

راهنمای مطالعات ژئوفیزیک در آبهای زیرزمینی

به نام خدا
جمهوری اسلامی ایران
وزارت نیرو
شرکت مدیریت منابع آب ایران
معاونت پژوهش و مطالعات پایه
دفتر استانداردها و معیارهای فنی

راهنمای مطالعات ژئوفیزیک در آبهای زیرزمینی

شهریور ماه ۱۳۸۴

نشریه شماره ۸۵-الف

پیش‌گفتار

امروزه، نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی اجتماعی و زیست محیطی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها، در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب‌ناپذیر کرده است. با در نظر داشتن گستردگی دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه، به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است. با در نظر گرفتن موارد بالا و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و از این رو، امور آب وزارت نیرو با همکاری سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، به تهیه استانداردهای مهندسی آب اقدام کرده است.

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

- استفاده از تخصص و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجربه‌های دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرح‌ها
- پرهیز از دوباره کاری‌ها و ائتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه‌کننده استاندارد.

امید است، مجریان و دست‌اندرکاران بخش آب، با به کارگیری استانداردهای یاد شده، برای پیشرفت و خودکفایی این بخش از فعالیت‌های کشور، تلاش نموده و صاحب‌نظران و متخصصان نیز با اظهارنظرهای سازنده، در تکامل این استانداردها همکاری کنند.

ترکیب اعضای کمیته

اعضای شاخه ژئوفیزیک گروه بررسی‌های اکتشافی کمیته فنی شماره ۱۲ (هیدروژئولوژی) که در تهیه متن استاندارد حاضر شرکت داشته‌اند عبارتند از:

شادروان مرحوم مهندس امیرحسین موسوی (فوق‌لیسانس ژئوفیزیک) یکی از بنیانگذاران شاخه ژئوفیزیک کمیته فنی شماره ۱۲ (هیدروژئولوژی) بودند که با کمال تأسف درگذشت ناگهانی ایشان کمیته را از همکاری‌های ذی‌قیمت محروم نمود.

آقای علی‌اکبر عطارزاده	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی معدن
آقای محمود نراقی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس ژئوفیزیک و زمین‌شناسی معدن

سپس این استاندارد در گروه بررسی‌های اکتشافی شامل اعضای زیر مورد تصویب نهایی قرار گرفت :

خانم فیروزه امامی	دفتر تهیه استانداردها و معیارهای فنی	فوق‌لیسانس زمین‌شناسی
خانم زهرا ایزدپناه	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی آبیاری و آبادانی
آقای محمدحسین رشیدی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی زمین‌شناسی
آقای علی‌اکبر عطارزاده	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس مهندسی معدن
آقای پرویز قوامی	سازمان آب منطقه‌ای تهران	فوق‌لیسانس مهندسی زمین‌شناسی
آقای محمود نراقی	کارشناس آزاد	فوق‌لیسانس ژئوفیزیک و زمین‌شناسی معدن
آقای محمدعلی نژادهاشمی	دانشگاه تهران	دکترای هیدروژئولوژی

لازم است گفته شود آقای دکتر بارویانت در تهیه بخش ۵-۱ این استاندارد کمیته را یاری نمودند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۲	۱- هدف
۲	۲- دامنه کاربرد
۲	۳- اطلاعات مورد نیاز مطالعات ژئوفیزیکی
۲	۴- انواع بررسی های ژئوفیزیکی
۳	۵- ژئوفیزیک سطحی
۳	۱-۵ روش ثقل سنجی
۶	۲-۵ روش مغناطیسی سنجی
۹	۳-۵ روش گرمایی
۱۰	۴-۵ روش الکترومغناطیسی
۱۴	۵-۵ روش مقاومت ویژه
۲۷	۶-۵ روش لرزه ای
۳۵	۶- ژئوفیزیک سطحی در مطالعات آبهای زیرزمینی
۳۵	۱-۶ امکانات ژئوفیزیک سطحی در مطالعات آبهای زیرزمینی
۳۵	۲-۶ محدودیت انواع ژئوفیزیک سطحی در مسائل آب زیرزمینی
۳۸	۷- بررسی ژئوفیزیکی در مراحل مختلف مطالعات آبهای زیرزمینی
۳۸	۱-۷ بررسی های ژئوفیزیکی در مرحله شناسایی
۳۹	۲-۷ بررسی های ژئوفیزیکی در مطالعات نیمه تفصیلی
۴۰	۳-۷ بررسی های ژئوفیزیکی در مطالعات تکمیلی
۴۱	۸- انتخاب روش ژئوفیزیکی در مطالعات آبهای زیرزمینی
۴۱	۱-۸ روش های مناسب در سازندهای نرم
۴۱	۲-۸ روش های مناسب در سازندهای سخت
۴۳	۹- انجام مطالعات ژئوفیزیکی
۴۳	۱-۹ جمع آوری دانسته ها و نقشه های مورد نیاز
۴۳	۲-۹ بررسی مدارک جمع آوری شده
۴۴	۳-۹ انتخاب روش ژئوفیزیکی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۴۴	۴-۹ نقشه پایه مطالعات
۴۴	۵-۹ عملیات صحرائی
۴۴	۶-۹ تجهیزات و کادر فنی مورد نیاز و دقت های لازم
۵۱	۱۰- پردازش اطلاعات ژئوفیزیکی
۵۱	۱-۱۰ پردازش اطلاعات مربوط به روش ثقل سنجی
۵۲	۲-۱۰ پردازش اطلاعات مربوط به روش مغناطیسی
۵۳	۳-۱۰ پردازش اطلاعات مربوط به روش گرمایی
۵۳	۴-۱۰ پردازش اطلاعات مربوط به روش الکترومغناطیسی
۵۴	۵-۱۰ پردازش اطلاعات مربوط به مقاومت ویژه
۵۷	۶-۱۰ پردازش اطلاعات مربوط به روش لرزه ای
۵۸	۱۱- نمایش نتایج مطالعات ژئوفیزیکی
۵۸	۱-۱۱ اطلاعات عمومی
۵۹	۲-۱۱ اطلاعات فنی
۶۰	۱۲- نظارت بر بررسی های ژئوفیزیکی
۶۰	۱-۱۲ نظارت بر برنامه ریزی
۶۰	۲-۱۲ نظارت بر عملیات صحرائی
۶۳	۳-۱۲ نظارت بر عملیات دفتری
۶۶	منابع و مراجع

مقدمه

واحدهای متفاوت سنگی، دارای پارامترهای فیزیکی مختلفی بوده و تأثیر نیروهای مصنوعی خارجی این واحدهای سنگی به دلیل خواص فیزیکی مختلف تا حدودی متفاوت است. مطالعات ژئوفیزیکی را می‌توان اندازه‌گیری پارامترهای مشخص واحدهای سنگی یا اندازه‌گیری تأثیر نیروهای خارجی روی این واحدها دانست. به عبارت دیگر، بررسی‌های ژئوفیزیکی تعیین تغییرات مشخصه فیزیکی واحدهای سنگی یا تغییرات عکس‌العمل واحدهای سنگی مختلف نسبت به پدیده‌های مصنوعی است. نتایج به‌دست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی را می‌توان به اطلاعات زیرزمینی و هیدروژئولوژی تعبیر و تفسیر کرده و بعضی از مسائل آبهای زیرزمینی را حل کرد. با توجه به مطالب بالا، بررسی‌های ژئوفیزیکی در مطالعات آبهای زیرزمینی، روشی است غیرمستقیم برای تعبیر و تفسیر مسائل هیدروژئولوژی، بنابراین بررسی‌های ژئوفیزیکی یک قسمت از مطالعات آبهای زیرزمینی منطقه‌ای بوده که باید در تماس تنگاتنگ یا هماهنگی کامل با بررسی‌های زیرزمینی و نتایج به‌دست آمده از حفاری‌ها باشد. مطالعات ژئوفیزیک منابع آب زیرزمینی، در بعضی مناطق توسط کارشناسانی صورت می‌گیرد که به مسائل آبهای زیرزمینی آشنایی کاملی ندارند در نتیجه نتایج این بررسی‌ها به صورتی تعبیر و تفسیر شده که چندان راهگشای مسائل هیدروژئولوژی منطقه نیست. بنابراین تهیه مجموعه‌ای لازم به نظر می‌رسید تا علاوه بر بررسی و توضیح مختصر درباره انواع روش‌های ژئوفیزیکی و کاربرد آنها در مسائل مربوط، به یکنواخت کردن این بررسی‌ها در مطالعات منابع آب زیرزمینی کشور کمی کند. با وجودی که در تهیه این مجموعه سعی فراوان شد ولی مسلماً دارای کمبود، خطا و نواقصی است. امید می‌رود که علاقمندان و دست‌اندارکاران ما را در کامل‌تر کردن این نشریه یاری دهند.

۱- هدف

هدف از تهیه این راهنما، معرفی چگونگی کاربرد روشهای ژئوفیزیکی سطحی در مطالعات هیدروژئولوژی و بررسی منابع آبهای زیرزمینی می‌باشد. همچنین قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر روش به همراه ضوابط و دستورالعمل‌های کاربردی جهت انتخاب و استفاده صحیح روشهای ژئوفیزیکی در سازندهای نرم و سخت ارائه شده است.

۲- دامنه کاربرد

این راهنما در انجام مطالعات ژئوفیزیکی به منظور بررسی آبهای زیرزمینی در مراحل مختلف مطالعاتی اعم از شناسایی، نیمه تفصیلی و تکمیلی در سازندهای نرم و سخت کاربرد دارد.

۳- اطلاعات مورد نیاز مطالعات ژئوفیزیکی

مشخصات مختلف فیزیکی واحدهای متفاوت سنگی و یا عکس‌العمل آنها تحت تأثیر پدیده‌های مصنوعی، در محدوده مشخصی تغییر می‌کند. در اغلب موارد، این دامنه‌ها برای واحدهای مختلف سنگی دارای پوشش است به طوری که در بیشتر محل‌ها نمی‌توان فقط با مطالعات ژئوفیزیکی به جنس و مشخصات هیدروژئولوژی آن پی برد. ضمناً در لایه‌های آبدار، علاوه بر عوامل گفته شده، کیفیت آب نیز روی خواص فیزیکی آن تأثیر دارد.

بنابراین در هر منطقه، به منظور تعبیر و تفسیر صحیح و قابل قبول پدیده‌های فیزیکی، به پدیده‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی به تعدادی نقاط شاهد نیز نیاز است. نقاط شاهد را می‌توان قسمت‌هایی با بیرون زدگی‌های زمین‌شناسی معین یا چاه و مادرچاه قنوات با مقاطع زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی مشخص دانست. تعداد نقاط شاهد، به وسعت و پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بستگی دارد.

۴- انواع بررسی‌های ژئوفیزیکی

بعضی از مشخصات طبیعی لایه‌های زیری و همچنین تأثیر نیروهای مصنوعی بر طبقات زیرزمینی را می‌توان در سطح زمین اندازه‌گیری کرد. روش‌هایی که با این طریق، مشخصات فیزیکی لایه‌های زیری را تعیین می‌کند «ژئوفیزیک سطحی» نامیده می‌شود.

روش‌های مختلف دیگری نیز وجود دارد که با فرستادن وسیله‌هایی به درون چاه می‌توان بعضی از پارامترهای فیزیکی لایه‌ها یا عکس‌العمل این لایه‌ها تحت تأثیر نیروهای مصنوعی خارجی را تعیین کرد. این روش را روش چاه‌نگاری (چاه‌پیمایی) می‌نامند. بنابراین بررسی‌های ژئوفیزیکی را می‌توان به طور کلی به دو دسته زیر تقسیم کرد:

- ژئوفیزیک سطحی^۱

- چاه‌نگاری^۲

این نشریه به ژئوفیزیک سطحی اختصاص دارد و چاه‌نگاری در نشریه جداگانه‌ای^۳ آمده است.

1 - Surface geophysics

2 - Well Logging

۳- نشریه شماره ۱۱۴-ن طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور

۵- ژئوفیزیک سطحی

پدیده‌هایی که در ژئوفیزیک آبهای زیرزمینی به روش سطحی اندازه‌گیری می‌شوند، شامل نیروی ثقل، نیروی مغناطیسی، درجه حرارت، قابلیت انتقال الکتریسیته و قابلیت انتقال امواج مکانیکی (الاستیک صوتی) می‌باشد. ژئوفیزیکی آبهای زیرزمینی به روش سطحی را می‌توان به‌طور کلی به شش روش زیر تقسیم‌بندی کرد :

- روش ثقل‌سنجی^۱،

- روش مغناطیسی^۲،

- روش حرارتی^۳،

- روش الکترومغناطیسی^۴،

- روش مقاومت ویژه^۵، و

- روش لرزه‌ای^۶.

سه روش اول، به اندازه‌گیری مشخصات طبیعی لایه‌های زمین متکی است در حالی که سه روش آخر، اندازه‌گیری عکس‌العمل واحدهای مختلف سنگی نسبت به نیروهای مصنوعی خارجی می‌باشد.

۵-۱ روش ثقل‌سنجی

۵-۱-۱ اساس روش ثقل‌سنجی^۷

جاذبه زمین که جزیی از جاذبه عمومی کیهانی است، تابع قانون نیوتن می‌باشد یعنی :

$$F = mg = \gamma \frac{M.m}{r^2} \quad (۱)$$

که در آن :

F = نیروی وارد به جرم،

M = جرم زمین،

r = فاصله مراکز دو جرم،

-
- 1 - Gravimetry Method
 - 2 - Magnetic Method
 - 3 - Thermometric Method
 - 4 - Electro magnetic Method
 - 5 - Electrical Method
 - 6 - Seismic Method
 - 7 - Basics of Gravity Prospecting Method

$$\gamma = \text{ضریب ثابت جاذبه عمومی (در دستگاه C.G.S معادل } 10^{-8} \times \frac{20}{30})$$

g = شتاب ثقل زمین (در دستگاه C.G.S بررسی بر حسب سانتی متر بر مجذور ثانیه بوده و گال نامیده می شود)، و

m = جرم جسم مورد نظر است.

به طور کلی، میزان تأثیر جاذبه زمین بر واحد جرم را شتاب ثقل^۱ می گویند. ثقل سنجی به روش های مختلف اندازه گیری شتاب ثقل زمین گفته می شود. در هر منطقه، میزان جاذبه ای که در بالا یا روی زمین اندازه گیری می شود، نشان دهنده تأثیر مجموعه جاذبه سازند زمین شناسی منطقه و بقیه کره زمین با هم می باشد. هر توده زمین شناسی، جاذبه ای که به وجود می آورد تابع جرم آن یا به طور کلی تابع شکل و وزن مخصوص آن است. چون شکل و وزن مخصوص سازندهای مختلف در هر منطقه تغییر می کند، بنابراین تأثیر آنها بررسی روی شتاب ثقل زمین متفاوت بوده و از این خاصیت در کاوش های ثقل سنجی به منظور پی بردن به سازندهای منطقه استفاده می شود. در اکتشافات زمین شناسی، تنها تأثیر واحد زمین شناسی موجود بر شتاب ثقل مورد توجه است، بنابراین تأثیر سایر عوامل از جمله اثر بقیه توده کره زمین بر شتاب ثقل باید از بین برده شود؛ این عمل را «کاهش ارقام ثقل سنجی» نامیده و باقی مانده را که بازتاب اثر واحد زمین شناسی موجود در منطقه است، «بی هنجاری جاذبه^۲» می گویند. نقشه هایی که بی هنجاری های جاذبه را نشان می دهد، «نقشه بی هنجاری ثقل^۳» می نامند. در عمل، به دلیل عواملی مانند حرکت کره زمین یا اثر سایر کرات از جمله خورشید، اثر کاملاً کروی نبودن زمین، تأثیر پستی و بلندی های موجود در منطقه و غیره، پس از اندازه گیری شتاب ثقل باید ابتدا بر روی آن تصحیح های لازم صورت گرفته و سپس نقشه بی هنجاری ثقل رسم شود. روش های مختلفی برای کاهش ارقام میزان ثقل وجود دارد که با توجه به روش مورد استفاده، نقشه های به دست آمده نام گذاری می شوند. یکی از متداول ترین آنها، تهیه نقشه بوگه^۴ است که نقشه های به دست آمده از این روش را، نقشه های بی هنجاری بوگه^۵ می خوانند. در این روش، کاهش و تصحیح ها به صورتی اعمال می شود که نقشه به دست آمده نشانگر تغییرات شتاب ثقل برای کره زمین ساکن است، در حالی که ارتفاع تمام توده های موجود به سطح دریا رسانیده شده باشد. در نقشه های بی هنجاری بوگه، میزان شتاب ثقل در نقاط مختلف مورد نیاز نبوده بلکه تغییرات شتاب ثقل و مقایسه بین آنها مورد توجه است. به عبارت دیگر، تأثیر واحد زمین شناسی موجود در منطقه در کاهش یا افزایش شتاب ثقل بررسی می شود. اثر واحدهای زمین شناسی، به صورت تفاوت وزن مخصوص با محیط اطراف نشان داده خواهد شد. وزن مخصوص سنگ های مختلف موجود در زمین بین ۱/۲ تا بیش از ۳ گرم بر سانتی متر مکعب تغییر کرده و به طور متوسط حدود ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. وزن مخصوص چند نوع از سنگ های مختلف در نمودار ۵-۱ نشان داده شده است.

