آنها این دستورالعمل را نداشته یا از داشتن آن مطمئن نبوده‌اند و تقریباً ۴۵ درصد از این دستورالعمل استفاده نکرده‌اند (شکل ۲-۱).

مواردی از مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق به صورت خلاصه عبارتند از:

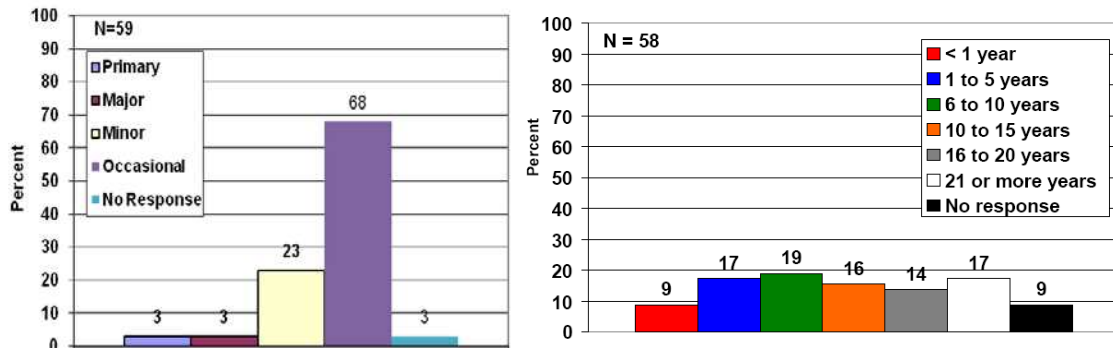
- در ۶۸ درصد موارد روشهای ژئوفیزیکی به صورت معمول و زیاد استفاده نکرده و در ۴۵ درصد موارد تنها در ۱۰ سال گذشته از این روشها استفاده کرده‌اند (شکل ۳-۱).



شکل (۱-۱) میزان رضایتمندی کاربران از روشهای ژئوفیزیکی از نظر کارشناس تکمیل کننده پرسشنامه (چپ) و از نظر موسسه و شرکت مربوطه (راست)



شکل (۲-۱) اطلاع از دستورالعمل FHWA (سمت چپ) و داشتن یک نسخه از این دستورالعمل (سمت راست)



شکل (۳-۱) میزان استفاده از روشهای ژئوفیزیکی (سمت چپ) و طول زمان استفاده از این روشها (سمت راست)

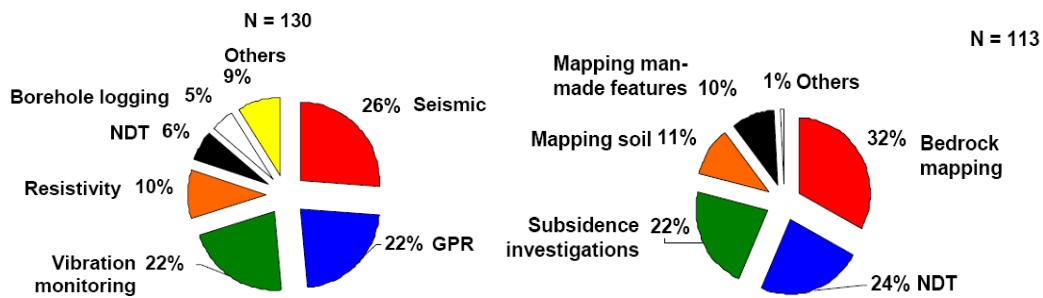
• حدود ۶۰ درصد از موارد بر روند افزایشی استفاده از ژئوفیزیک تاکید کرده و در ۲۵ درصد موارد افزایش ۵۰ تا ۱۰۰ درصدی را عنوان داشته اند.

• سه روش معمول ژئوفیزیکی مورد استفاده عبارت بوده اند از:

روش لرزه‌ای، روش رادار نفوذکننده GPR و ارتعاش سنجی. (شکل ۴-۱)

• سه کاربرد مهم ژئوفیزیک در مهندسی ژئوتکنیک عبارت بوده اند از:

تهیه نقشه سنگ کف، ترسیم نقشه خصوصیات نهشته‌های خاکی و نشست راهها (شکل ۴-۱).



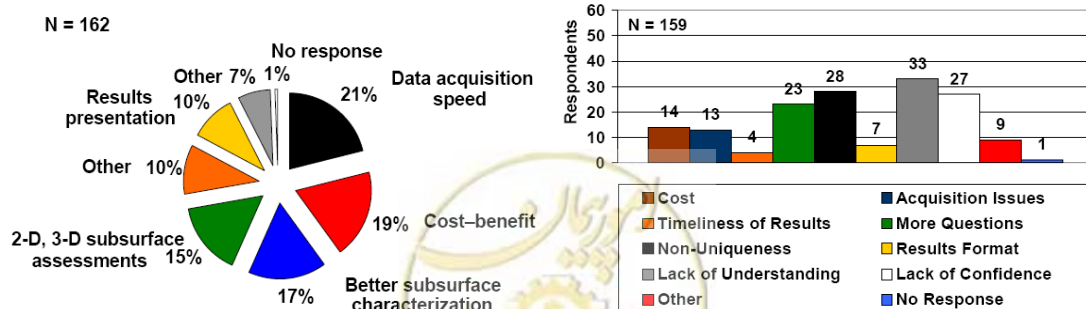
شکل (۴-۱) درصد استفاده از روشهای ژئوفیزیکی معمول (سمت چپ) و درصد کاربردهای این روشها (سمت راست)

• مزایای استفاده از روشهای ژئوفیزیکی عبارتند از:

سرعت بالا در به دست آوردن داده‌ها، صرفه اقتصادی و شناسایی بهتر شرایط زیرسطحی (شکل ۵-۱).

• موانع عمده استفاده از روشهای ژئوفیزیکی عبارتند از:

فقدان درک درست از روشهای ژئوفیزیکی، عدم یکتایی نتایج و عدم اعتماد به ژئوفیزیک (شکل ۵-۱)



شکل (۵-۱) مزایای استفاده از روشهای ژئوفیزیکی (سمت چپ) و معایب و موانع استفاده از آنها (سمت راست)

- سه مورد زیر می‌توانند در تشویق بیشتر کاربران به استفاده از ژئوفیزیک موثر باشند: آموزش، تجربه (و به اشتراک گذاشتن آن) و تدوین استانداردها
  - تعداد معدودی از موسسات بودجه سالیانه به مطالعات ژئوفیزیکی اختصاص داده و ارزش بیشتر پروژه‌ها کمتر از ۱۰۰۰۰ دلار بوده است.
  - نسبت مطالعات موفق به ناموفق ۷ به ۱ بوده است
- در یک جمع‌بندی کلی تهیه کنندگان گزارش فوق بر این عقیده‌اند که بیشتر متخصصان علوم زمین و مهندسان از مزایای روشهای ژئوفیزیکی اطلاعات ناکافی دارند. در صورتی که تجربیات موسسات مختلف در دسترس عموم قرار داده شود و فرصت‌های آموزشی برای موسسات و مهندسان درگیر در صنعت حمل و نقل فراهم گردد مزایای این روشها بهتر شناخته شده و به استفاده بیشتر و منظم از این روشها منجر خواهد شد.

## ۱-۵- راهنمای تهیه گزارشهای ژئوفیزیکی برای مطالعات زیست محیطی و زمین شناسی مهندسی - شورای ثبتی (Board of Registration) زمین شناسان و ژئوفیزیکدانها در ایالت کالیفرنیا

این راهنما جنبه الزام‌آور و مقررات ندارد و سابقه آن به هشت یادداشت ارائه شده در مجله زمین‌شناسی کالیفرنیا (California Geology) توسط بخش زمین شناسی و معدن کالیفرنیا در فاصله سالهای ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۵ برمی‌گردد. چهار راهنمای تهیه گزارش تهیه شده در این راستا توسط کمیته مشاور فنی این شورا در فاصله سالهای ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۹ عبارتند از:

- راهنمای تهیه گزارش زمین‌شناسی مهندسی
  - راهنمای تهیه خطر زلزله و گسلش
  - راهنمای تهیه گزارش مطالعات ژئوفیزیک
  - راهنمای تهیه گزارش بررسیهای آب‌های زیرزمینی
- این راهنما دارای سه بخش زیر است

### I مقدمه

بخش مقدمه به هدف تهیه راهنما و محدوده کاربرد آن اشاره دارد. این راهنما، در واقع چهارچوب کلی یک گزارش مناسب را معرفی می‌کند و جهت کمک به کسانی که در تهیه گزارشهای ژئوفیزیکی با کاربرد در پروژه‌های زمین‌شناسی مهندسی و زیست محیطی، سر و کار دارند تهیه شده است. این راهنما چشم‌انداز کلی کار را توصیف کرده و براساس آن چهارچوبی برای تهیه گزارش توصیه می‌کند. از اینرو همه تکنیک‌ها و موضوعات را پوشش نمی‌دهد و نیز تکنیک‌های شرح داده شده یا موضوعات مورد بحث الزاماً در همه پروژه‌ها مطرح نخواهد بود.

### II شرح مسئولیت امضاء کننده گزارش ژئوفیزیک

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی نیازمند دانشی از اصول زمین‌شناسی و فیزیک و همچنین شناخت محدودیت‌های روشهای ژئوفیزیکی، داده‌های جمع‌آوری شده و فرضیات و ابهامات تفسیر است. بنابراین باید تحت نظارت یک ژئوفیزیکدان با تجربه که مسئولیت تفسیرها را بپذیرد و گزارش را امضاء نماید، انجام گیرد.



### III) محتویات گزارش

#### الف) اطلاعاتی که بطور معمول در گزارش وجود دارند:

- ۱- نمای کلی و اهداف پروژه و نیز محدودیت‌های رخ داده در انجام مطالعات باید قید گردد. نوع گزارش که آیا گزارش مرحله‌ای، پیشرفت کار یا پایانی است و نیز چگونگی استفاده از گزارش، به عنوان مثال برای برنامه‌ریزی اولیه، طراحی، وضع مقررات و غیره بایستی مورد اشاره قرار گیرد.
- ۲- در صورت قابل کاربرد بودن، خلاصه‌ای در رابطه با تاریخچه سایت، کاربری سایت، قوانین مربوطه و هرگونه اطلاعاتی که برای خواننده مفید باشد، نوشته می‌شود.
- ۳- ماهیت و منابع اطلاعات سطحی و زیرسطحی زمین‌شناسی، مهندسی و ژئوفیزیکی منتشر شده و نشده در دسترس. توضیحات مناسب، امکان ارزیابی و اعتبارسنجی اطلاعات موجود را فراهم می‌آورد.
- ۴- توضیح کاملی به طور خلاصه از مواد (Material) تشکیل دهنده محل مورد شناسایی اعم از خاکها، سنگها و غیره، همراه با اطلاعاتی از شرایط هیدروژئولوژیکی مانند عمق سطح آب، تعداد آبخوانها و غیره. اگر گزارش ژئوفیزیک مستقل از گزارشهای زمین‌شناسی و مهندسی ارائه می‌شود، می‌تواند شامل توضیح کافی از سازندها و ساختارهای زمین‌شناسی و غیره همراه با ذکر منابع این اطلاعات باشد اما در صورتیکه گزارش ژئوفیزیک بخشی از یک گزارش زمین‌شناسی یا مهندسی است تکرار این توضیحات در بخش ژئوفیزیکی غیرضروری است.
- ۵- موقعیت و ابعاد محدوده‌های مورد مطالعه
- ۶- نوع روش یا روشهای ژئوفیزیکی مورد استفاده. تشریح دقیق روش اجرا و روشهای کنترل کیفیت مانند کالیبراسیون باید در متن گزارش یا در پیوستها صورت پذیرد. این بخش باید توضیح‌دهنده دلایل استفاده از روش یا روشهای ژئوفیزیکی استفاده شده که معمولاً عبارت از فراهم آوردن پوشش اطلاعاتی مناسب از منطقه، دقت و قدرت تفکیک روشها یا موارد دیگر هستند، باشد.
- ۷- محدودیت‌هایی که ممکن است بر کیفیت داده‌های ژئوفیزیکی تاثیر بگذارد. این محدودیتها ممکن است شامل منابع مزاحم موجود در درون یا مجاورت محدوده مورد مطالعه (مانند طوفانهای مغناطیسی، خطوط لوله، خطوط برق، ساختمانها، تردد کامیونها، باد و غیره) باشد. محل سرچشمه‌های نوفه و تداخل محلی می‌تواند در نقشه موقعیت عملیات ژئوفیزیکی نمایش داده شده و چگونگی تاثیر این منابع بر نتایج مفصلاً تشریح گردد.
- ۸- مواردی از قبیل تیم انجام دهنده عملیات، زمان انجام آن و چگونگی اجرا (شامل مستقر کردن ایستگاهها، شبکه بندی، مسیرهای پیمایش و غیره) از اجزاء دیگر گزارش است.
- ۹- نوع، ساخت، مدل، میزان حساسیت، کالیبراسیون و محدودیت‌های ابزار و دستگاههای ژئوفیزیکی مورد استفاده.
- ۱۰- نقاط قوت و ضعف روشهای مورد استفاده.

#### ب) موارد ویژه مربوط به اجرای عملیات که باید علاوه بر موارد فوق در گزارش آورده شوند:

- ۱- بحثی درباره اینکه چگونه اجرای عملیات با داده‌های موجود ارتباط داده شده است (برای مثال با بسط پیمایش در مناطق مجاور)
- ۲- نقشه‌های پایه زمین‌شناسی و/یا توپوگرافی در مقیاس مناسب و بیان شفاف منبع این نقشه‌ها. برای برداشتهای بزرگ مقیاس تر نقشه‌های توپوگرافی U.S.G.S ترجیح داده می‌شود.
- ۳- نقشه‌هایی که بر روی آنها خطوط پیمایش و/یا نقاط برداشت و وضعیت آن نسبت به نقاط از پیش تعیین شده

- یا نقاط شاخص دائمی (Permanent landmarks) در صورتی که نقاط از پیش تعیین شده در دسترس نباشند به روشنی مشخص شود. موقعیت نمونه‌های گردآوری شده برای آزمونها یا اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باید در همان نقشه یا نقشه‌های هم‌مقیاس با آن نمایش داده شوند.
- ۴- پیوستی که شامل داده‌های صحرایی مربوطه، آماده سازی داده‌ها (Reduction of data) و محاسبات به کار رفته باشد. این بخش باید دربردارنده دلایل استفاده از یک روش پردازش مشخص باشد. این پیوست همچنین منبعی برای ساده‌سازی‌های کامپیوتری و مدلسازیها (شامل نام برنامه، محل توسعه یا انتشار، نسخه‌های مختلف برنامه و نوع کامپیوتر مورد استفاده) است.
- ۵- تشریح هر محدوده‌ای از مقادیر که در هر ایستگاه ثبت شده به همراه دلایل انتخاب مقدار مشخصی برای استفاده در آنالیزها و تفاسیر.
- ۶- مطابقت یا عدم مطابقت نتایج مطالعات ژئوفیزیکی با ساختارهای زمین‌شناسی یا واحدهای هیدرولوژیک.
- ۷- توضیحی درباره آزمونها و اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی تکمیلی، در صورت استفاده، شامل روشها، نتایج و دلایل انجام آنها. اگر این امور توسط سایر متخصصین انجام شده، امضای آنها برای مسئولیت‌پذیری باید ارائه گردد.
- ۸- نقشه‌هایی از داده‌ها و نتایج ژئوفیزیکی در مقیاس و دقت خوب برای ارزیابی مناسب. توضیح نتایج و نتیجه‌گیری باید شامل ارجاع مناسب به نقشه‌ها باشد به گونه‌ای که موقعیت آنها در روی زمین قابل تعیین باشد.
- ۹- مقاطع عرضی براساس داده‌های ژئوفیزیکی با پیاده کردن نقاطی که اطلاعات زمین‌شناسی و مهندسی زیرسطحی برای آنها در دسترس بوده یا از اطلاعات جانبی که در مقطع آورده شده باشند، تهیه می‌گردند. این مقاطع عرضی همچنین نشان دهنده توپوگرافی و موقعیت داده‌های گردآوری شده هستند، چه این موقعیتها بر روی مقطع مورد نظر قرار داشته باشند یا در مناطق مجاور مقطع قراردادسته باشند و بر روی صفحه مقطع مورد نظر آورده شده باشند.
- ۱۰- اگر اطلاعات زمین‌شناسی و مهندسی زیرسطحی در دسترس نباشند، عدم وجود آنها با توضیحی گویا نوشته می‌شود.
- ۱۱- بحثی درباره اعتبار تفسیرهای ژئوفیزیکی انجام شده، و تفسیرهای محتمل جایگزین در جایی که قابل کاربرد باشند، ارائه می‌گردد.
- ۱۲- توصیه برداشت‌های ژئوفیزیکی تکمیلی در صورت لزوم. توصیه‌ها همچنین باید در تناسب با محل‌های ترانسه‌زنی، گمانه‌زنی یا چاهها باشد.
- ۱۳- ذکر منابع.

### ۱-۶- نتایج حاصل از بررسی منابع علمی و فنی

همانگونه که در بخشهای قبل اشاره شد مکتوبات متنوع و متعددی در زمینه کاربرد روشهای ژئوفیزیکی در پروژه‌های مهندسی مختلف وجود دارد که تشریح مفصل و تک تک آنها هدف این پژوهش نیست و مفید فایده گزارش نیز نخواهد بود. آنچه اهمیت دارد ارائه نتایج این بررسی در قالبی است که در ادامه پروژه راهگشا باشد. در این راستا جمع‌بندی بررسی ادبیات فنی به شرح بندهای زیر ارائه می‌گردد.



### ۱-۶-۱- انواع روشهای ژئوفیزیکی متداول در صنعت راهسازی

طیف گسترده‌ای از روشهای ژئوفیزیکی ابداع گردیده است که هرکدام بر اساس اندازه‌گیری ویژگی خاصی از زمین عمل می‌کنند و از اینرو هر کدام توانایی خاص خود را دارند. روشهای متداول در مباحث مربوط به صنعت راهسازی به نقل از Anerson (۲۰۰۶)، ۱۲ روش به شرح جدول ۱-۵ هستند. این ۱۲ روش به علاوه روشهای دیگر در پروژه‌های مهندسی دیگر نیز کاربرد دارند. اگر چه هر کدام از این ۱۲ روش به تناسب نیاز پروژه‌ها مورد استفاده بوده‌اند اما نتایج مطالعه NCHRP357 منتشر شده در آمریکا نشان داد که روشهای لرزه‌ای، رادار نفوذکننده و ثبت ارتعاشات محیطی به عنوان پرکاربردترین روشها در آژانسهای مرتبط با پروژه‌های راهسازی هستند.

### ۱-۶-۲- موارد کاربرد روشهای ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی

جمع‌بندی دیگری که از بررسی ادبیات فنی می‌توان به آن رسید موارد استفاده از روشهای ژئوفیزیکی بر حسب ویژگیهای هر روش می‌باشد. این موضوع بویژه از آن جهت حائز اهمیت است که می‌تواند به عنوان راهنمایی در انتخاب روش مناسب با توجه به مسائلی که با آن روبرو هستیم راهگشا باشد. Anderson و همکاران (۲۰۰۸) موارد متداول استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در مهندسی راه را در ۴ دسته به شرح زیر تقسیم بندی کرده‌اند:

- ۱- ویژگیهای زیرسطحی: عمق سنگ کف، نوع سنگ، مرز لایه‌ها، سطح آب، جریان آب زیرزمینی، تعیین محل شکستگیها، زونهای ضعیف، رس های متورم شونده و غیره.
  - ۲- خصوصیات مهندسی مواد سازنده زمین: سختی، دانسیته، مقاومت الکتریکی، تخلخل و غیره.
  - ۳- مسائل مربوط به فرورانش در بزرگراهها: شناسایی غارها و حفرات ایجاد شده در زیر جاده ها به دلیل فرو چاله‌ها، معادن متروکه و غیره.
  - ۴- شناسایی و تعیین موقعیت اشیاء و اجسام مصنوعی: تجهیزات مدفون، مخازن زیرزمینی و غیره.
- جداول ۱-۶ و ۱-۷ به ترتیب به نقل از Anderson و همکاران (۲۰۰۸) و ASTM (D6429)، فهرست مفصلی از کاربردهای بالقوه روشهای متداول ژئوفیزیکی را بیان می‌کنند.



جدول (۵-۱) دوازده روش ژئوفیزیکی متداول در شناسایی های ژئوتکنیکی (Anderson, 2006)

مورد استفاده از روش در ژئوتکنیک	مدل خصوصیات فیزیکی حاصله (کاربرد در ژئوتکنیک)	خصوصیات فیزیکی موثر در روش	پارامتر مورد اندازه گیری	روش ژئوفیزیکی
پروفیل زمین شناسی	مدل سرعت موج-عمق، اغلب با تفسیر لایه بندی	سرعت موج (به عنوان تابعی از دانسیته و مدول الاستیک)	زمان سیرها و دامنه های انرژی لرزه ای انکساری (امواج S یا P)	لرزه نگاری انکساری کم عمق (Refr)
پروفیل زمین شناسی	مدل سرعت موج-عمق، اغلب با تفسیر لایه بندی	دانسیته و سرعت موج (سرعت موج تابعی از دانسیته و مدول الاستیک)	زمان سیرها و دامنه های انرژی لرزه ای انعکاسی (امواج S و P)	لرزه نگاری انعکاسی کم عمق (Refl)
پروفیل زمین شناسی	مدل تغییرات مکانی سرعت موج	دانسیته و سرعت موج (سرعت موج تابعی از دانسیته و مدول الاستیک)	زمان سیرها و دامنه های انرژی لرزه ای (امواج S و P)	توموگرافی لرزه ای بین چاهی Seis. Tomo.
پروفیل زمین شناسی	سرعت موج برشی-عمق، اغلب با تفسیر لایه بندی	سرعت موج (تابعی از دانسیته و مدول الاستیک)	زمان سیرهای امواج سطحی تولید شده توسط یک منبع فعال (مانند ضربات چکش)	آنالیز چند کاناله امواج سطحی (MASW)
پروفیل زمین شناسی	مدل سرعت موج برشی-عمق، با تفسیر لایه بندی	سرعت موج (تابعی از دانسیته و مدول الاستیک)	زمان سیرهای امواج سطحی بدون نیاز به منبع انرژی	روش انکساری میکروترمور (ReMi)
پروفیل زمین شناسی	مدل سرعت الکترومغناطیس با عمق، با تفسیر لایه بندی	ضریب دی الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی، قابلیت هدایت و سرعت الکترومغناطیس	زمان سیرها و دامنه انرژی پالسی الکترومغناطیس بازتابیده	رادار نفوذکننده (GPR)
مورد استفاده از روش در ژئوتکنیک	مدل خصوصیات فیزیکی حاصله (کاربرد در ژئوتکنیک)	خصوصیات فیزیکی موثر در روش	پارامتر مورد اندازه گیری	روش ژئوفیزیکی
پروفیل زمین شناسی - هیدرولوژی	قابلیت هدایت با عمق، با تفسیر لایه بندی	هدایت و القای الکتریکی	پاسخ زمین به انرژی الکترومغناطیس طبیعی یا القایی	الکترومغناطیس (EM)
پروفیل زمین شناسی - هیدرولوژی	مقاومت الکتریکی با عمق، اغلب با تفسیر لایه بندی	مقاومت الکتریکی	اختلاف پتانسیل در پاسخ به جریان القایی	مقاومت الکتریکی (R.S.)
تغییرات مکانی محتوی رس (یا کانی سازی فلزی)	ظرفیت الکتریکی بر حسب عمق	ظرفیت الکتریکی	ولتاژ قطبش یا مقاومت وابسته به فرکانس زمین	قطبش القایی (IP)
مدل هیدرولوژی (نشست از بدنه سدها، خاکریزها و سنگ کف خرد شده و غیره)	تغییرات مکانی پتانسیل الکتریکی طبیعی زیرسطحی	پتانسیل الکتریکی طبیعی	اختلاف پتانسیل الکتریکی طبیعی	پتانسیل خودزا (SP)



ادامه جدول (۵-۱) دوازده روش ژئوفیزیکی متداول در شناسایی های ژئوتکنیکی (Anderson, 2006)

مورد استفاده از روش در ژئوتکنیک	مدل خصوصیات فیزیکی حاصله (کاربرد در ژئوتکنیک)	خصوصیات فیزیکی موثر در روش	پارامتر مورد اندازه گیری	روش ژئوفیزیکی
پروفیل یا نقشه زمین - شناسی (موقعیت گسلها، تغییرات عمق سنگ کف و غیره)	تغییرات مکانی حساسیت مغناطیسی زیرسطحی	حساسیت مغناطیسی و مغناطیس زایی پس ماند	تغییرات مکانی میدان ژئومغناطیسی	مغناطیس سنجی (M)
پروفیل یا نقشه زمین شناسی (موقعیت حفرات، تغییرات عمق سنگ کف و غیره)	تغییرات مکانی دانسیته، اغلب با تفسیر لایه بندی	دانسیته حجمی	تغییرات در شدت گرانش زمین	گرانی سنجی (G)

جدول (۶-۱) بعضی از کاربردهای بالقوه روشهای ژئوفیزیکی متداول (Anderson et al, 2008)

کاربرد	ReMi	MASW	Gra.	Mag.	SP	IP	Res.	EM	GPR	Seis.Tomo.	Refl.	Refr.
تهیه نقشه سنگ کف (عمق کمتر از ۱۰ متر)	الف	الف					ب	ب	الف		ب	الف
تهیه نقشه سنگ کف (عمق بیش از ۱۰ متر)	الف	الف					ب	ب		ب	الف	ب
تخمین محتوای کانی های رسی	ب	ب				ب	ب	الف				
تعیین موقعیت نهشته های شنی و ماسه های کم عمق	ب	ب						الف	الف			
تعیین موقعیت نهشته های شنی و ماسه های (شامل کانی های سنگین)				الف								
تعیین حجم مواد ارگانیکی در دریاچه های پر شده و ساختارهای کارستی	ب	ب	الف					الف			الف	الف
تهیه نقشه عمق سطح آب زیرزمینی							الف	الف	الف		الف- موج P	الف- موج P
تعیین عمق آب (شامل عمق آب شستگی پایه پلها)									الف			
تعیین مخروط افت آب زیرزمینی							ب	ب	الف		ب	ب
تهیه نقشه جهت یابی شکستگیها										الف		الف
تعیین محدوده زمین لغزش ها	ب	ب					الف	الف	ب	الف		الف





ادامه جدول (۱-۶) بعضی از کاربردهای بالقوه روشهای ژئوفیزیکی متداول (Anderson et al, 2008)

کاربرد	ReMi	MASW	Gra.	Mag.	SP	IP	Res.	EM	GPR	Seis. Tomo.	Ref.	Refr.
تعیین مسیر جریان سیالات زیرسطحی					الف							
تهیه نقشه گسترش آلاینده‌ها					ب		ب	الف	الف			
تهیه نقشه کاهش و افزایش وسعت زمین‌های شور در طول زمان							الف	الف				
تعیین موقعیت اجسام فرومغناطیس در زیر سطح آب				الف					الف			
تهیه نقشه توپوگرافی سنگ کف (عمق > ۱۰ متر)	الف	الف	ب				ب	ب	الف		الف	
تهیه نقشه توپوگرافی سنگ کف (عمق < ۱۰ متر)	الف	الف	ب				ب	ب			الف	ب
تهیه نقشه ساختارهای زیر سنگ کف	ب	ب					ب	ب	ب		الف	ب
شناسایی سطوح تماس لایه‌های زمین-شناسی پرشیب (عمق > ۱۰ متر)							الف	الف	الف		الف	
شناسایی سطوح تماس لایه‌های زمین-شناسی پرشیب (عمق < ۱۰ متر)				ب			ب	ب		ب	الف	ب
تهیه نقشه امتداد شکستگیها در سنگ کف نزدیک به سطح زمین									الف		الف	
تعیین مسیر جریان سیالات زیرسطحی					الف							
تهیه نقشه گسترش آلاینده‌ها					ب		ب	الف	الف			
تهیه نقشه کاهش و افزایش وسعت زمین‌های شور در طول زمان							الف	الف				
تعیین موقعیت اجسام فرومغناطیس در زیر سطح آب				الف					الف			
تهیه نقشه توپوگرافی سنگ کف (عمق > ۱۰ متر)	الف	الف	ب				ب	ب	الف		الف	
تهیه نقشه توپوگرافی سنگ کف (عمق < ۱۰ متر)	الف	الف	ب				ب	ب			الف	ب



ادامه جدول (۱-۶) بعضی از کاربردهای بالقوه روشهای ژئوفیزیکی متداول (Anderson et al, 2008)

کاربرد	ReMi	MASW	Gra.	Mag.	IP	Res.	EM	GPR	Seis. Tomo.	Refl.	Refr.
تهیه نقشه ساختارهای زیر سنگ کف	ب	ب				ب	ب	ب		الف	ب
شناسایی سطوح تماس لایه‌های زمین- شناسی پرشیب (عمق > ۱۰ متر)						الف	الف	الف			الف
شناسایی سطوح تماس لایه‌های زمین- شناسی پرشیب (عمق < ۱۰ متر)				ب		ب	ب		ب	الف	ب
تهیه نقشه امتداد شکستگیها در سنگ کف نزدیک به سطح زمین								الف			الف
شناسایی مناطق دارای نقطه ضعف بالقوه (مناطق خردشده و گسل ها، عمق > ۱۰ متر)				ب		ب	ب	الف	ب		الف
شناسایی مناطق دارای نقطه ضعف بالقوه (مناطق برشی و گسل ها، عمق < ۱۰ متر)				ب		ب	ب		الف	ب	ب
شناسایی فروچاله‌های کارستی نزدیک سطح زمین و تعیین گسترش جانبی به هم ریختگی زمین ناشی از آنها			ب			ب	ب	الف		الف	الف
تهیه نقشه حفرات خالی و تونلها (عمق > ۱۰ متر)	ب	ب	ب			الف	ب	الف	ب	ب	ب
تهیه نقشه حفرات خالی و تونلها (عمق < ۱۰ متر)	ب	ب	ب			ب	ب		الف	الف	ب
تهیه نقشه حفرات و تونلهای پر شده با آب	ب	ب						ب	الف	الف- موج P	ب- موج P
تهیه نقشه حفرات و تونلهای پر شده با رس						ب	ب		الف	الف	ب
تخمین سهولت حفاری و گودبرداری	ب	ب							ب		الف
مطالعات یکپارچگی پی ها	الف	الف						الف	ب		الف
مطالعات ساختگاه سدها	الف	الف				ب	ب	الف	الف	الف	الف
شناسایی لوله‌های جدار فلزی مدفون در چاهها				الف				الف			



ادامه جدول (۱-۶) بعضی از کاربردهای بالقوه روشهای ژئوفیزیکی متداول (Anderson et al, 2008)

کاربرد	ReMi	MASW	Gra.	Mag.	SP	Res.	EM	GPR	Seis. Tomo.	Refl.	Refr.
تعیین محل خطوط لوله و سایر اشیای فرومغناطیس مدفون					الف			الف	الف		
تعیین موقعیت تجهیزات غیرمغناطیسی مدفون								الف	الف		
تهیه نقشه محدوده‌های باستانی (اشیاء فرومغناطیس، گورستانها و غیره)				الف			الف	الف			
تهیه نقشه محدوده‌های باستانی (اشیاء غیرمغناطیسی - حفرات، گورستانها و غیره)								الف			
شناسایی حفرات زیر روسازی جاده‌ها								الف			
شناسایی و مشخص کردن حدود بخشهای نازک بستر و اساس راه								الف			
شناسایی و کنترل تراکم نامناسب در زیراساس جاده	ب	ب						الف			
شناسایی قسمتهایی از بستر راه با درصد رطوبت بالای غیرمعمول، به عنوان پیش نشانگر برای ایجاد گودال و دستانداز								الف			
تعیین موقعیت و تهیه نقشه محل‌های دفن زباله	ب	ب		الف		ب	الف	ب			ب
برآورد برجای ویژگیهای سنگها (مدول حجمی، برشی و یانگ)	الف	الف							الف		الف
برآورد برجای ویژگیهای سنگها (اشباع شدگی، تخلخل، نفوذپذیری)	ب	ب			الف	الف					
تعیین چگالی برجای سنگها			الف								
تعیین ثابت دی الکتریک سنگها								ب			
تهیه نقشه معادن رو باز متروکه پر شده	ب	ب	ب	ب		ب	ب	ب		الف	الف
تهیه نقشه معادن زیرزمینی متروک					ب				ب	الف	
شناسایی شفتهای معادن متروک				ب		ب		الف	ب	ب	ب

الف: کاربرد اصلی ب: کاربرد فرعی

Refr.: لرزه‌ای انکسار ی؛ Refl.: لرزه‌ای انعکاسی؛ Seis. Tomo.: توموگرافی لرزه ای بین چاهی؛ GPR: رادار نفوذکننده؛ EM: الکترومغناطیس؛ Res.:

مقاومت الکتریکی؛ IP: پلاریزاسیون القایی؛ Mag.: مغناطیس سنجی؛ Gra. گرانی سنجی؛ MASW: آنالیز چندگانه امواج سطحی؛ ReMi: میکروترمور انکساری.



جدول (۷-۱) انتخاب روش مناسب ژئوفیزیکی بر حسب مورد استفاده به نقل از ASTM (D6429)

روش های ژئوفیزیکی											کاربرد	
سایر روشها					روش های الکترومغناطیس			روش های الکتریکی		روش لرزه نگاری		
گرانی سنگی	مغناطیس سنگی	GPR	فلزیابی	Pipe/Cable Locator	VLF	حوزه زمان	حوزه فرکانس	SP	مقاومت الکتریکی DC	انعکاسی		انکساری
شرایط طبیعی زمین شناسی و هیدرولوژی												
		الف			ب	الف	ب		الف	ب	الف	شناسایی خاک و لایه- های تحکیم نیافته
		ب				ب			ب	الف	ب	شناسایی لایه های سنگی
ب		الف			ب	ب	ب		ب	الف	الف	تعیین عمق سنگ کف
		الف			ب	ب	ب		ب	الف	الف	تعیین عمق سطح آب زیرزمینی
ب	ب	ب			الف	ب	الف		ب	ب	ب	تعیین زونهای گسلی و شکستگی
الف		الف				ب	ب		ب	ب	ب	تعیین حفرات و فروچاله ها
							ب		الف		الف	تعیین ویژگیهای خاکها و سنگها
		ب					ب	الف	ب			تعیین محل نشست از سدها و آبگیرها
ب	الف	الف					الف		ب	ب	ب	بررسی محدوده های باستان شناسی
	ب	الف	ب	ب			الف		ب			شناسایی در مسائل حقوقی پروژه ها

الف : انتخاب اول ب : انتخاب جایگزین \*: شرایط زمین شناسی و هیدرولوژی طبیعی نیز برای تعیین مسیر جریان آلاینده ها کنترل شود.



ادامه جدول (۷-۱) انتخاب روش مناسب ژئوفیزیکی بر حسب مورد استفاده به نقل از ASTM (D6429)

روش های ژئوفیزیکی											کاربرد	
سایر روشها					روش های الکترومغناطیس			روش های الکتریکی		روش لرزه نگاری		
گرانی سنجی	مغناطیس سنجی	GPR	فلزیابی	Pipe/Cable Locator	VLF	حوزه زمان	حوزه فرکانس	SP	مقاومت الکتریکی DC	انعکاسی		انکساری
آلاینده های غیر زیستی												
		ب			ب	الف	الف		الف			بررسی شیرابه های محل های دفن زباله
		ب			ب	الف	الف		الف			بررسی نفوذ آب شور
							الف		الف			بررسی شور شدن خاک
آلاینده های زیستی												
		ب				ب	ب		ب			بررسی فازهای مایع غیرآبدار سبک
		ب				ب	ب		ب			بررسی فازهای محلول در آب*
		ب				ب	ب		ب			بررسی فازهای مایع غیرآبدار سنگین*
بررسی اشیاء و اجسام مصنوعی دفن شده												
		الف	ب	الف			ب					بررسی موقعیت تجهیزات
	الف	الف	الف	الف			الف					بررسی مخازن و فضاهای استوانه ای مدفون
	الف	ب	الف									بررسی محدوده مهمات مدفون
	الف		ب	ب			ب					بررسی محدوده چاههای رها شده
		الف				ب	الف		ب		ب	بررسی مرز ترانشه ها و محل های دفن زباله

الف : انتخاب اول ب : انتخاب جایگزین \*: شرایط زمین شناسی و هیدرولوژی طبیعی نیز برای تعیین مسیر جریان آلاینده ها کنترل شود.





## فصل دوم

---

وضعیت استفاده از ژئوفیزیک  
در پروژه‌های راهسازی کشور







## ۲-۱- مقدمه

ارائه دستورالعمل مناسب برای مطالعات ژئوفیزیکی در پروژه‌های راهسازی نیازمند شناخت وضع موجود و کم و کیف استفاده از این روشها در حال حاضر در کشور است. به همین جهت در راستای بررسی منابع علمی و فنی وضعیت استفاده از ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی در کشور در این بخش ارائه می‌گردد. در ابتدا ضمن مرور مختصر آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های موجود، موارد مهمتر مورد بررسی قرار گرفته و سپس روش تعریف و انجام پروژه‌های ژئوفیزیکی در مهندسين مشاور بر اساس تحقیق پرسشنامه‌ای مورد اشاره قرار خواهند گرفت.

## ۲-۲- دستورالعمل‌ها و راهنماهای مهم کشور در خصوص مطالعات ژئوفیزیکی

در جدول ۲-۱ لیستی از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های منتشر شده در داخل کشور که انتظار می‌رفت بخشی از آنها به مطالعات ژئوفیزیک اختصاص داده شود ارائه شد. مطابق با این جدول، منابع منتشر شده در این خصوص، شامل مجموعه ۱۲ استاندارد منتشر شده توسط شرکت مدیریت منابع آب (وزارت نیرو) و شرح خدمات مطالعات ژئوفیزیکی منتشر شده توسط سازمان برنامه و بودجه کشور است. استانداردهای منتشره توسط مدیریت منابع آب ایران برای استفاده در صنعت آب بوده است با این حال می‌تواند در مطالعات مربوط به راهسازی نیز مورد توجه قرار گیرند.

به جز منابع بالا، در ارتباط با پروژه‌های راهسازی عملاً هیچ گونه دستورالعملی که بطور مستقیم به روشهای ژئوفیزیکی اختصاص یافته باشد، وجود ندارد، اگرچه در بعضی از دستورالعمل‌های کلی‌تر مرتبط با بررسیها و شناسایی-های زیرسطحی اشاره‌های مختصر و کلی به استفاده از ژئوفیزیک نیز شده است. از جمله این موارد عبارتند از: راهنمای تهیه گزارش توجیه طرحهای راهسازی، شرح خدمات مطالعات راه فرعی، شرح خدمات مطالعات پل و شرح خدمات مطالعات مرحله اول و دوم تونل.

در ادامه، با توجه به کاربرد گسترده‌تر روشهای ژئوالکتریک و لرزه‌ای، از میان استانداردهای منتشر شده توسط مدیریت منابع آب، استانداردهای مرتبط با این دو روش و نیز شرح خدمات منتشر شده به منظور مطالعات ژئوفیزیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

### ۲-۲-۱- ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات الکتریک با روش مقاومت ویژه

این استاندارد توسط سازمان برنامه و بودجه وقت در سال ۱۳۷۵ به منظور ساماندهی مطالعات ژئوالکتریک در مهندسی آب تهیه شده است و در آن استانداردهای دو روش الکتریک شامل گمانه زنی الکتریک و پروفیل زنی الکتریک مورد اشاره قرار گرفته‌اند. این استانداردها شامل: برنامه‌ریزی، اجرا و تهیه گزارش است. استاندارد برنامه‌ریزی مشتمل بر: مدارک مورد نیاز، توصیه در انتخاب آرایه، انتخاب فاصله برداشت و پارامترهای اندازه‌گیری است. استاندارد اجرای پروژه در برگیرنده: پیاده کردن نقاط برداشت، دستورالعملهایی مربوط به دستگاهها، تجهیزات و مقاومت الکترودی است.

استاندارد تهیه گزارش، با توجه به "استاندارد علامتها و مشخصه های نقشه های ژئوفیزیکی" و همخوانی با نقشه-های مقیاس بندی شده، براساس داده های صحرائی و تفسیر آنها شامل: توصیه هایی برای تهیه نقشه‌ها، مقاطع و نموداری الکتریک است.



## ۲-۲-۲- ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات لرزه‌نگاری با روش شکست مرزی

این استاندارد نیز توسط سازمان برنامه و بودجه وقت در سال ۱۳۷۵ منتشر شده است. در این استاندارد عملیاتی مورد نیاز برای بررسی و اندازه‌گیری‌های لازم متناسب با دامنه کار مشخص شده است. عملیاتی مورد بررسی به قرار زیر تعیین شده‌اند:

- تقسیم نقشه‌های مورد استفاده براساس کاربرد آنها در سه مقیاس: کوچک، متوسط و بزرگ.
  - تقسیم گونه‌های مطالعاتی براساس چگونگی محل به دو گونه: آبرفت و ساختگاه.
  - محدوده مطالعات براساس وسعت محدوده به سه گروه: منطقه‌ای، ناحیه‌ای و محلی، همخوان با مقیاس نقشه‌ها.
  - گستره مطالعات براساس اهداف مطالعه در سه گروه: شناسایی، تفصیلی و تکمیلی.
- در این استاندارد مطالعات لرزه‌نگاری با روش شکست مرزی برای دو شیوه برداشت‌های سطحی و برداشت‌های درون-چاهی استاندارد شده است. این استاندارد شامل: برنامه ریزی، اجرا و تهیه گزارش است. استاندارد برنامه ریزی شامل: مدارک مورد نیاز، توصیه در انتخاب آرایه مناسب، انتخاب فاصله برداشت و پارامترهای اندازه‌گیری است. استاندارد اجرا، دربرگیرنده پیاده کردن نقاط برداشت و دستورالعمل‌های مربوط به دستگاهها و تجهیزات است. تهیه گزارش نیز همانند استاندارد مطالعات الکتریکی با توجه به "استاندارد علامتها و مشخصه‌های نقشه‌های ژئوفیزیکی" ارائه شده است.

## ۲-۲-۳- شرح خدمات مطالعات ژئوفیزیکی

این شرح خدمات نیز توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی وقت تهیه شده است و طی آن به دو روش مقاومت ویژه و شکست مرزی پرداخته شده است. شرح خدمات شامل دو فصل بوده که هر فصل آن به یکی از دو روش مذکور اختصاص یافته است. در هر یک از فصول بدون پرداختن به جزئیات فنی، برنامه و هدفی که در هر روش می‌بایست دنبال گردد، در قالب بندهایی عنوان شده است. به عنوان مثال می‌توان به بندهای زیر در مورد گمانه زنی الکتریکی و لرزه نگاری سطحی اشاره نمود:

### گمانه‌زنی الکتریکی:

- تعیین مقیاس حدود تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی سنگ کف و لایه‌های آبرفتی موجود در منطقه مورد مطالعه با برداشت‌های گمانه‌زنی الکتریکی بر روی رخنمون سازندهای زمین شناسی (در صورت موجود بودن) و مجاور چاههایی که اطلاعات حفاری آن موجود باشد.
- تفکیک لایه‌های زیرزمینی در محل هر سونداژ براساس مقاومت ویژه الکتریکی آنها
- تهیه مقطعی ژئوالکتریک
- تفسیر لایه‌های یاد شده و تلفیق آنها با اطلاعات موجود زمین‌شناختی، حفاری، توپوگرافی و سایر اطلاعات موجود در جهت هدفهای مطالعه
- تعیین مجموع ضخامت لایه‌های آبرفتی در محل هر سونداژ و تعمیم آن در منطقه (تهیه نقشه هم ضخامت رسوبات آبرفتی) در صورت نیاز کارفرما
- تشخیص و تفکیک مناطق از نظر تراوایی، مقاومت ویژه الکتریکی و آیزایی برحسب نیاز و در حد امکانات روشهای مورد استفاده
- تشخیص شکستگی‌های احتمالی در محدوده مورد مطالعه در حد امکانات روش مورد استفاده
- بررسی و تحقیق در مورد ساختمان زمین‌شناختی سنگ کف (نقشه هم عمق سنگ کف) در صورت نیاز کارفرما



- تعیین معابر آبهای زیرزمینی در پروژه‌های بررسی آبهای زیرزمینی در حد امکانات روشهای مورد استفاده
- تفکیک مرز بین آبهای شور و شیرین زیرزمینی در مناطق دارای سفره‌های آب شور و در پروژه‌های مربوط به بررسی آبهای زیرزمینی
- تعیین مناطق کارستی و تفکیک آنها به زونهای آبدار و خشک در مطالعات منابع آب در سازندهای سخت و کارستی

### لرزه نگاری سطحی:

- تعیین مقیاس حدود تغییرات سرعت موجهای لرزه‌ای در سنگ کف و لایه‌های آبرفتی موجود در منطقه مورد مطالعه از طریق برداشتهای شکست مرزی بر روی رخنمون سازندهای زمین‌شناسی (در صورت موجود بودن) و مجاور گمانه‌هایی که اطلاعات حفاری آن موجود باشد.
- تفکیک لایه‌های زیرزمینی در امتداد مقطع‌های لرزه‌نگاری براساس سرعت سیر موج در آنها
- تعیین مدولهای کشسانی دینامیک لایه‌ها در صورت اندازه‌گیری سرعت موجهای P و S و در اختیار قرار دادن چگالی لایه‌ها از طرف کارفرما
- تهیه مقطع‌های لرزه‌ای شکست مرزی
- تفسیر لایه‌های یاد شده و تلفیق آنها با اطلاعات موجود زمین‌شناختی، حفاری، توپوگرافی و سایر اطلاعات موجود در جهت هدفهای مطالعه
- تعیین ضخامت لایه‌های آبرفتی در هر مقطع و تعمیم آن در منطقه (تهیه نقشه هم‌ضخامت رسوبات آبرفتی) در صورت نیاز کارفرما
- تشخیص شکستگی‌های احتمالی در محدوده مورد مطالعه در حد امکانات روش مورد استفاده
- بررسی و تحقیق در مورد ساختمان زمین‌شناختی سنگ کف (نقشه هم‌عمق سنگ کف) در صورت نیاز کارفرما
- تعیین مناطق کارستی و تفکیک آنها به زونهای آبدار و خشک در مطالعات منابع آب در سازندهای سخت و کارستی در حد امکانات روش مورد استفاده.

## ۲-۳- روش تعریف و انجام پروژه‌های ژئوفیزیکی در مطالعات راهسازی در کشور

آگاهی از نوع روشهای ژئوفیزیکی، میزان و نحوه استفاده از آنها در پروژه‌های راهسازی در داخل کشور با ارائه‌نمایی از وضعیت کنونی می‌توانست در تدوین دستورالعمل موضوع این تحقیق مفید واقع گردد. به این منظور و با توجه به عدم اطلاعاتی جامع در این زمینه تصمیم گرفته شد تا با طراحی پرسشنامه‌های مشابه با (Sirles 2006) از خود مهندسين مشاور در امور راهسازی و شرکتهای مشاور و پیمانکار در امور ژئوفیزیک استعلام گردد. در این راستا پرسشنامه‌ای تهیه شد (متن این پرسشنامه در انتهای فصل حاضر آورده شده است) و برای شرکتهای زیر ارسال گردید:

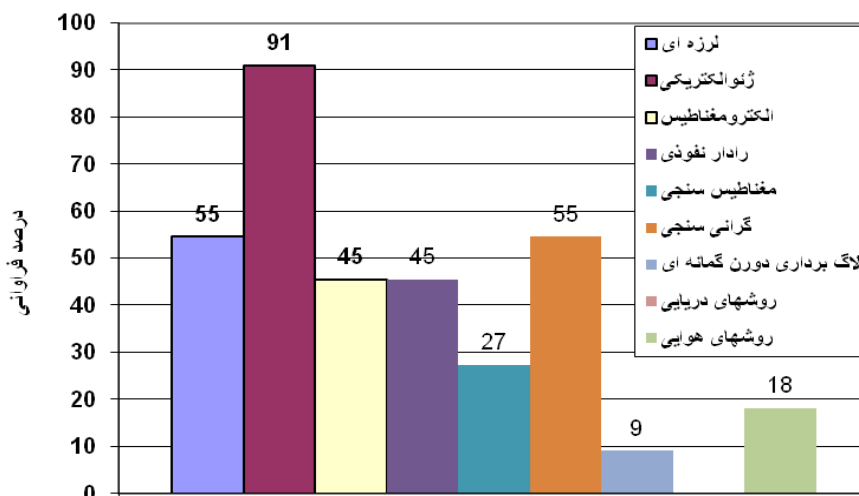
مهندسين مشاور هراز راه، مهندسان مشاور ایران استن، مهندسين مشاور پاسیلو، مهندسين مشاور برآیند، مهندسين مشاور گذرراه، مهندسين مشاور مترا در تهران، مهندسين مشاور فراشار آسیا، مهندسين مشاور وینه سار، مهندسين مشاور هگزا، طرح هفتم، مهندسين مشاور بهاب نواندیش، کاوش راه، مهندسين مشاور راه‌آهن راه، مهندسين مشاور طاق و پایه، مهندسين مشاور گارنو، بهین تردد پارس از شرکتهای دارای سابقه در پروژه‌های راهسازی و شرکتهای: تحقیق و گسترش صنایع معدنی پارس کانی، توسعه علوم زمین، زمین کاو گستر، مهندسين مشاور تهران پادیر، مهندسين مشاور خدمات زمین فیزیک، مهندسين مشاور ژرف پویا، مهندسين مشاور صحرا کاو از شرکتهای متخصص در مطالعات

ژئوفیزیک.

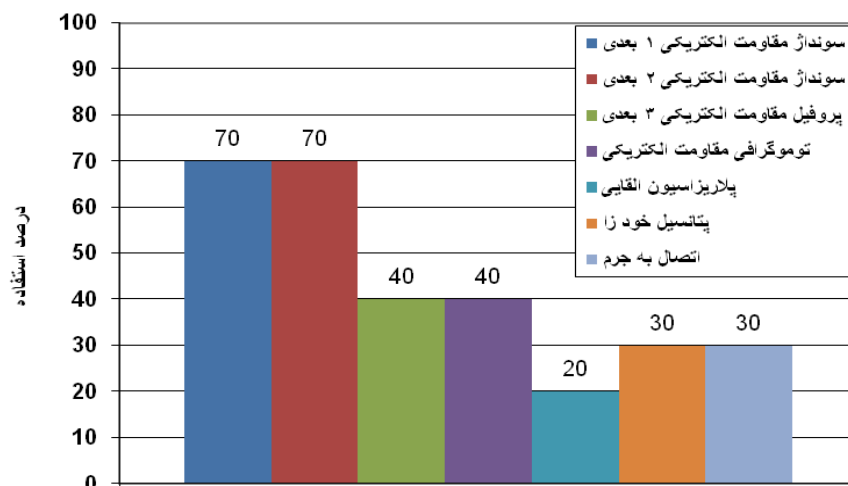
علیرغم پیگیری زیاد متاسفانه تنها ۱۱ شرکت پرسشنامه‌های درخواستی را تکمیل نمودند. از این ۱۱ شرکت، ۵ شرکت برای ۱۵ سال و بیشتر از روشهای ژئوفیزیکی استفاده نموده‌اند که نشان دهنده قدمت نسبتاً قابل توجه استفاده از این روشها در پروژه‌های راهسازی در کشور است. با این وجود تعداد پروژه‌ها به جز در مورد یک شرکت که بیش از ۱۰۰ پروژه در ۱۰ سال گذشته بوده، در اکثر موارد محدود و انگشت شمار بوده است. در پاسخ به این سوال که بیشتر در چه مواردی از پروژه‌های راهسازی، مطالعات ژئوفیزیک به شرکتها ارجاع شده است، به ترتیب به تونل، مسیر راه، پل، پی ساختمانها، زمین‌لغزش و شناسایی قناتها اشاره شده است. در هیچ یک از شرکتها، راهنما و دستورالعمل مشخصی مبنای مطالعات نبوده است. ۱۰ شرکت میزان رضایتمندی خود از روشهای ژئوفیزیکی را خوب و عالی توصیف کرده‌اند و تنها یک شرکت متوسط اعلام کرده است. در خصوص مزایا، معایب و موانع استفاده از روشهای ژئوفیزیکی، بیش از ۶۰ درصد شرکتها به چهار عامل سرعت برداشت داده‌ها، صرفه اقتصادی، امکان بررسی ۲ و ۳ بعدی زمین و ارزیابی بهتر خصوصیات زیرسطحی به عنوان مزایای این روشها اشاره کرده‌اند. بیش از نیمی از شرکتها، فقدان دانش کافی از روشهای ژئوفیزیکی را مهمترین مانع در استفاده از این روشها قید کرده‌اند. فقدان اطمینان و باقی ماندن سوالات بیشتر از شرایط زیرسطحی در مرتبه دوم از موانع استفاده از روشهای ژئوفیزیکی قرار گرفته‌اند. نکته قابل توجه در این میان قرار گرفتن کیفیت ارزیابی شرایط زیرسطحی در مقایسه با روشهای حفاری و نمونه‌گیری در میان هر دو دسته مزایا و معایب است که نشان دهنده این نکته است که نظر واحدی در این خصوص در میان استفاده‌کنندگان از روشهای ژئوفیزیکی وجود ندارد. سرعت زیاد برداشت داده‌ها، صرفه اقتصادی و شناسایی بهتر شرایط زیرسطحی را به عنوان مزایا و فقدان دانش کافی و عدم اطمینان به روشهای ژئوفیزیکی به عنوان مهمترین موانع، با نتایج مطالعه انجام شده در ایالات متحده مشابهت دارد.

بیشترین روشهای ژئوفیزیکی مورد استفاده در کشور شامل ژئوالکتریک با ۹۰ درصد استفاده و روشهای لرزه‌ای و گرانی‌سنجی هر یک با ۶۰ درصد استفاده بوده‌اند. روشهای دریایی در هیچ یک از شرکتها مورد تحقیق استفاده نشده است (شکل ۱-۲). مقایسه این نتایج با ایالات متحده نشان می‌دهد که در این کشور روشهای ژئوالکتریک و گرانی-سنجی به مراتب استفاده کمتری داشته و به جای آن روشهای جدیدتری مانند رادار نفوذکننده و ارتعاش‌سنجی رده‌های بالای استفاده را به خود اختصاص داده‌اند. اشکال ۲-۲، ۲-۳ و ۲-۴ به ترتیب درصد فراوانی استفاده از هر یک از روشهای ژئوالکتریک، لرزه‌نگاری و گرانی‌سنجی را نمایش می‌دهند. همانطوریکه مشاهده می‌شود سونداژ مقاومت الکتریکی ۱ بعدی و پروفیل مقاومت الکتریکی ۲ بعدی از روشهای ژئوالکتریک؛ روش بازتابی و روش درون چاهی و بین چاهی از روشهای لرزه‌نگاری و روش میکروگراویتی از روشهای گرانی‌سنجی بیشترین موارد استفاده را به خود اختصاص داده‌اند.

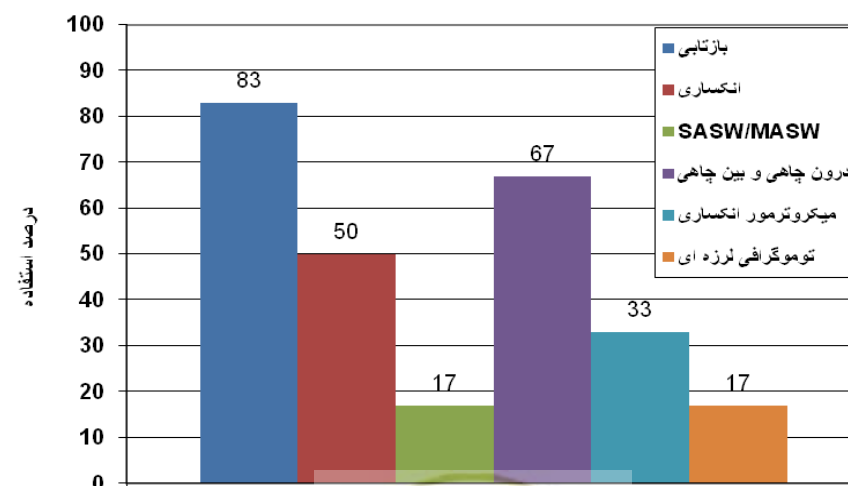




شکل (۱-۲) میزان استفاده از روشهای ژئوفیزیکی مختلف

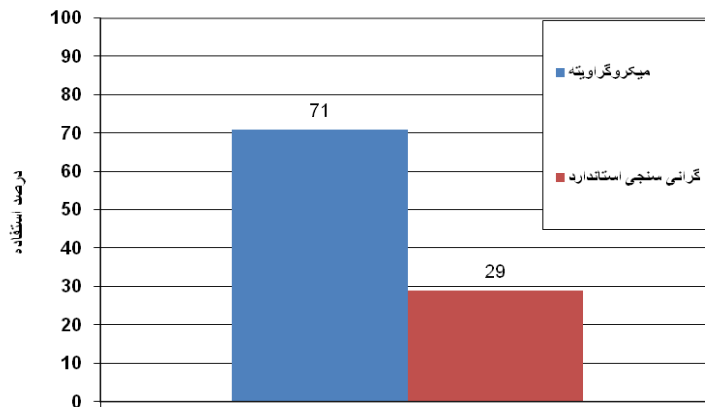


شکل (۲-۲) میزان استفاده از هر یک از روشهای ژئوالکتریک



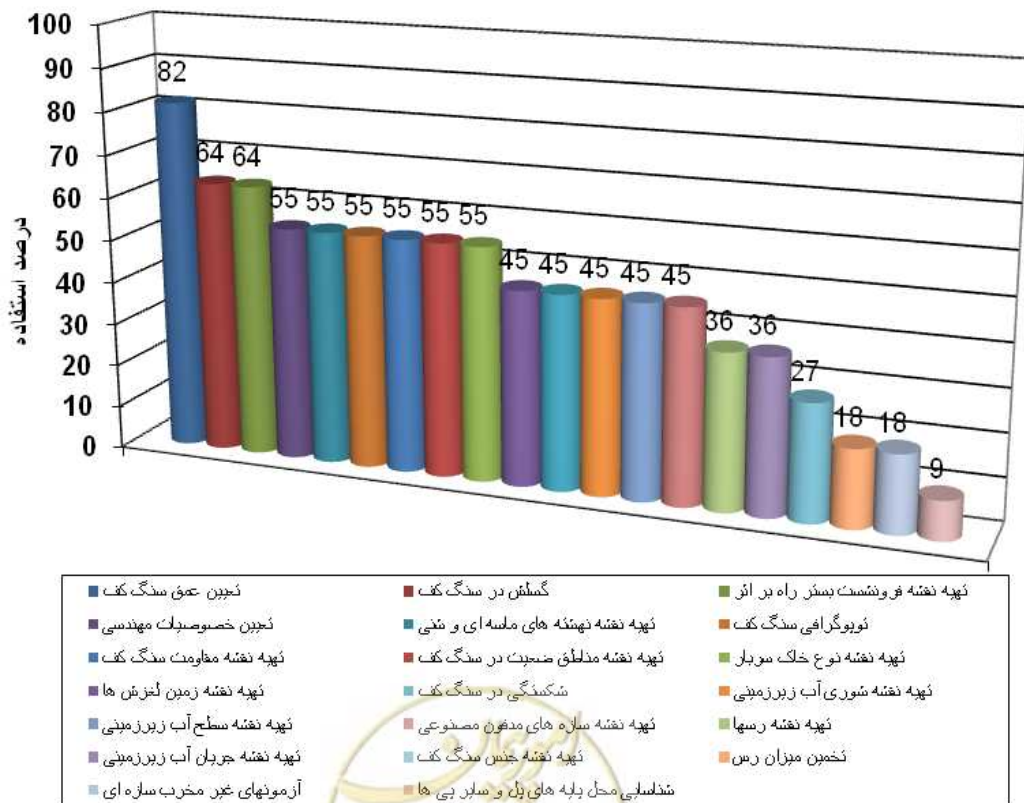
شکل (۳-۲) میزان استفاده از هر یک از روشهای لرزه‌ای





شکل (۲-۴) میزان استفاده از هر یک از روشهای گرانیتی سنجی

تعیین عمق سنگ کف، شناسایی گسلش در سنگ کف و تهیه نقشه فرونشست بستر راه؛ ۳ مورد از بیشترین اهداف جهت کاربردهای روشهای ژئوفیزیکی بوده که بیش از ۶۰ درصد شرکتها به آن اشاره نموده‌اند (شکل ۲-۵). در مطالعه انجام شده در ایالات متحده کاربردهای مورد استفاده در ژئوتکنیک شامل تهیه نقشه سنگ کف، تهیه نقشه نهشته‌های خاکی و نشست بستر راهها بوده که مورد اول و سوم آن با نتایج این تحقیق مشابه است. نکات قابل توجه از مقایسه این دو تحقیق یکی فراوانی میزان استفاده از روشهای ژئوفیزیک به عنوان آزمونهای غیرمخرب در ایالات متحده در مقایسه با ایران است، به طوریکه در ایالات متحده در رده دوم قرار گرفته در حالی که در ایران در رده ۱۹ می‌باشد و دیگری استفاده بیشتر این روشها در شناسایی گسلش در ایران است.



شکل (۲-۵) نوع کاربرد روشهای مختلف ژئوفیزیکی در شرکتهای مورد تحقیق

سه رویکرد مهمتر شرکتهای مورد تحقیق برای انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب به ترتیب عبارت‌اند از: توصیه کارشناس ژئوفیزیک شرکت، تجارب گذشته و توجه به استانداردهای ASTM و AASHTO و روش‌های انتخاب شده عموماً توسط کارشناس ژئوفیزیک، مدیر پروژه و مدیر شرکت یا بخش تأیید می‌شود. این نتایج نشان دهنده اهمیت نظر کارشناسان ژئوفیزیک در تصمیم‌گیری در خصوص چگونگی انجام مطالعات ژئوفیزیکی است.

## ۲-۴- پرسشنامه ارزیابی وضعیت موجود در کشور

همانطوریکه پیشتر نیز اشاره شد برای ارزیابی آماری وضعیت استفاده از ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی کشور پرسشنامه‌ای تهیه شده و برای شرکتهای مهندسی مشاور راهسازی و نیز شرکتهای ژئوفیزیکی ارسال گردید. در ادامه این پرسشنامه ارائه شده است:

۱. چه مدت است از روشهای ژئوفیزیکی در مطالعات راه استفاده می‌نمائید: سال
۲. حجم کارهای ارجاعی در زمینه مطالعات ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی به شرکت شما در ۱۰ سال اخیر چه میزان بوده است. (تعداد پروژه‌ها)
۳. در صورت امکان کارفرمایانی که در زمینه مطالعات ژئوفیزیک راه به شما مراجعه کرده‌اند را معرفی نمایید.
۴. آیا از دستورالعمل یا راهنمای مشخصی برای مطالعات ژئوفیزیک (در پروژه‌های راهسازی) استفاده می‌نمائید؟ لطفاً عنوان دستورالعمل یا راهنما را قید نمائید.
۵. بیشتر در چه مواردی از پروژه‌های راهسازی مطالعات ژئوفیزیک به شما ارجاع شده است؟ (تونل، پل، مسیر راه، شیروانیها، ابنیه دیگر) در صورت امکان به ترتیب فراوانی ارجاع کار ذکر گردد.
۶. براساس تجربیات شما، استفاده از نتایج ژئوفیزیک در مطالعات راهسازی چه میزان رضایت بخش است؟
۷. از نظر شما، بزرگترین مزیت روشهای ژئوفیزیکی در راهسازی کدام موارد است؟

صرفه اقتصادی

سرعت برداشت داده‌ها

دستیابی به موقع به نتایج

ارزیابی بهتر خصوصیات زیرسطحی (در مقایسه با حفاری و نمونه‌گیری)

امکان بررسی دو بعدی و سه بعدی وضعیت زیرزمینی

سادگی ارائه نتایج

سایر موارد (لطفاً ذکر شود)

۸. از نظر شما، بزرگترین معایب استفاده از روشهای ژئوفیزیکی در راهسازی کدام موارد است؟

عدم صرفه اقتصادی

سرعت پایین برداشت داده‌ها

عدم دستیابی به موقع به نتایج

در مقایسه با روش‌های حفاری و نمونه‌گیری سوالات بیشتر در مورد شرایط زیرزمین بدون پاسخ باقی می‌ماند.

دقت پائین و پراکندگی زیاد نتایج

فرمت داده‌های به دست آمده



- فقدان دانش کافی از تکنولوژی مطالعات ژئوفیزیک
- فقدان اطمینان به تکنولوژی مطالعات ژئوفیزیک
- سایر موارد (لطفا ذکر نمائید)
- ۹. کدام یک از روشهای ژئوفیزیکی زیر را مورد استفاده قرار می دهید؟
  - روشهای لرزه نگاری:
    - بازتابی
    - شکست مرزی
    - آنالیز طیفی امواج سطحی / آنالیز چندگانه امواج سطحی MASW/ SASW
    - آزمونهای ژئوفیزیکی درون چاهی و بین چاهی (Down-hole and Cross-hole)
    - میکروترمور انکساری (SeisOpt ReMi)
    - سایر موارد (لطفا ذکر شود)
  - روشهای الکتریکی:
    - سونداژ قائم مقاومت الکتریکی یک بعدی (VES)
    - پروفیل زنی دو بعدی مقاومت الکتریکی (روش ونر، دو قطبی-دوقطبی و ...)
    - مطالعه سه بعدی مقاومت الکتریکی (قطبی-دوقطبی و ...)
    - توموگرافی مقاومت الکتریکی (توموگرافی الکتریکی بین چاهی)
    - پلاریزاسیون القایی (Induced polarization, IP)
    - پتانسیل خودزا (Self-potential, SP)
    - اتصال به جرم (Mise-a-la-mass)
  - روشهای الکترومغناطیس:
    - الکترومغناطیس حوزه زمان
    - شناسایی فلزات ( شناسایی تاسیسات زیر سطحی، مهمات عمل نکرده، مخازن زیر سطحی و ...)
    - سونداژ یک بعدی برای شناسایی لایه های خاک و سنگ
    - الکترومغناطیس حوزه فرکانس
    - (Very Low Frequency) VLF
    - سائزموالکتریک
    - رادار نفوذ کننده زمینی (Ground Penetrating Radar, GPR):
      - نقشه برداری نقشه سنگ کف
      - نقشه برداری شکستگی های سنگ کف
      - نقشه برداری نقشه خاکها
  - روشهای مغناطیس:
    - میدان کل
    - گرادایومتر
    - روشهای ثقل سنجی:
      - میکروگراوایته





- ثقل سنجی استاندارد
  - روشهای چاه پیمایی درون گمانه ای:
  - الکتریکی (مقاومت، پتانسیل خودزا و...)
  - الکترومغناطیس القایی
  - هسته ای (گاما-گاما، نوترون و ...)
  - مشاهده ای (تصویربرداری)
  - آکوستیک (سونیک، دانسیته متغیر و ...)
  - لرزه ای (لاگ P/S)
  - هیدروفیزیکال (ستون سیال یا جایگزینی سیال)
  - انحراف گمانه (Borehole deviation)
  - روشهای هوایی:
  - مغناطیس سنجی
  - ثقل سنجی
  - الکترومغناطیس
  - ارتعاش سنجی (Vibration measurements):
  - سایر روشهای ژئوفیزیکی (لطفا ذکر نمائید)
۱۰. سه روش ژئوفیزیکی که بطور متداولتر در موسسه شما مورد استفاده قرار می گیرد؟

(۱)

(۲)

(۳)

۱۱. لطفا مشخص نمائید در موسسه شما مطالعات ژئوفیزیکی بمنظور تعیین کدامیک از موارد زیر انجام می شود:

- تعیین عمق سنگ کف
- توپوگرافی سنگ کف
- گسلش در سنگ کف
- شکستگی در سنگ کف
- تهیه نقشه مقاومت سنگ کف
- تهیه نقشه نقاط ضعف در سنگ کف
- تهیه نقشه جنس خاک سربار
- تهیه نقشه جنس سنگ کف
- تهیه نقشه نهشته های ماسه ای و شنی
- تهیه نقشه رسها
- تخمین محتوای رس
- تهیه نقشه شوری آب زیرزمینی
- تهیه نقشه سطح آب زیرزمینی



- تهیه نقشه جریان آب زیرزمینی
- تهیه نقشه زمین لغزش ها
- ارزیابی حجم زمین لغزش
- شناسایی سطح لغزش
- اندازه گیری پیش لغزش
- اندازه گیری پس لغزش
- تعیین خصوصیات مهندسی (محتوای الاستیک و ...)
- خاکهای روباره
- سازندهای سنگی
- تهیه نقشه فرونشست بستر راه ناشی از:
  - مناطق کارستی
  - غارهای انحلالی
  - شکستگی در مجاری انتقال آب و فاضلاب
  - گودال های ناشناخته
  - معادن متروکه
- تهیه نقشه سازه های مدفون ساخت بشر
  - تاسیسات عمومی (مثل برق و تلفن)
  - پی های قدیمی
  - مخازن زیرزمینی
  - تهیه نقشه آلودگی ها
  - مهمات عمل نکرده (مثل مین)
- شسته شدن نهشته های اطراف پایه های پل یا سایر پی ها
- آزمونهای غیر مخرب سازه ای
  - وضعیت روسازی
  - وضعیت بتن
- بخشهای عرشه، دکل و سیستم‌های معلق سازی پل (Bridge Superstructure)
- بخشهای پایه، کوله و ستون پل (Bridge Substructure)
- اندازه‌گیری سطح اساس (Baseline measurement)
- کنترل کیفیت (Construction QA/QC)
- سایر موارد (لطفا ذکر نمائید)
- سایر موارد (لطفا ذکر شود)

۱۲. رویکرد موسسه شما در انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب در مطالعات راه چیست؟

- توصیه پیمانکار
- توصیه متخصص ژئوفیزیک موسسه



- توصیه مهندس راه
  - تجارب گذشته (اینکه چه روشی در گذشته مورد استفاده بوده است)
  - فقط روشهای شناخته شده
  - استانداردهای و راهنماهای ASTM و AASHTO
  - رویکرد مشخصی وجود ندارد
  - ترجیح فرد یا موسسه (لطفا توضیح دهید)
۱۳. روشهای ژئوفیزیکی انتخاب شده توسط چه فرد یا افرادی تأیید می شوند؟
- پیمانکار
  - مهندس راه
  - مدیر پروژه
  - مدیر برنامه ریزی
  - متخصصی ژئوفیزیک شرکت
  - مدیر بخش یا شرکت
  - کارفرما
  - سایر موارد (لطفا ذکر نمائید)





## فصل سوم

---

تشریح روش‌های ژئوفیزیکی متداول در راهسازی





## ۳-۱- مقدمه

در جلد اصلی دستورالعمل روش‌های ژئوفیزیکی متداول و مناسب در پروژه‌های راهسازی به صورت اجمالی معرفی شده و معیارهای انتخاب روش یا روش‌های مناسبتر، متناسب با هدف مورد مطالعه، به صورت جداولی ارائه گردید. در این فصل از پیوست حاضر روش‌های متداولتر بطور مفصل‌تر توصیف می‌شوند. البته در توصیف هر روش هدف معرفی مفاهیم پایه با ذکر فرمولهای تئوری در موارد غیرقابل اجتناب، نکات مهم در برداشتهای میدانی، پردازش داده‌ها و تفسیر نتایج بوده است، چرا که توصیف کامل هر روش ژئوفیزیکی خود نوشتار مستقلی می‌طلبد. با توجه به جدیدتر بودن کاربرد روش رادار نفوذی (GPR) در ایران و عدم وجود نوشتارهای فارسی در رابطه با آن این روش کمی مفصل‌تر از بقیه روش‌ها تشریح گردیده است. توصیف روش‌ها به زبان قابل استفاده برای کاربران غیرمتخصص در ژئوفیزیک اما نیازمند به شناخت عمیقتر از این روش‌ها جهت استفاده در پروژه‌های مرتبط با حوزه کاری خود، مانند کارفرمایان و مشاوران ژئوتکنیک دست‌اندرکار در پروژه‌های راهسازی نوشته شده است. در عین حال فهرست منابع مفصل اشاره شده در متن نوشتار می‌تواند برای افرادی که علاقمند به توصیف بیشتری از روش‌ها باشند مورد استفاده قرار گیرند.

## ۳-۲- روش لرزه‌ای شکست مرزی

## ۳-۲-۱- کاربردها

روش لرزه‌ای شکست مرزی روشی موثر و مفید برای بدست آوردن اطلاعات کلی از مشخصات زیرسطحی زمین در یک محل بصورت پروفیل‌های دو بعدی، مسافت (افقی یا بر روی شیب) - عمق فراهم می‌آورد. استفاده از این روش در پروژه‌های راهسازی به عنوان مکمل بررسیهای ژئوتکنیکی است و استاندارد ASTM (D6429-99) این روش را به عنوان انتخاب اول در شناسایی لایه‌های خاکی و تحکیم‌نیافته، عمق و توپوگرافی سنگ بستر، سطح آب زیرزمینی، و همچنین تعیین ویژگیهای فیزیکی سنگ و خاک معرفی می‌کند. همچنین این استاندارد روش لرزه‌ای انکساری را به عنوان انتخاب دوم برای بررسی لایه‌های سنگی، پهنه‌های شکستگی‌ها و گسلی، حفرات و فروچاله‌ها، شناسایی مرزهای خاکی‌ها و ترانشه‌ها و مطالعات باستان‌شناسی معرفی می‌کند.

ارزیابی شکافت‌پذیری و قابلیت گودبرداری (Caterpillar, 1984, 1993) از کاربردهای بسیار مهم این روش در ساخت بزرگراهها است، بویژه در جاییکه هدف گودبرداری توده بزرگی از سنگ باشد که هزینه قابل توجهی به همراه دارد. از دیگر کاربردهای این روش، مطالعات شناسایی زمین‌لغزش‌ها (TRB, 1996) است.

## ۳-۲-۲- مفاهیم اولیه و تئوری حاکم بر روش

تئوری روش لرزه‌ای انکساری در منابع متعددی مانند ASTM (۲۰۰۰)، ASCE (۱۹۹۸)، ریچارد و همکاران (۱۹۷۰)، مونی (۱۹۸۴) تشریح شده است. این روش بر اختلاف سرعت عبور امواج لرزه‌ای (امواج تراکمی و برشی) در محیطهایی با ویژگیهای فیزیکی مختلف عبور دهنده امواج و وقوع پدیده شکست موج در هنگام عبور از مرز دو محیط با سرعتهای متفاوت استوار است. توضیح تئوری روش در منابع معمولاً با بیان قانون معروف و شناخته شده اسنل در شکست نور صورت گرفته است. به این ترتیب که هنگامی که یک موج الاستیک از یک محیط با سرعت  $V_1$  تحت زاویه  $i$  به یک سطح جدایش (Inter face) برخورد کند، در محیط دوم با سرعت  $V_2$  و تحت زاویه  $r$  منتشر خواهد شد، این پدیده را شکست مرزی گویند. در صورتیکه  $i$  زاویه تابش موج و  $r$  زاویه شکست موج باشد، طبق قانون اسنل (Snell's law)

خواهیم داشت:

هنگامیکه  $V_1 < V_2$  باشد موقعیتی پیش خواهد که  $r=90^\circ$  گردد، این بدان معنی است که موج شکست مرزی در محیط دوم و در طول مرز دو محیط (سطح جدایش) منتشر خواهد شد و موجهای بازگشتی از آن توسط گیرنده در سطح قابل دریافت خواهند بود در این حالت زاویه تابش، زاویه تابش حدی (critical Angle) نامیده شده و با  $i_c$  نشان داده می-شود. پس در این حالت داریم:

$$\sin i / \sin r = V_1/V_2 \quad \text{رابطه ۱-۳}$$

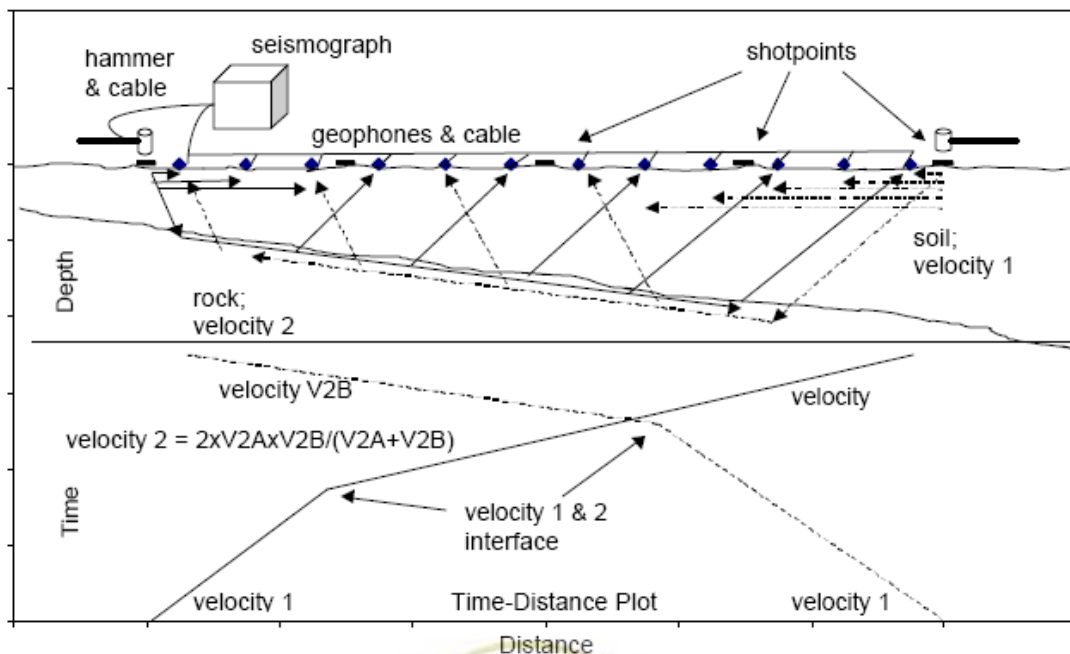
$$\sin i_c / \sin 90 = V_1/V_2 \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

نتیجه می‌گیریم:

$$\sin i_c = V_1/V_2 \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

روشهای لرزه نگاری بر مبنای ایجاد موج در نقاطی در سطح زمین بنام چشمه‌لرزه‌ای (shotpoints) و در همان حال اندازه‌گیری زمان رسید انرژی لرزه‌ای به گیرنده‌های لرزه‌ای (ژئوفونها) در سطح زمین می‌باشند (شکل ۱-۱). انرژی لرزه‌ای در روش شکست مرزی، مسیر بین چشمه و گیرنده‌ها را از مسیره‌های مختلف به صورت موج مستقیم و یا به صورت موج شکست مرزی طی می‌کند. با آگاهی از هندسه مسیر موج، فاصله گیرنده‌ها از چشمه و زمان رسید موجهای مستقیم و شکست مرزی به محل گیرنده‌های مختلف، از دیدگاه نظری می‌توان لایه بندی زیر سطحی و سرعت انتشار موج در هر لایه را مشخص نمود.

از آنجاکه سرعت انتشار این موجها به طور مستقیم به ویژگیهای کشسانی لایه‌ها و چگالی آنها بستگی دارد، در صورت اندازه‌گیری سرعت موجهای P و S برای لایه‌ها و آگاهی از چگالی آنها می‌توان مدوله‌های کشسانی دینامیک لایه‌ها (مدول یانگ، مدول بالک و مدول برشی) را محاسبه کرد.



شکل (۱-۳) نمایی شماتیک از روشی شکست مرزی بر روی یک سطح جدایش دو لایه‌ای شیبدار، نشان‌دهنده سیستم لرزه‌نگاری و نقاط چشمه لرزه‌ای. تفسیر عمق لایه بر اساس تعبیرات روند شیب منحنی زمان-مسافت صورت می‌گیرد. مسیر انتشار موج برای برداشتهای رفت و برگشت بصورت شعاعهای موج مستقیم (عبور در لایه اول) و موج شکست مرزی (شکست و بازتابش در سطح جدایش) نشان داده شده است (نقل از روکر، ۲۰۰۰).



### ۳-۲-۳- تجهیزات برداشت داده‌ها

تجهیزات مورد نیاز در برداشتهای لرزه‌ای انکساری شامل یک منبع انرژی لرزه‌ای با توانایی ارسال الکتریکی زمان اعمال ضربه، یک سری ژئوفون برای آشکارسازی سیگنال لرزه‌ای ایجاد شده توسط چشمه، یک لرزه‌نگار برای اندازه‌گیری، پردازش و ذخیره‌سازی زمان اعمال ضربه و سیگنالهای دریافتی توسط ژئوفونها و کابل یا سیستم رادیویی مخصوص انتقال داده‌ها از ژئوفونها به لرزه‌نگار است. امروزه انواع متنوعی از تجهیزات لرزه‌نگاری شکست مرزی با مارکهای مختلف وجود دارد که انتخاب نوع آنها بستگی به هدف مورد جستجو در بررسی‌ها دارد.

در این اندازه‌گیریها معمولاً از پتک و صفحه فلزی برای وارد آوردن ضربه عمودی بر سطح زمین به عنوان چشمه موجهای طولی (p) و پتک و الوار چوبی یا میز مخصوص وقابل کوبش در زمین برای وارد آوردن ضربه افقی به عنوان چشمه موجهای عرضی (s) استفاده می‌شود. تجربه نشان داده است که استفاده از پتکهای ۵ تا ۶ کیلوگرمی برای آرایشی از ژئوفونها تا طول ۵۰ متر، و در صورت پایین بودن سطح نوفه، تا طولهای ۱۰۰ متر نیز کافی است. برای آرایشهای طولیتر با شرایط نوفه قویتر می‌توان از پتکهای سنگینتر ۱۰ کیلوگرمی استفاده کرد. استفاده از لرزه‌نگارهای با توانایی جمع اثر ضربه‌های متوالی (Stacking) که امروزه متداول هستند امکان استفاده از این چشمه‌های لرزه‌ای کم انرژی را فراهم ساخته‌اند. چشمه‌های لرزه‌ای انفجاری ممکن است در موارد نیاز به بررسیهای عمیق مورد استفاده قرار گیرد. اگر چه استفاده از مواد انفجاری در مناطق شهری و نزدیک به سکونت‌های انسانی، به لحاظ محدودیتهای قانونی غیرعملی یا غیرممکن است اما در این موارد ممکن است استفاده از ابزارهای ایجاد انفجارهای کوچک و کنترل شده، به عنوان راه حل مدنظر قرار گیرد. همچنین چشمه‌های لرزه‌ای دیگر مانند سقوط وزنه‌های سنگین با سقوط آزاد یا سیستمهای پنوماتیکی، کامیون ارتعاشی و غیره نیز وجود دارد اما از آنجائیکه نیاز به حمل با وسیله نقلیه دارند یا اساساً بر روی تریلر سوار هستند در مناطق بدون جاده دسترسی قابل کاربرد نیستند.

از نظر تعداد ژئوفون مورد استفاده در یک برداشت، بستگی به تعداد کانالهای دستگاه لرزه‌نگار مورد استفاده دارد. در دسترس بودن لرزه‌نگارهای ۱۲ و ۲۴ کاناله امکان برداشت ساده‌تر پروفیل‌های لرزه‌ای نسبت به دستگاههای قدیمی‌تر تک کاناله را فراهم آورده است و توصیه می‌گردد.

### ۳-۲-۴- طراحی برداشت داده‌ها و کنترل کیفیت داده‌ها

طراحی عملیات برداشت داده‌های لرزه‌نگاری شکست مرزی تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند نیازهای پروژه، تجهیزات در اختیار و محدودیتهای بودجه‌ای قرار دارد. از جمله مسائل دیگر موثر بر طراحی عملیات برداشت مسئله ایمنی پرسنل و تجهیزات است که بایستی حتماً در نظر گرفته شود. در صورت تامین مسئله ایمنی و عدم وجود محدودیتهای بودجه‌ای، تعیین تعداد خطهای برداشت کافی و طول هر خط برداشت در راستای دستیابی به اهداف مطالعه، مسئله اصلی در طراحی عملیات برداشت خواهد بود و این بستگی به هدف مطالعه دارد. به عنوان مثال تعیین روشهای مناسب گودبرداری به تعداد برداشت لرزه‌ای کمتری در مقایسه با پیش‌بینی احجام گودبرداری برای آن روشها نیاز دارد. در مواردی که ممکن باشد همراه کردن برداشت‌های لرزه‌ای با حفاریهای ژئوتکنیکی و چاله‌های آزمایشی (test pits) در این رابطه مفید خواهد بود. حفاری‌ها و چاله‌های آزمایشی با نمونه‌برداری به تعیین و مشخص‌سازی افق‌های زیرسطحی در نقاط مختلف و بصورت قائم کمک کرده و برداشتهای لرزه‌ای در کنار آنها، مشخص کننده بعد دوم این لایه‌ها در مسیر افقی خواهد بود که به تهیه اطلاعات لازم برای تخمین گودبرداری منجر خواهد شد.

این استفاده همزمان و کنترل اطلاعات حاصل از پروفیل‌های لرزه‌ای می‌تواند در اصلاح و بهبود تفسیر پروفیل‌های

مناطق مجاور که ممکن است امکان انتقال دستگاه‌های حفاری وجود نداشته یا پرهزینه باشد نیز نقش مهمی داشته باشد.

طراحی جزئیات عملیات برداشت در دفتر کار و قبل از شروع عملیات صحرایی می‌تواند در تسهیل پردازش و تفسیر اطلاعات بعد از تکمیل برداشتها موثر باشد. برای مثال در نظر گرفتن خطوط برداشت روی زمین مسطح با دامنه‌های هموار و یکنواخت در صورتیکه میسر باشد، می‌تواند نیاز به اصلاح زمین و تغییرات توپوگرافی در مرحله تفسیر را از بین ببرد، در صورتیکه اجتناب از تغییر تراز توپوگرافی در زمینهای مسطح یا تغییر شیب در دامنه‌ها ممکن نباشد بهتر است چشمه لرزه‌ای میانی در نزدیکی این تغییر عارضه در نظر گرفته شود، بطوریکه بتوان خط لرزه‌ای را در قالب دو نیم خط بدون نیاز به اصلاح توپوگرافی در نظر گرفت.

گسترش طولی خط برداشت، تعداد نقاط چشمه، موقعیت و فاصله آنها از نزدیکترین ژئوفون از مسائل دیگری است که باید در طراحی عملیات برداشت به آنها توجه داشت و همانند تعداد خطوط برداشت به هدف مورد مطالعه، عمق مورد نیاز اکتشاف و وضعیت مورد انتظار از لایه‌بندی زیرسطحی و تغییرات سرعتی جانبی بستگی دارد (رجوع به بخش ۳-۲-۵).

استفاده از منابع انرژی کافی، اتصال مناسب و محکم ژئوفونها و صفحه فلزی محل ضربه با زمین از موارد دیگری است که در برداشتهای لرزه‌ای باید مورد کنترل قرار گیرند. همچنین باید به منابع تاثیرگذار بر دقت داده‌ها توجه داشت. متداول‌ترین عامل اثرگذار وجود نوفه‌های مزاحم است. لازمه بدست آوردن زمان رسیدهای واضح، داشتن نسبت سیگنال به نوفه مناسب است. روش ایجاد ضربه‌های متوالی و جمع اثر آنها با اثر سریعتری که روی یک سیگنال، نسبت به نوفه-های تصادفی دارد روشی برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه است. در عین حال برای اجتناب از منابع نوفه گذرا مانند وسایل نقلیه، عملیات تا رفع منبع نوفه باید متوقف گردد. کوتاه کردن طول خطوط برداشت نیز راهی برای کاهش نرخ کاهندگی سیگنال ورودی به ژئوفونهای دورتر از چشمه است. نوفه‌های با فرکانس بسیار بالا یا پایین یا دارای فرکانس خاص مانند نوفه حاصل از خطوط برق فشار قوی، با استفاده از فیلترهای خاص در داخل دستگاههای لرزه‌نگار قابل حذف هستند. با وجود این، اینگونه فیلترها ممکن است اولین رسیدهای مطلوب را نیز متاثر سازند.

شرایط آب و هوایی به طرق مختلف می‌تواند بر کیفیت داده‌ها اثر بگذارد. باد میتواند منشاء ایجاد نوفه در ژئوفونها باشد بویژه اگر پوشش گیاهی قابل ملاحظه وجود داشته باشد. دفن کم عمق ژئوفونها یا پاکسازی پوشش گیاهی می‌تواند این اثر را کمتر کند. از برداشت در هوای بارانی به دلیل ایجاد نوفه‌های بسیار قوی باید اجتناب کرد. زمین یخزده می‌تواند مانند یک لایه پرسرعت عمل کند و منجر به ایجاد معکوس شدگی سرعتی و شکست عملیات گردد.

خطوط فشار قوی برق هم می‌تواند بر سیگنال راه انداز و هم بر سیگنالهای ورودی به ژئوفونها تاثیر بگذارند. گاهی دیده شده که اثر جریانهای فشار قوی بر کلید راه‌انداز در هنگام بالا بردن پتک موجب ارسال سیگنال راه‌انداز دروغین و خطا در اندازه‌گیری شده است. تعبیه سیم رابط با زمین برای پتک می‌تواند از این مسئله جلوگیری کند. در زمین‌های خشک ممکن است برای متمرکز بودن این راه‌حل نیاز به مرطوب کردن زمین محل اتصال سیم رابط باشد. علاوه بر توجه به مسائل گفته شده در فوق در هنگام اجرای یک برداشت لرزه‌ای، کیفیت داده‌های حاصله باید هم در روی زمین و هنگام برداشت و هم در مرحله پردازش کنترل گردد و در صورت مشاهده خطا یا کیفیت پایین داده‌ها برداشت تکرار گردد. کیفیت داده‌ها با میزان وضوح و قدرت تشخیص اولین رسید امواج مشخص می‌گردد و این به عهده مسئول برداشت داده‌ها است که بر اساس تجربه خود در این مورد تصمیم بگیرد. همچنین انتخاب فاکتور بزرگنمایی (Gain) مناسب براساس شدت نوفه محلی موجود در زمان اندازه‌گیری در این مورد مهم است. کنترل‌های بیشتر نیز با تفسیر اولیه داده‌ها



بر اساس بررسی چشمی نگاشتهای برداشت شده در روی زمین توسط فرد با تجربه امکانپذیر است. استاندارد ASTM D5777 سه آزمون مختلف را در این رابطه پیشنهاد می‌کند که می‌تواند به عنوان مبنا در این زمینه مورد استفاده قرار گیرند.

کنترل بی‌نظمی در اولین رسید امواج به ژئوفونهای مختلف یکی از این راهها است. اختلاف بیش از حد بین زمانهای رسید موج، به عنوان مثال انحراف بیش از حد از شیب خط ترسیمی بین زمانهای ورودی، می‌تواند نشانه خطا در تشخیص زمان ورود، ترسیم داده‌ها یا ثبت آنها باشد، اگر چه پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و همچنین سطح بالای نوفه نیز می‌تواند چنین حالتی را ایجاد کند. مقایسه داده‌ها بین برداشتهای رفت و برگشتی یا مقایسه داده‌های برداشت شده با قرار دادن چشمه لرزه‌ای در فواصل مختلف راههای دیگر کنترل داده‌ها روی زمین هستند.

### ۳-۲-۵- عمق و قدرت تفکیک مورد انتظار

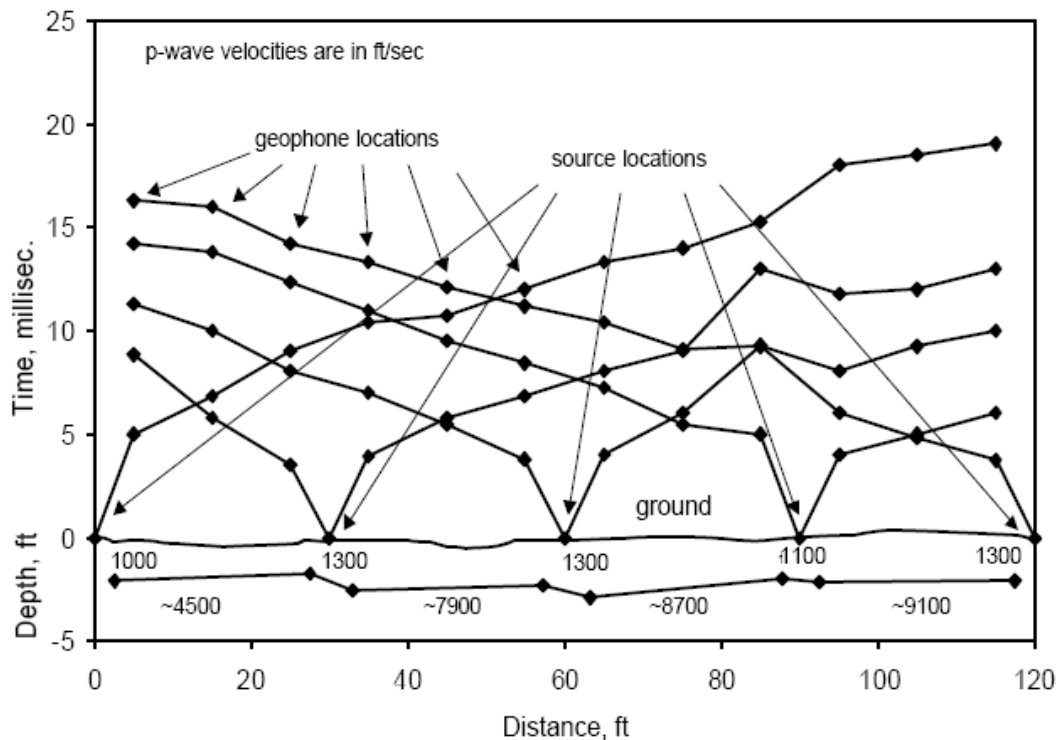
در کاربردهای ژئوتکنیکی با کمک روش لرزه نگاری انکساری بطور معمول ۳ یا ۴ لایه یا افق را می‌توان از یکدیگر تفکیک نمود. تفاسیر حاصل از یک آرایه متداول ۱۲ ژئوفونی بصورت موثر میتواند حداکثر تا سه افق را شامل شود. در شرایط زمین‌شناسی که حضور همزمان خاک و سنگ را داشته باشیم، این افق‌ها ممکن است خاک، سنگهای به شدت هوازده و خرد شده و سنگهای با هوازگی و خرد شدگی کمتر باشند. همانگونه که در ASTM D5777 گزارش شده است دقت قابل حصول تأیید شده برای تفاسیر عمق و سرعت تقریباً برابر با ۱۰ درصد می‌باشد. لایه‌های مخفی یا معکوس شدگی‌های سرعت در پروفیل‌های زیر سطحی بصورت مشخصی می‌توانند باعث کاهش دقت تفسیر عمق شوند. داده‌های حفاری زیر سطحی می‌تواند شرایط زیر سطحی را که باعث کاهش دقت تفسیر می‌شوند مشخص کند.

بنابر فیزیک توزیع امواج در لرزه نگاری انکساری، ماکزیمم عمق کاوش مورد انتظار تقریباً برابر با یک چهارم تا احتمالاً یک سوم فاصله دورترین چشمه انرژی تا ژئوفون هاست. هر چند عمق واقعی کاوش وابسته به پروفیل زیر سطحی و وجود یا عدم وجود معکوس شدگی‌های سرعت می‌باشد. علاوه بر این ماکزیمم عمق تنها در حوالی بخش مرکزی آرایه قابل دستیابی خواهد بود و منطقه واقعی کاوش تقریباً یک نیم بیضی از دور ترین نقاط شوت، خواهد بود. از دید محافظه کارانه، ماکزیمم عمق کاوش برای یک خط لرزه نگاری خاص را می‌توان معادل با عمیق ترین افق تفسیر شده در نظر گرفت.

فاصله میان نقطه شوت و ژئوفونهای نزدیک، کمترین عمق کاوش را تعیین می‌کند. این مقدار کمینه را می‌توان بصورت یک چهارم تا یک سوم فاصله نقطه شوت تا ژئوفون نزدیک در نظر گرفت. آرایه‌های ژئوفونی بلند با فاصله زیاد مابین ژئوفون و نقطه شوت قابلیت تفکیک و شناسایی افق‌های سطحی کم سرعت و با ضخامت پایین را ندارند. حتی با فواصل ژئوفونی نسبتاً نزدیک چنین افق‌های سطحی نازک ممکن است تنها بصورت روندی بین نقاط شوت و نزدیکترین ژئوفون تفسیر شوند. حداقل وجود یک روند بین چشمه و دو تا از نزدیکترین ژئوفونها لازم است تا اطمینان حاصل شود در معرض سناریوی "لایه مخفی" در این ناحیه نیستیم. خطاهای کوچک در زمان بندی سیگنال راه انداز (trigger) نیز می‌تواند بر سرعت‌های تفسیر شده تاثیر گذار باشد. بدین منظور از یک ابزار راه انداز (trigger device) نصب شده در محلی کاملاً نزدیک به سر پتک باید برای کاهش خطا استفاده کرد.

مشکل وجود تغییرات سرعتی در جهت افقی درون لایه‌های کم عمق را میتوان با استفاده از یک آرایه ۱۲ ژئوفونی در شرایطی که از چندین نقطه شوت بهره می‌گیریم حل نمود. عمل تفسیر را برای یک حالت دو لایه ای می‌توان با استفاده از روش فاصله زمانی برای داده‌های برداشت شده مابین دو چشمه لرزه‌ای مجاور انجام داد. برای یک خط لرزه-نگاری با ۵ چشمه لرزه‌ای تا ۴ سرعت جداگانه در جهت افقی قابل تعیین است. چنین تفسیری ممکن است در بررسیهای

شکافت‌پذیری و قابلیت گودبرداری در عمق کم، کاربرد موثری داشته باشد (شکل ۳-۲) در حالیکه تفسیری مبتنی بر ارائه یک میانگین برای آن لایه ممکن است مشکلات احتمالی گودبرداری را برای بخشهایی که سرعت از میانگین محاسبه شده متفاوت است، کمتر از آنچه هست نشان دهد.



شکل (۳-۲) نمونه‌ای از منحنی‌های زمان مسافت در بررسی یک ترانشه آبگذر برای یک جاده با استفاده از یک لرزه‌نگار ۱۲ کاناله، چشمه انرژی پتک و تفسیر یک مدل ۲ لایه‌ای ساده. به تغییرات جانبی سرعت بدست آمده برای موج P در یک لایه سنگ خرد شده با استفاده از روش ساده زمان تقاطع توجه کنید. این لایه سنگی در زیر یک لایه خاکی با ضخامت تقریبی ۲ فوت قرار دارد. پروژه تنها به اطلاعات تا عمق ۴ فوتی نیاز دارد و به عمیق‌تر از آن نیازی نیست. نتیجه آنکه یک دستگاه گودبرداری از نوع Vermeer T-655 قادر به انجام گودبرداری است. (نقل از روکر، ۲۰۰۰).

### ۳-۲-۶- پردازش داده‌ها

پردازش داده‌ها در روش لرزه‌نگاری انکساری شامل محاسبه و تعیین محل‌های چشمه و ژئوفون، انجام تنظیمات و تغییرات ارتفاعی در طول پروفیل لرزه‌نگاری و تعیین زمانهای رسید اولین موجها به ژئوفون هاست. این مرحله از پردازش می‌تواند بسیار ساده انجام شود همانطور که برای دهه‌های طولانی بصورت دستی بر روی رکوردهای آنالوگ انجام شده است.

پس از بازرسی و اعمال تغییرات بر روی داده‌ها در حین عملیات برداشت و ثبت شرایط توپوگرافی در طول آرایه، پردازش در محل آغاز می‌شود. برای یک لرزه‌نگاشت تک کاناله فاقد قابلیت ذخیره‌سازی دائمی داده‌ها، زمانهای استخراج شده برای اولین رسید امواج تنها داده موجود برای تحلیل هستند. برای لرزه‌نگاشتهای بزرگتر با قابلیت ثبت نگاشتها بر روی کاغذ یا بصورت رقومی، پردازش داده‌ها پس از عملیات صحرائی با تشخیص نهایی (در اصطلاح، پیک کردن) اولین رسیدها شروع می‌شود.

در مورد نگاشتهای کاغذی پیک کردن دستی زمانهای رسید به منظور کنترل و اصلاح زمانهای مشخص شده در روی



زمین می‌تواند صورت گیرد. نگاشتهای رقومی قابلیت پردازش اضافه در دفتر کار و اعمال اصلاحات لازم را دارند. رسید ها ممکن است برای بزرگنمایی اعمال شده در هنگام برداشت اصلاح شده و با اعمال فیلترهای رقومی مناسب سیگنال‌های مفید تقویت شده و سیگنالهای نامطلوب حذف یا تضعیف گردند. روش های اتوماتیک و کامپیوتری پیک کردن اولین رسید ها را نیز می توان با استفاده از بسته های نرم افزاری تفسیر بکار گرفت. پس از تعیین زمانهای رسید، هندسه آرایه چشمه و ژئوفون و داده های اولین رسید ها برای تفسیر با روشهای مختلف مدنظر به فرمت لازمه ارائه می‌گردد.

باید توجه داشت که در بعضی مواقع ممکن است با لایه‌های زمین‌شناسی سطحی با مدول پایین و سرعت امواج P پایینتر از سرعت این امواج در هوا (۳۵۰ متر بر ثانیه) مواجه باشیم و این باعث گردد ژئوفونهای نزدیک به چشمه لرزه‌ای ابتدا به موج تراکمی رسیده از طریق هوا پاسخ دهند و بنابراین زمان رسید معین شده مربوط به لایه زمین‌شناسی سطحی نباشد و زمانهای رسید اولین موج واقعی از درون لایه سطحی بعد از آن اتفاق بیافتد. این مسئله بویژه در زمانیکه با لایه‌های سطحی ضخیم، دارای سرعت موج تراکمی پایین، مواجه هستیم، مانند توده‌های زمین لغزش مشرف به جاده‌ها یا خاکهای با تراکم بسیار پایین، قابل ملاحظه است. در موارد لایه‌های کم ضخامت با سرعت نزدیک به سرعت موج در هوا این خطا ناچیز خواهد بود.

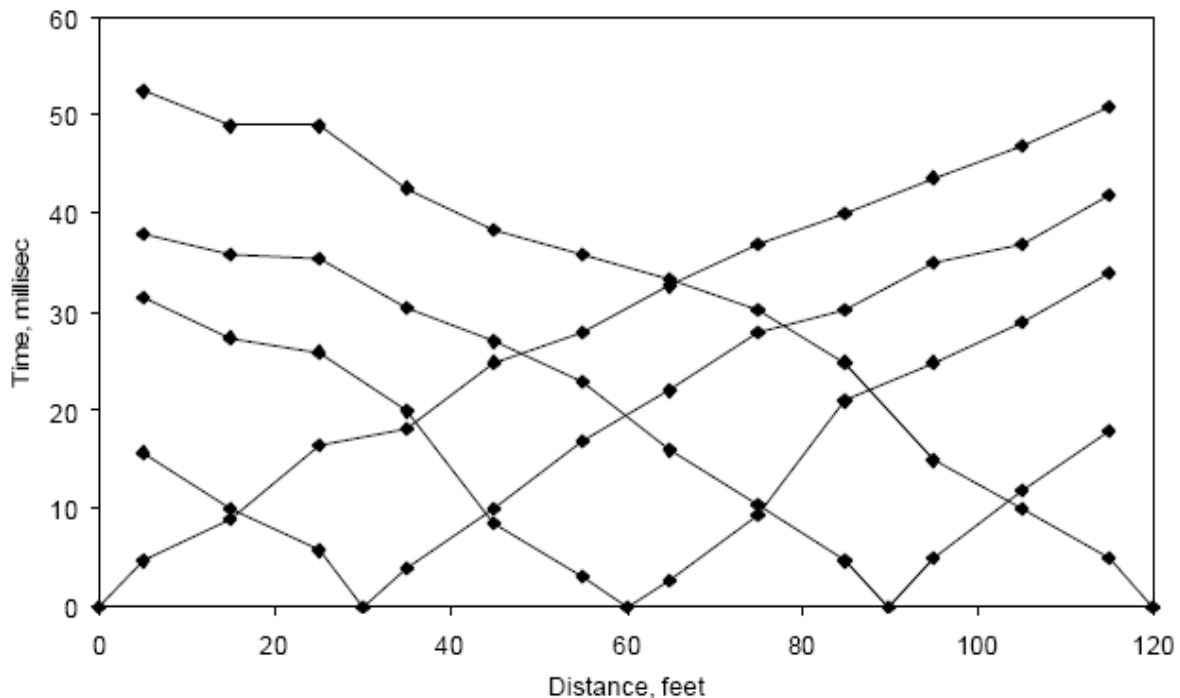
### ۳-۲-۷- تفسیر داده‌ها

تفسیر داده های اولین رسید ها به پروفیلی از سرعتهای زیر سطحی (که به معکوس سازی معروف است) با روشهای متعددی انجام می‌شود. روشهایی شامل محاسبات بسیار سنگین یا مبتنی بر راه حل‌های نموداری که در ابتدا بصورت دستی و در ادامه توسط امکانات نرم افزاری صورت می‌گرفته اند برای دهه های متمادی مورد استفاده قرار گرفته اند. در دستورالعمل EM111-1-1802 بخش مهندسی ارتش آمریکا به سه گروه اصلی از روشهای تفسیر اشاره شده است: روش زمان تقاطع (ITM)، روش زمان تاخیر و روش ردیابی پرتو (ASCE, 1998). این روشها و قابلیت اجرای آنها برای شرایط مختلف در ASTM D5777 نیز دیده شده است. توسعه‌های اخیر در این روشها منجر به ارائه انواعی پیشرفته از تفسیر با کمک ردیابی پرتو شامل روشهای بهینه سازی با تکنیک‌های تفاضل محدود به دنبال داشته که مبتنی بر همگرایی راه‌حل‌ها بعد از تعداد بسیار زیاد آزمون هستند. دو روش دیگر، تکنیک های تفسیری ساده ای را ارائه می‌دهد که مشتمل بر محاسباتی است که قابلیت انجام آنها در ماشین حساب ها یا کامپیوتر های عادی وجود دارد.

### ۳-۲-۷-۱- ترسیمه های زمان-فاصله

این ترسیمه ها قالب اصلی برای ارائه داده های اولین رسیده‌های لرزه ای است که لازمه تفسیر روش لرزه‌ای انکساری هستند. در این گرافها فاصله میان ژئوفونها و همچنین نقاط چشمه بر روی محور X و زمانهای ثبت شده برای سیر موج از چشمه تا ژئوفون در امتداد محور Y ترسیم می‌شوند. شکل ۳-۳ نمونه‌ای از ترسیمه‌های زمان-فاصله برای یک برداشت ۱۲ ژئوفونی با ۵ چشمه لرزه‌ای را نشان می‌دهد.





شکل (۳-۳) مثالی از یک ترسیمه زمان-مسافت برای برداشت ۱۲ ژئوفونی و ۵ چشمه لرزه‌ای در دو انتها، وسط و یک چهارم مسیر از هر طرف. به پیچیدگی زمانهای رسید موج برای چشمه میانی با کاهشی چشمگیر سرعت ظاهری بین ژئوفونهای ۵-۴ و ۹-۸ و نیز بین ژئوفونهای ۱۰-۹ در پروفیل برگشت (چشمه انتهایی) توجه گردد. این مسئله ممکن است نشان‌دهنده تغییرات افقی یا قائم در سرعت موج P باشد (نقل از روکر ۲۰۰۰).

مونی (۱۹۸۴) نمونه‌های زیادی از ترسیمه‌های زمان-فاصله همراه با تفسیرهای ممکنه برای تنوعی از شرایط هندسه زیرسطحی ارائه نموده است. دستورالعمل EM 1110-1-1802 (ASCE, 1998) نیز مثالهای متعددی از شرایط پیچیده زمین‌شناسی زیرسطحی همراه با ترسیمه‌های زمان-مسافت نظیر برای آنها ارائه کرده است که در مرحله تفسیر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. این کاتالوگها ابزار ارزشمندی برای مفسرهای کم‌تجربه هستند اما باید توجه داشت که تفسیر یک ترسیمه لزوماً واحد نیست و کنترل‌های بیشتری برای تصمیم‌گیری نهایی ممکن است ضروری باشد.

### ۳-۲-۷-۲- روش زمان تقاطع

در تفسیر با کمک این روش، فرض بر این است که هر یک از لایه‌های زیر سطحی دارای سرعت ثابتی هستند. سرعتها با تعیین شیب‌های خطوط مستقیم (یا تقریباً مستقیم) بخش‌های مختلف نمودار زمان-مسافت تفسیر می‌شود که برای هر مقدار شیب حداقل سه نقطه داده مورد نیاز است. براین اساس سرعتها از تقسیم فاصله به زمان سیر موج در هر بخش حاصل می‌شوند. فصل مشترک میان دو افق در این تکنیک صفحه‌ای فرض می‌شود؛ هرچند یک سطح جدایش شیبدار نیز در یک پروفیل دوبعدی قابل تشخیص است. اما مسئله شیب در واقع یک مسئله سه‌بعدی است و در یک برداشت سه بعدی قابل تعیین است. سرعت واقعی لایه‌های شیبدار با استفاده از محاسبه هارمونیک میانگین سرعت در برداشتهای مستقیم و معکوس قابل حصول است. لایه‌های نازک که تاثیر آنها در کمتر از سه نقطه داده وجود دارد باعث بروز شبهاتی در تفسیر سرعت و ضخامت می‌شوند و حتی گاهی بصورت شاخص در تفسیر دیده نمی‌شوند. این محدودیت اساسی که به عنوان مسئله ناحیه کور معروف است از مشکلاتی است که روش انکساری ممکن است به آن

دچار شود و قدرت تفکیک آن را در مجاورت سطوح جدایش محدود نماید. در دستورالعمل EM1110-1-1802 مسئله ناحیه کور مورد بحث قرار گرفته است. دیگر ایراد این روش عدم تشخیص لایه‌های با سرعت پایینتر نسبت به لایه‌های فوقانی است چراکه در این حالت عمل شکست موج در مرز لایه‌ها به سمت داخل لایه زیرین اتفاق می‌افتد. همچنین یک زون پر سرعت که در زیر یک شرایط با معکوس شدگی سرعت قرار گرفته است در عمقی پایین تر از مقدار واقعی تفسیر خواهد شد.

فرمول‌های تفسیر عمق مربوط به مدل دو لایه‌ای در ASTM D5777 و برای مدل‌های چند لایه‌ای در دستورالعمل EM 1110-1-11820 و Moony (1984) آورده شده است

بهره‌گیری از نقاط شوت مختلف در طول خط برداشت امکان تفسیر تغییرات عمقی فصل مشترک لایه‌ها و تغییرات جانبی سرعتها را بویژه در لایه‌های نزدیک تر به سطح فراهم می‌کند. تفسیر سرعت و عمق در بخش‌های عمیق تر در شرایطی که سرعت و فصل مشترک لایه‌های سطحی از پیچیدگی برخوردارند دشوار تر بوده و نیازمند دقت و تجربه بالاتر است.

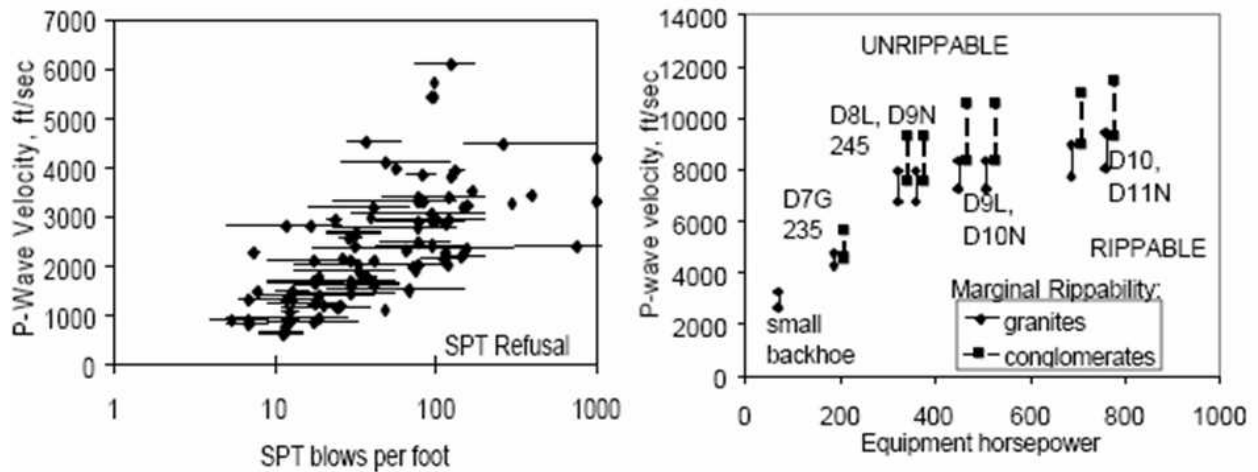
### ۳-۲-۸- ارتباط نتایج روش لرزه‌ای شکست مرزی با دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی

ارتباط بین سرعت امواج تراکمی و دیگر پارامترهای فیزیکی و مهندسی خاکها و سنگها پارامتر مهمی در کمک به تعیین ویژگیهای یک محل است، بویژه وقتی که با دیگر اطلاعات زمین‌شناسی هم کنترل گردد می‌تواند پس از تفسیر درست اطلاعات سرنخهایی را در اختیار مهندسین ژئوتکنیک و طراح پروژه‌های راهسازی قرار دهد. این سرعت می‌تواند مقادیری از تنها چند متر بر ثانیه در نهشته‌های خاکی بسیار سست تا ۵۰۰ تا ۸۰۰ متر بر ثانیه در خاکریزهای مهندسی و بیش از ۵۰۰ متر بر ثانیه در سنگهای بکر مقاوم داشته باشد. در مفهوم مهندسی سنگ، سرعت امواج بیشتر تفکیک کننده خاکهای رویی و سنگهای خردشده و هوازده از سنگ سالم بوده و ابزاری برای تشخیص انواع سنگ نمی‌باشد.

استفاده کلاسیک از سرعت امواج تراکمی مطالعات شکافت‌پذیری است. شکل (۳-۴) سه نوع درجه شکافت‌پذیری؛ یعنی شکافت‌پذیر، نسبتاً شکافت‌پذیر و غیرشکافت‌پذیر را در مقابل سرعت موج تراکمی برای گرانیت و کنگلومرا نشان می‌دهد. کاترپیلا (۱۹۸۴، ۱۹۹۳) این پارامترها را برای محدوده‌ای از سازندهای تشکیل دهنده زمین و محدودیت‌های استفاده از مواد آنها را مورد بحث قرار داده است. روابط بین سرعت موج P و دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی حاکی از آن است که محدوده گسترده‌ای از سازندهای زمین‌شناسی با روش لرزه‌ای انکساری قابل تشخیص هستند. برای مثال شکل (۳-۵) ارتباط سرعت موج تراکمی با تعداد ضربه آزمایش نفوذ استاندارد استخراج شده از ۲۰ پروژه در جنوب غرب آمریکا و شکل (۳-۶) نیز ارتباط این پارامتر را با مقدار متوسط RQD برای لایه سنگ گرانیت در سه پروژه بزرگراهی و یک مجموعه هتل در ایالت آریزونا نشان می‌دهند. پراکندگی داده‌ها در هر دو شکل (۳-۵) و (۳-۶) شاخصه طبیعت اندازه‌گیری SPT و RQD و محدودیت‌های روش لرزه‌ای انکساری است. روکر (۱۹۹۶) نشان داد که بین میانگین اندازه ذرات D50 رسوبات رودخانه‌ای غیراشباع، غیرچسبنده و خوب دانه‌بندی شده از نوع ماسه، شن و قلو سنگی جنوب غرب آمریکا و سرعت موج P ارتباط مشخص وجود دارد (شکل ۳-۷). اثر اشباع شدگی که منجر به کاهش سرعت موج P می‌گردد نیز در این شکل نشان داده شده است.

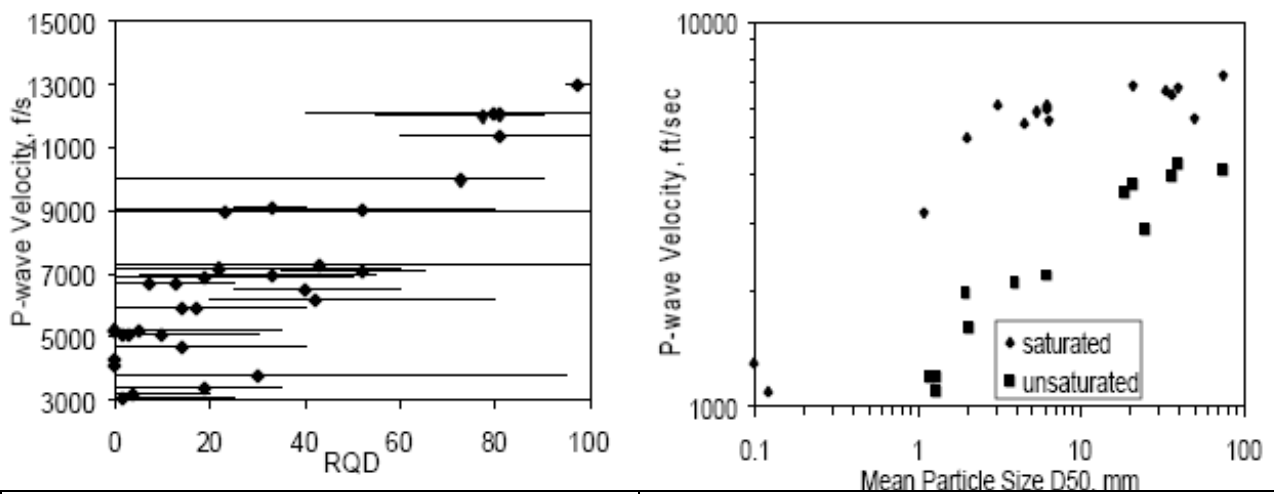
بالای سطح آب زیرزمینی، سرعت موج P مقداری از کرنش ضعیف توده خاک یا سنگ یا مدول دینامیکی یانگ است. مدول‌های یانگ و برشی ممکن است با فرض نسبت پواسون و اندازه‌گیری یا تخمین جرم حجمی خاک قابل تعیین باشد. فرمولهای این محاسبه در ASCE (۱۹۹۸) و ASTM D2845-95 (ASTM, 2000) نشان داده شده است. در نسبت پواسون ۰/۲۲ سرعت موج برشی ۶۰ درصد سرعت موج تراکمی و در نسبت پواسون ۰/۳۳، این نسبت ۵۰ درصد خواهد

بود. شکل (۳-۸) رابطه سرعت موج تراکمی و مدوله‌های یانگ و برشی محاسبه شده توسط روکر (۲۰۰۰) را نشان می‌دهد. این روابط در زیر سطح آب زیرزمینی، جایکه اشباع‌شدگی قویاً سرعت موج تراکمی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، معتبر نیستند.



شکل (۳-۵) رابطه سرعت موج تراکمی و عدد آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) برای تقریباً ۲۰ محل در جنوب غرب آمریکا. اعداد SPT غیر قابل قبول ثبت شده در لاگ گمانه‌ها، بزرگتر از ۱۰۰ ضربه در فوت، فقط برای مقایسه نشان داده شده‌اند (روکر، ۲۰۰۰).

شکل (۳-۴) رابطه قابلیت شکافت‌پذیری و سرعت موج تراکمی برای بلدوزرهای با اندازه مختلف (D7-D11) و تراکپو (۲۳۵-۲۴۵) در گرانیت و کنگلومرا (کاتریلار، ۱۹۸۴ و ۱۹۹۳). نقل مجدد از روکر (۲۰۰۰).

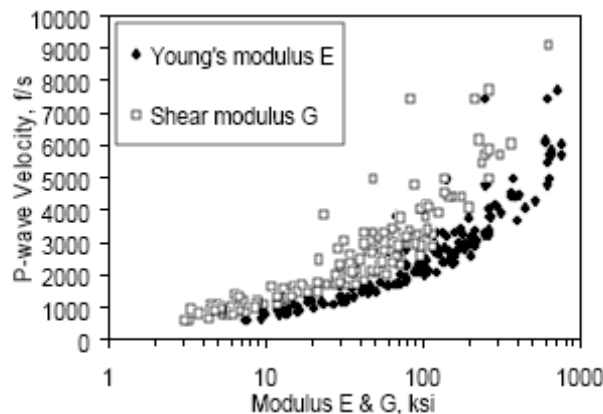


شکل (۳-۷) رابطه سرعت موج تراکمی و مقدار RQD برای سه پروژه بزرگراهی و یک پروژه هتل در محدوده سنگهای گرانیتی در آریزونا. مقادیر میانگین و محدوده تغییرات آن نشان داده شده است (روکر، ۲۰۰۰).

شکل (۳-۶) رابطه سرعت موج تراکمی در عمق حدود ۳/۵ متری و میانگین اندازه ذرات D50 برای نهشته‌های خوب دانه‌بندی شده بستر رودخانه برای ۲۰ محل در جنوب غربی آمریکا (روکر، ۲۰۰۰).







شکل (۳-۸) رابطه بین سرعت موج تراکمی و مدول‌های یانگ و برشی در حالت کرنش کم. مدولها از اندازه‌گیری همزمان سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی در ۲۵ محل در جنوب غربی آمریکا بدست آمده‌اند (روکر، ۲۰۰۰).

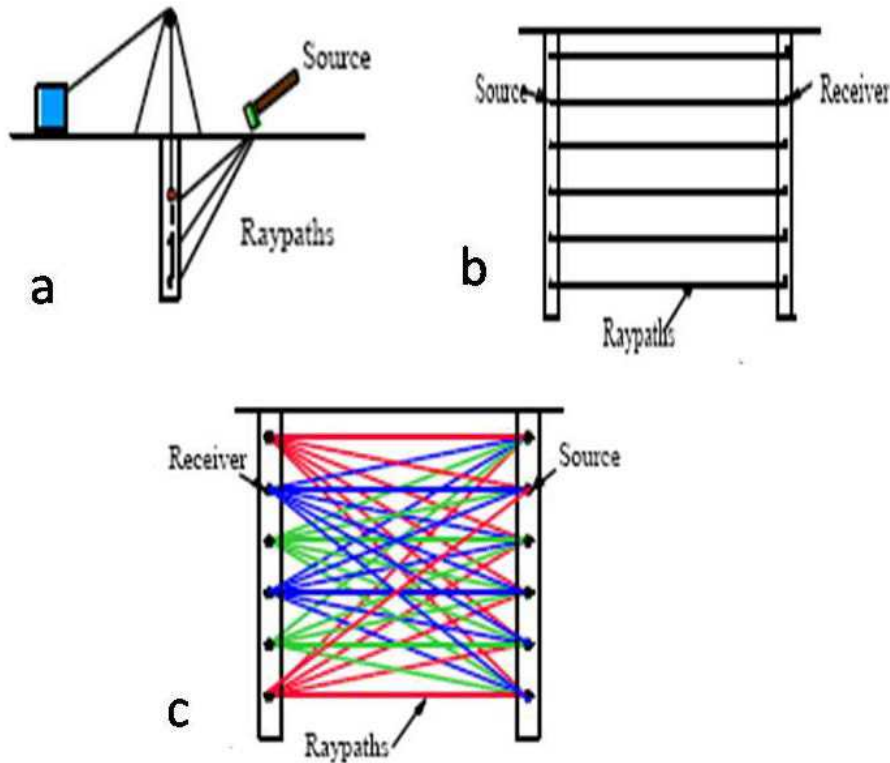
### ۳-۳- روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌ای گمانه‌ای

روشهای ژئوفیزیکی گمانه‌ای در مواقعی که اطلاعات زیاد از محل‌های محدود مانند محل پایه‌های یک پل مورد نیاز باشد کاربرد دارند. نتایج مطالعه در روشهای گمانه‌ای معمولاً به منطقه‌ای در مجاورت بلافاصله گمانه محدود می‌گردد اما برخلاف روشهای سطحی که قدرت تفکیک آنها با عمق کاهش می‌یابد قدرت تفکیک این روشها مستقل از عمق است. از نظر هزینه انجام این روشها به دلیل نیاز به حفاری، پر هزینه هستند اما در مواردی که از قبل گمانه‌هایی در محل موجود هستند یا قرار باشد گمانه‌هایی به منظور بررسی‌های دیگر حفر گردند هزینه کلی انجام این روشها پایین خواهد آمد. بعضی از روشها باید در گمانه‌های بدون پوشش، برخی در گمانه‌های دارای لوله جدار PVC و برخی دیگر با وجود لوله جدار فولادی قابل اجرا هستند. بعضی قابلیت اجرا در هر دو حالت خشک و مرطوب را دارند و برخی باید حتماً چاه مرطوب باشد. راهنمای ASTM D5753 توصیف خلاصه‌ای از این روشها و کاربردهای آنها را ارائه کرده است.

انواع مختلفی از ابزارهای اندازه‌گیری درون گمانه‌ای وجود دارد که هر کدام برای ثبت یک محرک خاص (ایجاد شده توسط یک چشمه فعال یا القایی) طراحی شده‌اند. محرکهای ارسالی با توجه به اهداف مطالعات می‌تواند بسیار متنوع و متغییر بوده و این امر منجر به شکل‌گیری روش‌های ژئوفیزیکی گمانه‌ای متنوعی شده است که بهترین آنها عبارتند از: چاه نگاری الکتریکی، چاه نگاری هسته‌ای، چاه نگاری صوتی، نگاربردای دما، چاه نگاری لرزه‌ای. علاوه بر این روشها، روشهای دیگری مانند قطر سنجی که تغییرات قطر گمانه و یا خصوصیات خود گمانه را اندازه‌گیری می‌نمایند، نیز وجود دارند. این روشها کاربردهای متنوعی از قبیل بررسی خصوصیات سیال درون گمانه، تصویربرداری از دیواره‌ها و اندازه‌گیری ویژگیهای مصالح تشکیل دهنده جدار گمانه در محدوده‌ای به فاصله چند اینچ تا چند متر پیرامون دیواره، دارند. عموماً روشهای گمانه‌ای برای شناسایی‌های عمیق در مطالعات اکتشافات نفت و گاز به کار می‌رود. در مطالعات با کاربرد در مهندسی عمران که برای شناسایی‌های زیرسطحی و به منظور تعیین مشخصات ژئوتکنیکی انجام می‌شود، روشهای گمانه‌ای لرزه‌ای متداول‌تر هستند که برای تعیین سرعت موج لرزه‌ای و لایه بندی زمین به کار برده می‌شود.

سه نوع روش لرزه‌ای گمانه‌ای در کاربردهای مهندسی متداول بصورت شماتیک در شکل (۳-۹) نشان داده شده‌اند و عبارتند از: روش لرزه‌ای تک گمانه‌ای (چاه پایین و چاه بالا؛ Downhole and Uphole)، بین گمانه‌ای (Cross hole) و توموگرافی لرزه‌ای (Seismic tomography) که در ادامه به اختصار تشریح خواهند شد. یادآوری می‌شود که این روشها

در مطالعات مربوط به تونل و پلها که نیازمند شناسایی‌های عمیقتر و مفصل‌تر در محدودهای کوچکتر هستیم مناسب است و در مسیرهایی طولانی مانند مسیر راه استفاده نمی‌شوند.

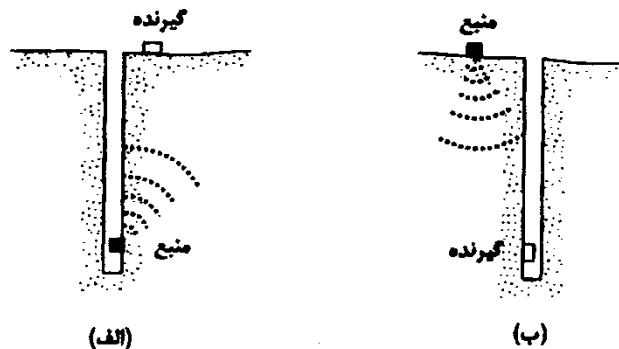


شکل (۳-۹) شمای کلی از سه روش لرزه‌ای گمانه‌ای (a) روش لرزه‌ای تک گمانه‌ای چاه پایین (b) بین چاهی (c) توموگرافی

### ۳-۳-۱- روش لرزه‌ای تک گمانه‌ای

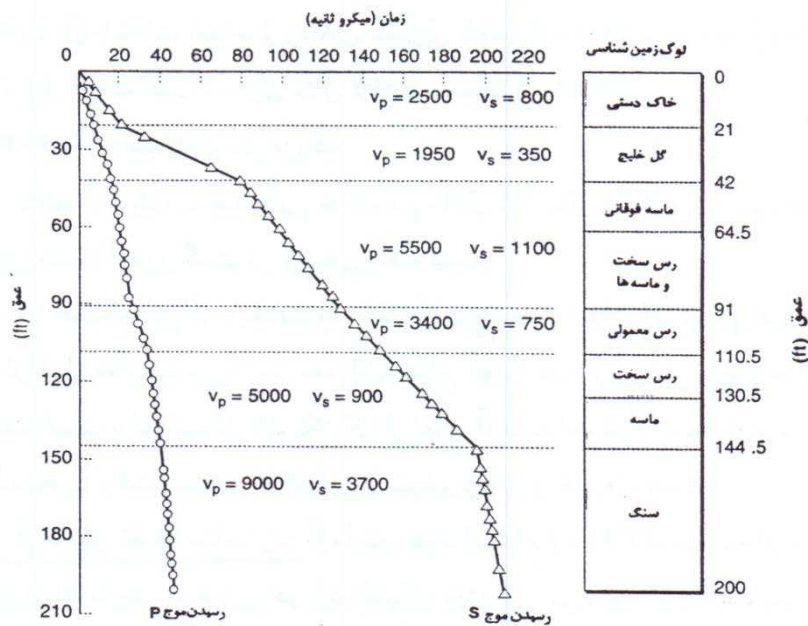
روش لرزه‌ای تک گمانه‌ای با استفاده از یک گمانه منفرد انجام شده و بر حسب موقعیت چشمه لرزه‌ای و گیرنده‌ها به دو صورت چاه پایین (Downhole) و چاه بالا (Uphole) انجام می‌شود. در آزمایش چاه پایین چشمه لرزه‌ای در سطح زمین نزدیک گمانه قرار داده می‌شود. یک گیرنده منفرد که در اعماق مختلف قابل جابجا کردن می‌باشد یا یک سری از گیرنده‌های متعدد در اعماق مختلف در برابر دیوار گمانه نصب می‌شوند. همچنین یک گیرنده آغازگر در محل چشمه قرار داده می‌شود (شکل ۳-۱۰)، تمامی گیرنده‌ها به یک سیستم ضبط اطلاعات با سرعت بالا بگونه‌ای متصل گردیده که خروجی آنها بصورت تابعی از زمان قابل اندازه‌گیری خواهند بود. در آزمایش چاه بالا یک چشمه لرزه‌ای متحرک در داخل گمانه قرار گرفته و یک گیرنده منفرد در سطح زمین نزدیک به گمانه نصب می‌شود.





شکل (۳-۱۰) شمای کلی از دو نوع برداشت لرزه‌ای تک گمانه‌ای (الف) آزمایش چاه بالا؛ (ب) آزمایش چاه پایین (Kramer, 1999)

هدف از این آزمایشات اندازه‌گیری زمان حرکت امواج P و S از منبع تحریک تا گیرنده‌ها می‌باشد. با قراردادن گیرنده‌ها در موقعیت مناسب، منحنی زمان سیر امواج بر حسب عمق قابل ترسیم می‌باشد (شکل ۳-۱۱) شیب منحنی زمان-عمق معرف سرعت انتشار موج در آن عمق خواهد بود.



شکل (۳-۱۱) منحنی زمان حرکت براساس آزمایش چاه پایین در ناحیه خلیج سانفرانسیسکو (Kramer, 1999)

امواج S در آزمایشات چاه پایین بسیار ساده‌تر از آزمایشات چاه بالا قابل ایجاد هستند، در نتیجه آزمایش چاه پایین بسیار متداولتر می‌باشد. با یک منبع موج SH، آزمایش چاه پایین سرعت امواج را مشابه امواجی که بیشترین مقدار انرژی امواج زلزله در سطح زمین را حمل می‌کنند اندازه‌گیری می‌کند. بدلیل اینکه امواج باید از میان تمامی مصالح مابین منبع انرژی و گیرنده‌ها عبور نمایند، آزمایش چاه پایین ردیابی لایه‌هایی را که در آزمایش انکسار لرزه‌ای مخفی می‌مانند، میسر می‌سازد. مشکلات بالقوه در آزمایشات تک گمانه‌ای و تحلیل نتایج آنها به دستخوردگی خاک در خلال حفاری گمانه، جدارگذاری آنها، اثرات حفاری، منابع انرژی ناکافی یا بسیار بزرگ، اثرات نوفه‌های زمینه و سفره آب زیرزمینی بر می‌گردد. اثرات مصالح و میرایی شعاعی بر اشکال موج، تشخیص ورود موج S در اعماقی بزرگتر از ۳۰ تا ۶۰

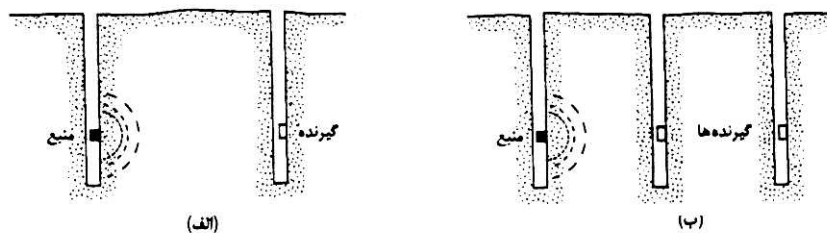
متر (تا ۲۰۰ فوت) را مشکل می‌سازد. تلاشهایی برای اندازه‌گیری ضرائب میرایی در آزمایشات چاه پایین نیز صورت گرفته است (Redpath et al, 1982; Redpath and lee, 1986).

### ۳-۳-۲- روش لرزه‌ای بین گمانه‌ای

روش لرزه‌ای بین گمانه‌ای برای اندازه‌گیری سرعت‌های انتشار امواج تراکمی و برشی در امتداد مسیرهای افقی لایه‌های زمین با استفاده از ۲ یا بیشتر گمانه استفاده می‌شود. این روش ترجیحاً در پروژه‌های بحرانی که نیاز به داده‌های با کیفیت خیلی بالا دارند بکار گرفته می‌شود، اگر چه استفاده از آن در موارد دیگر نیز دور از انتظار نیست. در ساده‌ترین حالت سیستم برداشت داده‌ها متشکل از دو گمانه است (شکل ۳-۱۲ الف) که در یکی چشمه انرژی و در دیگری گیرنده نصب می‌گردد. با نصب منبع و گیرنده، هر یک در داخل گمانه‌ها در یک عمق یکسان، سرعت انتشار امواج در مصالح بین گمانه‌ها در عمق مربوطه اندازه‌گیری می‌شود. با انجام آزمایش در اعماق مختلف یک پروفیل سرعت بدست خواهد آمد.

استفاده از این روش یا به منظور اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی و برشی است، که بنوبه خود می‌تواند برای تعیین مدول‌های یانگ و نسبت پواسون بکار گرفته شوند، یا می‌تواند بطور ساده برای شناسایی ناهنجاریهای موجود بین گمانه‌ها بکار گرفته شود.

چشمه انرژی در این روش براساس نیازهای آزمایش انتخاب می‌شود. نخستین ملاحظه در انتخاب چشمه انرژی نوع موج لرزه‌ای مد نظر برای اندازه‌گیری است، به این معنی که چشمه انرژی باید دارای توان کافی از نوع مورد نظر باشد. برای ایجاد موج P مناسب، چشمه انرژی بکار گرفته شده باید بتواند انرژی کافی از نوع تراکمی یا تغییر حجم را به محیط اعمال نماید. چشمه‌های انرژی مانند انفجار، چکش یا سیستم هوای فشرده (Air guns) به عنوان چشمه انرژی موج تراکمی قابل قبول هستند. برای ایجاد موج S قابل تشخیص، سیستم باید بتواند تغییر شکل‌های جهت یافته به محیط وارد نماید. برای برداشت امواج برشی مناسب، چشمه انرژی باید تکرار پذیر و در صورت لزوم، قابل اعمال در جهت معکوس نیز باشد. چشمه انرژی موج برشی باید قادر به تولید ردیف موج با دامنه حداقل دو برابر ردیف موج تراکمی باشد.



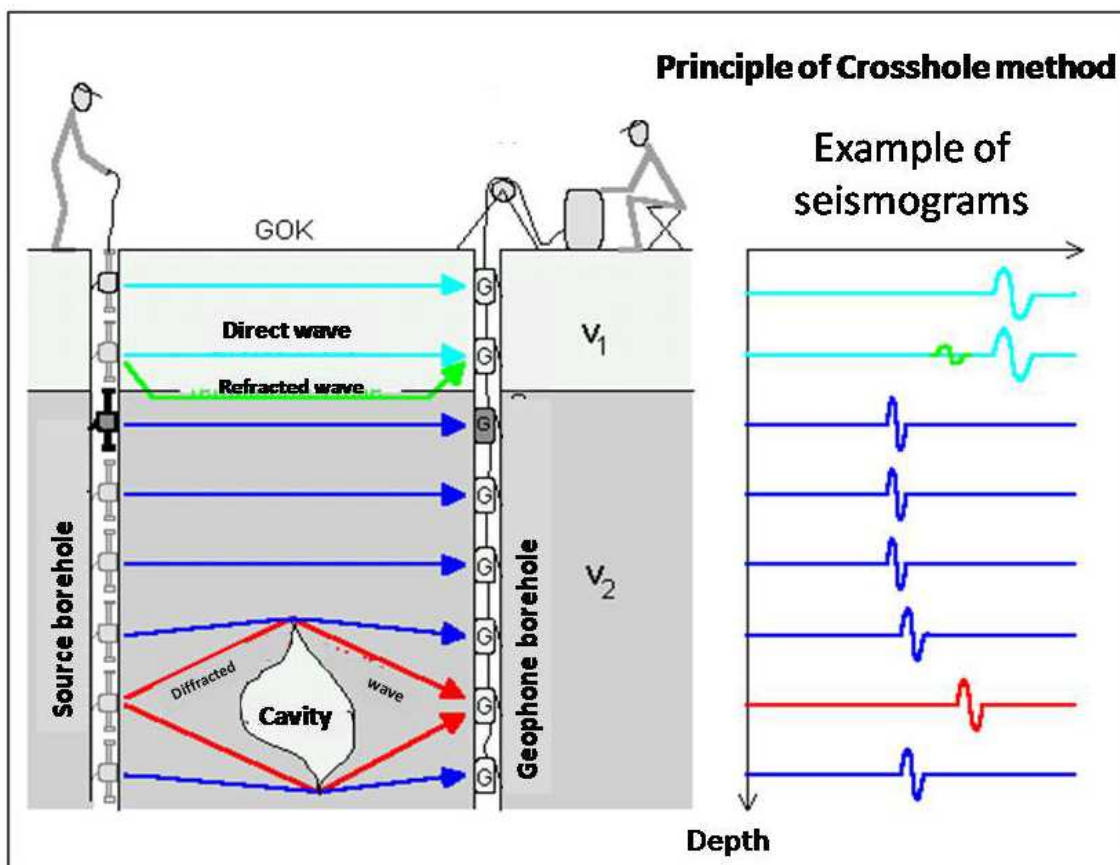
شکل (۳-۱۲) آزمایش امواج لرزه‌ای عبوری: الف) اندازه‌گیری مستقیم بوسیله دو گمانه، ب) اندازه‌گیری فاصله‌ای بوسیله سه گمانه (Kramer, 1999)

استاندارد ASTM D4428 جزییات مربوط به روش لرزه‌ای بین‌چاهی را ارائه نموده است. مطابق با این استاندارد استفاده از ۳ گمانه در یک راستا با فاصله مرکز تا مرکز ۳ متر ترجیح دارد. استفاده از ۳ گمانه یا بیشتر بطور همزمان می‌تواند عدم قطعیت‌های احتمالی ناشی از زمان آغاز اندازه‌گیری، اثرات جدار و خاکریزی بین جدار و دیواره گمانه و ناهمگنی مصالح را حداقل برساند. در این حالت سرعت‌های انتشار امواج بر مبنای اختلاف زمانهای رسیدن امواج به هر یک از گمانه‌های مجاور بدست می‌آیند. در مواردی که سرعت موج برشی بالاتر از ۴۵۰ متر بر ثانیه باشد فاصله بین

گمانه‌ها می‌تواند به ۴/۵ متر افزایش یابد. در مواردی که استفاده از فاصله‌های بیشتر ناگزیر باشد باید توجه داشت که ممکن است اولین امواج رسیده به گیرنده، موج مستقیم نباشد و امواج منکسر شده از لایه‌های مجاور سریعتر در گیرنده دریافت شوند. در این موارد محاسبه سرعت با توجه به قانون اسنل (همانند آنچه در روش شکست مرزی بیان شد) صورت گیرد.

شکل (۳-۱۳) نمونه‌ای شماتیک از مسیرهای مختلف عبور امواج در یک آزمایش بین چاهی و اولین رسید امواج توسط گیرنده‌ها را نشان میدهد.

حفر گمانه‌ها باید با ایجاد حداقل بهم ریختگی در جدار گمانه و با اعمال دقت لازم به منظور عدم انحراف از محور قائم صورت گیرد. به منظور تعیین دقیق فاصله افقی بین گمانه‌ها انحراف از محور قائم باید بدقت اندازه‌گیری شود.



شکل (۳-۱۳) شمای کلی مسیرهای مختلف عبور احتمالی امواج در آزمایش امواج لرزه‌ای بین چاهی نشان دهنده تاثیر وجود لایه پرسرعت و رسید سریعتر امواج انکسار یافته (رنگ سبز) در این لایه و نیز تاثیر تفرق امواج در اثر وجود یک ناهنجاری حفره‌ای (رنگ قرمز)

نظر باینکه غالباً لایه‌های مرزی افقی هستند، آزمایش امواج عبوری امکان اندازه‌گیری خواص لایه‌های منفرد در خاک را میسر می‌سازد. بوسیله این روش همچنین لایه‌های مخفی که در روش انکسار لرزه‌ای قابل تشخیص نمی‌باشند، شناسایی می‌گردند. آزمایشات امواج عبوری، اطلاعات قابل اطمینانی می‌دهند، چنانکه برای اعماق ۳۰ تا ۶۰ متر (۱۰۰ تا ۲۰۰ فوت) از منابع انرژی مکانیکی و برای اعماق بیشتر، از منابع انرژی انفجاری استفاده می‌شود. هنگامیکه لایه‌هایی با سرعت بالاتر در نزدیکی لایه مورد مطالعه قرار داشته باشد، سرعت اندازه‌گیری شده ممکن است با سرعت واقعی یکسان نباشد. در چنین حالات روشهای تفسیر پیشرفته تری از آنچه که در آزمایش انکسار لرزه‌ای به کار می‌رود،

نیاز است. Hryciw (۱۹۸۹) روشی برای اصلاح منحنی شعاع مسیر در مصالحی که بطور پیوسته سرعت در آنها تغییر می‌کند، ارائه داده است.

اندازه‌گیری کاهیدگی دامنه بوسیله روش لرزه ای بین‌گمانه‌ای مستلزم سه و یا تعداد بیشتری گمانه جهت محاسبه ضریب میرایی خاکها می‌باشد (Hoar and Stokoe, 1984; Mok et al, 1988). روش انجام این کار نیازمند گیرنده‌هایی است که بدقت کالیبره و به دیواره گمانه‌ها نصب شده باشند. با فرض یک الگوی تابش، اثر کاهیدگی هندسی (یا میرایی شعاعی) از میرایی اندازه‌گیری شده، به منظور بررسی کاهیدگی ناشی از میرایی مصالح، قابل تفکیک خواهد بود. فرضیات مورد نیازی که چنین دیدگاهی ارائه می‌دهد، بخوبی قابل انطباق با مناطقی است که هندسه ساده‌ای داشته و شرایط خاک در آنها همگن باشد.

### ۳-۳-۳- روش توموگرافی لرزه ای

واژه توموگرافی از واژه یونانی تومو به معنای برش گرفته شده که عبارت است از بازسازی تصویری خواص فیزیکی یک جسم در مقطعی از آن با اندازه‌گیری‌هایی که در سطوح خارجی آن جسم انجام می‌گیرد (Loit, 1983). در این روش با بررسی تغییرات سرعت امواج در مقطع به دست آمده می‌توان اطلاعات با ارزشی از کیفیت مصالح سازنده زمین به دست آورد.

در این روش خصوصیات فیزیکی زمین در مقابل انتشار، انعکاس، جذب و پراش امواج الاستیک، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مطالعات توموگرافی لرزه‌ای، امواج الاستیک توسط چشمه یا چشمه‌هایی تولید و پس از عبور از ناحیه مورد مطالعه توسط گیرنده‌ها دریافت می‌شوند. با پردازش اطلاعات حاصل از گیرنده‌ها، یک مقطع از ناحیه مورد مطالعه تهیه می‌گردد که می‌توان نوع و موقعیت ناهنجاری‌هایی نظیر گسل، حفره، توده چگال، دایک، سیل و عدسی و غیره را در ناحیه مورد مطالعه تشخیص داده و از کمیت‌های فیزیکی به دست آمده خواص و ضرایب فیزیکی و مکانیکی زمین را محاسبه نمود.

یکی از مشکلاتی که در روش‌های معمول لرزه‌ای (روش بازتابی و شکست مرزی) وجود دارد، کاهیدگی امواج فرکانس بالاست که وجودشان در تشخیص تغییرات کوچک مقیاس، حائز اهمیت است. این کاهیدگی ناشی از وجود لایه‌های سطحی هوازده است. در روش توموگرافی لرزه‌ای، فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در زیر لایه هوازده قرار داشته و از این رو امواج فرکانس بالا از محدوده بین خط گیرنده و فرستنده عبور نموده و قادر به تصویر کردن خواص کوچک مقیاس وابسته به سرعت و کاهیدگی مواد سازنده زمین هستند.

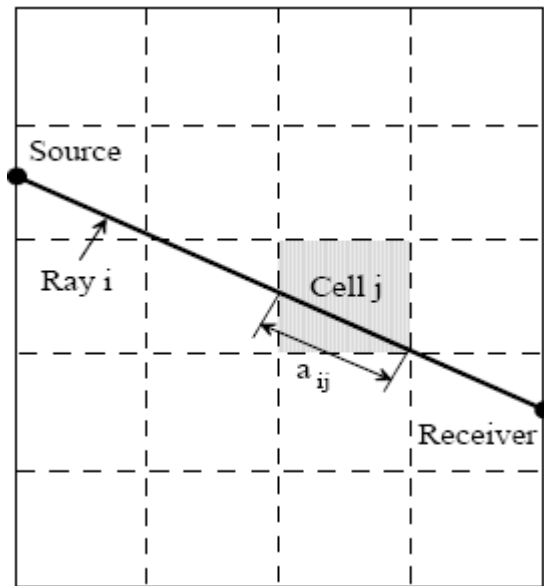
### ۳-۳-۳-۱- کلیات نظری توموگرافی لرزه ای

در این آزمایش مسیر عبور امواج به سلول‌هایی تقسیم بندی شده و زمان سیر موج و مختصات مکانی چشمه‌ها و گیرنده‌های امواج بعنوان داده‌های اولیه در نظر گرفته شده و مقطع تصویر شده نحوه توزیع سرعت را مشخص می‌نماید (شکل ۳-۱۴). به بیان ساده شده، روش محاسباتی مبتنی بر حل معادله ماتریسی زیر می‌باشد:

$$t_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j \quad i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, m \quad \text{رابطه ۳-۴}$$

که در این رابطه،  $a_{ij}$  طول  $i$  امین پرتو در  $i$  امین سلول،  $x_j$  عکس سرعت موج در  $j$  امین سلول و  $t_i$  زمان سیر  $i$  امین پرتو می‌باشد. برای حل این معادله ماتریسی روش‌های مختلف مستقیم و معکوس وجود دارد که مرسوم ترین روش استفاده از الگوریتم تکرار حداقل مربعات است.

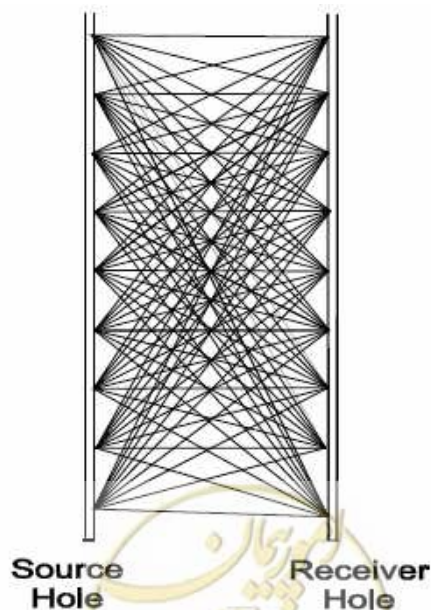




شکل (۳-۱۴) نمایش شماتیک یک مقطع سلول بندی شده و مسیر شاخص برای پرتو از چشمه به گیرنده

### ۳-۳-۲- برداشت داده‌ها

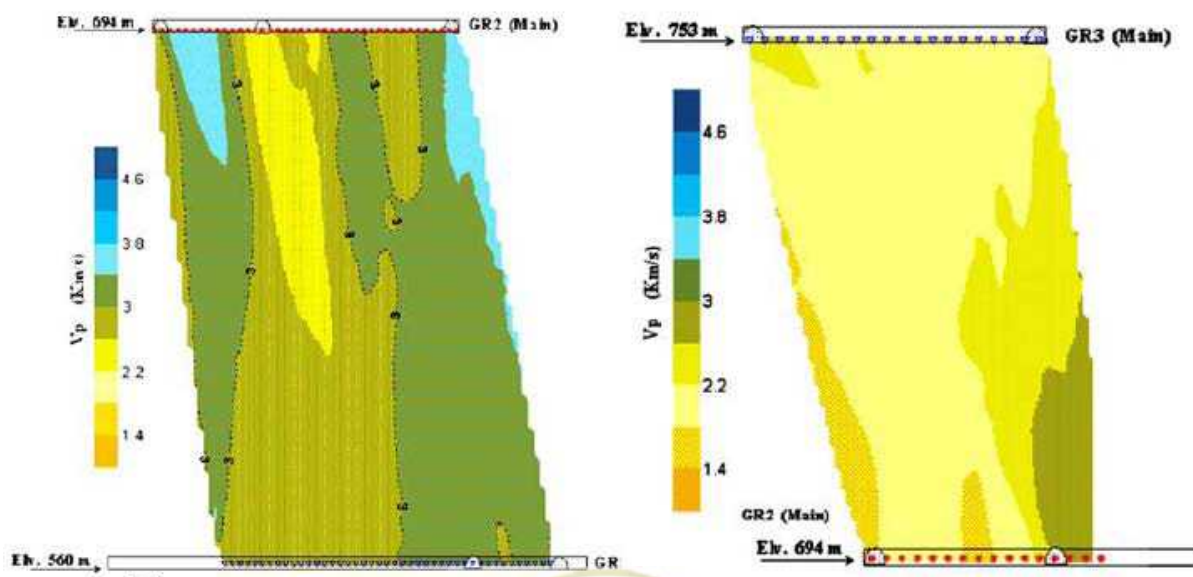
نحوه برداشت توموگرافی شامل قرار دادن منبع چشمه‌های انرژی در درون گمانه، گالری یا سطح زمین و نصب گیرنده‌ها درون گمانه، گالری یا سطح زمین و بررسی توده جرم بین گیرنده و فرستنده می‌باشد. نمایی شماتیک از گیرنده‌ها، فرستنده‌ها و مسیر امواج در شکل (۳-۱۵) ارائه شده است. روش کار به این گونه است که انرژی در محل فرستنده ایجاد شده و توسط تمام گیرنده‌ها ثبت می‌شود. آنگاه موقعیت فرستنده تغییر یافته و انرژی آزاد شده در موقعیت جدید، توسط همان سری گیرنده‌ها ثبت می‌گردد. این عمل تا یک سری پوشش کامل مسیر موج ادامه پیدا می‌کند. بدین ترتیب با پوشش کامل و ثبت زمان رسید امواج، می‌توان خواص سرعتی و کاهندگی زمین را توسط روش بازسازی تصویری توموگرافی، با قدرت تفکیک بالا تعیین نمود.



شکل (۳-۱۵) تصویر شماتیک فرستنده‌ها، گیرنده‌ها و مسیر امواج در روش توموگرافی لرزه‌ای

### ۳-۳-۳-۳- پردازش داده ها

- پس از برداشت داده ها، روش توموگرافی لرزه ای بر مبنای زمان سیر امواج طی پنج مرحله زیر انجام می‌گیرد:
- تعیین زمان سیر امواج لرزه‌ای
  - تعیین مدل اولیه: در این مرحله، ناحیه مورد مطالعه با سلولهایی با اندازه مشخص به صورت گسسته تبدیل شده و به هر سلول یک مقدار سرعت که از اولین زمان رسید موج تخمین زده شده، نسبت داده می‌شود.
  - ردیابی مسیر موج: هدف از این عمل، ردیابی مسیر موج از یک منبع انرژی به گیرنده با فرض مستقیم نبودن مسیر امواج است. روشهای متعددی برای ردیابی مسیر امواج ارائه شده است که عمده ترین آنها عبارتند از: حل تفاضل محدود معادله موج آیکنوال، استفاده از اصل هویگنس، حل تفاضل محدود معادله موج و روش درون یابی زمان سیر خطی. با وجود ارائه روش‌های فوق در بخشی از برنامه های کامپیوتری مسیر موج به صورت مستقیم در نظر گرفته می‌شود که خالی از اشکال نیست (Barry et al., 1993).
  - حل معادلات زمان-سیر: در این مرحله با استفاده از الگوریتم‌های خاص و نتایج مراحل قبل، معادلات زمان سیر حل می‌گردد. دو روش عمده در این زمینه وجود دارد. نخست روش بازسازی تصویر جبری که خود شامل دو الگوریتم تکنیک بازسازی جبری (Algebraic Reconstruction technique, ART) و تکنیک بازسازی تکرار همزمان (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, SIRT) است. دوم روش کمترین مربعات که روش معمولتر به شمار می‌آید.
  - شبیه سازی مقطع مورد مطالعه: در این مرحله با استفاده از سرعت های محاسبه شده برای سلولها، مقطع مورد نظر شبیه سازی می‌گردد.
- شکل (۳-۱۶)، به عنوان یک نمونه، توزیع سرعت موج تراکمی را در گالری‌های جناح راست سد بختیاری که به روش توموگرافی لرزه ای به دست آمده، نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۱۶) مقطع سرعت موج تراکمی به دست آمده به روش توموگرافی لرزه‌ای در گالری‌های جناح راست سد بختیاری (زارعی و همکاران، ۱۳۸۹).





### ۳-۳-۴- مزایا و محدودیت‌ها

توموگرافی، تصویری دو یا سه بعدی از منطقه هدف با قدرت تفکیک بالا برای تصمیم‌گیری‌های اولیه مهندسی را فراهم می‌کند. این روش می‌تواند برای بازبینی تغییرات تحت‌الارضی از جمله بازبینی تزریق آب بین گمانه‌های آزمایشی و نیز ارزیابی اثر تکنیک‌های اصلاح خاک مورد استفاده قرار گیرد. از این روش همچنین برای تعیین زون‌های شکسته و نیز تصویرسازی با دقت بالا استفاده می‌شود.

طول آرایش بلند، عمق نفوذ نسبتاً پایین، حساسیت به نوفه‌های جانبی، عدم کارایی مناسب در موارد عدم وجود اختلاف سرعت کافی در لایه‌های مجاور یا وجود لایه‌های نازک و اتصال نامناسب ژئوفونها به زمین از عوامل محدودکننده قابلیت این روش هستند. علاوه بر این، روش مذکور نیازمند برداشت داده‌های زیاد و نیز نرم‌افزارهای ویژ‌آنالیز دو بعدی و سه بعدی است.

### ۳-۴- روش مقاومت الکتریکی

#### ۳-۴-۱- کاربردها

استفاده از روشهای ژئوالکتریکی در ایران گسترش فراوانی یافته است به گونه‌ای که براساس بررسی آماری انجام شده در این مطالعه (فصل دوم)، در میان روشهای ژئوفیزیکی بیشترین کاربرد را دارا می‌باشد. مطالعه مشابهی در ایالات متحده و کانادا نشان دهنده کاربرد کمتر این روش در مقایسه با ایران است به گونه‌ای که روش مقاومت سنجی تنها ۱۰ درصد میزان استفاده را به خود اختصاص داده است. گسترش نسبی این روش در ایران را می‌توان به ناشناخته بودن روشهای جدیدتر مانند GPR و پرهزینه‌تر بودن روشهایی مانند ژئوسایزیمیک ارتباط داد.

براساس ASTM (D6429) و Anderson et.al., 2006، روش مقاومت سنجی در تهیه نقشه حفرات خالی در مسیر تونلها تا اعماق کمتر از ۳۰ فوت، برآورد برجای ویژگیهای سنگها و خاکها نظیر اشباع شدگی، تخلخل و نفوذپذیری، شناسایی مشخصات زمین‌لغزش‌ها، شناسایی سطوح تماس لایه‌های زمین‌شناسی پرشیب در اعماق کمتر از ۳۰ فوت و تهیه نقشه تغییرات محدوده زمین‌های شور در طول زمان، بیشترین کاربرد را به عنوان انتخاب اول داشته و در موارد متعدد دیگری می‌تواند به عنوان گزینه دوم مد نظر قرار گیرد.

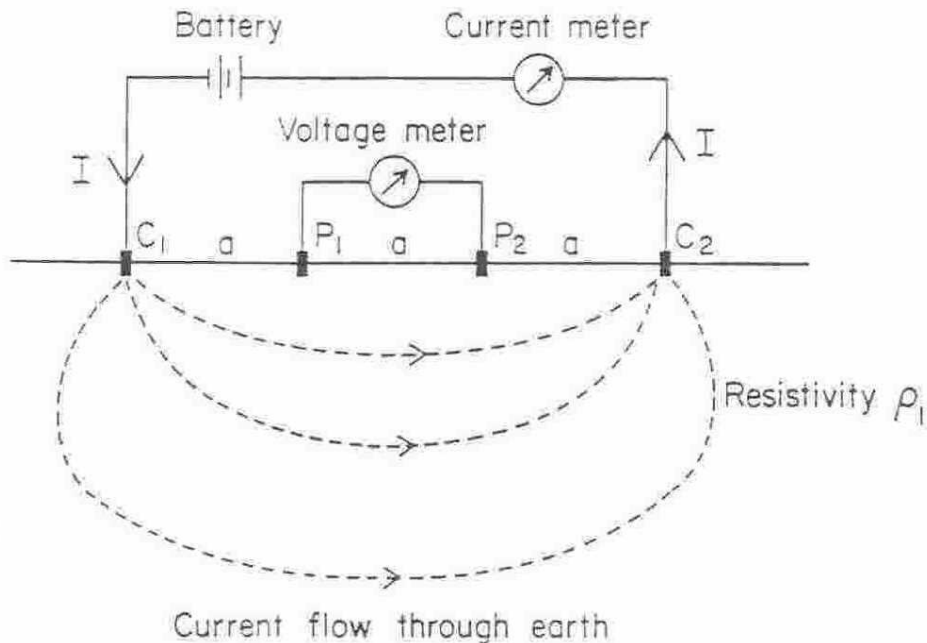
#### ۳-۴-۲- مفاهیم پایه در روش مقاومت الکتریکی

در یک مفهوم ساده تجهیزات اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی را می‌توان شامل یک منبع جریان (باطری)، آمپرتر و پتانسیومتر تصور کرد. این تجهیزات همانطور که در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده به چهار الکتروود که بمنظور برقراری ارتباط الکتریکی با زمین، چند سانتیمتر در زمین فرو رفته اند، متصل شده اند. منبع جریان، شدت جریان مستقیمی را به میزان I برای عبور از داخل زمین ایجاد می‌کند، این جریان به الکتروود C1 وارد شده و از الکتروود C2 باز میگردد. خطوط جریان در داخل زمین بصورت سه بعدی است. مسیر این جریان بصورت تئوری قابل محاسبه میباشد اما باید توجه داشت که این محاسبات به خصوص در یک زمین دارای پیچیدگی‌های زمین‌شناسی بسیار مشکل می‌باشد. همانطوریکه بیان شد در تئوری، جریان مستقیم در نظر گرفته می‌شود اما در عمل برای برداشت‌های مقاومت الکتریکی بنا به دلایل زیر از جریان متناوبی با فرکانس کمتر از ۲۰ هرتز استفاده می‌شود:

- جریان مستقیم در محل الکتروودها منجر به واکنش‌های یونی شده که به نوبه خود باعث تشکیل جریانهایی

متفاوت با جریان الکتریکی ارسالی می‌گردد.

- جریانهای الکتریکی طبیعی زمین و پتانسیل‌های لحظه‌ای، که معمولاً یک جهت‌ه بوده و به کندی با زمان تغییر می‌کنند و پتانسیلی الکتریکی علاوه بر پتانسیل ناشی از جریان ارسالی ایجاد می‌نمایند.



شکل (۳-۱۷) نمای شماتیک از یک برداشت مقاومت سنجی، تجهیزات مورد استفاده و منحنی‌های جریان الکتریکی در زمین

کمیتی که توسط پتانسیومتر اندازه‌گیری می‌شود مقدار افت پتانسیل در طول مسیر جریان الکتریکی است که براساس آن و با توجه به قانون اهم که مقدار افت پتانسیل را برابر حاصلضرب مقاومت الکتریکی در شدت جریان معرفی می‌نماید مقاومت الکتریکی محاسبه می‌گردد. وقتی زمین ناهمگن و لایه‌ای بوده و دارای تغییرات جانبی باشد افت پتانسیل مربوط به تمام لایه‌ها و زونها بوده و در نتیجه مقاومت الکتریکی نیز شامل برآیند مقاومت‌های حاصل از لایه‌ها و زونها خواهد بود. از طرفی چون نحوه آرایش الکترودها در نحوه توزیع جریان الکتریکی در زمین موثر است لذا در عمل برای بیان مقاومت الکتریکی زمین، پارامتری به نام مقاومت ظاهری ( $\rho_a$ ) تعریف می‌شود که با رابطه کلی زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

رابطه ۳-۵

در این رابطه  $\Delta V$ ، اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین الکترودهای پتانسیل،  $I$  شدت جریان فرستاده شده توسط الکترودهای جریان و  $K$  فاکتور مربوط به آرایه الکترودها بوده و مقدار آن برای آرایه‌های مختلف متفاوت است. متناسب با اهداف مطالعات، برداشت‌های مقاومت الکتریکی با آرایه‌های مختلفی از الکترودها انجام می‌شود که مهمترین این آرایه‌ها شامل ونر، شلومبرژه، دوقطبی- دوقطبی و سه الکترودی می‌باشند. آرایه‌های دیگری نیز وجود دارند که استفاده غیرژئوتکنیکی داشته یا استفاده از آنها گسترش چندانی ندارد. از این نوع آرایه‌ها می‌توان به آرایه لی، یک قطبی- دوقطبی، نیمه شلومبرژه و گرادیان اشاره نمود. برخی از این آرایه‌ها به صورت شماتیک در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده‌اند. در ادامه به شرح مختصر برخی آرایه‌های متداول پرداخته می‌شود.

## آرایه ونر (Wenner)

در این آرایه، چهار الکتروود با یکدیگر فاصله مساوی داشته و در یک راستا قرار می‌گیرند. معمولاً دو الکتروود میانی برای الکتروودهای پتانسیل و دو الکتروود کناری برای الکتروودهای جریان استفاده می‌شود. رابطه مقاومت ظاهری برای این آرایه به صورت زیر محاسبه شده است:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

رابطه ۳-۶

که در آن  $a$  فاصله الکتروودی می‌باشد.

## آرایه شلومبرژه (Schlumberger)

آرایه شلومبرژه یکی از معمول‌ترین آرایه‌ها برای گمانه زنی می‌باشد. در این آرایه جریان توسط دو الکتروود بیرونی به زمین تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل حاصله، توسط دو الکتروود درونی اندازه‌گیری می‌شود. زمانی که فاصله الکتروودهای جریان کوچک باشد مقادیر بدست آمده فقط ناشی از تاثیر لایه‌های سطحی در اندازه‌گیری می‌باشد و با افزایش این فاصله، مقادیر مقاومت الکتریکی لایه‌های عمیق‌تر بدست می‌آید. نهایتاً از منحنی گمانه‌کتریکی برای تعیین عمق و ماهیت لایه‌های مختلف در زیر محل گمانه‌کتریکی بدست می‌آید. بدیهی است که آرایه ونر در واقع حالت خاصی از آرایه شلومبرژه است که در آن فاصله‌های الکتروودی یکسان است. رابطه مقاومت ظاهری برای این آرایه به صورت رابطه زیر ارائه شده است:

$$\rho_a = \pi a \left[ \left( \frac{s}{a} \right)^2 - \frac{1}{4} \right] \frac{\Delta V}{I}$$

رابطه ۳-۷

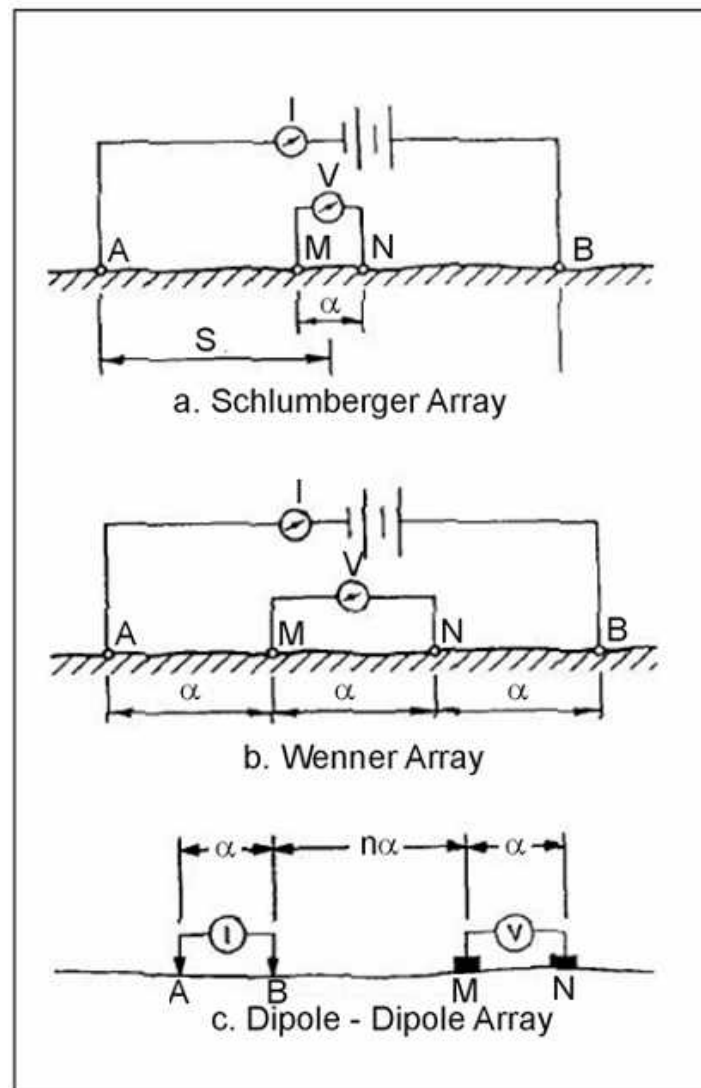
$a$ : فاصله بین الکتروودهای پتانسیل

$s$ : نصف فاصله الکتروودهای جریان

در عمل، الکتروودهای میانی ثابت نگه داشته شده و الکتروودهای بیرونی جابجا می‌شوند. افزایش فاصله  $a$  باعث کاهش حساسیت اندازه‌گیری  $\Delta V$  می‌شود لذا این فاصله هرگز نباید از  $0.4S$  بیشتر یابد و در صورت افزایش آن نتایج اندازه‌گیری معتبر نخواهد بود. گاهی اوقات برای شناسایی ناهمگنی‌های محلی یا تغییرات جانبی در اطراف الکتروودهای پتانسیل، نسبت فاصله  $a$  به  $S$  ثابت نگه داشته می‌شود.