چون تغییرات شتاب ثقلی که در اثر تغییرات وزن مخصوص سنگ های مختلف به وجود می آید، اندک می باشد، واحد گال در مطالعات ثقل سنجی واحد بزرگی بوده و عموماً واحدی که در این بررسی ها به کار می رود ۰/۰۰۱ گال یا میلی گال است.

-
- 1 - Gravitational Acceleration
 - 2 - Gravity Anomaity
 - 3 - Gravity Anomaly Map
 - 4 - Bouguer
 - 5 - Anomaly Map Bouguer

وزن مخصوص نوع سنگ												
۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۲/۸	۳	۲/۲۵	
												خاک سست
												رس خشک
												رس مرطوب
												ماسه خشک
												ماسه مرطوب
												شن خشک
												شن مرطوب
												ماسه سنگ
												مارن
												شیل
												آهک
												گرانیت
												بازالت

نمودار ۵-۱- تغییرات وزن مخصوص چند نوع از سنگ‌های مختلف

۵-۱-۲ دستگاه‌های ثقل سنجی

به‌طور کلی، دستگاه‌هایی که برای اندازه‌گیری شتاب ثقل زمین به کار می‌رود به دو دسته تقسیم می‌شوند :

الف- پاندول

در این روش، با اندازه‌گیری زمان نوسان پاندول، می‌توان مقدار g را محاسبه کرد. در پاندول‌های ساده، وزنه‌ای در انتهای نخ تقریباً بی‌وزنی قرار گرفته و حول نقطه ثابتی نوسان می‌کند؛ در صورتی که در پاندول‌های مرکب جرمی روی لبه تیزی قرار گرفته و حول آن نوسان می‌کند.

ب - ثقل سنج‌ها

کار ثقل سنج‌ها تقریباً شبیه نیروسنج است. میزان کشش فنر یا تغییرات طولی آن در این دستگاه‌ها، متناسب با مقدار g است. حساسیت و دقت وسایل مختلف اندازه‌گیری شتاب ثقل در عمل بسیار مهم می‌باشد. پاندول‌های ساده دارای دقت کمتر و حدود ۱ میلی‌گال است در حالی که دقت بعضی از ثقل سنج‌ها تا حدود ۰/۰۱ میلی‌گال می‌رسد.

۵-۱-۳ بررسی‌های ثقل‌سنجی

در بررسی ثقل‌سنجی به منظور انجام تصحیح‌های موردنظر، علاوه بر اندازه‌گیری میزان شتاب ثقل در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه، باید موقعیت دقیق این نقاط و ارتفاع آن مشخص شده در ضمن میزان شتاب ثقل نیز به‌طور مرتب در ایستگاه مبنا اندازه‌گیری شود.

پس از انجام ثقل‌سنجی در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه، لازم است با توجه به موقعیت، ارتفاع و عوارض مجاور نقطه موردنظر، همچنین اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه مبنا، تصحیح‌هایی روی ارقام به‌دست آمده صورت گیرد. پس از اعمال این تصحیح‌ها و کاهش اثر بقیه توده زمین بر روی شتاب ثقل نقشه‌های بی‌هنجاری‌های ثقلی منطقه^۱ رسم می‌شود. در بعضی موارد، نتیجه‌های به‌دست آمده، به شکل منحنی‌هایی در طول یک مسیر که تغییرات را در طول یک پروفیل مشخص می‌کند، نشان داده شده است.

۵-۱-۴ کاربرد روش ثقل‌سنجی در مطالعات آبهای زیرزمینی

از روش ثقل‌سنجی، به دلیل سادگی آن می‌توان برای شناسایی عمومی منطقه استفاده کرد. روش ثقل‌سنجی در مناطقی نتیجه بهتر می‌دهد که بین طبقات مختلف (به‌عنوان مثال بین منبع آب زیرزمینی و سنگ کف) از نظر وزن مخصوص، تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود داشته باشد؛ مثلاً در حالت‌هایی که در زیر سازندهای رسوبی به‌خصوص آبرفت‌ها، سازندهای آذرین مانند بازالت قرار دارد. در ضمن برای شناسایی موقعیت غارها در سازندهای آهکی، می‌توان از این روش استفاده کرد. البته روش ثقل‌سنجی به دلیل نیاز به انجام تصحیح‌های متعدد در مناطق کوهستانی و با تغییرات توپوگرافی زیاد، نتیجه‌های خوبی به‌دست نمی‌دهد. به تازگی، با اختراع دستگاه‌های ثقل‌سنجی خیلی حساس در مطالعات منابع آب کارستی روش ثقل‌سنجی حساس^۲ به کار رفته است که نتایج خوبی از آن به‌دست آمده است.

۵-۲ روش مغناطیسی سنجی

۵-۲-۱ اساس روش مغناطیسی

اجرام مغناطیسی، بر یکدیگر نیروی جاذبه یا دافعه وارد می‌کنند. میزان این نیرو براساس قانون کولمب^۳ از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$F = c \frac{mm'}{d^2} \quad (2)$$

1 - Gravity Anomaly Map

2 - Micro gravimetry

3 - Culomb

که در آن، m و $m' =$ جرم مغناطیسی دو واحد مورد نظر،
 $d =$ فاصله بین مراکز آنها، و
 c ضریب ثابت است.

مقدار c در دستگاه c.g.s معادل واحد است؛ یعنی اگر دو جرم مغناطیسی واحد در فاصله ۱ سانتی متر از یکدیگر قرار گیرند، نیروی جاذبه یا دافعه‌ای که روی یکدیگر وارد می‌کنند معادل ۱ دین است. به‌طور کلی، هر جرم مغناطیسی در اطراف خود یک میدان مغناطیسی به وجود می‌آورد. میدان مغناطیسی که جرم واحد مغناطیسی را در فاصله ۱ سانتی متری خود ایجاد می‌کند، ارستد^۱ نامیده می‌شود. به منظور شناسایی تغییرات میدان مغناطیسی که در اثر وجود طبقات مختلف زیرزمینی ایجاد می‌شود، واحد ارستد واحدی بزرگ بوده و برای کارهای اکتشافی، واحد کوچک‌تری به نام نانوتسلا (n.t) به کار می‌رود. هر نانوتسلا (n.t) معادل 10^{-5} ارستد است.

اگر ماده‌ای در میدان مغناطیسی (H) قرار گیرد در آن، خاصیت مغناطیسی القایی (J) به وجود می‌آید. نسبت مقدار مغناطیسی القایی به مقدار میدان مغناطیسی موجود را، قابلیت مغناطیس پذیری^۲ ماده مذکور می‌نامند.

$$K = \frac{J}{H} \quad (۳)$$

$K =$ قابلیت مغناطیس‌پذیری

$J =$ خاصیت مغناطیسی القایی

$H =$ میدان مغناطیسی

نیروی مغناطیسی زمین نیز، روی واحدهای مختلف سنگی، مغناطیسی القایی متفاوتی ایجاد می‌کند. نیروی مغناطیسی که در هر نقطه از زمین وجود دارد، علاوه بر شدت میدان مغناطیسی کره زمین در آن محل که عوامل مختلفی روی آن تأثیر دارد، به قابلیت مغناطیس‌پذیری واحد سنگی موجود نیز بستگی خواهد داشت.

یکی از روش‌های اکتشاف ژئوفیزیکی، اندازه‌گیری شدت مغناطیسی زمین در نقاط مختلف و تعبیر و تفسیر تغییرات آن که در اثر وجود واحدهای مختلف سنگی متفاوت بوده است. نمودار ۵-۲ خاصیت مغناطیس‌پذیری چند واحد سنگی را در سیستم C.G.S نشان می‌دهد.

۵-۲-۲ دستگاه‌های مغناطیس‌سنجی

دستگاه‌های مغناطیس‌سنجی، از سال‌های ۱۹۴۰ به بعد پیشرفت‌های زیادی کرد و هر سال، مدل‌های جدیدتری با دقت‌های بیشتری ساخته شد. اساس و پایه تمام دستگاه‌های مغناطیس‌سنجی، اندازه‌گیری یکی از مؤلفه‌های افقی یا قائم میدان مغناطیسی است. مهم‌ترین آنها عبارتند از :

1 - Orsted

2 - Magnetic susceptibility

- ترازوی قائم اشمیت^۱

این ترازو می‌تواند مؤلفه قائم میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری کند. این دستگاه از یک سوزن مغناطیسی که حول محوری گردش می‌کند، ساخته شده است. محور این سوزن در جهت میدان مغناطیسی زمین جهت‌گیری و در امتداد مؤلفه افقی قرار داده می‌شود. مرکز ثقل سوزن روی محوری که حول آن می‌چرخد قرار ندارد، بنابراین سوزن به حالت افقی نمی‌ایستد. در این دستگاه، یک وزنه در جهت مخالف نیروی مغناطیسی وجود دارد که به کمک آن می‌توان سوزن مغناطیسی دستگاه را به حالت افقی نگه‌داشت که در نتیجه، مؤلفه قائم میدان مغناطیسی به‌دست می‌آید.

میزان مغناطیس‌پذیری										سنگ
۱۰	۱	۱۰ ^{-۱}	۱۰ ^{-۲}	۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^{-۴}	۱۰ ^{-۵}	۱۰ ^{-۶}	۱۰ ^{-۷}		
									مانیتیت	
									بازالت	
									هماتیت	
									گرانیت	
									کوارتز	
									ماسه سنگ	
									آهک	
									دولومیت	
									شیل	
									رس	

نمودار ۵-۲- تغییرات قابلیت مغناطیس‌پذیری چند نمونه سنگ در دستگاه C.G.S

- ترازوی افقی اشمیت^۲

این دستگاه از یک سوزن مغناطیسی که حول محور افقی گردش می‌کند تشکیل شده است و به کمک این دستگاه می‌توان مؤلفه افقی میدان مغناطیسی را محاسبه کرد.

- دستگاه‌هایی که می‌توانند میدان کلی مغناطیسی را اندازه‌گیری کنند

برای اندازه‌گیری میدان کلی مغناطیسی، دستگاه‌های مختلفی با نام‌های متفاوت ساخته شده است. همه این دستگاه‌ها می‌توانند میدان‌های مغناطیسی تا ۱۰۰۰۰۰ نانوتسلا را با دقت‌های بین ۰/۱ تا ۰/۰۱ نانوتسلا اندازه‌گیری کنند.

1 - Balance Torsion de Schmidt

2 - Balance horizontal de Schmidt

۳-۲-۵ بررسی‌های مغناطیسی

در این بررسی‌ها، مؤلفه قائم، مؤلفه افقی یا میدان کلی مغناطیسی را در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه که موقعیت دقیق آنها مشخص بوده، اندازه‌گیری می‌کنند. در ضمن برای انجام تصحیح‌های لازم باید یک ایستگاه مبنا یا ثابت در منطقه انتخاب کرده و در دوره انجام عملیات، تغییرات میدان مغناطیسی را در این ایستگاه به‌طور مرتب اندازه‌گیری کرد.

پس از انجام بررسی‌ها، باید ارقام به‌دست آمده را با توجه به طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع محل و ارقام به‌دست آمده از ایستگاه مبنا، تصحیح کرد چون تغییرات میدان مغناطیسی مورد نیاز است؛ بنابراین ارقام به‌دست آمده باید نسبت به میدان مغناطیسی فرض مبنا سنجیده شود، سپس منحنی تغییرات این اختلاف‌ها^۱ رسم شود. در بعضی موارد، امکان دارد که تغییرات میدان مغناطیسی در طول یک مقطع نیز تهیه شود.

در بعضی موارد، دستگاه‌های مغناطیس‌سنج بر روی هواپیما سوار شده و با پرواز هواپیما در ارتفاع ۱۰۰ تا ۳۰۰ متری سطح زمین، میدان مغناطیسی در منطقه وسیعی اندازه‌گیری می‌شود، که آن‌را برداشت‌های مغناطیسی هوایی^۲ گویند.

۴-۲-۵ کاربرد روش مغناطیسی در مطالعات آبهای زیرزمینی

این روش به منظور شناسایی ساختمان عمومی مناطق به کار می‌رود. معمولاً روش مغناطیسی در مناطقی استفاده می‌شود که سنگ کف، از سنگ‌های آذرین یا دگرگونی تشکیل شده باشند. سازندهای رسوبی عموماً بدون خاصیت مغناطیسی و مغناطیس‌پذیری اند ولی این خاصیت، در سنگ‌های آتشفشانی بیشتر از سایر انواع سنگ‌ها می‌باشد. در مطالعات هیدرولوژی اگر هدف، بررسی منابع آب در سنگ‌های آتشفشانی به‌خصوص سنگ‌های بازالتی باشد، این روش می‌تواند کمک زیادی بکند. با استفاده از این روش، می‌توان مسائل زیر را حل کرد :

- تعیین موقعیت محل مناطقی از سازندهای رسوبی که به وسیله جریان بازالت‌ها یا سایر گدازه‌های آتشفشانی پوشیده شده است.
- تعیین موقعیت مناطقی که ضخامت گدازه‌های آتشفشانی، بیشتر از سایر مناطق بوده است.
- تعیین محل دره‌های قدیمی که به وسیله گدازه‌های آتشفشانی پوشیده و مدفون شده است.
- تعیین کنتاکت‌ها، همبری‌ها و گسل‌ها.

۳-۵ روش گرمایی

۱-۳-۵ اساس روش گرمایی

از سطح زمین به طرف عمق، به تدریج درجه حرارت افزایش می‌یابد، یعنی در این مسیر گرادیان حرارتی وجود دارد. یکی از عوامل این گرادیان حرارتی، هسته مذاب مرکزی زمین (ماگما) است. در بعضی از مناطق که شرایط مناسب ایجاد می‌شود،

1 - Magnetic Anomaly Map

2 - Airborne Survey

ماگما در داخل شکستگی‌ها بالا آمده و در محل‌هایی در نزدیکی سطح زمین ذخیره شده و منابع ژئوترمال را به وجود می‌آورد. مقداری از حرارت این منبع، به تدریج توسط هدایت در سنگ‌های مجاور به اطراف منتقل می‌شود. در حقیقت این منابع حرارتی، در سطح منطقه بی‌هنجاری‌های حرارتی ایجاد می‌کند. در بعضی از مناطق، بخارهای گرم از سطح منطقه متصاعد می‌شود و درجه حرارت آن محل در مقایسه با مناطق مجاور به میزان محسوسی افزایش می‌یابد. در سطح کره زمین، عواملی مثل درجه حرارت محیط، باد، آب و غیره بی‌هنجاری‌های ایجاد شده توسط این منابع حرارتی را به میزان زیادی خنثی می‌کنند. بدین معنی که در حالت‌هایی که این منابع حرارتی نزدیک سطح زمین قرار می‌گیرند، بی‌هنجاری حرارتی ایجاد می‌شود در غیر این صورت اثر آن محسوس نیست. ماگماهایی که در عمق‌های بیشتری قرار گرفته‌اند، تغییراتی که در درجه حرارت محیط اطراف به وجود می‌آورند فقط در چاه‌ها و چاهک‌های حفر شده قابل اندازه‌گیری است. در محل‌هایی که شکستگی‌های موجود تا سطح زمین ادامه دارد، بهترین روش اکتشاف منابع ژئوترمال، روش اندازه‌گیری درجه حرارت در نقاط مختلف و رسم بی‌هنجاری حرارتی موجود است. در منطقه ایستگاه‌ها در زلاندنو، با اندازه‌گیری درجه حرارت در عمق ۱ متر و در شبکه‌ای به فاصله‌های ۶۰ متر از یکدیگر، منابع ژئوترمال را کشف کرده‌اند. در ژاپن، به منظور تعیین محل چاه‌های ژئوترمال از روش حرارتی و با اندازه‌گیری درجه حرارت زمین در چاهک‌های به عمق ۲۰ متر تا ۳۰ متر استفاده کرده‌اند.

اختلاف زیاد گرمای ویژه آب با محیط اطراف در مناطق تمرکز جریان آب، باعث ایجاد بی‌هنجاری‌های حرارتی در منطقه می‌شود. بدین معنی که اگر مسیر تمرکز جریان آب، شکستگی‌های بزرگ در نزدیکی سطح زمین باشد، حرارت این منطقه نسبت به نواحی مجاور تا حدودی متعادل‌تر است.