مقایسه دو آرایه ونر و شلومبرژه نشان می‌دهد که آرایش شلومبرژه نسبت به تغییرات جانبی مقاومت الکتریکی لایه‌های زمین حساس بوده و امکان شناسایی این تغییرات را فراهم می‌آورد. در صورت نیاز می‌توان اثرات این تغییرات جانبی را حذف نمود. آرایش شلومبرژه در اجرا سریعتر و آسانتر است چون فقط فاصله الکتروودهای جریان باید در هنگام برداشت داده‌ها تغییر یابد در حالی که در روش ونر هر چهار الکتروود باید بصورت همزمان جابجا شوند. در آرایش ونر فضای بیشتری برای الکتروودهای پتانسیل وجود دارد و این امر باعث می‌شود مقدار اختلاف پتانسیل بیشتر شود در نتیجه بر خلاف آرایه شلومبرژه نیازی به دستگاه‌های خیلی دقیق نیست. علاوه بر این در روش شلومبرژه باید تصحیحاتی روی اطلاعات عملیات صحرائی انجام شود.





شکل (۳-۱۸) نمای شماتیک برخی از آرایه‌های مورد استفاده در روش مقاومت الکتریکی

### آرایه دوقطبی - دوقطبی (Dipole-Dipole)

در این آرایه فاصله الکترودهای پتانسیل برابر با فاصله الکترودهای جریان (a) است. فاکتور مهم دیگر در هندسه این آرایه ضریب n می باشد که بیانگر نسبت فاصله مرکز الکترودهای جریان و پتانسیل به a است که با افزایش آن عمق کاوش نیز افزایش می یابد. در این آرایه مقاومت ظاهری از رابطه زیر قابل محاسبه است:

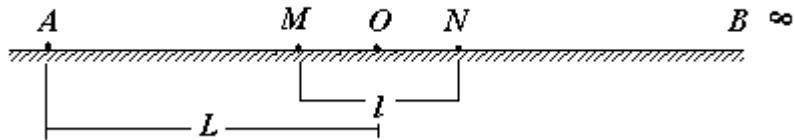
$$\rho_a = \pi a n(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad \text{رابطه ۳-۸}$$

امتیاز این روش در عدم وجود جفت شدگی الکترومغناطیسی بین مدارهای جریان و پتانسیل است. این آرایه به طور ویژه برای تهیه شبه مقطع در طول یک پروفیل استفاده می شود و کاربرد آن با اهداف ژئوتکنیکی در حال گسترش روزافزون است.

### آرایه الکترودی به روش پروفیل ترکیبی (Combined Resistivity Profiling, CRP)

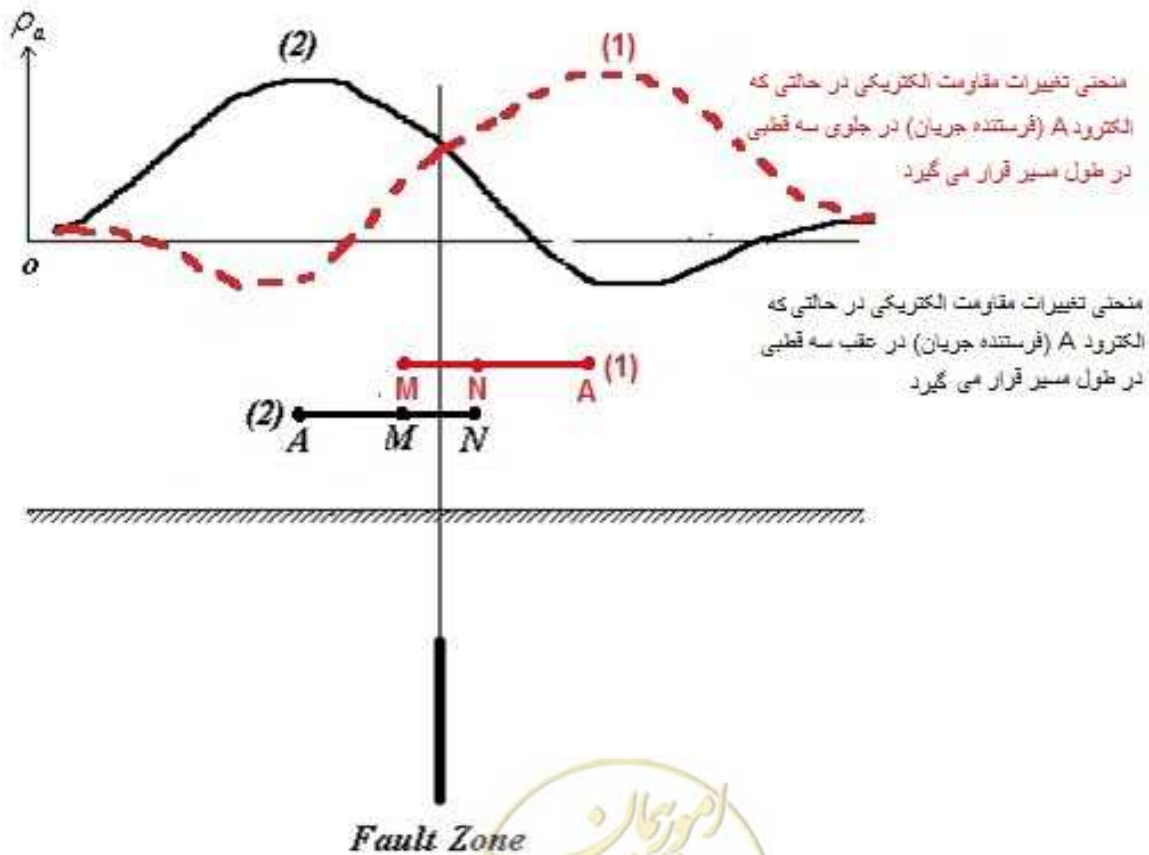
این آرایه کاربرد وسیعی در مسائل ژئوتکنیکی داشته و خصوصا برای تعیین شکستگی ها و گسل ها در یک سازند

زمین شناسی مورد استفاده وسیعی در ایران دارد. آرایه سه الکترودی شامل سه الکتروود A، M و N بوده و الکتروود B در یک فاصله نسبتاً دور قرار دارد. بطوریکه اندازه گیری های مقاومت الکتریکی فقط تابع جریان تزریقی الکتروود A می باشد (شکل ۳-۱۹)



شکل(۳-۱۹) آرایش روش پروفیل ترکیبی مقاومت ویژه ظاهری (C.R.P)

مشخصات این آرایه با فاصله  $L=OA$  و  $l=MN$  تعریف می شود. اغلب نسبت  $L/l=3/2, 5/2, 7/2$  انتخاب می شود. عمق نفوذ با ازدیاد L اضافه می شود. بعد از هر اندازه گیری سه الکتروود A، M و N را به اندازه l جهش داده و اندازه گیری مجدداً در امتداد پروفیل انجام می گیرد. بدیهی است با انتخاب فواصل متغیر L می توان اندازه گیری ها را برای اعماق متفاوت انجام داد. اگر اندازه گیری ها به نقطه O در وسط MN نسبت داده شود و دو آرایش الکتریکی بطور متقارن در دو طرف نقطه مرکزی O برداشت شود، محدوده ناهنجاری (گسل، زون خرد شده، ...) مشخص خواهد شد. (شکل ۳-۲۰)



شکل(۳-۲۰) روش پروفیل ترکیبی بر روی یک گسل مدفون



### ۳-۴-۳- تجهیزات مورد استفاده

جریان مورد نیاز معمولاً در تجهیزات کوچک توسط باتری‌های خشک و در تجهیزات بزرگ‌تر توسط موتور برق تامین می‌شود. برای اهداف مهندسی، جریانی با ولتاژ ۹۰ تا چند صد ولت ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. نکته ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که به هیچ وجه در هنگام انجام عملیات و برقرار بودن جریان، الکترودها لمس نشود زیرا وجود جریان الکتریکی با پتانسیل چند صد ولت شدیداً می‌تواند خطرناک بوده و باعث برق‌گرفتگی گردد.

الکترودهای مورد استفاده در این روش، طولی در حدود ۵۰ سانتی‌متر داشته و عموماً از برنز، مس، فولاد یا پوشش برنزی و انواع کم کیفیت‌تر آنها از فولاد ساخته شده‌اند. آنها باید به اندازه کافی در زمین فرو برده شوند تا امکان ارسال جریان و ثبت اختلاف پتانسیل ممکن گردد. در مواردی که زمین خیلی نارسا بوده و امکان ارتباط مناسب الکترودها با زمین میسر نباشد، با استفاده از محلول نمک در آب، رسانایی افزایش می‌یابد. در این روش ابزارهای مانند یک آمپر متر برای کنترل اینکه جریان بین الکترودهای جریان در سطح مقبولی است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر ابزار مورد استفاده در این روش، ابزارهایی برای نمایان ساختن اختلاف پتانسیل مورد نیاز برای دستیابی به شدت جریانی مشخص در الکترودهای جریان است. به طور معمول در کاربردهای مهندسی، شدت جریانهایی بین ۲ میلی‌آمپر تا ۵۰۰ میلی‌آمپر استفاده می‌شود. اگر شدت جریان پائین باشد، حساسیت اندازه‌گیری کاهش خواهد یافت. در این صورت مساله با بهبود تماس الکتریکی الکترودها با زمین می‌تواند حل گردد. در شرایطی که مقاومت الکتریکی زمین بالا بوده و فاصله بین الکترودها زیاد باشد، با افزایش ولتاژ جریان می‌توان این شرایط را بهبود بخشید. در جایی که زمین خیلی سخت و سنگی بوده و امکان اتصال مناسب الکترودها به زمین مقدور نباشد، گزینه جایگزین استفاده از ورقه‌های آلومینیوم و مرطوب کردن زمین است.

### ۳-۴-۴- برداشت و آماده سازی داده‌ها

همانطوریکه پیشتر نیز بیان شد، برای اندازه‌گیری مقاومت مخصوص ظاهری معمولاً از یک چهار قطبی AMNB استفاده می‌شود. بدین ترتیب که جریانی را توسط دو الکترودها A و B به زمین فرستاده سپس اختلاف پتانسیلی را که در اثر عبور این جریان بین دو نقطه M و N حاصل می‌شود اندازه‌گیری میکنند. آنگاه با استفاده از رابطه  $\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$  مقدار مقاومت مخصوص ظاهری را بدست می‌آورند، اندازه‌گیری صحرائی مقاومت ظاهری معمولاً به صورت گمانه الکتریکی و پروفیل زنی الکتریکی انجام می‌شود. به گمانه الکتریکی گاهی گمانه الکتریکی قائم (Electrical Vertical Sounding) (VES) نیز گفته می‌شود.

### ۳-۴-۴-۱- برداشت گمانه الکتریکی

برای انجام گمانه الکتریکی، مرکز آرایه ثابت نگه داشته شده و الکترودها در اطراف آن در یک راستای معین جابجا می‌شوند و در نتیجه مقاومت ظاهری و عمق لایه‌های مختلف زمین در زیر نقطه مرکز آرایه محاسبه می‌شود. در آرایه ونر که فواصل الکترودها یکسان است، پس از هر بار اندازه‌گیری، هر الکترودها پتانسیل به اندازه نیمی از جابجایی مورد نظر و هر الکترودها جریان به اندازه ۱/۵ برابر جابجایی مورد نظر، از مرکز آرایه دورتر برده می‌شوند. میزان افزایش فاصله به روش تفسیر مورد استفاده بستگی دارد. نتایج برداشتهای بصورت منحنی تهیه گردیده و روش‌های تفسیر برای آنها ارائه گردیده است. در بیشتر روشهای تفسیر، ترسیم منحنی‌ها براساس انتخاب نقاطی با فواصل لگاریتمی صورت می‌پذیرد. نسبت بین فواصل مناسب با رابطه زیر می‌تواند تعیین گردد:

$$\frac{a_i}{a_{i-1}} = 10^{1/n}$$

رابطه ۳-۹

که در این رابطه  $n$  تعداد نقاطی است که در هر چرخه لگاریتمی باید ترسیم گردد. به عنوان مثال اگر ۶ نقطه برای هر سیکل در ترسیم لگاریتمی نیاز باشد، هر فاصله  $a$  برابر با  $1/47$  برابر فاصله قبلی خواهد بود. در این حالت اگر برداشت با فاصله ۱۰ متر شروع شده باشد، فواصل بعدی عبارت خواهند بود از:  $14/7$ ،  $21/5$ ،  $31/6$ ،  $46/4$  و  $68/2$  که برای سادگی می‌توان مقادیر را به این صورت تعدیل کرد: ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۷۰. در سیکل بعدی فواصل شامل ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و الی آخر خواهد بود. برای هر سیکل دست کم ۶ نقطه ضروری است و در مناطقی با نوفه بالا، این میزان به ۱۰ تا ۱۲ و حتی بیشتر افزایش می‌یابد.

در آرایش شلومبرژه فقط فاصله اولیه  $S$  بین هر یک از الکترودهای جریان و مرکز آرایه انتخاب شده در برداشت‌های بعدی افزایش می‌یابد. بر اساس بیان Van Nostrand and Cook (۱۹۶۶) در صورتیکه فاصله بین الکترودهای پتانسیل از  $2S/5$  فراتر نرود، خطای مقاومت ظاهری بین ۲ تا ۳ درصد خواهد بود. از این رو فاصله بین الکترودهای پتانسیل با حداقل مقدار  $S$  تعیین خواهد شد. با افزایش  $S$ ، میزان دقت پتانسیل اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد. بنابراین در برخی نقاط در صورتی که  $S$  به اندازه کافی بزرگ باشد، افزایش فاصله الکترودهای پتانسیل نیز انجام خواهد شد. افزایش در مقادیر  $S$  باید لگاریتمی بوده و به همان شیوه‌ای که برای آرایه و نر عنوان شد، تعیین می‌گردد.

برای هر دو آرایه، فواصل حداقل و حداکثر الکترودها براساس نیاز به تعیین مجانب‌ها در منحنی تغییرات مقاومت ظاهری و نیز عمق شناسایی مورد نیاز تعیین می‌گردد. حداکثر فاصله الکترودی مفید توسط زمان، توپوگرافی سایت و تغییرات جانبی در مقاومت الکتریکی محدود می‌شود. برای تحقق اهداف مطالعه، فاصله الکترودی حداکثر باید حداقل سه برابر عمق مورد نظر باشد اما همزمان با پیشرفت پیمایش باید منحنی مقاومت ظاهری، برای قضاوت در مورد مناسب بودن داده‌های به دست آمده، ترسیم گردد. همچنین این منحنی‌های میانکار می‌توانند برای شناسایی خطاهای موجود در قرائت و مقاومت الکتریکی‌های غیرواقعی ناشی از تاثیر شرایط محلی مناسب باشند.

در مناطق تپه‌ای خط الکترودها در صورت امکان باید در طول یک منحنی میزان واقع گردند. در مناطقی که اطلاعات موجود نشان دهنده شیب لایه بندی است (بیش از ۱۰ درجه) خط برداشت باید در طول امتداد لایه بندی گسترده شود. الکترودها نباید در مجاورت بولدرها نصب گردند لذا در شرایطی لازم است که یک الکتروده به طور استثناء خارج از خط برداشت قرار گیرد. موقعیت جدید الکتروده در خارج از خط برداشت باید به گونه‌ای باشد که پارامتر هندسی  $K$  تغییر نکند. این شرایط در صورتی تامین می‌شود که رابطه زیر برقرار باشد:

$$\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} = \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N}$$

رابطه ۱-۱۰

در این رابطه  $A$  موقعیت الکتروده در خط برداشت،  $A'$  موقعیت جدید الکتروده در خارج از خط برداشت می‌باشد. در صورتی که فاصله الکترودها در مقایسه با میزان جابجایی به اندازه کافی بزرگ باشد، جابجایی الکتروده در خطی عمود بر خط برداشت مناسب خواهد بود. برای جابجایی‌های بزرگتر، یک تقریب منطقی این است که جابجایی الکتروده در طول کمانی به مرکزیت نزدیکترین الکتروده پتانسیل باشد به گونه‌ای که انحراف ایجاد شده در خط برداشت به دلیل جابجایی الکتروده بیش از ۴۵ درجه نباشد.

نمودار تغییرات مقاومت ظاهری بر حسب فاصله الکترودهای جریان اغلب یک منحنی هموار خواهد بود که تنها تغییرات مقاومت در عمق را نشان می‌دهد. روندهای معکوس و بی‌نظمی‌ها در منحنی مقاومت ظاهری، اگر در اثر خطا



نباشند، نشان دهنده تغییرات جانبی بوده و باید دقیقتر مطالعه گردند. با آرایه ونر، ممکن است برای شناسایی اختلافات موجود در دو سمت آرایه، از آرایه اصلاح شده لی استفاده شود. ممکن است به منظور کنترل نتایج، قرائت مجددی در همان نقطه، اما در امتدادی عمود بر امتداد قرائت قبلی لازم باشد.

در جایی که آرایه شلومبرژه مورد استفاده قرار می‌گیرد، تغییرات در فاصله الکترودهای پتانسیل ممکن است منجر به یک انحراف و جابجایی ناشی از تغییرات جانبی شرایط زمین در منحنی مقاومت ظاهری گردد. یک چنین جابجایی و انحرافی ممکن است به صورت یک جابجایی کلی منحنی بدون تغییراتی در شکل منحنی رخ دهد (Zohdy, 1968). در این شرایط، جابجایی رخ داده در منحنی، اغلب با تکرار بخشی از برداشت‌ها با فواصل متفاوتی از الکترودهای پتانسیل امکان پذیر است.

### ۳-۴-۲- انجام پروفیل زنی افقی

شناسایی تغییرات جانبی در مقاومت الکتریکی در جهت شناسایی ساختارهای زمین شناسی که انتظار می‌رود مقاومت الکتریکی متفاوتی نسبت به محیط اطراف از خود نشان دهند، می‌تواند مفید باشد. نهشته‌های آبرفتی به ویژه اگر غیراشباع باشند مقاومت الکتریکی بالایی داشته و انتظار می‌رود به خوبی با روش مقاومت الکتریکی شناسایی گردند. گسلهایی با شیب تند در صورتی که تفاوت مقاومت الکتریکی قابل توجهی بین سنگهای دو سوی گسل وجود داشته باشد، با پروفیل‌های مقاومت الکتریکی که خط گسل را قطع می‌نماید، می‌توانند شناسایی گردند. حفره‌های انحلالی و درزه‌های باز در صورت خالی بودن ممکن است به صورت یک ناهنجاری مقاومت الکتریکی بالا و در صورت پر بودن با خاک یا آب به صورت یک ناهنجاری مقاومت الکتریکی پائین خود نمایی کنند.

پیمایش‌های مقاومت سنجی برای شناسایی‌های زمین شناسی با الکترودهایی با فواصل یکسان انجام می‌شود که در آن مجموعه الکترودها در محدوده مورد مطالعه جابجا می‌شوند. پروفیل زنی افقی به معنای جابجایی مجموعه الکترودها در طول یک خط است. اگر آرایه‌های متقارن مانند ونر و شلومبرژه مورد استفاده قرار گیرد، مقادیر مقاومت ظاهری به دست آمده نشان دهنده مقاومت الکتریکی در مرکز آرایه است. به طور معمول ابتدا باید یک گمانه الکتریکی قائم به منظور تعیین فواصل الکترودی مناسب انجام گیرد. هر گونه اطلاعات زمین شناسی در دسترس مانند عمق لایه یا ساختار مورد نظر باید در هنگام تصمیم‌گیری در مورد فواصل الکترودها در نظر گرفته شود. فاصله بین دو ایستگاه مجاور، میزان تفکیک پذیری عوارض زیرسطحی براساس داده‌های به دست آمده را تعیین می‌کند. دقت و امکان تفکیک ساختارها و عوارض زیرسطحی با افزایش عمق هدف کاهش می‌یابد. به عنوان یک قانون کلی، فاصله بین ایستگاههای اندازه‌گیری باید از عرض کوچکترین ساختار و عارضه مورد نظر، با در نظر گرفتن دقت خواسته شده برای تعیین مرزهای جانبی، کوچکتر باشد.

داده‌های به دست آمده ممکن است به صورت پروفیل یا نقشه‌های هم مقدار در محدوده مورد مطالعه ترسیم گردند. برای ترسیم نقشه‌های هم مقدار اطلاعات به دست آمده از ایستگاههای شبکه‌ای به اطلاعات به دست آمده از ایستگاههای واقع در طول یک خط، مناسب‌ترند مگر آنکه فواصل خطوط برداشت خیلی به هم نزدیک باشد. این بدان دلیل است که تنظیم و تطبیق داده‌های برداشت شده در خطوط پروفیل‌های مختلف، مشکل بوده و انحراف‌هایی که در نقشه‌های هم مقدار به این دلیل ایجاد می‌شود باعث اشکال در تفسیر نتایج خواهد شد. بهترین روش برای به دست آوردن اطلاعات لازم برای ترسیم نقشه‌های هم مقدار، استفاده از نتایج شبکه‌های مربعی شکل یا حداقل یک سری از ایستگاههایی که پوشش یکنواختی در منطقه داشته و جهت‌گیری خاصی نداشته باشند، می‌باشد.

گاهی اوقات ترکیبی از روشهای برداشت قائم و افقی (سونداژ و پروفیل زنی) به کار می‌رود. به عنوان مثال در جایی



که هدف شناسایی سنگ کف باشد، یک سونداژ قائم نیز در هر ایستگاه انجام می‌شود. پیش از انجام یک برداشت گسترده در محدوده مورد مطالعه، نتایج گمانه الکتریکی در برخی نقاط باید با گمانه‌های حفاری شده مقایسه شده و در صورت تطبیق نتایج برای کل منطقه انجام پذیرد.

### ۳-۴-۵- تفسیر نتایج

#### ۳-۴-۵-۱- تفسیر نتایج گمانه الکتریکی

تفسیر نتایج گمانه زنی شامل بررسی منحنی تغییرات مقاومت ظاهری برای تهیه مقطع ژئوتکنیکی است که نشان دهنده ضخامت و مقاومت الکتریکی آنهاست. برای یک سری از پارامترهای مربوط به تعدادی لایه، می‌توان مقاومت ظاهری را بر مبنای فواصل الکترودی مختلف محاسبه نمود اما متأسفانه برای حالت معکوس یعنی تعیین پارامترهای لایه‌بندی براساس مقاومت ظاهری و فواصل الکترودی راه حل یکسانی ارائه نمی‌دهد. مقاطع مختلف ممکن است بنا به دلایل زیر از نظر الکتریکی خصوصیات یکسانی را در برداشت‌های صحرائی نشان دهند:

- مقاومت ظاهری و ضخامت با یکدیگر ارتباط دارند،
- در یک لایه ممکن است آنیزوتروپی مقاومت الکتریکی وجود داشته باشد،
- تغییرات شدید در خصوصیات ژئوتکنیکی به خصوص در عمق منجر به تغییرات اندکی در مقاومت ظاهری می‌گردد،
- دقت برداشت‌های صحرائی با تغییرات طبیعی در خاکهای سطحی و سنگ‌ها و توانایی تجهیزات مورد استفاده محدود شده است.

برای رفع این ابهامات، مفسر باید تمامی تفاسیر را بر مبنای منحنی‌های تئوریک و مقایسه آنها با منحنی‌های صحرائی کنترل کند تا نتایج بدست آمده از نظر زمین‌شناسی منطقی باشند. به طور ویژه لایه‌های نازک تفسیر شده با تباین مقاومت الکتریکی زیاد غیرمنطقی تلقی گردیده و احتمالاً منشأ مصنوعی دارند.

به دلیل محدودیت دقت و صحت ناشی از خصوصیات زمین‌شناسی و دستگاهی، برای اطمینان از نتایج تفسیر نباید وقت زیادی را هدر داد. به عنوان مثال برای یک سری از داده‌های صحرائی و یک منحنی سه لایه تئوریک که ۱۰ درصد مطابقت دارند، افزودن یک یا چند لایه نازک برای دستیابی به ۲ درصد مطابقت منحنی‌ها به ندرت شرایط زمین‌شناسی واقعی را بهتر از قبل نشان می‌دهد.

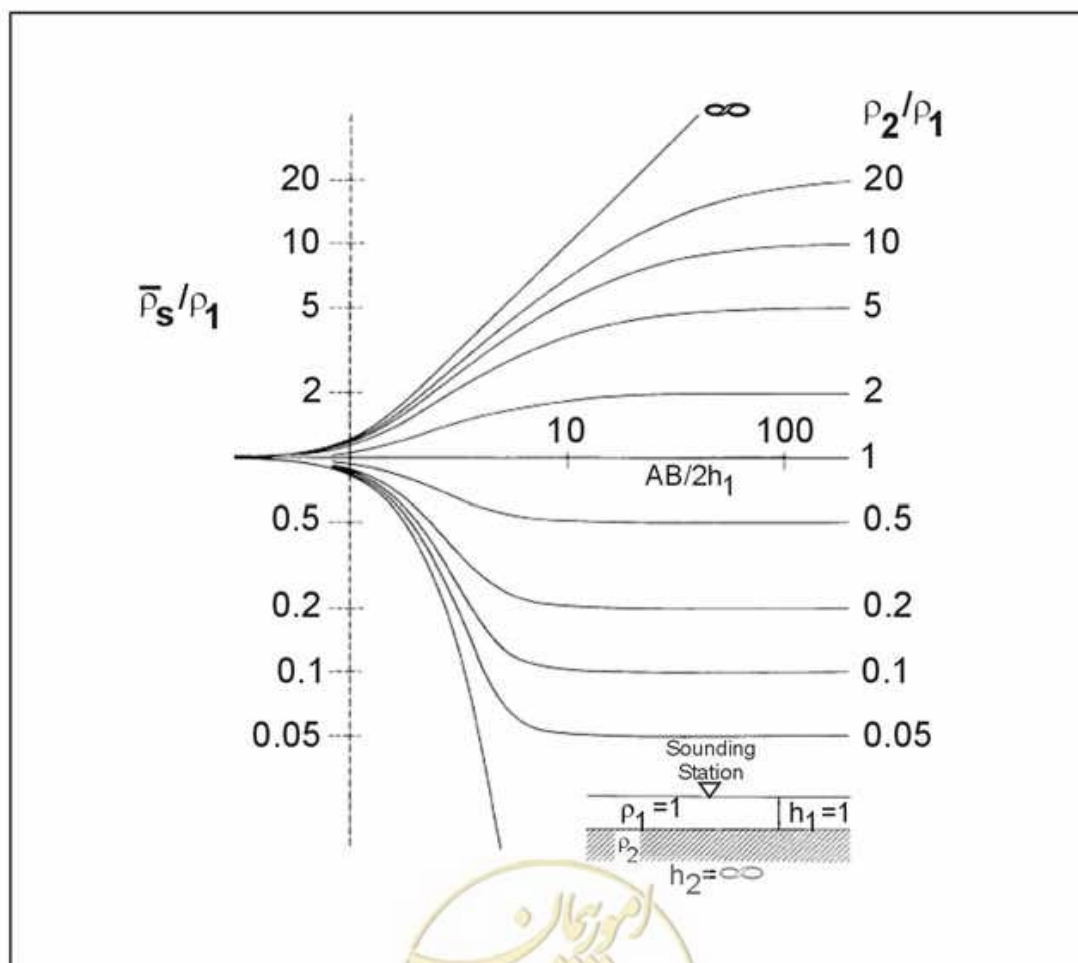
همه روشهای تفسیر به جز برخی روشهای تجربی و نیمه تجربی مانند روش تجمعی مور (Moor Cumulative) و روش لایه برانز (Branes layer) که باید پرهیز شوند بر انطباق منحنی‌های برداشت شده و تئوریک برای به دست آوردن پارامترهای لایه‌ها متکی‌اند. از آنجایی که منحنی‌ها تئوری همیشه صاف هستند، منحنی‌های صحرائی پیش از تفسیر باید صاف شوند تا خطاهای آشکار و تاثیرات ناشی از تغییرات مکانی حذف گردند. در روش مقاومت سنجی نقاط پراکنده به جای میان‌یابی، حذف می‌شوند. بخشهای دارای انحراف منحنی، به منظور شناسایی اثر تغییرات جانبی باید مورد بررسی قرار گیرد. مقایسه منحنی برداشت شده با منحنی‌های تئوریک چند لایه برای شناسایی این انحراف‌ها در منحنی مفید خواهد بود. شرایط محلی سایت نیز باید بررسی گردد. شیب زیاد لایه‌های زیرسطحی در طول خط برداشت (بیش از ۱۰ درجه شیب)، توپوگرافی نامناسب یا تغییرات جانبی زیاد در خصوصیات سنگها و خاکها ممکن است دلایلی برای کج شدگی‌های مشاهده شده در منحنی مقاومت ظاهری در مقایسه با منحنی‌های تئوریک باشد که در این صورت داده‌های صحرائی قابل قبول نیستند.



ساده ترین حالت منحنی چند لایه، عبارت است از یک لایه با ضخامت محدود که بر روی یک نیم فضای همگن با مقاومت الکتریکی متفاوت قرار گرفته است. منحنی مقاومت ظاهری برای این حالت نسبتاً ساده بوده و یک سری کامل از منحنی‌های مرجع بر روی یک برگه می‌تواند ترسیم شود. منحنی استاندارد دولایه برای آرایه شلومبرژه در شکل ۳-۲۱ ارائه شده است. این منحنی‌ها در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است. در این منحنی‌ها محور قائم شامل مقاومت ظاهری نرمالیزه نسبت به مقاومت لایه اول ( $p_a/p_1$ ) است که در مقابل نسبت فواصل الکترودی به ضخامت لایه اول ( $a/d_1$ ) در محور افقی ترسیم شده است. هر منحنی از این دسته یک مقدار از پارامتر  $K$  را معرفی می‌نماید که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K = \frac{p_2 - p_1}{p_2 + p_1} \quad \text{رابطه ۳-۱۱}$$

در این رابطه  $p_1$  مقاومت ظاهری برای فاصله الکترودی کمتر و  $p_2$  مقاومت ظاهری برای فاصله الکترودی بزرگتر است. این منحنی‌ها از  $p_a/p_1 = 1$  شروع شده و به صورت نامقارن به سمت  $p_a/p_1 = p_2/p_1$  میل می‌کنند. هر منحنی دو لایه برای یک مقدار مشخص  $K$  و یا برای یک نسبت مشخص از مقاومت ظاهری، باید در مقیاس لگاریتمی با منحنی استاندارد هم شکل باشد. منحنی صحیابی به دست آمده تنها با جابجایی افقی و قائم باید با منحنی استاندارد مطابقت کند که این میزان جابجایی افقی و قائم مورد نیاز با لگاریتم ضخامت و مقاومت در لایه اول برابر است.



شکل (۳-۲۱) منحنی استاندارد دولایه برای آرایه شلومبرژه

در حالاتی که سه لایه یا بیشتر وجود داشته باشد نیز از روش برازش منحنی‌های صحرایی با منحنی‌های استاندارد می‌توان بهره جست. برای حالت ۳ لایه، مطابق با اختلاف‌های موجود در مقاومت الکتریکی لایه‌ها، چهار نوع منحنی می‌تواند وجود داشته باشد که در شکل (۳-۲۲) نمایش داده شده‌اند. این ۴ نوع منحنی در منابع علمی با حروف A, K, H و Q معرفی شده‌اند. نماد H معرف منحنی کاسه‌ای شکل است که نشان دهنده مقاومت الکتریکی کمتر لایه میانی نسبت به لایه بالایی و پائینی می‌باشد. نماد K منحنی زنگوله‌ای شکل را نشان می‌دهد که در آن لایه میانی بیشترین مقاومت الکتریکی را دارد. نماد A نمودار افزایشی را نشان داده که در آن مقاومت الکتریکی به سمت عمق کاهش می‌یابد و نماد Q که نشان دهنده منحنی کاهش‌ی بوده و در آن مقاومت الکتریکی با عمق افزایش می‌یابد. برای شرایط ۴ لایه‌ای نیز ۱۶ نوع منحنی می‌توان وجود داشته باشد که در واقع به این منحنی‌ها بخش دیگری افزوده شده و انواع مختلف منحنی‌ها با نمادهایی نظیر HK برای منحنی کاسه‌ای- زنگوله‌ای و AA برای منحنی افزایشی یکنواخت و غیره نمایش داده می‌شوند.

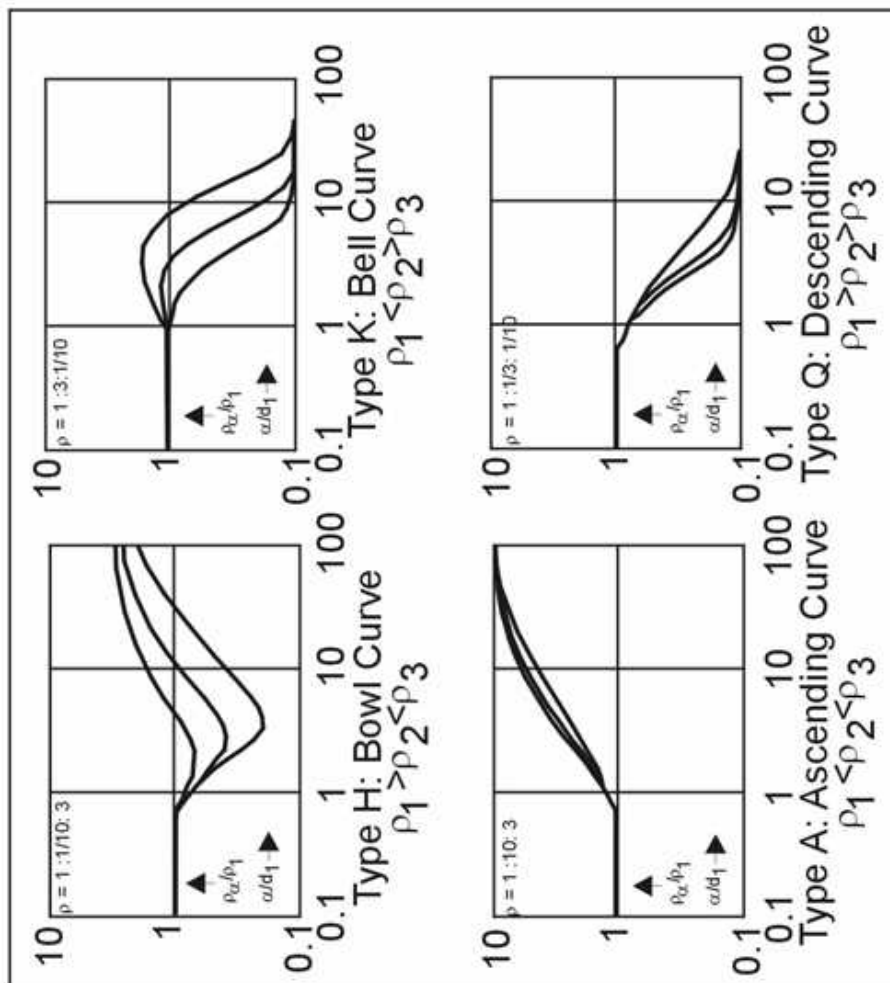
در یک سری از اندازه‌گیری‌ها معمولاً مقاومت ظاهری با افزایش فاصله الکتروود کاهش می‌یابد. گاهی این ارتباط ممکن است در یک یا چند قرائت معکوس گردد. اگر این تغییرات معکوس به دلیل خطای ناشی از قرائت نباشد، ناشی از تغییرات جانبی و محلی در مقاومت الکتریکی خاکها و سنگها خواهد بود. تاثیرات نظیر این می‌تواند از قرار گرفتن یک الکتروود جریان در زمینی که به طور محلی مقاومت بسیار بالاتری نسبت به اطراف دارد مانند یک لنز آبرفتی خشک در تماس با قطعات سنگی با مقاومت خیلی زیاد یا در مجاورت یک حفره، ناشی شود. معکوس شدن متقارن ممکن است به دلیل کاهش ضخامت لایه رسانا در سطح باشد.

پیش از در دسترس بودن کامپیوترهای شخصی، منحنی‌های مقاومت الکتریکی به صورت دستی بر روی کاغذهای لگاریتمی ترسیم شده و با منحنی‌های استاندارد مقایسه می‌شدند. به کار بردن منحنی‌های استاندارد نیازمند شناخت نوع منحنی در درجه اول و سپس مقایسه آن با منحنی‌های استاندارد به منظور دستیابی به بهترین تطابق است. منحنی‌های استاندارد دو و سه لایه برای تفسیر حالات پیچیده‌تر با بهره‌گیری از تکنیک نقاط کمکی (Auxiliary Point Method) امکان پذیر است. بحث و تشریح مرحله به مرحله این روش توسط (Zohdy (1965), Orellana and Mooney (1966) و (Keller and Frischknecht (1966) ارائه شده است.

سری‌های منحنی استاندارد مختلفی برای حالات دو یا چند لایه‌ای توسط محققین مختلف ارائه شده است که مهمترین آنها عبارتند از:

- یک سری متشکل از ۱۴۱۷ منحنی استاندارد برای دو، سه و چهار لایه‌ای برای آرایه شلومبرژه همراه با منحنی‌های کمکی و جداولی برای هر دو آرایه ونر و شلومبرژه توسط (Orellana and Mooney (1966).
- مقادیر مقاومت‌ظاهری برای ۱۰۲ منحنی دو و سه لایه‌ای برای آرایه ونر توسط (Wetzel and McMurray(1937).
- یک مجموعه متشکل از ۲۴۰۰ منحنی دو، سه و چهار لایه‌ای توسط (Mooney and Wetzel (1956).





شکل (۳-۲۲) چهار نوع منحنی تیبیک برای زمین سه لایه ای

Johansen (19750 و Ghosh (1971a, 1971b) تئوری فیلتر خطی (linear filter theory) را برای توسعه روش عددی سریع برای محاسبه مقاومت ظاهری از مقاومت الکتریکی و برعکس استفاده کردند. با این روشها و با استفاده از کامپیوتر یا ماشین حساب، برحسب ضرورت، منحنی‌های استاندارد جدید یا سری منحنی‌های مقاومت ظاهری به منظور انطباق منحنی‌های صحرائی و نیز سنجش صحت تفاسیر انجام شده، می‌تواند محاسبه گردد. بنابراین تفسیر همراه با آزمون و خطای داده‌های صحرائی مقاومت ظاهری امکان پذیر است. مقادیر اولیه از پارمترهای لایه ها می‌تواند حدس زده شده و سپس با منحنی مقاومت ظاهری محاسبه شده کنترل گردد. در این صورت حدس اولیه بهبود بخشیده شده و این عمل برای بهینه کردن تفسیرها تکرار می‌گردد. اگر حدس اولیه با بهره گیری از مقایسه منحنی صحرائی با منحنی‌های استاندارد دو و سه لایه ای واقع بینانه‌تر انتخاب گردد، محاسبات بسیار سریعتر خواهد بود. بیشتر برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده برای این منظور نیازمند یک تخمین اولیه توسط کاربر (مدل اولیه) می‌باشند اما برخی برنامه‌های دیگر خود مدل اولیه را نیز تهیه می‌کنند. پس از اینکه چند منحنی گمانه الکتریکی به این شیوه تفسیر شد، می‌توان با مقایسه نتایج با اطلاعات نقطه ای که در آن ضخامت لایه و یا مقاومت الکتریکی در دسترس است، سایر تفاسیر را با اطمینان بیشتری دنبال کرد.



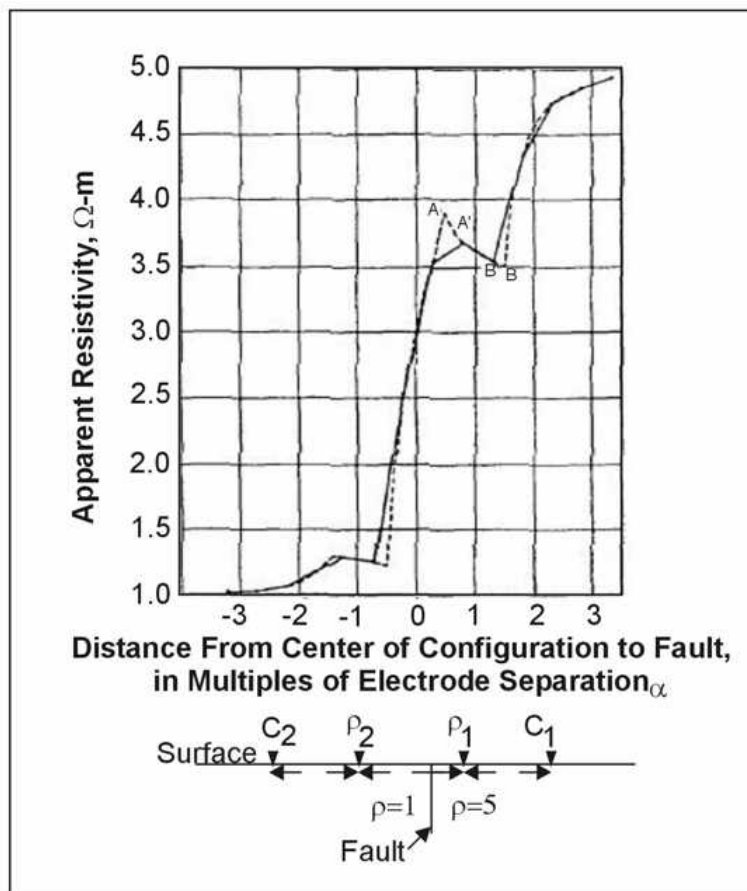
## ۳-۴-۵-۲- تفسیر نتایج پروفیل زنی الکتریکی

داده‌های به دست آمده از پروفیل زنی افقی برای اهداف مهندسی عموماً به صورت کیفی تفسیر می‌شوند. برای این منظور براساس مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری، نقشه‌های هم مقدار یا پروفیل‌ها ترسیم شده و بخشهایی که آنومالی نشان می‌دهند و نیز الگوی تغییرات ناهنجاری‌ها شناسایی می‌شوند. تفسیر داده‌ها باید با توجه به روند های زمین‌شناسی محلی انجام شود. معمولاً مفسر می‌داند در برنامه شناسایی در پی کسب چه نوع اطلاعاتی است و لذا برنامه برداشت داده‌ها به گونه‌ای اجرا می‌شود که عارضه زمین‌شناسی یا هیدورژئولوژی را به بهترین نحو ممکن نمایش دهد. خطای بزرگی که در اینجا ممکن است رخ دهد این است که مفسر با پیش‌فرض‌های خود دچار اشتباه شده و از امکان وجود حالاتی غیرمنتظره غفلت نماید. تفاسیر جایگزین نیز باید مد نظر قرار گرفته و در صورت امکان از کلیه اطلاعات مستقل در دسترس استفاده شود. یک روش برای بهبود برنامه شناخت این است که ابتدا منحنی‌های سونداژ قائم برای یک مدل مورد انتظار ترسیم شده و سپس بهترین فواصل الکتروودی که با تغییرات الگوی مقاومت الکتریکی، عمق مورد انتظار همخوانی دارد، انتخاب گردیده و در مرحله بعد پروفیل زنی افقی برای محدوده مورد مطالعه بر این اساس ادامه یابد.

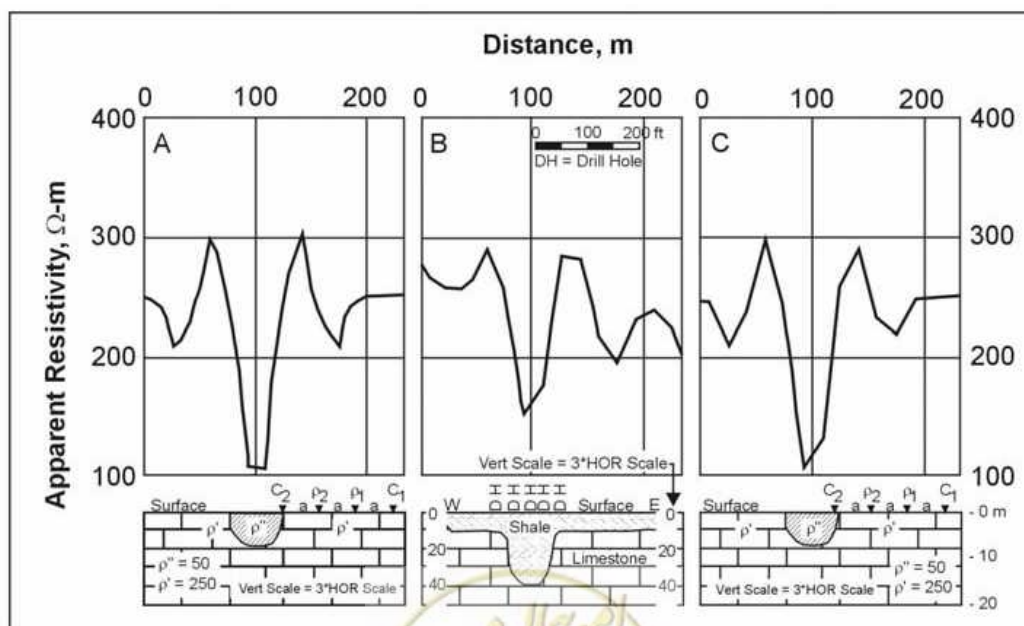
برای برخی از انواع مدل‌های ایده‌آل امکان تهیه پروفیل‌های تئوریک وجود دارد و این پروفیل‌ها در درک مفهوم پروفیل‌های صحرایی بسیار مفیدند. (Van Nostrand and Cook (1966 در خصوص تئوری تفسیر مقاومت الکتریکی بحث‌های مفصلی انجام داده و مثالهایی از مدل‌های ایده‌آل برای گسلها، دایکها، فروچاله‌های پر شده و غارها ارائه کرده‌اند.

شکل ۳-۲۳ پروفیل تئوریک آرایه ونر برای یک گسل را نشان می‌دهد، وضعیتی که برای برداشت پروفیل در مورد کلیه تغییرات جانبی ناگهانی دیگر، علاوه بر گسل نیز قابل تعمیم است. این شکل منحنی تئوریک، نمایانگر تغییرات پیوسته مقاومت ظاهری به عنوان تابعی از موقعیت مرکز آرایه الکتروودی را با یک منحنی تئوریک مورد انتظار از محل مورد مطالعه با حداقل‌های  $a/2$  بین ایستگاهها را مقایسه می‌کند. معمولتر آن است که فاصله ایستگاهها برابر با فواصل الکتروودی بکار گرفته می‌شود. در این حالت منحنی‌های صحرایی مختلفی با اتصال نقاط با فواصل  $a$  بر روی منحنی پیوسته، می‌توان ترسیم نمود. این منحنی‌ها در آشکار سازی بیشتر جزئیات منحنی‌های پیوسته موفق نیستند و می‌توانند کاملاً متفاوت از یکدیگر به نظر آیند. شکل (۳-۲۴) یک پروفیل در عرض یک فروچاله پر شده با شیل (یعنی یک توده با مقاومت الکتریکی پایین) و مقایسه آن با منحنی پیوسته تئوریک و منحنی صحرایی تئوریک را نشان می‌دهد. منحنی تئوریک برای یک توده رسانا است که در سطح زمین برونزد دارد، در حالی که منحنی صحرایی برای شرایطی است که در آن یک پوشش آبرفتی، سنگ بستر را پوشانده است، با این حال در هر دو حالت منحنی‌ها مشابه‌اند. شکل ۳-۲۵ (a) یک سری منحنی‌های تئوریک پیوسته را برای یک ساختار استوانه‌ای مدفون نشان می‌دهد. این مدل تا حدود زیادی یک تونل زیرسطحی و تا حدود کمتری یک غار کشیده را نمایش می‌دهد. یک کره مدفون پاسخ مشابهی تولید کرده با این تفاوت که حداکثر و حداقل منحنی‌ها کمتر نمایان می‌شوند. شکل ۳-۲۵ (b) یک سری از منحنی‌های مشابه را برای یک استوانه با تباین مقاومت الکتریکی متفاوت را نشان می‌دهد.

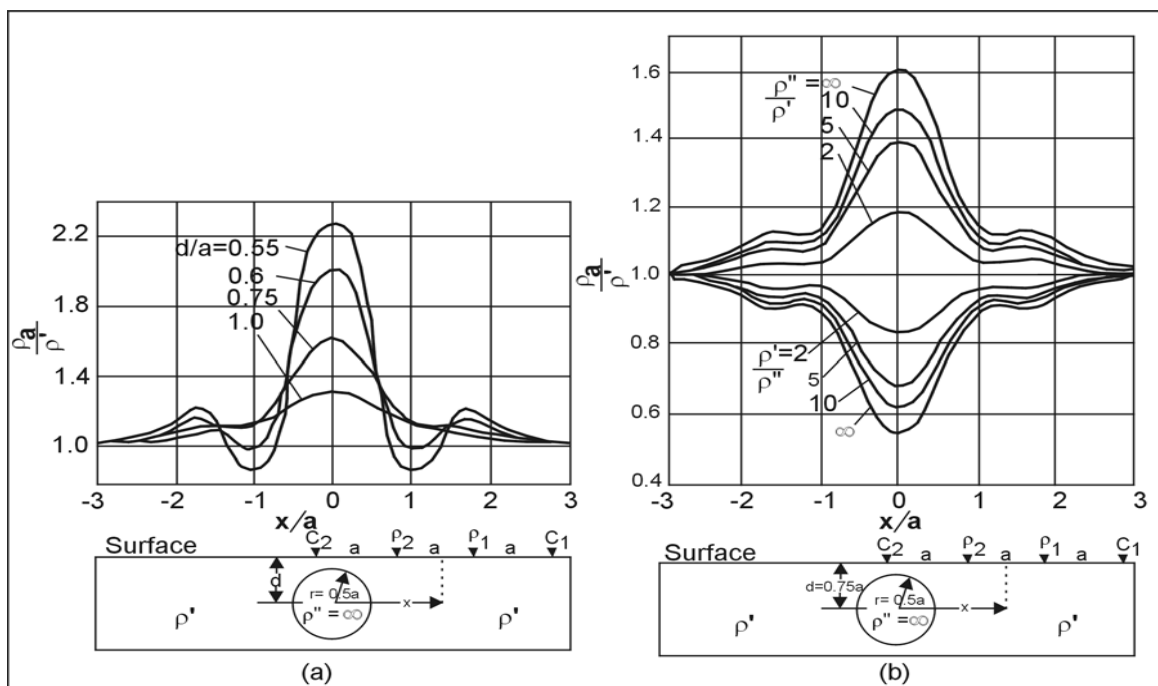




شکل (۳-۲۳) پروفیل افقی مقاومت ظاهری برای آرایه ونر در عرض یک گسل قائم. خط پر برای منحنی صحرایی تیپیک و خط چین برای منحنی تئوریک (van Nastrand and Cook, 1966)



شکل (۳-۲۴) پروفیل مقاومت افقی برای آرایه ونر در عرض یک فروچاله پرشده: (A) منحنی پیوسته تئوریک در عرض فروچاله کروی (B) منحنی صحرایی مشاهده شده برای مقطع زمین شناسی ارائه شده (C) منحنی صحرایی تئوریک برای فروچاله کروی (van Nostrand and Cook, 1966)



شکل (۳-۲۵) پروفیل تئوریک و نر در عرض یک ساختار استوانه‌ای (a) ساختار استوانه‌ای در اعماق مختلف (b) ساختار استوانه‌ای برای تباین بیشتر مقاومت الکتریکی‌های مختلف (van Nostrand and Cook, 1966)

## ۳-۵- روش رادار نفوذی

### ۳-۵-۱- کاربردها

روش رادار نفوذی از روش‌های نوین ژئوفیزیکی است که در سالهای اخیر در ایران نیز مورد توجه قرار گرفته و بر اساس مطالعه آماری انجام شده در این مطالعه، این روش پس از روش‌های لرزه‌ای، ژئوالکتریک و گرانی‌سنجی، در صنعت راه‌سازی رتبه چهارم را به خود اختصاص داده است. بیشترین استفاده از این روش در ایران به منظور مطالعه شرایط لایه‌های مختلف راه اعم از اساس، زیراساس و رویه می‌باشد. بررسی‌های انجام شده در ایالات متحده و کانادا نشان می‌دهد روش GPR از نظر فراوانی موارد استفاده شده در رده دوم قرار دارد.

تاریخچه استفاده از این روش در ارزیابی روسازی و زیرسازی جاده‌ها وابسته‌هایی از این قبیل به اواسط دهه ۱۹۷۰ بر می‌گردد. اتحادیه مدیریت بزرگراه‌های کشور آمریکا (FHWA) امکان قابلیت اجرای روش را در بررسی وضعیت تونل‌ها و پس از آن در ارزیابی وضعیت پل‌ها، مورد آزمایش قرار دادند (سارنتو ۲۰۰۳).

در اوایل دهه ۱۹۸۰، پیمایش‌های GPR در کانادا نیز آغاز شد. اولین آزمایش GPR جهت مطالعات راه‌سازی در سال ۱۹۸۶ در فنلاند انجام شد (Saarenketo, 1993)، و به سرعت به یک ابزار پیمایشی معمول در طراحی و ساخت جاده و پروژه‌های ترمیم و نوسازی در فنلاند تبدیل شد (Saarenketo and Scullion, 1994). در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، اکثر کاربردها در مطالعات زیرسازی در آمریکای شمالی بر اندازه‌گیری‌های ضخامت آسفالت (Maser, 1994)، تعیین فضاهای خالی زیر قالب‌های بتنی و تعیین نواحی در حال تخریب در پل‌ها متمرکز شد.

در دهه ۱۹۹۰ بیشتر کاربردهای معمول GPR در پیمایش‌های بزرگراه‌ها جهت اندازه‌گیری ضخامت آسفالت، تعیین حفره‌ها و لایه‌های لایه‌شدگی پل‌ها، اندازه‌گیری عمق اتصال‌های فلزی بین دهانه‌های پل و سنگ بستر، تعیین محل اشیاء مدفون، تعیین مناطقی از لایه‌های روکش آسفالت که تراشیده شده است متمرکز شد. با توجه به کاربردهای گوناگون

GPR در مطالعه راه‌ها، به نظر میرسد که بهترین و رضایت بخش‌ترین کاربرد GPR در تعیین ضخامت لایه‌های روسازی و زیرسازی راه می‌باشد. اولین آزمایش مهندسان عمران با استفاده از این روش در انگلیس در سال ۱۹۸۴ انجام شده است. پس از انجام این آزمایش‌ها تحقیق‌های بیشتری در مورد کاربردهای این روش بویژه جهت مطالعه سازه‌های بتنی، مطالعه آسفالت و اخیراً مطالعه خطوط حمل و نقل ریلی به چاپ رسیده است (Ballard, 1992 and 1993)، در فرانسه، این روش بیشتر بر ارزیابی وضعیت آسفالت متمرکز بوده است. در هلند، کاربرد اصلی این روش در حوزه راه‌ها جهت تعیین ضخامت لایه‌ها بوده است. اکنون بکارگیری این روش در حدود ۲۰ کشور دنیا از جمله استرالیا، کانادا، چین، استونی، آلمان، ایتالیا، لیتوانی، زلاند نو، اسپانیا، سوئد، سوئیس، انگلیس و اخیراً در ایران بصورت جدی انجام می‌شود.

این روش از دقت زیادی برخوردار بوده اما کاربرد آن به عمق‌های کم محدود می‌گردد. کاربردهای این روش شامل مواردی مانند شناسایی و ارزیابی خصوصیات لایه‌های مختلف راه، تعیین موقعیت نهشته‌های شنی و ماسه‌ای، تهیه نقشه سنگ کف و شناسایی سطوح تماس لایه‌های زمین‌شناسی پرشیب می‌باشد. از دیگر موارد مهم استفاده از GPR به این موارد می‌توان اشاره نمود: تهیه نقشه تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی، تعیین عمق آب‌شستگی در پایه پلها، تعیین مخروط افت آب زیرزمینی، تهیه نقشه گسترش آلاینده‌ها، تعیین موقعیت اجسام فرومغناطیس در زیر سطح آب، تهیه نقشه امتداد شکستگیها در سنگ کف نزدیک به سطح زمین، شناسایی مناطق دارای نقطه ضعف بالقوه مانند مناطق خردشده و گسل‌ها، شناسایی فروچاله‌های کارستی، حفرات و تونلهای نزدیک سطح زمین، مطالعات یکپارچگی پی‌ها، شناسایی محل لوله‌ها، تجهیزات و سایر اشیاء مدفون.

یادآوری می‌گردد تمامی کاربردهای فوق در شرایط اعماق کم برای این روش قابل تصور است.

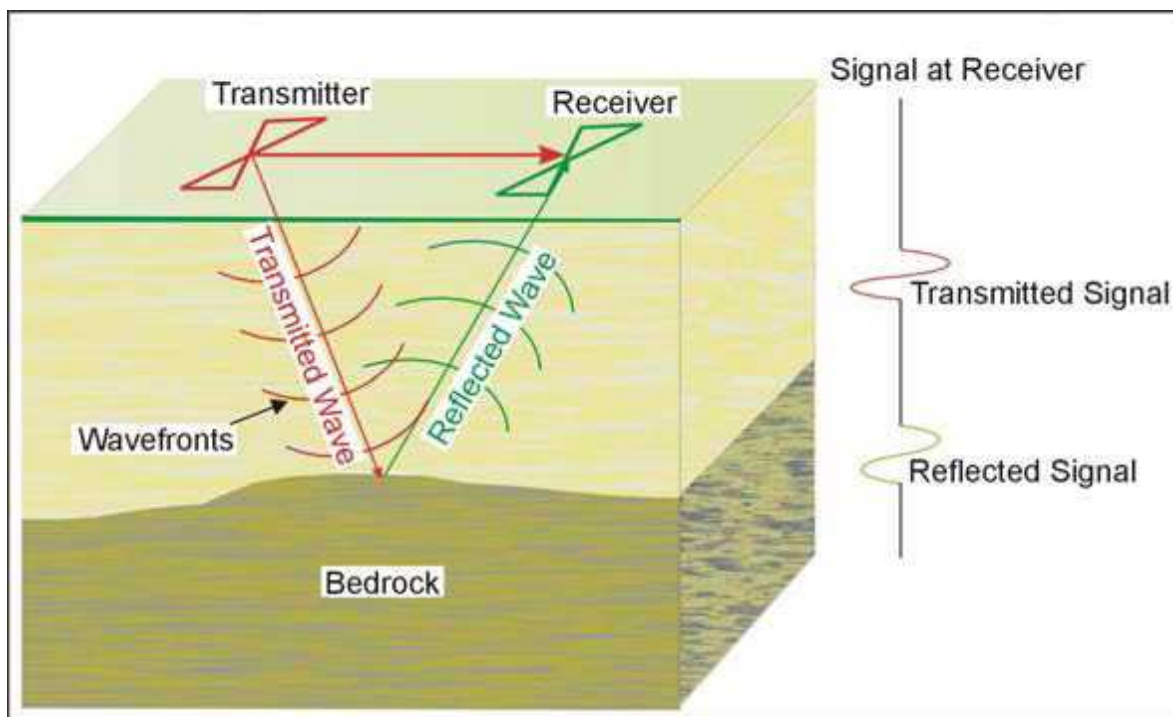
### ۳-۵-۲- مفاهیم پایه در روش رادار نفوذی

اساس روش رادار نفوذی، بر ارسال پالسهای فرکانس بالای الکترومغناطیس از یک آنتن فرستنده در محدوده فرکانسی متغیر (۱۰ تا ۳۰۰۰ مگاهرتز)، با توجه به عمق منطقه مورد مطالعه، و ثبت این امواج پس از بازتابیده شدن از سطوح درونی زمین، توسط یک آنتن گیرنده بنا شده است (شکل ۱-۲۶). سطوح بازتابی ممکن است افقی‌های مختلف خاک، سطح ایستابی، سطح حدفاصل خاک و سنگ، تاسیسات ساخت بشر و یا هر سطح بازتاباننده دیگر که دارای اختلاف در خصوصیات دی‌الکتریک باشد. این خصوصیات دی‌الکتریک با بسیاری از ویژگیهای زمین‌شناسی و مکانیکی مواد ارتباط دارد.

امواج رادار بوسیله آنتنی که کاملاً نزدیک به سطح زمین قرار دارد به درون زمین ارسال می‌گردد و سیگنالهای بازتابی می‌تواند توسط همان آنتن فرستنده یا آنتن گیرنده مجزایی آشکار گردند. این سیگنالهای دریافتی پردازش شده و بر روی یک نمایشگر تصویری نمایش داده می‌شوند. با حرکت آنتن یا آنتن‌ها به موزات سطح زمین، نمایشگر گرافیکی، نتایج را به صورت یک مقطع یا تصویر راداری از زمین نمایش می‌دهد. از آنجایی که طول موج امواج رادار در اغلب مصالح زمین‌شناسی کم است تفکیک سطوح حدفاصل و اشیاء بخوبی صورت می‌گیرد. با این وجود میرایی شدید این امواج در مواد تشکیل‌دهنده زمین باعث می‌گردد که عمق نفوذ آنها کم باشد و به ندرت به بیش از ۱۰ متر می‌رسد. آب و خاکهای رسی میرایی را افزایش داده و عمق نفوذ را کاهش می‌دهند.







شکل (۳-۲۶) نمای شماتیک از فرستنده، گیرنده و مسیر امواج الکترومغناطیس در روش GPR

بررسی فیزیک امواج الکترومغناطیس خارج از چارچوب این دستورالعمل است. با این وجود باید دانست که دو ویژگی مواد در انتشار امواج در فرکانس‌های منطبق با GPR مهم هستند که عبارتند از:

- قابلیت هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) یا عکس مقاومت الکتریکی ( $p$ )، رابطه ویژگی‌های مصالح زمین‌شناسی و قابلیت هدایت الکتریکی با  $mS/m$  ( $1/1,000 \Omega m$ ) اندازه‌گیری می‌شود. در جدول ۳-۱ قابلیت هدایت الکتریکی مواد مختلف ارائه شده است.

- ضریب دی‌الکتریک ( $\epsilon$ ) (بدون بعد) که یکی از ویژگی فیزیکی مهم در فرکانس‌های منطبق بر GPR است. این ویژگی به چگونگی واکنش مواد در مقابل یک میدان الکتریکی ثابت در شرایطی که اختلاف پتانسیل الکتریکی وجود دارد اما جریانی برقرار نیست، بستگی دارد. چنین شرایطی مشابه با حالت بین ورقه‌های یک خازن شارژ شده می‌باشد. خلا، کمترین دی‌الکتریک را دارد و سایر مواد نسبت به آن سنجیده می‌شوند. مواد ساخته شده از مولکولهای قطبی مانند آب، دی‌الکتریک بالایی دارند. از نظر فیزیکی بخش زیادی از انرژی در یک میدان الکترومغناطیسی درواکنش با مولکولهای آب یا سایر مواد دارای خاصیت قطبی شدن، مصرف می‌شود. بنابراین امواجی که از درون چنین موادی عبور می‌کنند آهسته تر حرکت کرده و بیشتر میرا می‌شوند. در پیچیده‌تر شدن مطلب، البته باید به نقش مهم آب در قابلیت هدایت الکتریکی مواد سازنده زمین نیز توجه داشت.

### ۳-۵-۳- تاثیر خصوصیات مواد و مصالح سازنده زمین بر نتایج روش GPR

نقش دو ماده آب و رس بخاطر تغییرات مهمی که در پاسخ الکترومغناطیس زمین در برداشت‌های GPR ایجاد می‌کنند حائز اهمیت است. در فرکانس‌های مورد نظر در GPR ماهیت قطبی مولکولهای آب باعث تاثیر نامتناسب بر جریان الکترومغناطیس شده و در صورت وجود آب فراوان، منجر به ثابت دی‌الکتریک بالا و کاهش سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس خواهد شد. کانی‌های رسی نیز با وجود یونهای محصور در آنها رفتاری مشابه آب از خود نشان می‌دهند.

علاوه بر این بسیاری از کانی‌های رسی آب را نیز جذب کرده و نگه می‌دارند. جدول ۳-۱ خصوصیات فیزیکی مواد و مصالح سازنده زمین مرتبط با روش GPR را نشان می‌دهد. همانطوریکه مشاهده می‌شود محدوده تغییرات این خصوصیات بسیار زیاد است و لذا کاربرد آنها برای برداشت‌های صحرایی مناسب نیست. برای تبدیل زمان رفت و بازتاب امواج الکترومغناطیس، برآورد یا تعیین سرعت انتشار امواج ضروری است. در صورتی که تخمینی از میزان ثابت دی الکتریک داشته باشیم، معادلات تجربی ساده‌ای به صورت زیر برای برآورد سرعت انتشار و میرایی معرفی شده است:

$$V = \frac{(3 \times 10^8)}{\epsilon^{1/2}} \quad \text{رابطه ۱-۱۲}$$

$$a = 1.69 \frac{\sigma}{\epsilon^{1/2}} \quad \text{رابطه ۱-۱۳}$$

که در این روابط:

$V$  = سرعت انتشار امواج بر حسب m/s

$\epsilon$  = ثابت دی الکتریک (بدون بعد)

$a$  = میرایی بر حسب db/m

$\sigma$  = هدایت الکتریکی بر حسب mS/m

در جایی که ثابت دی الکتریک نامعلوم باشد رابطه زیر برای محاسبه سرعت انتشار امواج پیشنهاد شده

$$V = \frac{2D}{t} \quad \text{است:}$$

رابطه ۱-۱۴

که در این رابطه،  $D$  عمق سطح بازتاباننده و  $t$  زمان رفت و بازگشت امواج الکترومغناطیس است. سرعت به دست آمده از این روش فقط برای همان نقطه معتبر بوده و در صورت تغییرات جانبی در سرعت، تعیین آن در نقاط مختلف ضروری است.

یک معیار مشترک برای ارزیابی سیستم‌های GPR مختلف، محدوده دینامیکی (Dynamic Range) یا شاخص عملکرد (Performance figure) است. شاخص عملکرد میزان کاهش کل سیگنال ناشی از میرایی در مسیر رفت و برگشت امواج الکترومغناطیس، که اجازه ثبت آنها در گیرنده را بدهد می‌باشد. کاهش‌های بیشتر از این حد اجازه رکورد سیگنال را نمی‌دهند. به عنوان مثال اگر یک ماده هادی ( $\sigma = 100 \text{ mS/m}$ ) و حاوی مقداری آب با ثابت دی الکتریک ۲۰ را در نظر بگیریم، براساس روابط بالا، سرعت انتشار ۰/۰۷ m/ns و میرایی ۳۸ dB/m خواهد بود. اگر یک سیستم GPR با محدوده دینامیکی حدود ۱۰۰ dB برای این مواد استفاده شود، سبب می‌گردد که امواج در مسافت‌های سیر بیش از ۲/۶ متر قابل شناسایی نباشند. زمان عبور برای ۲/۶ متر، ۳۷ تا ۳۸ نانوثانیه است که از نظر زمین شناسی با مواد رسی با مقداری اشباع شدگی مطابقت دارد. در مقابل با فرض مواد خشک با ثابت دی الکتریک ۵، و هدایت الکتریکی کم در حدود ۵ mS/m، سرعت انتشار و میرایی محاسبه شده به ترتیب ۰/۱۳ m/ns و ۳/۸ dB/m خواهد بود. در این شرایط برای یک سیستم GPR با محدوده دینامیکی حدود ۱۰۰ dB، فاصله قابل تشخیص ۲۶ تا ۲۷ متر و زمان عبور بیش از ۲۰ نانوثانیه خواهد بود. این مثال از نظر زمین‌شناسی با سنگ‌های رسوبی خشک مطابقت دارد.

از آنجایی که در حال حاضر کاتالوگ‌های جامعی از خصوصیات مواد و مصالح سازنده زمین وجود ندارد، بیشتر برداشت‌های GPR براساس آزمون و خطا و یافته‌های تجربی انجام می‌شوند.



جدول (۱-۳) خصوصیات الکترومغناطیس مواد و مصالح سازنده زمین (نقل از ASTM D 6432 و Wightman et al., 2003)

نوع مواد	ثابت دی الکتریک	هدایت الکتریکی (mS/m)	سرعت انتشار امواج (m/ns)	میرایی (dB/m)
هوا	۱	۰	۰/۳	۰
آب مقطر	۸۰	۰/۰۱	۰/۰۳۳	۰/۰۰۲
آب شیرین	۸۱	۳۰-۰/۱	۰/۰۳۳	۰/۱
آب دریا	۷۰	۴۰۰	۰/۰۳۳	۱۰۰۰
ماسه خشک	۶-۴	۱-۰/۰۰۰۱	۰/۱۵-۰/۱۲	۰/۰۱
ماسه مرطوب	۳۰-۲۰	۱-۰/۱	۰/۰۶	۰/۳-۰/۰۳
سیلت اشباع	۱۰	۱۰-۱	۰/۰۹۵	
رس اشباع	۱۲-۸	۱۰۰۰-۱۰۰	۰/۱۰۰۶-۰/۰۷۸	
سواحل خشک ساحلی	۱۰	۲	۰/۰۹۵	
آهک (خشک)	۹-۷	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۱۱۳-۰/۱	۱-۰/۴
دولومیت	۸-۶		۰/۱۲۲-۰/۱۰۶	
کوارتز	۴		۰/۱۵	
زغال	۵-۴		۰/۱۵-۰/۱۳۴	
سیمان	۱۰-۵		۰/۱۳۴-۰/۰۹۵	
شیل	۱۵-۵	۱۰۰-۱	۰/۰۹	۱۰۰-۱
سیلت	۳۰-۵	۱۰۰-۱	۰/۰۷	۱۰۰-۱
رسها	۴۰-۵	۱۰۰۰-۲	۰/۰۶	۳۰۰-۱
گرانیت (خشک)	۵	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۱۳۴	۱-۰/۰۱
نمک خشک	۶-۵	۱-۰/۰۱	۰/۱۳	۱-۰/۰۱
یخ	۴-۳	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱
پی وی سی، اپوکسی و پلی استر	۳		۰/۱۷۳	

### ۳-۵-۴- تجهیزات برداشت داده‌ها در روش GPR

سیستم های GPR مورد استفاده در راهسازی به دو صورت مورد استفاده قرار می گیرند:  
 الف) در پیمایش های طولانی راه به منظور ارزیابی شرایط آسفالت، روسازی و زیرسازی که در این حالت وسایل اصلی GPR بر روی یک خودرو نصب شده و بطور نرمال در مطالعات راه سازی شامل تجهیزات زیر می باشد:  
 - آنتن های دوتایی - زمینی (Ground-coupled systems) و یا آنتن های دوتایی - هوایی (Air coupled systems) (متشکل از یک فرستنده و یک گیرنده)

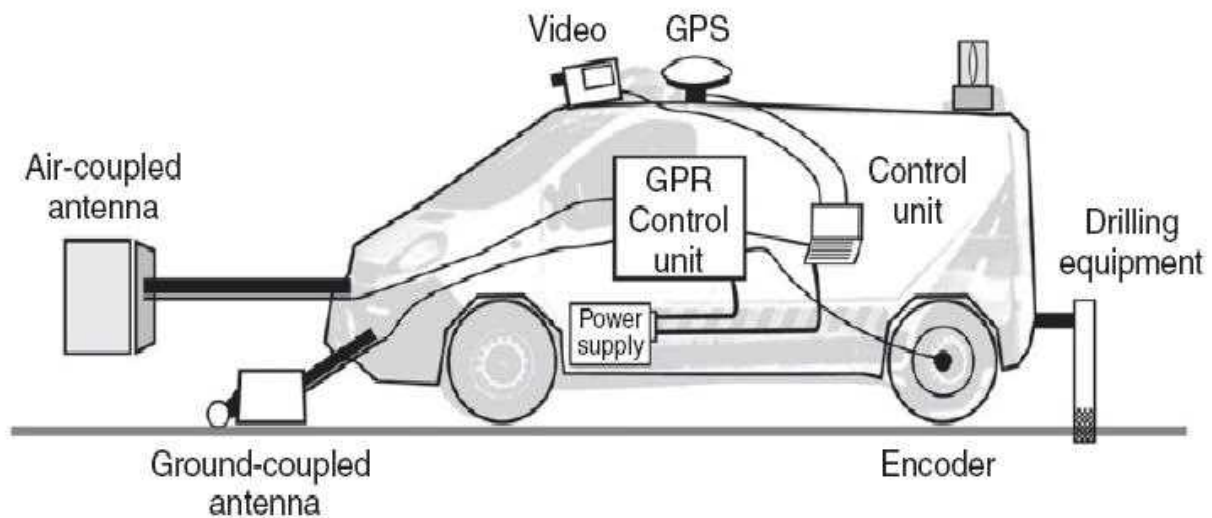
- کابل ها

- واحد کنترل GPR

- رمز گذار پالس ها و دیگر دستگاه های موقعیت یابی GPS

معمولاً یک واحد پیمایش جاده ای GPR یک واحد کنترل اضافی و یک PC دارد که جهت استفاده همزمان دستگاه GPR و تجهیزات یدکی یا فایل های ترسیمی می باشد. این سیستم اجازه اتصال داده ها به یکدیگر را فراهم می نماید (شکل ۳-۲۷).





شکل (۲-۲۷) یک سیستم GPR برای پیمایش جاده ای. آنتن‌ها بطور نرمال در جلوی ماشین نصب میشوند که به راننده اجازه میدهد که کنترل کافی را روی حرکت آنتن‌ها داشته باشد و بتوان بدقت در هنگام عبور آنتن از نقاط مرجع علامت گذاری کرد (سارنتو و همکاران، ۲۰۰۰).

ب) در مطالعه بخش کوچکی از مسیر راه مانند محل پلها که نیازمند شناسایی عمیقتری است سیستم‌های GPR همانند حالت اول شامل آنتن‌ها، کابل‌ها، واحد کنترل و ثبات و موقعیت یاب (GPS) هستند که آنتن بوسیله سیستم‌های جابجایی متناسب دستی توسط کاربر بر روی زمین کشیده می‌شود.

### ۳-۵-۴-۱- سیستم آنتن‌ها در GPR

در روش GPR ارسال و دریافت سیگنالها می‌تواند توسط آنتن‌های مجزایی صورت گرفته یا آنتن فرستنده، سیگنال بازتابی را نیز دریافت نماید. سیستم آنتن‌ها در مواردی که فاصله بین آنتن‌ها ثابت باشد، می‌توانند درون یک محفظه قرار گرفته و یا در موارد دیگر به صورت مجزا قرار گرفته تا امکان تغییر فاصله بین آنتن‌ها وجود داشته باشد. تغییر فاصله بین آنتن‌ها، امکان تنظیم این فاصله برای حداکثر کردن توان شناسایی برای هدف‌های مشخص و ویژه را فراهم می‌نماید. سیستم آنتن‌ها می‌تواند همراه با پوشش یا بدون آن مورد استفاده قرار گیرند. امواج ساطع شده از طرفین و بالای آنتن فرستنده پس از برخورد با عناصر سطح و بالای زمین منعکس شده و در برداشت داده‌ها اختلال و نویز ایجاد می‌کنند. این پوششها که از فلز یا موادی با خاصیت بالای جذب رادار ساخته شده اند، انرژی الکترومغناطیس ساطع شده از طرفین و بالای آنتن‌ها را کاهش داده و در نتیجه نویزهای حاصل از بازتابش امواج الکترومغناطیس توسط عناصر سطح و بالای زمین را کاهش می‌دهند. آنتن‌هایی با فرکانس‌های پائین به ندرت پوشش گذاری می‌شوند در حالی که در آنتن‌های فرکانس بالا ضرورتاً این کار انجام می‌شود. لازم به ذکر است انتخاب فرکانس آنتن‌ها براساس عمق و قدرت تفکیک مورد نظر انتخاب می‌شوند.

سیستم آنتن‌های مورد استفاده عموماً در دو رده کلی سیستم‌های دوتایی هوایی و سیستم‌های دوتایی زمینی قابل

تقسیم‌اند.



### ۳-۵-۴-۱- سیستم‌های دوتایی-هوایی

استفاده از سیستم‌های دوتایی-هوایی GPR رشد سریعی در جهت ارزیابی بخش بالایی ساختار آسفالت و راه داشته است. آنها سیگنال‌هایی بی نقص تولید می‌کنند و در نتیجه می‌توان در سرعت‌های نزدیک به سرعت مجاز در بزرگراه‌ها عملیات GPR را انجام داد (بیش از ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت). از مهمترین مزایای این سیستم اینست که با تغییر وضعیت و خواص آسفالت تغییری در این آنتن‌ها ایجاد نمی‌شود و اجازه اندازه‌گیری تغییرات در مشخصات مواد تشکیل دهنده را می‌دهد. برای نمونه می‌توان به پیمایش‌های انجام شده جهت کنترل کیفیت آسفالت اشاره کرد (Saarenketo et al., 2000). این سیستم‌ها پالس‌هایی را در محدوده فرکانسی ۵۰۰ مگاهرتز تا ۲/۵ گیگاهرتز و به طور معمول ۱ گیگاهرتز ارسال کرده و عمق شناسایی آنها کمتر از ۱ متر است. این آنتن‌ها با ارتفاعی بین ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر از سطح مورد مطالعه حمل شده و به طور معمول برای شناسایی عوارض کم‌عمق و کم‌ضخامت مانند آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرکانس مورد استفاده با قدرت تفکیک روش GPR رابطه مستقیم و با عمق نفوذ آن رابطه معکوس دارد از این رو آنتن‌های دوتایی هوایی از قدرت تفکیک بالایی برخوردارند.

اکثر آنتن‌های مورد استفاده در مطالعات راه‌سازی از نوع TEM horn می‌باشد ولی در مواردی از مطالعات راه‌سازی از آنتن‌های نوع دوقطبی پروانه‌ای نیمه‌کروی HDB نیز استفاده می‌شود. از شرکتهای تولیدکننده آنتن‌های نوع اول به Wavebounce, GSSI, Penetradar, Pulse Radar و از شرکتهای تولیدکننده آنتن‌ها نوع دوم به Radar Team Sweden Ab می‌توان اشاره نمود.

### ۳-۵-۴-۲- سیستم‌های دوتایی-زمینی

آنتن‌های سیستم دوتایی زمینی که در محدوده فرکانسی ۸۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز عمل می‌کنند، عمق نفوذی حتی تا حدود ۲۰ تا ۳۰ متر می‌توانند داشته باشند و در مقابل قدرت تفکیک کمتری دارند. از سیستم‌های اخیر برای شناسایی‌های زیرسطحی عمیق مانند شناسایی لایه‌های زمین استفاده می‌شود که در این حالت عموماً سیستم آنتن بر روی زمین توسط کاربر کشیده می‌شود.

مزیت مهم این آنتن‌ها در مقایسه با آنتن‌های دوتایی-هوایی اینست که سیگنال بهتری را به درون زمین انتقال داده و وضوح و قدرت تفکیک مناسبتری در جهت عمود بر سطح دارند از این رو در مواردی مانند تعیین محل شکستگی‌های آسفالت، کابل‌ها و آرماتورهای بکار برده شده در سازه‌های بتنی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. جفت‌شدگی سطحی و رینگ شدن آنتن‌ها مهمترین مشکلات موجود در این سیستم‌ها می‌باشد که دستیابی به اطلاعات کمی از عمق‌های کم را مختل می‌نمایند. سرعت مجاز در جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از سیستم دوتایی-زمینی بطور نرمال بین ۵ تا ۳۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. از شرکت‌های شاخص تولیدکننده این نوع آنتن‌ها می‌توان به شرکت آمریکایی GSSI، شرکت سوئدی MALA، شرکت ایتالیایی IDS و شرکت آمریکایی Penetradar اشاره نمود.

### ۳-۵-۴-۳- پیکر بندی آنتن‌ها

به علت پیشرفت سریع پردازشگرهای داده‌ها و گنجایش بالا در ذخیره کردن داده‌ها، سیستم‌های چند کاناله در مطالعه راه مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. از جمله مزایایی استفاده از این سیستم‌ها به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

- از آنتن‌های با فرکانس بالا با وضوح خوب در بررسی سطوح نزدیک به سطح آسفالت واز آنتن‌های با فرکانس پائین در ارسال سیگنال به عمق‌های بیشتر بصورت همزمان می‌توان استفاده کرد.

- سیستم های چند کاناله اجازه می‌دهند که با استفاده از تکنیک های آرایه ای آنتن ها در جهت تعیین سرعت های سیگنال، بکار گرفته شود (Davis et al, 1994; Mesher et al., 1995).
- سیستم های چند کاناله این اجازه را می‌دهد که چندین آنتن با فرکانس یکسان جهت جمع آوری داده ها در چندین خط برداشت بطور همزمان بکار گرفته شود تا اینکه بتوان یک نمایش سه بعدی از منطقه مورد مطالعه بدست آورد ( Davidson and Chase, 1998; Manacorda et al., 2002 ) و یا اینکه می‌توان ترکیبی از این سه مورد را در پیکربندی بکار گرفت. شکل ۳-۲۸ دو نوع آنتن مورد استفاده در مطالعات راه سازی را نشان می‌دهد.

### ۳-۵-۴-۲- تجهیزات جانبی و کمکی

لوازم جانبی زیادی را می‌توان در مطالعات راه سازی جهت تجهیز کردن سیستم های GPR بکار گرفت، دو مورد از این تجهیزات که بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است، سیستم های عکسبرداری در هنگام برداشت داده ها و دیگری استفاده از سیستم های GPS می‌باشد. سومین وسیله پیشنهادی در این مطالعات، استفاده از سیستم‌های حفاری جهت تهیه مغزه های مرجع و دستیابی به اطلاعات لازم در آزمایشگاه مکانیک خاک می‌باشد. مورد اخیر در شناسایی های عمیقتر که با آنتن‌های دوتایی- زمینی انجام می‌شود، اهمیت بیشتری خواهد داشت.



شکل (۳-۲۸) سیستم های مختلف GPR و پیکربندی های مختلف آنتن های مورد استفاده در پیمایش های راه سازی. عکس ۱، یک آنتن ۱۰۰ مگا هرتز دوتایی-زمینی GSSI و یک آنتن رادار اگیگا هرتز می‌باشد که بوسیله موسسه حمل و نقل تگزاس (TTI) مورد استفاده قرار گرفته است. عکس ۲ سیستم رادار چند کاناله برای مطالعه رادار سه بعدی در نروژ می‌باشد، عکس ۳ یک سیستم آنتن شیپوری چند کاناله دوتایی-هوایی ساخت شرکت Penetradar را نشان می‌دهد، عکس ۴ یک سیستم راداری راه کانادایی را نشان می‌دهد که یک سیستم آنتن شیپوری و یک آرایه آنتن دوتایی-زمینی چند کاناله می‌باشد.

سیستم های عکسبرداری به مفسر این اجازه را می‌دهد که محیط اطراف مناطقی را که در آنجا برداشت داده‌ها صورت گرفته، مشاهده نماید. این خود می‌تواند به فهم مفسر از سیگنال‌های دریافتی کمک کند و در ادامه آن بتوان تفسیرهایی با دقت بیشتر از لایه های روسازی و زیرسازی و یا بازتابنده های ویژه مثل آبراهه های موجود در محور ارائه داد. تصاویر تهیه شده در پروژه های ترمیم و نوسازی جاده ها مفید بوده و نیز در مطالعات انجام شده جهت تشخیص معایب محور ها و دلایل آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. وسیله جانبی دیگر دوربین های گرما سنج مادون قرمز است که همزمان با برداشت GPR بویژه بر روی پل ها و باندهای بتنی فرودگاه ها استفاده می‌شود. در سال های اخیر دوربین‌های گرماسنج مادون قرمز و سنسور های حرارتی بطور همزمان با برداشت داده های GPR استفاده می‌شوند که در کنترل کیفیت آسفالت و یا در راه آهن بکار گرفته شده است. انواع مختلفی از خودروهای ون در پیمایش های راه ها بکار گرفته می‌شود که اهداف اندازه گیری مختلفی دارند.

### ۳-۵-۵- طراحی برداشت داده‌ها

همانطوریکه در بخش معرفی تجهیزات GPR بیان شد، برداشت های GPR متناسب با هدف شناسایی عموماً به دو صورت زیر انجام می‌شود:

- برداشت با سرعت‌های بالا که تجهیزات مربوطه بر روی یک خودرو نصب شده و با حرکت در مسیر راه یا محدوده مورد نظر برداشت انجام می‌شود (پیمایش های جاده‌ای)
  - برداشت در حالتی که آنتن‌ها بر روی زمین کشیده می‌شوند.
- در این بخش ابتدا کلیاتی که در یک برداشت GPR باید مورد توجه قرار گیرد بیان شده و سپس با توجه به گسترش استفاده از GPR به صورت پیمایش‌های جاده ای، به صورت ویژه به این حالت پرداخته خواهد شد.

### ۳-۵-۵-۱- کلیات لازم در برداشت داده ها در روش GPR

به منظور تعیین روش مناسب برای برداشت داده ها و سایر خصوصیات تکنیکی لازم برای یک بررسی خوب باید به سوالات زیر پاسخ داده شود:

- عمق هدف مورد شناسایی چقدر است؟ اگر چه شناسایی اشیاء و ساختارهایی تا عمق ۵۰۰ متر نیز تحت شرایط خاص مانند یخ‌های ضخیم قطبی و نهشته‌های نمکی گزارش شده است اما در صورتیکه عمق هدف در اعماق بیش از ۱۰ متر قرار دارد، امکان‌سنجی آن باید به دقت بررسی شود. در عمق های خیلی کم مانند ارزیابی آسفالت، روسازی و زیرسازی عموماً از آنتن‌های دوتایی- هوایی، نصب شده بر روی خودرو استفاده شده (شکل ۳-۲۹) و برای شناسایی‌های عمیق‌تر از آنتن‌های دوتایی- زمینی که توسط کاربر کشیده می‌شود، استفاده می‌شود (شکل ۳-۳۰).

- هندسه هدف مورد شناسایی چگونه است؟ اندازه، جهت یافتگی و ترکیب مواد تشکیل دهنده هدف مهم‌اند. در صورتی که ابعاد هدف مورد شناسایی از حدی کمتر باشد قابل شناسایی نخواهد بود. برای تشخیص امکان شناسایی از نظر ابعاد معیاری به این صورت پیشنهاد شده است که در صورتیکه نسبت عمق هدف مورد شناسایی به کمترین بعد آن کمتر از ۱:۱۰ باشد، قابل شناسایی خواهد بود.

- خصوصیات الکتریکی هدف مورد شناسایی چگونه است؟ مانند همه روشهای ژئوفیزیکی باید تباینی کافی در خصوصیات فیزیکی وجود داشته باشد. تباين دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی مهمترین پارامترهای هستند. هدایت الکتریکی به احتمال زیاد شناخته شده بوده و یا امکان تخمین آن به سادگی وجود دارد. یک روش برای

برآورد اینکه آیا هدف مورد نظر تباین کافی با محیط اطراف برای آشکار شدن دارد یا نه، استفاده از رابطه زیر برای برآورد قدرت بازتابندگی (Reflectivity Power) است:

$$\text{Pr} = \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_{rHost}} - \sqrt{\varepsilon_{rTarget}}}{\sqrt{\varepsilon_{rHost}} + \sqrt{\varepsilon_{rTarget}}} \right]^2 \quad \text{رابطه ۳-۱۵}$$

که در این رابطه  $\varepsilon_r$  نفوذپذیری الکتریکی نسبی است.

در صورتی که Pr حداقل ۰/۰۱ باشد، هدف مورد نظر با پیرامون خود به اندازه کافی تباین داشته و قابل شناسایی است.

- خصوصیات الکتریکی مواد و مصالح سازنده زمین چگونه است؟ خصوصیات الکتریکی و همگن بودن زمین باید ارزیابی شود. میرایی امواج به خصوصیات الکتریکی مواد و به تعداد سطوح بازتابنده که امواج را پراکنده می‌کنند بستگی دارد.

- آیا عوامل مزاحم و منشا نوفه در محل وجود دارند؟ فرستنده‌های رادیویی، سازه‌های فلزی بزرگ (از جمله ماشین‌ها) و تیرهای برق چشمه‌های احتمالی نوفه‌ها هستند که باید مورد توجه قرار گیرند.

در برداشت‌های GPR می‌توان با تنظیم فرکانس مورد استفاده، قدرت تفکیک و شناسایی افقی و قائم را تعیین کرد به گونه‌ای که با آنتن‌های فرکانس بالا (۱ گیگاهرتز) می‌توان تا دقت سانتی متر را اندازه‌گیری کرد در حالی که برای آنتن‌های فرکانس پائین (۱۰ مگاهرتز) این دقت در حد متر است. جدول ۳-۲ دقت تفکیک را برای فرکانسها و خصوصیات دی الکتریک مختلف ارائه کرده است.



شکل (۳-۲۹) خودروی برداشت GPR در حال عملیات در جاده برای شناسایی عمقهای کم







شکل (۳-۳۰) تیم برداشت و تجهیزات برداشت با آنتن‌های زمینی برای برداشت عمق‌های بیشتر

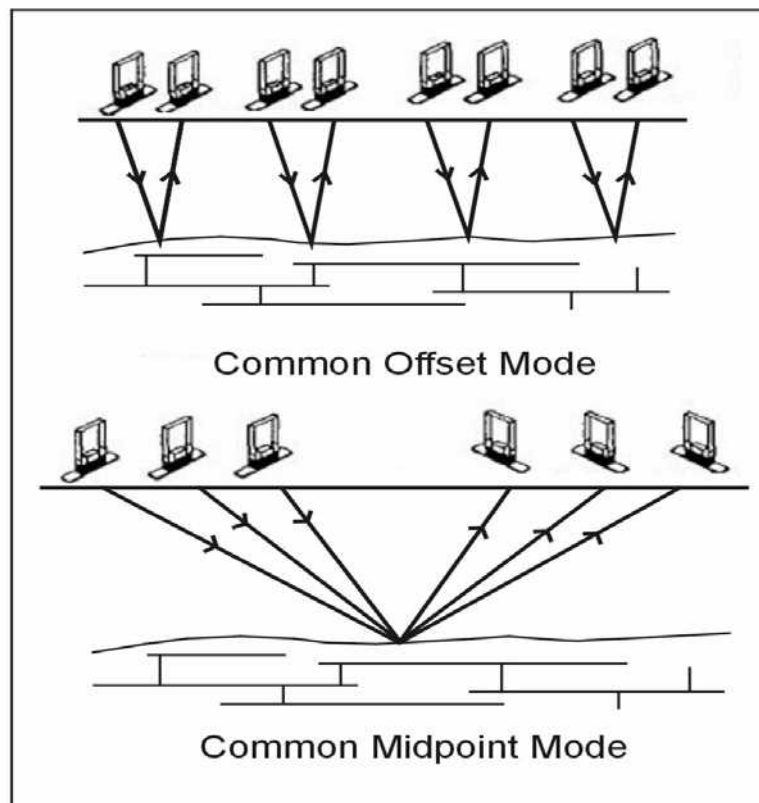
جدول (۳-۲) محدودیت دقت تفکیک (متر) برای فرکانس آنتن‌های مختلف و نفوذپذیری الکتریکی

$\epsilon_r$ \ f (MHz)	1	5	10	15	25	80
25	3.00	1.34	0.95	0.77	0.60	0.34
50	1.50	0.67	0.47	0.39	0.30	0.17
80	0.94	0.42	0.30	0.24	0.19	0.10
100	0.75	0.34	0.24	0.19	0.15	0.08
200	0.38	0.17	0.12	0.10	0.08	0.04
300	0.25	0.11	0.08	0.06	0.05	0.03
500	0.15	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02
900	0.08	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01

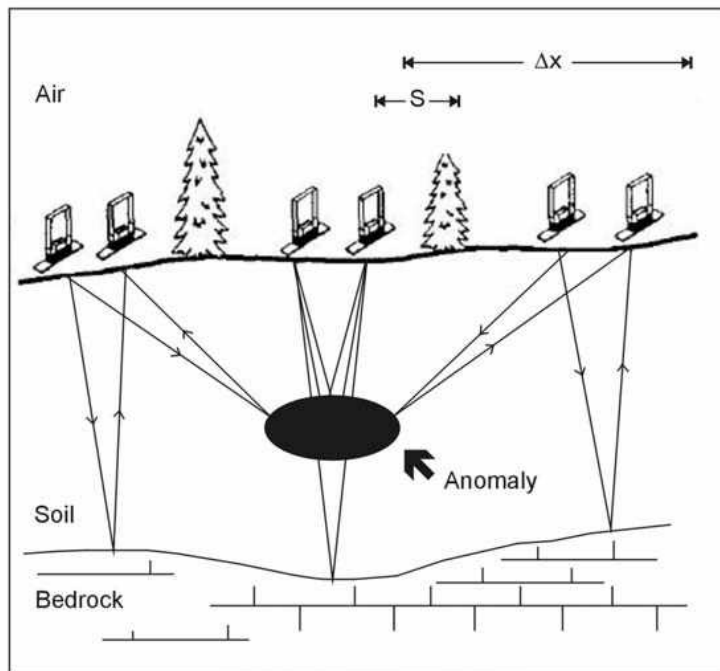
الگوی برداشت‌های GPR براساس چگونگی بازتاب امواج الکترومغناطیس مشابه با روش انعکاس لرزه‌ای است. دو روش برداشت جابجایی مشترک (common offset) و نقطه میانی مشترک (common midpoint) که در روش انعکاس لرزه‌ای استفاده می‌شوند در این روش نیز به کار می‌روند. شکل ۳-۳۱ چگونگی انجام این دو روش برداشت را نمایش می‌دهد. روش برداشت متداولتر روش جابجایی مشترک است که در آن فرستنده و گیرنده در فواصل ثابتی از یکدیگر نصب شده و در طول یک خط حرکت داده می‌شوند تا پروفیل مسیر تهیه شود (شکل ۳-۳۲). حرکت آنتن‌ها در طول مسیر برداشت می‌تواند به صورت پیوسته بوده یا در نقاط مجزایی برداشت صورت گیرد. در روش نقطه عمقی مشترک که کمتر معمول است، برای هر نقطه با تغییر فاصله آنتن‌های فرستنده و گیرنده

برداشت صورت می‌گیرد. با برداشت داده‌ها در نقاطی از یک شبکه، امکان ترسیم نمایی سه بعدی از شرایط زیرسطحی وجود دارد.

ذکر این نکته ضروری است که در این روش نیز همانند روش انعکاس لرزه‌ای، انرژی الزاما به سمت پائین منتشر نشده و بازتابش‌های عناصر موجود در اطراف نیز دریافت خواهد شد. علاوه بر این در روش GPR بخشی از انرژی امواج در هوا منتشر شده که در صورت بازتابش توسط عناصری نظیر ساختمانها و ماشین‌آلات، آنتن گیرنده ثبت کرده و پردازش‌های مورد نیاز را پیچیده‌تر خواهد نمود.



شکل (۳-۳) نمایش شماتیک روشهای برداشت جابجایی مشترک (common offset) و نقطه میانی مشترک (common midpoint)



شکل (۳-۲۲) نمایش شماتیک از پروفیل زنی GPR به شیوه جابجایی مشترک

پیش از برداشت داده‌های GPR در صورت امکان، بررسی محلی سایت مورد مطالعه ضروری است. در صورت عدم امکان بررسی حضوری سایت، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکسهای هوایی و نقشه‌های توپوگرافی توصیه می‌شود. نکته مهم در دقت و صحت برداشت‌های GPR تعیین موقعیت ایستگاهها یا مسیرهای برداشت است. در مواردی که اختلاف توپوگرافی قابل توجه باشد، تعیین ارتفاع نقاط نیز ضروری خواهد بود.

منطقه برداشت باید از محدوده هدف مورد شناسایی بیشتر باشد به طوری که علاوه بر برداشتهای انجام شده بر روی هدف مورد شناسایی، برداشتهایی نیز از خصوصیات مصالح زمینه در دست باشد. در هنگام برداشت جهت‌یافتگی مناسب مسیرهای برداشت نیز باید مورد توجه قرار گیرد. خطوط برداشت همواره باید عمود بر ساختارهای طولی نظیر کانالهای مدفون، خطوط لوله، ترانشه‌ها و گسلها که انتظار وجود آنها می‌رود، باشند. فاصله خطوط برداشت نیز باید متناسب با ابعاد هدف مورد شناسایی انتخاب شده و برداشتها حتی المقدور در مسیرهای مستقیم انجام گیرد. در موارد خاص جهت یافتگی قطبی آنتن‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نویزهای سطحی را به حداقل برساند.

در مجموع برای یک برداشت GPR مناسب، مراحل زیر برای جهت عملیات صحرائی توصیه می‌شود:

- راه اندازی تجهیزات و کنترل عملکرد داخلی آنها
- کنترل عملکرد خارجی تجهیزات (یک روش آن است که آنتن را بر روی ماشین یا دیواری قرار داده و به آهستگی به سمت آن قدم بزنیم. بازتابش باید بر نگاشت‌ها ثبت گردد).
- کالیبراسیون زمانی
- کالیبراسیون دستگاه با برداشت یک هدف مشخص در عمق معین (تنظیمات قابل توجهی برای شناسایی هدف مورد نظر ممکن است مورد نیاز باشد).
- شروع برداشت از هدفهای ناشناخته با توجه کافی به شرایط سطحی زمین، اطمینان از پوشش کامل محدوده مورد مطالعه و توجه به تغییرات در نگاشت‌ها.

- اغلب یک مسیر برای اطمینان از اینکه همه عناصر نگاشت توسط عوامل زیرسطحی ایجاد شده است، دو مرتبه برداشت می‌شود.

### ۳-۵-۵-۲- برداشت داده های GPR در پیمایش های جاده‌ای

پیمایش‌های جاده‌های، برای ارزیابی ویژگیهای آسفالت، روسازی، زیرسازی و در مجموع برای شناسایی‌های سریع و گسترده در طول جاده‌ها و در اعماق کم انجام می‌شود. در طراحی یک پیمایش GPR می‌بایست تعداد خطوط پیمایش مشخص شود. معمولاً در پیمایش‌های جاده‌ای یک خط پیمایش طولی طراحی می‌شود. در اکثر موارد در محورهای جاده-ای با یک خط رفت و یک خط برگشت، با نصب دستگاه در سمت راست خودرو و برداشت این قسمت به نتایج مطلوبی خواهیم رسید. نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که در برداشت‌هایی که به منظور کنترل کیفیت آسفالت انجام می‌شود، داده‌ها می‌بایست از نواحی بین چرخهای سمت راست و سمت چپ برداشت شود. دلیل این کار این است که مناطق زیر چرخ‌ها به علت تاثیرات فشرده‌گی ناشی از وزن ماشین و انتقال از طریق چرخ‌ها به آسفالت از وضعیت طبیعی خارج می‌شوند (Saarenketo, 2006).

اگر یک سیستم آنتن دوتایی تشکیل یافته از یک آنتن دوتایی-هوایی و یک آنتن دوتایی-زمینی مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان آنها را در یک خط و یا در مواردیکه آنتن دوتایی - زمینی جهت برداشت محوطه بین چرخ‌ها به کار رود، در کنار یکدیگر استفاده کرد. در پیمایش‌های مربوط به مطالعه خطوط راه آهن اگر فقط یک خط برداشت شود، خط مربوطه می‌بایست بین ریل‌ها باشد اما در بسیاری از پیمایش‌ها، داده‌ها از هر دو قسمت ریل‌ها برداشت می‌شود. در پیمایش‌های مربوط به مطالعه پل‌ها فاصله میان خطوط برداشت ۵/۰ متر پیشنهاد می‌شود.

مقاطع عرضی اطلاعات بسیار مفیدی را در خصوص ساختارهای راه فراهم کرده و به شناخت مکانیزم‌های معیوب شدن و گسیختگی راه کمک می‌کنند، اما جمع‌آوری داده‌ها در محورهای با ترافیک سنگین بسیار مشکل و خطرناک بوده و در این مواقع، برداشت نیازمند رعایت نکات ایمنی ویژه‌ای می‌باشد. با به کارگیری تکنیک‌های جدید برداشت سه بعدی GPR، تحلیل ساختارهای راه از طریق مقاطع عرضی بسیار آسانتر می‌باشد.

تعیین زمان برداشت داده‌های GPR دارای محدودیت‌های جوی می‌باشد. پیشنهاد می‌شود که برداشت داده‌ها در هنگام بارندگی و یا وقتی که سطح آسفالت مرطوب است انجام نشود. وقتی که برداشت داده‌ها با آنتن‌های دوتایی-هوایی برای کنترل کیفیت آسفالت صورت می‌گیرد، می‌بایست آسفالت کاملاً خشک باشد و در سطح آسفالت منطقه مرطوب دیده نشود و اگر اطلاعات مربوط به دی‌الکتریک لایه‌ها در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌بایست دمای لایه‌های روسازی بالای صفر درجه سانتیگراد باشد. از سوی دیگر، برداشت داده‌های GPR بوسیله آنتن‌های دوتایی - زمینی در هنگام زمستان بخصوص بر روی جاده‌های شنی نتایج بهتری را ارائه می‌دهد، زیرا پوشش یخی در جاده‌های یخ‌زده در حالیکه ذرات خاک ترکیبات کلریدی را احاطه کرده، باعث افزایش هدایت الکتریکی می‌شود. در جاده‌های با ترافیک بالا، فرودگاه‌ها و خطوط راه آهن پرفت و آمد، برداشت داده‌ها اغلب در شب صورت می‌گیرد.

برای برداشت داده‌هایی با کیفیت خوب می‌بایست سرعت برداشت در محدوده سرعت ۵۰-۶۵ کیلومتر در ساعت بماند، البته برداشت باید در وضعیت راهبندان محور اثری نگذارد. برداشت‌های با سرعت بالا، صحت نتایج را کاهش می‌دهد.

### ۳-۵-۵-۲-۱- تنظیمات مربوط به برداشت داده‌ها

تنظیمات مربوط به برداشت داده‌ها به نوع محل برداشت، هدف برداشت و مسئله مورد مطالعه بستگی دارد. برای مثال



تعداد نمونه برداری در مطالعه پل‌ها بسیار بیشتر از راه می‌باشد. به هر حال، ثابت شده است که تنظیمات زیر برای بدست آوردن داده‌های GPR با کیفیت خوب موثر بوده است.

چگالی نمونه برداری مناسب در هنگام برداشت مقاطع طولی در مسیر راه‌ها، راه آهن و باند فرودگاه‌ها برای هر دو سیستم آنتن دوتایی-زمینی و دوتایی-هوایی، ۱۰-۲۰ اسکن بر متر می‌باشد. این چگالی نمونه برداری اطلاعات مهمی را در مورد وضعیت شکستگی‌ها و چگونگی گسترش این شکستگی‌ها در آسفالت فراهم می‌کند (اسکالین و سارنتو، ۱۹۹۵) و همچنین در تعیین مرزهای لایه‌های روسازی و تشخیص اهدافی مثل لوله‌ها و کابل‌های مدفون در زیر زمین مفید می‌باشد.

در مواردیکه مقاطع عرضی راه‌ها و یا پل‌ها اندازه‌گیری می‌شود، چگالی نمونه برداری ۴۰ اسکن بر متر پیشنهاد می‌شود. در تنظیم تقویت دامنه موج ارسالی در آنتن‌های دوتایی-هوایی، می‌بایست دقت کرد که مقداری ثابت و یکنواخت باشد. در تنظیم موج انعکاسی از ورقه فلزی، می‌توان یک محدوده مناسب جهت تعیین ماکزیمم تقویت دامنه در آنتن‌های دوتایی-هوایی بدست آورد. اکثر برداشت داده GPR یک سیستم افزایش دامنه خودکار دارد، اما معمولاً از این سیستم استفاده نمی‌شود. در تنظیمات مربوط به تقویت دامنه و تشخیص مقدار بهینه برای تقویت در انواع مختلف آسفالت‌ها و یا دهانه پل‌های مختلف، می‌توان با انجام آزمایش‌های مختلف به نتیجه مطلوب رسید. پس از تعیین این مقدار، می‌بایست فایل مربوط به تنظیمات را در حافظه واحد کنترل برداشت ذخیره کرد. اگر در هنگام برداشت داده‌ها مشخص شود که مقدار دامنه امواج جهت تشخیص عارضه‌ها کافی نیست این مسئله باید با اعمال پردازش‌های بعدی در هنگام تحلیل برطرف شود. واحد‌های جدید کنترل داده‌های GPR با گنجایش بالا در ذخیره کردن داده‌ها امکان برداشت داده با چگالی بیشتر و رفع این نقیصه را فراهم آورده‌اند.

در هنگام برداشت داده‌ها، پیشنهاد می‌شود جهت حذف نوفه‌ها و پدیده حلقوی شدن داده‌ها از برخی صافی‌ها استفاده شود. به هر حال، اعمال این صافی می‌بایست سبک و ملایم باشد، بطوریکه انعکاس‌های دریافت شده از ساختارهای حقیقی و اهداف مدفون حذف نشود. باید به خاطر داشت که در برخی از نرم‌افزارها پس از برداشت نیز می‌توان صافی‌های مورد نیاز را اعمال کرد.

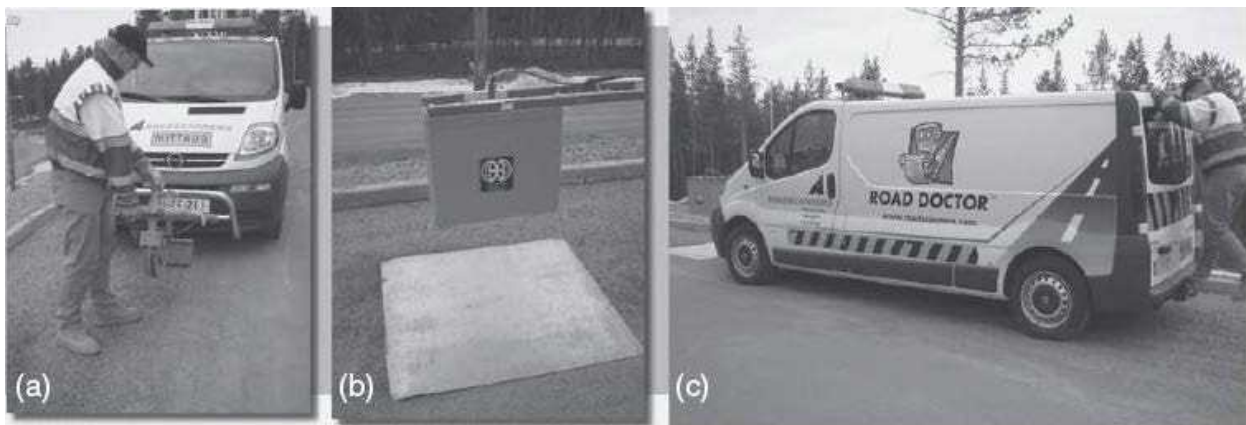
**آنتن‌های دوتایی - زمینی:** در صافی‌های IIR مقدار صافی بلند گذر را می‌بایست ۰/۲ فرکانس مرکزی تعیین کرد و برای صافی پایین گذر، این مقدار می‌بایست ۵ برابر فرکانس مرکزی باشد. برای مثال در آنتن ۴۰۰ مگا هرتز، بالا گذر ۸۰ مگا هرتز و پایین گذر ۲۵۰۰ مگا هرتز مناسب می‌باشد.

**آنتن‌های دوتایی - هوایی:** برای این آنتن، در صافی‌های FIR مقدار صافی بلند گذر، نصف فرکانس مرکزی بوده در حالیکه صافی پایین گذر ۳ برابر فرکانس مرکزی می‌باشد. برای مثال در آنتن ۱ گیگا هرتز، بالا گذر ۵۰۰ هرتز و پایین گذر ۳/۲۵ گیگا هرتز می‌باشد.

هر یک از تولیدکننده‌های آنتن‌های GPR، جهت تعیین و تنظیم صافی‌های هر سیستم پیشنهاد‌های مربوط به خود را دارد. زمان نمونه برداری به نوع هدف مورد مطالعه بستگی دارد، اما بطور نرمال محدوده زمانی جهت استفاده در سیستم‌های رادار فرکانس بالا مورد استفاده در مطالعه آسفالت، ۲۰ نانو ثانیه می‌باشد. در استفاده از سیستم‌های دوتایی-زمینی با فرکانس‌های ۴۰۰-۶۰۰ مگا هرتز بطور نرمال از محدوده زمانی ۶۰ یا ۸۰ ثانیه استفاده می‌شود.

در هنگام برداشت با آنتن‌های دوتایی-هوایی می‌بایست از یک ورقه فلزی که معمولاً از جنس آلومینیوم می‌باشد، استفاده شود. در این موارد یک ورقه فلزی با ابعاد حدود ۱۰۰×۱۰۰ سانتیمتر، قبل از شروع پیمایش در زیر آنتن گذاشته می‌شود و حدود ۱۰۰-۲۰۰ اسکن را به زمین فرستاده و بازتاب آن دریافت می‌شود. پیشنهاد می‌شود که در هر پیمایش

اندکی قبل از شروع برداشت این کار انجام شود. در پردازش‌ها می‌بایست سیگنال رسیده از راه هوا حتماً حذف شود. سیگنال مربوط به هوا اولین سیگنال دریافتی است که بدون هیچگونه بازتابی، مستقیماً از فرستنده به گیرنده می‌رسد. در هر برداشت یک فایل کالیبراسیون ارتفاعی مورد نیاز است، این فایل جهت تصحیح دامنه بازتابنده‌ها بکار گرفته می‌شود، این فایل مانند یک تابع از ارتفاع آنتن بالای سطح زمین می‌باشد. با قرار دادن یک ورقه فلزی در زیر آنتن (توصیه می‌شود که جنس ورقه از آلومینیوم و یا فولاد باشد) و با وارد کردن نیرو در جهت پایین و بالا به خودرو، نوسان ایجاد می‌شود، ایجاد این نوسان در آنتن مانند این است که سیگنال‌ها در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین ارسال شده باشد. پس از حدود ۴۰ ثانیه نوسان خودرو، برداشت فایل کالیبراسیون متوقف می‌شود (شکل ۳-۳۳). لازم است قبل از شروع کار و استفاده از آنتن‌ها، به ویژه در آنتن‌های دوتایی- هوایی، آنتن‌ها حدود ۱۵-۲۰ دقیقه کار کند تا اینکه دستگاه‌ها گرم شده و برای یک برداشت صحیح آماده شوند. این کار از ایجاد انحراف در دامنه و زمان رسید سیگنال‌های GPR در هنگام برداشت داده‌ها جلوگیری می‌کند.



شکل (۳-۳) آزمایش کالیبراسیون آنتن GPR مربوط به قبل و بعد از برداشت داده‌ها (a) انجام آزمایش lifting برای آنتن دوتایی- زمینی (b) آزمایش ورقه فلزی برای آنتن‌های دوتایی- هوایی (c) آزمایش تکانش آنتن برای آنتن‌های دوتایی- هوایی (سارنتو و همکاران، ۲۰۰۵)

### ۳-۵-۲-۲- تعیین موقعیت

تعیین موقعیت صحیح داده‌های GPR، در پردازش و تفسیر داده‌های برداشت شده ضروری است. زمانیکه داده‌های GPR و موقعیت دقیق ارجاع آن با هم منطبق نباشد، داده‌ها بی‌ارزش خواهد بود. آزمایش‌های زیادی بر روی داده‌های GPR جهت سنجش دقت و صحت نتایج بدست آمده از داده‌ها و مطابقت آنها با واقعیت انجام می‌شود. بسیاری از اشکالات که در تحلیل داده پیش می‌آید ناشی از تعیین موقعیت نادرست نمونه GPR و یا نمونه مرجع می‌باشد. تعیین موقعیت را میتوان با استفاده از گذاشتن کد‌هایی که فاصله نمونه برداری را کنترل کند مشخص کرد، همچنین اضافه کردن علامت‌گذاری‌هایی به داده‌های GPR در نقاط معلوم و مشخصی را که از قبل تعیین شده یا استفاده از سیستم‌های کیلومتر سنج و GPS انجام داد. سیستم‌های ویدئویی پیوند یافته به سیستم GPR نیز در سنجش دقت و کنترل صحت موقعیت تعیین شده، مفید است. بهترین راه برای استفاده از همه این روش‌ها، ترکیب آنها می‌باشد. نشانه گذاری را در نقاط مشخصی از محور برای مثال در محل آبرو‌ها، محل اتصال پل‌ها و محل اتصال راه‌های مختلف به یکدیگر، می‌توان انجام داد. محل‌های ابتدا و انتهای پیمایش را نیز می‌بایست با نرم افزار برداشت، نشان گذاری کرد. در یک پیمایش ویژه کوتاه مثل دهانه پل‌ها، پیشنهاد می‌شود که نقاط مرجع را در فواصل ۲۰-۱۰۰ متری تعیین کرده و به همین صورت نقاط نشان گذاری را نیز در این نقاط قرار داد. در پیمایش‌های راه‌ها پیشنهاد می‌شود که نقاط ابتدا و

انتهای محور، نقاطی باشد که به لحاظ حضور آب‌نیه و یا ثبت در دفتر اداره راه و ترابری، نقاط مشخصی باشند. بطور ویژه در مطالعه دهانه پل‌ها، تعیین موقعیت صحیح در جهت عرض بسیار ضروری است و جهت انجام این مهم از سیستم‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد، برای مثال رسم نشانه‌های گذاشته شده در مسیر، دوربین‌های ویدئویی و لیزر‌ها نیز بطور موفقیت آمیزی بکار گرفته می‌شود. در چند سال اخیر، با پیشرفت و بکارگیری تکنولوژی GPS، صحت موقعیت یابی بطور قابل توجهی افزایش یافته است. سیستم‌های استاندارد GPS موجود در بازار، دارای خطای  $\pm 1$  متر می‌باشد، در حالیکه سیستم جدید با نام ایستگاه مرجع مجازی (VRS)، که از GPS و همچنین از ماهواره Glonass استفاده می‌کند، در پیمایش‌های GPR می‌تواند مقدار خطا را تا مقدار  $\pm 0.5$  متر بهبود بخشد.

### ۳-۵-۲-۳- نمونه برداری مرجع

در بسیاری از پروژه‌ها، پیشنهاد می‌شود که جمع‌آوری نمونه‌های مرجع همزمان با برداشت GPR انجام شود و اگر این مورد امکان‌پذیر نبود، پیشنهاد می‌شود که برخی نقاط از محور برداشت نشانه‌گذاری شود و در آن نقاط نمونه برداری شود. مشکل این روش این است که پردازش اولیه داده‌ها می‌بایست در محل برداشت انجام شود. در پیمایش‌های شبکه‌ای و پروژه‌های بازسازی، نقاطی را می‌بایست برای نمونه برداری مرجع از بخش‌هایی که ساختارهای بارز و نمونه‌ای از پروژه را داشته باشند، مشخص کرد. این نقاط می‌بایست از بخش‌هایی که در محدوده نزدیک به  $10^\circ$  متری اطراف خود، ضخامت آنها بدون تغییر بوده است انتخاب شود. این کار باعث اطمینان از عدم خطا در تعیین مقدار دی‌الکتریک هر لایه، پیش از محاسبه خواهد شد. نقاط دیگری را که می‌توان به عنوان نقاط نمونه برداری انتخاب کرد، نقاطی است که در آن احتمال می‌رود ساختار جاده دارای مشکلاتی باشد.

### ۳-۵-۶- پردازش داده‌های GPR

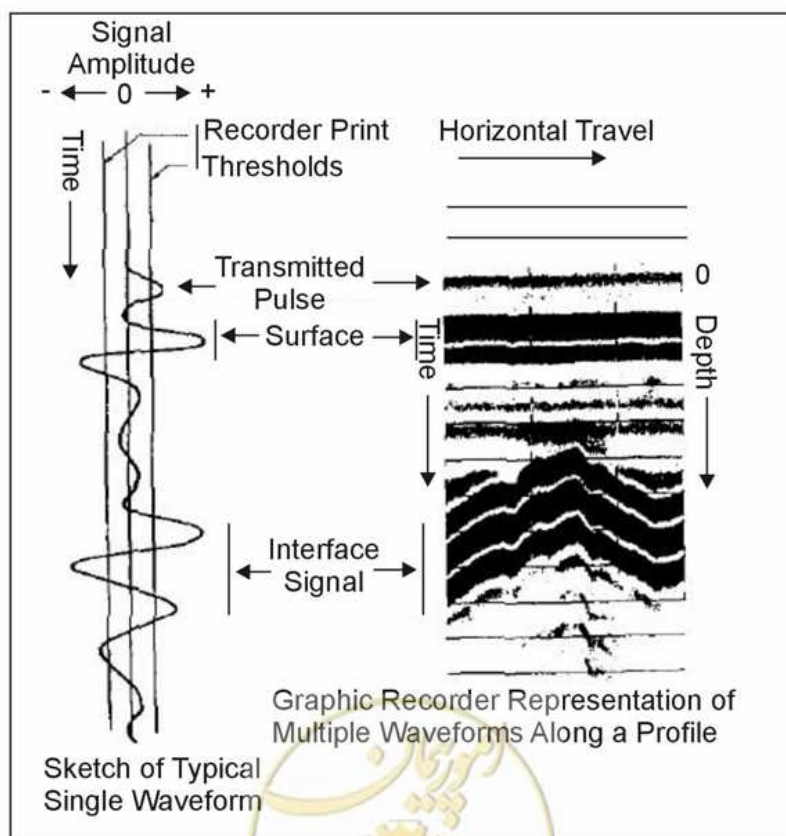
برای بیشتر برداشت‌ها معمولاً داده‌ها بدون پردازش به کار می‌روند. با این وجود در موارد لازم، پردازش‌های معمول در GPR عبارتند از: برانبارش (Stacking)، واهماویخت (Deconvolution)، اعمال فیلتر، تبدیل هیلبرت (Hilbert transforms)، مهاجرت (migration) و تبدیل طیف (spectrum transforms). (Yilmaz, 1987 and Fisher et al., 1992). روش‌های متعددی از فیلتر کردن ممکن است برای حذف نویزها در روش GPR استفاده شود. نوسانات حاصل از اتصال‌های مکرر آنتن‌ها به زمین (در سایت‌های ناهموار) می‌تواند با میانگین‌گیری از کلیه اسکن‌ها به دست آمده از داده‌ها حذف گردد. نویزهای رادیویی ناشی از خطوط تلفن و سایر فرستنده‌های رادیویی نزدیک باید با استفاده از روش فیلتر گرادیان متوسط حذف گردند (Olhoeft, 1991). تغییرات ارتفاع سطح زمین می‌تواند تاثیر زیادی در نتایج GPR داشته باشد. روش استاندارد برای اصلاح اثر توپوگرافی استفاده از جابجایی زمان استاتیک (static time shift) برای هر عبور رادار پیش از ترسیم پروفیل‌هاست. روش جابجایی زمان استاتیک، در جایی که موقعیت و ارتفاع آنتن‌ها و سرعت موج در نزدیک سطح زمین مشخص باشد، قابل استفاده است. در مواردی که برداشت GPR به صورت پیوسته انجام می‌شود، امکان کشیدن آنتن‌ها با سرعت یکنواخت مقدور نبوده و لذا برداشت‌ها در فواصل مکانی ثابتی انجام نمی‌شوند. در این موارد لازم است با استفاده از روش‌هایی مناسب (از جمله روش‌های مصطلح به Rubber sheeting) برداشت‌های رادار را فشرده یا کشیده کرده و به برداشت‌هایی در فواصل ثابت تبدیل نمود.

داده‌های GPR می‌توانند به صورت یک پروفیل پیوسته از عبورهای رادار نمایش داده شوند که در آن محور افقی نشان دهنده فواصل افقی و محور قائم نشان دهنده زمان رفت و برگشت امواج یا عمق است. داده‌ها معمولاً به گونه‌ای

نمایش داده می‌شوند که شدت امواج رسیده در هر زمان با دامنه امواج متناسب است یا به صورتیکه شدت امواج با شدت تغییر رنگ آنها متناسب است به نحوی که امواج با شدت بیشتر به سمت سیاه متمایل بوده و امواج با شدت کمتر به سمت سفید متمایل‌اند. گاهی برای نمایش این داده‌ها از رنگهای دیگر نیز استفاده می‌شود. شکل ۳-۳۴ نمونه‌ای از نمایش داده‌های GPR را ارائه می‌نماید. قسمتهایی که در دو سوی منفی و مثبت از حد آستانه فراتر رفته‌اند، به صورت سیاه شده نمایان شده‌اند. این نحوه نمایش بیشتر برای شرایطی که شناسایی یک هدف مشخص مورد نظر است، مناسب بوده و پردازش‌های پس از برداشت ضرورت ندارد.

برای نمایش داده‌های GPR تعیین زمان عبور امواج الکترومغناطیس برای تعیین عمق بازتاباننده‌های مختلف لازم است. تعیین زمان عبور شامل تعیین زمان رفت امواج از زمان صفر تا بازتاباننده و برگشت آنهاست. زمان صفر زمانی است که در آن امواج از فرستنده ساطع می‌شوند. در سیستم‌هایی که آنتن فرستنده و گیرنده یکی است، زمان صفر از تقاطع صفر سیگنالهای رادار ارسالی به دست می‌آید. روش دیگر برای محاسبه زمان صفر قرار دادن صفحات فلزی در فواصل مختلف از آنتن و محاسبه زمان صفر توسط رگرسیون است. در سیستم‌هایی که آنتن فرستنده و گیرنده مجزاست، زمان صفر از ترسیم امواج منعکس شده از هوا و سطح زمین برای فواصل مختلف آنتن‌های گیرنده و فرستنده و محل تقاطع آنها به دست می‌آید.

عمق بازتاباننده برابر است با نصف حاصلضرب زمان رفت و برگشت امواج در سرعت انتشار. لذا محاسبه عمق علاوه بر زمان عبور امواج، نیازمند دانستن سرعت در لایه‌های زمین است. سرعت در لایه‌های زمین می‌تواند تخمین زده شده، محاسبه شده و یا اندازه‌گیری شود. سرعت را می‌توان براساس جدول ۳-۱ تخمین زده یا با روشهای زیر اندازه‌گیری و محاسبه کرد:



شکل (۳-۳۴) نمونه‌ای از نمایش داده‌های GPR (سیگنالها و نمایش گرافیکی پروفیل)



### - روش سونداژ سرعت انتشار امواج:

این روش برای اندازه‌گیری سرعت با استفاده از آنتن‌های دوگانه GPR (آنتن فرستنده و گیرنده مجزا) برای یک سطح افقی بازتابنده به کار می‌رود. در این روش فاصله آنتن‌های گیرنده و فرستنده تغییر کرده و برای فواصل مختلف زمان رفت و برگشت اندازه‌گیری می‌شود. در این روش میانگین سرعت انتشار امواج در لایه‌ها از سطح زمین تا سطح بازتابنده با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_m = x / \sqrt{(t_x^2 - t_d^2)} \quad \text{رابطه ۳-۱۶}$$

که در این رابطه:

$x$  = فاصله افقی بین آنتن فرستنده و گیرنده

$t_x$  = زمان رفت و برگشت امواج در فواصل مختلف  $x$

$t_d$  = زمان رفت و برگشت امواج در  $x$  برابر با صفر

جابجایی آنتن‌ها می‌تواند براساس الگوی نقطه عمقی مشترک (CMP) باشد و یا آنتن فرستنده ثابت بوده و آنتن گیرنده جابجا شود. این روش اخیر را که بازتابش با زاویه باز (wide-angle reflection, WAR) گویند تنها در صورتی که سطح بازتابنده هموار باشد قابل استفاده است.

### - روش استفاده از نگاشت‌های هذلولی شده:

نگاشت‌های GPR به دست آمده از ساختارها و سازه‌هایی نظیر لوله‌ها، قله سنگها و مخازن، اشکالی هذلولی شکل ایجاد می‌کنند که این اشکال برای محاسبه عمق بازتابنده با استفاده از روابط زیر به کار می‌رود:

$$Depth = x / \sqrt{((t_z / t_y)^2 - 1)} \quad \text{رابطه ۳-۱۷}$$

$$V = (2 / t_y) \left( x / \sqrt{((t_z / t_y)^2 - 1)} \right) \quad \text{رابطه ۳-۱۸}$$

که در این روابط:

$x$  = فاصله در سطح زمین

$t_z$  = زمان رفت و برگشت امواج تا بازتابنده (لوله و غیره)

$t_y$  = زمان رفت و برگشت امواج تا بازتابنده وقتی آنتن‌های دقیقاً بر روی بازتابنده قرار دارند (راس هذلولی)

$V$  = سرعت انتشار امواج بر حسب متر بر ثانویه

### - تعیین سرعت با استفاده از بازتابنده ای در عمق مشخص:

روش دیگری برای تعیین سرعت در یک نقطه مشخص از سایت، استفاده از بازتابنده ای با عمق مشخص است. بازتابنده می‌تواند تجهیزات، سطح آب در نهشته‌های درشت دانه، لایه‌های رسی یا سایر ساختارهای زمین‌شناسی که عمق آنها معلوم است، باشد. در این صورت با استفاده از برداشت‌های GPR و رابطه زیر می‌توان سرعت را به دست آورد:

$$V = d / t \quad \text{رابطه ۳-۱۹}$$

که در این رابطه  $d$  عمق بازتابنده و  $t$  نصف زمان رفت و برگشت امواج وقتی که آنتن‌ها بر بالای بازتابنده قرار دارند، می‌باشند.



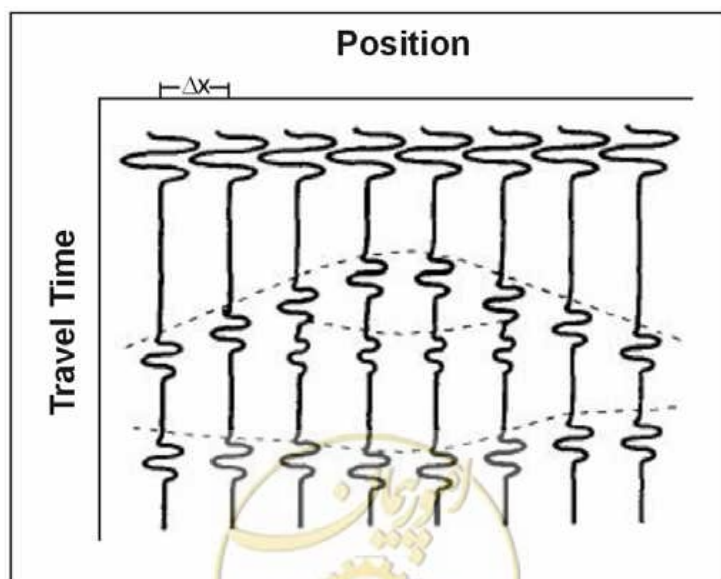
### ۳-۵-۷- تفسیر داده‌های GPR

این روش نیز همانند سایر روشهای ژئوفیزیکی، تفسیر واحد و منحصر به فردی ارائه نمی‌دهد. تشخیص اینکه کدام یک از تفاسیر صحیح‌تر است تنها با تکیه بر سایر اطلاعات مانند زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و سایر روشهای ژئوفیزیکی امکان پذیر است. تفسیر برداشتهای صحرائی باید در دو مرحله انجام شود: ابتدا تفسیر اولیه در صحرا برای شناسایی خطاهای احتمالی و برداشت دوباره در صورت ضرورت انجام شده و تفسیر کامل در دفتر به منظور استخراج شرایط زیرسطحی بعمل می‌آید.

برداشت‌های GPR بدون ارزیابی دقیق شرایط زمین‌شناسی و چینه‌شناسی سایت و خصوصیات ویژه هدف مورد شناسایی، نتایج دلخواه را نخواهند داشت. اگر اهداف مورد نظر از برداشت بخوبی تبیین نشده باشند، اغلب نتایج برداشت GPR نگاشت‌های خیلی خوب بدون هرگونه تفسیر واضح و صریح خواهد بود. این امکان وجود دارد که سیستم GPR را به گونه‌ای تنظیم کرد که جزئیات مورد نظر از شرایط زیرسطحی در نگاشت آشکار گردد.

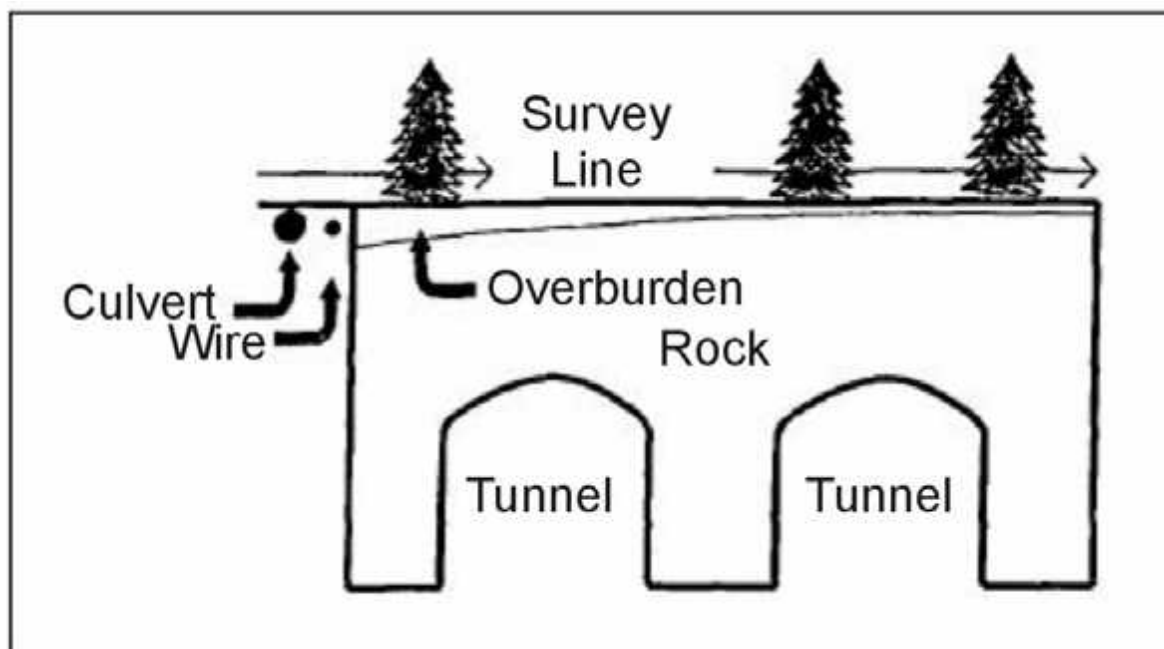
برای ارزیابی شرایط زمین‌شناسی به جز شرایط خاص مانند قرارگیری لایه خاک جنگلی در زیر تپه‌های ماسه بادی، هیچ گونه تفسیر از پیش آماده‌ای وجود ندارد. نگاشت‌های GPR جزئیات چینه‌شناسی را به خوبی آشکار می‌کنند اما برای تشخیص اینکه کدام بخش از نگاشت مربوط به کدام میان‌لایه بوده یا کدام بخش، تغییرات جزئی در میزان رطوبت را نشان می‌دهد، راهی وجود ندارد. وقتی یک هدف برای کالیبراسیون وجود داشته باشد، برداشت‌های GPR موفقیت بیشتری خواهد داشت. روش GPR برای مطالعه چینه‌شناسی یک منطقه می‌تواند مفید باشد اما کالیبراسیون آن (در صورت امکان با حفر ترانشه) برای کارهای زمین‌شناسی ضروری است.

شکل (۳-۳۵) نشان می‌دهد که برداشت GPR از عناصر زیرسطحی مورد شناسایی، یک نگاشت هذلولی را ثبت کرده‌اند. هذلولی شدن شکل نگاشت به دلیل ثبت پالسهای الکترومغناطیس پیش و پس از زمانی است که سیستم آنتن-ها درست بطور قائم بالای هدف مورد نظر قرار گیرد. نزدیکترین مسیر رفت و برگشت موج در جایی است که آنتن یا مرکز سیستم آنتن‌ها در سطح زمین دقیقاً بر روی هدف مورد شناسایی قرار گرفته باشد. با فاصله گرفتن آنتن یا سیستم آنتن‌ها از بالای هدف مورد شناسایی فاصله رفت و برگشت امواج افزایش می‌یابد.

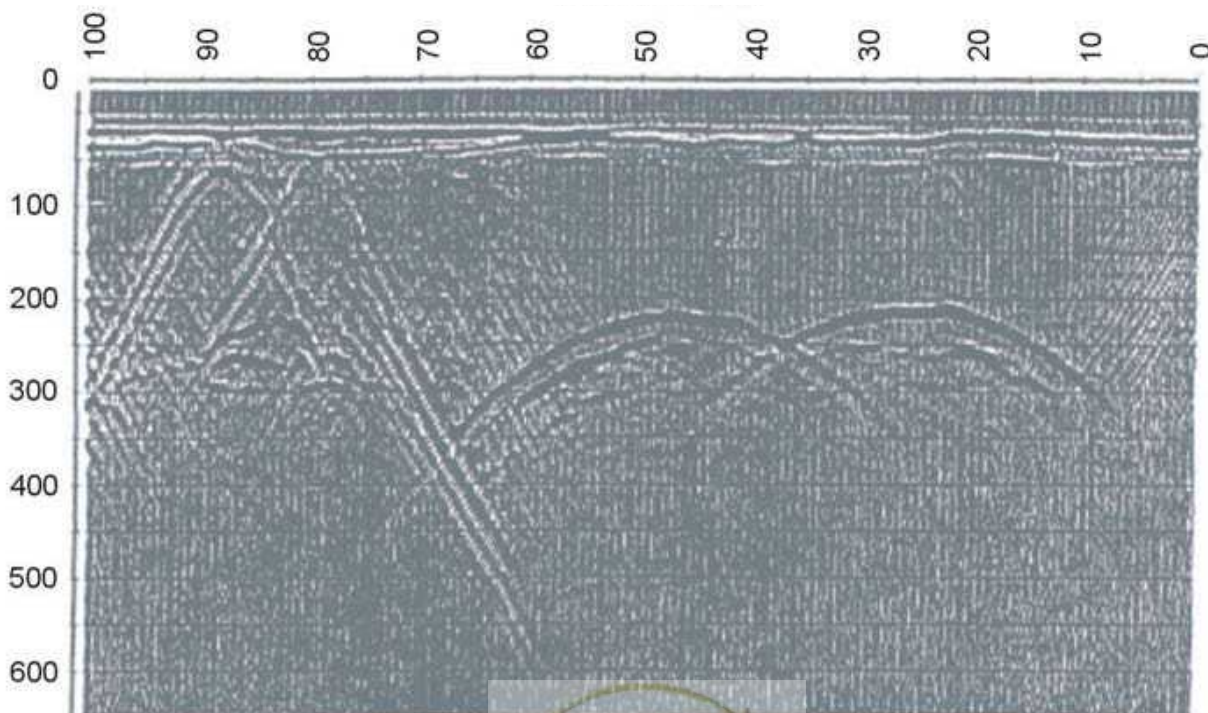


شکل (۳-۳۵) شکل مقاطع بازتابش GPR برای شرایط نمایش داده شده در شکل ۳-۳۲

شکل (۳-۳۶) نمایی شماتیک از یک سری هدف‌های مورد شناسایی را نمایش داده و شکل (۳-۳۷) نگاشتهای GPR به دست آمده برای سری مشابه اهداف در حالت واقعی را نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۳۶) تصویر شماتیک از یک سری از هدف‌های مورد شناسایی



شکل (۳-۳۷) نگاشت واقعی GPR برداشت شده بر روی یک مجرای آب، لوله و دو تونل نشان دهنده شکل هذلولی انرژی بازتابی و تفرق یافته از عوارض اشاره شده (Annan, 1992).



### ۳-۵-۸- محدودیت های روش GPR

روش GPR نیز همانند همه روشهای ژئوفیزیکی همیشه نمی تواند تفسیری واحد از شرایط زیرسطحی ارائه نموده و به تنهایی به همه مسائل و ناشناخته‌های زیرسطحی مورد نظر پاسخ دهد. علاوه بر این در این روش نیز با افزایش عمق، توان شناسایی و تفکیک ساختارها و عناصر زیرسطحی کاهش می‌یابد.

به جز محدودیت‌های کلی روشهای ژئوفیزیکی، GPR محدودیتهایی مختص به خود نیز دارد. میزان کارایی این روش (عمق شناسایی و قدرت تفکیک) به مشخصات سطحی و زیرسطحی سایت بستگی دارد. با وجود اینکه عمق شناسایی برای ماسه‌های اشباع تا عمق ۳۰ متر (Morey 1974, Beres and Haeni 1991, smith and Jol 1992 and wright et al., 1984)، گرانیت تا ۳۰۰ متر، نمک خشک تا ۲۰۰۰ متر (Unterberger 1978) و یخ تا ۵۴۰۰ متر (Wright et al., 1984) گزارش شده است اما به طور معمول عمق شناسایی در روش GPR ۱ تا ۱۰ متر است.

ضریب بازتاب، دامنه امواج ساطع شده و بازتاب شده را تعیین می‌کند. ضریب بازتاب به زاویه امواج، قطبیت امواج و خصوصیات الکترومغناطیس مواد زمین بستگی دارد. از طرفی اختلاف سرعت مناسب برای انعکاس امواج الکترومغناطیس، نیازمند تفاوت آشکار و مشخص در دو سمت سطح انعکاس دهنده است و در صورت عدم تباین کافی امکان تشخیص لایه‌ها و مرزها وجود نخواهد داشت. به عنوان مثال تشخیص سطح آب در مواد ریزدانه در مقایسه با مواد درشت دانه به دلیل تفاوت در ضخامت نسبی زون کاپیلاریته برای یک تباین یکسان سخت تر است.

امواج الکترومغناطیس پلاریزه بوده و بسته به جهت قرار گیری آنتن‌ها نسبت به عناصر و اهداف مورد نظر، دقت شناسایی متفاوت خواهد بود. دو آنتن با میدان الکتریکی پلاریزه، موازی و خطی برای عناصر و اهداف خطی مانند لوله‌ها، می‌تواند پاسخ دریافتی را وقتی که میدان الکتریکی به موازات یا عمود بر لوله باشد (محور طولی آنتن موازی با طول هدف مورد شناسایی باشد)، حداکثر نماید. به همین ترتیب هم محور بودن با میلگردهای درون بتن، توانایی GPR برای ترسیم نقشه آنها را افزایش می‌دهد اما عمود بودن محور بر میلگردها باعث پراکندگی امواج الکترومغناطیس شده و این پراکندگی مانع از تشخیص بخشهای زیرین میلگردها و در نتیجه تعیین ضخامت بتن می‌شود. دو آنتن عمود بر هم پاسخ دریافتی از لایه‌های افقی را به حداقل می‌رساند.

نویزها در روش GPR منابع متعددی می‌توانند داشته باشند. سنگهای درشت، حفرات ایجاد شده توسط حیوانات، ریشه گیاهان و سایر ناهمگنی‌ها بازتابها یا پراکنشهای ناخواسته‌ای را تولید کرده که در فرایند برداشت داده‌ها اختلال ایجاد می‌کنند. تغییرات جانبی در خصوصیات الکترومغناطیس زمین نیز می‌تواند از منابع نویز باشد. از دیگر منابع نویز، می‌توان به وجود ماشین آلات، ساختمانها، حصارها، خطوط انتقال نیرو، درختان و غیره اشاره نمود. در این موارد می‌توان با نصب پوشش آنتن‌ها، نویزها را کاهش داد. قطعات فلزی پراکنده در سطح زمین و یا نزدیک به آن یا تجهیزات و سازه‌های فلزی نظیر لوله‌ها، کابل‌ها، تانکرها و غیره و فرستنده‌های رادیویی و تلویزیونی و سیم‌های تلفن از عوامل اختلال در برداشت داده‌ها به شمار می‌آیند. از دیگر منابع نویز و اختلال در برداشت‌ها، به اتصال و جدا شدن آنتن‌ها به زمین در مناطق ناهموار، پوشش گیاهی زیاد، آبهای جاری و تغییرات در شرایط سطحی زمین می‌توان اشاره نمود.

### ۳-۶- روشهای الکترومغناطیس

#### ۳-۶-۱- مقدمه

این روش عمدتاً در طی سالهای دهه ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ در آمریکای شمالی و کشورهای اسکاندیناوی بوجود آمد که البته



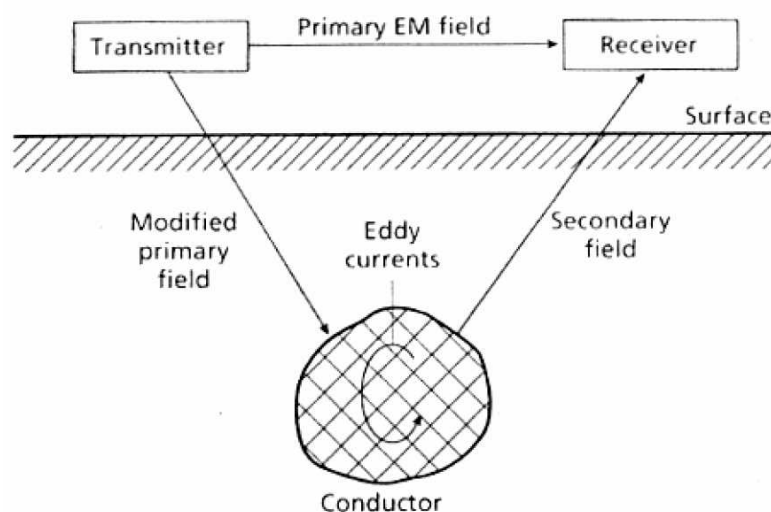
بهبود ها و پیشرفتهای زیادی بر روی تکنیک های این روش در سالهای اخیر صورت گرفته است. علیرغم آنکه تئوری این روش کاملا پیچیده و بسیار تخصصی است، ولی فهم اصول اساسی و کاربرد آن دشوار نیست و عملیات صحرائی برخی از شیوه های روش الکترومغناطیس نسبتا ساده است.

اساس روش الکترومغناطیس این است که امواج الکترومغناطیس در رساناها جریان القا می کنند. جریانهای ایجاد شده خود منشا امواج الکترومغناطیس جدیدی می شوند که می توان آنها را با تجهیزات مناسب آشکارسازی کرد.

### ۳-۶-۲- اصول و مبانی روش الکترومغناطیس

توده های ناهنجاری با رسانایی الکتریکی زیاد، میدانهای الکترومغناطیس قوی ایجاد می کنند. بعضی توده های دارای کانه‌های اصلی نارسانا نیز اگر مقادیر کافی از کانی های فرعی با رسانایی زیاد داشته باشند ممکن است میدان های ثانویه ایجاد کنند.

برای تشریح نحوه کار این سیستم، یک سیم پیچ فرستنده و یک سیم پیچ گیرنده را در نظر بگیرید که در دو نقطه روی سطح زمین بر روی توده ای با رسانایی خوب قرار دارند (شکل ۳-۳۸).

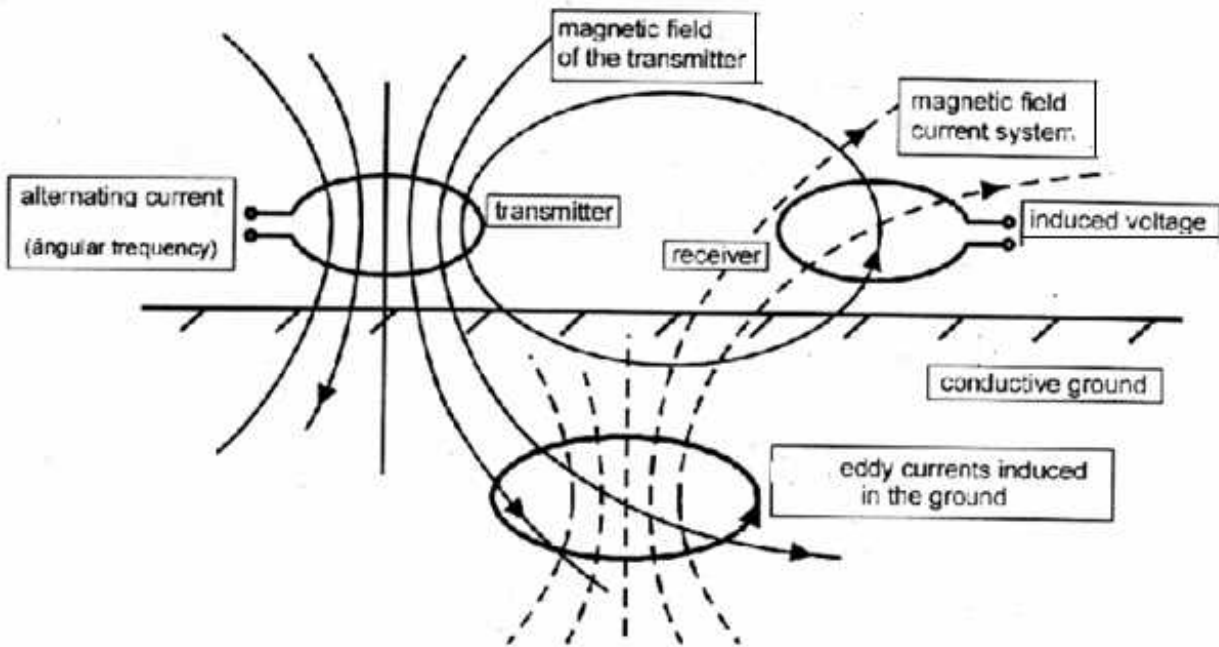


شکل (۳-۳۸) نمای شماتیک از روش الکترو مغناطیس

یک جریان متناوب (با فرکانس چندصد هرتز تا یک کیلو هرتز) از سیم پیچ فرستنده عبور داده می شود. عبور جریان از این سیم پیچ باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی متناوب می شود که میدان اولیه نام دارد. این میدان در محیط اطراف پخش می شود و توده رسانا و گیرنده را نیز در بر می گیرد. میدان اولیه باعث ایجاد یک جریان متناوب (جریان ادی Eddy Current) در توده رسانا می شود. این جریان پیچکی خود میدان مغناطیسی متناوبی ایجاد می کند که میدان ثانویه نامیده می شود. این میدان نیز به محیط اطراف و از جمله گیرنده می رسد. لذا میدان مغناطیسی کل در اطراف گیرنده از میدانهای اولیه و ثانویه تشکیل شده است. یعنی گیرنده به برآیند میدانهای اولیه و ثانویه پاسخ می دهد (شکل ۳-۳۹). پاسخ این برآیند هم از لحاظ فاز و هم از لحاظ دامنه با پاسخ میدان اولیه تفاوت دارد که حضور توده رسانا را آشکار می کند و اطلاعاتی در مورد شکل هندسی و خواص الکتریکی آن بدست می دهد.

با اندازه گیری جریان تولید شده در سیم پیچ ثانویه در اثر میدان ثانویه می توان شدت میدان برآیند در محل گیرنده

(Hs) را اندازه گرفت و آنرا با شدت میدان اولیه (Hp) مقایسه نمود.



شکل (۳-۳۹) سیم پیچ فرستنده با ایجاد میدان اولیه باعث تولید جریان های Eddy در توده رسانا شده و سیم پیچ گیرنده برآیند میدانهای اولیه و ثانویه را ثبت می کند

### ۳-۶-۳- عمق نفوذ میدانهای الکترومغناطیس

عمق نفوذ میدان الکترومغناطیس به فرکانس آن و رسانایی الکتریکی محیط بستگی دارد. این میدانها در هنگام عبور از زمین تضعیف می شوند و دامنه آنها بصورت نمایی با عمق کاهش می یابد. عمق نفوذ تئوری (d) را می توان عمقی تعریف کرد که در آن دامنه میدان ( $A_d$ ) با ضریب  $e^{-1}$  در مقایسه با میدان اولیه ( $A_0$ ) در سطح کاهش می یابد.

$$A_d = A_0 \cdot e^{-1} \quad \text{رابطه ۳-۲۰}$$

$$d = 503.8 (f \cdot \delta)^{-0.5} \quad \text{رابطه ۳-۲۱}$$

که در آن  $\delta$  رسانایی بر حسب  $sm^{-1}$  و  $f$  فرکانس میدان بر حسب هرتز است. بنابراین عمق نفوذ با کاهش فرکانس رسانایی افزایش می یابد. بر این اساس می توان فرکانس مورد استفاده را برای برداشت برای هر عمق مطلوب تنظیم کرد. البته در عمل یک عمق نفوذ موثر  $Z_e$  را می توان عمقی تعریف کرد که در آن یک رسانا قرار دارد و آنومالی قابل آشکار سازی ایجاد می کند.

$$Z_e \approx 100 (f \cdot \delta)^{-0.5} \quad \text{رابطه ۳-۲۲}$$

این ارتباط تقریبی است زیرا عمق نفوذ به فاکتورهایی مانند ماهیت و بزرگی اثرات تغییرات نزدیک سطح در رسانایی، شکل هندسی رسانا و نوبزهای صنعتی نیز بستگی دارد. بستگی عمق نفوذ به فرکانس نیز قید و بندهایی ایجاد می کند. معمولاً ایجاد و اندازه گیری جریانهایی با فرکانس خیلی پایین دشوار است و حداکثر عمق نفوذ حدود ۵۰۰ متر است.

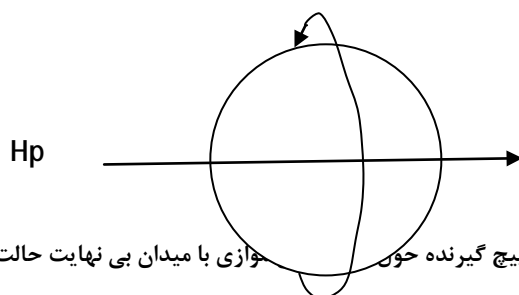


### ۳-۶-۴- روش‌های اندازه‌گیری صحرایی الکترومغناطیس

در عمل روش‌های الکترومغناطیس به دو دسته روش‌های اندازه‌گیری زاویه تیلت<sup>۱</sup> و سیستم‌های اندازه‌گیری فاز تقسیم می‌شوند که در ادامه به بیان آنها پرداخته می‌شود:

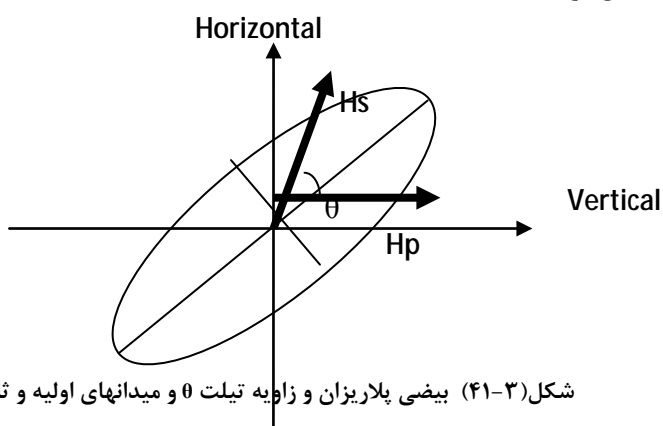
#### ۳-۶-۴-۱- روش‌های اندازه‌گیری زاویه تیلت

هرگاه در سیم پیچ گیرنده فقط میدان اولیه وجود داشته باشد و صفحه سیم پیچ به موازات امتداد میدان قرار گیرد، قرائت صفر است. زمانیکه سیم پیچ حول محور در امتداد میدان بچرخد بی نهایت حالت قرائت صفر داریم (شکل ۳-۴۰).



شکل (۳-۴۰) با چرخاندن سیم پیچ گیرنده حول جوازی با میدان بی نهایت حالت صفر ایجاد می‌شود

در بسیاری از سیستم‌های الکترومغناطیس میدان ثانویه ایجاد شده در یک صفحه قائم قرار می‌گیرد و چون میدانها متناوبند بردار میدان کل یک بیضی در صفحه قائم با زمان را معین می‌کند (شکل ۳-۴۱). در چنین وضعی فقط یک حالت صفر برای گیرنده وجود دارد که در این حالت صفحه سیم پیچ منطبق بر صفحه پلاریزاسیون است. برای رساناهای خوب امتداد محور اصلی بیضی دقیقاً در امتداد میدانهای اولیه و ثانویه است. انحراف زاویه ای این محور از افق زاویه تیلت میدان برآیند است.



شکل (۳-۴۱) بیضی پلاریزان و زاویه تیلت  $\theta$  و میدانهای اولیه و ثانویه

خطوط برداشت در این روش عمود بر امتداد ساختار زمین شناسی انتخاب می‌شود. در هر ایستگاه سیم پیچ گیرنده حول سه محور عمود بر هم چرخانده می‌شود تا قرائت صفر بدست آید. سپس زاویه تیلت را می‌توان با چرخاندن سیم پیچ حول یک محور افقی عمود بر این صفحه تا رسیدن به یک حداقل تعیین کرد. روشهای زاویه تیلت که در آنها از فرستنده ثابت استفاده می‌شود در مقایسه با روشهایی که در آنها هردو فرستنده و گیرنده متحرک اند، اطلاعات کمتری از رساناهای زیر سطحی بدست می‌دهند. دو روش عمده و کاربردی زاویه تیلت

عبارتند از  $VLF^2$  (فرکانس خیلی پایین) و  $AFMAG^3$  (میدان مغناطیسی با فرکانس شنوایی) که در هیچ یک نیازی به برپایی فرستنده خاص نیست و به ترتیب از فرستنده های رادیویی قوی سیستم های مخابراتی و ناوبری موجود در باند فرکانسی ۱۵-۲۵ کیلوهرتز و دیگری از میدانهای الکترو مغناطیس طبیعی با فرکانس ۱-۱۰۰۰۰ هرتز ایجاد شده توسط طوفانهای تندری (آذرخش) که در اطراف زمین بین سطح زمین و یونسفر منتشر می شوند و به زیر سطح زمین نفوذ می کنند استفاده می شود.

### ۳-۶-۴-۲- سیستمهای اندازه گیری فاز

روشهای زاویه تیلت اگرچه بعلت ساده، ارزان و سریع بودن در حد وسیعی کاربرد دارند ولی اطلاعات کمی ناچیزی بدست می دهند. سیستمهای پیچیده تر، از روابط فاز و دامنه بین میدانهای اولیه و ثانویه و برآیند بهره می گیرند. میدان الکترومغناطیس متناوب موج سینوسی با طول موج  $2\pi$  است که اگر پشت سر موج دیگری عقب بماند گفته می شود این امواج نسبت بهم خارج فازند. این اختلاف فاز را می توان با یک زاویه فاز  $\Phi$  که مربوط به جدایی زاویه ای دو موج است نشان داد. روابط فاز را می توان بصورت دیاگرام برداری خاصی که در آن طول بردار متناسب با دامنه میدان و زاویه اندازه گیری شونده از طرف بردار موج اولیه به طرف بردار موج ثانویه (بصورت پادساعتگرد) زاویه فازی که موج ثانویه از موج اولیه عقب افتاده را نشان می دهد.

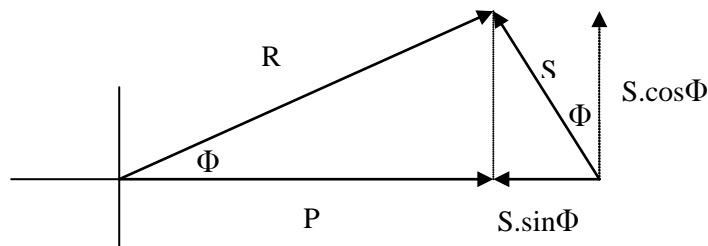
میدان اولیه در سطح زمین مستقیماً از فرستنده به گیرنده می رسد و جز تغییر اندکی در دامنه تغییر دیگری نمی کند. ولی وقتی در زمین نفوذ می کند دامنه آن با عمق کاهش می یابد و پس از ایجاد جریان ثانویه در رسانای زیر سطحی تاخیر فازی معادل  $\pi/2$  نسبت به میدان اولیه پیدا می کند که بر روی دیاگرام مشخص است. خواص الکتریکی رسانا منجر به ایجاد تاخیر فاز دیگری می شود:

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{2\pi f l}{r}$$

رابطه ۳-۳۳

که در آن  $I$  اندوکتانس رسانا و  $r$  مقاومت رسانا است. در مورد رسانای خوب،  $\Phi$  به  $\pi/2$  نزدیک است ولی برای رسانای ضعیف صفر خواهد بود.

با ترسیم میدان ثانویه با اختلاف فاز نسبت به میدان اولیه می توان میدان برآیند را ترسیم نمود. تصویر میدان ثانویه بر محور افقی  $S \sin \Phi$  را مولفه در فاز یا حقیقی و تصویر آن بر صفحه قائم  $S \cos \Phi$  را مولفه خارج فاز یا مجازی می نامند. هرچه نسبت مولفه حقیقی به مجازی زیادتر باشد رسانایی بهتر است (شکل ۳-۴۲).



شکل (۳-۴۲) بردار دیاگرام نشان دهنده روابط بین دامنه و فاز میدان های الکترومغناطیس اولیه و ثانویه





### ۳-۶-۵- مزایا و معایب

روش الکترومغناطیس معمولاً با دو سیم پیچ به نام سیم پیچ فرستنده و سیم پیچ گیرنده انجام می‌شود. یکی از مزایای عمده این روش عدم احتیاج به الکتروود می‌باشد که باعث سریع‌تر شدن عملیات برداشت می‌شود و نیز امکان برداشت هوابرد با استفاده از یک سیستم سیم پیچ که بر روی هواپیما یا هلیکوپتر نصب می‌شود، می‌باشد. محدودیت عمده روش الکترومغناطیس عمق نفوذ کم جریان القا شونده است که این عمق بیشتر از چند صد متر نیست. ضمناً چون این روش به ساختارهای مقاوم و غیر رسانا حساس نیست به ندرت در بررسی‌های مهندسی بکار می‌رود.

### ۳-۷-۱- روشهای ژئوفیزیکی مبتنی بر تحلیل امواج سطحی

نیاز روز افزون به احداث سازه‌های جدید از جمله شبکه‌های حمل و نقل ایمن و پیشرفته نظیر شبکه راه و راه آهن، فرودگاه‌ها و سایر تاسیسات و ابنیه فنی مرتبط با آن‌ها و اهمیت نقش این نوع پروژه‌های عمرانی در توسعه پایدار جامعه و در نتیجه نیاز روزافزون به شناسایی‌های زیرسطحی برای افزایش امنیت و پایداری این گونه سازه‌ها و تاسیسات، موجب توسعه روشهای جدیدتر شناسایی زیرسطحی در دو دهه اخیر شده است. هدف از توسعه این روشها از طرفی دستیابی سریعتر به نتایج و از طرف دیگر سهولت کاربرد در مناطق شهری، که ممکن است روشهای سنتی با محدودیت اجرا مواجه باشند بوده است.

از میان این روشها، روشهای مبتنی بر استفاده از امواج لرزه‌ای سطحی شامل: تحلیل طیفی امواج سطحی (SASW)، تحلیل چند کاناله امواج سطحی (MASW)، روش انکساری میکروترمر (ReMi) و تحلیل آرایه‌ای ارتعاشات محیطی (Ambiente noise array methods) به صورت ویژه‌ای مورد توجه بوده‌اند. این روشها که همگی در زیرمجموعه روشهای لرزه‌ای قابل دسته‌بندی هستند همگی بر ویژگیهای امواج سطحی بنا شده‌اند. مبنای کلی در این روشها برآورد پروفیل سرعت موج برشی با استفاده از خاصیت پاشندگی امواج سطحی در محیطهای لایه‌ای است. پارامتر سرعت موج برشی یکی از پارامترهای اساسی در برآورد پاسخ زمین در هنگام زلزله به منظور طراحی ایمن سازه‌ها در مقابل زلزله است. علاوه بر این با داشتن سرعت موج برشی در کنار سرعت امواج تراکمی، قابلیت برآورد دیگر پارامترهای الاستیسیته لایه-های خاک فراهم می‌گردد. این روشها نسبت به روشهای سنتی شکست مرزی و بازتابی دارای مزایایی از جمله موارد زیر هستند.

- در مقایسه با روش شکست مرزی مرسوم، قابلیت شناسایی تا اعماق بیشتر را فراهم می‌آورند
  - معکوس شدگی سرعت (وجود لایه‌های پرسرعت بر روی لایه‌های کم سرعت) مانعی در بکارگیری آنها ایجاد نمی‌کند.
  - عدم نیاز به چشمه‌های لرزه‌ای فعال در مورد بعضی از این روشها امکان بکارگیری آنها در شرایط شهری را آسان می‌سازد.
- در ادامه این بخش، روشهای فوق‌الذکر بطور خلاصه آورده شده است.

### ۳-۷-۱-۱- تحلیل طیفی امواج سطحی

تحلیل طیفی امواج سطحی به عنوان روشی برای تعیین پروفیل سرعت موج برشی و مدول برشی و نیز ضخامت لایه-



های خاک، سنگ و بستر جاده‌ها، اولین بار بوسیله Nazarian و Stokoe (۱۹۸۴) معرفی شد. در این روش از یک چشمه انرژی فعال با ضربات قائم برای ایجاد امواج ریلی با فرکانسهای مختلف استفاده می‌شود. انتشار این امواج بوسیله یک جفت گیرنده نصب شده با فاصله معین در سطح زمین ردیابی و ثبت می‌شوند. فاصله این گیرنده‌ها از کم (۱ متر) تا زیاد (۵۰۰ متر) تغییر می‌کند (Nazarian و Desai، ۱۹۹۳). لرزه‌نگارها از نوع گیرنده‌های تک مولفه قائم هستند و بنابراین پروفیل سرعت موج برشی بر مبنای محاسبه سرعت فاز امواج ریلی بدست آمده از رکوردها و معکوس سازی آن تعیین می‌شود.

Nazarian و Stokoe (۱۹۸۴) بر اساس مقایسه نتایج این روش و روش شناخته شده بین‌چاهی (Crosshole) در ۱۵ محل مختلف، اختلاف سرعت موج برشی و ضخامت لایه‌های بدست آمده از این دو روش را به ترتیب در حد ۱۰ درصد و چند اینچ بیان کرده‌اند.

### ۳-۷-۱-۱- مفاهیم پایه

همانگونه که در بالا گفته شد مبنای روش تحلیل طیفی امواج سطحی بر ویژگیهای امواج ریلی استوار است. امواج ریلی امواج سطحی هستند که در امتداد سطح آزاد زمین منتشر شده و دامنه جنبش ذرات در آنها با عمق بصورت تصاعدی کاهش می‌یابد و همچنین عمق نفوذ آنها در زمین به طول موج آنها بستگی دارد و مولفه‌های با طول موج بزرگتر عمق نفوذ بیشتری دارند.

در محیطهای همگن غیر پاشنده (non-dispersive) سرعت فاز امواج ریلی ثابت بوده و از رابطه زیر قابل تعیین است:

$$V_R^6 - 8\beta^2 V_R^4 + (24 - 16\beta^2/\alpha^2)\beta^4 V_R^2 + 16(\beta^2/\alpha^2 - 1)\beta^2 = 0 \quad \text{رابطه ۳-۲۴}$$

که  $V_R$  سرعت امواج ریلی در محیط یکنواخت،  $\beta$  سرعت امواج برشی در محیط یکنواخت و  $\alpha$  سرعت امواج تراکمی در محیط یکنواخت هستند.

در محیطهای غیرهمگن سرعت موج برشی و تراکمی لایه‌ها با عمق تغییر می‌یابد و بنابراین مولفه‌های فرکانسی مختلف امواج ریلی سعتهای فاز متفاوتی خواهند داشت (Bullen، ۱۹۶۳). به این ترتیب سرعت فاز فرکانسهای مختلف موج ریلی تابعی از سرعتهای متغیر موج حجمی در اعماق مختلف متناسب با طول موجهای قابل نفوذ به آن عمق خواهد بود. در محیطهای لایه‌ای معادله سرعت فاز موج ریلی به شکل زیر است:

$$V_R(f_j, C_{Rj}, \beta, \alpha, \rho, h) = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad \text{رابطه ۳-۲۵}$$

که  $f_j$  فرکانس به هرتز؛  $V_{Rj}$  سرعت فاز موج ریلی در فرکانس  $f_j$ ؛  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)T$  بردار سرعت موج برشی،  $\beta_i$  سرعت موج برشی در لایه  $i$ ام؛  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)T$  بردار سرعت موج تراکمی،  $\alpha_i$  سرعت موج تراکمی در لایه  $i$ ام؛  $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)T$  بردار چگالی،  $\rho_i$  چگالی در لایه  $i$ ام؛  $h = (h_1, h_2, \dots, h_{n-1})T$  بردار ضخامت،  $h_i$  ضخامت لایه  $i$ ام و  $n$  تعداد لایه‌های مدل زمین در نظر گرفته شده هستند.