این عامل و همچنین رطوبت موجود، حتی باعث ایجاد دگرگونی در پوشش گیاهی محل تمرکز جریان آب می‌شود. در بیشتر مواقع، بی‌هنجاری حرارتی ایجاد شده توسط جریان آب‌های زیرزمینی ناچیز بوده و فقط به کمک عکس‌های مادون قرمز قابل تشخیص است. این روش به منظور اکتشاف محل‌های تمرکز جریان آب، در مناطقی قابل استفاده بوده که درجه حرارت محیط عبور آب مانند غار و شکستگی، با درجه حرارت سطح زمین متفاوت باشد. به این منظور، در این بررسی‌ها زمان عکسبرداری عامل مهمی به شمار می‌رود. فصل یخبندان، یکی از زمان‌هایی بوده که اختلاف درجه حرارت محسوس است. معمولاً عکسبرداری در شب پیشنهاد می‌شود.

این روش، به تازگی به کمک قمرهای مصنوعی توسعه زیادی یافته و در آینده امید زیادی به آن می‌رود؛ زیرا این روش یکی از راه‌های اکتشاف در دورسنجی^۱ است.

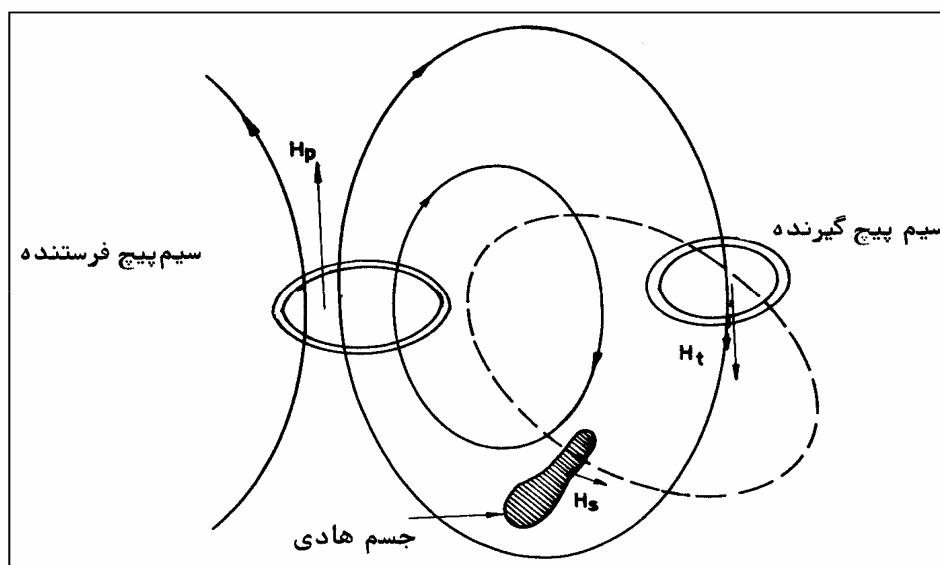
۴-۵ روش الکترومغناطیسی

۴-۵-۱ اساس روش الکترومغناطیسی

در اثر عبور جریان برق متناوب از یک سیم‌پیچ، در مجاورت آن یک حوزه مغناطیسی ایجاد می‌شود. با برخورد این حوزه مغناطیسی به سنگ‌های زمین، در سنگ‌ها یک جریان الکتریکی به وجود می‌آید که میزان آن به قابلیت هدایت سنگ بستگی

دارد. در اثر عبور جریان برق در سنگ‌ها یک حوزه مغناطیسی ثانویه ایجاد شده که می‌توان به وسیله یک سیم‌پیچ ثانویه میزان آن را اندازه‌گیری کرد. بنابراین دستگاهی که در روش الکترومغناطیسی به کار می‌رود شامل یک فرستنده جریان^۱ و یک گیرنده^۲ است. فرکانس فرستنده بین ۱۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز تغییر می‌کند. هرگاه در میدان مغناطیسی ایجاد شده، گیرنده قرار گیرد، میدان مجموع دامنه اختلاف فاز و جهت میدان را می‌توان بررسی کرد. (شکل ۵-۱).

عمق مؤثری که می‌توان به روش الکترومغناطیسی بررسی کرد به شدت ایجاد شده توسط فرستنده و فواصل استقرار گیرنده نسبت به فرستنده بستگی دارد.



شکل ۵-۱- عمق مؤثری که می‌توان به روش الکترومغناطیسی بررسی کرد

H_p = میدان مغناطیسی اولیه که توسط دستگاه فرستنده جریان الکتریکی ایجاد می‌شود،

H_s = میدان مغناطیسی که توسط جسم هادی^۳ ایجاد می‌شود، و

H_t = میدان مغناطیسی مجموع.

۵-۴-۲ راه‌های مختلف بررسی به روش الکترومغناطیسی

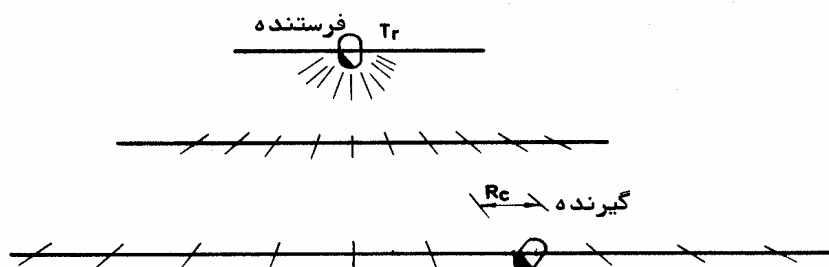
روش الکترومغناطیسی را می‌توان هم در سطح زمین و هم در ارتفاع کمی نسبت به سطح زمین (با پرواز هواپیما یا هلیکوپتر) انجام داد. بررسی‌های الکترومغناطیسی با توجه به وضعیت استقرار سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده، به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

-
- 1 - Transmitter
 - 2 - Receiver
 - 3 - Conductor body

الف- روش مدار عمودی^۱

در این روش، به کمک فرستنده‌ای که سیم‌پیچ آن به شکل عمودی قرار گرفته، یک میدان مغناطیسی تولید می‌شود که جهت و میزان مغناطیسی ثانویه به وجود آمده باید در نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۵-۲). این روش بررسی، با توجه به وضعیت استقرار فرستنده و گیرنده‌ها به راه‌های مختلفی انجام می‌شود.

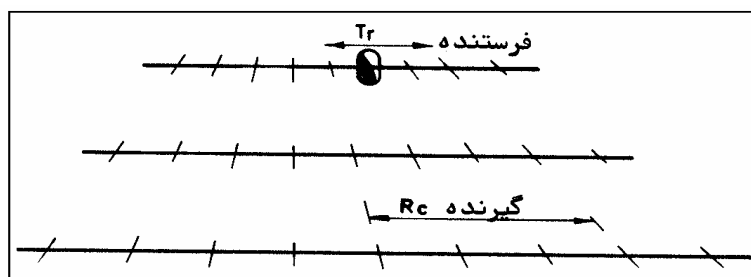
فرستنده ثابت: در این حالت، فرستنده در محل ثابتی استقرار یافته و گیرنده در نقاط مختلف حول محورش آن‌قدر چرخانده می‌شود تا کمترین میزان القا را داشته باشد. در این حالت، تقریباً تمام میدان مغناطیسی موجود، مربوط به میدان ثانویه است.



شکل ۵-۲- روش عمودی با محل فرستنده ثابت

تغییر فرستنده و گیرنده بررسی روی دو خط موازی: در این حالت، محل فرستنده و گیرنده با هم روی دو خط موازی یکدیگر، تغییر داده می‌شود. روش اندازه‌گیری مانند حالت قبل (فرستنده ثابت) است.

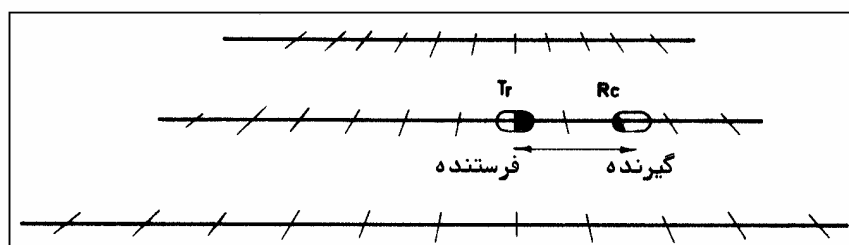
شکل ۵-۳ این روش بررسی الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- روش عمودی با تغییر محل فرستنده و گیرنده روی خطوط موازی

ب- روش مدار افقی^۱

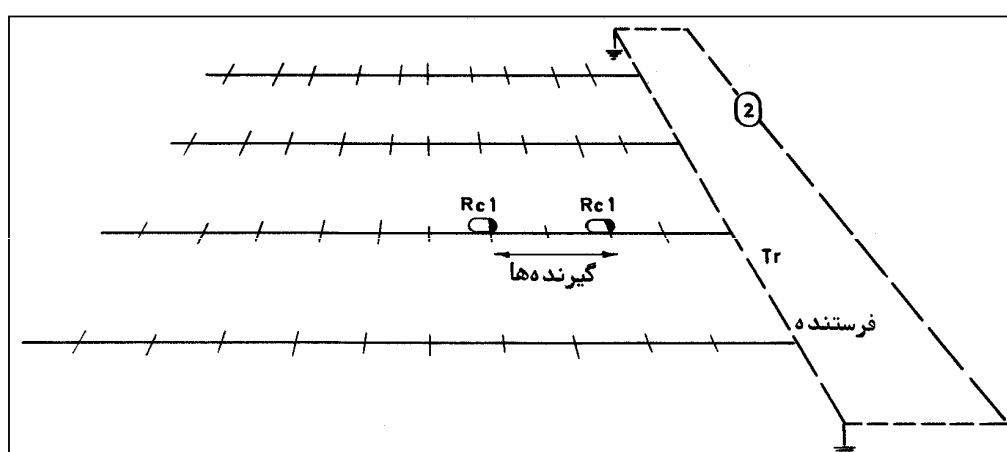
در این حالت، دو سیستم گیرنده و فرستنده روی خطوط مختلف و با شکل ثابت، روی منطقه مورد نظر حرکت داده می‌شوند (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- روش مدار افقی

ج - روش تورام^۲

این روش، در میان روش‌های مختلف بررسی‌های الکترومغناطیسی بهتر بوده و کاربرد بیشتری دارد. فرستنده جریان، در این روش ثابت نگاه‌داشته می‌شود و امواج الکترومغناطیسی توسط دو گیرنده به هم متصل، دریافت می‌شود. آرایش سیستم فرستنده بر روی زمین، به شکل مربع مستطیل بوده که تا چند صد متر طول دارد. خطوط برداشت مختلف عمود بر اضلاع بزرگ مربع مستطیل است. فاصله گیرنده‌ها معمولاً حدود ۳۰ متر بوده و روی خطوط برداشت مختلف حرکت می‌کنند. فرکانس جریان فرستنده بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز و اغلب دو یا سه فرکانس به کار گرفته می‌شود (شکل ۵-۵).



شکل ۵-۵- روش تورام

1 - Horizontal Loop
2 - Turam

۵-۴-۳ کاربرد روش‌های الکترومغناطیسی در مطالعات آبهای زیرزمینی

نتیجه‌های به‌دست آمده از روش‌های الکترومغناطیسی، بیشتر از سایر روش‌های ژئوفیزیکی به فاصله بین فرستنده جریان و گیرنده‌ها، فرکانس جریان اندازه‌گیری‌های مؤلفه قائم یا افقی و به‌طور کلی سیستم آرایش صحرایی با در نظر گرفتن مسئله و مورد مطالعه یعنی به‌طور کلی به چگونگی اندازه‌گیری‌ها بستگی خواهد داشت.

روش‌های الکترومغناطیسی، بیشتر برای شناسایی عمومی و به‌ویژه به منظور اکتشاف مواد معدنی هادی که در زیرزمین ذخیره شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در بررسی‌های اکتشافی منابع آب، به‌ندرت از روش‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌شود، اگر چه در سال‌های اخیر برای نقشه‌های پربندی مقاومت ویژه ظاهری از روش VLF^۱ استفاده زیادی شده است.

به‌طور کلی، روش‌های مغناطیسی ثقل‌سنجی و الکترومغناطیسی در مطالعات شناسایی عمومی منطقه به عنوان روش‌های کمکی در بررسی‌های منابع آب زیرزمینی کاربرد دارد. از طرف دیگر، چون روش‌های الکترومغناطیسی هوایی با سرعت زیادی انجام می‌گیرد و به خصوص در مناطق و محدوده‌های وسیع کار چند ماهه را می‌توان ظرف چند روز انجام داد، از این روش برای شناسایی عمومی منطقه استفاده می‌شود.

روش‌های الکترومغناطیسی، به خصوص در محدوده‌هایی کاربرد دارد که آبخوان روی طبقات سخت قرار داشته و اختلاف زیادی بین قابلیت هدایت الکتریکی طبقات رویه و سنگ کف وجود داشته باشد و بتوان از داده‌های صحرایی نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری را رسم کرد.

با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی همراه با روش‌های الکتریکی مقاومت ویژه، می‌توان بررسی‌های زیر را انجام داد :

- بررسی جنس و ضخامت لایه‌هایی که تا سطح آب زیرزمینی قرار گرفته‌اند.

- ضخامت آبخوان، قابلیت هدایت الکتریکی طبقه اشباع شده از آب و بررسی میزان شوری آن.

البته عمق نفوذ جریان و در نتیجه عمق مورد بررسی به فواصل بین فرستنده و گیرنده بستگی داشته و حداکثر تا عمق ۳۰۰ متری است.

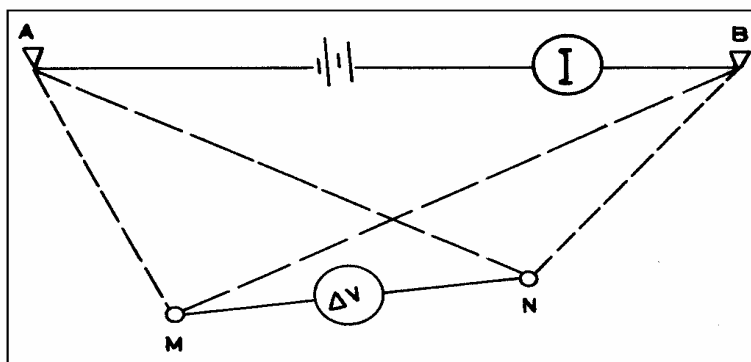
۵-۵ روش مقاومت ویژه

۵-۵-۱ اساس روش مقاومت ویژه

سنگ‌های مختلف کره زمین، در مقابل عبور جریان برق دارای قابلیت هدایت الکتریکی متفاوتی هستند. اختلاف قابلیت هدایت الکتریکی سنگ‌های مختلف این امکان را فراهم می‌آورد که به کمک آن بتوان واحدهای مختلف سنگی را از یکدیگر تفکیک کرد. قابلیت هدایت الکتریکی واحدهای مختلف سنگی را می‌توان با اندازه‌گیری وضعیت پخش پتانسیل الکتریکی در داخل آنها محاسبه کرد. روش تعیین مقاومت مخصوص الکتریکی واحدهای سنگی، که براساس قانون اهم پایه‌گذاری شده و به نام «روش مقاومت ویژه الکتریکی» نامیده می‌شود، متداول‌ترین روش ژئوفیزیکی مورد استفاده آبهای زیرزمینی به شمار می‌رود.

1- Very Low Frequency

در این روش، جریان الکتریکی مستقیم (DC) یا متناوبی (AC) که با استفاده از مولدی در سطح زمین تولید شده، به کمک دو میله فلزی A و B (که داخل زمین قرار گرفته) به داخل زمین فرستاده می‌شود. در مرحله بعد، پتانسیل الکتریکی ایجاد شده بین دو نقطه دیگر به وسیله دو میله فلزی اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۵-۶).



شکل ۵-۶- روش مقاومت ویژه

با اعمال قانون اهم می‌توان به رابطه ۴ رسید:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi R} \quad (4)$$

که در آن :

ΔV = اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین دو نقطه M و N،

I = شدت جریان ارسالی بین دو نقطه A و B،

ρ = مشخص‌کننده قابلیت هدایت واحد سنگی مورد نظر، که مقاومت مخصوص الکتریکی آن نامیده می‌شود، و

R = فاصله بین نقاط مورد بررسی و نقاط فرستنده جریان.

این معادله، برای شکل ۵-۶ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Delta V = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \cdot I \quad (5)$$

و یا

$$\Delta V = \frac{\rho I}{K} \quad (6)$$

K = ضریب هندسی است که بستگی به فواصل بین الکترودهای پتانسیل و جریان دارد.