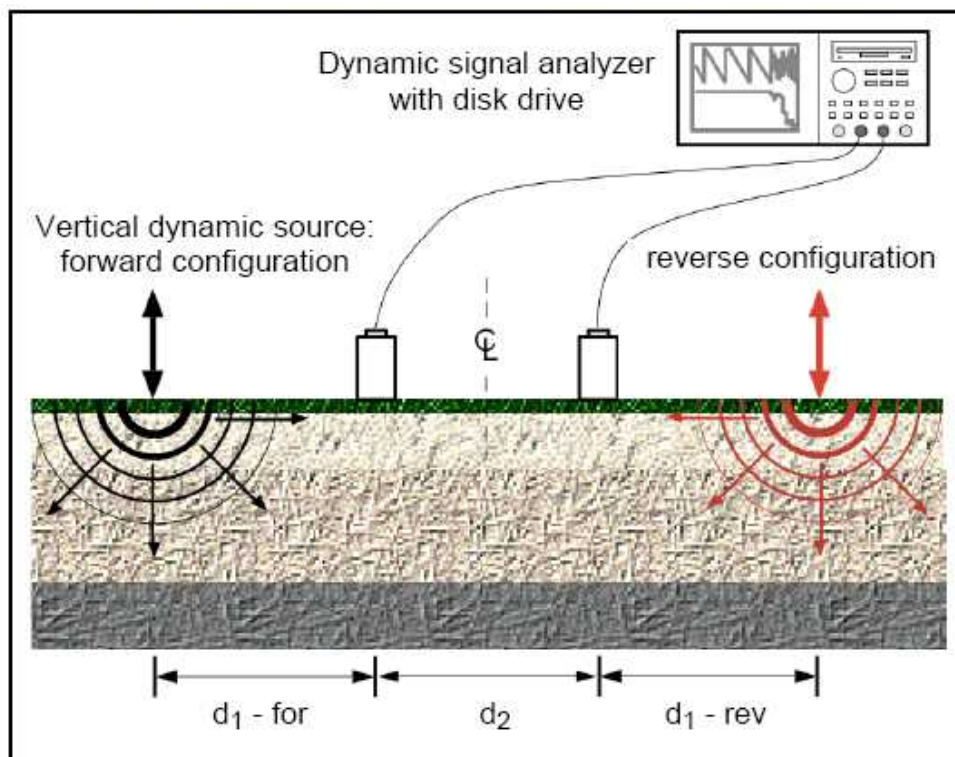
روش تحلیل طیفی امواج سطحی بر مبنای ارتباط بین سرعت فاز امواج ریلی و محدوده عمق نظیر طول موجهای مختلف این امواج است. به عبارت دیگر سرعت فاز برای مولفه‌های فرکانسی مختلف تشکیل دهنده موج ریلی ثبت شده، محاسبه می‌گردد و منحنی پاشندگی (سرعت فاز بر حسب فرکانس) بدست آمده به این طریق در یک فرآیند معکوس-سازی برای تعیین پروفیل سرعت موج برشی و به تبع آن مدول برشی و ضخامت لایه‌های خاک بکار می‌رود (Miller و همکاران، ۲۰۰۰؛ Nazarian و همکاران، ۱۹۸۳؛ Stokoe و همکاران، ۱۹۹۴؛ Park و همکاران، ۲۰۰۱؛ Xia و همکاران، ۱۹۹۹).



بنابراین بطور خلاصه روش SASW از سه مرحله برداشت صحرائی، استخراج منحنی‌های پراکندگی و سرانجام معکوس‌سازی منحنی‌های پاشندگی تشکیل شده است.

### ۳-۱-۷-۲- برداشتهای صحرائی

شمای کلی برداشتهای صحرائی در این روش در شکل ۳-۴۳ نشان داده شده است. برای شروع آزمایش دو گیرنده لرزه‌ای بطور مساوی در دو طرف یک خط مرکزی فرضی مستقر می‌گردند. یک ضربه قائم (پتک یا چشمه انرژی قائم دیگر) جهت ایجاد امواج ریلی حاوی فرکانسهای مختلف در نقطه‌ای در یک سوی این آرایه اعمال می‌گردد. فاصله بهینه بین چشمه انرژی و گیرنده نزدیک تقریباً برابر با فاصله بین دو گیرنده بیان شده است (Nazarian و Stokoe, ۱۹۸۴ به نقل از Heisey و همکاران ۱۹۸۲). برای به حداقل رساندن اثر هرگونه اختلال فازی داخلی در سیستم گیرنده‌ها و دستگاه ثبات، چشمه انرژی در طرف دیگر آرایش تکرار می‌گردد و رکوردهای بدست آمده در دو مسیر رفت و برگشتی میانگین‌گیری می‌شود.

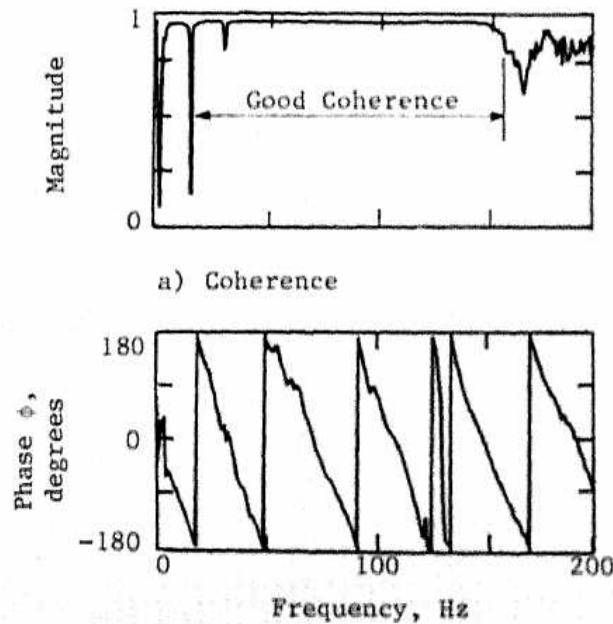


شکل ۳-۴۳: نمای شماتیک برداشت صحرائی در روش SASW (برگرفته از [www.geovision.com](http://www.geovision.com))

### ۳-۱-۷-۳- استخراج منحنی‌های پاشندگی

جهت استخراج منحنی پاشندگی امواج ریلی ابتدا نگاهشتهای بدست آمده در حوزه زمان با تبدیل فوریه به حوزه فرکانس برده شده و با محاسبه طیف توان متقاطع (crosspower spectrum) بین نگاهشتهای دو ایستگاه، تابع همگونی (Coherence function) و اطلاعات فاز آنها بدست می‌آید. تابع همگونی ابزاری کمی برای بررسی کیفیت سیگنالهای گرفته شده بوسیله گیرنده‌ها می‌باشد و مقداری بین صفر و یک دارد. مقدار ۱ به معنای تطابق کامل بین سیگنال‌ها است. اطلاعات فاز طیف توان متقاطع نشان‌دهنده اختلاف فاز بین دو گیرنده در هر فرکانس است. با دانستن فاصله بین

گیرنده‌ها و جابجایی فاز برای هر فرکانس سرعت و طول موج امواج ریلی برای آنها محاسبه می‌گردد. شکل ۳-۴۴ نمونه‌ای از تابع همگونی و منحنی تغییرات فاز بدست آمده برای یک آرایه با فاصله ۸ فوتی بین دو گیرنده را به نقل از (Nazarian و Stokoe, ۱۹۸۴) نشان می‌دهد. تابع همگونی فرکانسهای قابل استفاده در آزمایش را مشخص می‌سازد که در نمونه نشان داده شده بین ۱۵ تا ۱۶۰ هرتز است.



شکل (۳-۴۴) نمونه‌ای از تابع همگونی (بالا) و اطلاعات فاز بدست آمده (پایین) از روش SASW با فاصله بین گیرنده‌ای برابر ۸ فوت (Stokoe و Nazarian, ۱۹۸۴).

برای هر فرکانس خاص اختلاف فاز نظیر  $(\Theta_{(f)})$  بین جفت گیرنده محاسبه می‌شود و زمان سیر  $(\Delta t)$  موج بین آنها از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta t_{(f)} = \Theta_{(f)} / 2\pi f$$

رابطه ۳-۲۶

اگر فاصله بین گیرنده‌ها را که شناخته شده است با  $\Delta d$  نشان دهیم سرعت فاز نظیر هر فرکانس  $(f)$  برای موج ریلی از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$VR_{(f)} = \Delta d / \Delta t_{(f)}$$

رابطه ۳-۲۷

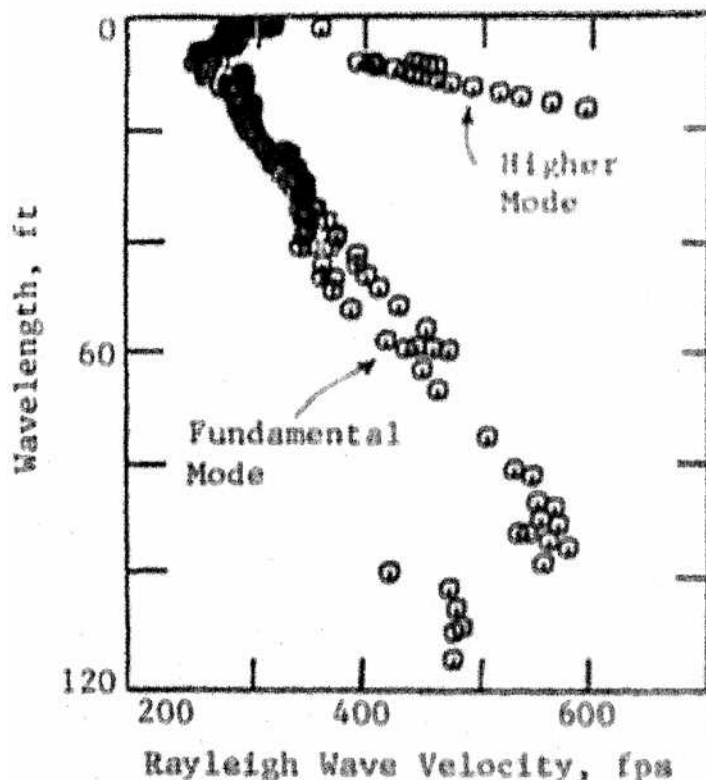
و طول موج نظیر آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\lambda R_{(f)} = VR_{(f)} / f$$

رابطه ۳-۲۸

با داشتن  $VR_{(f)}$  و  $\lambda R_{(f)}$  برای هر زوج گیرنده بکار رفته در برداشت صحرائی منحنی‌های پاشندگی  $(VR_{(f)})$  در مقابل  $(\lambda R_{(f)})$  برای نقطه میانی گیرنده‌ها بدست می‌آید. نمونه‌ای از منحنی پاشندگی در شکل ۳-۴۵ نشان داده شده است.





شکل (۳-۴۵) نمونه‌ای از منحنی پاشندگی بدست آمده از روش SASW برای یک سایت در آمریکا (Nazarian و Stokoe, ۱۹۸۴).

### ۳-۷-۱-۴- معکوس‌سازی منحنی پاشندگی

معکوس‌سازی منحنی پاشندگی امواج سطحی فرایند تعیین سرعت واقعی انتشار امواج (بویژه امواج برشی) در یک محیط، از روی این منحنی است. با توجه به مستقل بودن معکوس‌سازی منحنی‌های پاشندگی از نوع روش‌های برشمرده در بالا مبحث معکوس‌سازی در پایان بخش ۱-۷ آورده شده است.

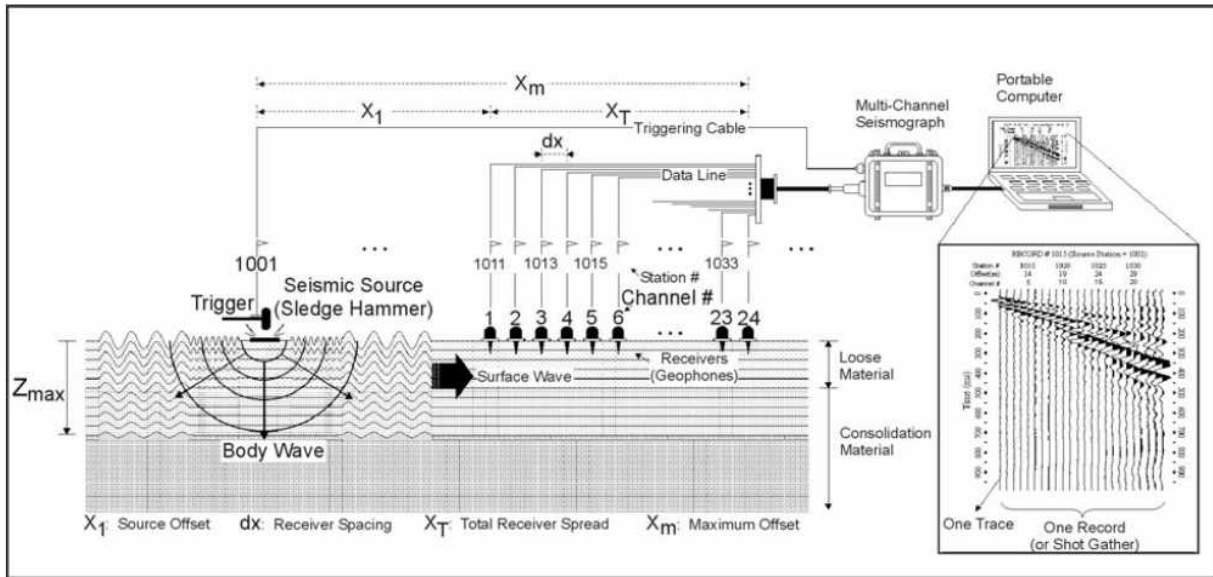
### ۳-۷-۲- روش تحلیل چند کاناله امواج سطحی

روش تحلیل چند کاناله امواج سطحی روشی غیر مخرب برای ارزیابی ضخامت بستر راه و نیز تعیین ضرایب الاستیک خطی زمین و مصالح زیر بستر است. این روش به تحلیل ویژگی‌های پاشندگی نوع معینی از امواج لرزه‌ای سطحی (مد پایه امواج ریلی) که بصورت افقی در طول سطح اندازه‌گیری از نقطه چشمه انرژی تا گیرنده‌ها سیر می‌کنند می‌پردازد. این روش روشی مناسب در تعیین سرعت موج برشی یا اطلاعات سختی لایه‌ها در قالب یک بعدی (عمق) یا دوبعدی (عمق و سطح) با هزینه کم و زمان کوتاه است. مزیت اصلی روش MSAW در نظر گرفتن کامل طبیعت پیچیده امواج لرزه‌ای که همیشه حاوی نوفه‌های مضر، مانند مدهای بالاتر امواج سطحی، امواج حجمی، امواج ناشی از ترافیک و امواج دیگر هستند، می‌باشد. این نوفه‌ها در صورتیکه در نظر گرفته نشوند، ممکن است باعث گردد که بخش مهمی از داده‌ها مورد تردید قرار گیرند. چارچوب اصلی روش MASW بر ثبت چندکاناله امواج لرزه‌ای و روش تحلیلی است که برای مدت طولانی در اکتشافات لرزه‌ای بکار می‌رود، بنا شده است. این تکنیک می‌تواند سیگنال‌های مفید را از انواع دیگر نوفه با استفاده از تکنیک‌های شناخت الگو (pattern-recognition) تمیز دهد.



۳-۷-۲-۱- برداشت داده‌ها

روش برداشت داده‌ها شامل استقرار تعداد زیادی گیرنده (معمولاً ۲۴ یا بیشتر) در طول یک خط با فواصل مساوی، متصل به یک دستگاه ثابت چندکاناله است (شکل ۳-۴۶). هر گیرنده به یک کانال وصل است و به این ترتیب یک رکورد چندکاناله شامل تعدادی سری زمانی دریافت شده از گیرنده‌ها و مرتب شده به ترتیب نزدیکی به نقطه چشمه لرزه‌ای است.



شکل (۳-۴۶) نمای شماتیک نشان‌دهنده روش برداشت داده‌ها در تکنیک MASW به نقل از سازمان زمین‌شناسی کانزاس

برخلاف روشهای لرزه‌ای دیگر (مانند روش بارتابی یا شکست مرزی) پارامترهای برداشت داده‌ها در روش MASW انعطاف‌پذیری گسترده‌ای دارند. دلیل این امر به قابلیت روش تحلیل داده‌ها در این تکنیک برمی‌گردد که قادر است بطور خودکار اثرات عوامل تاثیرگذار مانند حوزه نزدیک و دور و اختلاط فرکانسی (aliasing) مکانی را در نظر بگیرد. با وجود این دو دسته پارامتر در این روش مهم در نظر گرفته می‌شود: یکی فاصله چشمه ( $X_1$ ) از اولین گیرنده و دیگری فاصله بین گیرنده‌ها ( $dx$ ) که در شکل ۳-۴۶ نشان داده شده‌اند. فاصله چشمه تابعی از حداکثر عمق مورد نیاز اکتشاف ( $Z_{max}$ ) در نظر گرفته می‌شود و قاعده  $X_1 \approx Z_{max}$  بکار می‌رود. فاصله بین گیرنده‌ها بطور اندک تابع سختی متوسط لایه‌های نزدیک به سطح زمین است و معمولاً ۱ متر در نظر گرفته می‌شود. جدول ۳-۳ مقادیر بهینه پارامترهای اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۳) مقادیر بهینه پارامترهای اندازه‌گیری در روش MASW (قواعد کلی به نقل از راهنمای FHWA)

نوع مصالح* (Vs, M/s)	x1 (m)	dx (m)	xM (m)	ژئوفون مناسب (هرتز)	وزن مناسب پتک (کیلوگرم)	طول زمان برداشت (ms)	نمونه برداری (ms)
خیلی نرم (Vs < 100)	۱-۵	۰/۵-۰/۲۵	≤ ۲۰	۴/۵	≥ ۵	۱۰۰۰	۱
نرم (۱۰۰ - ۳۰۰)	۵-۱۰	۱-۰/۵	≤ ۳۰	۴/۵	≥ ۵	۱۰۰۰	۱

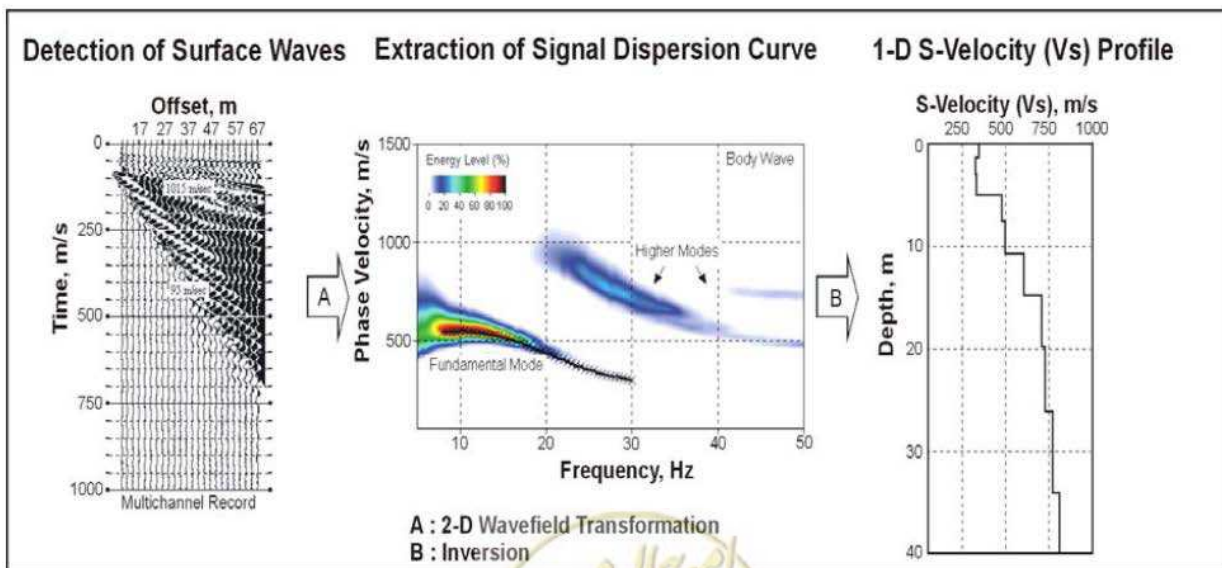
۰/۵	۵۰۰	$\geq 5$	۱۰-۴/۵	$\leq 50$	۲-۱	۱۰-۲۰	سخت (۲۰۰ - ۵۰۰)
۰/۵	۵۰۰	$\geq 5$	۴۰-۴/۵	$\leq 100$	۵-۲	۲۰-۴۰	خیلی سخت (> ۵۰۰)

\* متوسط ویژگی‌های مواد در عمقی معادل ۳۰ متر از سطح زمین

### ۳-۷-۲-۲- پردازش داده‌ها

پردازش داده‌ها در روش MASW مشابه با روش SASW از سه مرحله به صورت زیر تشکیل شده است (شکل ۳-۴۸):

- آشکار سازی اولیه امواج سطحی،
  - ایجاد پانل تصویری پاشندگی و استخراج منحنی پراکندگی از روی آن
  - معکوس سازی منحنی پاشندگی و محاسبه پروفیل تغییرات سرعت موج برشی با عمق.
- تمامی این مراحل قابلیت انجام بصورت خودکار را دارند. آشکار سازی امواج سطحی با بررسی رکوردهای لرزه‌ای ثبت شده در محتملترین فرکانسها و سرعتهای فاز انجام می‌شود. ایجاد پانل تصویری از طریق تبدیل دو بعدی میدان موج در دو فضای زمان و مکان که چندین روش تشخیص الگو را بر داده‌ها اعمال می‌کند، حاصل می‌شود. این تبدیل تمام نوفه-های مزاحم از فعالیتهای انسانی را حذف می‌کند. در واقع پانل تصویری حاصله، ارتباط بین سرعت فاز و فرکانس برای امواجی که بصورت افقی مسقیماً از چشمه تا خط برداشت سیر می‌کنند را نشان می‌دهد. این امواج شامل مد اصلی و مدهای بالاتر امواج ریلی و نیز امواج حجمی مستقیم (امواج تراکمی) هستند (شکل ۳-۴۷). منحنی‌های پاشندگی مورد نیاز، مانند منحنی مربوط به مد اصلی امواج ریلی، از روی الگوهای تجمع انرژی مشاهده شده در این پانل تصویری استخراج می‌گردد. این منحنی استخراج شده در مرحله نهایی در فرایند معکوس سازی برای بدست آوردن پروفیل سرعت موج برشی بکار می‌رود.



شکل (۳-۴۷) مراحل سه‌گانه پردازش داده‌ها در روش MASW به نقل از FHWA. داده‌های واقعی از مطالعات یک محل در نزدیکی یوما در ایالت آریزونا گرفته شده است.

### ۳-۷-۲-۳- تفسیر داده‌ها

استفاده از روش MASW به صورت ایجاد نقشه‌های دوبعدی سرعت موج برشی با تکرار برداشتهای چندکاناله می‌باشد (شکل ۳-۴۸). آرایش چشمه-گیرنده‌ها، شامل فاصله چشمه تا گیرنده‌ها ( $x1$ )، فاصله بین گیرنده‌ها ( $dx$ ) و تعداد کل گیرنده مورد استفاده در تمامی اندازه‌گیریها یکسان انتخاب می‌شود. همچنین فاصله بین دو آرایه متوالی ( $dC$ ) نیز بطور مساوی در طول اندازه‌گیری انتخاب می‌شود (شکل ۳-۴۹) که مقدار آن بستگی به تغییرات افقی مورد انتظار سرعت موج برشی در طول مسیر پیمایش دارد. در مواردیکه تغییرات زیادی مورد انتظار نباشد و تغییرات جانبی سرعت در کل طول یک برداشت ( $xT$ ) قابل صرفنظر کردن باشد میزان جابجایی بین دو برداشت متوالی به اندازه نصف طول یک برداشت ( $dC \approx 0.5 xT$ ) کافی است. بنابراین انتخاب طول بهینه یک برداشت باید قبل از تعیین میزان جابجایی بین دو برداشت متوالی صورت پذیرد. از نظر تئوری مقدار کوتاهتر  $xT$  دقت بالاتری در تفکیک تغییرات افقی سرعت فراهم می‌آورد اما از طرف دیگر مانع بررسی دقیق منحنی پاشندگی می‌گردد. بنابراین در انتخاب طول برداشت باید بصورت سبک و سنگین کردن مسئله عمل کرد. در بسیاری سایت‌های خاکی طول برداشت  $10^\circ$  تا  $30^\circ$  متر بهینه محسوب می‌شود که منجر به میزان جابجایی بین دو برداشت در حد  $5$  تا  $15$  متر می‌گردد. با انجام برداشتهای مکرر (معمولاً بیش از  $5$  برداشت) پروفیل یک بعدی سرعت (در جهت قائم) از پردازش هر برداشت بطور جداگانه و برای نقطه میانی آن برداشت بدست می‌آید. با داشتن این پروفیل‌ها و میانبایی بین آنها نقشه دو بعدی سرعت موج برشی در جهت جانبی و قائم حاصل خواهد شد.

### ۳-۷-۳- روش شکست مرزی میکروترمر (ReMi)

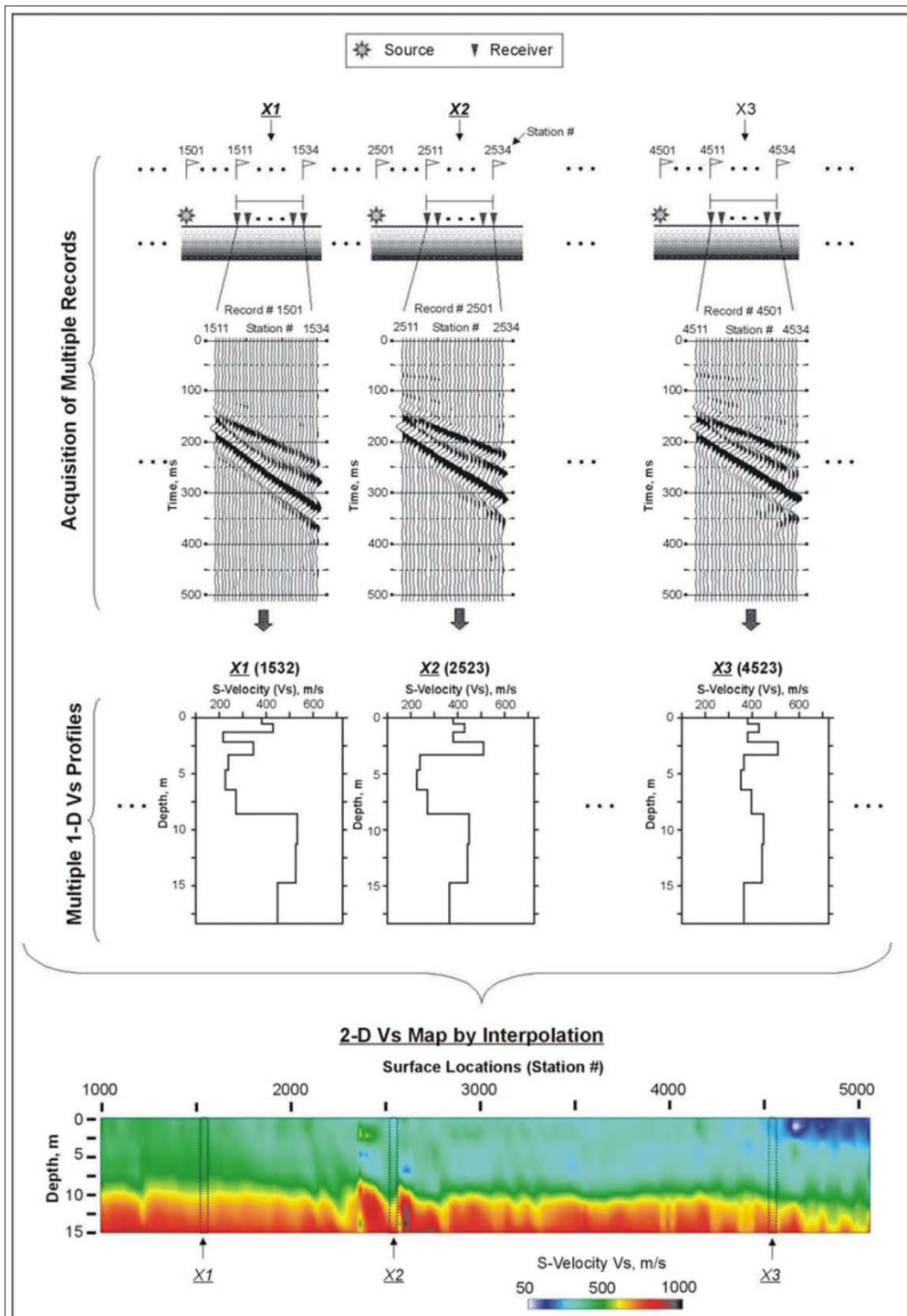
تکنیک ReMi، روش لرزه‌ای جدیدی برای تعیین پروفیل سرعت موج برشی است که بوسیله Louie در سال  $2001$  ارائه گردید. تجهیزات مورد استفاده در این روش همانند روش متداول شکست مرزی است با این تفاوت که چشمه لرزه-ای در این روش نوفه‌های لرزه‌ای محیطی (میکروترمر) هستند که بطور دائمی بوسیله عوامل شهری و طبیعی تولید می‌شوند. استفاده از این چشمه‌های لرزه‌ای و تجهیزات معمولی شکست مرزی این روش را به عنوان روشی ارزان‌تر و سریعتر از دیگر روشها مانند روشهای درون‌چاهی؛ SASW و MASW مطرح کرده است. بسته به ویژگیهای مواد زیرسطحی این روش قادر به تعیین سرعت موج برشی تا اعماق حداقل  $40$  متر و حداکثر  $100$  متر است.

### ۳-۷-۳-۱- مفاهیم پایه

این روش بر دو ایده اساسی بنا شده است. نخست اینکه تجهیزات متداول روش شکست مرزی امواج تراکمی قادر به ثبت امواج سطحی تا فرکانسهای پایین در حد  $2$  هرتز هستند. ایده دوم این است که یک تبدیل دو بعدی کندی (عکس سرعت) - فرکانس ( $p-f$ ) بر روی داده‌های میکروترمر می‌تواند رسید امواج ریلی را از رسید دیگر امواج لرزه‌ای جدا سازد و امکان شناخت سرعت فاز واقعی در مقابل سرعتهای ظاهری را فراهم سازد. روش ReMi شامل سه مرحله پردازش است: تحلیل طیفی سرعت، برگزیدن منحنی پاشندگی سرعت فاز و در آخر مدلسازی سرعت موج برشی که در ادامه بطور مختصر تشریح می‌شوند.

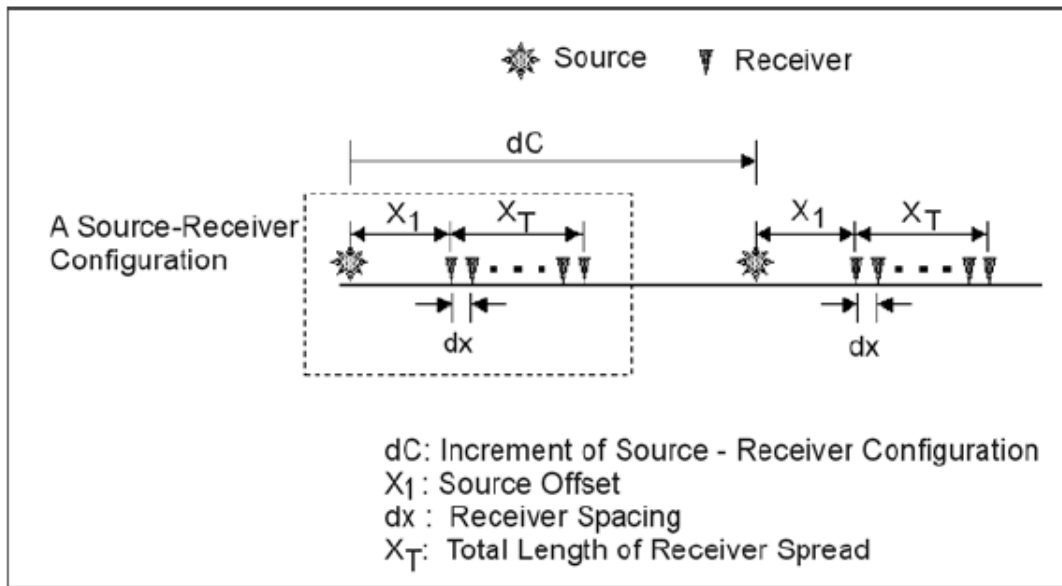






شکل (۳-۴۸) شمای کلی نحوه ایجاد نقشه دوبعدی سرعت موج برشی از تحلیل چندکاناله امواج سطحی (بر گرفته از راهنمای FHWA به نقل از سازمان زمین‌شناسی کانزاس).





شکل (۳-۴۹) تعریف آرایش چشمه - گیرنده و جابجایی بین دو برداشت متوالی در روش MASW (راهنمای FHWA).

### ۳-۷-۳-۱-۱-۳-۱- تحلیل طیفی (p-f) سرعت (velocity Spectral Analysis)

اساس تحلیل طیفی سرعت تبدیلی بنام P-tau یا slantstack ارائه شده بوسیله Claerbout و Thorson (۱۹۸۵) است. این تبدیل بخشی از یک رکورد حاصله از چند گیرنده همراه با دامنه‌های لرزه‌نگاشت‌های حاصله بر حسب فاصله و زمان (x-t) را گرفته و آن را به دامنه برحسب پارامتر پرتو (ray parameter, p) که عکس سرعت ظاهری است و زمان تقاطع (tau) تبدیل می‌کند. این تبدیل در اهداف مشابه با تبدیل فوریه دو بعدی یا تحلیل فرکانس- عدد موج توصیف شده توسط Horike (۱۹۸۵) است. این تبدیل یک انتگرال گیری ساده از یک رکورد لرزه‌ای  $A(x,t)$  در مسافت  $x$  و زمان  $t$  است.

$$A(p, \tau) = \int_x A(x, t = \tau + px) dx \quad \text{رابطه ۳-۲۹}$$

در این رابطه شیب خط  $p = dt/dx$  عکس سرعت ظاهری  $Va$  در جهت  $x$  است. در عمل  $x$  به تعداد  $nx$  بازه به مقدار محدود  $dx$  (معمولاً ۸ تا ۲۰ متر) تقسیم می‌گردد و بنابراین  $x = jdx$  با عملگر  $j$  خواهد بود. به همین ترتیب زمان نیز به  $t = idt$  (با  $dt$  برابر ۰.۰۰۱ تا ۰.۰۱) تقسیم می‌گردد و به این ترتیب فرمی گسسته به تبدیل p-tau برای مقادیر منفی و مثبت  $p = p_0 + ldp$  و  $\tau = kdt$  که slantstack نامیده می‌شود خواهد داد.

$$A(p = p_0 + ldp, \tau = kdt) = \sum_{j=0, nx-1} A(x = jdx, t = i dt = \tau + px) \quad \text{رابطه ۳-۳۰}$$

شروع محاسبه از مقادیر

مقادیر حداقل سرعت را که بدست خواهد آمد، تعیین می‌کند و معمولاً ۲۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود، اگرچه برای سایتهای بسیار ضعیف مقادیر ۱۰۰ متر بر ثانیه نیز جستجو می‌گردد.  $np$  معمولاً یک یا دو برابر  $nx$  در نظر گرفته می‌شود. در اینجا  $dp$  ممکن است محدوده‌ای از ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۵ ثانیه بر متر داشته و به نحوی اختیار گردند که بازه  $-p_{max}$  تا  $p_{max}$  با گامهای کندی  $2np$  را پوشش دهد. این روش انتشار انرژی در هر دو مسیر در طول خط برداشت شکست مرزی را تحلیل می‌کند. مقادیر دامنه در زمانهای  $t = \tau + px$  که بین زمانهای نمونه برداری قرار می-

گیرند بوسیله میانبایی خطی تخمین زده می‌شوند.

مسافتهای مورد استفاده در روش شکست مرزی میکروترمر بطور ساده فاصله ژئوفونها از یک سری خط برداشت هستند. به این ترتیب زمانهای تقاطع بعد از اعمال تبدیل زمانهای رسید به یک انتهای آرایه می‌باشند. رکوردهای حاصل از تبدیل P-tau بسته به تعداد جابجایی‌های بکار رفته در رکوردهای اولیه x-t بکار رفته شامل یک یا بیشتر تریسهای کندی هستند. هرکدام از این تریسها دربردارنده جمع خطی یک رکورد در تمام زمانهای تقاطع، در یک مقدار کندی یا سرعت هستند. گام بعدی محاسبات محاسبه تبدیل فوریه  $F_A(p, f)$  برای هر تریس  $A(p, \tau)$  (در معادله ۱-۲۹) در جهت tau یا زمان تقاطع است.

$$F_A(p, f) = \int_{\tau} A(p, \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad \text{رابطه ۳-۳۱}$$

که برای آن تبدیل فوریه گسسته با  $f = m df$  بصورت زیر خواهد بود.

$$F_A(p, f = m df) = \sum_{k=0, m-1} A(p, \tau = k dt) e^{-i2\pi m df k dt} \quad \text{رابطه ۳-۳۲}$$

اگر چه در عمل، تبدیل فوریه سریع از نظر ریاضی معادل، اما موثرتر است. باید توجه داشت که این یک تبدیل یک بعدی است که محور کندی یا  $p$  را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. نیل به قدرت تفکیک فرکانسی مناسب نیاز به زمان اندازه-گیری طولانی‌تر از روشهای متداول لرزه‌ای دارد. برای مثال با  $dt$  برابر با  $0.001$  ثانیه طول رکورد  $nt$  برابر  $4000$  نمونه، یا  $4$  ثانیه برای رسیدن به تفکیک فرکانسی  $df$  برابر با  $0.25$  هرتر لازم است. طیف توان  $S_A(p, f)$  مزدوج تبدیل فوریه است.

$$S_A(p, f) = F_A^*(p, f) F_A(p, f) \quad \text{رابطه ۳-۳۳}$$

که علامت \* نشان‌دهنده مزدوج مختلط است. این روش دو تبدیل p-tau از یک رکورد، در جهت‌های پیشرو (forward) و برعکس، در طول خط برداشت جمع می‌کند. برای جمع انرژی از مسیره‌های پیشرو و معکوس در یک محور کندی، که نشان‌دهنده مقادیر مطلق  $p/|p|$  هستند، از رابطه زیر استفاده می‌شود

$$S_A(|p|, f) = [S_A(p, f)]_{p \geq 0} + [S_A(-p, f)]_{p < 0} \quad \text{رابطه ۳-۳۴}$$

این جمع تبدیل یک رکورد در فضای مسافت - زمان (x-t) به فضای p-f را کامل می‌کند. پارامتر پرتو  $p$  برای این رکوردها مولفه افقی کندی در طول آرایه است. در تحلیل بیش از یک رکورد از روش شکست مرزی میکروترمر تصاویر p-f منفرد برای هر رکورد  $(S_{An}(|p|, f))$  بصورت نقطه به نقطه به تصویر توان مجموع اضافه می‌شود.

$$S_{total}(|p|, f) = \sum_n S_{An}(|p|, f) \quad \text{رابطه ۳-۳۵}$$

بنابراین تحلیل کندی-فرکانس رکوردی از توان طیفی کل رکوردهای ثبت شده در یک سایت فراهم می‌آورد که در یک سیستم مختصاتی کندی بر حسب فرکانس ترسیم می‌شوند. با مشاهده روندهایی دارای توان قابل ملاحظه در این ترسیمه‌ها قله‌های کندی-فرکانس استخراج شده و بر روی یک نمودار شاخص پیروید-سرعت برای تحلیل پاشندگی پیاده می‌شوند.

شیب مشخص امواج پاشنده، مزیت اصلی تحلیل p-f است. رسیده‌های دیگر موجود در رکوردهای میکروترمر مانند امواج حجمی و امواج عبوری از داخل هوا، چنین شیبی ایجاد نمی‌کنند. حتی اگر پر انرژی‌ترین فاز ورودی در یک رکورد لرزه‌ای امواج، غیر امواج ریلی باشند، باز هم تحلیل p-f آنها را خارج از محدوده منحنی پاشندگی امواج ریلی نشان خواهد داد و مشکلی در تفسیر ایجاد نخواهد شد. با ثبت کانالهای زیاد بوسیله گیرنده‌های مولفه قائم و کاربرد تبدیل p-f این روش می‌تواند بصورت موفقیت آمیزی منحنی پاشندگی موج ریلی را تحلیل کند چیزی که روش SASW قادر به آن نیست.



### ۳-۷-۳-۲- مشخص‌سازی پاشندگی فاز - سرعت (Rayleigh Phase-Velocity Dispersion Picking)

این تحلیل شامل اضافه کردن محاسبه نسبت توان طیفی به تکنیک McMechan و Yedlin (۱۹۸۱)، برای نرمال کردن رکوردهای نوفه است. متوسط توان روی کل مقادیر کندی ممکن است مقدار متفاوتی از یک فرکانس به فرکانس دیگر داشته باشد. این روش شامل گرفتن نسبت طیفی  $R(|p|,f)$  توان در هر ترکیب کندی-فرکانس در مقابل توان متوسط در عرض تمام مقادیر کندی برای آن فرکانس، در تصاویر p-f منفرد  $S_A(|p|,f)$  یا در تصویر مجموع  $S_{total}(|p|,f)$  است.

$$R(|p|,f) = S(|p|,f) np / [ \sum_{j=0, np-1} S(|p|=l dp, f) ] \quad \text{رابطه ۳-۳۶}$$

که در آن  $np$  نصف تعداد اولیه گامهای کندی  $2np$  است. در اغلب موارد مقادیر ماکزیمم در تصویر نسبت طیفی حاصله، بوضوح در طول منحنی پاشندگی قرار می‌گیرند.

توانایی تشخیص و تفسیر منحنی‌های پاشندگی بطور مستقیم از تصاویر p-f نسبت طیفی از قابلیت‌های کنترل همگونی داده‌ها معرفی شده در روش SASW و معیار توان معرفی شده در روش MASW به موازات هم بهره می‌برد. قرائت سرعت‌های فاز در فرکانسهایی که قله یا شیبی در نسبت طیفی اتفاق می‌افتد بطور واضح منحنی پاشندگی را مشخص می‌سازد. برای فرکانسهایی که قله شاخصی در نسبت طیفی نشان نمی‌دهند (معمولاً زیر ۴ هرتز و بالای ۱۴ هرتز که موج سطحی پاشنده قابل تشخیصی ظاهر نمی‌شود) قرائتی انجام نمی‌شود. تصویر p-f غالباً بطور مستقیم سرعت متوسط تا عمق ۳۰ متری را از روی ، سرعت فاز یک قله مشخص که برای سایت‌های نرم در ۴ هرتز و برای سایت‌های سخت‌تر در ۸ هرتز ظاهر می‌گردد، نشان می‌دهد.

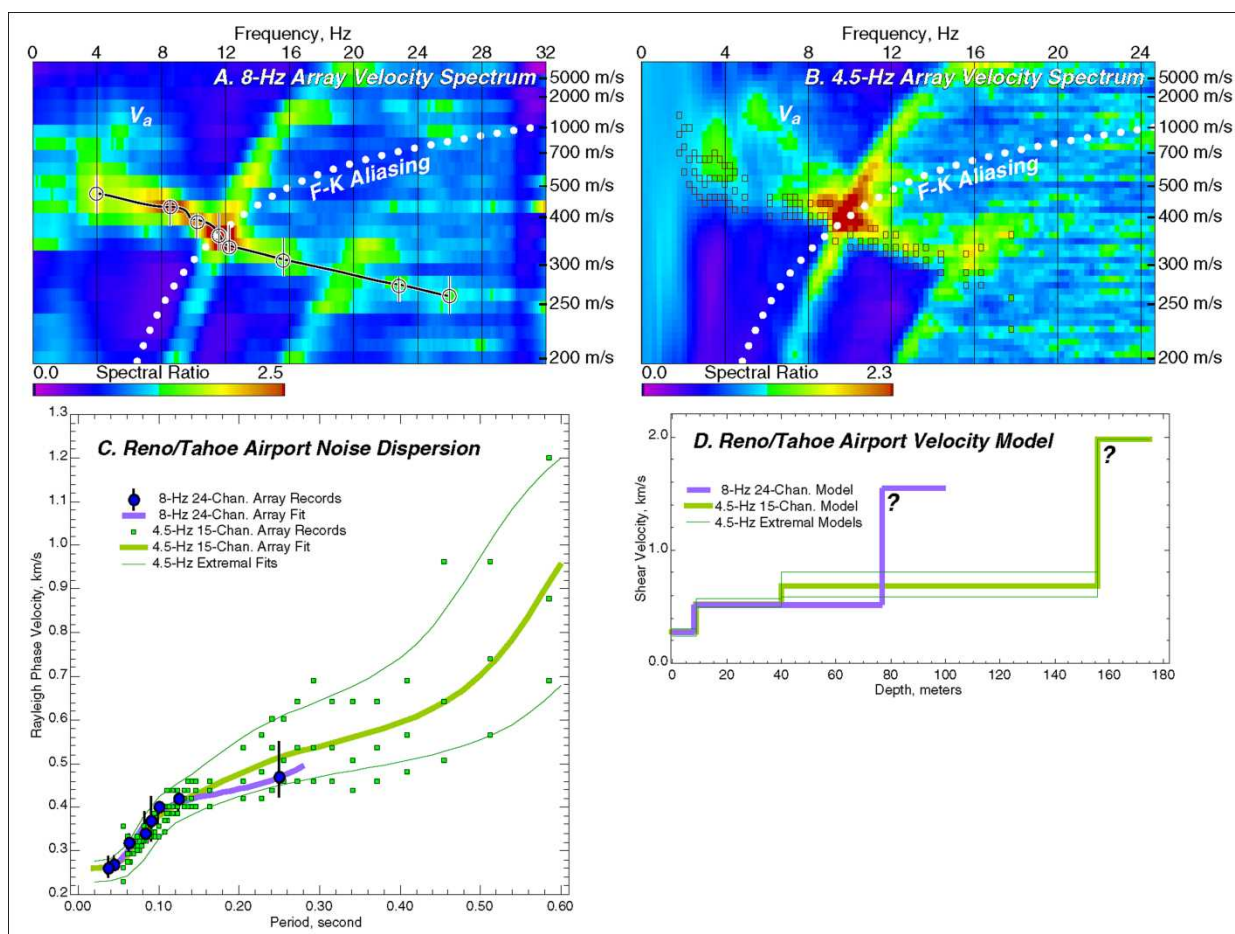
قرائتها در طول پایین‌ترین پوش سرعت که بخش پراثری ظاهر شده در تصویر p-f را احاطه می‌کند انجام می‌شود. این امکان وجود دارد که این پوش به نحوی تعیین گردد که محدوده اعتمادپذیری سرعت‌های فاز در آن در نظر گرفته شود. قرائت منحنی پاشندگی موج سطحی در طول پوش پایین‌ترین سرعت‌های فاز، دارای نسبت طیفی بالا اثر مطلوب بیشتری دارد. از آنجا که امواج ریلی مد بالاتر دارای سرعت‌های فاز بالاتر از مد اصلی هستند، روش شکست مرزی میکروترمز ترجیحاً سرعت‌های مرتبط با مد اصلی را بدست می‌دهد. مدهای بالاتر در صورتیکه به اندازه مد اصلی انرژی داشته باشند، ممکن است بصورت روندهای مجزا در تصاویر p-f ظاهر شوند. شکل‌های ۳-۵ و ۳-۵۱ نمونه‌ای از پردازش داده‌های روش شکست مرزی میکروترمز را به نقل از Louie (۲۰۰۱) نشان می‌دهند.

### ۳-۷-۳-۲- تجهیزات و روش برداشت داده‌ها

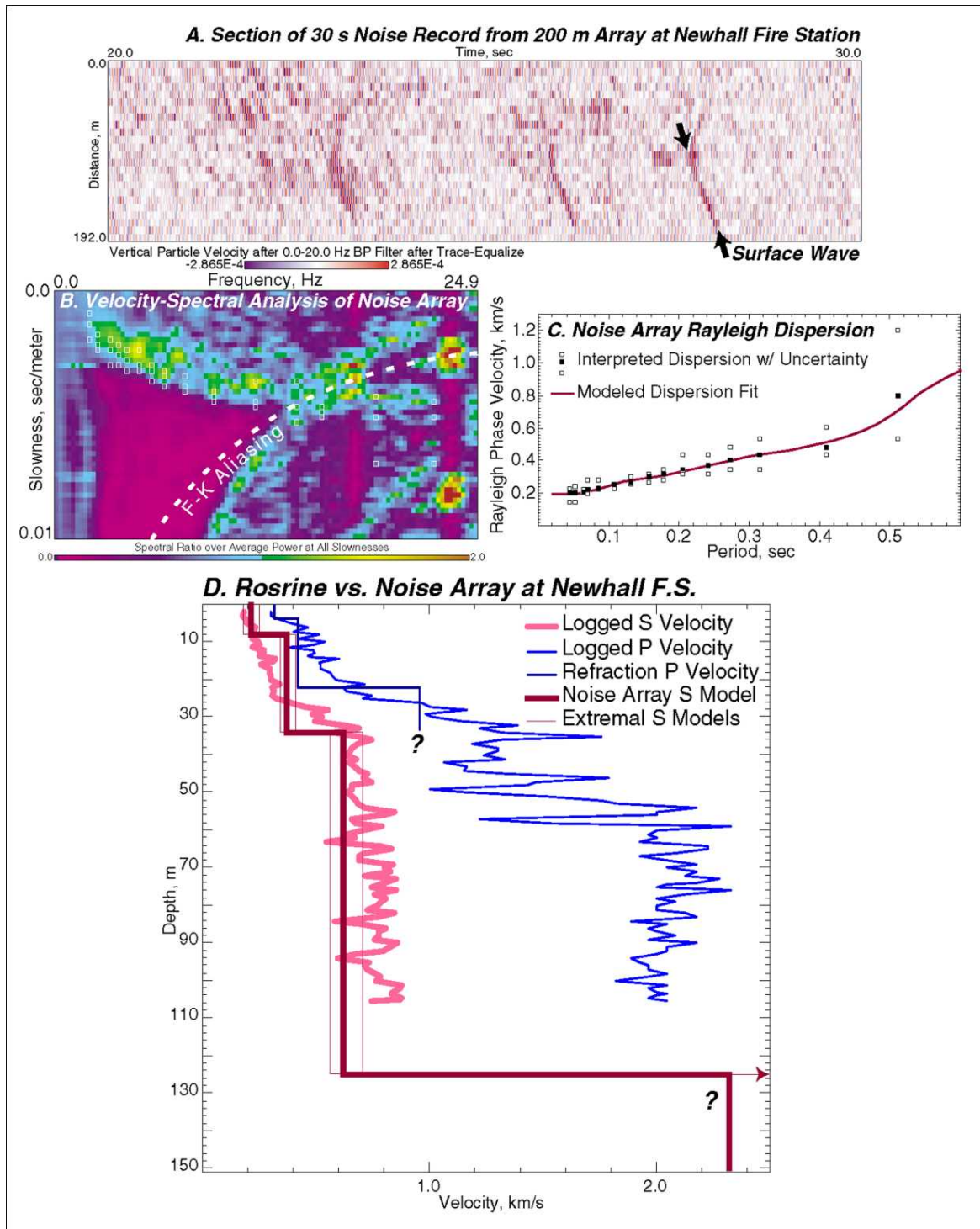
تجهیزات مورد استفاده در روش شکست مرزی میکروترمز همانگونه که ذکر شد و از نام آن پیدا است همان تجهیزات مورد استفاده در روش شکست مرزی متداول است. بنابر این تجهیزات مورد نیاز لرزه‌نگارهای ۱۲ یا ۲۴ کاناله با ژئوفونهای تک مولفه قائم ۴.۵ تا ۱۴ هرتز و کابلهای اتصال است. لرزه‌نگارهای مورد استفاده باید از حافظه کافی برای ذخیره‌سازی رکوردهای با طول حداقل ۴ ثانیه یا بیشتر را داشته باشند. معمولاً رکوردهای ۱۵ تا ۳۰ ثانیه‌ای توصیه می‌شود. طول کل آرایه می‌تواند از ۳۰۰ تا ۴۰۰ فوت متغیر باشد، اگر چه آرایه‌های کوتاه با طول ۶۰ فوت تا طول چند کیلومتری نیز استفاده شده‌اند. طول آرایه تعیین کننده عمقی است که تا آن عمق سرعت موج برشی با دقت مناسب قابل شناسایی است. به عنوان یک قاعده، حداکثر عمق قابل حصول یک سوم تا نصف طول آرایه در نظر گرفته می‌شود، اگر چه در مواردی تعیین سرعت تا عمقی برابر با طول آرایه نیز انجام شده است. موارد یاد شده معمولاً با استفاده از ژئوفونهای فرکانس پایین (۴/۵ هرتز) و ثبت نوفه‌های پرپود بلند قابل دستیابی است. با توجه به اینکه روش ReMi از



اطلاعات فاز میدان موج استفاده می‌کند، همانند روش شکست مرزی معمول، نیازی به کالیبراسیون دامنه ژئوفونها نیست. معمولاً مرکز آرایه بر نقطه هدف شناسایی قرار می‌گیرد. در صورت وجود حفرات زیرزمینی با قطر ۱۰ فوت یا بیشتر بهترین گزینه این است که آرایه از کنار آنها عبور کند و از روی آنها نگذرد. کاشتن ژئوفونها روی سنگفرش در صورتیکه امکان جفت‌شدگی مناسب با زمین داشته باشند منعی ندارد. یک روش آسان بکارگیری روش در محیطهای شهری چیدن آرایه در پیاده‌روها با کاشتن ژئوفونها در نوار پارکینگ یا ترکهای سنگفرشها است. در موارد اجبار، انحراف ۵ درصدی طول برداشت از آنچه در نظر گرفته شده تاثیر زیادی در دقت نتایج ندارد. این مسئله در مورد ارتفاع ژئوفونها نیز صادق است. در واقع یک شیب ثابت در خط برداشت بطور ایمن قابل صرفنظر کردن است مشروط به اینکه ارتفاع ژئوفونها بیش از ۵ درصد از این شیب منحرف نشوند.



شکل (۳-۵) تحلیل سرعت موج برشی در عمق کم در نزدیکی فرودگاه Reno/Tahoe با استفاده از داده‌های میکروترمز در دو آرایه به نقل از Louie (۲۰۰۱). تصاویر p-f از کندی صفر (لبه بالایی) تا ۰.۰۵ ثانیه بر متر (معادل سرعت فاز حداقل ۲۰۰ متر بر ثانیه) در لبه پایینی خطی هستند. (a) مجموع تبدیل p-f از ۵ رکورد ۴۸ ثانیه‌ای با استفاده از آرایه‌ای از گیرنده‌های ۸ هرتزی، با پیکهای p-f مشخص و خطای آن (دوایر و میله‌ها). (b) مجموع تبدیل p-f از ۵ رکورد ۵۰ ثانیه‌ای با استفاده از آرایه‌ای از گیرنده‌های ۴/۵ هرتزی، با پیکهای p-f و پیکهای حدی در طول پوش پایینترین سرعت (مربعهای کوچک). تحلیل فرکانس - عدد موج (F-K) زیر منحنی مشخص شده با نقطه‌های سفید دارای آلیاسینگ خواهد بود اما تبدیل (p-tau) هنوز قادر به تعیین سرعتهای فاز برای این ناحیه خواهد بود. (c) منحنی‌های پاشندگی برای تمامی پیکها و محدوده‌های برازش شده بر آن. (d) مدل‌های سرعت موج برشی برازش شده. رکوردهای آرایه ۸ هرتز که تا فرکانس حداقل ۴ هرتز قابل کاربرد هستند سرعت تا عمق حداکثر ۷۵ متری و رکوردهای ۴/۵ هرتزی با حداقل فرکانس ۲ هرتز تا عمق ۱۵ متری را بدست می‌دهند.



شکل (۳-۵۱) نمایش داده‌های میکروترمز ثبت شده توسط یک آرایه خطی ۲۰۰ متری با استفاده از ژئوفونهای ۸ هرتز (a) در ایستگاه آتش-نشانی نیوهال در جنوب کالیفرنیا و نتایج تحلیل روش کندی - فرکانس (p-f) برای آن (b). پیکانها در (a) مثالی از تعداد بسیاری امواج سطحی قابل مشاهده در رکورد را نشان می‌دهند. منحنی پاشندگی موج ریلی (c) به مدل سرعت نشان داده شده در (d) منجر می‌شود که با سرعت موج برشی بدست آمده از روش لاگر معلق استفاده شده در یک گمانه در محل تطابق دارد. سرعت موج تراکمی حاصل از روش شکست مرزی معمولی برای عمق بیشتر از ۳۰ متر و سرعت موج برشی حاصل از میکروترمز برای عمق بیش از ۱۱۰ متر بخوبی قابل تعیین نیستند (با علامت سوال مشخص شده است).



برداشت ۵ تا ۱۰ رکورد ۱۵ تا ۳۰ ثانیه‌ای در این روش توصیه شده است. نمونه‌برداری یا بازه ۲ میلی‌ثانیه جواب مناسبی در مطالعه سرعت موج برشی در عمق کم می‌دهد. مناسب است که هر گونه فیلتر قبل از رقوم‌سازی داده‌ها و ترسیم آنها حذف گردد و اگر دستگاه ثبات این امکان را فراهم نمی‌کند حداقل فرکانس قابل برداشت (ترجیحاً ۴ هرتز یا کمتر) به عنوان حد پایین فیلتر انتخاب شود و حد بالای آن معادل با نصف فرکانس نمونه‌برداری اختیار گردد. برای مثال با نمونه‌برداری در بازه ۲ میلی‌ثانیه، فرکانس نمونه‌برداری ۵۰۰ هرتز است و بنابراین حد بالایی فیلتر برابر با ۲۵۰ هرتز گزینه مناسبی برای یک فیلتر ضد آلیازینگ خواهد بود. این مورد کمک می‌کند تا منتظر عبور یک منشاء خوب نویز مانند قطار، کامیونهای سنگین یا پرواز یک جت بمانیم. رکوردهای برداشتی باید بصورت جداگانه در لرزه‌نگار یا حافظه خارجی ذخیره شوند و از جمع رکوردها (stacking) خوداری گردد. اگر سایت آرام باشد فعال کردن تعدادی منابع نویز در خلال اندازه‌گیری، مانند راندن یک کامیون و دویدن رفت و برگشتی در طول خط برداشت یا استفاده از صرباط پتک و وزنه‌های سنگین چاره‌ساز است. ثبت زمان یا تعیین محل منابع انرژی مهم نیستند. دویدن و قدم زدن خود به تنهایی امواج برشی ایجاد می‌کنند اما تبدیل با p-f مطمئن خواهیم بود که آنها در منحنی پاشندگی موج ریلی تداخل ایجاد نخواهد کرد. ترکیبی از منابع تولید کننده نویز بر استفاده تنها یک نوع آنها ارجحیت دارد.

### ۳-۷-۴ - تحلیل آرایه‌ای نوفه‌های محیطی (Array Analysis of Ambient Noises)

پایه تکنیکهای مبتنی بر تحلیل آرایه‌ای نوفه‌های محیطی (خردلرزه‌ها) مطابق با روشهای سه‌گانه فوق بر خاصیت پاشندگی امواج سطحی استوار است. تفاوت این تکنیک‌ها با روشهای اشاره شده در بخشهای قبل علاوه بر نوع تجهیزات و آرایش‌های مورد استفاده در نحوه پردازش داده‌ها می‌باشد. در این روشها بر خلاف روشهای فوق که بیشتر از ژئوفونهای متداول در مطالعات اکتشاف لرزه‌ای استفاده می‌شد از دستگاههای لرزه‌نگاری مورد استفاده در مطالعات زلزله‌شناسی با محدوده فرکانسی گسترده‌تر و غالباً سه‌مولفه استفاده می‌گردد. همچنین برخلاف روشهای قبلی که بیشتر توسعه خود را مدیون تلاشهای متخصصین در حوزه ژئوفیزیک اکتشافی و مهندسی هستند روشهای تحلیل آرایه‌ای بیشتر در قلمرو محققین زلزله‌شناسی مورد توجه قرار گرفته‌اند و عمق قابل شناسایی در این روشها از نظر تئوری بیشتر از روشهای سه-گانه فوق‌الذکر است.

رهیافت‌های معمول ارائه شده برای استخراج منحنی پاشندگی از سیگنالهای اولیه در برداشت آرایه‌ای نوفه‌های محیطی را می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد: روشهای فرکانس-عدد موج (Capon, ۱۹۶۹؛ Lacoss et al, ۱۹۶۹؛ Kvaerna و Ringhdal, ۱۹۸۶؛ Ohrnberger, ۲۰۰۱) و روشهای خودهمبستگی مکانی (Aki, ۱۹۵۷؛ Roberts و ASten, ۲۰۰۴؛ Henstridge, ۱۹۷۹).

از آنجایی که امواج سطحی از مودهای مختلفی تشکیل شده است، مقدار سرعت موج برشی محاسبه شده یکتا نخواهد بود. اما در عمل تنها تأثیر مود پایه بررسی می‌گردد و اثر مودهای بالاتر (خصوصاً در خاک‌های نرم با نسبت پواسون بالا) ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

روش‌های یاد شده، بر مبنای تحلیل پراکندگی موج سطحی ریلی گسترش یافته است. در برداشت نوفه‌های محیطی فرض می‌گردد که اثر این موج تنها در مؤلفه قائم لرزه نگارها ثبت می‌گردد. لیکن در سال‌های اخیر مشارکت موج سطحی لاو در تعیین پروفیل سرعت موج برشی بررسی شده است. این بررسی‌ها با در نظر گرفتن پارامتر مشارکت موج لاو لحاظ می‌گردد که موجب بررسی‌های عمیق‌تر لایه‌های آبرفت می‌گردد.

برای استفاده از روش‌های تئوری آرایه‌ای، لایه‌های آبرفت افقی و موازی یکدیگر و همچنین همگن و همسان فرض می‌گردد. به طور کلی، بررسی نگاشت‌های نوفه‌های محیطی نشان می‌دهد که این خردلرزه‌ها ارتعاشاتی تصادفی هستند

که در بازه زمان و مکان بی قاعده و نامنظم می‌باشند. اما با بررسی این نگاشت‌ها در طول مدت زمان، می‌توان فرض کرد که با تقریب اندکی مانا می‌باشند که فرض اساسی در روش‌های تحلیلی فوق‌الذکر می‌باشد. اوکادا در سال ۱۹۹۷ و ۲۰۰۴ روش‌های آرایه‌ای را به صورتی که در حال حاضر مطرح می‌باشد در قالب کتابچه راهنمایی منتشر کرده است. در این کتابچه به تئوری و نحوه کاربرد آنها در ترسیم پروفیل سرعت موج برشی در لایه‌های آبرفت پرداخته است.

### ۳-۷-۴-۱- روش خود همبستگی مکانی (SPAC) (Spatial AutoCorrelation; SPAC)

اکی (۱۹۵۷) متوجه شد که اگر مؤلفه قائم ارتعاشات زمینه در تمام نقاط محیط یک دایره و همچنین در مرکز دایره موجود باشند، کمیت معناداری به نام ضریب SPAC (یا متوسط آزمون ضریب خودهمبستگی) را می‌توان تعریف کرد که دارای رابطه مستقیمی با منحنی پاشندگی امواج ریلی است.

با وارون‌سازی منحنی پاشندگی پروفیل یک‌بعدی سرعت در زیر آرایه بدست می‌آید (Malagini et al, ۱۹۹۵؛ Hermann, ۲۰۰۱؛ Scherbaum et al, ۲۰۰۳؛ Watlet et al, ۲۰۰۵؛ Parolai et al, ۲۰۰۵). در ارتعاشات زمینه اغلب با چشمه‌های ناشناخته و یا چشمه‌های چندجهته (Omni-directional) مواجه هستیم. در نتیجه، امواج ریلی و لاو در مؤلفه‌های افقی بصورت ترکیبی وجود دارند که به نتایج پیچیده‌ای منجر می‌شود. بنابراین، در اکثر مطالعات ارتعاشات زمینه فقط از میدان موج مؤلفه قائم با هدف تخمین منحنی‌های پاشندگی موج ریلی استفاده می‌شود. استفاده ترکیبی از منحنی‌های پاشندگی امواج ریلی و لاو، یکنائی را در وارون‌سازی ساختار سرعت موج برشی افزایش می‌دهد. به علاوه، تخمین چگالی طیف توان امواج ریلی و لاو می‌تواند خصوصیات ارتعاشات زمینه را نمایانتر سازد (Koehler et al, ۲۰۰۷). بنابراین، تعیین سرعت امواج لاو از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

Betig et al (۲۰۰۱) تعدیلی در روش SPAC ارائه دادند تا بتوان آرایه‌های نامنظم را نیز مورد تحلیل قرار داد. آنها در عین حال ضریب خودهمبستگی بین تمام جفت ایستگاه‌های ممکن را نیز در محاسبات خودهمبستگی در نظر گرفتند. آنها کلیه جفت ایستگاه‌های ممکن را به صورت آرایه کمکی نشان دادند و آرایه کمکی را به حلقه‌های هم مرکز دسته بندی کردند و ضریب SPAC تعدیل یافته (MSPAC) را ارائه دادند.

اوکادا (۲۰۰۶) با این فرض که مؤلفه قائم میکروترمورها از امواج سطحی ریلی تشکیل شده است و مد اصلی مد غالب باشد روش مؤثر تفسیر میکروترموهای ثبت شده با آرایه دایروی M ایستگاهی را ارائه داد، به طوری که، با قرار دادن تعداد M ایستگاه (M بزرگتر از ۳) روی محیط دایره‌ای با شعاع  $r$  با فواصل مساوی از یکدیگر و یک ایستگاه در مرکز دایره، رابطه‌ای برای ضریب SPAC بدست آورد. در مدل اوکادا (۲۰۰۶)، ضریب SPAC مجموع دو عبارت است، اولی تابع بسل، که همانند ضریب SPAC حاصل از آرایه دایروی تقریباً پیوسته است و دومی به صورت دنباله‌ای از توابع بسل با مرتبه‌های مختلف است، به طوری که، دنباله وابسته به تعداد ایستگاه‌های آرایه دایروی، M است و  $k$  عدد موج است.

برای آرایه  $J_0(rk)$  دایره‌ای شامل چندین ایستگاه روی محیط دایره با شعاع  $r$  حول یک ایستگاه مرکزی  $(x, y)$ ، اکی در سال ۱۹۵۷ تابع همبستگی مکانی  $S(r, \theta)$  مابین مؤلفه‌های قائم خردلرزه‌های نگاشته شده را چنین تعریف کرد.

$$S(r, \theta) = E[X * (x, y, t) X(x', y', t)] \quad \text{رابطه ۳-۳۷}$$

که در آن  $X(x, y, t)$  در ایستگاه مرکزی و  $X(x', y', t)$  در ایستگاه  $(x', y')$

بر روی محیط دایره می‌باشد جایی که  $x' = x + r \cos(\theta)$ ،

$$S(r, \theta) = E[X * (x, y, t) X(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta, t)] \quad \text{. } y' = y + r \sin(\theta)$$

رابطه ۳-۳۸

همچنین  $\theta$  آزمون هر یک از ایستگاه‌ها نسبت به مرکز و  $t$  معرف زمان می‌باشد.  $E[ ]$  اشاره به میانگین (امید



ریاضی) دارد و علامت \* نشانگر مزدوج مختلط است.

اگر میانگین تابع  $S(r, \theta)$  در رابطه ۳-۳۸ در تمام آزیموت‌ها محاسبه شود، میانگین آزیموتی تابع همبستگی مکانی.  $\bar{S}(r)$  برابر است با

$$\bar{S}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S(r, \theta) d\theta \quad \text{رابطه ۳-۳۹}$$

که از این پس به آن تابع میانگین همبستگی مکانی گفته می‌شود.

اگر طیف توان،  $h(\omega)$  برای مؤلفه‌های قائم‌خردلرزه‌ها در فضای آرایه‌ای تخمین زده شود، تابع میانگین همبستگی مکانی به صورت زیر با طیف توان مرتبط می‌گردد.

$$\bar{S}(r) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} h(\omega) J_0\left(\frac{\omega}{c(\omega)} r\right) d\omega \quad \text{رابطه ۳-۴۰}$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $c(\omega)$  سرعت فاز در فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  و  $J_0$  تابع بسل نوع اول از مرتبه صفر می‌باشد که برابر است با:

$$j_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(x \cos \varphi) d\varphi \quad \text{رابطه ۳-۴۱}$$

البته آرگمان تابع بسل  $x$  برابر  $\left(\frac{\omega}{c(\omega)} r\right)$  خواهد بود. انتگرال رابطه ۳-۴۱ از تبدیل هنکل (Hankel transform) مابین طیف توان و تابع میانگین همبستگی مکانی استخراج شده است.

هنگامی که خردلرزه‌های نگاشت شده از آرایه توسط فیلترهای میان‌گذر با عرض عبور نازک به مرکزیت  $\omega_0$  فیلتر گردند، تابع خودهمبستگی مکانی نرمال شده توسط طیف توان  $h(\omega)$ ،  $\bar{S}(r, \omega_0)$  برابر ضریب خود همبستگی مکانی خواهد شد.

$$\bar{S}(r, \omega_0) = J_0(x) = J_0\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} r\right) = \rho(r, \omega_0) \quad \text{رابطه ۳-۴۲}$$

بنابراین اگر تابع خود همبستگی مکانی در فرکانس  $\omega_0$  برای

خرد لرزه‌های اندازه‌گیری شده در آرایه دایره‌ای تخمین زده شود، سرعت فاز  $c(\omega_0)$  از رابطه ۳-۴۲ توسط تابع بسل محاسبه خواهد شد.

$$c(\omega_0) = \frac{\omega_0}{x} r \quad \text{رابطه ۱-۴۳}$$

که در آن  $x$ ، متغیری در تابع بسل است که شرط تساوی رابطه ۳-۴۲ را ارضا کند. البته متغیر  $X$  در حل این مسئله لزوماً یکتا نخواهد بود.

بدین وسیله تابع خود همبستگی مکانی تعریف شده در رابطه ۳-۴۲، مشخصات کیفی سایت را در محل آرایه نشان می‌دهد.

با توجه به تئوری اکی تمام محیط دایره می‌بایست مملو از دستگاه لرزه نگار باشد در صورتی که در عمل اوکادا در سال ۲۰۰۴ نشان داد که با حداقل ۳ دستگاه بر روی محیط و یک دستگاه در مرکز دایره، این تئوری قابل استفاده خواهد بود. البته افزایش تعداد دستگاه‌ها دقت محاسبات را بیشتر خواهد کرد. همچنین اوکادا در سال ۲۰۰۶ نشان داد که فرد بودن تعداد دستگاه‌ها بر روی محیط دایره آزیموت‌های بیشتری را در اختیار خواهد گذاشت. (Okada, 2006)



### ۳-۷-۲- روش فرکانس - عدد موج (Frequency- wave number; F-K)

روش فرکانس - عدد موج در ابتدا توسط کاپون در سال ۱۹۶۹ و لاکوس در سال ۱۹۶۹ بر روی داده‌های حاصل از آزمایش‌های هسته‌ای ارائه گردید. در این روش با چینش چندین لرزه نگار که فاصله آنها به عمق شناسایی لایه‌های خاک مرتبط می‌گردد، خردلرزه‌های محیطی برداشت می‌گردد. از آنجایی که پدیده‌های تصادفی تابع زمان و مکان می‌باشد، می‌توان تابع چگالی طیف توان فرکانس - عدد موج را به یکی از دو روش زیر بدست آورد:

الف) تخمین تابع همبستگی خردلرزه‌ها و اعمال تبدیل فوریه بر آن

ب) اعمال مستقیم تبدیل فوریه بر نگاشت‌های خردلرزه‌ها و محاسبه میانگین مربعات مقادیر مطلق آن‌ها  
در روش اول تابع همبستگی دو نگاشت ثبت شده در دو لرزه نگار در زمان و مختصات‌های  $(x, y, t_1)$  و  $(x', y', t_2)$  برابر است با:

$$S(\Delta x, \Delta y, \tau) = E[X * (x, y, t_1) X(x + r \cos \theta, y + r \sin \theta, t_2)] \quad \text{رابطه ۱-۴۴}$$

که در آن  $\Delta x = x - x'$  و  $\Delta y = y - y'$  و  $\tau = t_2 - t_1$  می‌باشد و تابع چگالی طیف توان فرکانس - عدد موج مربوط به آن برابر است

$$h(k_x, k_y, \omega) = \iiint_{-\infty}^{\infty} S(\Delta x, \Delta y, \tau) \exp(i(-k_x(\Delta x) - k_y(\Delta y) + \omega(\tau))) d\Delta x d\Delta y d\tau \quad \text{رابطه ۱-۴۵}$$

روش دوم استفاده از تابع چگالی طیف توان با استفاده از تبدیل فوریه محدود می‌باشد. در فضای دو بعدی برآورد طیف توان ارائه شده توسط کاپون به صورت زیر است.

$$h(k_x, k_y, \omega) = \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Phi_{ij}(\omega) \exp(i(k_x(x_i - x_j) + k_y(y_i - y_j))) \right]^{-1} \quad \text{رابطه ۳-۴۶}$$

که  $x_i - x_j$  و  $y_i - y_j$  فاصله بین مختصات دو ایستگاه نو ز و  $\Phi_{ij}(\omega)$  یک عضو از ماتریس  $\Phi(\omega)$  می‌باشد که ماتریس معکوس تبدیل فوریه ماتریس همبستگی  $S(\Delta x, \Delta y, \tau)$  است.

با استفاده از بردار  $K_0$  در نقاط حداکثر طیف  $f-k$  و فرکانس  $f_0$ ، سرعت فاز  $c(0)$  تعیین می‌گردد.

$$c(0) = \frac{\omega_0}{k_0} = \frac{2\pi f_0}{\sqrt{k_{x0}^2 + k_{y0}^2}} \quad \text{رابطه ۳-۴۷}$$

در روش فرکانس - عدد موج، راستای انتشار امواج غالب  $\phi_0$  بر اساس مختصات  $(k_{x0}, k_{y0})$  برابر است با:

$$\phi_0 = \text{Arctan}\left(\frac{k_{x0}}{k_{y0}}\right) \quad \text{رابطه ۳-۴۸}$$

### ۳-۷-۵- وارون سازی منحنی پراکندگی و برآورد پروفیل سرعت موج برشی

همانگونه که در ابتدای بخش ۱-۷ ذکر شد مرحله آخر در روشهای مبتنی بر اندازه‌گیری امواج سطحی استفاده از منحنی‌های پاشندگی بدست آمده برای تخمین پروفیل سرعت موج برشی لایه‌های زمین است که در اصطلاح به وارون سازی (Inversion) معروف است.

وارون سازی منحنی پاشندگی فرایند تعیین سرعت انتشار موج واقعی (بویژه سرعت موج برشی) است. ساده‌ترین راه بدست آوردن سرعت موج برشی با استفاده از منحنی پاشندگی این است که سرعت موج برشی را تقریباً ۱۱۰ درصد سرعت موج ریلی و عمق نمونه‌برداری را ۰/۵ تا ۰/۳۳ طول موج در نظر بگیریم (Stokoe و Nazarian, ۱۹۸۴). وجود یک لایه با سرعت‌های نسبتاً زیاد یا کم نزدیک به سطح باعث یک جایجایی کلی سرعت موج ریلی در منحنی پاشندگی به

سمت سرعتهای بالا یا پایین خواهد شد. بنابراین استفاده از این روش ساده وارون سازی موجب درجاتی از خطا خواهد شد. اما برای بسیاری از خاکها که ویژگیهای خاک دارای تغییرات زیاد نباشد استفاده از این روش، با خطای اندک همراه است. در زمینهای با تغییرات شدید ویژگیهای خاک در عمق سرعت موج برشی برآورد شده به این طریق با خطای فاحش همراه خواهد بود.

از این روشهای مختلفی برای وارون‌سازی منحنی پاشندگی توسط محققین مختلف ارائه شده است. Nazarian و Stokoe (۱۹۸۴) وارون‌سازی بر مبنای استفاده از ماتریس هسکل-تامسون با اندکی تغییرات برای یک محیط چند لایه را بکار بردند. به این منظور پروفیل خاک به لایه‌های متعدد (معمولاً ۱۵ تا ۲۰ لایه) تقسیم می‌شود. برای سایت‌های خاکی ضخامت لایه‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود و برای سایت‌های خاکریزی شده لایه‌های نازک در نزدیک سطح با افزایش ضخامت با عمق استفاده می‌گردد. سپس یک پروفیل سرعت، با استفاده از روش ساده ذکر شده در بالا، به عنوان اولین حدس برای هر لایه انتخاب شده و منحنی پاشندگی تئوریک با استفاده از کد کامپیوتری نوشته شده به این منظور بدست می‌آید. منحنی تئوریک بدست آمده با منحنی حاصل از اندازه‌گیری مقایسه می‌شود. اگر این دو منحنی، تا حد معقولی به هم نزدیک باشند به عنوان پروفیل سرعت محل مورد بررسی انتخاب می‌گردد. در غیر این صورت سرعتهای موج برشی انتخاب شده برای لایه‌ها تغییر داده شده و منحنی پاشندگی تئوریک از نو برای آن محاسبه می‌گردد و اینکار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که حداقل عدم تطابق بین دو منحنی حاصل گردد. در این روش چگالی و نسبت پواسون لایه‌های مختلف خاک به عنوان ورودی بکار می‌روند اما تاثیر آنها بر روی نتایج نهایی، بویژه در کاربردهای شناسایی‌ها ژئوتکنیکی که این پارامترها برای لایه‌های مختلف به هم نزدیک هستند، ناچیز است.

Hermann (۱۹۹۴) با استفاده از روش حداقل مربعات میرا شده همراه با یک مدل اولیه که معمولاً برای محاسبه مشتقات استفاده می‌شود پروفیل سرعت را بدست آورد. در هر تکرار، تخمین بهتری از مدل محاسبه می‌شود و حداقل کردن تابع عدم تطابق (misfit; MF) بعد از چند تکرار بدست می‌آید. در صورتیکه تابع عدم تطابق چندین مینیمم داشته باشد (معمولاً وقتی عدم قطعیت‌ها روی منحنی پاشندگی زیاد باشد چنین می‌شود) روشهای مبتنی بر مشتقگیری یک مدل بهینه بدست می‌دهد که بشدت وابسته به مدل اولیه است. یک دسته جدید از روشها مبتنی بر نمونه‌های شبه تصادفی (pseudo-random) یکنواخت از فضای پارامتر در ۱۵ سال گذشته در ژئوفیزیک رایج شده است؛ از جمله، شبیه‌سازی بادوام کردن (annealing) ارائه شده توسط Sen و Stoffa (۱۹۹۱)، الگوریتم ژنتیک (Lomax و Snieder، ۱۹۹۴) و اخیراً الگوریتم نزدیکترین همسایگی (Neighbourhood) که توسط Sambridge (۱۹۹۹) توسعه یافته است. هدف تمام این الگوریتم‌ها جستجوی کل فضای پارامتر است تا مجموعه پارامترهای با بهترین انطباق با داده را بیابند. Watlele و همکاران (۲۰۰۴) کد جدیدی را با استفاده از الگوریتم نزدیکترین همسایگی توسعه دادند تا منحنی‌های پاشندگی را وارون کنند.

در تمامی روش‌های فوق مدل‌هایی متنوع تابع فرکانس، سرعت موج حجمی و برشی، چگالی و ضخامت لایه ایجاد می‌گردد.

$$c = c(f; v_{p1}, v_{s1}, p_1, h_1, \dots; v_{pn}, v_{sn}, p_n, h_n) \quad \text{رابطه ۳-۴۹}$$

با محاسبه مقدار عدم تطابق (رابطه ۳-۵۰) پاسخ حاصل از این مدل‌ها با منحنی پاشندگی مشاهده شده مقایسه شده و دقت مدل‌های ایجاد شده از لایه‌های آبرفت و سنگ بستر در منطقه مورد مطالعه بررسی شده و در نهایت مدل مناسب برای سایت مورد مطالعه استخراج می‌گردد.

رابطه ۳-۵۰

$$misfit = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(c_{di} - c_{ci})^2}{n \cdot \sigma_i^2}}$$



در این رابطه  $C_{di}$  و  $C_{ci}$  به ترتیب سرعت مشاهده شده و محاسبه شده و  $\sigma_i$  واریانس نمونه‌ها و  $n$  تعداد نمونه در فرکانس  $f_i$  می‌باشد.

در مطالعاتی که بر اساس روش‌های آرایه‌ای انجام می‌شود همان‌طور که در شکل ۱-۵۲ نشان داده شده است چندین دستگاه لرزه نگار با چینش خاص و به‌طور هم‌زمان به برداشت اطلاعات می‌پردازند. از اطلاعات برداشت شده منحنی پاشندگی سرعت موج ریلی بر حسب فرکانس استخراج می‌گردد. با وارون‌سازی این منحنی توسط یکی از روش‌های فوق‌الذکر منحنی سرعت نسبت به عمق استخراج خواهد شد. از آنجایی که محدوده دقت این منحنی وابسته به قطر آرایه چیده شده می‌باشد با ترکیب نتایج بدست آمده از چند آرایه با قطرهای مختلف، دقت سرعت موج برشی بدست آمده در اعماق مختلف افزایش خواهد یافت.

در تخمین سرعت موج برشی نسبت فواصل بین ایستگاه‌ها به طول موج وابسته است. رابطه زیر می‌تواند در این ارتباط مد نظر قرار گیرد (شعبانی، ۱۳۸۹).

$$2D_{\min} < \lambda_{\min} < \lambda_{\max} < 3D_{\max} \quad \text{رابطه ۳-۵۱}$$

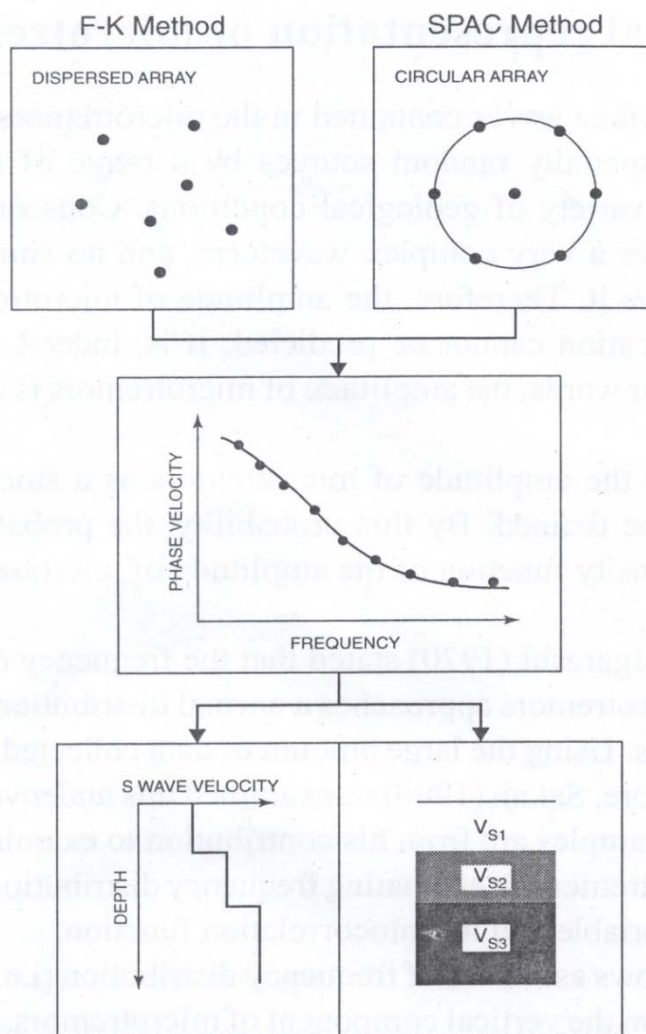
$D_{\max}$  و  $D_{\min}$  کمترین و بیشترین فواصل بین دستگاهی  $\lambda_{\min}$  و  $\lambda_{\max}$  کمترین و بیشترین طول موج می‌باشد. رابطه  $D_{\min}$  و  $\lambda_{\min}$  برای دوری از خطای اختلاط فرکانسی می‌باشد و رابطه  $D_{\max}$  و  $\lambda_{\max}$  برای دوری از اثر فیلتر کنندگی ساختگاه در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۸- روشهای نسبت طیفی استاندارد و نسبت طیفی مولفه افقی به قائم

در این بخش دو روش مبتنی بر استفاده از نگاشت زمینلرزه‌های واقعی و ارتعاشات محیطی معرفی می‌شوند. این دو روش در واقع در دسته روشهای شناسایی ژئوفیزیکی طبقه‌بندی نمی‌گردند بلکه در زمره روشهای تجربی بررسی اثرات ساختگاهی بر جنبش لرزه‌ای ناشی از یک زلزله محتمل می‌باشند. در عین حال به لحاظ اطلاعاتی که از دو پارامتر پیروید طبیعی خاک و دامنه بزرگنمایی جنبش لرزه‌ای زمین بدست می‌دهند و نیز درخواست کارفرما در اینجا آورده شده‌اند. این دو پارامتر پارامترهایی کلیدی در طراحی لرزه‌ای سازه‌های مهم مانند پل‌ها هستند و علاوه بر آن با داشتن پیروید طبیعی، با فرض دانستن ضخامت یا سرعت موج برشی از روشهای دیگر می‌توان پارامترهای دیگری از خاک را نیز تخمین زد.