K ضریبی است که به فواصل الکترودهای فرستنده جریان و الکترودهای اندازه‌گیری پتانسیل بستگی داشته و به نام ضریب هندسی مقاوم مخصوص الکتریکی نامیده می‌شود.

با دانستن ارقام مربوط به I ، ΔV و K می‌توان مقدار مقاومت ویژه الکتریکی واحد سنگی مورد نظر را از رابطه ۷ محاسبه کرد:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (7)$$

مقاومت مخصوص الکتریکی اغلب واحدهای سنگی زیاد بوده و در نتیجه، بیشتر جریان برق ارسالی، از داخل آب موجود در واحدهای سنگی عبور می‌کند، بنابراین مقاومت مخصوص به‌دست آمده، با درجه اشباع سنگ از آبگیری و درجه شوری آب موجود، نسبت عکس دارد. به‌طور کلی، مقاومت ویژه سنگ‌ها به نوع کانی‌های موجود در آنها، ساختمان سنگ، بافت سنگ، تخلخل، رطوبت موجود، درجه شوری آب و غیره بستگی دارد.

نمودار ۳-۵ مقاومت ویژه چند نمونه از سنگ‌های مختلف و چند نمونه آب را نشان می‌دهد.

اگر واحد سنگی مورد مطالعه از مواد همگن^۱ تشکیل شده باشد، مقدار به‌دست آمده از معادله بالا، مقاومت ویژه حقیقی سنگ است در غیر این صورت مقاومت ویژه مورد محاسبه به نام مقاومت مخصوص ظاهری سنگ نامیده می‌شود.

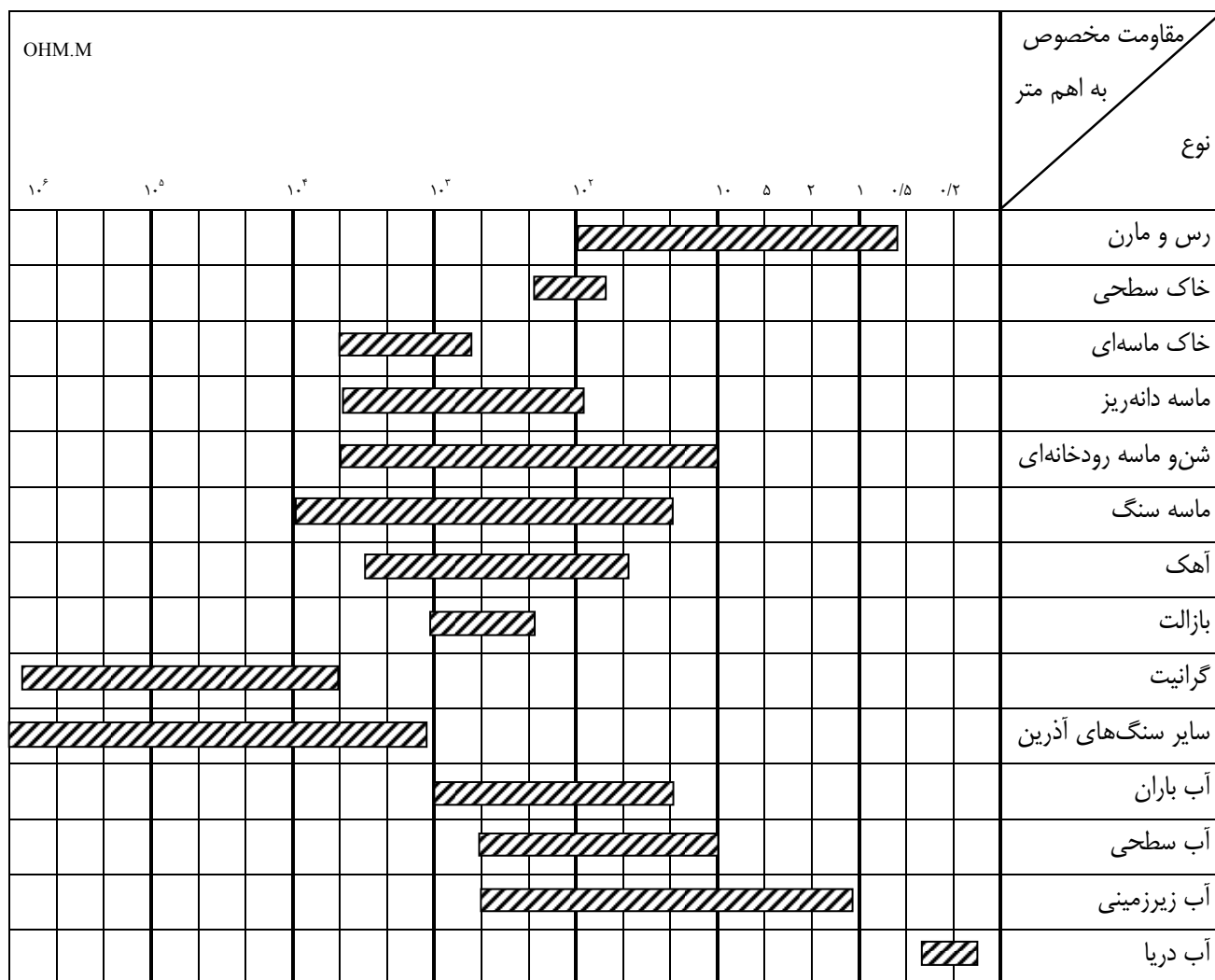
به‌طور کلی می‌توان گفت :

- مقاومت ویژه سنگ‌های رسوبی، کمتر از سنگ‌های آذرین است.
- مقاومت ویژه سنگ‌های بازیک، کمتر از سنگ‌های اسیدی است.
- مقاومت ویژه سنگ‌هایی که اجزای آنها از دانه‌های رس تشکیل شده، کمتر از سنگ‌هایی است که اجزای آنها از دانه‌های ماسه‌ای تشکیل شده است.
- مقاومت ویژه منابع آب سطحی و زیرزمینی موجود در مناطق با سازندهای آذرین و دگرگونی، بیشتر از منابع آب موجود در مناطق با سازندهای رسوبی است.

۵-۲-۵ مقاوم ویژه ظاهری^۲

اگر محیط مورد بررسی، همگن^۳ و متجانس^۴ (دارای خواص مشابه از تمام جهات) باشد، مقاومت ویژه ایستگاه‌ها که از رابطه ۷ به‌دست می‌آید مقاومت ویژه واقعی سنگی خواهد بود.

1 - Homogen
2 - Apparent Resistivity
3 - Homogen
4 - Isotropic



نمودار ۵-۳- مقاومت ویژه الکتریکی چند نمونه سنگ و آب

ولی در اغلب موارد، واحدهای مورد بررسی ناهمسان و غیر متجانس است بنابراین مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده، با مقاومت ویژه قسمت‌های مختلف محیط مورد نظر متفاوت بوده و آنرا مقاومت الکتریکی ظاهری نامیده و به ρ_a نشان می‌دهند. مقاومت ویژه ظاهری به عوامل مختلفی مانند ضخامت، شیب، درجه غیر همسانی و غیر متجانسی واحد سنگی و همچنین به آرایش الکترودها بستگی دارد. یعنی براساس رابطه ۶ می‌توان گفت که مقاومت ویژه ظاهری، با تغییر چهار فاصله الکترودها تغییر می‌کند. در حقیقت در محیط غیرهمسان و غیر متجانس، اگر آرایش الکترودها عوض شود مقدار ρ_a تغییر می‌کند.

۳-۵-۵ مقاومت ویژه طولی و عرضی

در بررسی‌های ژئوالکتریک، فرض بر این است که محیط، همسان و متجانس (هموژن و ایزوتوپ) باشد، یعنی مقاومت ویژه الکتریکی واحدهای زیرزمینی در تمام جهات یکسان است. ولی در عمل به‌خصوص در مورد سازندهای رسوبی، به دلیل تشکیل سنگ طی مراحل مختلف و عموماً به صورت لایه لایه، مقاومت ویژه در جهات مختلف یکسان نیست. اگر ρ_L مقاومت ویژه الکتریکی سنگ در جهت طولی^۱ و ρ_t مقاومت ویژه الکتریکی سنگ در جهت عمود بر لایه^۲ باشد، این دو مقدار با یکدیگر مساوی نبوده و معمولاً $\rho_t > \rho_L$ است.

ضریب λ را که معادل $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_L}}$ است، ضریب ناهمسانی^۳ آن سازند می‌نامند. در عمل، متوسط مقاومت ویژه در امتداد لایه و عمود بر آن را مقاومت ویژه متوسط یا مقاومت ویژه ظاهری آن می‌نامند.

$$\rho = \rho_m = \sqrt{\rho_L \rho_t} \quad (۸)$$

$$\rho = \rho_m = \text{مقاومت ویژه ظاهری یا مقاومت ویژه متوسط}$$

۴-۵-۵ آرایش الکترودها

طرز قرار گرفتن الکترودهای فرستنده جریان و الکترودهای گیرنده پتانسیل را در روش بررسی‌های الکتریکی، آرایش الکترودها می‌نامند. در مطالعات ژئوالکتریک، آرایش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود که در اینجا چند نوع آن (که در مطالعات منابع آب زیرزمینی بیشتر کاربرد دارد)، ذکر خواهد شد.

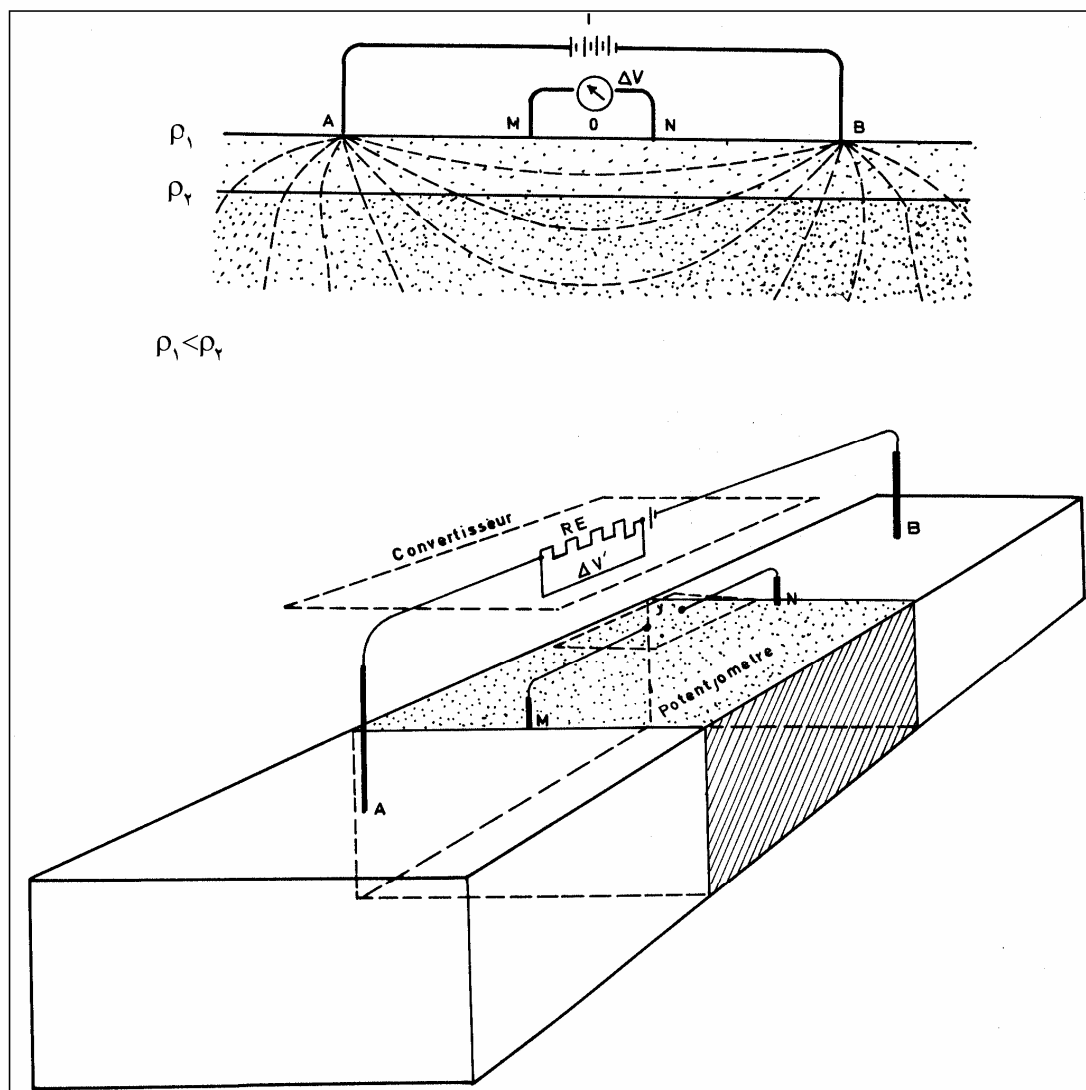
۱-۴-۵-۵ آرایش شبکه خطی

در آرایش خطی، چهار الکترودهای روی خط مستقیمی قرار گرفته‌اند. روش‌های مختلفی در آرایش خطی به کار می‌رود که مهم‌ترین آنها عبارتند از :

الف- آرایه شلومبرژه^۴

مهم‌ترین آرایش خطی که در بررسی‌های ژئوالکتریک به کار می‌رود، روشی است که توسط شلومبرژه معرفی شد. در این روش، الکترودها نسبت به مرکز O (الکترودهای فرستنده جریان) به صورت قرینه قرار دارند (شکل ۵-۷).

1 - Longitudinal Resistivity
2 - Transversal Resistivity
3 - Anisotropy Coef
4 - Schlumberger



شکل ۵-۷- سونداژ الکتریک به روش چهار قطبی شلومبرژه

در این صورت $AM = BN$ و $AN = BM$ خواهد بود، درست همان طور که پیش از این در روابط ۴ و ۵ و ۶ آمد. مقدار K وقتی قطبها نسبت به مرکز قرینه نباشد برابر است با :

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{BM}} \quad (9)$$

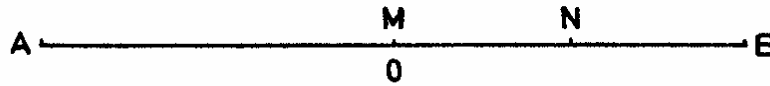
رابطه ۹ را می توان به صورت رابطه ۱۰ هم نوشت:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN}\right)} \quad (10)$$

در این روش، مقدار K وقتی A, B و MN نسبت به O قرینه باشد مساویست با :

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (۱۱)$$

در حالت خاصی، اگر یکی از الکترودهای گیرنده پتانسیل روی نقطه مرکزی قرار گیرد (شکل ۵-۸)



شکل ۵-۸- آرایه شلومبرژه

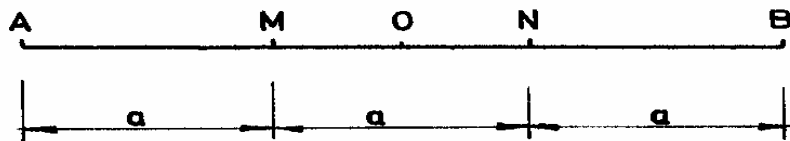
در این صورت :

$$K = \pi \frac{AM \cdot BM}{MN} \quad (۱۲) \text{ خواهد بود.}$$

ب- آرایه ونر

در روش ونر، فواصل بین الکترودهای فرستنده جریان و الکترودهای گیرنده پتانسیل مساوی و معادل مقداری ثابت است، یعنی

$$AM = NB = MN = a \quad (\text{شکل ۵-۹})$$



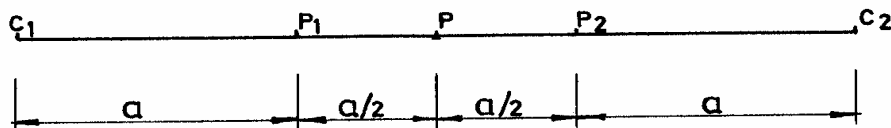
شکل ۵-۹- آرایه ونر

پس در این روش $K = 2\pi a$ بوده و مقدار $\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$ می باشد که ρ_a مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برحسب

اهم - متر است.

ج - آرایه لی

الکترودهای گیرنده پتانسیل، در روش لی سه عدد است (شکل ۵-۱۰). ابتدا بین P و P_1 ، سپس بین P و P_2 اختلاف پتانسیل اندازه گیری می شود.



شکل ۵-۱۰ - آرایه لی

در این حالت :

$$\rho_a = \epsilon \pi a \frac{\Delta V_{P_1}}{I} = \epsilon \pi a \frac{V_{P_1}}{I} \quad (۱۴)$$

د - آرایه حامل

در شرایطی که گسترش کابل ها در آرایه شلومبرژه، به علت عوارض سطح زمین دارای محدودیت باشد، می توان الکتروده B را عمود بر امتداد گسترش اصلی و در فاصله ای بیش از OA قرار داد. در این صورت، آرایه به دست آمده آرایه حامل خوانده می شود. در این آرایه، ضریب هندسی به صورت زیر نوشته می شود :

$$K = \frac{\pi}{\epsilon MN} (\epsilon \cdot A^* - MN^*)$$

ه - آرایه لوژن (آرایه قطبی، دو قطبی یا سه الکترودی)

اگر یکی از الکترودهای فرستنده جریان، در فاصله بی نهایت قرار گیرد، یعنی با سه الکتروده کار شود، می توان فاصله الکترودها را مساوی در نظر گرفت (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱ - آرایه لوژن

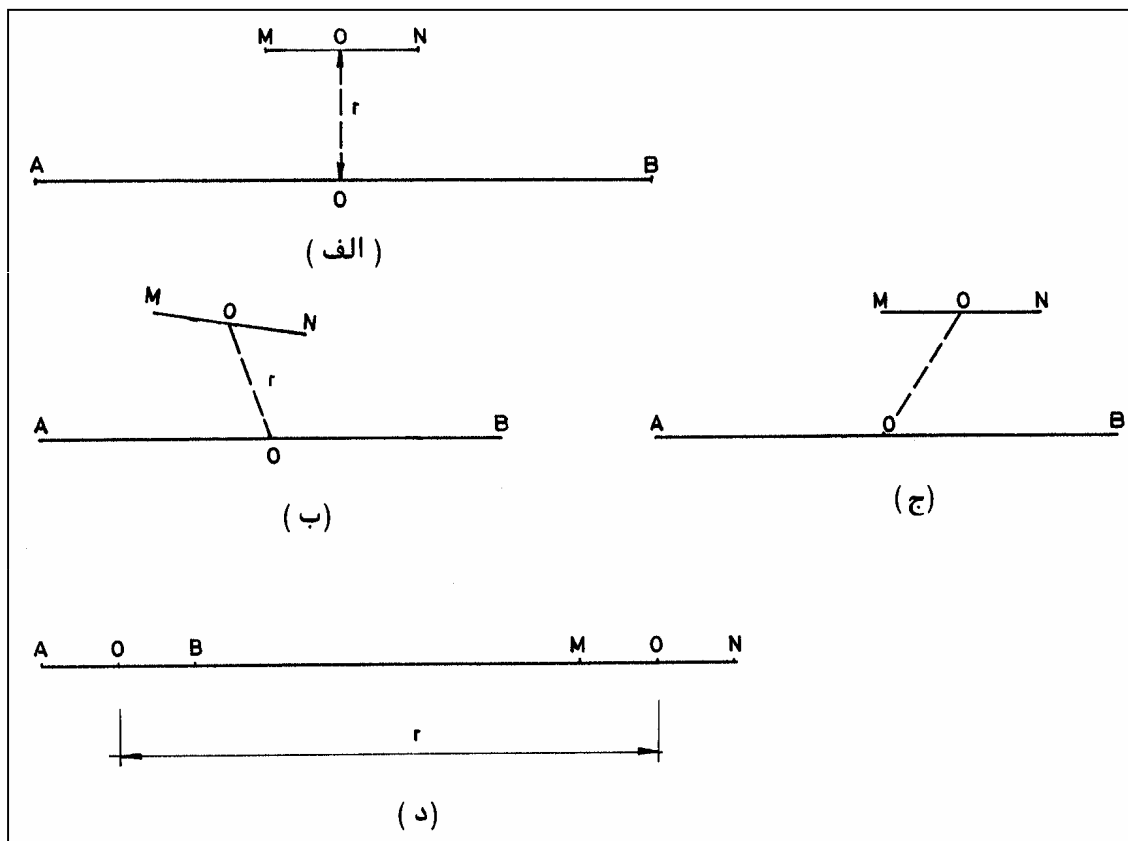
در این حالت، مقدار مقاومت ظاهری عبارت است از :

$$\rho_a = 4\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

روش‌های مختلف دیگری نیز وجود دارد که در مطالعات آبهای زیرزمینی کاربردی ندارد.

۵-۴-۲ آرایش غیر خطی (آرایش چهار قطبی غیر خطی نامتقارن)

در آرایش غیر خطی، ممکن است الکترودهای گیرنده پتانسیل و الکترودهای فرستنده جریان، روی یک خط مستقیم قرار نگیرند. این آرایش را روش دو قطبی^۱ نیز می‌نامند. در این روش، الکترودهای فرستنده جریان و الکترودهای گیرنده پتانسیل نزدیک به هم قرار دارند (شکل ۵-۱۲).



شکل ۵-۱۲- آرایش غیر خطی

۵-۵-۵ وسایل مورد استفاده در روش مقاومت ویژه

وسایل مورد استفاده در بررسی‌های ژئوالکتریکی را می‌توان به این صورت تقسیم بندی کرد:

الف - مولد جریان الکتریکی

در بیشتر مواقع، از جریان مستقیم (DC) برای بررسی‌های ژئوالکتریک استفاده می‌شود. در این موارد، مولد جریان شامل مجموعه‌ای از باتری‌های خشک بوده که به‌طور سری به هم متصل می‌شوند و بدین ترتیب، حتی تا چند صد ولت را می‌توان به زمین فرستاد. به جای چند باتری می‌توان یک باتری ۱۲ ولتی یا ۲۴ ولتی را به کار برد و به کمک مبدل‌هایی^۱ (تقویت‌کننده‌هایی)، جریان را به میزان مورد نیاز تقویت کرد.

در بعضی روش‌ها، جریان متناوب (که توسط ژنراتورهای قابل حمل تولید می‌شود) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب - الکترودها

الکترودهای به کار رفته باید به شکلی باشند که خود، پتانسیل ایجاد نکرده ضمناً جریان الکتریکی را کاملاً به زمین فرستاده و بتوان اختلاف پتانسیل موجود را توسط آنها اندازه‌گیری کرد. بهترین نوع الکترودها، معمولاً میله‌های مسی به طول ۵۰ سانتی‌متر است که برای گیرنده‌های پتانسیل به کار می‌رود و میله‌های مسی به طول ۱ تا ۱/۵ متر است که برای فرستنده‌های جریان از آنها استفاده می‌شود. برای ایجاد اتصال بهتر، می‌توان آب نمک یا آب معمولی را روی الکترودها ریخت. در بعضی موارد، به جای الکترودها از ظروف خلل و فرج‌دار استفاده می‌شود. از الکترودهای غیرقطبی^۲، برای کاهش مقدار پتانسیل خودزا (S.P) استفاده می‌شود.

ج - کابل‌ها

برای اتصال مولد به الکترودها، از کابل استفاده می‌شود. چون کابل‌ها روی زمین کشیده شده و احتمال بریدگی عایق روی آنها وجود دارد، باید از جنس خوب و مخصوص عملیات ژئوفیزیکی باشد. کابل مورد استفاده، از سه رشته سیم فولادی که در یک پوشش پلاستیکی (P.V.C) قرار گرفته تشکیل شده است.

برای از بین بردن جریان‌های القایی در نقاط A و B، لازم است پیچیدگی کابل‌ها روی قرقره معکوس یکدیگر باشد.

د - سیستم‌های اندازه‌گیری

سیستم اندازه‌گیری باید دقیق باشد، به‌طوری که بتواند اختلاف پتانسیل و شدت جریان ورودی را به ترتیب تا حدود صدم میلی‌ولت و دهم میلی‌آمپر اندازه‌گیری کند. در ضمن به دلیل کاربرد آنها در شرایط مختلف آب و هوایی، دقت آنها باید در رطوبت و در درجه حرارت‌های مختلف از ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش نیافته، حمل و نقل آنها ساده بوده و در مقابل ضربه‌ها مقاومت کافی داشته باشند.

1 - Convertor

2 - Impolarizable

۵-۵-۶ انجام بررسی‌های صحرایی مقاومت ویژه

با توجه به هدف مطالعات و نیازها، می‌توان بررسی‌های ژئوالکتریکی را به روش‌های مختلفی انجام داد.

الف - روش سونداژ الکتریک^۱

اگر هدف، تعیین تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در یک محل از سطح زمین تا عمق باشد، می‌توان نقطه (ایستگاه) O را در محل ثابتی در نظر گرفته و سپس در آرایش الکتریکی انتخابی، فاصله بین الکترودهای فرستنده جریان (B,A) را افزایش داد و مقادیر ρ_a را به ازای طول‌های مختلف AB تعیین کرد.

در روش سونداژ الکتریکی با آرایش شلومبرژه، فاصله الکترودها ($AB/2$) را به تدریج با فواصل لگاریتمی افزایش داده مقادیر مقاومت ظاهری اندازه‌گیری می‌شود. سپس ارقام به دست آمده روی کاغذ لگاریتمی منتقل می‌شود. منحنی که از این نقاط می‌گذرد، در حقیقت $\rho_a = f(AB/2)$ بوده و به نام منحنی سونداژ الکتریکی در آن نقطه نامیده می‌شود. این منحنی، اساس تعبیر و تفسیرهای مطالعات است. با مقایسه منحنی به دست آمده و منحنی‌های استاندارد، می‌توان ضخامت و مقاومت ویژه حقیقی لایه‌های مختلف را تعیین کرد.

ب - آرایه مقاومت ویژه

در صورتی که در یک منطقه، هدف، تعیین تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای عمق مشخصی باشد، فاصله الکترودهای فرستنده جریان AB را به میزان معین انتخاب کرده و مقدار مقاومت ویژه ظاهری در نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌شود، سپس برای عمق مذکور، منحنی‌های هم‌مقاومت ویژه ظاهری تهیه می‌شود.

ج - آرایه برداشت خطی

در این بررسی، تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در امتداد یک خط مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با توجه به ساختمان زمین‌شناسی و عمق مورد بررسی، مقدار AB و MN انتخاب شده و این مقادیر در طول پروفیل انتخابی ثابت نگه‌داشته می‌شود. پس از اندازه‌گیری در هر نقطه، این مجموعه روی خط برداشت تغییر مکان می‌یابد تا کل مسیر را پوشش دهد. اگر ارقام مقاومت ویژه ظاهری به دست آمده نسبت به فاصله در طول خط برداشت روی کاغذی منتقل شود، یک پروفیل به دست می‌آید که مقاومت ویژه ظاهری را برای عمق معینی در طول خط برداشت نشان می‌دهد. از این آرایه، برای مشخص کردن تغییرات ناگهانی طبقات زیرزمینی مانند گسل‌ها، پایین افتادگی‌ها، تغییر سازند و غیره استفاده می‌شود.

د - آرایه سه الکترودی C.R.P.^۲

این آرایه، باید به صورت رفت و برگشت انجام گیرد تا محل دقیق گسل‌ها ردیابی شود.

1 - Electrical Sounding

2 - Comlunel Resistivity Pral

۵-۵-۱ پردازش داده‌های مقاومت ویژه

همان‌طور که گفته شد، نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه در گمانه‌های الکتریکی بر حسب فاصله، روی کاغذ لگاریتمی (فاصله بررسی روی محور افقی و مقاومت ویژه مربوط روی محور عمودی) آورده می‌شود. این روش نمایش اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌های الکتریکی، دارای مزایای مختلفی است:

- اطلاعات به‌دست آمده را می‌توان با منحنی که از قبل برای حالت‌های مختلف محاسبه شده و به صورت منحنی پایه یا مدل در دسترس بوده، مقایسه کرد.

- اثرهای تغییرات ضخامت لایه‌هایی که در اعماق قرار گرفته‌اند، کاهش یافته اما تأثیر لایه‌های نزدیک‌تر به سطح زمین بهتر نمایان می‌شود.

بین طول فرستنده جریان AB و عمق نفوذ جریان، ارتباط مستقیم وجود دارد و به‌طور کلی، می‌توان عمق نفوذ جریان (عمق مورد مطالعه) را، تقریباً معادل $AB/4$ دانست. در طبیعت سازندهای زمین‌شناسی به‌خصوص آبرفت‌ها، لایه لایه بوده که در بیشتر موارد، مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. هر لایه در بررسی‌های ژئوفیزیکی با دو عامل «مقاومت ویژه» و «ضخامت مربوط» مشخص می‌شود. اگر در منطقه مورد مطالعه، یک لایه همسان (هموژن) و متجانس (ایزوتروپ) وجود داشته باشد و ضمناً رطوبت آن نیز یکسان باشد، منحنی مقاومت ویژه‌ای که به‌دست می‌آید، به صورت یک خط موازی با محور OA خواهد بود. هر گونه تغییر در روند این منحنی، نشان‌دهنده برخورد به لایه با مقاومت ویژه الکتریکی متفاوت است؛ یعنی با بررسی منحنی‌های سونداژالکتریک می‌توان لایه‌های با مقاومت ویژه مختلف را شناسایی کرد که عمق تقریبی آنها نیز معادل $AB/2$ نقطه مربوط است.

منحنی‌های پایه، برای روش چهار قطبی شلومبرژه در حالت‌های مختلف که منطقه مورد مطالعه از دو لایه یا سه لایه مختلف تشکیل شده باشد محاسبه و توسط مؤسسات و سازمان‌های مختلف انتشار یافته است. به عنوان مثال، منحنی‌های پایه برای حالت سه طبقه، بر حسب سه عامل زیر طبقه‌بندی شده است:

- نسبت بین مقاومت‌های ویژه طبقات اول و دوم $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ ،

- نسبت بین ضخامت لایه‌های اول و دوم $\frac{h_2}{h_1}$ ، و

- مقدار مقاومت ویژه لایه سوم $\rho_3 = \rho_1$ $\rho_3 = \infty$ $\rho_3 = 0$. $\rho_3 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$

برای مقاومت ویژه لایه سوم، چهار مقدار در نظر گرفته می‌شود.

$\rho_3 = \infty$ ، و برای $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ تعداد ۱۲ نسبت، و برای h_2/h_1 نیز تعداد ۱۰ نسبت فرض شده و منحنی‌های پایه تهیه شده

است. جمع منحنی‌های پایه ۴۸۰ عدد بوده که مربوط به سه حالت زیر است:

طبقه هادی روی طبقه مقاوم قرار گرفته $\rho_1 < \rho_2$

دو طبقه

طبقه مقاوم روی طبقه هادی قرار گرفته $\rho_1 > \rho_2$

یک طبقه مقاوم بین دو طبقه هادی است $\rho_1 < \rho_2, \rho_1 > \rho_2$

سه طبقه

یک طبقه هادی بین دو طبقه مقاوم است $\rho_1 > \rho_2, \rho_1 < \rho_2$

برای چهار طبقه با ضخامت‌های مساوی و به صورت هادی، مقاوم، هادی، مقاوم، منحنی‌های پایه نیز تهیه شده است. مقایسه منحنی سونداژالکتریک و منحنی‌های پایه، این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان ضخامت و مقاومت ویژه حقیقی لایه‌های مختلف را تعیین کرد، و با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، کیفیت آب زیرزمینی و غیره بتوان شکل هندسی و تغییرات کمی و کیفی لایه‌های موجود در منطقه مورد بررسی را برآورد کرد.

۵-۵-۱ کاربرد روش مقاومت ویژه در مطالعات منابع آب زیرزمینی

همان‌طور که گفته شد، به کمک روش ژئوالکتریک، تفکیک لایه‌های مختلفی که دارای مقاومت ویژه الکتریکی متفاوتند، میسر است. یکی از مخازن عمده منابع آب زیرزمینی، رسوبات آبرفتی بوده که از تناوب لایه‌های شن و ماسه و لایه‌های ریزدانه تشکیل شده‌اند. عموماً این منابع، روی طبقات با مقاومت زیاد مانند سنگ‌های آهکی آذرین و ... یا طبقات با مقاومت کم مانند سازندهای رسی، مارنی و ... قرار دارند. به دلیل وجود اختلاف بین مقاومت ویژه الکتریکی طبقات مختلف، استفاده از روش ژئوالکتریک، به منظور شناسایی شکل هندسی مخزن، عمق سنگ کف و غیره کاربرد زیادی دارد. همچنین به کمک روش ژئوالکتریک، اگر در بین سازندهای محل مورد بررسی، لایه‌های رسی نباشد، می‌توان عمق حد فاصل آب شور و شیرین در منابع آب زیرزمینی ساحلی را تعیین کرد. ضمناً به کمک روش‌های مختلف سونداژالکتریک و برداشت مقاطع الکتریک می‌توان محل گسل‌ها و همچنین میزان جابه‌جایی طبقات زیرین و در نتیجه ضخامت سنگ مخزن آب را مشخص کرد.

به‌طور کلی، به کمک روش ژئوالکتریک می‌توان تمام عواملی که روی مقاومت ویژه الکتریکی تأثیر دارند (مانند جنس سازند، تغییر کیفیت آب، وجود شکستگی و غیره) را مورد بررسی قرار داد.