داده‌های مورد استفاده در این دو روش هم می‌تواند رکوردهای زلزله‌های واقعی و هم ارتعاشات محیطی باشند و تجهیزات مورد استفاده دستگاه‌های لرزه‌نگار مجهز به گیرنده‌های سه مولفه‌ای می‌باشند. روش نسبت طیفی استاندارد روشی مبتنی بر مقایسه طیفی رکوردهای برداشت شده در محل‌های مورد نظر با یک ایستگاه مرجع است اما در روش نسبت طیفی مولفه افقی به مولفه قائم نیاز به ایستگاه مرجع ندارد و بر مبنای تقسیم طیف مولفه افقی نگاشت لرزه‌ای به طیف مولفه قائم آن عمل می‌کند.





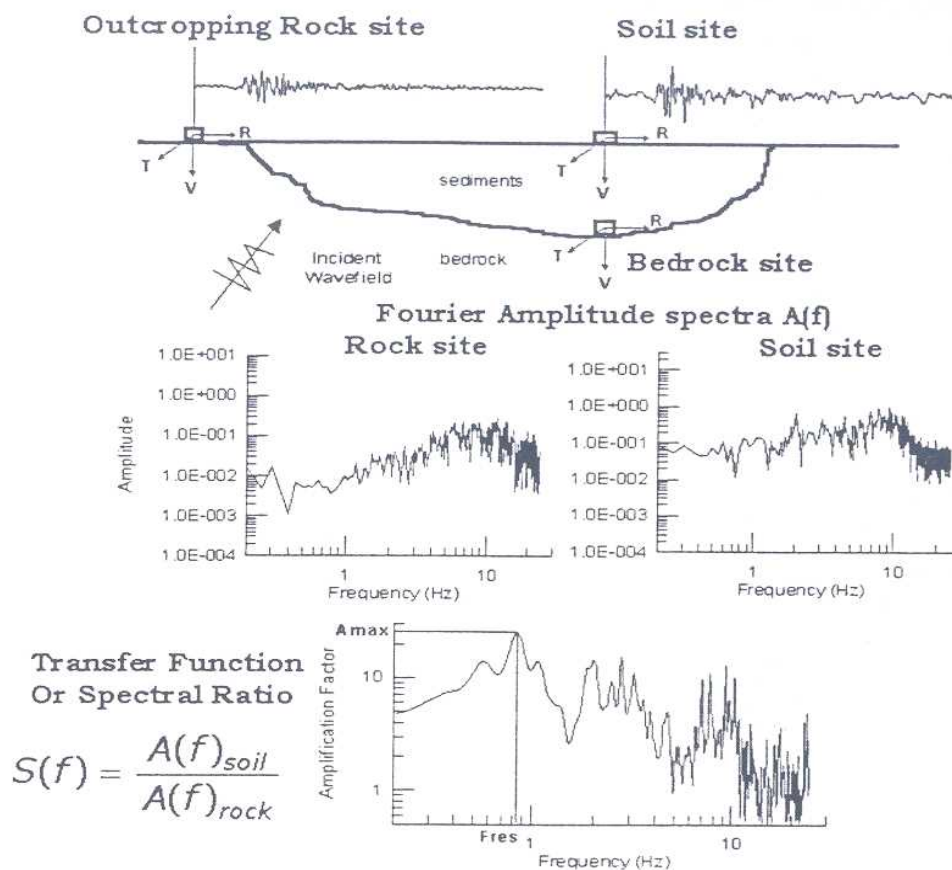
شکل (۳-۵۲) پروفیل سرعت موج برشی توسط روش معکوس سازی مستقیم خردلرزه‌ها

### ۳-۸-۱- روش نسبت طیفی استاندارد

روش نسبت طیفی استاندارد یکی از رایج‌ترین و مقبول‌ترین روشهای ارزیابی اثرات ساختگاهی بوده که اولین بار توسط Borchert در سال ۱۹۷۰ ارائه شده است. در این روش با استفاده از ثبت همزمان نگاشتهای زلزله بر روی ساختگاههای مورد نظر و یک یا چند ساختگاه مرجع، و محاسبه نسبت طیفی مولفه‌های نظیر در ساختگاه مورد نظر و ساختگاه مرجع، با فرض اینکه رخدادهایی که بر روی ایستگاه مرجع ثبت شده تحت تاثیر اثرات ساختگاهی قرار نمی‌گیرند به محاسبه توابع بزرگنمایی در ساختگاه می‌پردازیم.

ایستگاه(های) مرجع ایستگاههایی عاری از لایه‌های سست سطحی و هوازده (ترجیحاً رخنمونهای سنگی) و همچنین فاقد اثرات توپوگرافی در نظر گرفته می‌شوند، و فاصله بین ساختگاه مرجع و ساختگاه مورد نظر باید به اندازه‌ای باشد که بتوان از اثرات چشمه انرژی و اثرات مسیر انتشار موج صرف‌نظر کرد. در استفاده از داده‌های زلزله‌های واقعی فاصله بین دو ایستگاه مرجع و ایستگاه مورد نظر یک پنجم فاصله رومرکزی (Epicenter) توصیه شده است. همچنین به منظور قابل اعتماد بودن نتایج استفاده از حداقل ۵ نگاشت زلزله با نسبت سیگنال به نویز مناسب لازم است.

اگر چه استفاده از این روش با استفاده از داده‌های زلزله به عنوان یکی از روشهای قابل اعتماد شناخته شده است اما استفاده از آن با استفاده از داده‌های ارتعاشات محیطی با توجه به تغییر چشمه‌های این ارتعاشات در فواصل اندک، تنها توسط معدودی از محققین گزارش شده است و توصیه نمی‌شود. در صورت ضرورت حداکثر فاصله بین دو ایستگاه کمتر از ۱ کیلومتر باید باشد که در عمل پیدا کردن ایستگاه مرجع در این فواصل نزدیک دشوار خواهد بود. این امر بویژه در فرکانسهای بالا مشکل ساز است. آکی در تحقیقات خود نشان داد که برای میکروترموورها با فرکانس بالا نمی‌توان اثر چشمه را با این روش حذف کرد چراکه چشمه بوجود آورنده میکروترموورها مربوط به فعالیت‌های انسانی می‌گردد و در هر جایی از محیط شهری می‌تواند وجود داشته باشد اما برای فرکانسهای پایین با توجه به اینکه منشا آنها امواج اقیانوسی است می‌توان چشمه را برای ساختگاههای نزدیک هم ثابت فرض کرد. شکل ۳-۵۳ شمای کلی روش نسبت طیفی استاندارد را نشان می‌دهد.

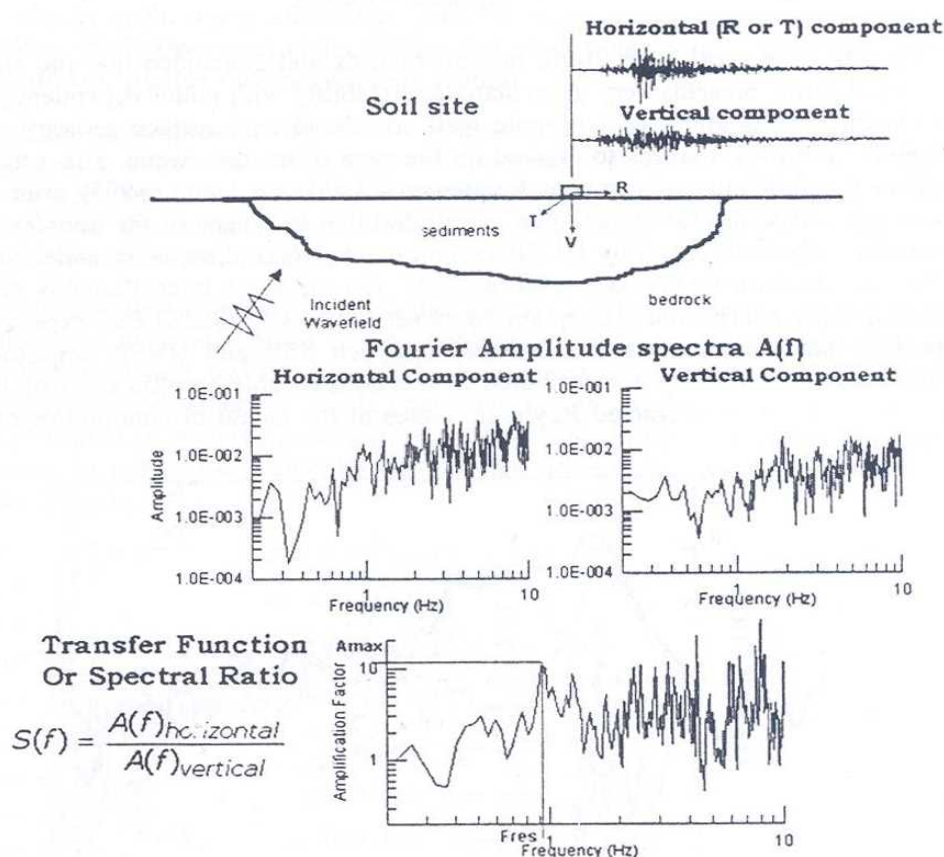


شکل (۳-۵۳) شمای کلی روش نسبت طیفی استاندارد (Ansal, 2004)

### ۳-۸-۲- روش نسبت طیفی مولفه افقی به قائم (H/V)

از آنجا که استفاده از روش نسبت طیفی استاندارد نیازمند به وجود یک ساختگاه مرجع است که در عمل پیدا کردن ساختگاههای مرجع مناسب، بویژه در مناطق شهری مشکل است روشی بسیار ساده ابداع گردید که شامل محاسبه نسبت طیف مولفه افقی به طیف مولفه قائم است. استفاده از این روش در داده‌های زلزله در واقع از تکنیک تابع گیرنده ارائه شده توسط Langston (۱۹۷۹) الگو گرفته است. این تکنیک برای تشخیص ساختار سرعتی پوسته زمین از نسبت طیفی

مولفه افقی به قائم حاصل از امواج P دورلرزه‌ها استفاده می‌کند که در روشی نسبت طیفی افقی به قائم با استفاده از امواج S به ابزاری برای تشخیص فرکانس غالب و دامنه بزرگنمایی ساختگاه‌های آبرفتی تبدیل شده است. لرمو و چاوزگارسیا در سال ۱۹۹۳ برای اولین بار از این روش در سه ساختگاه مختلف در مکزیک، استفاده کردند. نتایج حاصل شباهت بسیار امیدوارکننده‌ای بین این روش و روش استاندارد نسبت طیفی را نشان می‌دهد. شکل ۳-۵۴ شمای کلی روش نسبت طیفی افقی به قائم با استفاده از داده‌های زلزله را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵۴) شمای کلی روش نسبت طیفی افقی به قائم با استفاده از نگاشت‌های زلزله (Ansal, 2004)

استفاده از این روش با داده‌های ارتعاشات محیطی بوسیله Igarashi و Nogoshi (۱۹۷۱) پیشنهاد شد و بوسیله مقاله Nakamura (۱۹۸۹) که بیشتر بر مبنای مشاهدات تجربی بنا شده بود تا مطالعات تئوریک، به ادبیات علمی جهانی راه یافت و به تکنیک ناکامورا معروف شد. سادگی برداشت داده‌ها و صرفه اقتصادی بسیار زیاد باعث توجه روزافزون به استفاده از این روش علیرغم مشخص نبودن مبانی تئوریک آن در جهان شد بطوریکه امروزه به عنوان یکی از متداولترین روشها در ارزیابی اولیه اثرات ساختگاهی و بویژه مطالعات ریزپهنه‌بندی تبدیل شده است. البته جنبه‌های تئوریک روش بعد از ارائه آن توسط محققین بسیاری مورد توجه قرار گرفت که از جمله گسترده‌ترین کارهای انجام شده پروژه‌ای با عنوان اختصاری SESAME توسط کنسرسیومی متشکل از مراکز تحقیقاتی اروپایی در فاصله سالهای ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ قابل اشاره است.

یکی از محاسن اصلی این تکنیک نیاز به یک دستگاه لرزه‌نگار سه مولفه‌ای و اندازه‌گیری‌های کوتاه مدت چند ده

دقیقه‌ای از ارتعاشات محیطی است که نیاز به انتظار طولانی برای وقوع زمینلرزه بویژه در مناطق با لرزه‌خیزی پایین را مرتفع می‌سازد. رکوردهای سه مولفه‌ای چند ده دقیقه‌ای برداشت شده پس از پیش پردازشهای لازم با حذف نوفه‌های گذرا به پنجره‌های چند ثانیه‌ای مانا شکسته شده و طیف فوریه برای هرکدام از این پنجره‌ها محاسبه می‌گردد. پس از هموار سازی طیفهای بدست آمده میانگین طیف مولفه‌های افقی بدست می‌آید. با تقسیم این طیف میانگین بر طیف مولفه قائم تابع تبدیل ساختگاه مورد نظر محاسبه شده که از روی آن فرکانس غالب خاک و دامنه بزرگنمایی قرائت می‌گردد (شکل ۳-۵۵).

مقایسه نتایج حاصل از روش H/V بدست آمده از داده‌های ارتعاشات محیطی با روش نسبت طیفی استاندارد بدست آمده از نگاشتهای زلزله توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است. این مقایسه‌ها کارایی این روش در پیش‌بینی فرکانس تشدید سابتیهای خاکی در قریب به اکثر موارد را به اثبات رسانده است. با وجود این به نظر می‌رسد که تکنیک ناکامورا، در تخمین فاکتور بزرگنمایی حرکت خاک سطحی موفقیتی مانند محاسبه فرکانس طبیعی نداشته باشد. شکل ۳-۵۶ یک نمونه از مقایسه‌های انجام شده در این رابطه با استفاده از داده‌های حدود ۱۸۰ سایت مختلف توسط حق-شناس (۲۰۰۸) به خوبی این مسئله را نشان می‌دهد.

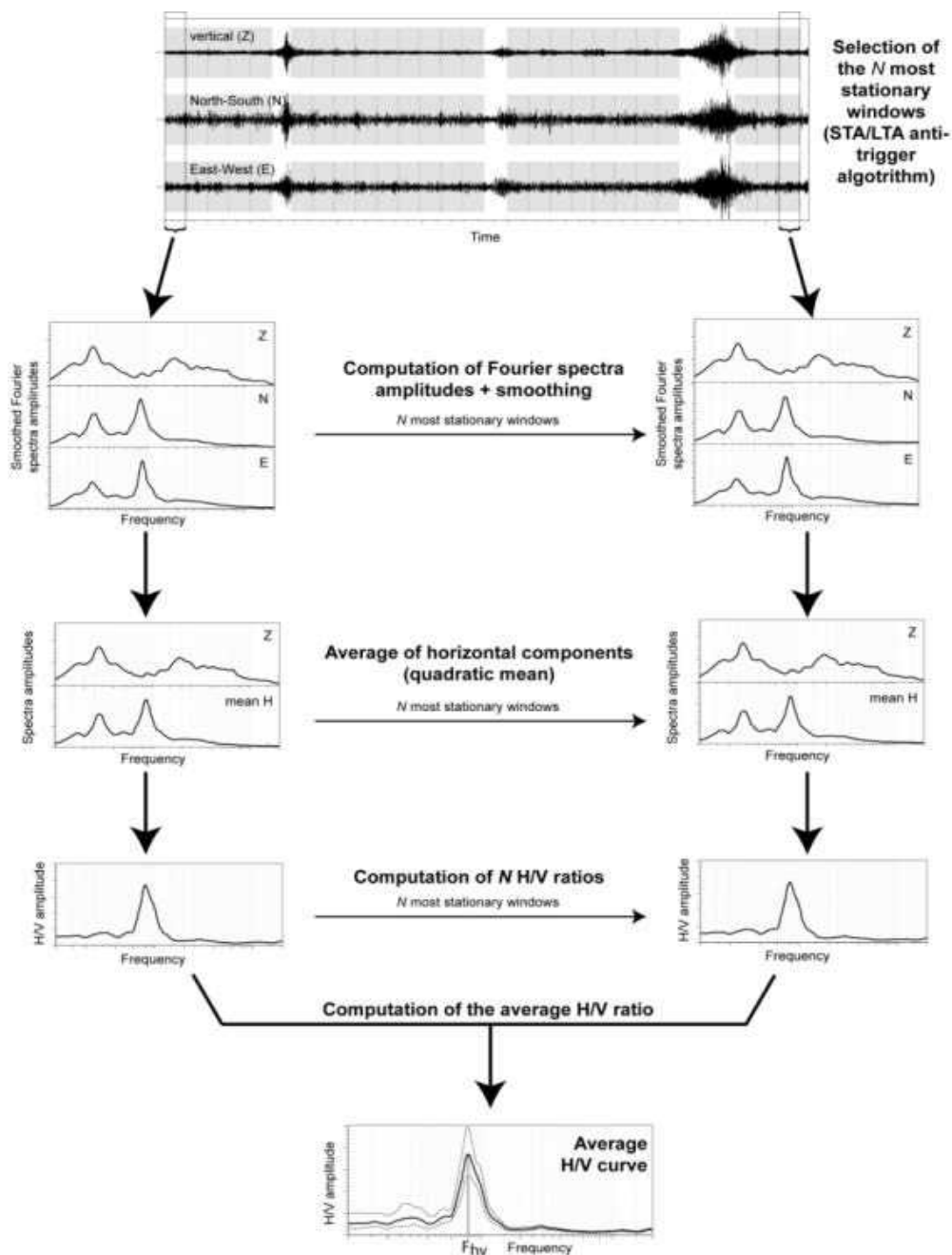
این مقایسه نشان می‌دهد که روش H/V در اغلب موارد نسبت بزرگنمایی را کمتر از مقادیر مشاهده شده از داده‌های زلزله نشان می‌دهد. بنابراین بهتر است نسبت بزرگنمایی حاصل از این روش به عنوان حداقل میزان بزرگنمایی مورد انتظار در نظر گرفته شود. با بدست آوردن فرکانس تشدید ( $F_0$ ) از این روش در صورتیکه یکی از پارامترهای ضخامت (H) یا سرعت موج برشی (Vs) از روشهای دیگر معین شده باشد پارامتر دیگر با استفاده از رابطه تقریبی زیر قابل تخمین است.

$$F_0 = \frac{Vs}{4H}$$

رابطه ۳-۵۲

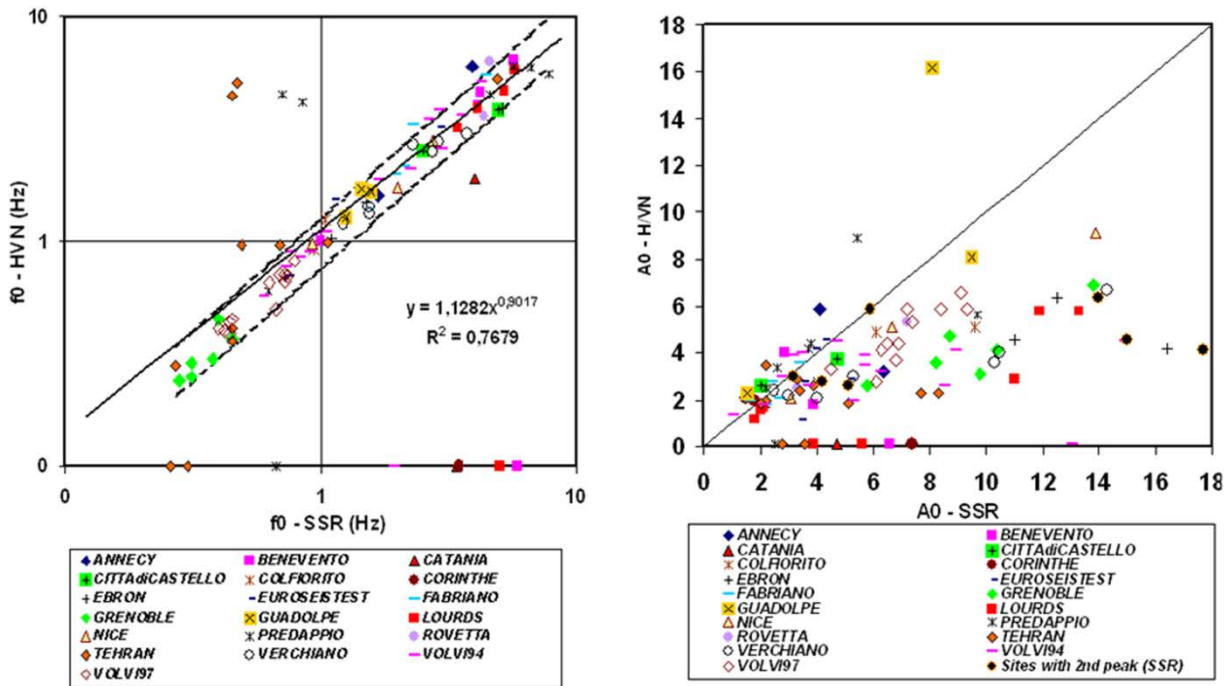






شکل (۳-۵۵) شمای کلی محاسبه نسبت طیفی افقی به قائم با استفاده از نگاشتهای ارتعاشات محیطی سه مولفه‌ای





شکل (۳-۵۶) مقایسه نتایج حاصل از روش H/V داده‌های ارتعاشات محیطی با روش نسبت طیفی استاندارد داده‌های زلزله. سمت چپ: مقایسه فرکانسهای تشدید بدست آمده، سمت راست: مقایسه نسبت بزرگنمایی (Haghshenas et al, 2008)

### ۳-۹- روش گرانی سنجی

#### ۳-۹-۱- مقدمه

یکی از مهمترین نیروهای فیزیکی موجود در عالم هستی نیروی گرانشی بین اجرام مختلف می باشد که مقدار این نیرو را از رابطه مشهور نیوتن می توان محاسبه کرد:

$$F = \frac{Gm_2.m_1}{r^2} \quad \text{رابطه ۳-۵۳}$$

در این رابطه  $G$  ثابت جهانی جاذبه برابر با  $6.673 \times 10^{-8}$  و  $m_1$  و  $m_2$  جرم های جاذب کننده و جاذب شونده و  $r$  فاصله بین دو مرکز جرم می باشد. در سطح زمین نیز نیروی جاذبه حاصل از جرم زمین بر هر جرم دیگری وارد می شود. پارامتر مبنا در گرانی سنجی شتاب ثقل ( $g$ ) می باشد که مقدار متوسط آن در سطح زمین ۹.۸ متر بر مجذور ثانیه می باشد. مقدار این شتاب در هر نقطه از سطح زمین بستگی به عواملی دارد که در زیر به آنها اشاره می شود.

- تغییر قطر زمین از استوا تا قطب: مقدار شتاب ثقل در عرض های جغرافیایی پائین (نزدیک به خط استوا) بدلیل فاصله بیشتر از مرکز زمین کاهش یافته، و به سمت قطبها افزایش می یابد.

$$G = G_0(1 + 0.0052884 \sin^2\theta - 0.00000059 \sin^22\theta) \quad \text{رابطه ۳-۵۳}$$

که  $G_0$  برابر  $978.049$  گال در استوا و  $\emptyset$  عرض جغرافیایی است.

- اثر جاذبه اجرام آسمانی: زمین تحت تاثیر نیروهای جذر و مد قرار می‌گیرد و چون سختی سنگها و مواد جامد پوسته بی نهایت نیست سطح جامد نیز به مانند سطح آبها دچار تغییر شکل هرچند کوچک می‌شود که خود باعث تغییرات کوچک اما قابل اندازه گیری در گرانی می‌شود.

- تغییر در جنس سازندها و توده های زمین شناسی زیر سطحی

- اثر ایزوستازی: چنانچه ناهنجاری بوگه (در ادامه شرح داده می‌شود) برای ناحیه ای از سطح که مسطح و بالاتر از سطح دریاست محاسبه گردد تقریباً همیشه منفی است و در بالای اقیانوسهای عمیق ناهنجاری عموماً مثبت است و در نزدیکی خشکی هایی که اختلاف ارتفاع کمی با سطح دریا دارند نزدیک به صفر است.

- اثر جاذبه کوههای اطراف

- اختلاف ارتفاع نقاط: بارفتن به سمت ارتفاع و دور شدن از مرکز زمین نیروی گرانش کاهش می‌یابد.

مقدار شتاب ثقل تحت تاثیر تغییرات چگالی زمین نیز می‌باشد. آن چه که در روی زمین در روش گرانی‌سنجی اندازه گرفته می‌شود، شتاب ثقل (g) می‌باشد که باید فقط مربوط به تغییرات چگالی باشد، بنابراین باید اثرات ارتفاع، زمان (کشند ماه و خورشید) و جرم بین ایستگاه و سطح مبنا (صفحه بوگه)، اثر جرم های توپوگرافی و اثر عرض جغرافیایی از مقدار اندازه گیری شده حذف شوند.

به این ترتیب تغییر شتاب ثقل بین دو نقطه، پس از اعمال تصحیحات، گویای تغییر چگالی در زیر نقاط است که همان پارامتر مورد نظر در اکتشافات ژئوفیزیکی به روش گرانی‌سنجی می‌باشد. بنابراین به منظور تعیین ناهنجاری چگالی، تغییرات g در نقاط روی یک خط (پروفیل) و یا شبکه اندازه گیری و مشخص می‌شود.

همان طور که عنوان شد بر روی داده های قرائت شده باید تصحیحاتی برای حذف اثرات ارتفاع، جزر و مد، توپوگرافی و عرض جغرافیایی انجام شود. همچنین داده های قرائت شده به یک سطح مبنا منتقل شوند.

### ۳-۹-۲- برداشت داده های گرانی‌سنجی

ابزار اندازه گیری گرانی گرانی‌سنج (Gravimeter) است. این دستگاهها طوری طرح ریزی شده اند که تفاوت‌های کوچک در قدرت گرانی را مستقیماً اندازه می‌گیرند و در عین حال که دستگاههایی قابل حمل بوده و کار با آنها سریع انجام می‌شود، برای کلیه مقاصد یک برداشت حساسیتی کاملاً خوب دارند.

شیوه برداشت به میزان زیادی به منظور و هدف برداشت بستگی دارد. برداشت های بزرگ مقیاس که صدها کیلومتر مربع را پوشش داده و به منظور آشکار سازی ساختارهای زمین شناسی عمده صورت می‌گیرند، توسط خودرو یا هیلکوپتر و با پوشش نقاطی حدود یک ایستگاه در کیلومتر مربع یا کمتر انجام می‌شوند. ایستگاهها طوری انتخاب می‌گردند که پوشش یکنواخت داشته باشند یا اگر زمین تخت و باز باشد، ممکن است بر روی نقاط یک شبکه قرار گیرند.

برای انجام چنین برداشتی، با شروع از نقطه مرجع، تعداد ایستگاه مبنا در منطقه در نظر گرفته می‌شود که به طور

گسترده از هم جدا باشند. برای آنکه دقت زیاد شود، این ایستگاههای مبنا در قالب یک سری پیمایشهای مثلثی یا چند وجهی اندازه گیری می‌شوند. بطوریکه هر وجه حداقل دو بار اندازه گیری شود. یک راه برای انجام این روش آن است که هر مثلث سه ایستگاهی با ترتیب ABABCBCACA اندازه گیری شود. در این سری ها دو مقدار از هر یک از تفاوت‌های AB، BC، و CA با تصحیح رانه که در ادامه توضیح داده می‌شود، به طور نیمه مستقل به دست خواهد آمد. اگر هیچگونه خطای اندازه گیری وجود نداشته باشد، جمع جبری تفاوتها در اطراف مثلث صفر خواهد بود. جمع واقعی را خطای بست (closing error) نامند. سپس مثلثهای دیگر، مثل BCD و غیره، به همان ترتیب اندازه‌گیری می‌شوند تا شبکه مبنا تکمیل گردد. پس از آن خطاهای بست در سرتاسر شبکه با روش کمترین مربعات (least squares) توزیع می‌یابند. این فرایند تفاوت‌های مختلف را آنچنان تصحیح می‌کنند که مقادیر به دست آمده میانگینی از بهترین تقریب ممکن برای تفاوت‌هایی است که از داده‌ها به دست آمده است. حال ایستگاههای ثانوی اندازه گیری می‌شوند. در حالی که آغاز و انجام اندازه گیری یک مجموعه در یکی از ایستگاههای مبنا که قبلا اندازه گیری شد صورت می‌گیرد تا بتوان تصحیح رانه را انجام داد.

اگر برداشت تنها منطقه کوچکی را پوشش دهد، اندازه‌گیری نخستین در شبکه ایستگاهی مبنا لزومی نخواهد داشت، و بازگشت گهگاهی به یک نقطه مرجع برای وارسی رانه، تنها کاری است که لازم خواهد بود. از آنجا که موقعیت و ارتفاع ایستگاهها باید دقیقا معلوم باشد، برداشت گرانی مقدار زیادی نقشه برداری توپوگرافی اولیه لازم دارد. در مناطق مسکونی معمولا قسمت بزرگی از این کار قبلا انجام یافته است، ولی در مناطق دور افتاده قبل از برداشت می باید نقشه تهیه گردد. خوشبختانه در ایران نقشه های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ برای سرتاسر کشور توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح تهیه شده است. علاوه بر این برخی مطالعات زمین شناسی نیز باید در منطقه انجام گیرد. در ضمن مطالعات زمین‌شناسی، جمع آوری نمونه های سنگ هوانزده برای تعیین چگالی ضروری است. این داده ها برای تصحیح‌های ارتفاع و زمینگان، و بعدها برای تفسیر اندازه گیریها مورد نیاز خواهند بود.

### ۳-۹-۳- پردازش داده‌های گرانی سنجی

پردازش داده های گرانی سنجی با اعمال تصحیحات و استفاده از برخی فیلترها میسر است:

#### ۳-۹-۳-۱- تصحیحات گرانی سنجی

برای پس از برداشت های گرانی انجام برخی تصحیحات بر روی داده ها ضروری است که در ادامه بررسی می‌شوند:

#### ۳-۹-۳-۱-۱- تصحیح عرض جغرافیایی

نیروی گرانش در عرض‌های جغرافیایی متفاوت، تغییر می‌نماید. به منظور تصحیح این اثر از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\frac{dg}{ds} = 1.37 \sin 2\phi \quad \text{رابطه ۳-۵۵}$$

در رابطه بالا  $\phi$  عرض جغرافیایی متوسط منطقه و  $dg/ds$  میزان تصحیح بر حسب میلی گال برای ۱ مایل در راستای شمال- جنوب می باشد.



### ۳-۹-۱-۲- تصحیح رانه دستگاه

در تمام گرانی‌سنج‌ها قرائت مقادیر گرانی با زمان تغییر می‌کند. تغییر گرانی زمین با زمان عمدتاً ناشی از خزش فشر دستگاه گرانی‌سنج است. نتیجه کلی رانه این است که در طول روز یا حتی چند ساعت در یک ایستگاه قرائت‌های تکراری یک سری مقادیر گرانی مختلف می‌دهد. در نتیجه لازم است برای حذف این اثر رانه دستگاه از داده‌های گرانی‌سنجی، در برخی از ایستگاه‌ها، در حین اندازه‌گیری به تناوب قرائت‌هایی انجام شده و منحنی رانه ترسیم گردد. منحنی رانه در حقیقت نمودار قرائت گرانی بر حسب زمان است و فرض می‌شود که تغییرات رانه دستگاه بین دو قرائت متوالی خطی است. تصحیح رانه در زمان  $t$  مقداری مانند  $d$  است که از مقدار اندازه‌گیری شده در آن ایستگاه کسر می‌شود.

### ۳-۹-۱-۳- تصحیح کشند

گرانش زمین تحت تاثیر جزئی گرانش ماه و خورشید یا همان نیروی کشند قرار گرفته و لذا تصحیحاتی به منظور حذف اثر آن ضروری است. حداکثر دامنه تغییرات گرانی حاصل از نیروی کشند،  $0/3$  میلی‌گال و دارای دوره ۱۲ ساعته است. به دلیل اینکه این تغییرات کشندی بسیار هموار و نسبتاً آرام صورت می‌گیرند، می‌توان به آسانی آن را در حین تصحیح رانه گرانی‌سنجی اصلاح کرد.

### ۳-۹-۱-۴- تصحیح ارتفاع

تصحیح گرانی ناشی از تغییرات ارتفاع ایستگاه‌های اندازه‌گیری معمولاً به سه روش انجام می‌گیرد:

#### الف) تصحیح هوای آزاد

اساس این روش بر پایه قانون جاذبه نیوتن استوار است. یعنی گرانش با عکس مربع فاصله متناسب است. به عبارت دیگر مقدار نیروی گرانش با افزایش ارتفاع نسبت به سطح آزاد دریاها کاهش می‌یابد. با تعیین ارتفاع نقاط برداشت از طریق تراز یابی، تصحیح هوای آزاد روی داده‌ها با استفاده از فرمول زیر انجام می‌گیرد:

$$\Delta g(\text{free air}) = 0.3086 \cdot h(\text{mGal/meter})$$

رابطه ۳-۵۶

#### ب) تصحیح بوگه

در تصحیح هوای آزاد فرض می‌شود که نقطه اندازه‌گیری در هوای آزاد قرار دارد و جرم بین نقطه اندازه‌گیری و سطح مبنا تاثیری روی مقادیر اندازه‌گیری ندارد، در حالی که در واقعیت این جرم نیز وجود دارد و اثر چگالی این جرم باید در تصحیح داده‌های گرانی‌سنجی اعمال شود. به این ترتیب که هر چه ارتفاع نقطه اندازه‌گیری بیشتر باشد، به دلیل وجود جرم زیادتر بین نقطه اندازه‌گیری و سطح مبنا، مقدار گرانی اندازه‌گیری شده، زیادتر خواهد شد. بنابراین تصحیح دیگری به نام تصحیح بوگه لازم خواهد بود. در تصحیح بوگه فرض می‌شود که تمام نقاط اندازه‌گیری روی سطح مبنا انجام شده و سطح اندازه‌گیری کاملاً یکنواخت است. این جرمی که ضخامت و چگالی یکنواخت و گسترش افقی بی-نهایت دارد، در اصطلاح تخته بوگه نامیده می‌شود. اثر تخته بوگه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta g(\text{Bouguer}) = 2\pi G\rho h$$

رابطه ۳-۵۷

در این رابطه،  $h$  ضخامت،  $\rho$  چگالی منطقه برداشت، و  $G$  همان ثابت جهانی گرانش می‌باشد.



### ج) تصحیح توپوگرافی

پستی و بلندی‌های پیرامون ایستگاههای برداشت گرانی، بر روی گرانش ثبت شده اثر می‌گذارند. ربایش حاصل از بلندی‌ها به سمت بالا و عدم ربایش حاصل از پستی‌ها به سمت پائین است از این رو هر دو باعث کاهش مقدار گرانی در نقطه اندازه گیری می‌شوند. بنابراین تصحیح توپوگرافی یا زمینگان همیشه مثبت بوده و به مقادیر اندازه گیری شده افزوده می‌شود. برای انجام این نوع تصحیح، از الگوی ترسیمی که تحت عنوان نمودارها و جداول هامر نامیده می‌شوند، استفاده می‌شود. اختلاف بین گرانی اندازه گیری شده و گرانی که با در نظر گرفتن همه اثرها و تصحیحات فوق‌الذکر به دست می‌آید را ناهنجاری بوگه گویند. بی‌هنجاری بوگه برای تمامی ایستگاهها محاسبه شده و به صورت نقشه های هم گرانی ترسیم می‌شوند.

### ۳-۹-۳-۲- فیلترها

#### الف - گرادیانهای گرانی

بعد از آن که مقادیر ناهنجاری بوگه محاسبه گردید، نقشه مربوطه وجود ناهنجاری را به خوبی نشان خواهد داد. به منظور تفسیر کیفی و کمی و تایید محل ناهنجاری مقادیر گرادیان های گرانی به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

#### الف - مشتقات قائم

این مشتقات برای هر چه بهتر نشان دادن ناهنجاری‌های سطحی به کار می‌روند. به عبارت دیگر ناهنجاری‌های با عمق کمتر در روی نقشه های مشتقات قائم دارای وضوح بیشتری خواهند بود. برای محاسبه مشتقات قائم از روش FFT و فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial g^N}{\partial (Z^N)} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} Go(p, q) (p^2 + q^2)^{\frac{N}{2}} \exp(i(px + qy)) dpdq$$

رابطه ۳-۵۸

که در آن  $Go(p, q)$  تبدیل فوریه داده های گرانی می باشد. برای مشتق اول قائم  $N=1$  و برای مشتق دوم  $N=2$  خواهد بود.

#### ب- ادامه-فروسو (Downward Continuation)

به منظور تخمین عمق ناهنجاری گرانی می توان از این روش (استفاده از فیلتر ادامه فروسو) استفاده کرد. یعنی با انتقال داده ها به سطوح پایین تر (ادامه فروسو) با عبور از عمق مربوط به حضور ناهنجاری ، اثر آن در روی نقشه حذف شده و به این ترتیب عمق تقریبی آن تعیین می شود. در این روش داده ها به طور کلی توسط اعمال ضرایب فیلتر (FFT) به سمت پایین جابجا می شوند :

$$gz(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} Go(p, q) \bar{z} \sqrt{p^2 + q^2} \exp(i(px + qy)) dpdq$$

رابطه ۳-۵۹

با اعمال فیلترهای مناسب مثل فیلتر ادامه فروسو بر روی داده ها می توان عمق ناهنجاریها را تخمین زد.



## پ- روش سیگنال تحلیلی (Analytical signal)

به منظور تعیین حدود ناهنجاری از روش سیگنال تحلیلی استفاده می‌کنیم. در این روش مقدار تابع زیر را در تمام نقاط شبکه محاسبه نموده که ماکزیمم آن بیانگر گوشه‌های ناهنجاری زیر سطحی می‌باشد.

$$|A(u, v)| = \sqrt{\left\{ \left( \frac{\partial^2(g)}{\partial u \partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2(g)}{\partial u \partial z^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2(g)}{\partial z^2} \right)^2 \right\}} \quad \text{رابطه ۳-۶۰}$$

بنابراین ناهنجاریهایی که دارای دیواره‌های بارز (Sharp) باشند در روی این نقشه‌ها، ناهنجاری مثبت نشان می‌دهند.

## ۳-۹-۴- تعبیر و تفسیر

بطور کلی ناهنجاری بوگه در هر ایستگاه مجموع ناهنجاری ناحیه‌ای و ناهنجاری باقیمانده است که مربوط به اثرات ثقلی ساختمانهای مورد نظر است. برای بدست آوردن ناهنجاری باقی مانده باید اثر ناهنجاری ناحیه‌ای را از ناهنجاری بوگه حذف کرد. روشهای گوناگونی برای این مقصود وجود دارند. برای مثال با استفاده از روشهای ترسیمی اثرهای منظم محلی را از مقاطع و نقشه‌های گرانی حذف می‌کنند تا مقادیر باقیمانده که مربوط به ناهنجاری‌های موجود است خود را نشان دهند.

البته روشهای تحلیلی پیچیده‌تری نیز وجود دارد که با استفاده از میانگین‌گیری مقادیر و یا استفاده از روشهای مشتق دوم و یا استفاده از برازش سطوح هندسی با درجات مختلف به تعیین مقدار ناهنجاری باقیمانده می‌پردازند.







## فصل چهارم

---

مثال‌هایی از کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی  
در پروژه‌های راهسازی





## ۴-۱- مقدمه

هدف از ارائه این فصل آشنایی خوانندگان و کاربران دستورالعمل با مثال‌هایی عملی از پروژه‌های ژئوفیزیکی اجرا شده در زمینه‌های مختلف مرتبط با پروژه‌های راهسازی، اهداف در نظر گرفته شده، نحوه گردش کار انجام شده، شیوه انجام و نحوه ارائه نتایج در گزارش‌های مربوطه تا حدی که منابع موجود اجازه آن را فراهم می‌آورد، می‌باشد. قدر مسلم منابع موجود در این زمینه متعدد و متنوع هستند و انتخاب از میان آنها تا حدی سلیقه‌ای خواهد بود. در انتخاب مطالعات موردی ارائه شده در این فصل، تلاش شده است مواردی انتخاب شود که در درجه اول از مجموعه روش‌های ژئوفیزیکی متنوعتری بهره‌گیری کرده باشند و علاوه بر آن از توصیف و تشریح مناسبی از جزییات اهداف مورد نظر و شیوه هدایت و انجام کار برخوردار باشند.

#### ۴-۲- مثال اول: مطالعات ژئوفیزیکی در تونل‌های بخش غربی کنارگذر شمالی کورک (Hodgson, 2007)

شهر کورک دومین شهر بزرگ ایرلند است و ایجاد کمربندی شمالی این شهر از پروژه‌های عمرانی مهم در این شهر با تصمیم شورای این شهر می‌باشد. مشاور مادر در اجرای این پروژه شرکت Fehily Timoney Gifford انتخاب گردید که به نوبه خود مشاورین BMA Geoservices را به عنوان مشاور ژئوفیزیک پروژه برگزید. مطالعه موردی ارائه شده در این بخش برگرفته از گزارش ارائه شده توسط این مشاور برای مطالعات ژئوفیزیک ۵ تونل در بخش غربی کمربندی شمالی است. هدف اصلی مطالعات بررسی شرایط زیرسطحی تا عمق ۱۰۰ متری در محل ۵ تونل پیشنهادی در نظر گرفته شده در این مسیر بوده است. روش‌های ژئوفیزیکی در نظر گرفته شده شامل برداشتهای دو بعدی مقاومت الکتریکی و شکست مرزی لرزه‌ای و تاریخ عملیات برداشت از ۹ تا ۳۰ ژوئای، ۳۰ و ۳۱ آگوست ۲۰۰۷ بوده است. شرایط آب و هوایی زمان برداشت متغییر اما به طور کلی نامناسب با بارش‌های سنگین گزارش شده است. اهداف پروژه به تفکیک شامل موارد زیر بوده است:

- تعیین شرایط زیرسطحی تا اعماق ۱۰۰ متری
- برآورد ماهیت و ضخامت خاک روباره
- تخمین عمق و کیفیت سنگ کف
- کمک به شناسایی تغییرات در جنس سنگ کف

روش مقاومت الکتریکی برای تخمین ضخامت روباره و تخمین تغییرات در جنس سنگ کف و روش لرزه‌ای شکست مرزی برای تعیین سختی (Stiffness) روباره و تخمین عمق سنگ کف انتخاب شد. مجموعاً ۱۸ پروفیل مقاومت الکتریکی ۲ بعدی و ۳۶ پروفیل شکست مرزی برداشت شده است. در مواردی که امکان آن وجود داشته است نتایج مطالعات با اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از حفاری‌های تامین شده بوسیله مشاورین Fehily Timoney Gifford تطبیق داده شده است.

گزارش مطالعات ژئوفیزیک پروژه در قالب گزارشی مشتمل بر دو بخش بدنه اصلی گزارش و سه پیوست ارائه گردیده است. بدنه اصلی گزارش به توصیف کلی اهداف پروژه، موقعیت و طول قطعات مختلف تونلی در نظر گرفته شده، وضعیت زمین‌شناسی عمومی، ابعاد و احجام برداشتهای ژئوفیزیکی انجام شده در طول محورهای تونلی و نتایج نهایی حاصل از مطالعات در محل هر تونل اختصاص داده شده است. پیوست اول (A) گزارش حاوی نقشه‌های موقعیت تونل‌ها و

موقعیت برداشتهای ژئوفیزیکی انجام شده بر روی نقشه‌های پایه با مقیاس مناسب حاصل از نقشه برداری محلی است که نمونه‌ای از آن در شکل ۴-۱ آورده شده است. پیوست دوم (B) نتایج تفسیر مقاطع مقاومت الکتریکی و پروفیل‌های لرزه-نگاری (شکل‌های ۴-۲ و ۴-۳ به عنوان نمونه) را ارائه می‌دهد و در پیوست سوم (C) متدولوژی برداشت داده‌ها نشان داده شده است. در این پیوست روش‌های مورد استفاده، تجهیزات بکار گرفته شده، نحوه برداشت میدانی، پردازش داده‌ها و تحلیل خطاها تشریح گردیده‌اند.

استفاده از نقشه، جداول، نمودار و مقاطع ابزارهای مناسبی هستند که گزارش و پیوستهای آن برای انتقال گویای نتایج به کاربران، از آنها بهره گرفته است که در ادامه نمونه‌هایی از آنها ارائه می‌گردد.

#### ۴-۲-۱- توصیف محل و وضعیت زمین‌شناسی

موقعیت تونل‌ها و برداشتهای ژئوفیزیکی انجام شده بر روی نقشه‌های ارائه شده در پیوست ۱ گزارش (به عنوان نمونه شکل ۴-۱ برای تونل‌های ۱، ۳ و ۴) و نیز بصورت جداولی در بدنه اصلی گزارش (جداول ۴-۱ تا ۴-۳) بیان شده است. زمین‌شناسی محل‌های مورد مطالعه بر مبنای نقشه زمین‌شناسی کورک جنوبی (ورقه شماره ۲۵) ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایرلند تشریح گردیده است.

از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از آهکهای کربنیفر سازندهای Little Island و سازند آهکی Waulsortain تشکیل شده است. سنگ‌های قدیمی‌تر با سن دونین شامل سازندهای ماسه سنگهای قرمز قدیمی و سازندهای Gyleen و Ballytrasna هستند. رسوبات روبراه عمدتاً از تیل‌هایی منشا گرفته از ماسه سنگهای دونین، تشکیل شده‌اند.

#### ۴-۲-۲- تجهیزات مورد استفاده و برداشت داده‌ها

همانگونه که اشاره شده توصیف روش‌های مورد استفاده، تجهیزات بکار گرفته شده، عملیات صحرائی انجام شده و تحلیل منابع خطا در پیوست سوم گزارش در قالب عناوین جداگانه آورده شده‌اند که در اینجا بصورت خلاصه به آن اشاره می‌شود. در این مطالعه از دو روش مقاومت الکتریکی ۲ بعدی و شکست مرزی استفاده شده است.

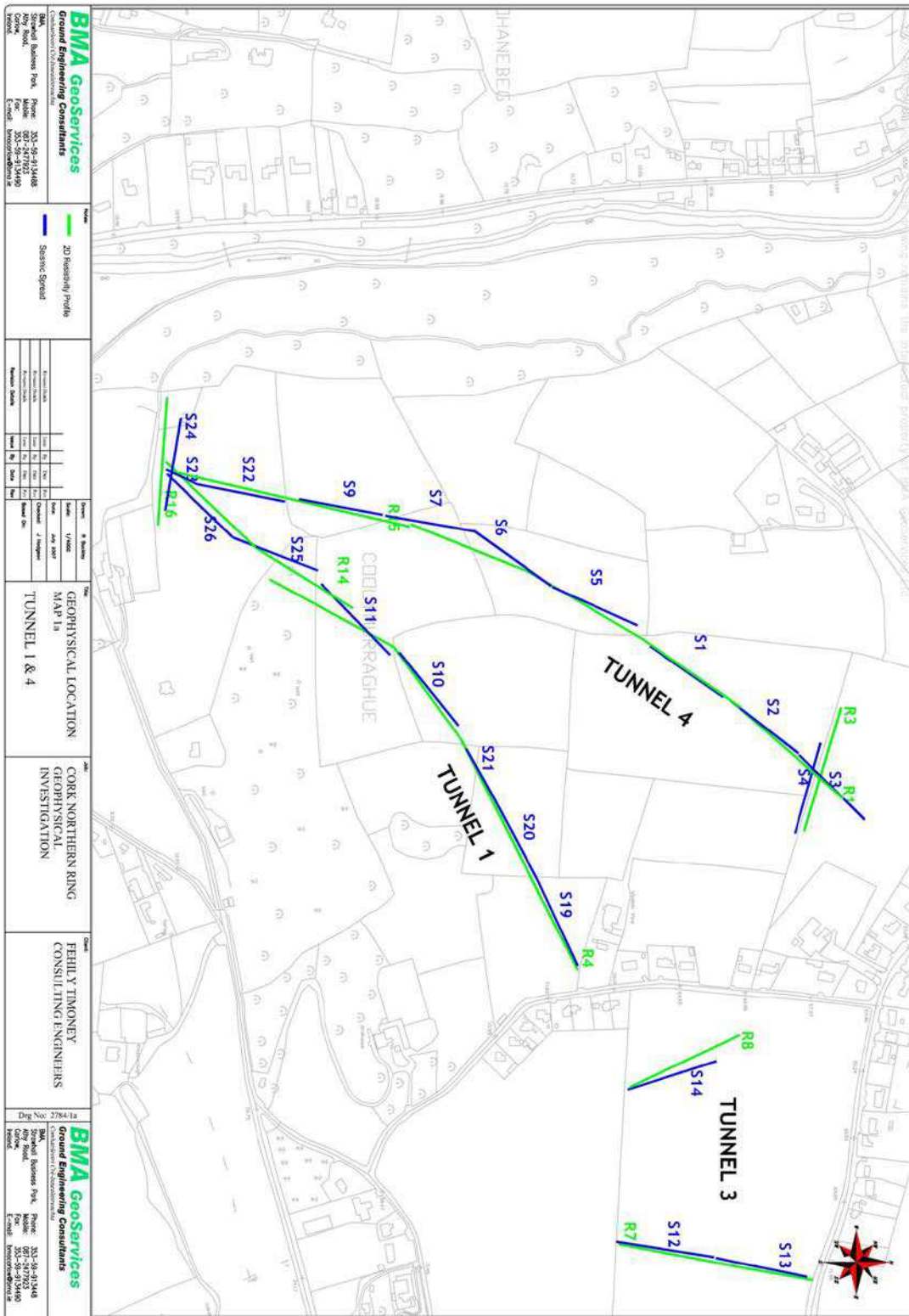
دستگاه مقاومت سنج TIGRE، ۴ کابل چند رشته‌ای هر یک با ۳۲ خروجی و در کل ۱۲۸ الکتروود فولادی ضدزنگ تجهیزات مورد استفاده در برداشت مقاطع مقاومت الکتریکی را شامل می‌گردند. تجهیزات مورد استفاده برای روش شکست مرزی شامل لرزه نگارهای ۲۴ کاناله SmartSeis، کابل و ۲۴ ژئوفون مولفه قائم بوده است. برای چشمه لرزه‌ای مورد استفاده نیز از ضربات پتک بر روی صفحه فلزی استفاده شده است.

برداشت‌های مقاومت الکتریکی با آرایه ونر انجام شده و برای به دست آوردن مقاومت که یک پارمتر کمی مستقل از شرایط آزمایش و خصوصیات ویژه انواع مختلف خاک و سیالات است، از فرمول زیر استفاده شده است:

$$\text{Resistance} = 2\pi \times \text{spacing} \times \text{Resistivity} \times \tan \delta \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

در مقاومت الکتریکی ۲ بعدی، برداشت-جهت‌جانبی و قائم برای تهیه نقشه تغییرات نوع مواد سازنده زمین در این جهات انجام شده است. این امر با روشهای مختلفی به وسیله اتصال یکسری از الکتروودها به مقاومت سنج و به کار بردن یک کامپیوتر برای کنترل فرایند گردآوری و ذخیره سازی داده‌ها انجام شده است.





شکل (۱-۴) موقعیت برداشت‌های شکست مرزی و مقاوت الکتریکی در تونلهای ۱، ۳ و ۴



در مجموع ۱۸ پروفیل دو بعدی مقاومت الکتریکی با بازه‌های ۵ متری بین الکترودها برداشت شده است (جدول ۴-۴). برای اطمینان از اتصال مناسب آنها با زمین، کنترل لازم صورت گرفته است و در موارد عدم اتصال مناسب الکترودها به دلیل شرایط محلی زمین از آب نمک برای بهبود شرایط استفاده شده و کنترل‌های مجدد تا زمان اطمینان از اتصال مناسب بعمل آمده است. وارون سازی ساده و اولیه داده‌ها در محل برداشت برای کنترل کیفیت داده های برداشت شده، انجام شده است.

روش شکست مرزی نیز در ۳۶ مقطع لرزه‌ای برداشت شده و در همه برداشت‌ها از ۱۲ یا ۲۴ ژئوفون در یک امتداد با فواصل ۵ متری تشکیل استفاده شده است. در هر برداشت، برای اطمینان از پوشش همه سطوح بازتابنده (Refractor) امواج، از ۵ چشمه لرزه‌ای، ۴ تا در دو انتهای آرایش و یکی در نقطه میانی استفاده شده است.

جدول (۴-۱) موقعیت تونل‌های در نظر گرفته شده برای ساخت

شماره تونل	طول	موقعیت انتهایی غربی		موقعیت انتهایی شرقی	
		شرق	شمال	شرق	شمال
۱	۸۳۳	۱۶۰۷۸۰	۷۲۱۹۵	۱۶۱۴۱۴	۷۲۷۵۹
۲	۴۲۰	۱۶۲۲۴۴	۷۲۹۲۳	۱۶۲۱۹۶	۷۳۳۰۸
۳	۹۷۰	۱۶۱۵۵۴	۷۲۳۷۸	۱۶۱۹۱۴	۷۳۲۶۴
۴	۹۴۸	۱۶۰۷۶۱	۷۲۱۴۶	۱۶۱۱۴۴	۷۳۰۲۶
۵	۱۱۱۰	۱۵۶۷۹۹	۷۱۳۶۹	۱۵۷۴۸۰	۷۲۲۴۸

جدول (۴-۲) مشخصات برداشت های مقاومت الکتریکی

تونل	طول (متر)	طول برداشت به موازات تونل (متر)	طول برداشت نشده به دلیل مشکلات دسترسی (متر)	طول برداشت عرضی
۱	۸۳۳	۹۵۰	۴۳	۱۵۵
۲	۴۲۰	۳۹۵	۲۵	۱۵۵
۳	۹۷۰	۹۷۰	۰	۱۵۵
۴	۹۴۸	۹۵۰	۸۴	۳۱۰
۵	۱۱۱۰	۷۹۰	۳۶۸	۴۶۵
جمع	۴۲۸۱	۴۰۵۵	۵۲۰	۱۲۴۰

جدول (۴-۳) مشخصات برداشت های شکست مرزی

تونل	طول (متر)	طول برداشت به موازات تونل (متر)	طول برداشت نشده به دلیل مشکلات دسترسی (متر)	طول برداشت عرضی
۱	۸۳۳	۸۰۵	۴۳	۱۵۵
۲	۴۲۰	۳۴۵	-	۱۵۵
۳	۹۷۰	۲۳۰	-	۱۵۵
۴	۹۴۸	۹۶۵	۸۴	۲۳۰
۵	۱۱۱۰	۷۴۵	۳۶۸	۲۳۰
جمع	۴۲۸۱	۳۰۹۰	۴۹۵	۸۰۵

جدول (۴-۴) موقعیت پروفیل‌های مقاومت الکتریکی دو بعدی

نام پروفیل	شماره تونل	فاصله الکترودها (m)	طول (m)	آزیموت	عمق ظاهری (m)
2DRES1	۴	۵	۶۳۵	NE-SW	۱۰۵
2DRES3	۴ عرضی	۵	۱۵۵	E-W	۲۵
2DRES4	۱	۵	۶۳۵	NE-SW	۱۰۵
2DRES5	۲	۵	۳۹۵	S-N	۶۵
2DRES6	۲ عرضی	۵	۱۵۵	W-E	۲۵
2DRES7	۳	۵	۲۴۵	S-N	۴۰
2DRES8	۱ عرضی	۵	۱۵۵	NW-SE	۲۵
2DRES9	۵ عرضی	۵	۱۵۵	N-S	۲۵
2DRES10	۵	۵	۶۳۵	N-S	۱۰۵
2DRES11	۵	۵	۱۵۵	S-N	۲۵
2DRES12	۵ عرضی	۵	۱۵۵	W-E	۲۵
2DRES13	۵ عرضی	۵	۱۵۵	SE-NW	۲۵
2DRES14	۱	۵	۳۱۵	S-N	۵۰
2DRES15	۴	۵	۳۱۵	S-N	۵۰
2DRES16	۱ و ۴ عرضی	۵	۱۵۵	W-E	۲۵
2DRES17	۳	۵	۶۳۵	SW-NE	۱۰۰
2DRES18	۳	۵	۳۴۵	SW-NE	۵۵
2DRES19	۳ عرضی	۵	۱۵۵	W-E	۲۵

#### ۴-۲-۳- پردازش داده‌ها و تفسیر نتایج

داده‌های حاصل از مقاومت سنجی، با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV (تهیه شده بوسیله Campus Geophysical Instruments, ۱۹۹۷) با وارون‌سازی در ۵ تکرار، برای به دست آوردن مدل ۲ بعدی شرایط مقاومت الکتریکی زیرسطحی پردازش شدند. نتایج حاصل به صورت پروفیل‌های ۲ بعدی که یک محور عمق و محور دیگر فاصله را در طول پروفیل نمایش می‌دهند، ارائه شده‌اند. مقادیر مقاومت و تغییرات آنها در طول پروفیل با طیف رنگی در هر مقطع مشخص شده است. شکل ۲-۴ نمونه‌ای از این پروفیل‌ها را به همراه تفسیر زمین‌شناسی آن نمایش می‌دهد. برای پردازش داده‌های شکست مرزی مراحل زیر طی شده است:

- زمانهای اولین رسید موج به هر ژئوفون (First Break) مشخص شده و منحنی‌های زمان-سیر برای هر برداشت تهیه شد.
- سرعت لرزه‌ای هر یک از منحنی‌های زمان-سیر استخراج شده و بر اساس آن ضخامت نظیر سرعت‌های مختلف بدست‌آمده با استفاده از روش زمان-تقاطع (intercept-time method) محاسبه شده است.
- پردازش داده‌ها در این مطالعه با نرم‌افزارهای FIRSTPIX و GREMIX (Interpex, 1997, 1998) انجام شده است. شکل ۳-۴ به طور نمونه منحنی زمان-عبور، مقطع عمقی و منحنی سرعت را برای یک نقطه ارائه می‌دهد.



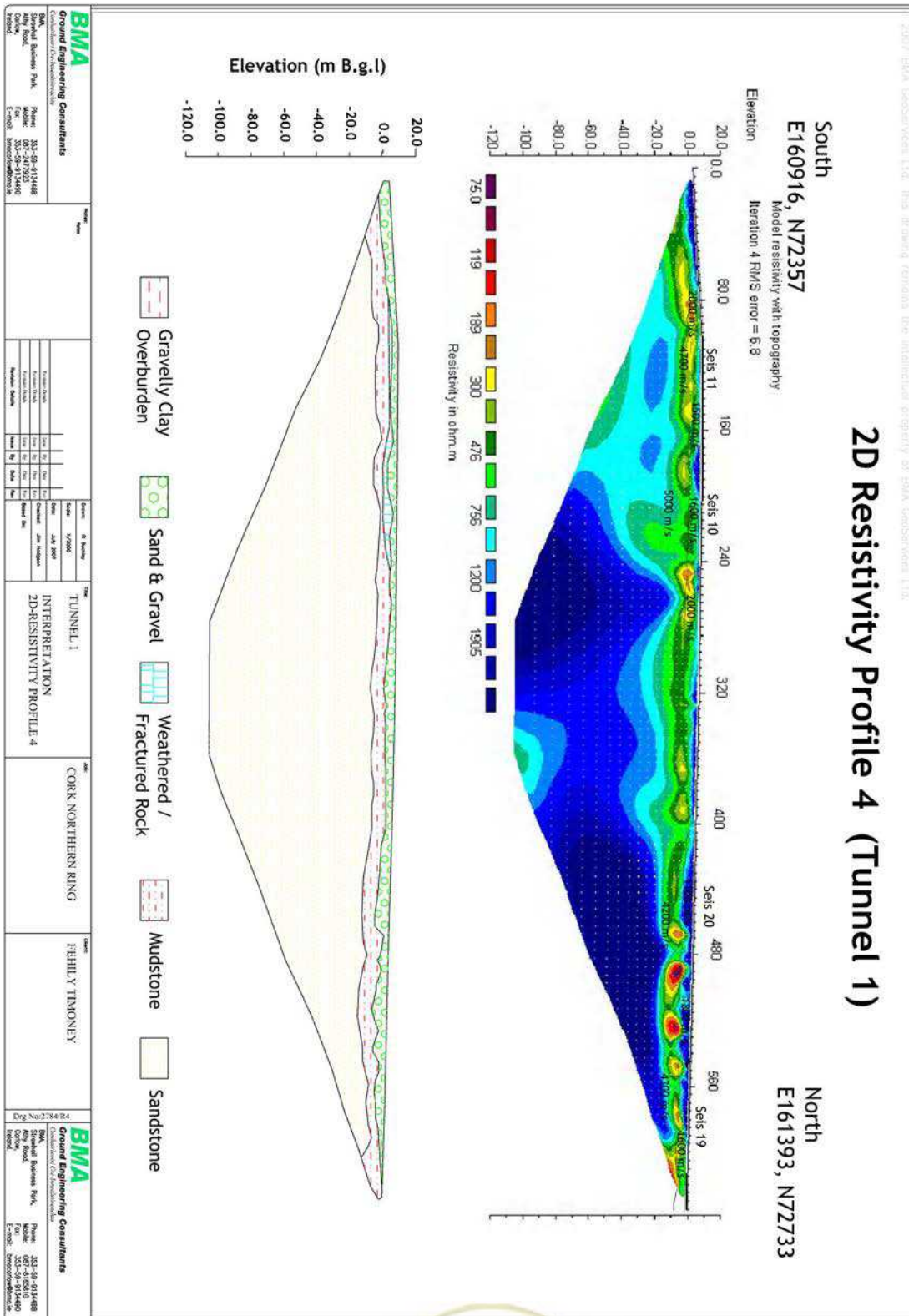
#### ۴-۲-۴- نتایج

نتایج نهایی مطالعات در بدنه اصلی گزارش ارائه شده که به تلفیق نتایج حاصل از برداشتهای ژئوفیزیکی با اطلاعات زمین‌شناسی پرداخته است. در تفسیرهای انجام شده، اطلاعات واقعی موجود، پاسخ‌های شاخص ژئوفیزیکی مواد شناخته شده و تجربه نویسندگان مد نظر بوده‌اند. توصیف نتایج برای محل هر تونل تحت عنوانی مستقل با ارائه توضیحات متنی و جدولی خلاصه از پارامترهای بدست آمده برای لایه‌های مختلف و نتایج کاربردی آنها مانند کیفیت توده سنگ و قابلیت شکافت پذیری آن آورده شده است. به عنوان نمونه برای تونل شماره ۱ نتایج به شرح زیر است.

پروفیل‌های مقاومت الکتریکی ۱۴ و ۴ و پروفیل‌های لرزه ای ۱۰، ۱۱، ۲۰، ۲۱، ۲۵ و ۲۶ با امتداد تقریبی SW-NE در طول تونل شماره ۱ برداشت شده‌اند. علاوه بر این در دو امتداد عرضی یکی در شمال با پروفیل الکتریکی ۸ و لرزه‌ای ۱۴ و دیگری در جنوب با پروفیل الکتریکی ۱۶ و لرزه ای ۲۴ برداشت شده‌اند (شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۳). در بخش جنوبی تونل ۱ و در طول پروفیل الکتریکی ۱۴، چهار لایه اصلی شناسایی شده است (i) یک لایه نازک از خاک سطحی متشکل از ماسه و شن (ii) سنگ کف خرد شده (iii) گلسنگ و (iv) سنگ کف ماسه سنگی

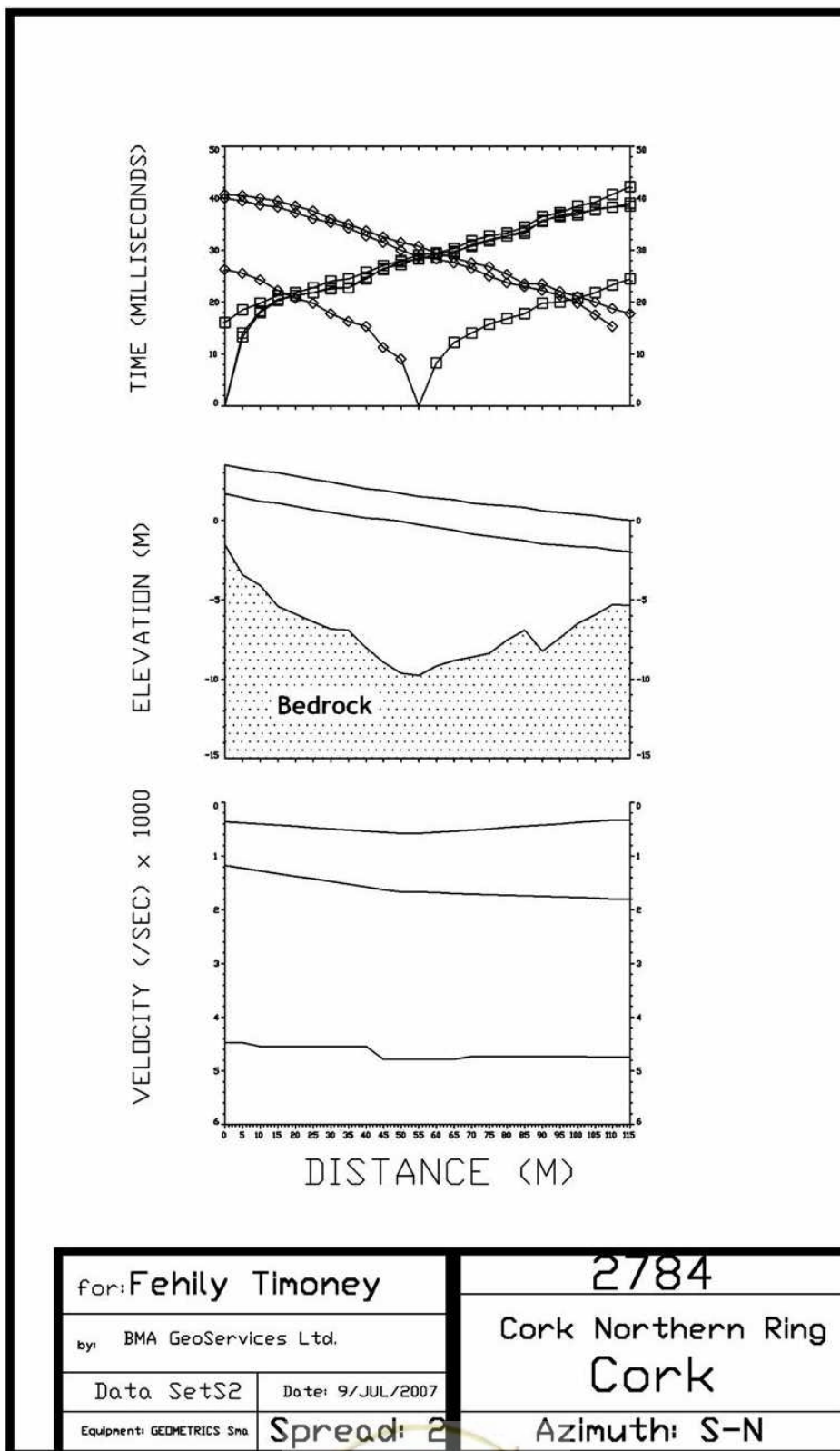






شکل (۴-۲) نمونه ای از پروفیل های دو بعدی ژئوالکتریک و تفسیر زمین شناسی آن در تونل ۱





شکل (۳-۴) منحنی زمان-عبور، مقطع عمقی و منحنی سرعت برای یک نقطه به صورت نمونه



ضخامت لایه روباره از خیلی کم عمق (کمتر از ۱ متر) تا ۹ متر متغیر است. یک لایه با ضخامت متغیر در طول پروفیل که به عنوان یک لایه سنگی هوازده/خردشده تفسیر شده است در زیر این لایه سطحی قرار دارد. مقاومت الکتریکی ثبت شده برای این لایه عموماً کمتر از ۱۰۰۰ اهم-متر است. از این رو می‌توان چنین برداشت کرد که در بخش جنوبی پروفیل ۱۴ که مقاومت الکتریکی بیش از ۱۰۰۰ اهم-متر ثبت شده است، لایه‌ای از ماسه سنگ متراکم قرار دارد. به نظر می‌رسد یک منطقه گسلی در فاصله ۱۷۵ تا ۲۰۰ متری از طول پروفیل ۱۴ وجود داشته باشد. در این منطقه یک تفاوت شدید در مقادیر مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود که تا اعماق نیز ادامه دارد. احتمالاً سنگهای خرد شده دیگری در این محدوده وجود دارد.

یک لایه از گلسنگ با مقاومت الکتریکی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم-متر در طول پروفیل‌های ۱۴ و ۴ وجود دارد که به سمت شرق از ضخامت آن کاسته می‌شود. بخش جنوبی از تونل ۱ در طول پروفیل الکتریکی ۱۴، تباین کمتری در مقادیر مقاومت الکتریکی لای‌ها نشان می‌دهد. در زیر این لایه گلسنگ، لایه ماسه سنگی متراکم با مقاومت الکتریکی بیش از ۱۰۰۰ اهم-متر مشاهده می‌شود.

پروفیل عرضی در بخش شمالی، ماسه و شن با ضخامت ۱ تا ۵ متر بر روی یک لایه ۶ تا ۱۲ متری از ماسه سنگ هوازده را نشان می‌دهد. در زیر این لایه‌ها، لایه سنگی و متراکم با ضخامت ۸ تا ۱۳ متر و سرعت موج بسیار زیاد در حدود ۴۰۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفته است که به عنوان ماسه سنگ متراکم تفسیر شده است.

پروفیل عرضی برداشت شده برای تونل‌های ۱ و ۴ در بخش جنوبی، نشان می‌دهد ضخامت لایه شن و ماسه‌ای از ۲ تا ۵/۵ متر متغیر است که بر روی لایه سنگ خرد شده با سرعت موج بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بر ثانیه قرار گرفته است. به سمت غرب لایه‌های گلسنگ با همراه ماسه سنگ متراکم وجود دارد. جدول ۴-۵ خلاصه وضعیت لایه‌بندی زمین شناسی در تونل ۱ را ارائه می‌دهد.

جدول (۴-۵) خلاصه خصوصیات ژئوفیزیکی لایه‌های زمین در تونل ۱

تفسیر	ضخامت (m)	سرعت موج (m/s)	مقاومت الکتریکی (ohm-m)	سختی و کیفیت سنگ برآورد شده	شکاف پذیری (Rippability)
شن و ماسه/خاک روباره	۱-۹	۴۰۰	۱۲۰۰-۲۰۰	سست تا سفت	شکاف پذیر
سنگ خرد شده	۱/۵-۱۳	۱۱۰۰-۲۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰	متوسط تا سخت	شکاف پذیر تا کمی شکاف پذیر
گلسنگ و ماسه سنگ متراکم		۴۱۰۰-۵۰۰۰	۲۵۰ تا بیش از ۲۰۰۰	سخت	شکننده- انفجاری

#### ۴-۳- مثال دوم: مطالعات ژئوفیزیکی برای شناسایی‌های زمین‌شناسی در پروژه بزرگراهی دهانه

##### خلیج Ise (ژاپن)

این مثال برگرفته از مقاله Inazaki و همکاران ۲۰۰۲ ارائه شده در دومین کنفرانس سالانه کاربردهای ژئوفیزیک و روشهای غیر مخرب در تاسیسات حمل و نقل و زیربنایی است. این مثال از اینرو انتخاب گردیده است که روشهای مختلف ژئوفیزیکی در کنار هم برای شناسایی وضعیت زمین در منطقه‌ای که به لحاظ بررسی‌های مستقیم زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی با موانع طبیعی روبرو است، بکار گرفته شده‌اند.

در جریان مطالعات و طراحی ساخت یک بزرگراه در دهانه خلیج Ise در قسمت مرکزی ژاپن (شکل ۴-۴)، مطالعات

ژئوفیزیکی گسترده‌ای بصورت سیستماتیک از سال ۱۹۹۲ انجام شده است. طول کلی بزرگراه مذکور ۹۰ کیلومتر که ۲۰ کیلومتر آن در بخش دریایی در دهانه خلیج Ise، در امتداد دیواره‌های شبه جزیره‌ای سازنده دهانه در نظر گرفته شده طراحی شده بود. این پروژه به عنوان بخشی از یک محور مواصلاتی جدید با نام "محور ملی جدید ساحلی اقیانوس آرام" به همراه پروژه‌های بزرگراهی دیگر در نظر گرفته شده در نواحی ساحلی اقیانوس آرام پیشنهاد گردید. طرح جامع (master plan) مسئله در سال ۱۹۸۵ تهیه شد و بررسی‌های زمین‌شناسی از سال ۱۹۹۰ آغاز شد.

روش ساخت در بخش دهانه‌ای خلیج بصورت احداث یک پل دریایی با دهانه بزرگ و یکسری تونل‌های زیردریایی به عنوان تاسیسات اصلی در این بخش پیشنهاد شده بود. عدم شناخت کافی از وضعیت زمین‌شناسی و مشکلات مربوط به مطالعات زمین‌شناسی مستقیم منجر به عدم اطمینان طراحان از تناسب شرایط زمین‌شناسی و ویژگی‌های فیزیکی سنگها و تاب باربری آنها در مقابل سازه‌های در نظر گرفته شده ایجاد کرده بود.

به همین دلیل شناسایی‌های ژئوفیزیکی گسترده با اجرای روشهای مختلف شامل روش بازتابی لرزه‌ای دریایی، روش شکست مرزی زیرآبی، مغناطیس سنجی دریایی، لرزه‌نگاری خشکی و چاه‌نگاری در مراحل اولیه پروژه مد نظر قرار گرفت. در این راستا بیش از ۳۰۰ کیلومتر برداشتهای لرزه‌ای بازتابی منفرد و ۴۰ کیلومتر برداشت چند کاناله در طول ۴ سال قرارداد برداشت گردید. داده‌های به دست آمده برای تهیه نقشه ضخامت رسوبات و مناطق با برونزد سنگی بستر دریا، شناسایی مناطق کم سرعت یا خرد شده در سنگ کف و شناسایی گسلهای موجود مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های ژئوفیزیک دریایی، همراه با داده‌های لرزه‌ای برداشت شده در خشکی و بررسی‌های زمین‌شناسی، وضعیت زمین‌شناسی پیچیده‌ای را آشکار ساخت بطوریکه ۵ روند عمده زمین‌شناسی در یک پهنه باریک حدود ۱۰ کیلومتری دهانه خلیج قابل تفکیک است. بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، مسیرهای مختلفی که از بخشهای مناسب برای ساخت پل یا تونل می‌گذشت در نظر گرفته شد. سپس بررسی‌های مقایسه‌ای بین مسیرها با در نظر گرفتن هزینه‌ها و زمان لازم برای ساخت، مشکلات طراحی لرزه‌ای، تاثیر محیط طبیعی و اثر آن بر روی شبکه حمل و نقل ناحیه‌ای مد نظر قرار گرفت.

#### ۴-۳-۱- وضعیت زمین‌شناسی و اهداف بررسی‌های ژئوفیزیکی

از آنجا که استفاده از روشهای متنوع ژئوفیزیکی بیان شده در این پروژه، هر کدام با هدفی خاص و در ارتباط با مسائل زمین‌شناسی مورد سوال موثر در انتخاب مسیر نهایی و طراحی پروژه است در این بخش وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی به اختصار شرح داده می‌شود.

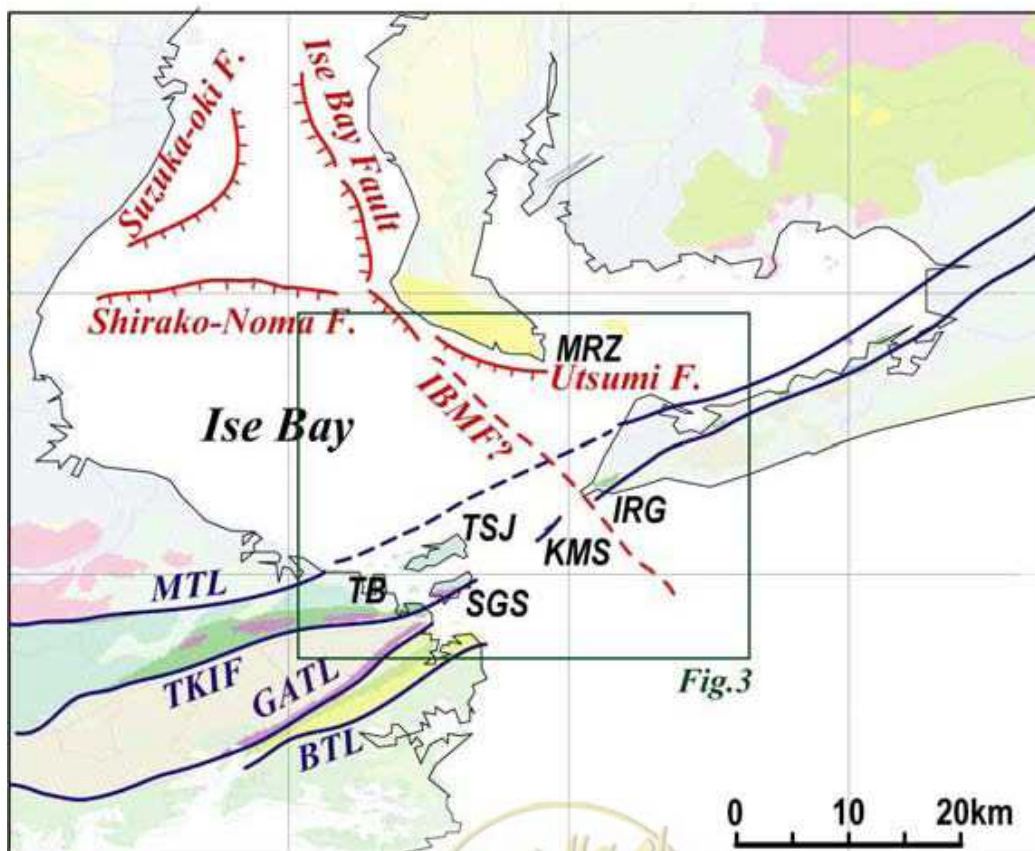
شکل ۴-۴ چارچوب زمین‌ساخت منطقه را نشان می‌دهد. از نظر زمین‌شناسی سنگ کف منطقه اساساً از گوه‌های افزایشی (Accerational Complexes) حاشیه زونهای فرورانش، سنگهای دگرگونی منشاء گرفته از این گوه‌های افزایشی و سنگهای گرانیتی تشکیل شده است. این سنگها در واقع مخلوطی از سنگهای پوسته اقیانوسی و رسوبات کمر بند فرورانش هستند. این مجموعه‌های افزایشی در واقع پهنه‌های زمین‌ساختی خطی هستند که مشخصه مناطق حاشیه جزایر ژاپن می‌باشد و در طولی بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر قابل ردیابی است. ۴ واحد عمده از این نوع در منطقه نمایان است که از شمال به جنوب عبارتند از: کمر بند دگرگونی Ryoke، کمر بند دگرگونی Sanbagawa، کمر بند Chichibu و کمر بند Shimanto. بین این کمر بندها به عنوان خطوط زمین‌ساختی از نوع گسل‌های بزرگ مقیاس مشخص شده است که دارای پهنه‌های خردشدگی بسیار عریض بوده و همانند خود این کمر بندها در طول بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر قابل مشاهده‌اند.

خطواره MTL در حدفاصل کمر بندهای Ryoke و Sanbagawa مهمترین خطواره تکتونیکی است که جزایر ژاپن را

به دو قسمت درونی و بیرونی تقسیم کرده و چند بخش از آن هنوز فعال بوده و عنوان پهنه‌های لرزه‌زا به شمار می‌آیند. از این رو یکی از نیازهای پروژه ساخت بزرگراه تعیین موقعیت MTL در دریا، تشخیص اینکه آیا رسوبات جوان نیز از این خطواره تاثیر پذیرفته‌اند و نیز تعیین خصوصیات فیزیکی مناطق خردشده همراه با این خطواره، بوده است. گسل‌های TKIF و GATL که به نظر می‌رسند در قسمت دریایی دهانه خلیج به هم نزدیک شده باشند، به آوردن سنگهای اولترامافیک و سرپانتینیت به سطح شناخته شده هستند. سنگهای سرپانتینیتی به داشتن سطحی صابونی و تغییرشکل آسان بخوبی شناخته شده و لذا بشدت برای احداث پی پلها یا عبور تونلها نامناسب هستند. بنابراین یکی دیگر از نیازهای مهم طراحان اطلاع از وجود احتمالی قطعات ناشناخته سرپانتینیت در بخش دریایی کار بود.

با استفاده از بازتابش لرزه‌ای یک و چندکاناله چندین گسل فعال در درون خلیج Ise شناسایی شدند (شکل ۴-۴). گسل دیگری به نام IBMF که در شکل ترسیم شده، براساس شواهد صحرایی نبوده بلکه برای توجیه وضعیت پیچیده زمین شناسی مشاهده شده در بخش خشکی منطقه مورد بررسی در محل مشخص شده فرض گردیده است. یکی دیگر از مسائل مهم در این مطالعه تعیین صحت یا عدم صحت محل پیشنهاد شده برای این گسل بوده است.

علاوه بر موارد فوق تهیه نقشه عمق سنگ کف و برآورد خصوصیات ژئوتکنیکی آن نیز مورد نیاز بوده است. از آنجایی که انجام آزمایشهای برجا و نمونه‌گیری در دریا بسیار مشکل است، برداشتهای متراکم شکست مرزی زیرآبی به منظور تعیین پروفیل‌های سرعت موج تراکمی که با خصوصیات مقاومتی سنگهای رابطه نزدیکی دارد، انجام شد. در ادامه روش های ژئوفیزیکی به کار رفته تشریح می شوند:



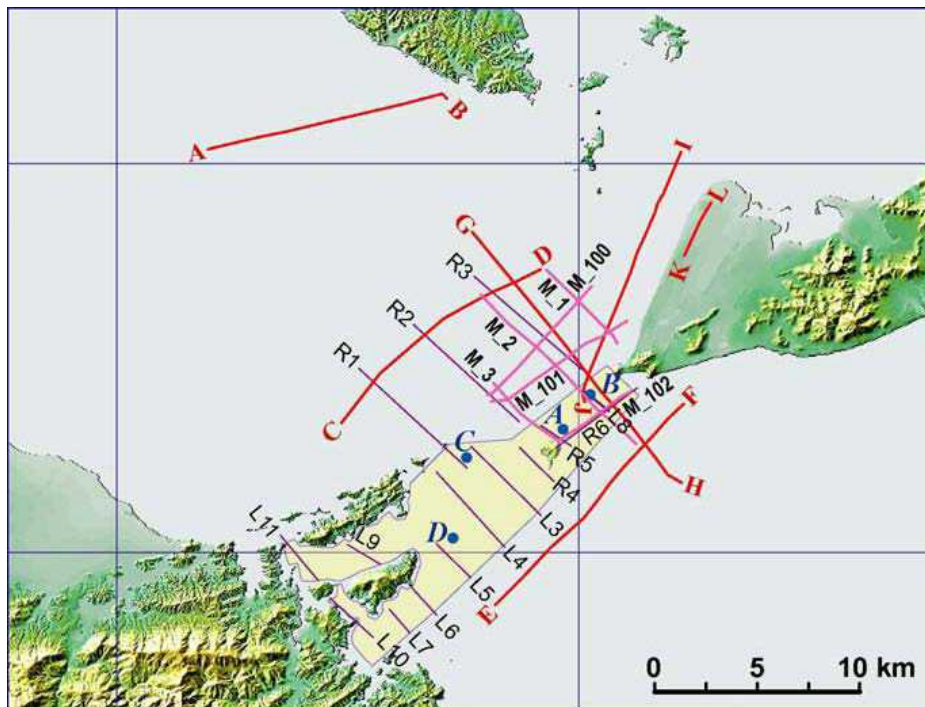
شکل (۴-۴) نقشه تکتونیکی منطقه دهانه خلیج Ise. نشان‌دهنده توزیع گسل‌های فعال. ادامه احتمالی گسل IBMF به سمت منطقه باز بر اساس حدسهای اولیه بصورت خط چین نشان داده شده است. چهار گسل تکتونکی مهم مشخص کننده مرزهای مجموعه‌های افزایشی منطقه فرورانش با MTL، TKIF، GATL، و BTL نشان داده شده‌اند که در منطقه دهانه خلیج Ise به هم نزدیک می‌شوند.