در عمل، سازندهای سخت می‌توانند منابع آب زیرزمینی باشند که دارای تخلخل، شکستگی‌ها، غارها و درزهای انحلالی مختلف هستند. با افزایش فضای خالی در سنگ، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی آن نیز افزایش می‌یابد. ضمناً انواع سنگ‌های مختلف عموماً دارای مقاومت الکتریکی متفاوتی هستند، بنابراین روش ژئوالکتریک در مطالعه منابع آب سازندهای سخت نیز کاربرد دارد. روش برداشت خطی^۱ به منظور شناسایی محل گسل‌ها و شکستگی‌ها نتایج خوبی در این مطالعات به‌دست می‌دهد. روش برداشت به صورت ترکیبی، در مورد جهت کارست‌ها اطلاعاتی به‌دست داده و عمق آنها را مشخص می‌کند.

در مطالعات ژئوالکتریک، به منظور به‌دست آمدن نتایج بهتر و درست‌تر، باید از یک طرف آرایش الکتریکی متناسب با نوع مسئله انتخاب شود و از طرف دیگر پردازش نتایج بررسی‌های ژئوالکتریک با استفاده از تمام اطلاعات و آمار موجود صورت گیرد.

به‌طور کلی، مهم‌ترین مسائلی را که به روش مقاومت ویژه می‌توان بررسی کرد، عبارتند از:

- شناسایی لایه‌های هادی و مقاوم بین طبقات با مقاومت ویژه مختلف از نظر کمی و کیفی

- تعیین محل گسل‌ها در سازندهای سخت و امتداد آنها در آبرفت‌ها
- بررسی شکل هندسی ضخامت و گسترش لایه‌های آبد در محل‌های خروجی یا محل‌های ورودی آبخوان
- تعیین مرز بین آبهای شور و شیرین (سطح تماس آب شور و شیرین) در مناطق ساحلی
- تعیین مسیر دره‌های آبرفتی قدیمی و گسترش آنها در دشت
- بررسی مخروط افکنه‌ها از نظر گسترش و عمق رسوبات
- بررسی سنگ کف مقاوم و یا هادی زیر رسوبات آبرفتی
- تفکیک آهک‌های سخت و فشرده^۱
- بررسی و تعیین محل غارهای آهکی
- تعیین محل گنبد‌های نمکی و گسترش آنها
- بررسی مناطق ژئوترمال (کانون‌های آب گرم)
- تعیین بهترین محل‌های حفاری
- برآورد مشخصات هیدروپنماکی در نقاط مختلف آبخوان
- تعیین لایه‌های شنی و ماسه‌ای بین لایه‌های رسی و مارنی

۵-۶ روش لرزه‌ای

۵-۶-۱ اساس روش لرزه‌ای^۲

هر ضربه یا انفجار در زمین، باعث بروز لرزه‌هایی شده که در داخل سنگ‌های پوسته زمین به صورت امواج لرزه‌ای منتقل می‌شود. با نصب گیرنده‌های مناسب در مجاورت محل انفجار روی زمین، می‌توان این امواج را دریافت کرد. براساس تئوری الاستیسیته، هر گاه ضربه‌ای بر یک محیط مانند زمین وارد شود، در آن امواج الاستیسیته به وجود می‌آید که این امواج در داخل سنگ‌های مجاور محل ضربه پخش شده و با فاصله زمانی به نقاط مختلف می‌رسد. سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در سنگ‌های مختلف متفاوت بوده و به وزن مخصوص و سایر مشخصات سنگ بستگی دارد.

به‌طور کلی می‌توان گفت که سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در سنگ‌های سخت، بیش از آبرفت‌ها و لایه‌های رسی و مارنی است. سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در چند محیط که از نظر منابع آب حایز اهمیت می‌باشند، در نمودار ۵-۴ آمده است.

1- Compact
2- SeismicP respecting

سرعت انتشار امواج														نوع سنگ
بر حسب متر بر ثانیه														
۷×۱۰ ^۳	۶×۱۰ ^۳	۵×۱۰ ^۳	۴×۱۰ ^۳	۳×۱۰ ^۳	۲×۱۰ ^۳	۱×۱۰ ^۳	m/s							
														هوا
														آب
														یخ
														سطوح هوازده
														شن و ماسه خشک
														شن و ماسه آبدار
														رس
														ماسه سنگ سست
														ماسه سنگ سخت
														مارن
														شیل
														آهک
														دولومیت
														گرافیت
														سنگ‌های متامرفیک

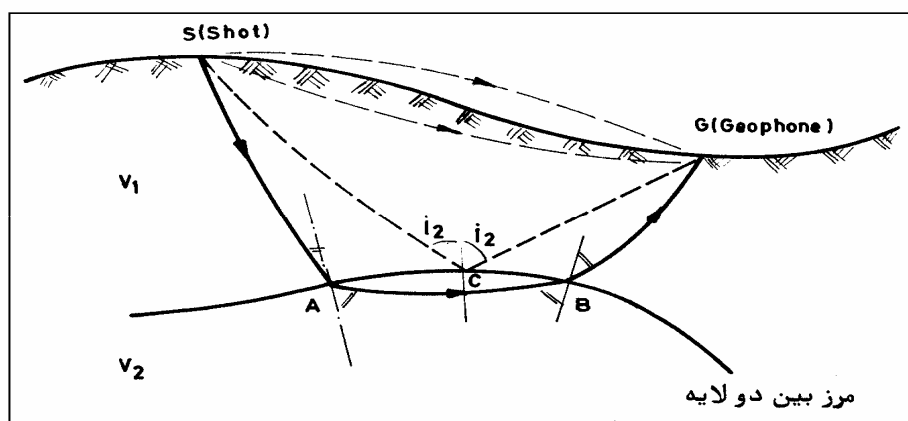
نمودار ۵-۴- سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در محیط‌های مختلف

روش لرزه‌ای، یکی از راه‌های کلاسیک ژئوفیزیک می‌باشد که در سال ۱۹۲۱ برای اولین بار در اکتشافات نفت به کار رفته و طی پنجاه سال گذشته پیشرفت چشمگیری داشته است. در این روش، در نقطه‌ای در نزدیکی سطح زمین، در زمانی مشخص، انفجاری ایجاد می‌شود. زمان رسیدن لرزه‌های حاصل از این انفجار را در نقاط مختلف توسط یک سری گیرنده در سطح زمین اندازه‌گیری می‌کنند. گیرنده‌ها، عموماً روی خط مستقیمی قرار دارند که از محل انفجار نیز گذشته و با فاصله‌های مشخصی نسبت به آن قرار گرفته‌اند. حرکات زمین در محل‌های متفاوت، توسط گیرنده‌ها دریافت و سپس به علایم الکتریکی تبدیل می‌شود و پس از عبور از تقویت کننده‌هایی روی نوارهای مغناطیسی یا فیلم که زمان انفجار نیز به‌طور دقیق روی آن آمده، ضبط می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که کار گیرنده‌ها، ثبت مدت زمان بین لحظه انفجار و لحظه رسیدن لرزه به محل نصب آنها است. این مدت زمان، به جنس و مشخصات هندسی لایه‌های زیرزمینی بین محل گیرنده بستگی دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان سرعت انتشار امواج از نقطه مبدا تا محل دریافت را تعیین کرد، و سپس تغییرات سرعت روی محور

عمودی بر حسب فاصله از محل انفجار (فاصله روی محور افقی) را روی محور مختصات ترسیم کرد. با تعبیر و تفسیر این تغییرات می‌توان به جنس و ساختمان لایه‌های زیرزمینی پی برد.

۵-۶-۲ انواع بررسی‌های لرزه‌ای

سرعت امواج در لایه‌های مختلف، به دلیل وزن مخصوص و فشردگی متفاوت تغییر می‌کند. بنابراین زمانی که موج به سطح جدا کننده دو لایه رسید، به دو قسمت تقسیم می‌شود. مقداری از انرژی در این سطح، انعکاس یافته و مقداری نیز روی این مرز با ایجاد شکست در موج منتقل می‌شود (شکل ۵-۱۳). در بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش لرزه‌ای، می‌توان هر یک از دو دسته امواج بازتابی^۱ یا شکست مرزی^۲ را مورد مطالعه قرار داد.



شکل ۵-۱۳- نمایش تغییر سرعت موج هنگام حرکت در دو لایه مختلف

۵-۶-۲-۱ روش بازتابی

در این روش، زمان رفت و برگشت امواج، از محل انفجار تا سطح مرز و بازتاب آن تا محل گیرنده‌ها تعیین می‌شود. در این روش با محاسبه زمان انتقال امواج بازتابی روی مرزهای مختلف، می‌توان به عمق و ضخامت هر طبقه پی برد. این روش برای بررسی لایه‌های کم عمق زمین چندان مناسب نیست، زیرا امواجی که از لایه‌های کم عمق منعکس می‌شوند در زمان کوتاهی به سطح زمین برمی‌گردند. اندازه‌گیری این زمان کوتاه نیاز به دستگاه‌های بسیار دقیق دارد. مخازن آب زیرزمینی عموماً در واحدهای سنگی مجاور سطح زمین ذخیره می‌شوند.

1 - Reflection Method
2 - Refraction Method

۵-۶-۲ روش شکست مرزی

در این روش، مدت زمان انتقال امواجی که به مرز دو طبقه برخورد کرده و در سطح این مرز حرکت و سپس به گیرنده‌ها رسیده، اندازه‌گیری می‌شود. فاصله گیرنده‌ها از نقطه انفجار به روشی انتخاب می‌شود که زمان اولین موجود دریافت شده، حاصل از شکست امواج طبقات اول و دوم و سوم باشد (شکل ۵-۱۴).

۵-۶-۳ وسایل و ابزارهای روش لرزه‌ای

ابزار و وسایلی که در روش‌های مختلف لرزه‌ای به کار می‌روند، به‌طور کلی از چهار قسمت زیر تشکیل شده‌اند:

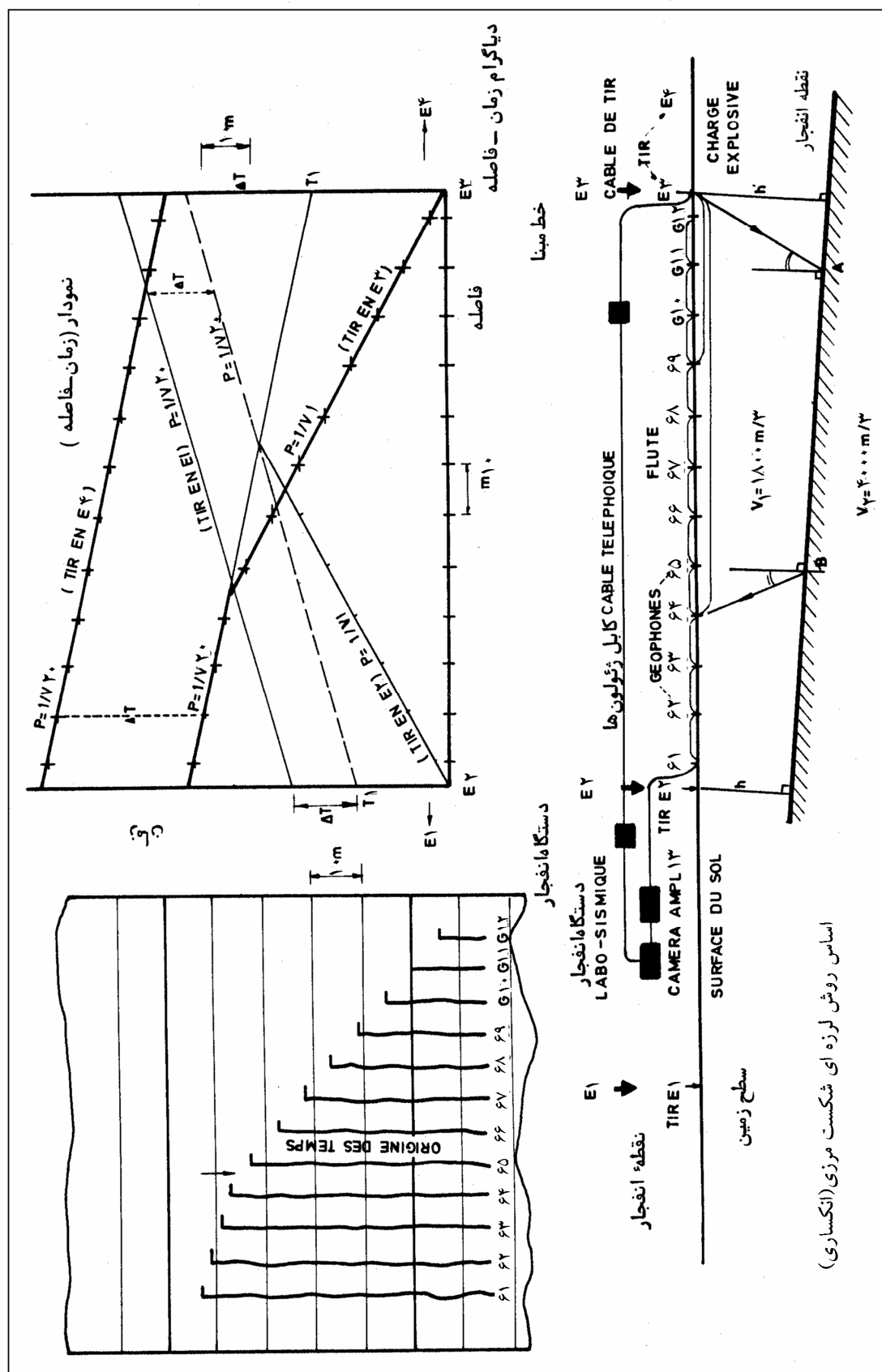
- منبع تولید لرزه،
- تبدیل کننده‌های امواج لرزه‌ای به الکتریسیته،
- تقویت کننده‌های جریان‌های الکتریکی، و
- دستگاه‌های ضبط یا ثبت کننده علایم.

۵-۶-۳-۱ وسایل ایجاد لرزه^۱

امواج الاستیکی را می‌توان با دو روش ایجاد کرد:

الف- با مواد منفجره

به این منظور باید چاهک‌ها یا چاله‌هایی حفر کرده و مواد منفجره را در یک چاه یا در چند چاه در اعماقی معین با توجه به جنس زمین قرار داد. مواد منفجره مورد استفاده، معمولاً دینامیت یا نیترات آمونیوم می‌باشد. این مواد با اجازه مقامات مسئول از طریق کارفرما در اختیار گروه‌های ژئوفیزیکی قرار گرفته و مصرف آن نیز باید طی جدول‌هایی با نظارت مسئولین مربوط صورت گیرد. انفجار مواد منفجره توسط چاشنی انجام می‌شود. چاشنی‌های انفجار به صورت استوانه‌های فلزی کوچک و با قطر حدود ۰/۶ سانتی‌متر بوده که قسمتی از آن توسط پودر انفجاری پر شده است. از انتهای چاشنی انفجاری دو سیم خارج شده که این سیم‌ها را می‌توان به جعبه انفجار متصل کرد. با گذراندن جریان الکتریکی، سیم چاشنی داغ شده و باعث انفجار پودر داخل چاشنی و سپس انفجار مواد منفجره می‌شود.



شکل ۵-۱۴- اساس روش لرزه‌ای شکست مرزی

ب- با سقوط وزنه

امواج الاستیکی را می‌توان با سقوط وزنه‌ای روی زمین ایجاد کرد. وزنه‌های مورد استفاده، حدود سه تن (۳۰۰۰ کیلوگرم) وزن داشته و از ارتفاع حدود سه متری رها می‌شوند. از این روش در مناطق مسطح مانند صحاری شنی و ماسه‌ای و ضمناً مناطقی که کامیون حامل وزنه بتواند در آن حرکت کند، استفاده می‌شود ولی برای مناطق جنگلی و کوهستانی کاربرد ندارد. این روش به نام شرکتی که اولین بار آن را به کار برده (MC Cullon) و وسایل مورد نیاز این روش نیز توسط این شرکت ساخته شده، نامیده می‌شود. این روش در صحاری آفریقا به کار رفته است.

۵-۶-۳-۲ ژئوفون‌ها^۱

همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، امواج لرزه‌ای پس از ایجاد، در داخل زمین حرکت کرده و پس از برخورد به سطوح طبقات مختلف، بازتاب نموده یا شکسته شده و دوباره به سطح زمین بر می‌گردند.