۴-۳-۲- توصیف روشهای ژئوفیزیکی بکار رفته و نتایج حاصله

جدول ۴-۶ دسته‌بندی از روشهای ژئوفیزیکی بکار گرفته شده و مسائل زمین‌شناسی مورد جستجو برای هر زیربخش از منطقه مورد بررسی مطابق با نقشه شکل ۴-۴ را نشان می‌دهد و شکل ۴-۵ نقاط و پروفیل‌های ژئوفیزیکی برداشت شده را نشان می‌دهند.

جدول (۴-۶) مسائل زمین‌شناسی مطرح در بخشهای مختلف مسیر مورد مطالعه و روشهای ژئوفیزیکی به کار رفته برای حل آنها

Subdivision	Land/Island	TB		TSJ/SGS		KMS		IRG
	Offshore		Small Channel		Reef		Main Strait	
Geophysical Survey	Reflection							
	Refraction							
	Magnetic							
	VSP							
	Logging							
Geological Problem	Tectonics				TKIF GATL	TKIF	MTL TKIF GATL	MTL TKIF
	Engineering Properties	Ultramafic Rocks	Faulted Zone	Ultramafic Rocks Weathered Rocks	Ultramafic Rocks Serpentinite	Faulted Zone	Faulted Zone	Ultramafic Rocks Faulted Zone



شکل (۴-۵) موقعیت برداشت‌های ژئوفیزیکی. دایره‌های توپر: لاک برداری درون گمانه‌ای؛ خطوط ضخیم A-B تا I-J و ۶ خط مشخص شده با M: برداشت لرزه‌ای بازتابی دریایی؛ خطوط R1-R6 و L3-L11: برداشت‌های شکست مرزی؛ بخش سایه‌خورد: برداشت مغناطیس سنجی علاوه بر این بیش از ۳۰۰ کیلومتر برداشت‌های بازتابی منفرد مانند K-L نیز انجام شده است.



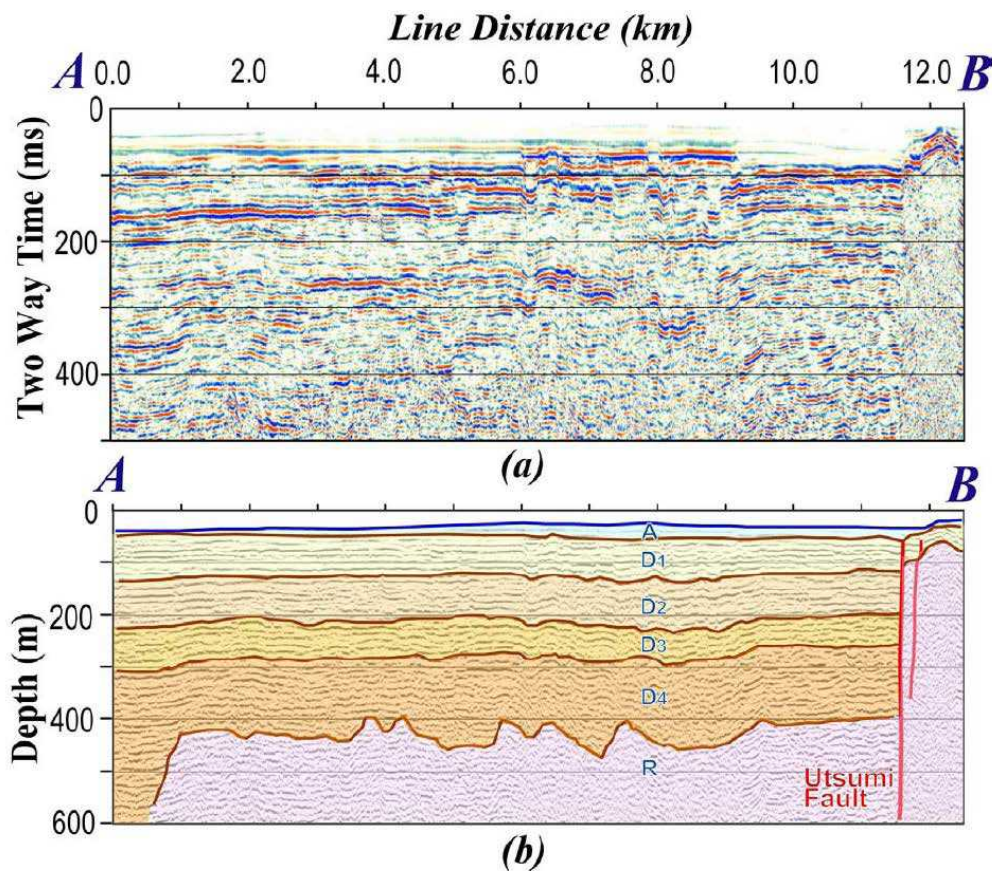
### روش بازتابش لرزه‌ای:

هدف از برداشت‌های بازتابش دریایی، اثبات موقعیت گسل IBMF در محل پیشنهادی، تعیین موقعیت MTL و تشخیص اینکه آیا MTL رسوبات جوان را متاثر کرده است یا نه، بوده است. برای دستیابی کامل به این اهداف، پروفیل‌های A-B، C-D و E-F به صورت عرضی در محل پیشنهادی برای گسل IBMF، و پروفیل‌های G-H، I-J و چندین پروفیل کوچک دیگر به صورت عرضی در محل گسل MTL برداشت شده است. خط برداشتی به طول ۳ کیلومتر به روش بازتابش لرزه‌ای خشکی، در راس شبه جزیره Atsumi جایی که تصور می‌شده با لایه ضخیمی از نهشته‌های ماسه‌ای پوشیده شده باشد، انجام شده است (خط K-L در شکل ۴-۵). شکل ۴-۶ مقطع زمانی و پروفیل عمقی تفسیر شده برداشت‌ها در طول خط A-B، خط برداشتی که از موقعیت شناخته شده گسل Utsumi و احتمالی IBMF می‌گذرد (رجوع به شکل ۴-۴). این برداشت بخوبی موقعیت گسل Utsumi را در انتهای شرقی پروفیل نمایان کرده است و در بقیه قسمت‌ها نشان‌دهنده ساختار لایه‌ای با شیب جزئی به سمت غرب بدون هیچگونه گسستگی که باعث تغییر شکل لایه‌ها شده باشد، است. شواهدی از این نوع گسلس در دو مقطع C-D و E-F مشاهده نشده است که قویاً پیشنهاد می‌کند که گسل IBMF در دهانه خلیج حضور ندارد.

### روش شکست مرزی:

برداشت‌های شکست مرزی زیرآبی برای شناسایی و مطالعه مناطق خردشده توسط گسل MTL و ارزیابی خصوصیات فیزیکی سنگ کف در طول مسیر پیشنهادی، مورد استفاده قرار گرفته است. برداشت‌های شکست مرزی کوچکی نیز به منظور تهیه نقشه لایه هوازده و شناسایی مناطق گسل خورده انجام شده است. شکل ۴-۷، مقاطع سرعت به دست آمده از سه پروفیل شکست مرزی را مقایسه می‌کند. این سه پروفیل در عرض بخش امتداد یافته گسل MTL برداشت شده است. سرعت موج تراکمی سنگ کف در حدود ۴ تا ۵ کیلومتر بر ثانیه بوده است. در این شکل، مناطق سرعت پائین سنگ کف (۲/۷ تا ۳/۳ کیلومتر بر ثانیه) با علامت فلش مشخص شده است و همانطوریکه مشاهده می‌شود از دو بخش با فاصله حدود ۱ کیلومتر تشکیل شده و هر دو مشخصاً در شمال بخش بالا آمده سنگ کف قرار دارند. در این مطالعه دو بخش سرعت پائین و بخش میانی آنها به عنوان نواحی خرد شده گسل MTL تفسیر شده است.





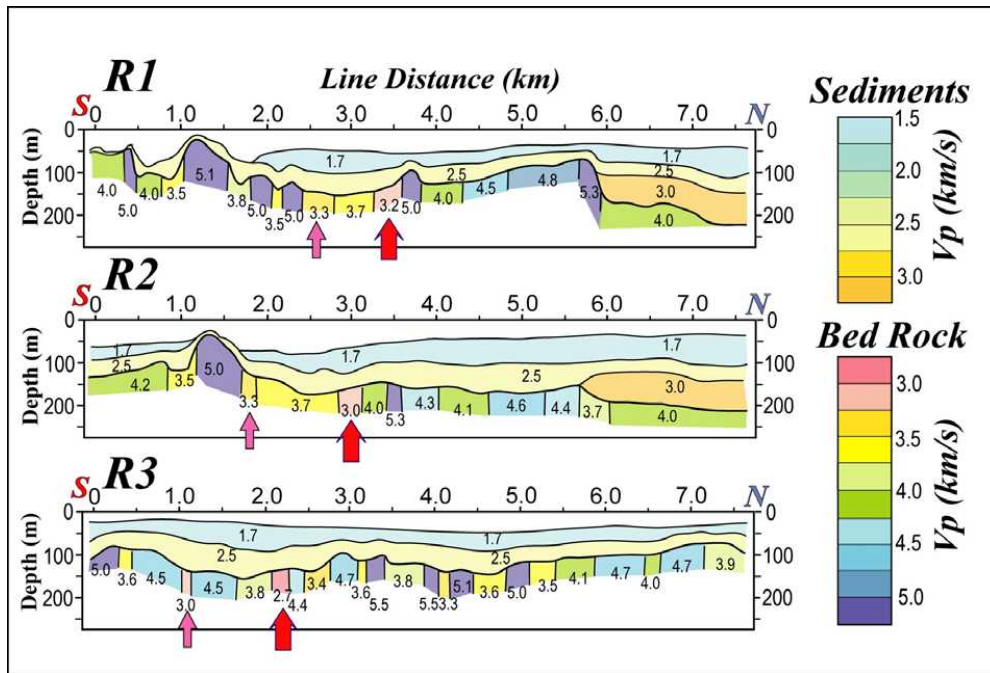
شکل (۴-۶) (a) مقطع زمانی و پروفیل عمقی تفسیر شده در طول برداشت بازتابی چندکاناله A-B که آن گسل تأیید شده Utsumi در انتهای شرقی خط برداشت و همچنین گسل فرضی IBMF را قطع می‌نماید. ساز و کار گسلش در گسل Utsumi آشکار بوده در حالی که هیچ شواهدی از گسل IBMF در این پروفیل تشخیص داده نشده است.

#### روش مغناطیس سنجی:

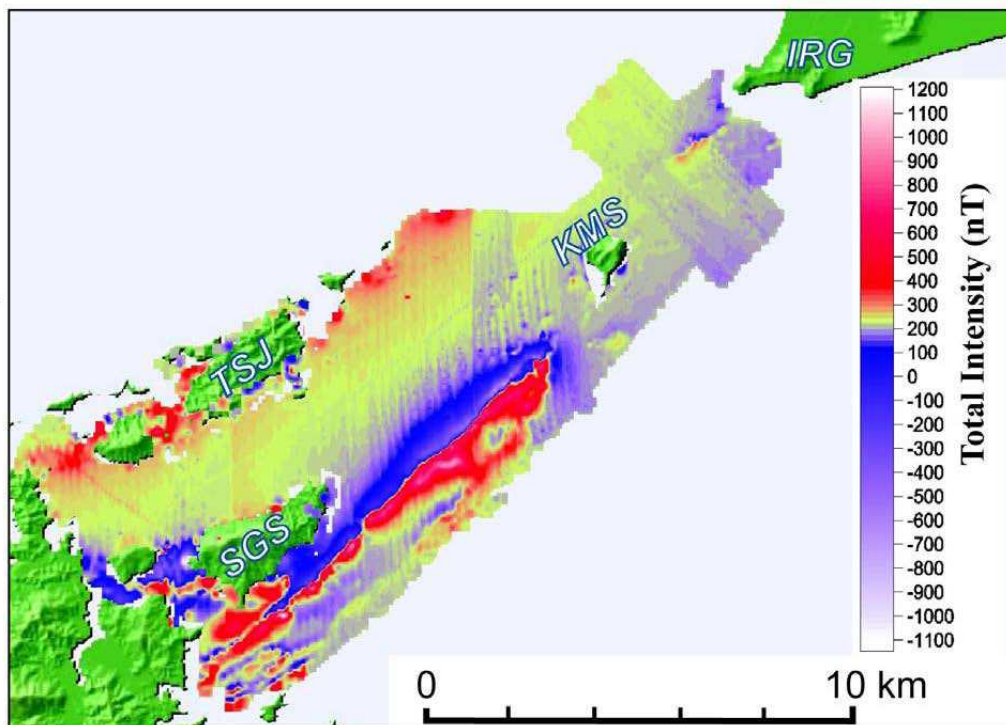
مغناطیس سنجی در سطح دریا برای تهیه نقشه گسترش سنگهای الترامافیک و بلوکهای سرپانتینیت در طول گسلهای TJK و GATL مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه تجهیزات مغناطیس سنجی برای دستیابی به دقت کافی از شدت میدان مغناطیسی توسط کشتی کشیده شده اند. فاصله بین خطوط برداشت شده توسط کشتی حدود ۵۰ متر بوده است. همانطوریکه در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود، محدوده‌ای به طول ۱۰ کیلومتر بین SGS و KMS با امتداد NE-SW آنومالی مغناطیسی نشان داده است که این محدوده با امتداد گسلهای TKIF و GATL مطابقت دارد. این محدوده نواری شکل با آنومالی قوی مغناطیسی نشان دهنده سنگهایی با مغناطیس بالا در طول TKIF و GATL هستند که تنها بر اساس آنومالی مغناطیسی سرپانتینیت ها کشیده شده‌اند. آنالیز شیمیایی نشان داده است که این سرپانتینیت کشیده شده متعلق به GATL است.







شکل (۴-۷) ساختارهای سرعت در طول خطوط برداشت شکست مرزی ساحلی: R1, R2 و R3. دو بخش سرعت پائین در شمال بخش بالا آمده سنگ کف که با علامت فلش مشخص شده و به عنوان نواحی خردشده همراه با گسل MTL تفسیر شده اند.

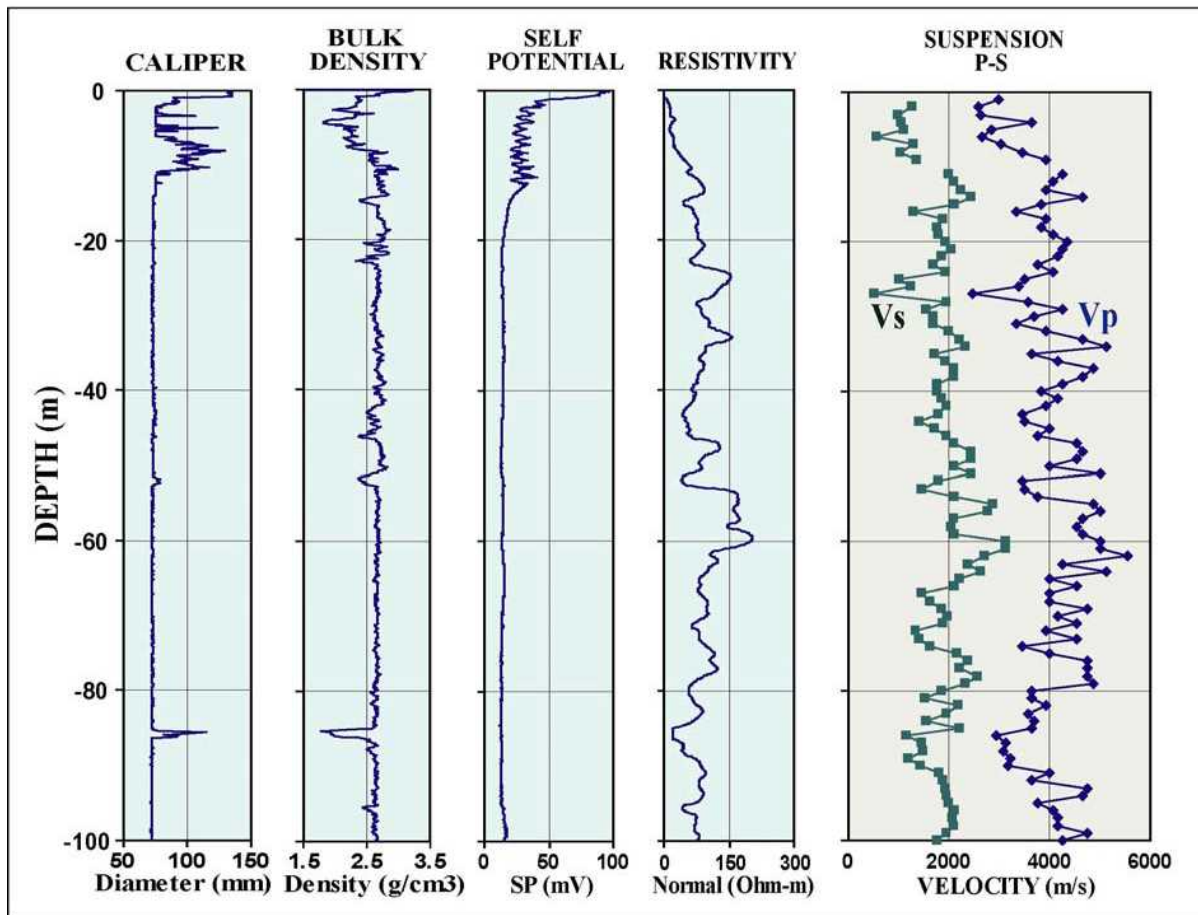


شکل (۴-۸) نقشه شدت آنومالی مغناطیسی در منطقه دهانه Isf Bay. یک آنومالی مغناطیسی خطی در KMS و SGS به موازات زنجیره جزایر رخ داده است. آنومالی مغناطیسی شدید حضور سرپانتینت در طول یک مرز تکتونیکی را پیشنهاد می‌نماید.



## چاه نگاری ژئوفیزیکی:

برای این منظور، در این مطالعه گمانه‌هایی در دریا و خشکی حفر گردید. چاه نگاری معلق P-S و چاه نگاری صوتی برای به دست آوردن سرعت موج تراکمی و برشی به کار گرفته شد. این سرعتها برای تعیین خصوصیات فیزیکی سنگ کف مناسب هستند. همچنین چاه نگاری دانسیته و الکتریکی برای شناسایی خصوصیات شکستگی‌ها انجام شده است. به عنوان نمونه چاه نگاری گمانه A در شکل ۴-۹ ارائه شده است. براساس این چاه نگاری، بخش بالایی گمانه در حدود عمق ۱۳ متر از کف دریا به شدت دچار شکستگی شده است. آنومالی‌های دیگری در عمق‌های ۵۲ و ۸۹ متری در جایی که تغییرات مشخصی در منحنی‌های چاه پیمایی، به خصوص در منحنی دانسیته و قطر چاه وجود دارد، دیده می‌شود. سرعت های موج P و S هر دو در این بخش‌ها کاهش می‌یابد در حالی که آنومالی مشاهده شده در عمق ۲۷ متری پروفیل‌های سرعت با سایر اطلاعات چاه پیمایی همخوانی ندارد که احتمالاً به دلیل عدم تشخیص صحیح اولین رسیده‌های امواج بوده است.



شکل (۴-۹) چاه نگاری ترکیبی به دست آمده در گمانه ساحلی A. چاه نگارها نشان می‌دهند که ۱۳ متر بالایی به شدت خرد شده و این بخش به عنوان سنگ کف برای بارگذاری پل مناسب نیست.



#### ۴-۴- مثال سوم: شناسایی لایه‌های نازک رس با استفاده از روش القای الکترومغناطیس (Pfeiffer and Hanna, 2005)

##### ۴-۴-۱- مقدمه

مثال حاضر برگرفته از گزارش شماره FHWA-CFL/TD-05-010 است که در سال ۲۰۰۵ تحت نظارت اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا تهیه شده است. این گزارش در واقع حاصل یک کار پژوهشی انجام یافته به منظور بررسی قابلیت‌های روش القایی الکترومغناطیس در شناسایی لایه‌های نازک رس در زیر بستر راه‌ها می‌باشد. وجود لایه‌های رسی متورم شونده در زیر مسیر جاده‌ها مشکلات عدیده‌ای در ساخت، بهره‌برداری و نگهداری از آنها ایجاد می‌کند. جاده‌های ساخته شده روی مناطق رسی در معرض خطر نشست‌های تفاضلی و تغییر شکل ناشی از تغییر حجم ایجاد شده در اثر تورم یا چروکیدگی رس، مقاومت برشی پایین، محتوی آب بالای رسها و خود ساختار رس هستند.

اگرچه حفاری‌های ژئوتکنیکی و نمونه‌برداری مستقیم بهترین اطلاعات از نوع خاک و حدود آتربرگ آن را فراهم می‌کنند اما با توجه به اینکه این حفاریها در کارهای جاده سازی در فواصل نسبتاً دور (بصورت شاخص ۰/۴ یا ۰/۸ کیلومتر) انجام می‌شوند، کارایی آنها با توجه به امکان عدم شناسایی پهنه‌های رسی بحرانی در حد فاصل حفاریها، پایین می‌آید. بنابراین نیاز به استفاده از روشهای ژئوفیزیکی مانند روش الکترومغناطیس می‌تواند در تهیه نقشه لایه‌های رسی، جبران خلا داده‌ها در حدفاصل حفاریها و نیز هدایت حفاریها در مناطق با ریسک بالاتر از نظر وجود رس، مورد توجه قرار می‌گیرد.

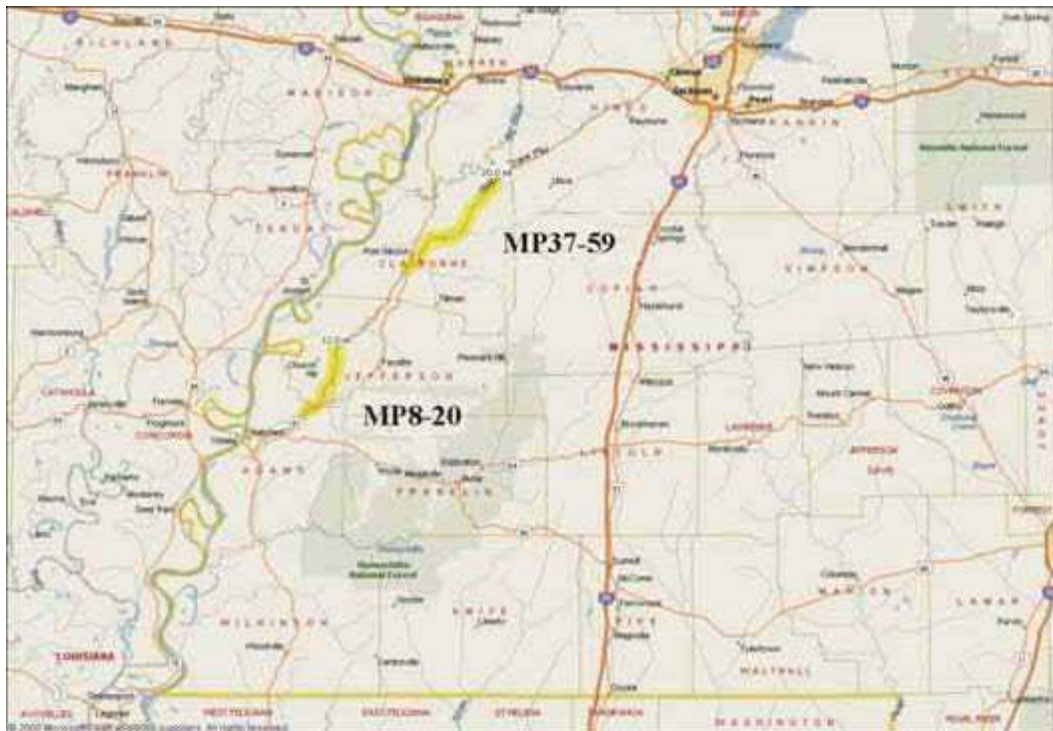
از این رو Blackhawk که یک بخش از موسسه Zapata Engineering به شمار می‌آید با همکاری اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا FHWA یک مطالعه چند مرحله‌ای ژئوفیزیک سطحی با استفاده از تجهیزات مختلف EMI در New Mexico انجام داده‌اند. طی این مطالعه با استفاده از تجهیزات جدید Geonics Em31-3، امکان شناسایی دقیق و سریع مناطق رس دار در طول بزرگراه Natchez Trace Parkway مورد تحقیق قرار گرفته است. مهمترین هدف این مطالعه چند مرحله‌ای، تشخیص موثر بودن روش الکترومغناطیس در تصویرسازی ژئوفیزیکی برای تهیه نقشه مناطق رس دار در زیر راهها بوده است.

نتیجه این مطالعات نشان داده است که روش EMI، روشی موثر، سریع و اقتصادی برای تهیه نقشه تغییرات قابلیت هدایت خاک در زیر بستر راههاست. مطابقت خوبی بین قابلیت هدایت خاک و حدود آتربرگ وجود ندارد با این وجود ارزیابی کیفی مناطقی که پتانسیل بالایی برای حضور رسهایی با خاصیت پلاستیسیته بالا دارند، با روش EMI امکان پذیر است. این روش می‌تواند برای تعیین موقعیت مناسب حفاری در مطالعات راهسازی به کار رفته و به این ترتیب منجر به صرفه جویی قابل توجهی گردد. در ادامه، مطالعه موردی انجام شده در بزرگراه Natchez Trace Parkway مورد بررسی قرار می‌گیرد:

#### ۴-۴-۲- مطالعه موردی شناسایی رسهای در بزرگراه Natchez Trace Parkway

از ۹ تا ۱۲ مارس ۲۰۰۴ جهت شناسایی رس‌ها، با استفاده از روش الکترومغناطیس در حوزه فرکانس، محدوده‌ای به طول ۵۴/۷ کیلومتر در می‌سی‌سی‌پی مورد مطالعه قرار گرفت. مسیرهای مورد مطالعه در شکل ۴-۱۰ شامل MP8 تا MP20 و MP37 تا MP59 می‌شود.





شکل (۴-۱۰) محدوده مسیرهای مورد مطالعه در راه Natchez Trace Parkway

همانطوریکه قبلا نیز بیان شد، در این مطالعه داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از یک سیستم برداشت داده های الکترومغناطیس در حوزه فرکانس به نام Geonic Limited EM31-3 برداشت شده اند. این سیستم نوع تکامل یافته EM31 MK2 به شمار می آید. EM31-3 یک سیم پیچ فرستنده به صورت قائم دارد (محور سیم پیچ موازی زمین است) که با فرکانس ۹/۸ کیلوهرتز عمل می کند. علاوه بر سیم پیچ گیرنده موجود در سیستم EM31 MK2 که فاصله آن با سیم پیچ فرستنده ۳/۶۶ متر است، در EM31-3 دو سیم پیچ گیرنده قائم دیگر با فواصل ۲ و ۴ متری از سیم پیچ فرستنده استفاده می شود. این وضعیت امکان برداشت همزمان هدایت الکتریکی ظاهری در سه عمق مختلف را فراهم می آورد. سیستم EM31-3 بر روی یک وسیله ساخته شده از موادی غیرفلزی نصب شده تا تاثیر این گونه مواد بر روی داده ها به حداقل برسد. یک دستگاه GPS نیز بین سیم پیچ فرستنده و سیم پیچ گیرنده واقع در فاصله ۱ متری نصب شده بود. مجموعه این سیستم برداشت بر روی مسیر مورد مطالعه توسط ماشینی با سرعت ۱۶ km/h کشیده می شده است (شکل ۴-۱۱). GPS با فرکانس ۱ هرتز و EM31-3 با فرکانس ۵ هرتز داده برداشت می کرده اند بنابراین فاصله داده های GPS ۴/۵ متر و فاصله داده های الکترومغناطیس ۱ متر خواهد بود. در طول مسیر، دو برداشت در دو سوی جاده و در جهت ترافیک انجام شده است. سرعت برداشت ۱۳/۷ کیلومتر در هر روز بوده و ۴ روز کاری برای برداشت ۵۴/۷ کیلومتر صرف شده است. در پایان هر روز کاری، داده ها ویرایش شده و وارد سایت مرکزی شده است. این کار به منظور تهیه نقشه های اولیه به منظور تعیین موقعیت حفاری ها بوده است. در طول این مطالعه با انجام حفاری و گرفتن نمونه، درصد رس تعیین شده و با نتایج ژئوفیزیک مقایسه شده است.





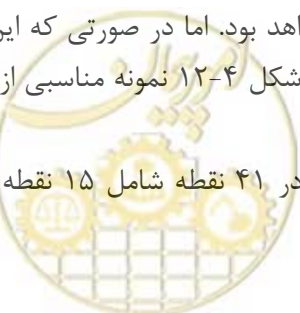
شکل (۴-۱۱) سیستم Em31-3 در حال انجام عملیات برداشت

در این مطالعه از نرم افزار اختصاصی MTADS DAS برای بررسی داده های EM31-3 استفاده شده است. این برنامه در مقایسه با نرم افزارهای استاندارد توانایی بیشتری در پردازش داده های GPS دارد و از این رو انتخاب شده است. پس از تصحیح موقعیت، داده ها به صورت فایلی که شامل هدایت پذیری و موقعیت فضایی (XYZ) بوده، ذخیره شده و سپس مجدداً در نرم افزار Oasis montaj نوشته شده توسط Geosoft Inc. برای نمایش داده ها و پیاده کردن سایر نقاط مهم مانند موقعیت پلها و غیره باز شده و سپس با استفاده از فایل خروجی و نرم افزار AutoCAD نقشه های ژئوفیزیکی تهیه شده اند.

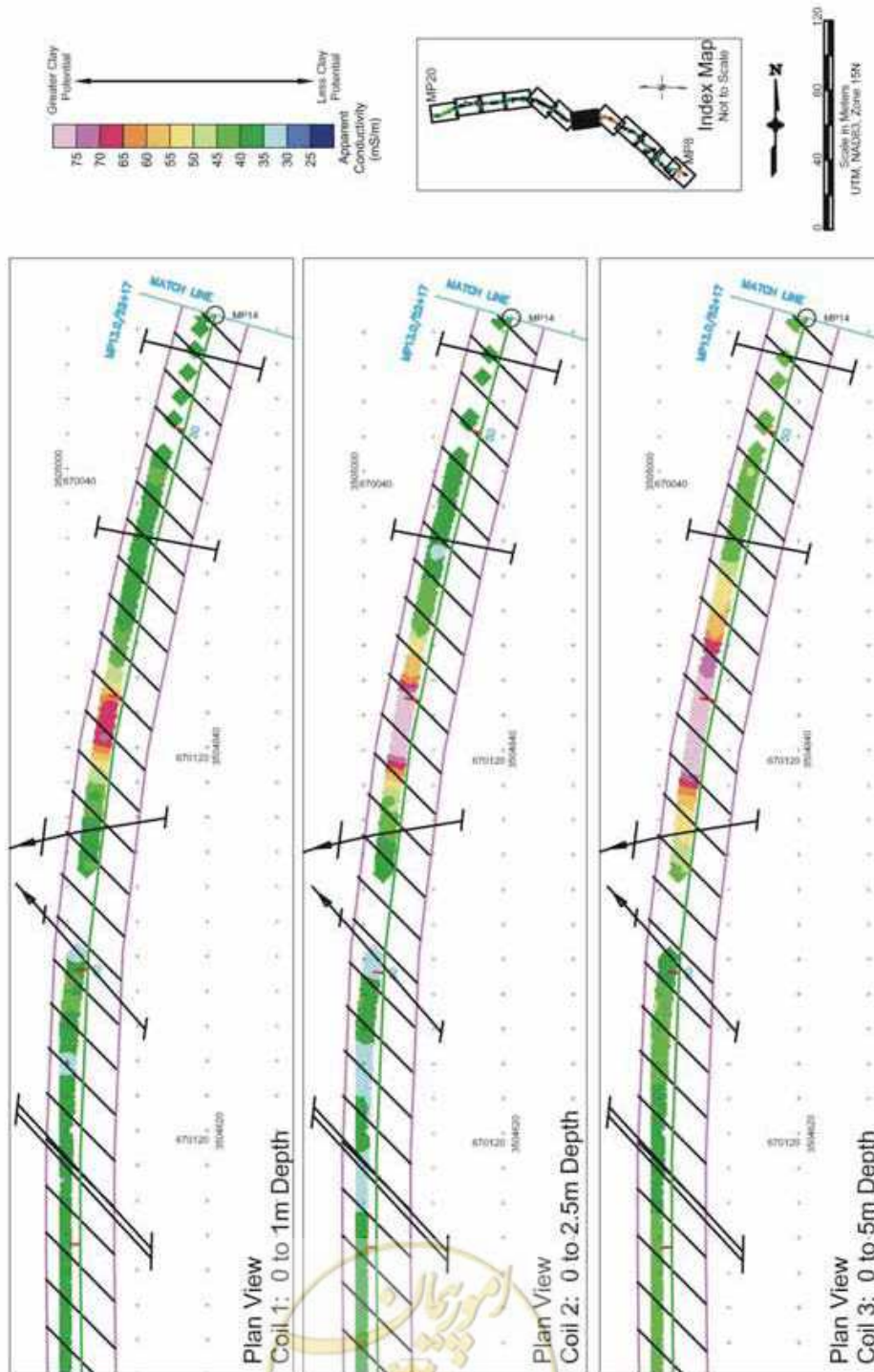
برای هر سه سیم پیچ و در نتیجه هر سه عمق برداشت مختلف نقشه رنگی پربندی شده هدایت پذیری ظاهری تهیه شده است. نمونه ای از این نقشه‌ها در پلان، در شکل ۴-۱۲ ارائه شده است. شکل ۴-۱۳ نیز نمونه‌ای از مقاطع الکترومغناطیس در طول بخشی از مسیر را نمایش می‌دهد. در این نقشه ها هدایت پذیری از ۲۰ تا ۸۰ mS/m متغیر است. هر چه میزان هدایت پذیری افزایش یابد نشان دهنده درصد رس کمتر است. مثلاً، هدایت پذیری ظاهری معادل ۲۰ mS/m که با رنگ آبی تیره مشخص شده است، درصد رس خیلی کم و هدایت پذیری ظاهری معادل ۸۰ mS/m که با رنگ صورتی نمایش داده شده است، درصد رس خیلی زیاد را نمایش می‌دهد.

در این نقشه ها، داده های سیم پیچ ۱ که دارای فاصله ۱ متری با فرستنده است، وضعیت لایه‌های رسی تا عمق ۱ متری را نمایش می‌دهد. سیم پیچ ۲ با فاصله ۲ متر از فرستنده، وضعیت رسها تا عمق حدود ۲/۵ متری را نشان داده و سیم پیچ ۳ با فاصله ۳/۶۶ متری از فرستنده، وضعیت رسها از عمق صفر تا عمق حدود ۵ متری را نمایندگی می‌نماید. با مقایسه هدایت پذیری ظاهری برای سه سیم پیچ مختلف در هر نقطه، گسترش عمقی لایه‌های رسی را می‌توان تخمین زد. به عنوان مثال اگر هدایت پذیری ظاهری سیم پیچ ۱ بیشتر از ۲ و ۲ بیشتر از ۳ باشد در این صورت احتمالاً گسترش رسها به عمق ۱ متری محدود خواهد بود. اما در صورتی که این وضعیت بر عکس باشد نشان دهنده گسترش احتمالی رسها تا عمق ۵ متری خواهد بود. شکل ۴-۱۲ نمونه مناسبی از شرایطی است که در آن رسها تا عمق ۵ متری گسترش یافته اند.

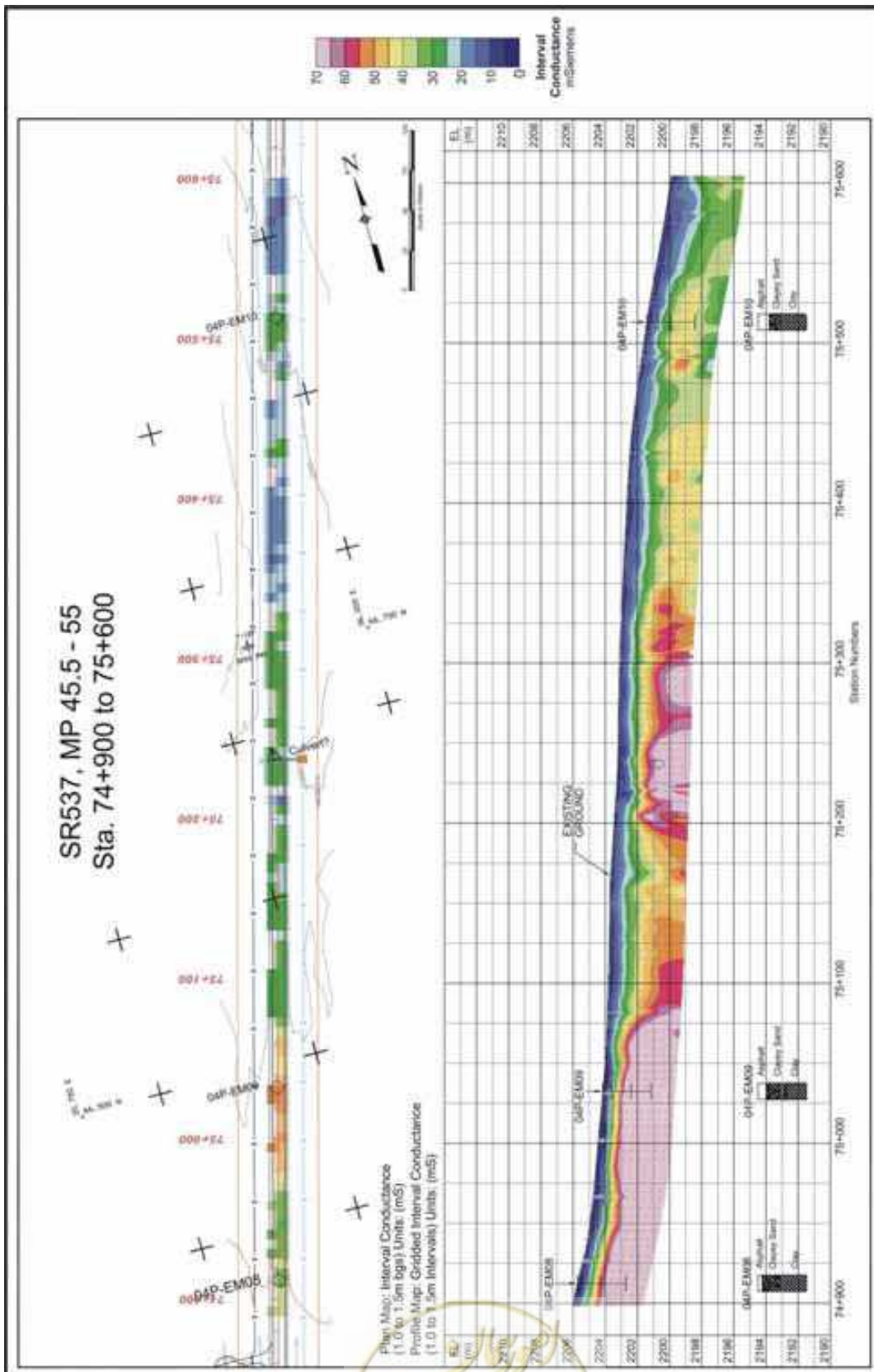
برای ارزیابی نتایج عملیات ژئوفیزیکی، در ۴۱ نقطه شامل ۱۵ نقطه بین MP8 و MP20 و ۲۶ نقطه بین MP37 و



MP59 حفاری و نمونه گیری انجام شده است. در آزمایشگاه با استفاده از نمونه به دست آمده، دانه بندی، حدود آتبرگ، رطوبت طبیعی و طبقه بندی خاک در هر نقطه تعیین شده است. مقایسه نتایج ژئوتکنیک و الکترومغناطیس نشان می دهد، بین هدایت پذیری ظاهری و هیچ یک از پارامترهای ژئوتکنیکی رابطه مستقیمی وجود ندارد، با این وجود، این روش، کارایی مناسبی در تشخیص مناطق دارای رس از خود نشان داده است.



شکل (۴-۱۲) نقشه های هدایت پذیری ظاهری برای ارزیابی میزان رس در سه عمق مختلف



شکل (۴-۱۳) نمونه ای از مقطع الکترومغناطیس در طول بخشی از مسیر مورد مطالعه



#### ۴-۵- مثال چهارم: ارزیابی ضخامت و کیفیت روسازی راههای استان فارس با استفاده از GPR

در سال ۱۳۸۷ مطالعه جامع اکثر راه های شریانی استان ها و راه های روستایی در دستور کار وزارت راه و ترابری قرار گرفت. در این راستا اوایل سال ۱۳۸۸ پروژه‌ای جهت ارزیابی ضخامت و کیفیت روسازی محور های شریانی استان فارس به تصویب رسید. روش GPR بهترین روش برای مطالعه کیفیت و تعیین ضخامت لایه های روسازی و زیرسازی تشخیص داده شده و شرکت مجری طرح (شرکت تدبیرراه) برای انجام این پروژه، از این روش با استفاده از سیستم های ساخته شده توسط شرکت آمریکایی GSSI استفاده نمود. در مجموع با این سیستم در حدود ۲۴۰۰ کیلومتر خطی برداشت انجام شد. در ادامه با جزئیات بیشتر به نحوه تنظیم، پیش پردازش، برداشت و پردازش و تفسیر بخشی از داده ها پرداخته می-شود.

#### ۴-۵-۱- برداشت داده ها

#### ۴-۵-۱-۱- خودروی برداشت داده ها

در برداشت های انجام شده، کلیه تجهیزات مورد نیاز یک برداشت مناسب، بر روی یک خودروی ون ساخت شرکت توپوتا نصب شده است. این خودرو علاوه بر تجهیزات اصلی GPR که شامل: آنتن، واحد کنترل، لپ تاپ، مسافت سنج و GPS می باشد، از دوربین های مخصوص عکسبرداری، که هر ۱۰ متر یک عکس از محور ذخیره می کند، و همینطور سیستم هشدار دهنده سرعت برای کنترل سرعت برداشت نیز برخوردار است. در شکل های ۴-۱۴ و ۴-۱۵ برخی از این تجهیزات را که بر روی سامانه برداشت GPR نصب شده را می توان مشاهده نمود.

#### ۴-۵-۱-۲- تجهیزات مورد استفاده

مجموعه تجهیزات اصلی مورد استفاده در این سیستم شامل:

- ۲ آنتن (۱ گیگا و ۲ گیگاهرتز)

- لپ تاپ: این لپ تاپ، دارای نرم افزار برداشت و تحلیل (نرم افزار RADAN) می باشد (شکل ۴-۱۶).

- واحد کنترل برداشت (سیستم مدل SIR20): این واحد، کلیه تجهیزات نصب شده در سیستم برداشت را جمع آوری

و به هم متصل می کند (شکل ۴-۱۷).

- بسته تجهیزات مربوط به دستگاه مسافت سنج (DMI, Distance Measurement Instrument): این دستگاه جهت

تعیین دقیق موقعیت برداشت بکار گرفته می شود (شکل ۴-۱۸).

- کابل های اتصالی آنتن ها به واحد کنترل





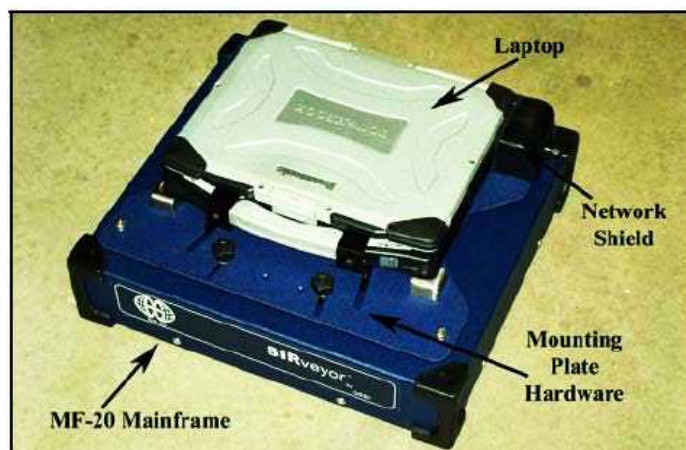


شکل (۴-۱۴) خودروی ون، در حال برداشت داده های GPR در استان فارس

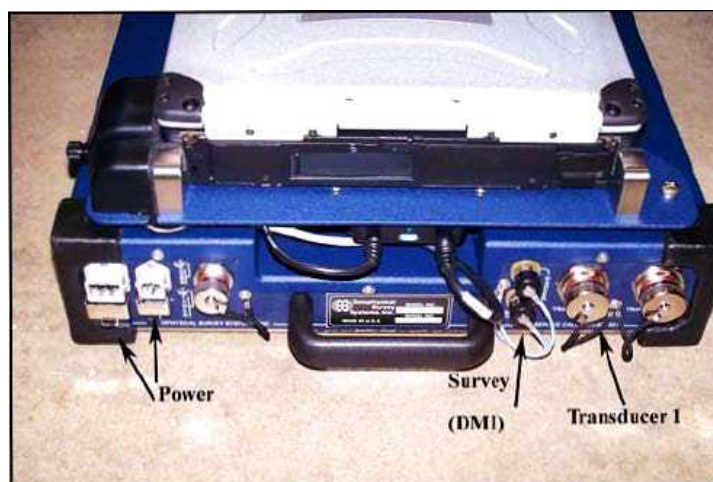


شکل (۴-۱۵) دوربین‌های نصب شده روی خودرو جهت عکسبرداری از محورهای مورد نظر

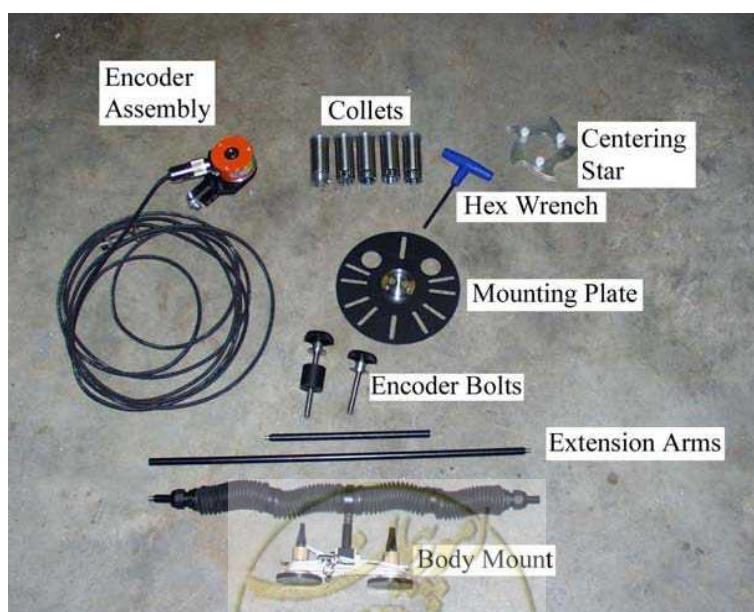




شکل (۴-۱۶) نمایی از لپ تاپ و واحد کنترل برداشت GPR



شکل (۴-۱۷) نمایی از ورودی های مختلف به واحد کنترل SIR20



شکل (۴-۱۸) بسته تجهیزات مربوط به دستگاه مسافت سنج

نحوه راه‌اندازی دستگاه GPR به این ترتیب است که ابتدا آنتن‌های دوتایی- هوایی را که در دو نوع ۱ گیگاهرتز و ۲ گیگاهرتز بوده و بر حسب ضرورت پروژه یکی از آنها یا هر دو آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد به سیر فلزی تعبیه شده در جلوی خودرو وصل می‌شود. سپس کابل‌های مهار آن جهت پایداری بیشتر متصل می‌شود. مراحل این کار به ترتیب در شکل‌های ۱۹-۲ و ۲۰-۲ نمایش داده شده است. پس از اتصال آنتن به بدنه، نوبت به نصب مسافت سنج به واحد کنترل GPR و راه‌اندازی لپ‌تاپ و اتصال کابل‌های مسافت سنج و آنتن و منبع تغذیه می‌رسد. مراحل نصب در شکل‌های ۲۱-۴ و ۲۲-۴ مشخص شده است.



شکل (۴-۱۹) نحوه اتصال آنتن به سیر تعبیه شده



شکل (۴-۲۰) نحوه اتصال کابل های مهار کننده به بدنه خودرو



شکل (۴-۲۱) نمایی از نصب مسافت سنج و دیسک مربوط به آن



شکل (۴-۲۲) نحوه یک نصب صحیح دستگاه مسافت سنج

#### ۴-۵-۱-۳- کالیبراسیون مسافت سنج

در ابتدای برداشت، دستگاه مسافت سنج کالیبره می‌شود. برای این کار یک قطعه ۱۰۰ متری مستقیم و بدون کوچکترین انحراف انتخاب شده و ابتدا و انتهای قطعه با گذاشتن علامت مشخص می‌شود و پس از تنظیمات دستگاه (شکل ۲-۲۳)، خودرو از نقطه آغاز شروع به حرکت کرده (با سرعت ثابت ۱۰ کیلومتر بر ساعت) و در نقطه ۱۰۰ متر می‌ایستد. فایل حاصل ذخیره شده و بدین گونه دستگاه مسافت سنج کالیبره می‌شود (معمولاً پس از هر ۱۰۰۰ کیلومتر برداشت، انجام کالیبراسیون ضروریست).





شکل (۴-۲۳) نمایی از تنظیم دستگاه برای کالیبراسیون مسافت سنج

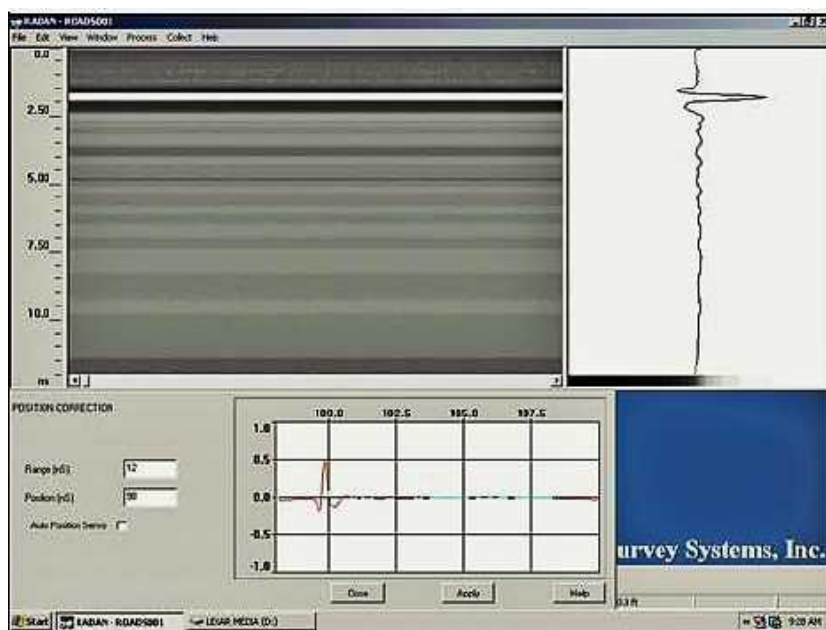
#### ۴-۱-۵-۴- پیش پردازش های قبل از برداشت

بر روی داده های GPR، پیش پردازش هایی اعمال می‌شود. پس از قرار گرفتن در نقطه شروع برداشت و نصب و به کار انداختن تمامی تجهیزات GPR، باید سیگنال ورودی به زمین تنظیم گردد. برای اینکار چند نکته را باید در نظر گرفت: نکته اول اینکه، دریافت و مشاهده موج مستقیم (موج عبوری در هوا) ضروریست، در غیر این صورت داده‌های برداشت شده قابل استفاده نخواهد بود. البته این را نیز باید در نظر داشت که با توجه به ۵۱۲ نمونه ای بودن عمق برداشت، تنظیمات بگونه‌ای باید باشد که دریافتی قبل از موج مستقیم ثبت نشود (شکل‌های ۲-۲۴، ۲-۲۵ و ۲-۲۶). نکته بعدی که باید به آن توجه داشت، تقویت دامنه سیگنال دریافتی می‌باشد. این تقویت باید بگونه‌ای باشد که حداکثر دامنه سیگنال دریافتی نباید از  $\frac{2}{3}$  کل فضای نمایش سیگنال که در شکل ۲۵ با مستطیل قرمز و پیکان نمایش داده شده است، بیشتر باشد.

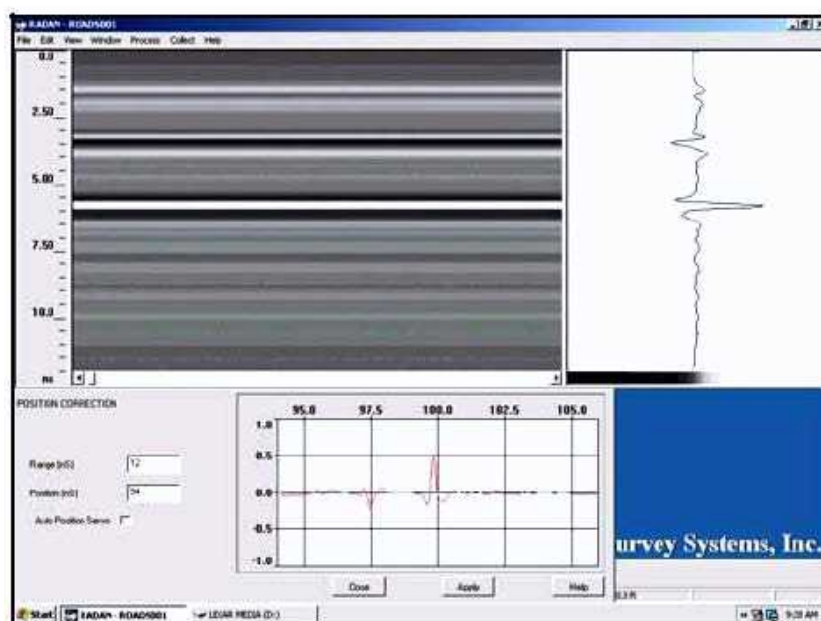
در قسمت بعد باید صافی های اولیه برای محدوده فرکانس های بالا و پایین دریافتی را تنظیم کرد. همانطور که در شکل ۴-۲۷ دیده می‌شود، در زمانی که این محدوده به خوبی مشخص نشود، نوفه های الکترومغناطیسی موجود در محل برداشت داده ها مشکلاتی را به وجود می‌آورند، این مشکلات معمولاً در برداشت با آنتن ۲ گیگا هرتز بیشتر اثر خود را نشان می‌دهد.

با توجه به مشخصات هر آنتن، صافی ها را باید تنظیم کرد. به عنوان مثال برای آنتن ۱ گیگاهرتز، صافی بالا گذر، ۲۵۰ مگاهرتز و پایین گذر ۳۲۵۰ مگاهرتز، بهترین نتیجه را داشته است. البته با توجه به مناطق برداشت مختلف و شرایط خاص (برداشت در مناطق با نوفه زیاد)، باید این صافی ها را تغییر داد. برای آنتن ۲ گیگاهرتز، بالا گذر ۵۰۰ مگاهرتز و پایین گذر ۵۰۰۰ مگاهرتز نتایج بهتری را به همراه داشته است.

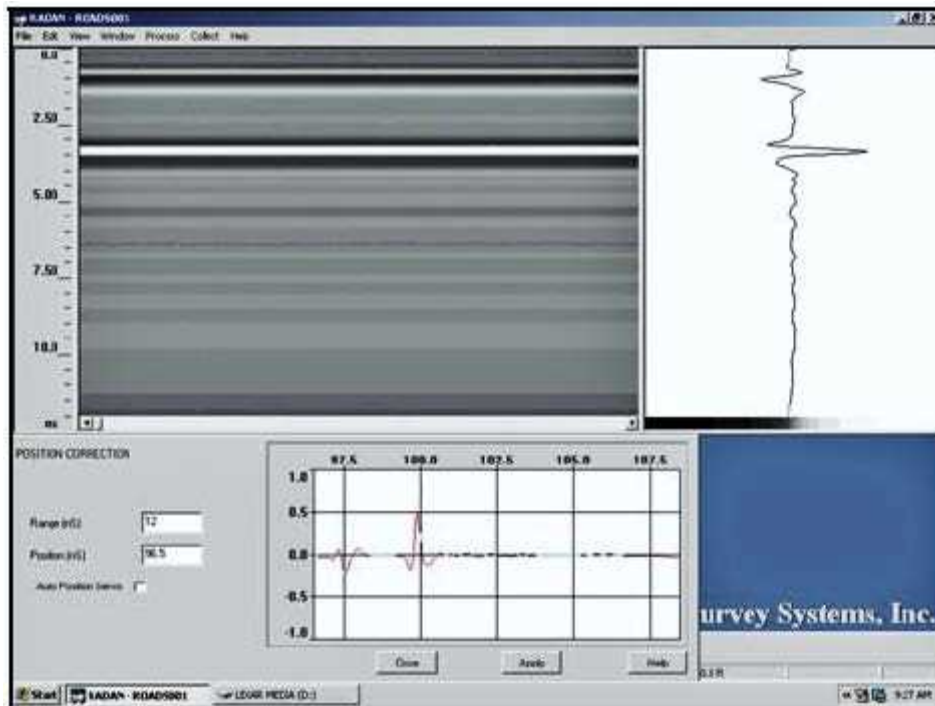




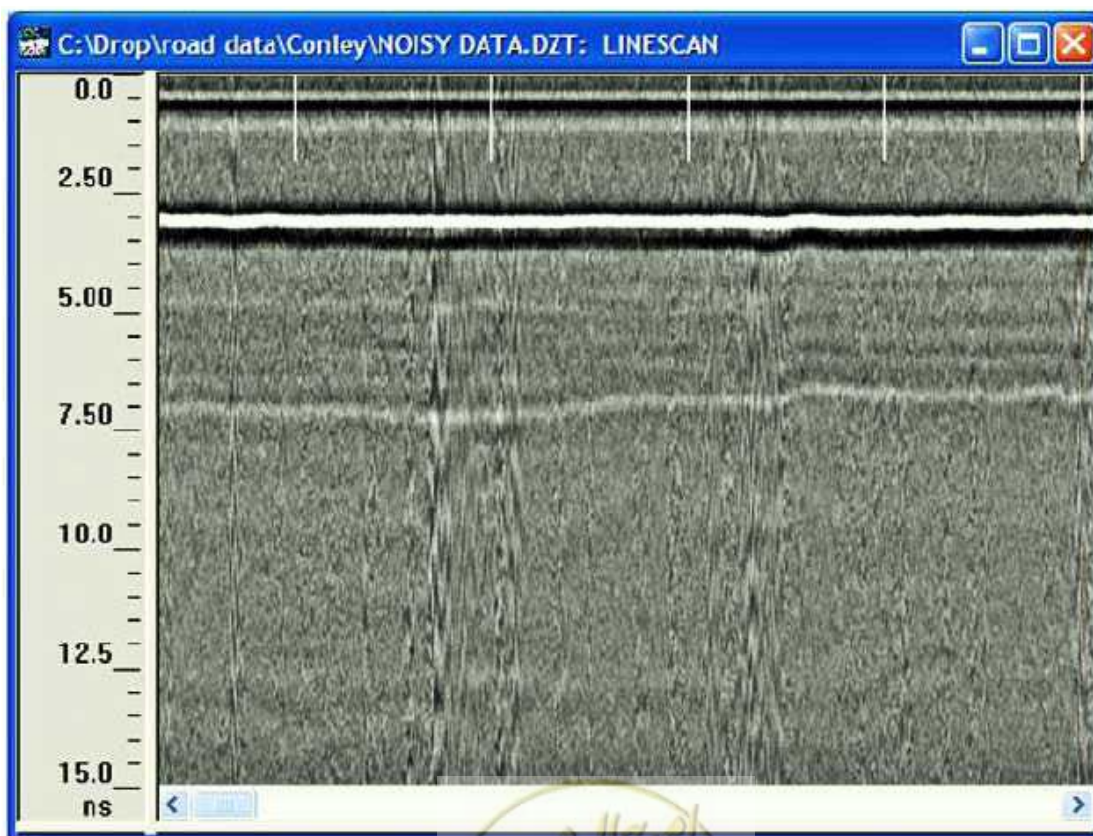
شکل (۴-۲۴) مثالی از سیگنال دریافتی بدون حضور موج مستقیم، بازتاب نشان داده شده مربوط به سطح آسفالت می‌باشد.



شکل (۴-۲۵) یک نمونه از دریافت امواج قبل از موج مستقیم که جهت برداشت مناسب نمیباشد.



شکل (۴-۲۶) مثالی از دریافت مناسب سیگنال‌های بازتابی از ساختارهای تشکیل دهنده راه



شکل (۴-۲۷) مقطع برداشت شده از راه که دارای نوفه‌های الکترومغناطیسی می‌باشد.

#### ۴-۵-۱-۵- آغاز برداشت داده ها

در این قسمت، وقتی تمامی مراحل به ترتیب انجام شد، خودرو بر روی نقطه شروع محور قرار می‌گیرد. نقاط شروع، بطور معمول عارضه های خاص و یا آبپنه مشخص در محورها می‌باشد. کارشناسان بخش طراحی پروژه، چند روز قبل از برداشت این نقاط را به عنوان بنچ مارک مشخص و علامت گذاری می‌کنند.

در ادامه پس از آغاز برداشت، خودرو با سرعت ثابت ۷۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند، در حین برداشت باید کاملاً به داده های برداشت شده دقت کرد، زیرا امکان دارد برخی اتصالات در حین برداشت قطع شود که خود باعث صرف زمان زیادی برای برداشت دوباره و افزایش هزینه می‌شود.

کلید داده های برداشت شده، بوسیله واحد کنترل در یک فایل مشخص ذخیره میشود و پس از پایان برداشت و بررسی کنترل کیفی اولیه داده ها برای بخش پردازش و تفسیر آماده می‌شود، که این بخش پس از پایان برداشت و انتقال لپ تاپ به مرکز بخش پردازش و تفسیر، کار خود را آغاز می‌کند.

#### ۴-۵-۲- پردازش و تفسیر داده ها

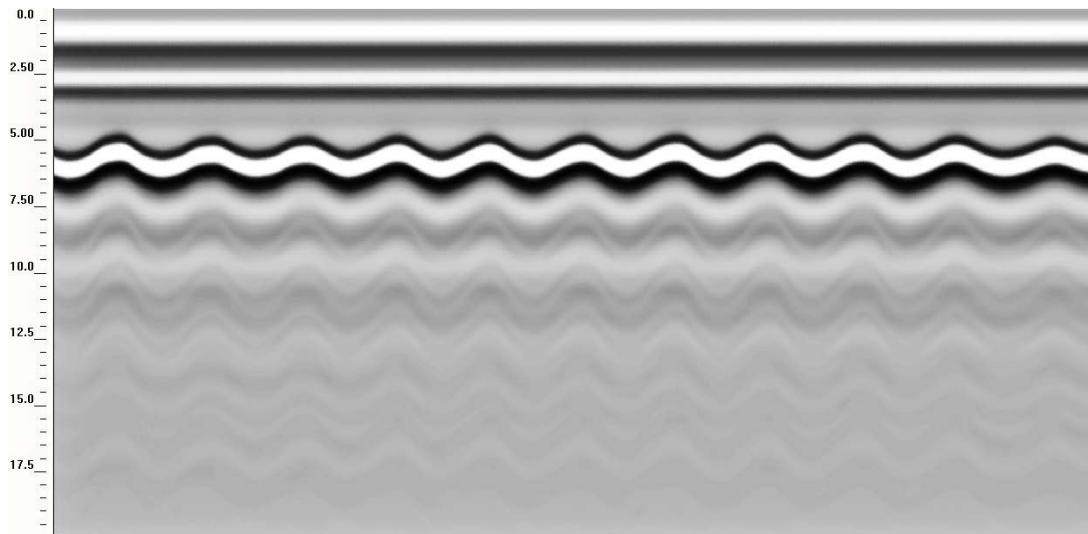
در این بخش، ابتدا داده های ذخیره شده را در فایل های جدا گانه و به تفکیک هر محور، منظم کرده و طبق برنامه ریزی و زمان بندی انجام شده، پردازش داده ها آغاز می‌شود.

در مرحله اول پردازش، باید با استفاده از تصحیحات استاتیکی و شناسایی اولیه دی الکتریک لایه های زیرین را بر روی داده های خام برداشت شده، اعمال کرد. این تصحیحات، با تلفیق فایل کالیبراسیون آنتن (شکل ۴-۲۸) هر محور، که در آغاز برداشت و تکانش ماشین تهیه می‌شود، با داده های برداشت شده همان محور (شکل ۴-۲۹) صورت می‌گیرد. نتیجه حاصل از این تلفیق، داده هایی می‌باشد که مناسب تفسیر است (شکل ۴-۳۰).

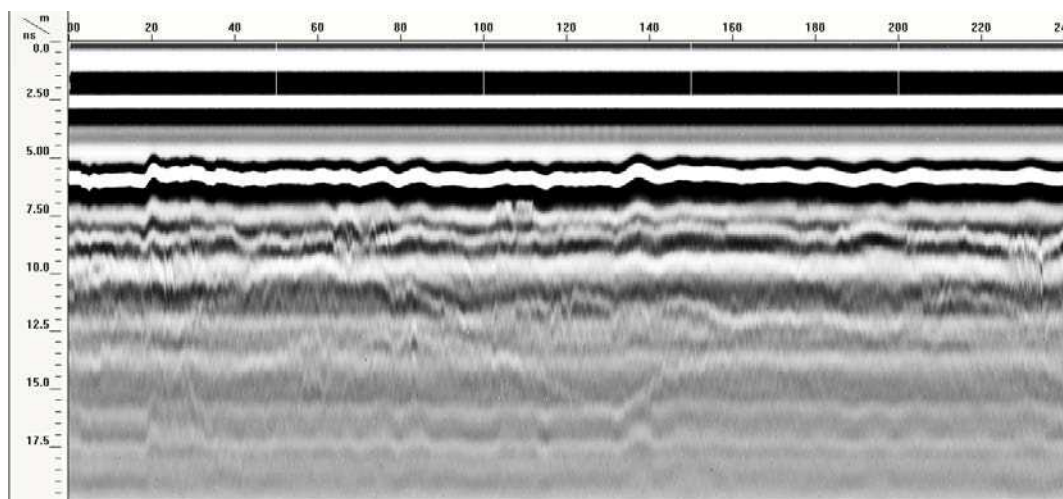
یکی دیگر از پردازش هایی که در شرایط خاص باید از آن استفاده کرد، صافی مهاجرت است. در مطالعات راهسازی، و به ویژه در بخش زهکشی، نیازمند داشتن اطلاعاتی از محل، عمق و عرض تقریبی آبرو های موجود در ساختار راه می‌باشیم. این اطلاعات از لحاظ بررسی نحوه انتقال آب در زیر راه و جلوگیری از کاهش استحکام راه، حائز اهمیت است. البته به غیر از آبرو ها، اطلاعات خوبی از دهانه پل ها و وضعیت آرماتور های موجود در بتن نیز بدست می‌آید. شکل ۴-۳۱ تصویری از یک آبرو را نشان می‌دهد که بوسیله دوربین های سیستم برداشت، تهیه شده است. پس از بررسی داده ها و انطباق با تصاویر، مقطع نشان داده شده در شکل ۴-۳۲ داده‌های برداشت شده از بالای این آبرو می‌باشد. با بکارگیری صافی مهاجرت (شکل ۴-۳۳) و انجام تنظیمات مربوط به آن، پردازش اعمال می‌شود که در نهایت شکل ۴-۳۴ بدست می‌آید که برای تفسیر مناسب می‌باشد.



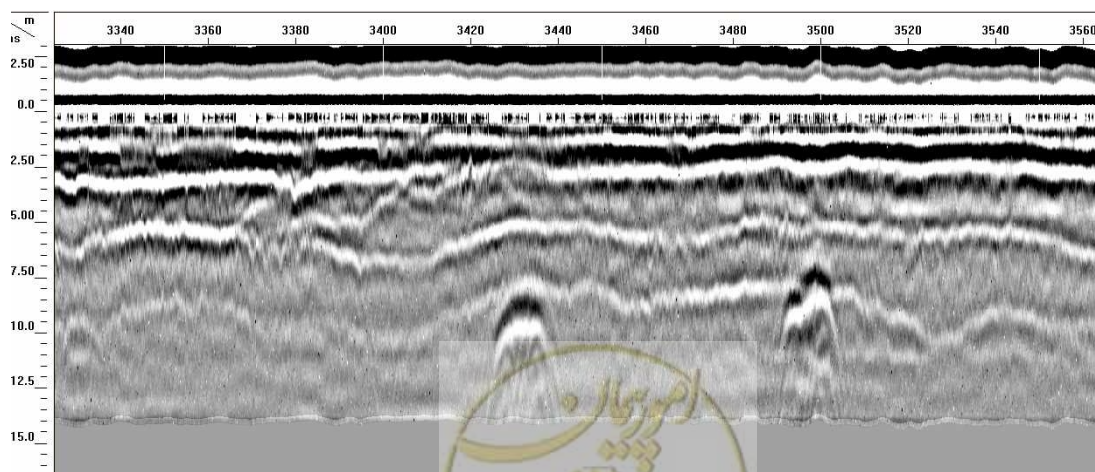




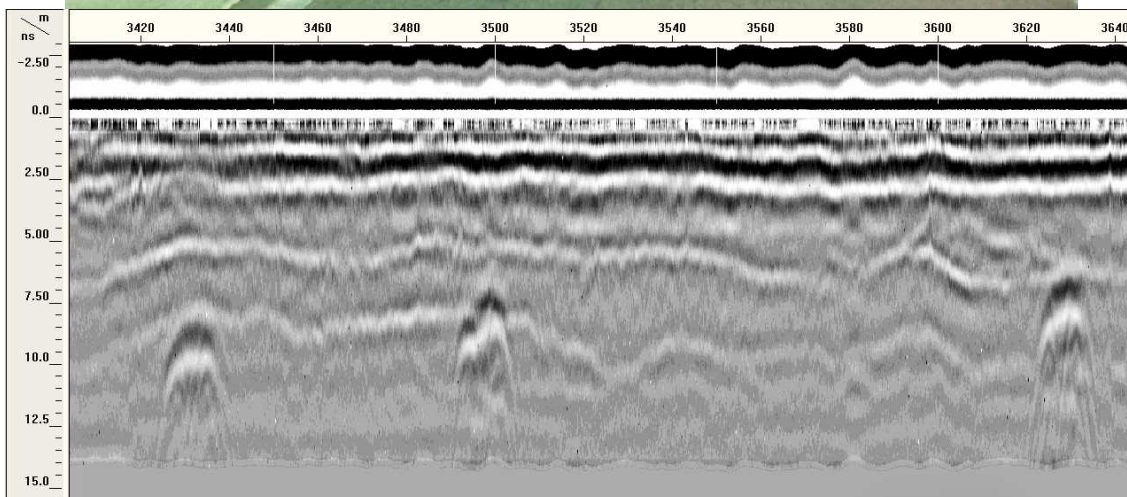
شکل (۴-۲۸) نمونه ای از یک فایل کالیبراسیون آنتن (۱ گیگاهرتز) که در هنگام تکانش تهیه شده است.



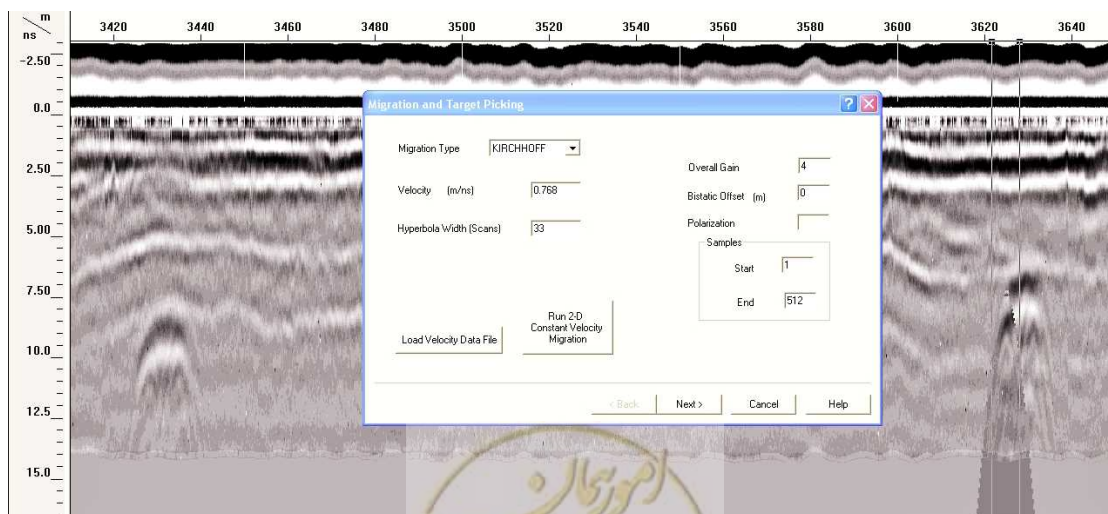
شکل (۴-۲۹) داده های خام برداشت شده قبل از اعمال تصحیحات استاتیکی



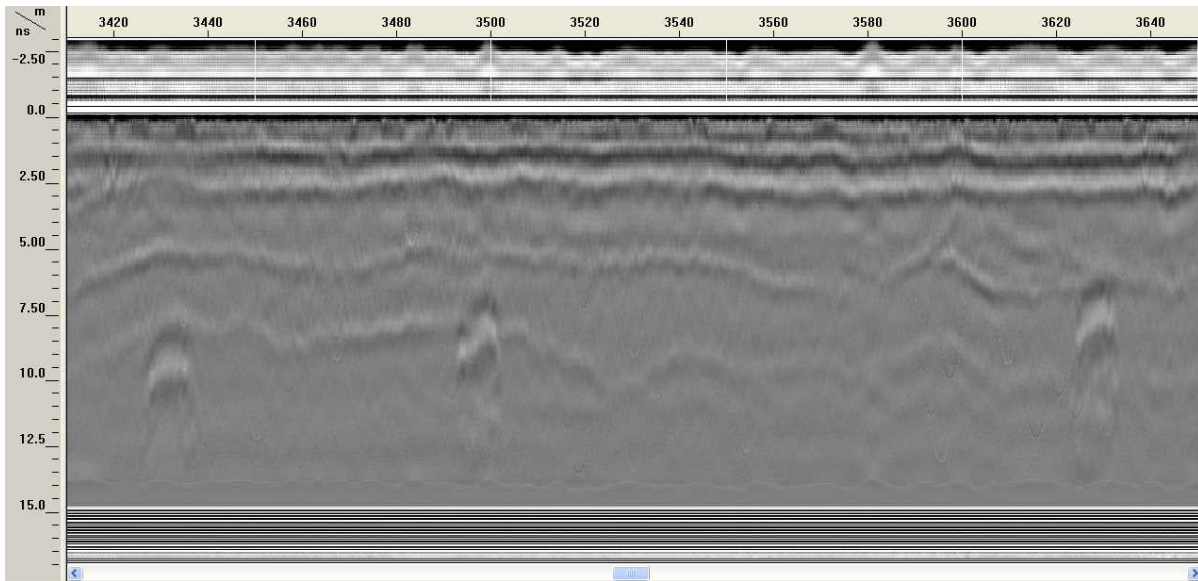
شکل (۴-۳۰) داده های برداشت شده، بعد از اعمال تصحیحات استاتیکی و شناسایی بازتاب ها



شکل (۴-۳۲) مقطع برداشت شده پیش از اعمال صافی مهاجرت، بر روی آبرو نشان داده شده در شکل ۳۱



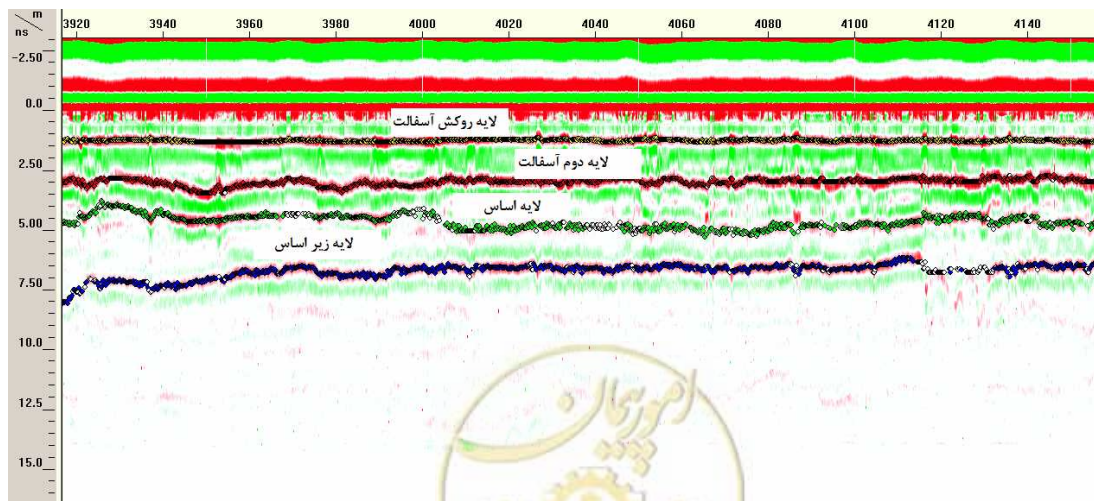
شکل (۴-۳۳) نمایی از تنظیمات صافی مهاجرت بر روی داده های دریافتی از آبرو مشاهده شده



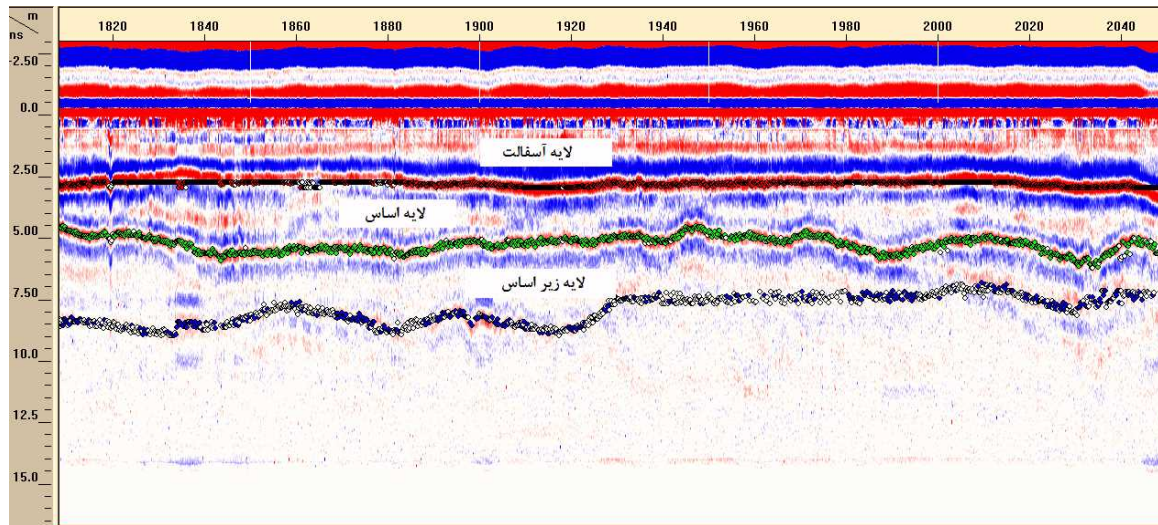
شکل (۴-۳۴) مقطع برداشت شده پس از اعمال صافی مهاجرت

در این مطالعه کلیه پردازش‌ها و نشان کردن بازتاب‌ها با استفاده از نرم افزار RADAN انجام شده است. پیشنهاد می‌شود که در تمامی تحلیل‌ها، هنگام نشان گذاری، نتایج با دی الکتریک بدست آمده از هر لایه تطبیق داده شود. در ادامه نمونه‌هایی از تحلیل‌ها آورده شده است که انواع مختلف لایه بندی‌های موجود در ساختارهای راه را می‌توان مشاهده کرد. در تفسیرهای انجام شده در محورها، معمولاً با ساختارهای متفاوتی از راه مواجه خواهیم شد که در شکل‌های ۲-۳۵، ۲-۳۶ و ۲-۳۷ نشان داده شده است. بعد از تحلیل داده‌های هر محور و استخراج داده‌ها، داده‌ها را باید به تفکیک هر لایه و مشخصات بازتاب دریافتی از آن لایه تفسیر کرد.

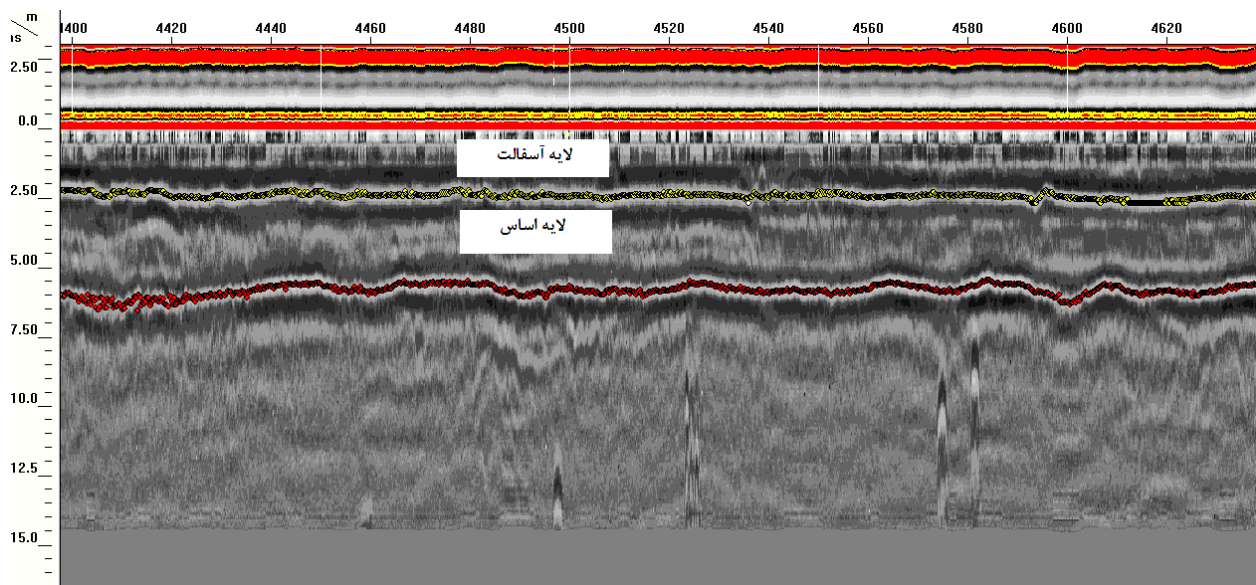
در مطالعات در سطح شبکه راه‌های شریانی استان فارس، با تحلیل ضخامت و دی الکتریک لایه‌های مختلف، هر محور به دو بخش آسفالت و اساس - زیراساس تقسیم شده است. سپس قطعات همگن موجود در هر بخش تعیین می‌شود (شکل ۴-۳۸). در نهایت نتایج به همراه پروفیلی از تغییرات ضخامت لایه‌های روسازی و زیرسازی رسم (شکل ۴-۳۹) و به کارفرما گزارش داده می‌شود.