با استقرار دستگاه‌های گیرنده‌ای به نام ژئوفون یا سیزموگراف در سطح زمین، می‌توان این امواج لرزه‌ای را دریافت کرد. این دستگاه‌ها عموماً سیم‌پیچ کوچکی بوده که در داخل یک آهنربا حرکت می‌کند. امواج لرزه‌ای باعث حرکت سیم‌پیچ داخل میدان مغناطیسی شده و در نتیجه الکتریسیته تولید می‌شود. مقدار جریان ایجاد شده به ساختمان ژئوفون‌ها بستگی داشته و معمولاً با لرزش (زمینی که ژئوفون‌ها در آن قرار دارد) معادل ۱ سانتی‌متر بر ثانیه، ولتاژی حدود ۰/۵ تا ۷ ولت در ژئوفون‌ها ایجاد می‌شوند. ژئوفون‌ها توسط سیمی به تقویت کننده‌ها متصل می‌شود. ژئوفون‌ها به تعداد ۱۲ یا ۲۴ و در بعضی موارد ۳۶ عدد روی یک خط و با فاصله‌های معینی قرار می‌گیرد. یکی از ژئوفون‌ها بر سر چاهک‌های محل انفجار یا نزدیک محل برخورد وزنه بر زمین قرار دارد تا لحظه ایجاد لرزه‌ها^۲ را دقیقاً ثبت کند.

۵-۶-۳-۳ صافی‌ها و تقویت کننده‌ها^۳

الکتریسیته‌ای که در اثر امواج لرزه‌ای ایجاد می‌شود، عموماً ضعیف و حدود چند دهم ولت و یا حدود میکروولت بوده و ضمناً همراه علایم مزاحم^۴ است. این علایم، قبل از ثبت، باید تصفیه و تقویت شود. به این منظور فیلترها و تقویت کننده‌هایی در مدار قرار داده می‌شود تا امواج مزاحم که عموماً مربوط به باد یا حرکت وسایل مجاور ژئوفون‌ها بوده، حذف و امواج الکتریکی موجود را تقویت کند.

۵-۶-۳-۴ دستگاه‌های نگاشت ثبات یا ضبط کننده‌ها

دستگاه‌های ثبت امواج الکتریکی ایجاد شده تا قبل از دهه ۱۹۵۰ شامل دوربین عکاسی خاصی بوده که علایم مذکور را روی کاغذهای عکاسی ثبت می‌کرد. در سی سال اخیر، امواج لرزه‌ای که به جریان‌های الکتریکی تبدیل شده است، روی نوارهای مغناطیسی ضبط می‌شود.

کلیه دستگاه‌های تقویت کننده صافی ثبات یا ضبط، در چند جعبه جداگانه به صورت چمدانی است که قابل حمل می‌باشد.

1 - Seismographs
2 - Time Break
3 - Filters Amplifiers
4 - Noise

۵-۶-۴ بررسی‌های لرزه‌ای

منابع آب زیرزمینی عموماً در طبقات سطحی که روی سازند سختی قرار گرفته تشکیل می‌شود. بنابراین مقاطع لرزه‌ای به شکلی انتخاب می‌شود که بتوان جنس و تغییرات ضخامت لایه روی سنگ کف را که حداکثر به حدود چند صد متر می‌رسد مشخص کرد. همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد، امواج پس از ایجاد، در داخل زمین حرکت کرده و با برخورد به مرز طبقات، شکسته شده و به ژئوفون‌ها می‌رسد. با اندازه‌گیری فاصله زمانی بین لحظه انفجار و دریافت امواج توسط ژئوفون‌ها می‌توان منحنی زمان دریافت اولین امواج را بر حسب فاصله^۱ رسم کرد. این منحنی با توجه به تعداد طبقات زمین، از تعدادی خط تشکیل شده که شیب قسمت اول آن معادل عکس سرعت حرکت امواج در طبقه بالایی و شیب قسمت دوم خط، معادل عکس سرعت حرکت امواج در طبقه دوم و همین‌طور شیب خط‌های بعدی، عکس سرعت امواج در طبقات زیری را نشان می‌دهد. با تغییر محل ژئوفون‌ها و محل انفجار روی خط، می‌توان ضخامت لایه‌های مختلف را تعیین و تا حدودی جنس آنها را نیز شناسایی کرد.

۵-۶-۵ پردازش نتایج ژئوفیزیکی به روش لرزه‌ای

به‌طور کلی، نتایج بررسی‌های لرزه‌ای به دو صورت زیر معرفی می‌شود:

۵-۶-۵-۱ مقاطع لرزه‌ای

اگر برداشت‌ها روی خط انجام شده باشد، پس از تعیین ضخامت و سرعت انتشار امواج در لایه‌های مختلف، مقاطع لرزه‌ای تهیه می‌شود. در این صورت، ضخامت لایه‌های متفاوت و سرعت انتشار امواج در آن، بر روی برش‌هایی منتقل می‌شود. با در دست داشتن سرعت انتشار امواج در سازندهای مختلف می‌توان مقاطع گفته شده را به برش‌های زیرزمینی تبدیل کرد.

۵-۶-۵-۲ نقشه هم‌عمق سنگ کف یا هم‌ضخامت رسوبات سطحی

اگر پوشش منطقه توسط پروفیل‌های لرزه‌ای کامل باشد، می‌توان ضخامت رسوبات سطحی یا عمق سنگ کف را در نقاط مختلف تعیین کرد و به کمک آن، نقشه هم‌عمق سنگ کف یا هم‌ضخامت رسوبات سطحی را تهیه کرد؛ بنابراین معمولاً منطقه مورد بررسی را توسط شبکه‌ای از پروفیل‌های لرزه‌ای موازی یکدیگر می‌پوشانند. ضمناً در صورت نیاز، خطوط برداشتی عمود بر پروفیل‌ها و موازی انتخاب می‌شود.

۵-۶-۶ کاربرد روش لرزه‌ای در مطالعات منابع آب

سرعت انتقال امواج در واحدهای مختلف سنگی، با وجودی که متفاوت است ولی برای هر نوع از واحدهای زمین‌شناسی دارای دامنه تغییراتی بوده که این دامنه‌ها تا حدودی یکدیگر را می‌پوشاند. بدین جهت، نمی‌توان تنها از روی سرعت انتقال امواج به نوع سنگ پی برد ولی با توجه به مشخصات منطقه‌ای می‌توان به نتایج خوبی رسید.

سرعت انتقال امواج در سنگ‌های سخت، زیاده‌تر از سنگ‌های نرم و همچنین در یک نوع سنگ برای حالت خرد شده، کمتر از حالت بدون شکستگی می‌باشد. ضمناً انتقال امواج در سنگ‌ها بیش از آبرفت‌ها و در آبرفت‌های دانه‌درشت، بیش از آبرفت‌های دانه‌ریز است. سرعت انتقال امواج در آب و هوا، به ترتیب معادل ۱۵۰۰ و ۳۴۰ متر بر ثانیه بوده بنابراین برای آبرفت‌های خشک، مشخص کننده جنس و دانه‌بندی آبرفت و برای آبرفت‌های اشباع به دلیل عبور قسمت اعظم امواج از داخل آب، به سرعت انتقال امواج در آب نزدیک می‌شود. البته در مورد آبرفت‌های دانه‌ریز مانند رس، چون حتی در صورت خشک‌بودن، باز هم سطح دانه‌ها از آب پوشیده شده، برای حالت‌های اشباع آن چندان تغییر نمی‌کند.

با توجه به مطالب بالا، از روش لرزه‌ای در مطالعات منابع آب زیرزمینی برای تعیین عمق سنگ کف، موقعیت دره‌های قدیمی، خردشدگی سنگ‌ها، موقعیت شکستگی‌های بزرگ و گسل‌ها، موقعیت آبرفت‌های دانه درشت، تعیین منطقه کارستی و غیره استفاده می‌شود. ضمناً همانطور که ذکر شد روش شکست‌مرزی کاربرد بیشتری نسبت به روش بازتابی دارد.

۶- ژئوفیزیک سطحی در مطالعات آبهای زیرزمینی

۱-۶ امکانات ژئوفیزیک سطحی در مطالعات آبهای زیرزمینی

تاکنون روش‌های مختلف ژئوفیزیک سطحی در مطالعات منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شده ولی روش ژئوالکتریک به دلیل هزینه کمتر و نشان دادن رطوبت خاک نسبت به سایر روش‌ها، در طیف وسیعی از مسائل آب زیرزمینی کاربرد داشته و تاکنون نیز بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

به تازگی روش الکترومینیٹیک در مطالعات آبهای زیرزمینی کاربرد پیدا کرده و از آن به منظور تعیین منطقه شکستگی و همچنین تعیین مرز بین آب شور و شیرین^۱ استفاده می‌شود.

روش لرزه‌ای شکست مرزی، برای شناسایی لایه‌های عمیق به تنهایی یا توأم با روش ژئوالکتریک به کار می‌رود. روش ثقل‌سنجی را می‌توان به منظور بررسی ساختار لایه‌های عمیق سنگ کف و تعیین مرز آبخوان‌ها با سنگ‌های سخت زیری و به خصوص سنگ‌های آذرین به کار گرفت؛ در ضمن، کانال‌های مدفون را می‌توان به کمک این روش تعیین محل کرد. روش مغناطیسی در مطالعات آبهای زیرزمینی، کاربرد زیادی نداشته ولی امکان دارد برای حل بعضی از مسائل خاص مانند تعیین عمق سنگ کف آذرین، وجود دایک^۲ و غیره به کار برد.

روش حرارتی، اخیراً در مطالعات آبهای زیرزمینی به کار گرفته شده است، به عنوان مثال عکس‌های مادون قرمز ماهواره‌ای، برای شناسایی معابر اصلی جریان آبهای زیرزمینی و غیره صورت می‌گیرد. همچنین از این روش برای تعیین محل گذر آبهای سطحی به صورت کانال به خصوص در لغزش‌ها استفاده می‌شود.

به‌طور کلی، کاربرد ژئوفیزیک سطحی در حل مسائل مختلف منابع آب زیرزمینی را می‌توان به صورت جدول ۶-۱ خلاصه کرد.

۲-۶ محدودیت انواع ژئوفیزیک سطحی در مسائل آب زیرزمینی

همان‌طور که در ابتدای مبحث آمد، بررسی‌های ژئوفیزیکی با توجه به خواص فیزیکی سنگ‌ها و بر اساس وجود اختلاف بین مشخصه فیزیکی واحدهای سنگی مجاور استوار است. بنابراین برای این که بتوان یک روش ژئوفیزیکی را در منطقه‌ای به‌طور مفید به کار برد، باید بین مشخصه فیزیکی مورد استفاده در آن روش برای واحد سنگی مورد نظر و واحدهای سنگی مجاور، اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود داشته باشد. یعنی اگر هدف، شناسایی عمق سنگ کف یک آبخوان است، می‌توان روشی را به کار برد که مشخصه فیزیکی که روش مذکور بر آن استوار بوده، برای سنگ مخزن و سنگ کف متفاوت باشد. این عامل محدودیت عمده کاربرد روش‌های مختلف ژئوفیزیک سطحی در مطالعات منابع آب زیرزمینی به شمار می‌رود؛ در ضمن روش‌های مختلف دارای محدودیت‌های دیگری نیز می‌باشند. به‌طور کلی، محدودیت‌های اصلی روش‌های ژئوفیزیک سطحی در مطالعات آبهای زیرزمینی به این شرح است.

1 - Interface

2 - Dike

جدول ۶-۱- کاربرد ژئوفیزیک سطحی در مطالعات منابع آب زیرزمینی

نوع مسئله	روش مناسب
تعیین گستره‌های آب شور و شیرین	مقاومت ویژه
شناسایی جنس و ضخامت لایه‌های مختلف آبرفتی	مقاومت ویژه
تعیین عمق سنگ کف و برآورد جنس آن	مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکست مرزی
تعیین مرز بین آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی	مقاومت ویژه و روش الکترومینیتهیک
تعیین محل بسترهای قدیمی رودخانه‌ها و مسیل‌ها	مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکست مرزی
تعیین موقعیت گسل‌ها در سازندهای سخت و امتداد آنها در آبرفت‌ها	پروفیل الکتریک
تفکیک آهک‌های خرده شده از آهک‌های توده‌ای	مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکست مرزی
تفکیک آهک‌های آبدار از آهک‌های بدون آب	مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکست مرزی
تفکیک رسوبات آبرفتی از سنگ‌های آذرین مانند گرانیت و بازالت	ثقل سنجی
تفکیک آبرفت‌های دانه‌درشت و دانه‌ریز	مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکست مرزی
تفکیک آبرفت‌های آبدار و خشک	مقاومت ویژه و لرزه‌ای شکست مرزی
بررسی عمومی منطقه به‌طور سریع و ارزان	ثقل سنجی
بررسی منطقه‌ای که سنگ مخزن، سنگ کف یا سنگ سقف آن بازالت‌ها و گرانیت‌ها هستند	مغناطیسی
تعیین موقعیت غارها و دایک‌ها	ثقل سنجی و مقاومت ویژه
تعیین عمق سنگ کارستی آبدار	مقاومت ویژه
تعیین موقعیت چشمه‌های زیر دریایی	روش گرمایی و روش الکتریکی
تعیین آبگذری‌ها	مقاومت ویژه و گرماسنجی

۶-۲-۱ محدودیت روش ثقل سنجی

استفاده از روش ثقل سنجی، به دلیل نیاز به انجام تصحیح‌های متعدد مانند تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح توپوگرافی، تصحیح بوگه و غیره، در مناطق کوهستانی که اختلاف ارتفاع بین ایستگاه و نقاط مجاور نسبتاً قابل ملاحظه باشد، نتایج رضایت‌بخشی نمی‌دهد. همچنین در مناطقی که وزن مخصوص سنگ مخزن آب با سنگ‌های مجاور، نزدیک به هم باشد، روش ثقل سنجی کاربرد ندارد.

۶-۲-۲ محدودیت روش مغناطیسی

در مناطقی که سنگ مخزن آب و سنگ‌های مجاور آن از سازندهای رسوبی تشکیل شده باشد، نمی‌توان از روش مغناطیسی استفاده کرد. ضمناً اگر در منطقه مورد بررسی انبارهای آهن، راه‌آهن، لوله‌های آهنی زیرزمینی، کابل‌های انتقال فشار قوی برق یا سنگ‌های آهن‌دار طبقات سطحی زمین را پوشانده‌اند، روش مغناطیسی کاربرد ندارد.

۶-۲-۳ محدودیت روش الکترومینیته

این روش نیز دارای محدودیت‌های روش مغناطیسی است.

۶-۲-۴ محدودیت روش حرارتی

این روش در مناطقی کاربرد دارد که منابع آب، باعث ایجاد گرادیان حرارتی در منطقه شده باشد، در غیر این صورت قابل استفاده نیست.

۶-۲-۵ محدودیت روش مقاومت ویژه

از روش مقاومت ویژه نیز در مناطقی که دارای خطوط راه‌آهن، کابل‌های انتقال برق (فشار قوی)، لوله‌های فلزی زیرزمینی (انتقال آب، گاز، نفت و غیره) و ... بوده، نمی‌توان استفاده کرد. ضمناً این روش نیز مانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی دارای محدودیت گفته شده در بالاست یعنی برای تفکیک آبخوان از سنگ‌های مجاور به وسیله روش مقاومت ویژه، لازم است که مقاومت الکتریکی آنها متفاوت باشد؛ به عنوان مثال روش مقاومت ویژه نمی‌تواند سنگ کف را از آبخوان (در محل‌هایی که آبخوان ریزدانه یا محتوی آب‌شور بوده) و سنگ کف را از سازندهای تشکیل شده از رس و مارن تفکیک کند.

۶-۲-۶ محدودیت روش لرزه‌ای

چون در این روش باید لرزه‌ای در داخل زمین به وجود آید، استفاده از آن در مجاورت شهرها، بناهای تاریخی، پل‌ها و غیره، مقذور نیست. در ضمن برای تفکیک واحدهای سنگی با سرعت انتشار امواج الاستیک تقریباً مساوی، کاربردی ندارد.

۷- بررسی ژئوفیزیکی در مراحل مختلف مطالعات آبهای زیرزمینی

معمولاً مطالعات آبهای زیرزمینی به منظور نتیجه‌گیری بهتر، طی مراحل مختلف شناسایی، نیمه‌تفصیلی و تکمیلی یا بهره‌برداری صورت می‌گیرد. بررسی‌های ژئوفیزیکی در مراحل مختلف مطالعات آبهای زیرزمینی به منظور دستیابی به اهداف مختلف انجام شده و بالطبع از نظر میزان تا حدودی با یکدیگر متفاوت است.

۱-۷ بررسی‌های ژئوفیزیکی در مرحله شناسایی

در این مرحله از مطالعات، مشخصات کمی و کیفی سنگ مخزن آب در دست نیست، بنابراین برای شناسایی وضعیت عمومی منطقه، لازم است مطالعات ژئوفیزیکی نیز در سطح شناسایی صورت گیرد. روش‌های مختلف ژئوفیزیکی که معمولاً در مرحله شناسایی به کار می‌رود، عبارتند از: مقاومت ویژه، ثقل‌سنجی و الکترومغناطیسی.