شکل (۴-۳۵) نمایی از تحلیل لایه‌های روسازی و زیرسازی محورهای استان فارس با ۴ بازتابنده مشخص



شکل (۴-۳۶) نمایی از تحلیل لایه های روسازی و زیرسازی محور های استان فارس با ۳ بازتابنده مشخص



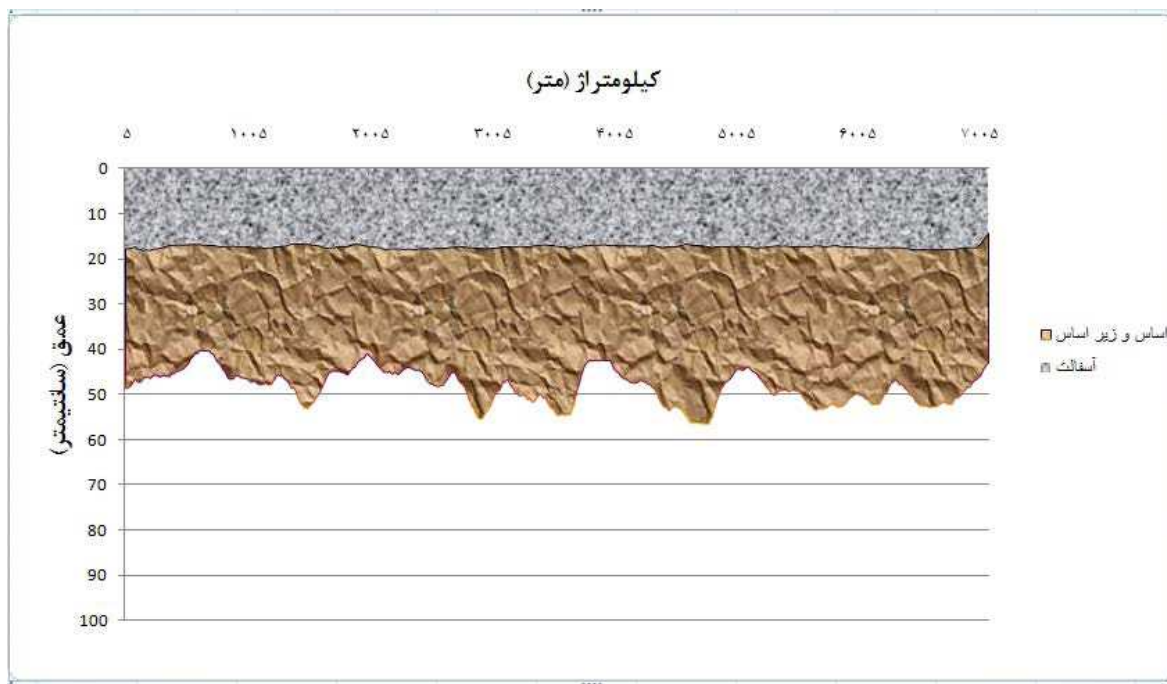
شکل (۴-۳۷) نمایی از تحلیل لایه های روسازی و زیرسازی محور های استان فارس با ۲ بازتابنده مشخص

قطعه بندی اولیه روسازی (ضخامت لایه های آسفالتی)						
نظم محور:						
خط جبروی:		کندرو				
تاریخ پیرایش:		طول محور:				
شماره قطعه	کر قطعه	کیلومتر ابتدا	کیلومتر انتها	طول قطعه	ضخامت لایه آسفالت (سانتیمتر)	
					میانگین	پوش ۸۵
۱	0002F1-1	۰	۱۴۴۴۵	۱۴۴۴۵	۳۱.۱۰	۲۹.۶۰
۲	0002F1-2	۱۴۴۴۵	۲۷۳۱۵	۱۲۸۷۰	۲۳.۴۰	۲۱.۴۰
کل محور	0002F1	۰	۲۷۳۱۵	۲۷۳۱۵	۲۷.۵۰	۲۵.۸۰

قطعه بندی اولیه روسازی (ضخامت لایه های اساس و زیراساس)						
شماره قطعه						
کر قطعه		کیلومتر ابتدا	کیلومتر انتها	طول قطعه	ضخامت لایه (سانتیمتر)	
					میانگین	پوش ۸۵
۱	0002F1-1	۰	۱۷۴۵	۱۷۴۵	۳۴.۷	۲۹.۸
۲	0002F1-2	۱۷۴۵	۵۵۸۵	۳۸۴۰	۲۹.۴	۲۵.۳
۳	0002F1-3	۵۵۸۵	۷۷۵۵	۲۱۷۰	۳۶.۴۰	۳۳.۱۰
۴	0002F1-4	۷۷۵۵	۹۳۶۵	۱۶۱۰	۲۸.۲۰	۲۴.۴۰
۵	0002F1-5	۹۳۶۵	۱۴۶۲۵	۵۲۶۰	۳۳.۴۰	۲۸.۳۰
۶	0002F1-6	۱۴۶۲۵	۱۸۲۱۵	۳۵۹۰	۲۸.۱۰	۲۵.۳۰
۷	0002F1-7	۱۸۲۱۵	۲۴۷۵۰	۶۵۳۵	۳۴.۲۰	۳۰.۰۰
۸	0002F1-8	۲۴۷۵۰	۲۷۳۱۵	۲۵۶۵	۲۷.۹۰	۳۰.۶۰
کل محور	0002F1	۰	۲۷۳۱۵	۲۷۳۱۵	۳۱.۹۰	۲۸.۴۰

شکل (۴-۳۸) نمونه ای از نتایج نهایی گزارش شده تعیین قطعه های همگن مربوط به ساختار راه



شکل (۴-۳۹) نمونه ای از مقطع نهایی نشان دهنده تغییرات ضخامت لایه های روسازی و زیرسازی راه





## فصل پنجم

---

علامت‌ها و مشخصه‌های نقشه‌ها و مقاطع ژئوفیزیکی







### ۵-۱- مقدمه

در جلد اصلی دستورالعمل، چارچوب مناسب برای ارائه گزارش نهایی مطالعات ژئوفیزیک در پروژه‌های راهسازی، انواع داده‌های ژئوفیزیکی و معیارهای کلی برای ارائه مناسب و مقبول این داده‌ها و نتایج حاصل در یک گزارش ژئوفیزیکی، ارائه گردیده و در این راستا به استانداردی تحت عنوان استاندارد علامت‌ها و مشخصه‌های نقشه‌های ژئوفیزیکی، از سری استانداردهای مهندسی آب اشاره شد که توسط شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است و می‌تواند به عنوان الگو در پروژه‌های مهندسی راهسازی مدنظر قرار گیرد. در این فصل مشخصه‌های کلی نقشه‌های ژئوفیزیکی براساس این استاندارد و مشخصه‌های نقشه‌ها و نمودارهای مربوط به دو روش متداولتر لرزه‌ای و ژئوالکتریک براساس استانداردهای مربوطه، از سری استانداردهای مهندسی آب، با اندکی تغییرات، به عنوان نمونه، بازآوری می‌شود. لازم به ذکر است در مورد روشهای دیگر می‌توان به خود استانداردهای مربوط به هر روش مراجعه نمود.

### ۵-۲- مشخصه‌های کلی نقشه‌های ژئوفیزیکی

#### ۵-۲-۱- نقشه موقعیت (Location Map)

این نقشه نشان دهنده موقعیت محل اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی نسبت به یکدیگر و نسبت به عارضه‌های طبیعی و مصنوعی موجود در منطقه می‌باشد. این نقشه، با مقیاسی متناسب با حجم عملیات و طرح، شامل اطلاعات توپوگرافی، زمین‌شناسی و محل اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی قبلی، محل چاهها و چشمه‌ها، رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، مسیل‌ها و راههای اصلی و فرعی است، که براساس استاندارد نقشه‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژی تهیه می‌شود. محل کلیه اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی روی این نقشه با استفاده از استاندارد روش مورد نظر آورده می‌شود.

#### ۵-۲-۲- مقطع‌های ژئوفیزیکی (Geophysical Sections)

نتیجه تفسیر داده‌ها، اغلب به صورت مقطع‌های ژئوفیزیکی ارائه می‌شوند. در این مقطع‌ها، محور قائم نشان دهنده عمق، و محور افقی بیانگر موقعیت بر سطح زمین است. مقیاس‌های قائم و افقی باید براساس نوع طرح و متناسب با یکدیگر انتخاب شوند. مقیاس افقی اغلب همان مقیاس نقشه موقعیت و مقیاس قائم حداکثر تا ۱۰ برابر مقیاس افقی انتخاب می‌شود. نام خط برداشتی (پروفیلی) که مقطع برای آن رسم شده، براساس استاندارد روش مورد نظر، در دو طرف آن نوشته می‌شود. روی این مقطع، وضعیت پستی و بلندی سطح زمین با خط ضخیم‌تر و مرز بین لایه‌ها با خط هایی با ضخامت کمتر آورده می‌شود. سایر اطلاعات مربوط به محل اندازه‌گیری‌ها و کمیت‌های فیزیکی، اندازه‌گیری شده و برای هر لایه، با توجه به استاندارد علامت‌های روش مربوط آورده می‌شود.

#### ۵-۲-۳- نقشه‌ها و مقطع‌های پربندی داده‌های ژئوفیزیکی (Contour Map and Sections)

در بررسی مهندسی آب (و نیز سایر فعالیت‌های عمرانی از جمله راهسازی)، اغلب لازم است تا نقشه‌ها و مقطع‌های پربندی از داده‌های ژئوفیزیکی تهیه گردد. برای این منظور، داده‌های مورد نظر در محل هر اندازه‌گیری روی نقشه موقعیت مقطع مربوط آورده شده و پربندها رسم می‌شوند. مقدارهای پربندی به طور معمول در دو انتهای پربند نوشته می‌شود و در صورتی که پربند بسته یا طولانی باشد، یک قسمت مناسب از پربند را بریده و عدد مربوط را یادداشت می‌کنند.



### ۵-۲-۴- نمودارها (Diagrams)

داده‌های خام مربوط به اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی، گاه به صورت نمودار تغییرات کمیت اندازه‌گیری شده و در امتداد خط برداشت ارائه می‌شوند. در این نمودارها، محور قائم نشان‌دهنده کمیت مورد نظر و محور افقی بیانگر موقعیت در سطح زمین می‌باشد. مقیاس‌های قائم و افقی نمودارها، باید براساس نوع طرح و متناسب با گسترده کمی داده‌ها انتخاب شوند. روی این نمودارها، اغلب نقاط اندازه‌گیری با علامتی مشخص و سپس به هم مربوط می‌شوند.

### ۵-۲-۵- راهنمای نقشه‌ها (Legend)

توضیح علامتها و اطلاعات نقشه‌های ژئوفیزیکی، در قسمت راهنمای نقشه آورده می‌شود. صفحه راهنما در اندازه A4 و در گوشه‌ای از نقشه بر حسب مورد آورده می‌شود تا پس از تا کردن نقشه، صفحه راهنما در رو قرار گیرد. صفحه راهنما شامل سه بخش بالایی، میانی و پائینی به شرح زیر است (شکل ۵-۱).

#### ۵-۲-۵-۱- بخش بالایی

بالای صفحه و در وسط، عنوان "جمهوری اسلامی ایران" به فارسی و در زیر آن به انگلیسی آورده شده است.

#### ۵-۲-۵-۲- بخش میانی

علامتهای ژئوفیزیکی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و غیره به کار رفته در نقشه به شرح زیر است:

- علامت‌ها به فارسی در سمت راست و معادل آنها به انگلیسی در سمت چپ و خود علامت در وسط. علامتهای ژئوفیزیکی براساس استاندارد روش‌ها شامل: محل ایستگاههای اندازه‌گیری، مقدارهای کمی ژئوفیزیکی، منحنی‌های پربندی، گسل‌ها، جهت حرکت آبهای زیرزمینی، جهت تغییرات مقدارهای کمی ژئوفیزیکی و غیره.
- علامت‌های هیدرولوژیکی شامل: محل چاههای عمیق، نیمه عمیق، رودخانه‌ها و غیره برحسب مورد (براساس نشریه شماره ۱۷۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور).
- علامت‌های زمین‌شناسی شامل: سازندهای زمین‌شناختی، گسل‌ها، شیب، جهت و غیره.
- در صورت نیاز به مقیاس رنگی، این مقیاس در زیر بخش میانی آورده می‌شود.

#### ۵-۲-۵-۳- بخش پائینی

در پائین صفحه راهنما به صورت جدول مشخصات شامل اطلاعات فارسی و انگلیسی قرار می‌گیرد:

- کافرما (وزارت، سازمان و ...)
- عبارت "بررسی‌های ژئوفیزیکی" (نوع بررسی)
- عنوان نقشه
- منطقه مورد مطالعه
- شماره نقشه و تاریخ
- مقیاس نقشه
- کنترل (امضاء مسئول تهیه نقشه)





نیز در بر گیرد. علامت شمال بر روی نقشه در محل مناسب آورده می شود. موقعیت اندازه‌گیری های الکتریک انجام شده بر حسب مورد به شرح زیر بر روی نقشه موقعیت آورده می شود:

- محل گمانه های الکتریکی انجام شده با دایره توپر که شماره گمانه در بالای آن نوشته شده است:

2



محل گمانه های الکتریکی با طول فرستنده جریان (AB) بیش از ۲۰۰۰ متر با دو دایره توپر و توخالی هم مرکز که شماره گمانه در بالای آن نوشته شده است:

2



- محل گمانه های الکتریکی با دو گسترش AB عمود برهم با یک دایره توپر و چهار پیکان واگرای عمود بر هم که شماره گمانه در بالای آن نوشته شده است:

3



- قطر دایره توپر برابر با ۲ میلی متر انتخاب می شود.

- محل گمانه های الکتریکی قبلی با دایره توخالی با قطر ۲ میلی متر که شماره گمانه در بالای آن نوشته شده است:

3



- خط برداشت با پروفیل (مجموعه گمانه های الکتریکی) با یک حرف بزرگ لاتین در داخل دایره در دو انتهای آن مشخص می گردد:

D



- امتداد پروفیل زنی الکتریک توسط پاره خطی که نام پروفیل در زیر آن نوشته شده، مشخص می گردد:

D4



### ۵-۳-۲- نقشه هم مقاومت ویژه ظاهری

هدف از این نقشه ها نمایش روند تغییر مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه برای یک عمق موثر نفوذ جریان است. در مطالعات الکتریک به روش گمانه زنی، مشروط به اینکه توزیع گمانه های الکتریک برداشت شده در سطح منطقه در حدی باشد که تهیه چنین نقشه ای را با دقت مورد قبول ممکن سازد، این نقشه ها تهیه می شوند. تهیه این نقشه ها در

مواردی که گمانه‌های الکتریک کم و بیش در یک راستا برداشت شده باشند مقدور نخواهد بود. در هر مطالعه این نقشه باید حداقل برای سه عمق موثر (طول AB) کم، متوسط و زیاد تهیه شود. در مطالعات آب، نقشه‌ها باید برای عمق‌هایی کمتر از عمق متوسط آبخوان، برابر عمق متوسط آبخوان و بیش از عمق متوسط آبخوان تهیه شود. در مطالعات مهندسی انتخاب عمق براساس هدف طرح صورت می‌گیرد. در کلیه موارد عمق موثر نفوذ جریان برابر یک چهارم طول فرستنده جریان (AB/4) برای آرایش شلومبرژه و یک سوم طول فرستنده جریان (AB/3) برای آرایش ورنر در نظر گرفته می‌شود. نقشه پایه مورد استفاده برای تهیه نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری همان نقشه موقعیت مذکور است. این نقشه‌ها همچنین شامل اطلاعات اختصاصی زیر می‌باشند:

- فاصله الکترودهای فرستنده جریان (AB) برحسب متر در راهنمای نقشه مشخص می‌شود:

$$AB=200m$$

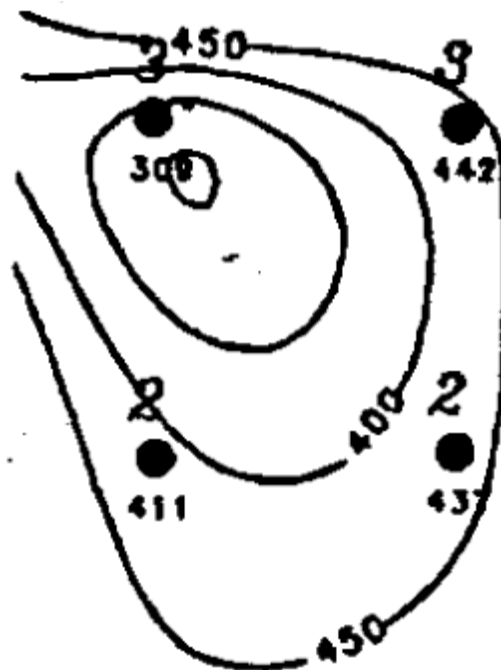
- مقدار مقاومت ویژه ظاهری بر حسب اهم متر در زیر محل هر گمانه نوشته می‌شود:

2  
●  
520

- پربندهای هم مقاومت ویژه ظاهری بر روی نقشه آورده می‌شود. فاصله پربندی (برحسب اهم متر) متناسب با گستره داده‌ها و در صورت امکان با رعایت ضریب تقریبی  $\sqrt{2}$  به ترتیب زیر انتخاب می‌شود:

۳، ۵، ۷، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ...

مقدار پربندها با بریدن قسمتی از پربند و یادداشت مقدار مربوط در آن محل به دفعات مورد نیاز آورده شود:



- بر روی این نقشه از مقیاس رنگی برای مشخص کردن پهنه‌هایی با مقاومت ویژه متفاوت استفاده می‌شود. این مقیاس معمولاً براساس طیف نور مرئی از قرمز تا بنفش است که متناسب با گستره داده‌ها انتخاب و در راهنمای نقشه مشخص می‌شود.

۵-۳-۳- نقشه‌های هم عمق سنگ کف، هم ارتفاع سنگ کف و هم ضخامت رسوبات آبرفتی

هدف از این نقشه‌ها نمایش روند تغییرات عمق سنگ کف و یا ضخامت رسوبات آبرفتی بر حسب مورد در منطقه

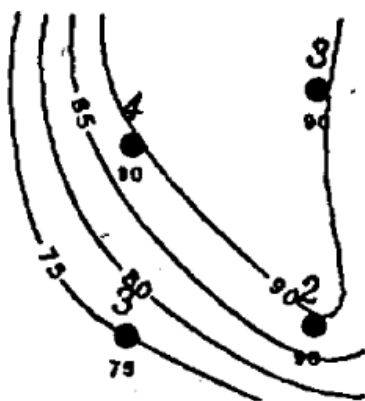
مورد مطالعه است. در مطالعات ژئوالکتریک به روش گمانه زنی، مشروط به اینکه توزیع گمانه های الکتریک برداشت شده در سطح منطقه در حدی باشد که تهیه چنین نقشه هایی را با دقت مورد قبول ممکن سازد، این نقشه ها تهیه می‌شوند. نقشه پایه برای تهیه نقشه های بالا همان نقشه موقعیت مذکور است. این نقشه ها همچنین شامل اطلاعات اختصاصی زیر اند:

- عمق سنگ کف، ارتفاع سنگ کف و یا ضخامت رسوبات آبرفتی برحسب متر که در زیر محل گمانه نوشته می‌شود:



- فاصله پربندی متناسب با گستره داده ها انتخاب و نوع کمیت مورد استفاده (عمق، ارتفاع و یا ضخامت) در راهنمای نقشه مشخص می شود. در صورت وسیع بودن گستره مقدار کمیت مورد نظر، می توان فاصله های پربندی را با رعایت ضریب تقریبی  $\sqrt{2}$  انتخاب کرد.

- رقم پربندها باید با بریدن قسمتی از پربند به دفعات مورد نیاز و یادداشت رقم مربوط در آن محل آورده شود:



- بر روی این نقشه از مقیاس رنگی برای مشخص کردن پهنه هایی با مقدار متفاوت استفاده می شود. این مقیاس معمولاً براساس طیف نور مرئی از قرمز تا بنفش است که متناسب با گستره داده ها انتخاب و در راهنمای نقشه مشخص می شود. لازم به ذکر است در صورتی که مبنای تهیه این نقشه ها ارتفاع مطلق از سطح دریا باشد، واژه "مطلق" در عنوان نقشه هم ارتفاع سنگ کف به صورت "هم ارتفاع مطلق سنگ کف" آورده می شود.

#### ۵-۳-۴ - نقشه هم مقاومت عرضی (RT)

هدف از تهیه این نقشه، نمایش تغییرات مقاومت عرضی لایه آبدار در سطح منطقه است. نقشه پایه برای تهیه نقشه هم مقاومت عرضی همان نقشه موقعیت مذکور است. این نقشه همچنین شامل اطلاعات اختصاصی زیر است:

- مقدار مقاومت عرضی برحسب اهم متر مربع در زیر محل هر گمانه نوشته می شود:



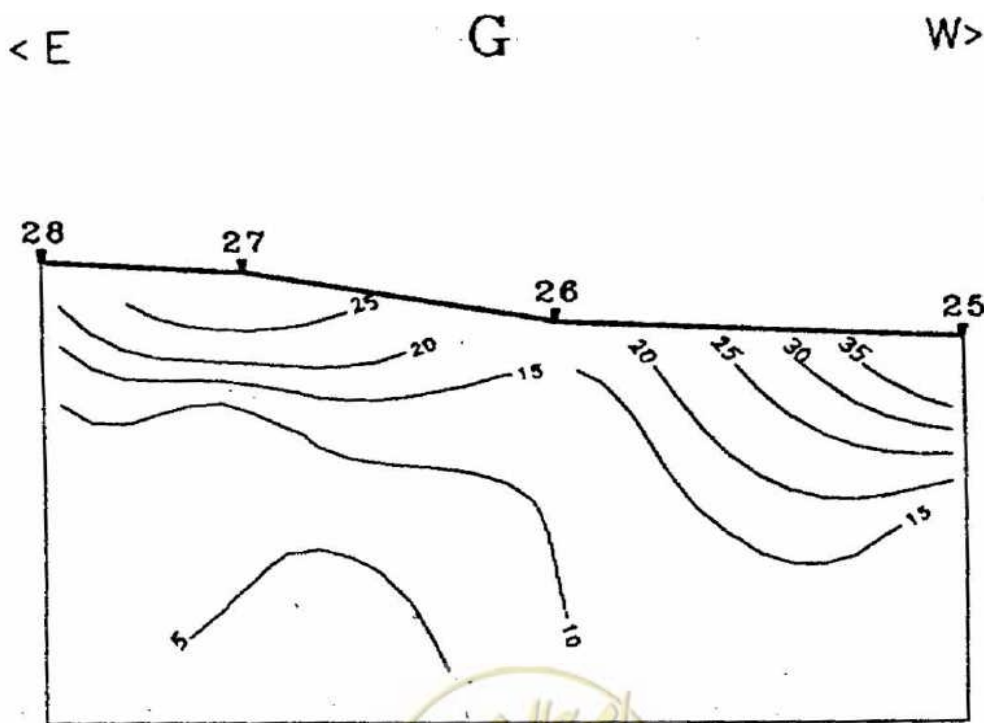
- پربندهای هم مقاومت عرضی بر روی نقشه آورده می شود. با توجه به گستره معمولاً وسیع مقاومت عرضی در منطقه، فاصله پربندی (برحسب اهم متر مربع) باید در صورت امکان با رعایت تقریبی  $\sqrt{2}$  انتخاب شود:

۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ...

- بر روی این نقشه از مقیاس رنگی برای مشخص کردن پهنه‌هایی با مقاومت عرضی متفاوت استفاده می‌شود. این مقیاس براساس طیف نور مرئی از قرمز به بنفش است که متناسب با گستره داده‌ها انتخاب و در راهنمای نقشه مشخص می‌شود.

### ۵-۳-۵ - مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری

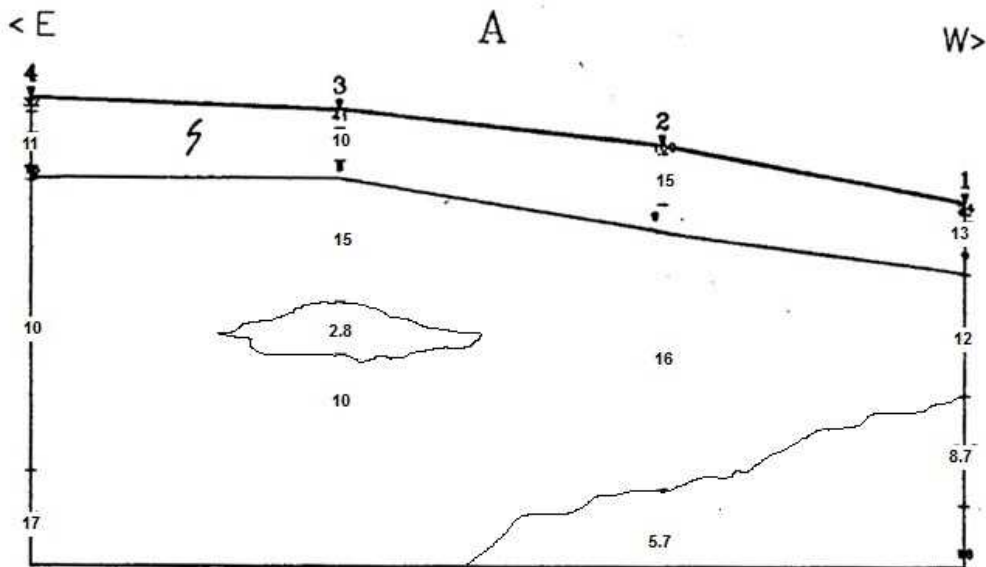
هدف از این مقاطع، نمایش کیفی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری از سطح به عمق و در امتداد خطهای برداشت است. نتایج خام صحرایی مقاومت ویژه ظاهری را می‌توان به صورت مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری (شکل ۵-۲) نشان داد. در این مقطع‌ها محور افقی بیانگر موقعیت بر سطح زمین و محور قائم نشان دهنده ارتفاع ظاهری (معمولا برای آرایه شلومبرژه یک چهارم طول AB و برای آرایه ونر یک سوم طول AB) است. نسبت طول AB مورد استفاده باید در راهنمای مقطع آورده شود. مقیاسهای قائم و افقی باید براساس نوع طرح و متناسب با یکدیگر انتخاب و در راهنمای مقطع آورده شود. مقیاس افقی معمولا همان مقیاس نقشه موقعیت و مقیاس قائم حداکثر تا ۱۰ برابر مقیاس افقی انتخاب می‌شود. نام خط برداشتی که مقطع برای آن رسم گردیده است، در بالا و راستای مقطع در دو طرف آن نوشته می‌شود. بر روی این مقطع وضعیت پستی و بلندی سطح زمین با خط ضخیمتر آورده می‌شود. محل گمانه‌های الکتریکی با یک خط تیره قائم و شماره گمانه در بالای آن بر روی مقطع مشخص می‌گردد. فاصله پربندی و استفاده از مقیاس رنگی در این مقطعه‌ها مانند نقشه هم مقاومت ویژه ظاهری همان مقطع است. محل تلاقی با دیگر مقطعه‌ها با یک خط تیره قائم و یک دایره در بالای آن که نام مقطع دوم را در بر دارد مشخص می‌شود:



شکل (۲-۵) یک مقطع هم مقاومت ژئوالکتریک

### ۵-۳-۶- مقطع ژئوالکتریک

هدف از این مقطع، نمایش کمی تغییرات مقاومت الکتریکی حقیقی از سطح به عمق و در امتداد خطهای برداشت است. نتایج تفسیر داده‌های صحرائی (مقاومت ویژه حقیقی) را می‌توان به صورت مقطع ژئوالکتریک نشان داد (شکل ۵-۳). در این مقطعها محور افقی بیانگر موقعیت بر سطح زمین و محور قائم نشان دهنده ارتفاع است. مقیاسهای قائم و افقی باید براساس نوع طرح و متناسب با یکدیگر انتخاب و در راهنمای مقطع آورده شود. مقیاس افقی معمولا همان مقیاس نقشه موقعیت و مقیاس قائم حداکثر تا ۱۰ برابر مقیاس افقی انتخاب می‌شود. نام خط برداشتی که مقطع برای آن رسم گردیده است، در بالا و راستای مقطع در دو طرف آن نوشته می‌شود. بر روی این مقطع وضعیت پستی و بلندی سطح زمین با خط ضخیمتر آورده می‌شود. محل گمانه‌های الکتریک با یک خط تیره قائم و شماره گمانه در بالای آن بر روی مقطع مشخص می‌گردد. مقاومت ویژه هر لایه (برحسب اهم متر) در زیر هر گمانه نوشته می‌شود. مرز قطعی لایه‌ها با خط ممتد نازک و مرز احتمالی لایه‌ها با خط پین مشخص می‌گردد. جنس لایه‌ها، محل گسله‌ها و همبریه‌ها تا حد امکان مطابق استاندارد علامتهای زمین شناختی بر روی مقطع آورده می‌شود:



شکل (۵-۳) یک مقطع ژئوالکتریک

### ۵-۳-۷- نمودارهای پروفیل زنی

#### الف) نمودارهای پروفیل زنی ساده

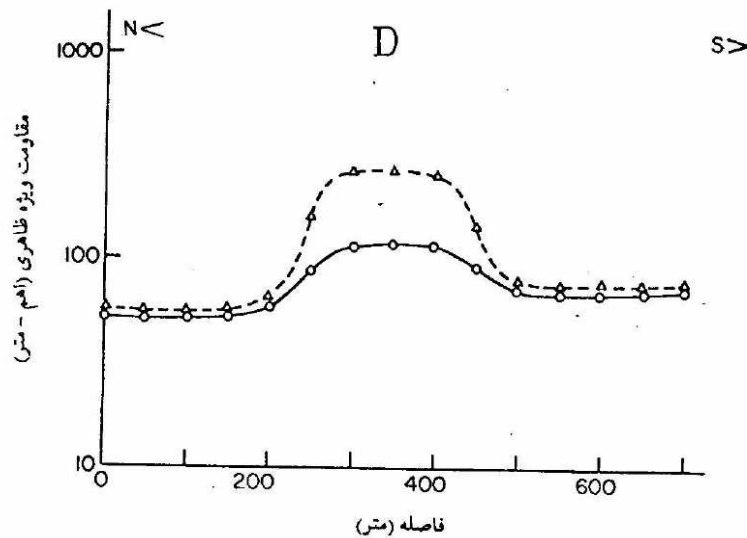
هدف از این نمودارها، نمایش کیفی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در امتداد خطهای برداشت برای یک یا چند طول فرستنده جریان (طول AB) است. نتایج اندازه‌گیری‌های پروفیل زنی با آرایشهای ونر و شلومبرژه به صورت نمودار نمایش داده می‌شود (شکل ۵-۴). در این نمودارها محور افقی بیانگر موقعیت در سطح زمین و محور قائم نشان دهنده مقاومت ویژه ظاهری است. هر دو محور خطی‌اند و مقیاس محور افقی معمولا همان مقیاس نقشه موقعیت و مقیاس محور قائم با توجه به گستره تغییرات مقاومت ویژه ظاهری انتخاب می‌شود. نام خط برداشتی که نمودار برای آن رسم گردیده است، در بالا و در راستای خط برداشت در دو طرف آن نوشته می‌شود. برای مشخص کردن نمودارهای پروفیل زنی برای هر طول AB از نشانه‌ها (دایره، مثلث، ضربدر و ...) و خطهای مناسب (خط ممتد، خط چین، نقطه خط و ...) استفاده می‌شود.



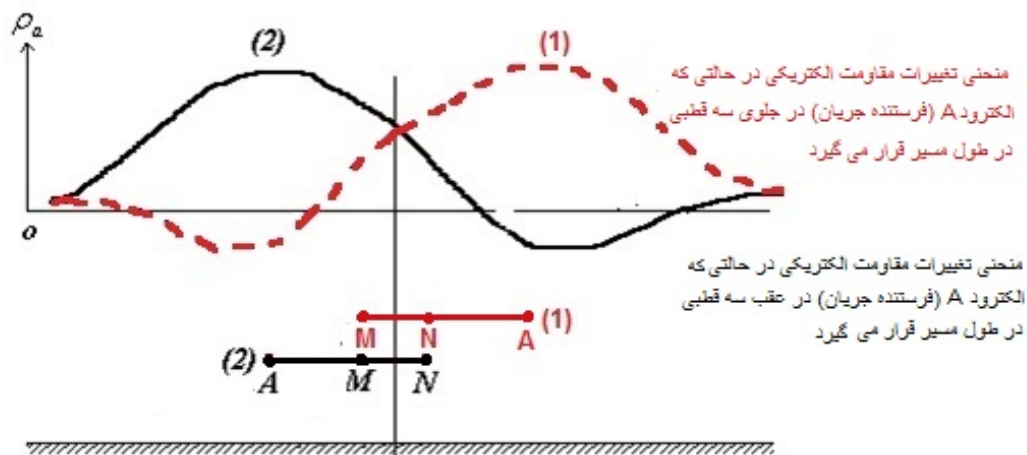
شود. این علائم باید در راهنمای نقشه معرفی گردند:

### ب) نمودارهای پروفیل زنی ترکیبی (C.R.P)

هدف از این نمودارها نمایش کیفی تغییرات مقاومت الکتریکی در امتداد خط‌های برداشت برای یک یا چند فاصله AO تایی می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری‌های پروفیل زنی ترکیبی (C.R.P) با آرایه سه الکترودی به صورت نمودار نمایش داده می‌شود (شکل ۵-۵). در مسیر این تغییرات محدوده گسلها و شکستگی‌ها مشخص می‌گردند. مشخصات این نمودارها از نظر ارائه مطابق با نمودارهای پروفیل زنی ساده می‌باشد.



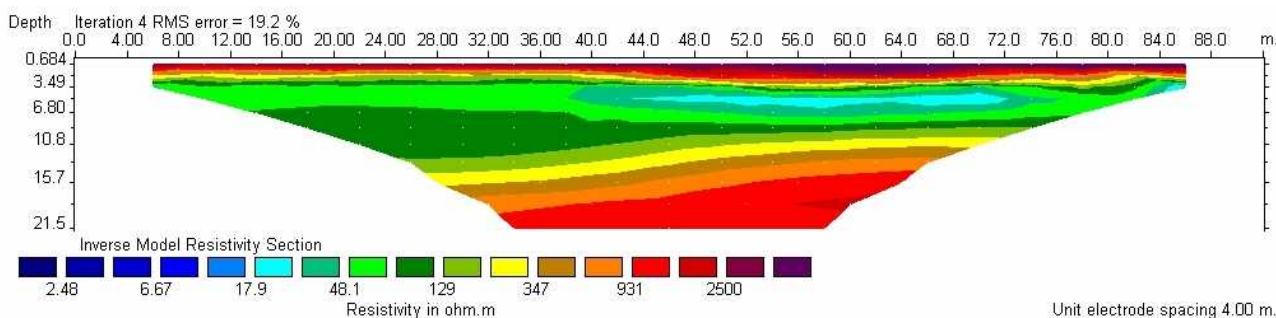
شکل (۴-۵) یک نمودار پروفیل زنی الکتریکی



شکل (۵-۵) نمودار پروفیل زنی ترکیبی (C.R.P)

### ۵-۳-۸ - مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری قطبی - قطبی و یا دوقطبی - دوقطبی

هدف از این مقطع، نمایش کیفی تغییرات مقاومت ظاهری قطبی - قطبی و یا دوقطبی - دوقطبی از سطح به عمق و در امتداد خطهای برداشت است. نتایج اندازه گیریهای پروفیل زنی قطبی - قطبی و یا دوقطبی - دوقطبی (مقاومت ویژه ظاهری) را می‌توان به صورت مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری نشان داد (شکل ۵-۵). در این مقطعها محور افقی بیانگر موقعیت بر سطح زمین و محور قائم نشان دهنده عمق ظاهری است. مقیاس های قائم و افقی باید براساس نوع طرح و متناسب با یکدیگر انتخاب و در راهنمای نقشه آورده شود. مقیاس افقی معمولا همان مقیاس نقشه موقعیت و مقیاس قائم حداکثر تا ۱۰ برابر مقیاس افقی انتخاب می‌شود. نام خط برداشتی که مقطع برای آن تهیه گردیده است در بالا و راستای خط برداشت در دو طرف آن نوشته می‌شود. محل درج مقدار مقاومت ویژه در عمق برای هر اندازه گیری محل تلاقی خطهای ۴۵ درجه ای است که از وسط دو قطبی AB برای آرایه دوقطبی - دو قطبی و محل الکتروود A برای آرایه قطبی - دوقطبی و دوقطبی MN رسم می‌گردد. فاصله دوقطبیهای AB و MN (a) و حداکثر فاصله مرکزهای AB و MN (بر حسب a) باید در راهنمای نقشه آورده شود. فاصله پربندی (بر حسب متر) متناسب با گستره داده ها و در صورت امکان با رعایت ضریب تقریبی  $\sqrt{2}$  انتخاب می‌شود. بر روی این مقطع می‌توان از مقیاس رنگی برای مشخص کردن بخشهایی با مقاومت ویژه متفاوت استفاده کرد. این مقیاس معمولا براساس طیف نور مرئی از قرمز تا بنفش است که متناسب با گستره داده ها انتخاب و در راهنمای نقشه مشخص می‌شود:



شکل (۵-۶) یک مقطع هم مقاومت ویژه ظاهری

### ۵-۳-۹ - راهنمای نقشه ها

توضیح علامتها و اطلاعات نقشه های الکتریکی در قسمت راهنمای نقشه آورده می‌شود (شکل ۵-۶). صفحه راهنما در اندازه A4 و در گوشه ای از نقشه بر حسب مورد آورده می‌شود تا پس از تا کردن نقشه، صفحه راهنما در رو قرار گیرد. صفحه راهنما شامل سه بخش بالایی، میانی و پایینی به شرح زیر است:

#### الف) بخش بالایی (عنوان):

شامل نام کارفرما، روش مطالعه، نام طرح و نام منطقه مورد مطالعه است که به فارسی در سمت راست و به انگلیسی در سمت چپ نوشته می‌شود.

#### ب) بخش میانی:

شامل علامتهای ژئوفیزیکی، هیدروژئولوژیکی، زمین شناسی و سایر علامتهای به کار رفته در نقشه به شرح زیر:

- شرح علامتها به فارسی در سمت راست و معادل آنها به انگلیسی در سمت چپ و خود علامت در وسط. علامتهای

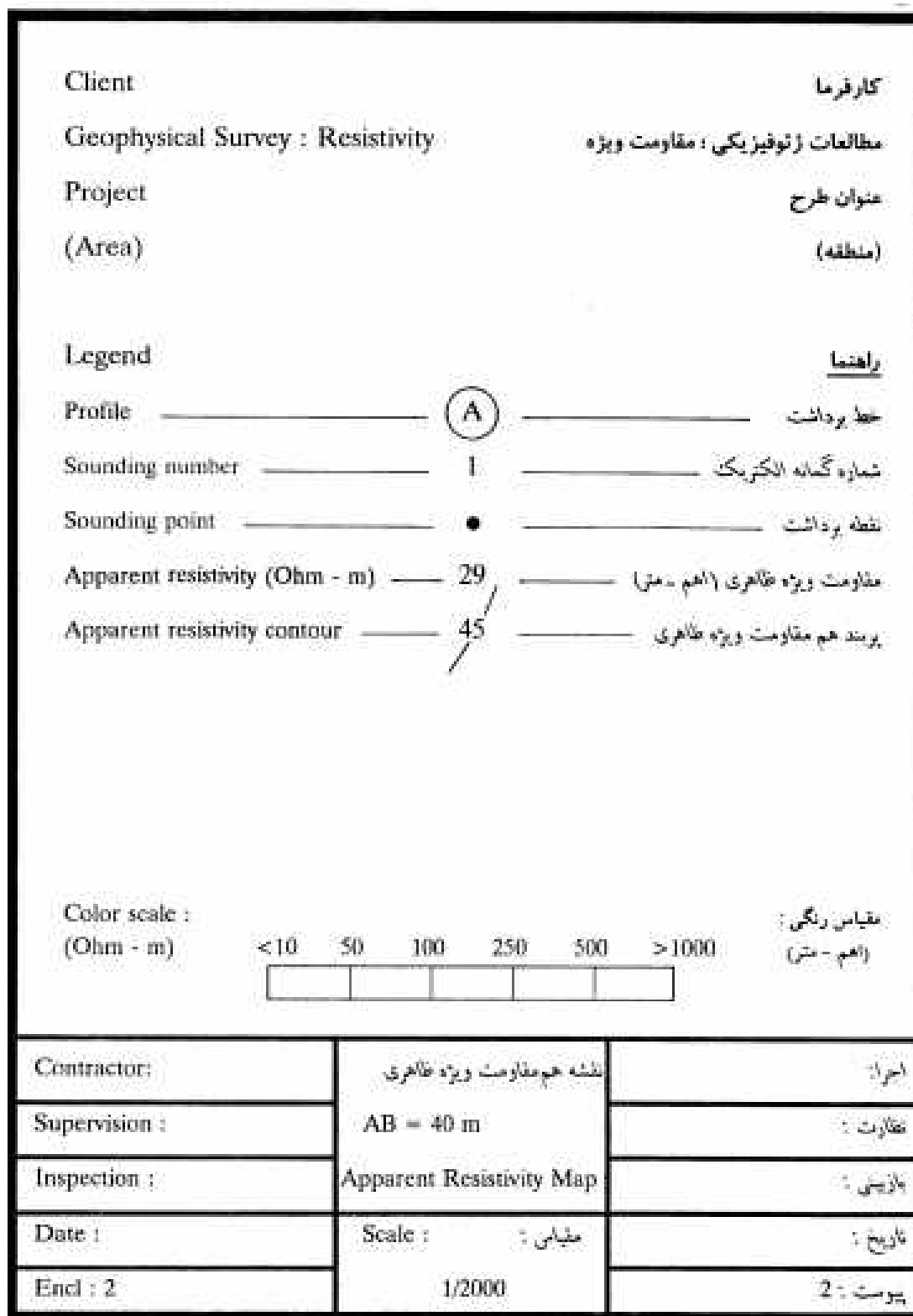


- ژئوفیزیکی طبق استاندارد روشها شامل: محل ایستگاههای اندازه گیری، مقدارهای کمی ژئوفیزیکی، منحنيهای پربندی، جهت تغييرات مقدارهای کمی ژئوفیزیکی و ...
- علامتهای هیدروژئولوژیکی شامل: محل چاههای عمیق، نیمه عمیق، جهت حرکت آبهای زیرزمینی، رودخانه ها . غیره برحسب مورد (طبق استاندارد وزارت نیرو)
  - علامتهای زمین شناختی شامل: سازندهای زمین شناختی، گسله ها، شیب، جهت و غیره (طبق استاندارد وزارت نیرو). در صورت گسترده بوده اطلاعات زمین شناختی، می‌توان راهنمای زمین‌شناسی را به طور جداگانه در محل مناسبی بر روی نقشه آورد.
  - در صورت نیاز به مقیاس رنگی، این مقیاس در زیر بخش میانی آورده می‌شود.

#### ج) بخش زیرین (سایر اطلاعات):

- در پائین صفحه راهنما، جدول مشخصات شامل اطلاعات زیر به فارسی و لاتین آورده می‌شود:
- نوع نقشه، مقطع یا نمودار
  - مقیاس
  - اجرا (نام مهندس مشاور، نهاد یا سازمان اجراکننده مطالعات)
  - نظارت (نام دستگاه نظارت)
  - بازبینی (نام و امضای مسئول تهیه نقشه)
  - تاریخ (تاریخ تهیه نقشه)
  - پیوست (شماره نقشه). این شماره باید در گوشه راست و بالای کادر راهنما و در خارج آن نیز منظور شود.





شکل (۵-۷) راهنمای نقشه در روشهای ژئوالکتریکی

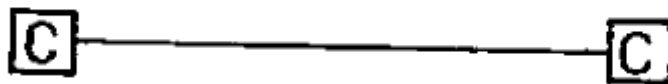


## ۵-۴- استاندارد علامتها و مشخصه های نقشه ها، مقطعه‌ها و نمودارهای لرزه ای

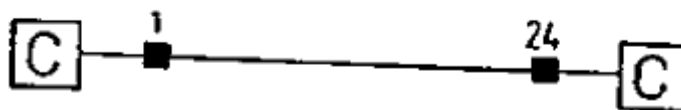
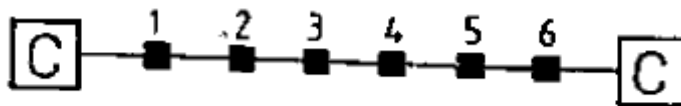
## ۵-۴-۱- نقشه موقعیت برداشت های سطحی

هدف از ارائه این نقشه، مشخص کردن موقعیت اندازه‌گیری های لرزه ای در سطح نسبت به یکدیگر و نسبت به عارضه های طبیعی و مصنوعی موجود در منطقه است. این نقشه در برگرفته اطلاعات پایه‌ای از قبیل: توپوگرافی، زمین-شناسی، محل اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی قبلی و همچنین محل چاهها و چشمه ها، رودخانه ها و آبراهه ها، مسیله‌ها و راههای اصلی و فرعی است. این اطلاعات از طرف کارفرما در اختیار مجری عملیات قرار می گیرد و طبق استاندارد نقشه های زمین شناسی و هیدروژئولوژی بر روی نقشه آورده می شود. اطلاعات منظور شده بر روی نقشه موقعیت باید در حدی باشد، تا ضمن حفظ توانایی نقشه، اطلاعات مفیدی را نیز که برای تفسیر نتایج اندازه گیری های لرزه ای لازم خواهد شد، در برگیرد. موقعیت اندازه گیری های لرزه ای انجام شده بر حسب مورد به شرح زیر بر روی نقشه موقعیت آورده می شود:

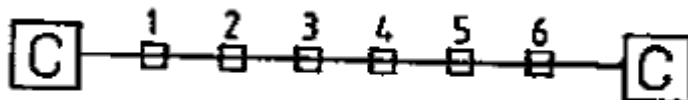
- محل و امتداد خطهای برداشت (پروفیلها) با خط ممتد مشخص و هر خط برداشت با یک حرف بزرگ لاتین A تا Z در دو انتها و در داخل یک مربع نامگذاری می گردد:



- در صورت نیاز به نمایش کلیه گیرنده ها، محل آنها با مربع کوچک توپر و شماره گیرنده در بالای آن مشخص می‌شود، در غیر این صورت تنها محل اولین و آخرین گیرنده نشان داده می شود:



- خطهای برداشت لرزه ای قبلی به ترتیب قبلی و به ترتیب بالا ولی با استفاده از مربعهای توخالی نمایش داده می شود:



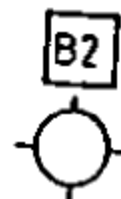
- محل چشمه های لرزه ای با مربع توخالی و یک ضربدر در داخل آن و شماره چشمه در بالای آن نشان داده می‌شود:



- ابعاد مربعهای مورد استفاده برای نشان دادن محل گیرنده ها و چشمه ها ۲ میلی متر است.

#### ۵-۴-۲- نقشه موقعیت برداشتهای درون گمانه ای

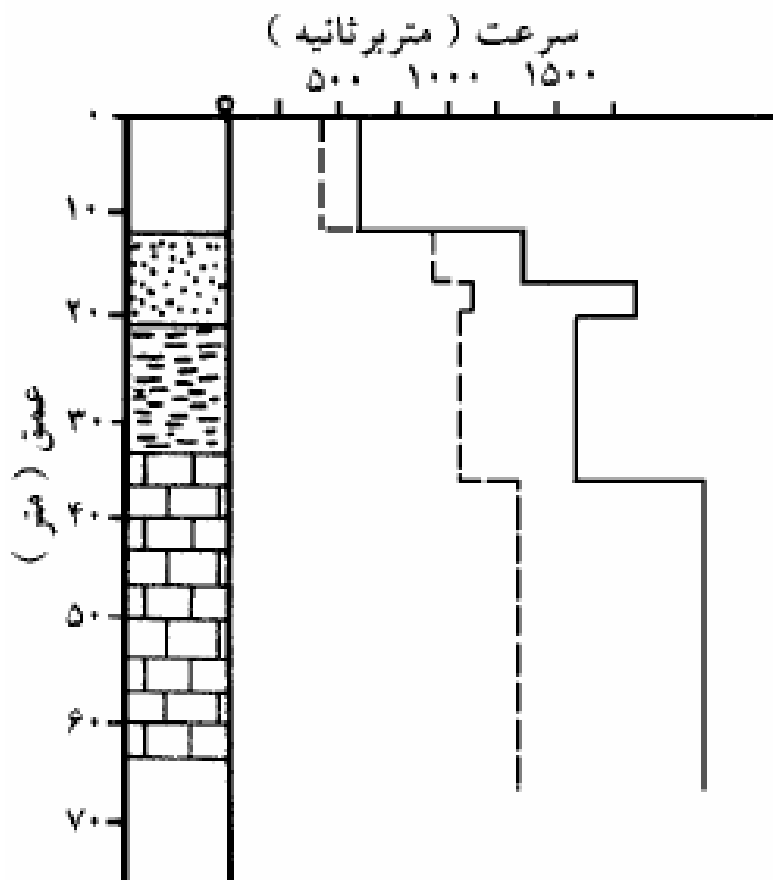
هدف از ارائه این نقشه، مشخص کردن موقعیت اندازه گیری های سرعت لرزه ای درون گمانه ای نسبت به یکدیگر و نسبت به عارضه های طبیعی و مصنوعی موجود در منطقه است. این نقشه در برگیرنده اطلاعات پایه ای از قبیل توپوگرافی، زمین شناسی، محل اندازه گیری های ژئوفیزیکی قبلی و همچنین محل گمانه ها، چاهها و چشمه ها، رودخانه ها و آبراهه ها، مسیل ها و راههای اصلی و فرعی است. این اطلاعات از طرف کارفرما در اختیار مجری عملیات قرار می گیرد و طبق استاندارد نقشه های زمین شناسی و هیدروژئولوژی بر روی نقشه آورده می شود. اطلاعات منظور شده بر روی نقشه موقعیت باید در حدی باشد تا ضمن حفظ خوانایی نقشه، اطلاعات مفیدی را نیز که برای تفسیر نتایج اندازه گیری های لرزه ای درون گمانه ای لازم خواهد بود، دربرگیرد. موقعیت گمانه هایی که در آنها اندازه گیری سرعت انجام شده است، با یک مربع به ضلع ۵ میلیمتر که شماره گمانه در داخل آن نوشته شده است، مشخص می گردد. لازم به توضیح است که در صورت برداشتهای سطحی و درون گمانه ای در یک مطالعه، اطلاعات مربوط به این دو برداشت بر روی یک نقشه موقعیت آورده می شود.



#### ۵-۴-۳- نگار سرعت لرزه ای

هدف از این نگار، نمایش کمی تغییرات سرعت موجهای لرزه ای از سطح به عمق بوده و در مطالعات لرزه ای شکست مرزی به شبوه درون گمانه ای به کار می رود. نتایج تفسیر اندازه گیری های سرعت درون گمانه ای (سرعت امواج و ضخامت لایه ها) را می توان به صورت نگار سرعت لرزه ای نشان داد (شکل ۵-۷). در این نگار محور قائم بر حسب عمق، با مقیاسی متناسب با عمق مطالعه انتخاب می شود. عمق از سطح زمین (بر حسب متر) در سمت چپ محور نوشته می شود. در سمت راست محور قائم اطلاعات زمین شناسی به دست آمده از حفاری ها با استفاده از علائم استاندارد شده زمین شناختی نشان داده می شود. نمودار تغییرات سرعت موجهای لرزه ای بر حسب عمق در سمت راست ستون زمین شناختی با مقیاس افقی در بالای نقشه (معمولاً بر حسب متر بر ثانیه) رسم می شود. این نمودار برای موجهای تراکمی با خط ممتد و برای موجهای برشی به صورت خط چین (که در راهنمای نقشه ذکر می گردد) نشان داده می شود.



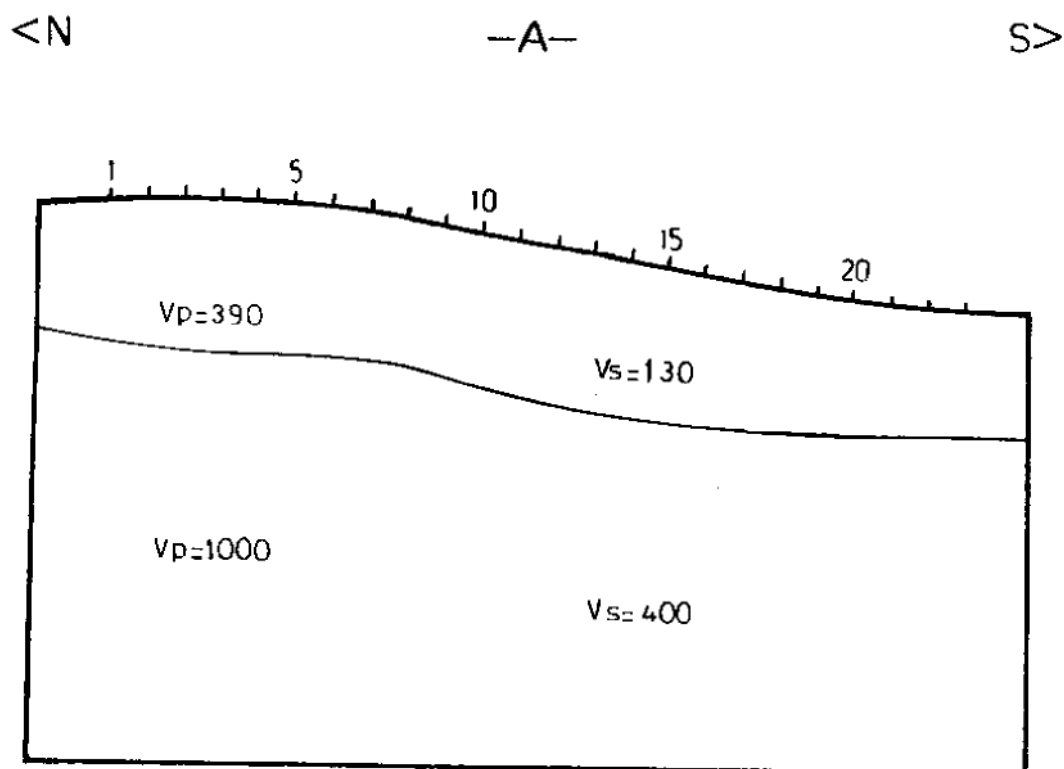


شکل (۵-۸) یک نگار سرعت لرزه ای

#### ۵-۴-۴ - مقطع لرزه ای

هدف از این مقطع، نمایش کمی تغییرات سرعت موجهای لرزه ای از سطح به عمق و در امتداد خطهای برداشت بوده و در مطالعات لرزه ای شکست مرزی با برداشتهای سطحی به کار می‌رود. نتایج تفسیر داده های صحرایی (سرعت موجهای لرزه ای) را می‌توان به صورت مقطع لرزه ای نشان داد (شکل ۵-۸). در این مقطع ها محور افقی بیانگر موقعیت بر سطح زمین و محور قائم نشان دهنده ارتفاع است. مقیاسهای افقی و قائم باید براساس نوع طرح و متناسب با یکدیگر انتخاب شوند. مقیاس افقی معمولا همان مقیاس نقشه موقعیت و مقیاس قائم حداکثر تا ۱۰ برابر مقیاس افقی انتخاب می‌شود. نام خط برداشتی که مقطع برای آن رسم گردیده است، در بالا و راستای مقطع و در دو طرف آن نوشته می‌شود. بر روی این مقطع، وضع پستی و بلندی سطح زمین با خط ضخیمتر آورده می‌شود. محل ژئوفونها با یک خط تیره و شماره ژئوفونها در بالای آن بر روی مقطع مشخص می‌شود. سرعت موجهای لرزه ای (برحسب متر بر ثانیه) برای هر لایه نوشته می‌شود. جنس لایه ها، محل گسله ها و همبریها تا حد امکان مطابق استاندارد علامتهای زمین شناختی بر روی مقطع آورده می‌شود.





شکل (۵-۹) یک مقطع لرزه ای

#### ۵-۴-۵ - راهنمای نقشه ها

توضیح علامتها و اطلاعات نقشه های لرزه ای در قسمت راهنمای نقشه آورده می شود (شکل ۵-۹). صفحه راهنما در اندازه A4 است و در گوشه ای از نقشه بر حسب مورد آورده می شود، تا پس از تا کردن نقشه، این صفحه در رو قرار گیرد. صفحه راهنمای نقشه شامل سه بخش بالایی، میانی و پائینی که مشابه با آنچه در مورد روشهای الکتریکی عنوان شد، می باشد.





<b>Client</b>	کارفرما	
<b>Geophysical Survey : Refraction</b>	مطالعات ژئوفیزیکی لرزه‌ای شکست مرزی	
<b>Project</b>	عنوان طرح	
<b>(Area)</b>	(منطقه)	
<b>Legend</b>	<u>راهنما</u>	
Profile _____	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">A</span> _____ خط برداشت	
Receiver _____	■ _____ گیرنده	
Source _____	⊠ _____ چشمه	
<b>Contractor:</b>	نقشه موقعیت	اجرا:
<b>Supervision :</b>	Location Map	نظارت :
<b>Inspection :</b>		بازبینی :
<b>Date :</b>	Scale :                      : مقیاس :	تاریخ :
<b>Encl : 2</b>	1/2000	پیوست : 2

شکل (۵-۱۰) راهنمای نقشه در روشهای لرزه‌ای





---

## منابع و مأخذ





## منابع و مأخذ:

- سا —  
 زمان برنامه و بودجه، ۱۳۷۷. ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات الکتریک با روش مقاومت ویژه، ۱۳۷۷.
- سا —  
 زمان برنامه و بودجه، ۱۳۷۷. ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب: استاندارد مطالعات لرزه ای با روش شکست مرزی،  
 — معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۷۸، شرح خدمات مطالعات ژئوفیزیکی.  
 — سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۵۱، شرح خدمات مطالعات راههای اصلی.  
 — شرح خدمات مطالعات ژئوفیزیکی، ۱۳۷۸، معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری  
 — سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۶۰، شرح خدمات مطالعات راههای فرعی.  
 — سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۶۵، شرح خدمات مطالعات بهسازی راه.  
 — سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۸۶، راهنمای تهیه گزارش توجیه طرحهای راهسازی.  
 — سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۸۲، مشخصات فنی عمومی راه.  
 — سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۷۸، دستورالعمل تهیه پروژه راههای جنگلی.  
 — سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۷۵، آئین نامه طرح هندسی راه  
 — سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۸۴، راهنمای طرح، اجرا و بهره برداری راههای جنگلی.  
 — سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۶۲، شرح خدمات مطالعات مرحله اول و دوم تونل.  
 — سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۵۱، شرح خدمات مطالعات پل،  
 — معماریان، حسین. ۱۳۷۷ "زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
 — شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۴، استاندارد علامت ها و مشخصه های نقشه های ژئوفیزیکی  
 — شعبانی، الهام. ۱۳۸۹، بهینه سازی روش خود همبستگی مکانی SPAC برای تعیین مدل سرعت در مطالعه اثر ساختگاه: رساله دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Aki, K., 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, 35, 415–456.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1988. "Manual on Subsurface Investigations, 1st Edition, Single User Digital Publication" 1988.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2000, Annual Book of ASTM Standards, Volumes 04.08 Soil and Rock (I) & 04.08 Soil and Rock (II), ASTM, West Conshohocken, PA.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 1998, Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the US Army Corps of Engineers, No. 23, ASCE Press, Reston, VA, 7-23.
- Anderson, N. L. (2006) Selection of Appropriate Geophysical Techniques: A Generalized Protocol Based on Engineering Objectives and Site Characteristics. Proc., 2006 Highway Geophysics.
- Anderson, N.L, Croxton, N., Hoover, R. and Sirls, P. (2008) Geophysical Methods Commonly Employed or Geotechnical Site Characterization. TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C130. Transportation Research Board Exploration and Classification of Earth Materials Committee July 2008.
- Anderson, N.L, Croxton, N., Hoover, R. and Sirls, P. (2008) Geophysical Methods Commonly Employed or Geotechnical Site Characterization. TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR

- E-C130. Transportation Research Board Exploration and Classification of Earth Materials Committee July 2008.
- Annan, A. P., 1996, Transmission dispersion and GPR: *J. Envir. Eng. Geophys.*, 0, 125–136.
- Ansal, A., 2004. *Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation (Geotechnical, Geological, and Earthquake Engineering)*. Springer publication.
- ASTM- D4428, 1996, Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing
- ASTM- D5777, 1996, Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation
- ASTM-D4428/D4428M-00, 2002, Standard Test Method for Crosshole Seismic Testing.
- ASTM-D5753, 2002, Standard Guide for Planning and Conducting, Borehole Geophysical Logging
- ASTM-D6167, 2002, Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging: Mechanical Caliper
- ASTM-D6274, 2002, Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging—Gamma
- ASTM-D6429, 2002, Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods
- ASTM-D6430, 2002, Standard Guide for Using the Gravity Method for Subsurface Investigation
- ASTM-D6431, 2002, Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation
- ASTM-D6432, 2002, Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation
- ASTM-D6639, 2002, Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations
- ASTM-D6726, 2002, Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging—Electromagnetic Induction
- ASTM-D6727, 2002, Standard Guide for Conducting Borehole, Geophysical Logging—Neutron
- ASTM-D6820, 1996, Standard Guide for Using the Time Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations
- ASTM-G57, 1996, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method
- Ballard G (1992) Under the Skin. *World Highways/Routes du Monde*. Jan/Feb 1992, 37–39.
- Ballard G (1993) Non Destructive Assesment of Pavement Design & New Build Quality. In: J. Bungey (ed) *Proceedings of Conference on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 14–16
- Bares, m., and Haeni, F.P., 1991 “Application of Ground Penetration Radar Methods in Hydrogeologic Studies.” *Ground Water*, Vol 29, No. 3, 1991. pp. 375-386.
- Based on Engineering Objectives and Site Characteristics. *Proc.*, 2006 Highway Geophysics-
- Benson, R., Glaccum, R.A., and Noel, M.R., 1982, *Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration*, office of research and development, U.S. environmental protection agency, Las Vegas, Nevada, published by national water well association Dublin, Ohio.
- Bettig, B., Bard, P.Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou C. and Hatzfeld, D., 2001. Analysis of dense array noise measurements using the modied spatial auto-correlation method (SPAC). Application to the Grenoble area. *Bolletino di Geosica Teorica ed Applicata*, 42, 281-304
- BOARD FOR GEOLOGISTS AND GEOPHYSICISTS. “GUIDELINES FOR GEOPHYSICAL REPORTS FOR ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING GEOLOGY”. STATE OF CALIFORNIA - STATE AND CONSUMER SERVICES AGENCY.
- Borcherdt, R.D., et J.F. Gibbs, 1970. Effect of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. *Bull.Seism. Soc. Am.*, **66**, 467-500.
- Breiner, S. 1973, *Applications manual for portable magnetometers*, Geometrics, Sunnyvale CA.
- Bullen, K. E., 1963, *An introduction to the theory of seismology*: Cambridge At The University Press, 381 pp.
- Bulter, D.K., 1980, *Microgravimetric techniques for geotechnical applications*, U.S., Army engineer waterways experiment station.
- California Department of Transportation, 2009. “Foundation Report Preparation for Bridge Foundation. [www.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/requests/fr\\_preparation\\_bridge.pdf](http://www.dot.ca.gov/hq/esc/geotech/requests/fr_preparation_bridge.pdf)

- California Division of Mines and Geology, 1988. Guideline for Geophysical Report for Environmental and Engineering Geology.
- Canada - Nova Scotia Offshore Petroleum Board (CNSOPB), "GEOPHYSICAL AND GEOLOGICAL PROGRAMS IN THE NOVA SCOTIA OFFSHORE AREA GUIDELINES FOR WORK PROGRAMS, AUTHORIZATIONS & REPORTS"
- Canada-Newfoundland and Labrador Offshore Petroleum Board, 2008. Geophysical, Geological, environmental and Geotechnical Program Guideline.
- Canadian Association of Petroleum Landmen, 2006. Practice Standard For Use Of Geophysical Data, 2006, .
- Capon, J. 1969, High- Resolution Frequency- Wavenumber Spectrum Analysis [Journal]// PROCEEDINGS OF THE IEEE. - AUGUST 1969. - pp. VOL. 57, NO. 8, P 1408-1419.
- Caterpillar Tractor Company (Caterpillar), 1984, Caterpillar Performance Handbook 15th Edition, Peoria, Illinois.
- Caterpillar Tractor Company (Caterpillar), 1993, Caterpillar Performance Handbook 24th Edition, Peoria, Illinois.
- Crowin, R.F., 1990, The Self Potential method for environmental and engineering applications, geotechnical and Environmental Geophysics, Vol 1: review and Tutorial, S.H. Ward (ed.), Soc. Of Explor. Geophy.
- Daniels, D.J., 1996 "Surface Penetration radar." The institute of Electrical Engineers, London, UK., 1996, 330 pp.
- Daniels, J.J., 1989, fundamental of ground penetration radar, Proceedings, symposium on application of geophysics to engineering and environmental problems, society of engineering and mineral exploration geophysics.
- Darracott B.W. & McCann, D.M., 1986, Planning Engineering Geophysical Surveys, in: Hawkins A.B. (editor), Site Investigation Practice: Assessing BS5930, Geological Society Engineering Geology Special Publication No.2.
- Davidson,, N.C. and Chase, S.B. 1998. Radar Systems for Tomographic Bridge Deck Inspection. Proc. of the Seventh Int. Conf. on Ground-Penetrating Radar, GPR'98, May 27-30, 1998, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, V. 1, pp. 87-89.
- Davis JL, Rossiter JR, Mesher DE & Dawley CB (1994) Quantitative Measurement of Pavement Structures Using Radar. Proceedings of 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, Kitchener, Ontario, Canada, 319-334.
- Dobrin, M.B., 1976, *Introduction to Geophysical Prospecting*, McGraw-Hill, 3rd ed.
- Exploration and mining division of Ireland, 2008. Guideline for regional airborne geophysical surveying for minerals.
- Fisher, E., McMechan, G., and Annan, P., 1992, Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data: Geophysics, v. 57, p. 495-504.
- Ghosh, D. P., 1971a. Inverse Filter Coefficient for the Computation of Apparent Resistivity Standard Curves for a Horizontally Stratified Earth. Geophysical Prospecting, Vol 19, No. 4, pp 769-775.
- Ghosh, D. P., 1971b. The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Sounding Measurements. Geophysical Prospecting, Vol 19, pp 192-217.
- Guidelines for submission of geophysical data as required under the South Australian Petroleum Act 2000, 2008, South Australian Petroleum
- Guidelines for the Reporting of Geophysical and Geological Data Acquired in Permit/License Areas for Hydrocarbon Exploration and Production, 2008, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig Holstein, Geologischer Dienst (LANU), Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Geologisches Landesamt Hamburg (BSU) and Geologischer Dienst für Bremen (GDfB)
- Haeni F. P., 1988, Application of the seismic refraction Techniques to Hydrologic Studies, U.S. geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 2, chapter D2.
- Haghshenas, E., P. Bard, N. Theodulidis and SESAME WP04 Team (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio, Bull. Earthquake Eng. 6, no.1, 75-108.
- Henstridge, D.J., 1979. A signal processing method for circular arrays. *Geophysics*, 44, 179-184.

- Hodgson J.A., 2007 "Geophysical Survey for Cork Northern Ring Road Western Section" prepared for Cork City Council, BMA GeoServices.
- Horike, M., 1985, Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, *J. Phys. Earth.*, v. 33, p. 59-96.
- INAZAKI T., KURAHASHI T., and WAKASUGI T, 2002. "Integrated geophysical survey to characterize the geological setting for the Ise Bay Mouth Highway Project", The 2<sup>nd</sup> Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, GEOPHYSICS 2002.
- International Society of Rock Mechanics (ISRM), 1981, Suggested methods for geophysical logging boreholes.
- International Society of Rock Mechanics (ISRM), 1984, Suggested methods for Seismic Testing Within and Between Boreholes.
- International Society of Rock Mechanics (ISRM), 2004, Suggested methods for Land Geophysics in Rock Engineering.
- International Society of Rock Mechanics (ISRM), 2006, Suggested methods Borehole Geophysics in Rock Engineering
- Intropex, 1997: GREMIX users manual, Golden, Co, USA.
- Keller, G. V., and F. Frischknecht, 1966. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press, New York.
- Kohler, A.; Ohrnberger, M.; Scherbaum, F.; Wathelet, M; and Cornou C., 2007. Assessing the reliability of the modified three-component spatial autocorrelation technique. *Geophys. J. Int.* VOL 168 P. 779-796.
- Kvaerna, T. and F. Ringdahl, 1986. Stability of various fk-estimation techniques, in Semiannual Technical Summary, 1 October 1985 - 31 March 1986, In NORSAR Scientific Report, 1-86/87, Kjeller, Norway, 29-40.
- Lacoss, R.T., Kelly, E.J. and Toksoz, M.N., 1969. Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, 34(1), 21-38.
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig Holstein, Geologischer Dienst (LANU), Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Geologisches Landesamt Hamburg (BSU) and Geologischer Dienst für Bremen (GDfB), (2008) "Guidelines for the Reporting of Geophysical and Geological Data Acquired in Permit/License Areas for Hydrocarbon Exploration and Production"
- Langston, C.A. (1979). Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic P and S waves. *J. geophys. Res.*, 84, 4749 - 4762.
- Lomax, A. J. and Snieder R., 1995. The contrast in upper mantle shear-wave velocity between the East European Platform and tectonic Europe obtained with genetic algorithm inversion of Rayleigh-wave group dispersion, *Geophysical Journal International* 123, 169-182.
- Louie, J.L., 2001, Faster, Better, Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays; *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 347-364.
- Maijala, P., Saarenketo, T. and Valtanen, P. 1994. Correlation of Some Parameters in GPR Measurement data with quality Properties of Pavements and Bridge Decks. *Proceedings of Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada. Waterloo Centre for Groundwater Research. pp. 393-406.
- Manacorda, L., Reinante, S. M. E., Cazau, L. and Penna, E., 2002. Los reservorios del Grupo Neuquén. In Schiuma, M., Hinterwimmer, G., Vergani, G. (eds.). *Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina*. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002, 529-550.
- Maser KR (1994) Highway Speed Radar for Pavement Thickness Evaluation. *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 12-16, Kitchener, Ontario, Canada, Vol 2 of 3, 423-432
- Mayne, P.W., B.R. 2001, Christopher, and J. Dejong, "Manual on Subsurface Investigations," National Highway Institute, FHWA Report NHI-01-031, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- McCann, D.M., M. Eddleston, P.J. Fenning, and G.M. Reeves, *Modern Geophysics in Engineering*



- Geology*, The Geological Society, London, England, 1997, 441 pp.
- McMechan, G. A., and Yedlin, M. J., 1981, Analysis of dispersive waves by wave field transformation: *Geophysics*, v. 46, p. 869-874.
- McNeill J.D. and Labson V.F., 1990, Geophysical mapping using VLF radio fields, *Electromagnetic methods in applied geophysics*, soc. Of expl. Geophysics.
- McNeill, J.D., 1980, Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Technical Note TN-6 and 7, 1980.
- McNeill, J.D., 1990, Use of Electromagnetic Techniques for Geotechnical applications, U.S. Army engineer waterways experiment station.
- Meshner DE, Dawley CB, Davies JL & Rossiter JR (1995) Evaluation of New Ground Penetrating Radar Technology to Quantify Pavement Structures. *Transportation Research Record* 1505: 17–26.
- Miller, R. D., Park, C. B., Ivanov, J. M., Xia, J., Laflen, D. R., and Gratton, C., 2000, MASW to investigate anomalous near-surface materials at the Indian Refinery in Lawrenceville, Illinois: *Kansas Geol. Surv. Open-File Rept. 2000-4*, Lawrence, Kansas, 48 pp.
- Mooney, H. M., and W. Wetzel, 1956. The Potentials About a Point Electrode and Apparent Resistivity Curves for a Two-, Three-, and Four Layer Earth. University of Minnesota Press, Minneapolis, MN.
- Mooney, H.M., 1984, *Handbook of Engineering Geophysics*, Vol. 2: *Electrical Resistivity*, Bison Instruments, Minneapolis, Minn.
- Mooney, H.M., 1984. *Handbook of Engineering Geophysics*, Volume 1: *Seismic*. Bison Instruments Inc., 5706 West 36th Street, Minneapolis, MN, 55416.
- Morey, R.m., 1974 “Continuous Subsurface Profiling by Impulse Radar.” *Proceedings Engineering Foundation Conference on subsurface Exploration for Underground Excavation and Heavy Construction*, Henniker, NH, 8/11-16/74. American Society Civil Engineering, 1974, pp. 213-232.
- Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.*, **30-1**, 25-30.
- Nazarian, S. and Desai, M. R., 1993. Automated surface wave method: Field testing: *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 119, p.1094-1111.
- Nazarian, S., and Stokoe II, K. H., 1984. In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves: *Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering*, v. 8, San Francisco, Calif., July 21-28.
- Nazarian, S., Stokoe II, K. H., and Hudson, W. R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems, *Transportation Research Record* No. 930, 38-45.
- NDE Conference*, 2006, pp. 29–47. Available at <http://2006geophysics.mst.edu/>.
- Nogoshi M. et T. Igarashi, 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) (in Japanese with English abstract). *Journal of Seismological Society of Japan*, **24**, 26-40.
- Ohrnberger, M., 2001. Continuous automatic classification of seismic signals of volcanic origin at Mt Merapi, Java, Indonesia. *PhD. thesis*, University of Potsdam, Germany.
- Okada, H. 2004, *The Microtremor survey Method [Journal] // Geophysical monograph series No.12. - 2004.*
- Okada, H., 2006. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method. *Exploration Geophysics*, **37**, 73–84.
- Olhoeft, G.R., 1991” Quantitative Statistical Description of Subsurface Heterogeneities with Ground Penetration radar at Bermidji, Minnesota, U.S. *Geophysical Survey Water-Resources Investigations report 91-4034*, 1991, pp. 650-653.
- Orellana, E., and H. Mooney, 1966. *Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding Over Layered Structures*. Madrid Interciecia.
- Park, C.B., Ivanov, J., Miller, R.D., Xia, J., and Ryden, N., 2001, Multichannel analysis of surface waves (MASW) for pavement-feasibility test: *Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium*, Tokyo, p. 25-30.
- Parolai, S., Picozzi, M., Richwalski, S.M. and Milkereit, C., 2005. Joint inversion of phase velocity dispersion and H/V ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm, considering higher modes. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(11).

- Pfeiffer, J., and Hanna, k., 2005 "CLAY SEAM MAPPING With Electromagnetic Induction" Central Federal Lands Highway Division 12300 West Dakota Avenue Lakewood, CO 80228, Publication No. FHWA-CFL/TD-05-010, November 2005.
- Pullan, S. E., and Hunter, J. A., 1990 "Delineation of buried bedrock valleys using the optimum offset shallow seismic reflection techniques" in geotechnical and Environmental Geophysics, Vol III, Geotechnical, Ward, S.H. (ed.), Soc. Explor. Geophys., Tulsa, OK, 1990.
- Reynolds, J.M., 2000. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Willy and Sons Ltd.
- Richart, F.E., Hall, J.R. Jr. and Woods, R.D., 1970, Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Roberts, J. and Asten, M., 2007. Further investigation over Quaternary silts using the spatial autocorrelation (SPAC) and horizontal to vertical spectral ratio (HVSr) microtremor method. *Exploration Geophysics*, **38**(3), 175–183.
- Robinson & Thagesen, 2004. Road Engineering for Development (2<sup>nd</sup>. Ed.). pub. Routledge, UK
- Roimela, P., Salmenkaita, S., Maijala, P., Saarenketo, T. (2000). "Road Analysis: a Tool for Cost-effective Rehabilitation Measures for Finnish Roads," Presented at GPR 2000, the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, May 23-26, 2000, Gold Coast, Australia
- Rucker M.L. 2000. Applying the seismic refraction technique to exploration for transportation facilities. The first International Conference on the Application of Geophysical Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis , Missouri , USA , Expanded Abstracts, 1–3.
- Rucker, M.L., 1996, Integrating the refraction seismic method into stream crossing characterization for scour and excavation conditions, in Shackelford, C.D., Nelson P.P. and Roth, M.J.S. (eds.), Geotechnical Special Publication No. 58: ASCE, New York, 1163-1177.
- Saarenketo T & Scullion T (1995) Using Electrical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates. Research Report 1341-2. Texas Transportation Institute, College Station, Texas. 71 p.
- Saarenketo T (1992) Ground Penetrating Radar Applications in Road Design and Construction in Finnish Lapland. Geological Survey of Finland, Special Paper 15: 161–167.
- Saarenketo T, Silvast M & Noukka J (2003) Using GPR on Railways to Identify Frost Susceptible Areas. In: Proceedings of 6th International Conference on Railway Engineering, April 30–May 1, London, U.K. 11 p.
- Saarenketo T., Kolisoja P., Vuorimies N., Yliheikkilä T. & Ylitapio T. (2000). Kantavan keroksen murskeen imupaineominaisuudet: Osat I ja II. Tampere University of Technology, Laboratory of Geotechnical Engineering, Publication 51, 71 p. + 37 app.p. and 42 p. + 20 app.p. In Finnish
- Saarenketo, S., Puumalainen, K., Kuivalainen, O. & Kyläheiko, K. (2005) Knowledge-based view on new venture growth. Paper presented in The Inaugural San Francisco-Silicon Valley Global Entrepreneurship Research Conference. San Francisco, California, USA, March 9-12, 2005. Abstract published in the Silicon Valley Review of Global Entrepreneurship Research, Vol. 1, p.57.
- Saarenketo, T. and Scullion, T. 1994. Ground Penetrating Radar Applications on Roads and Highways. Research Report 1923-2F. Texas Transportation Institute, College Station, Texas. 36 p.
- Sambridge, M., 1999a. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: I. Searching a parameter space, *Geophys. J. Int.* **138**, 479-494.
- Sambridge, M., 1999b. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: II. Appraising the ensemble, *Geophys. J. Int.* **138**, 727-746.
- Scherbaum F, Hinzen K and Ohrnberger M. 2003, Determination of shallow shear wave velocity profiles in the Cologne, Germany area using ambient vibrations [Journal] // *Geophys. J. Int.* Vol: 152 , p. 597–612.
- Sen, M. K. and Stofa, P. L., 1991. Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion
- Shama, P. V., Environmental and Engineering Geophysics, Geophysics, Cambridge University Press, p. 475.
- Sirles, P. C. *NCHRP Synthesis 357: Use of Geophysics for Transportation Projects*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006. Available at [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_357.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_357.pdf)

- Smith D.G., Jol, H.M., 1992 "Ground Penetration Radar Investigation of a lake Bonneville Delta Provo level, Brigham City, Utah" *Geology*. Vol 20. 1992, pp. 1083-1086.
- Steeple D. W., and Miller, R. D., 1990 " seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and groundwater problems" in *geotechnical and environmental geophysics Vol I, review and Tutorial*, Ward, S.H. (ed.), Soc. Explor. Geophy., Tulsa, OK, 1990. Ward, S.H., 1990, *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vols. I-III*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla.
- Stokoe II, K.H., Wright, G.W., James, A.B., and Jose, M.R., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method, in *Geophysical characterization of sites, ISSMFE Technical Committee #10*, edited by R.D. Woods, Oxford Publishers, New Delhi.
- Telford, W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff, and D.A. Keys, 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, England
- Thorson, J. R., and Claerbout, J. F., 1985, Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion: *Geophysics*, v. 50, p. 2727-2741.
- Transportation Research Board (TRB), 1996, Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report No. 247, Turner, A.K., and Schuster, R.L. (eds), National Academy Press, Washington, D.C., 241.
- Unterberger, R.R. 1978 " Radar Propagation in Rock salt" *Geophys. Prospect.*, Vol 26, 1978, pp. 312-328.
- Van Nostrand, R. G., and K. Cook, 1966. Interpretation of Resistivity Data. US Geological Survey Prof. Paper 499.
- Ward, S.H., 1990, *Geotechnical and Environmental Geophysics, Vols. I-III*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla.
- Wathelet, M., Jongmans, D. and Ohrnberger, M., 2005. Direct inversion of spatial auto-correlation with the neighbourhood algorithm. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**(5), 1787-1800.
- Wetzel, W. W., and H. McMurray, 1937. A Set of Curves to Assist in the Interpretation of the Three Layer Resistivity Problem. *Geophysics*, Vol 2, pp 329-341.
- Wightman, W. E., F. Jalinoos, P. Sirles, and K. Hanna. *Application of Geophysical Methods to Highway-Related Problems*. Publication No. FHWA-IF-04-021. Central Federal Lands Highway Division, FHWA, U.S. Department of Transportation, 2004. Available at [www.cflhd.gov/agm/index.htm](http://www.cflhd.gov/agm/index.htm).
- Wright, D.L. Olhoeft, G.R., and Watts, R.D. 1984 "Ground Penetration Radar Studies on Cape Cod." Proceeding on the NWWWA/EPA Conference on Surface and borehole Geoohysical methods in Ground Water Investigations. San Antonio, TX. 1984, pp. 666-680.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Estimation of near-surface velocity by inversion of Rayleigh wave, *Geophysics*, 64, 691-700.
- Yilmaz, O, 1987 'Seismic data Processing,' SEG Investigation in geophysics, No. 2, Tulsa, OK, 1987, 526 pp.
- Zohdy, A., 1965. The Auxiliary Point Method of Electrical Sounding Interpretation, and Its Relationship to the Dar Zarrouk Parameters. *Geophysics*, Vol 30, pp 644-660.
- Zohdy, A., 1968. The Effect of Current Leakage and Electrode Spacing Errors on Resistivity Measurements. U.S. Geological Survey, Prof. Paper 600-D, pp 822-833.
- Zohdy, A.A., Eaton G.P., and Mabey, D.R., 1974, Application of surface geophysics to ground water investigations, U.S. Geological Survey, Techniques of water resources Investigation. Book 2, Chapter D1.
- Zohdy, A.A., Eaton G.P., and Mabey, D.R., 1974, Application of surface geophysics to ground water investigations, U.S. Geological Survey, Techniques of water resources Investigation. Book 2, Chapter D1.





**Islamic Republic of Iran  
Plan and Budget Organization**

# **Manual for Geophysical studies in Road Construction Project (Technical Report)**

**No. 702-2**

Office of Deputy for Technical and  
Infrastructure Development Affairs

Department of Technical and  
Executive Affairs

**Nezamfanni.ir**

The Ministry of Road & Urban Development

Road, Housing & Urban Development  
Research Center

**bhrc.ac.ir**