۱-۱-۷ روش مقاومت ویژه در مرحله شناسایی

همان‌طور که گفته شد، مقاومت ویژه، یکی از روش‌های سریع و ارزان است که می‌توان از آن در مطالعات مرحله شناسایی استفاده کرد. به این منظور، سطح منطقه‌ای که برآورد می‌شود، روی مخزن آب زیرزمینی قرار داشته و توسط تعدادی سونداژ الکتریکی پوشش داده می‌شود. تعداد سونداژها با توجه به وضعیت زمین‌شناسی منطقه و غیره متفاوت است. معمولاً برای هر ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر مربع از منطقه مورد نظر، یک سونداژ الکتریکی منظور می‌شود.

با استفاده از نتایج این مطالعات، می‌توان به تهیه نقشه‌ها و برنامه‌های مختلف زیر اقدام کرد:

- تهیه نقشه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای عمق متوسط سنگ مخزن آب،
- تهیه نقشه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای سنگ مخزن آب،
- تهیه مقاطع ژئوالکتریکی در حد اطلاعات و امکانات موجود،
- تفکیک مناطق دارای آب شور و شیرین، و
- تهیه برنامه مطالعات ژئوالکتریکی برای مرحله بعدی مطالعات.

۲-۱-۷ روش الکترومغناطیسی در مرحله شناسایی

برای شناسایی عمومی منطقه، علاوه بر روش مقاومت ویژه می‌توان از روش‌های مختلف الکترومغناطیسی به‌خصوص روش هوایی V.L.F.^۱، برای مشخص کردن مناطق با مقاومت ویژه ظاهری خوب، متوسط و کم استفاده کرد. روش الکترومغناطیس هوایی، به دلیل سرعت عمل زیاد، برای شناسایی عمومی منطقه کمک مؤثری می‌کند.

1 - Very Low Frequency

۷-۱-۳ روش ثقل‌سنجی در مرحله شناسایی

در مناطقی که توپوگرافی زمین زیاد تغییر نمی‌کند، برای جلوگیری از انجام تصحیح‌های متعدد، در صورتی که سنگ مخزن آب روی سنگ‌های با وزن مخصوص نسبتاً زیاد قرار گرفته باشد، روش ثقل‌سنجی می‌تواند برای شناسایی عمومی منطقه، کمک مؤثری باشد. به این منظور، تعداد نقاط اندازه‌گیری متناسب با وسعت منطقه، معمولاً یک ایستگاه در ۱ تا ۲ کیلومتر مربع انتخاب می‌شود.

۷-۲ بررسی‌های ژئوفیزیکی در مطالعات نیمه تفصیلی

موقعیت سنگ مخزن آب در مرحله شناسایی، تا حدودی مشخص است، بنابراین بررسی‌های ژئوفیزیکی در این مرحله، در منطقه منبع آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. روش‌های ژئوفیزیکی که در مطالعات مرحله نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی کاربرد دارد، روش‌های مقاومت ویژه لرزه‌ای، ریز ثقل‌سنجی^۱ و حرارتی است.

بررسی‌های ژئوفیزیکی در مطالعات مرحله نیمه تفصیلی، معمولاً برای جوابگویی به ابهامات زمین‌شناسی موجود و تعیین مشخصات کمی و کیفی منبع آب است، بنابراین در هر منطقه، با توجه به نوع مسائل موجود، روش مناسبی انتخاب می‌شود.

۷-۲-۱ روش مقاومت ویژه در مرحله نیمه تفصیلی

در این مرحله، با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات قبلی، و برای حل مسائل موجود، فواصل گمانه‌های الکتریکی و همچنین تعداد پروفیل‌ها و فواصل بین آنها انتخاب می‌شود.

معمولاً فواصل سونداژهای الکتریک، حدود ۵۰۰ متر و فواصل پروفیل‌ها از ۱ تا ۱/۵ کیلومتر و طول الکترودهای فرستنده جریان، با توجه به ضخامت منبع مورد نظر تعیین خواهد شد.

اگر تعیین محل جابه‌جایی‌ها مورد نظر باشد، در بین مقاطع ژئوالکتریک یا بین سونداژهایی که تغییرات ناگهانی مشاهده می‌شود، از روش برداشت خطی استفاده می‌شود.

برای تعبیر و تفسیر نتایج مطالعات ژئوالکتریک، نتایج حفاری‌های اکتشافی به کار رفته و کلیه این اطلاعات برای تکمیل نقشه‌های زمین‌شناسی آب و تعیین مطالعات هیدرودینامیکی آبخوان استفاده می‌شود.

نقشه‌های ارائه شده در مطالعات ژئوالکتریک مرحله نیمه تفصیلی عبارتند از :

- نقشه‌های تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای اعماق متوسط آبخوان و سنگ کف،
- نقشه تغییرات مقاومت عرضی RT برای آبخوان،
- مقاطع ژئوالکتریک همراه با وضعیت لایه‌های زیری به انضمام مقاطع زمین‌شناسی حفاری‌هایی که روی مقاطع یا در مجاورت آنها قرار دارد، و
- نقشه عمق سنگ کف یا نقشه تغییرات ضخامت سنگ مخزن.

۲-۲-۷ روش لرزه‌ای در مرحله نیمه تفصیلی

در مناطقی که جنس رسوبات (سنگ مخزن، سنگ کف و سنگ سقف) از نظر سختی و خاصیت انتقال امواج با یکدیگر متفاوت باشد، برای تعیین عمق سنگ کف و ضخامت لایه‌های آبدار، می‌توان روش لرزه‌ای شکست مرزی را به کار برد. تمام مشخصات بررسی‌های لرزه‌ای با توجه به نوع مسئله، مشخصات زمین‌شناسی منطقه و غیره انتخاب می‌شود. نتایج حاصل به صورت نقشه تغییرات ضخامت لایه اولی و به شکل برش‌های لرزه‌ای معرفی می‌شود.

۳-۲-۷ روش ریز ثقل سنجی در مرحله نیمه تفصیلی

در مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب در سازندهای سخت، اغلب به شناسایی موقعیت محل غارها و حفره‌ها نیاز است. به این منظور، از روش ریز ثقل سنجی به کمک دستگاه‌های حساس استفاده می‌شود. یعنی در طول پروفیل‌های مختلف، مقدار شتاب ثقل اندازه‌گیری شده و منحنی‌های بی‌هنجاری مربوط تهیه می‌شود. به کمک این منحنی‌ها، می‌توان محل‌های گفته شده را مشخص کرد.

۴-۲-۷ روش حرارتی در مطالعات نیمه تفصیلی

روش حرارتی که در مطالعات منابع آب زیرزمینی کاربرد دارد، استفاده از عکس‌های هوایی است که به کمک دوربین‌های مخصوص و اشعه مادون قرمز گرفته می‌شود. بر اساس این عکس‌ها، می‌توان بی‌هنجاری‌های حرارتی را تعیین و موقعیت محل کانال‌ها، رودخانه‌های مدفون و چشمه‌های زیردریایی را مشخص کرد. به این منظور، عموماً از عکس‌های ماهواره‌ای کمک گرفته می‌شود.

۳-۷ بررسی‌های ژئوفیزیکی در مطالعات تکمیلی

در مطالعات مرحله نیمه تفصیلی، مشخصات عمومی آبخوان تا حد زیادی تعیین شده است ولی در بعضی موارد، مسائل و مشکلات خاصی وجود دارد که به مطالعات تکمیلی نیازمند است. مسلماً مسائل مناطق مختلف، یکسان نبوده و در این مرحله از مطالعات، با توجه به مشکلات موجود، روش مناسب ژئوفیزیکی انتخاب می‌شود.

۸- انتخاب روش ژئوفیزیکی در مطالعات آبهای زیرزمینی

نظر به اینکه مشخصات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در مناطق مختلف بسیار متنوع است، نمی‌توان از پیش، روش‌های مناسب ژئوفیزیکی را برای مناطق مختلف انتخاب کرد. بنابراین باید ابتدا بررسی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی مقدماتی انجام شده و مسائل و ناشناخته‌های موجود تعیین شود، سپس برای دستیابی به مسائل و ناشناخته‌های موجود، برنامه بررسی‌های اکتشافی لازم که یکی از آنها مطالعات ژئوفیزیکی است، با توجه به خصوصیات منطقه تدوین شود.

به‌طور کلی، در بررسی‌های ژئوفیزیکی، بر اساس اختلاف خصوصیات فیزیکی لایه‌ها و طبقات متفاوت با سازندهای مجاور، باید روشی انتخاب شود که طبقات مذکور از نظر خاصیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری، دارای مشخصات متفاوتی باشند. اگر از نظر خاصیت فیزیکی مورد نظر، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین طبقات مختلف وجود نداشته باشد، انجام بررسی ژئوفیزیکی مربوط، به حل مسئله کمکی نخواهد کرد.

با توجه به مطالب بالا، برای انتخاب روش ژئوفیزیکی مناسب، باید کلیه مشخصات منطقه در ارتباط با مسائل موجود، همچنین محدودیت و امکانات روش‌های مختلف در نظر گرفته شود. ضمناً درباره انتخاب روش مناسب برای جوابگویی به مسائل موجود با متخصص ژئوفیزیک مشورت شود.

۸-۱ روش‌های مناسب در سازندهای نرم

سازندهای نرمی که بیشتر در مطالعات منابع آب زیرزمینی مورد توجه هستند، رسوبات تحکیم نیافته به‌خصوص آبرفت‌ها می‌باشند. این رسوبات عموماً از تناوب لایه‌های مختلف شن، ماسه، سیلت و رس و یا مخلوطی از آنها تشکیل شده‌اند. این لایه‌ها از نظر مقاومت ویژه الکتریکی تا حدودی با یکدیگر متفاوت بوده، همچنین مقاومت ویژه الکتریکی آنها با سنگ‌های زیرین که عموماً از مارن، کنگلومرا و یا سایر سازندهای سخت بوده، متفاوت است. بنابراین روش مناسب ژئوفیزیکی که در مطالعات سازندهای نرم پیشنهاد می‌شود، روش مقاومت ویژه است. وجود آب در خلل و فرج این‌گونه رسوبات، باعث کاهش مقاومت ویژه الکتریکی آنها می‌شود؛ به‌خصوص اگر آب موجود در بین ذرات، دارای املاح شیمیایی زیادی باشد، مقدار مقاومت ویژه تا حد زیادی پایین آمده و تقریباً معادل مارن و رس می‌شود. در این صورت، تفکیک آبخوان از سنگ کف به کمک روش الکتریکی میسر نیست.

همچنین در بعضی از مناطق، برای حل مسائل خاص می‌توان از روش الکترومیتیک نیز استفاده کرد. ضمناً در صورتی که در بین و یا در زیر رسوبات متخلخل، سازندهای سخت مانند ماسه سنگ یا لایه‌های آهکی وجود داشته باشد، برای تفکیک این لایه‌ها می‌توان روش لرزه‌ای را نیز به کار برد.

محل پروفیل‌ها و سونداژها، با توجه به مشخصات منطقه و مسائل موجود، باید به ترتیبی انتخاب شود که از مطالعات مذکور حداکثر بهره ممکن به‌دست آید.

۸-۲ روش‌های مناسب در سازندهای سخت

در مطالعات آبهای زیرزمینی در سازندهای سخت، دلایل بررسی‌های ژئوفیزیکی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- مشخص کردن موقعیت، گستردگی و به‌طور خلاصه شکل هندسی واحد سنگی مورد نظر در منطقه مورد مطالعه،
- ممکن است قسمتی از واحد سنگی مورد نظر، دارای تخلخل بیشتری باشد که این منطقه، نسبت به بقیه سنگ دارای امکانات آبی بیشتری بوده و هدف، مشخص کردن موقعیت گسترش آن است.

- عموماً قسمتهایی از واحد سنگی در اثر نیروهای تکتونیکی یا فرسایشی، شکسته شده و در آنها حفره‌هایی ایجاد می‌شود. تعیین این مناطق که دارای امکانات آبی بهتر بوده، هدف بررسی‌های ژئوفیزیکی است.
- با توجه به توضیح بالا، در ابتدای مطالعات، باید سازندی را که در منطقه مورد نظر، سنگ مخزن آب بوده، به کمک بررسی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی تعیین کرد، سپس به کمک بررسی‌های اکتشافی شکل هندسی مخزن و محل‌هایی از آن را که دارای امکانات آبی بهتر می‌باشد، باید مشخص کرد.
- اصولاً خاصیت مغناطیسی سنگ‌های آذرین و دگرگونی، نسبت به سایر سنگ‌ها بیشتر است، در حالی که سنگ‌های رسوبی بدون خاصیت مغناطیسی هستند. بنابراین در مناطقی که این دو واحد سنگی در مجاورت یکدیگر بوده و یکی از آنها سنگ مخزن آب است، می‌توان از روش مغناطیسی استفاده کرد. مثلاً اگر بازالت سنگ مخزن باشد، روش مغناطیسی نتایج خوبی می‌دهد.
- یکی از مخازن عمده آب زیرزمینی، سازندهای کارستی بوده که با فرسایش آهک‌ها و دولومیت ایجاد می‌شود. آهک‌ها در حالت طبیعی دارای تخلخل هستند. مشخصات فیزیکی سنگ آهکی با تخلخل حدود ۱۰ درصد عبارتست از :
 - وزن مخصوص حدود ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب،
 - مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۶۰۰ اهم‌متر، و
 - سرعت انتشار امواج لرزه‌ای حدود ۵ کیلومتر بر ثانیه.
 اگر تخلخل این آهک در اثر شکستگی فرسایش به حدود ۲۰ درصد برسد. مشخصات فیزیکی آن به صورت زیر تغییر می‌کند:
 - وزن مخصوص حدود ۲/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب،
 - مقاومت ویژه الکتریکی ۱۲۰ اهم‌متر، و
 - سرعت انتشار امواج لرزه‌ای حدود ۴ کیلومتر بر ثانیه.
- امکانات آبی آهک خرد شده و کارستی، نسبت به آهک توده‌ای بیشتر است. برای تفکیک مناطق شکسته شده و کارستی یک واحد آهکی، می‌توان از روش‌های ثقل‌سنجی مقاومت ویژه و لرزه‌ای استفاده کرد. البته به‌طوری‌که ملاحظه شد، تغییرات مقاومت ویژه آهک در اثر پدیده کارستی، بیشتر از تغییرات وزن مخصوص و سرعت انتشار امواج لرزه‌ای بوده و به یک پنجم کاهش می‌یابد. بنابراین روش الکتریکی در مطالعات منابع آب کارستی بیشتر کاربرد دارد. به‌طور کلی، از روش مقاومت ویژه در سازندهای کارستی، می‌توان برای رسیدن به اهداف زیر استفاده کرد:
 - تعیین عمق آهک کارستی،
 - تفکیک آهک کارستی و آهک توده‌ای،
 - تعیین منطقه دارای بیشترین تخلخل، و
 - تعیین جهت کارستی شدگی.
- ضمناً روش‌های ژئوالکتریک و ثقل‌سنجی و در بعضی موارد، روش حرارتی، تنها روش‌های ژئوفیزیکی مناسب برای تعیین موقعیت معابر اصلی جریان در غارها و رودخانه‌های زیرزمینی است.
- وزن مخصوص آهک‌های با کانال‌ها و فضاهای خالی، حتی به حدود ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌رسد؛ بنابراین در این‌گونه مناطق، می‌توان از روش ریز ثقل‌سنجی نیز استفاده کرد.

۹- انجام مطالعات ژئوفیزیکی

در یک منطقه، انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی، به اقدامات مختلفی نیاز داشته که به ترتیب توضیح داده می‌شود.

۹-۱ جمع‌آوری دانسته‌ها و نقشه‌های مورد نیاز

قبل از انجام عملیات صحرایی، باید مدارک و دانسته‌های زیر جمع‌آوری شود :

- نتایج مطالعات زمین‌شناسی منطقه، به‌خصوص هیدروژئولوژی و نقشه‌های مربوط،
- نتایج مطالعات آبهای زیرزمینی،
- نتایج مطالعات ژئوفیزیکی قبلی،
- نتایج کلیه حفاری‌های انجام شده در منطقه،
- نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس مناسب (حداقل مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰)،
- مقاطع زمین‌شناسی چاه‌ها و برش‌های زمین‌شناسی موجود،
- نقشه عمق آب زیرزمینی ،
- نقشه‌های نشان‌دهنده کیفیت آب زیرزمینی از قبیل هدایت الکتریکی، کلر، باقی‌مانده خشک و غیره، و
- سایر دانسته‌های موجود که به شناسایی منبع آب زیرزمینی کمک می‌کند.

۹-۲ بررسی مدارک جمع‌آوری شده

پس از جمع‌آوری مدارک گفته شده، باید کلیه آنها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و بر اساس آن اطلاعات عمومی زیر تهیه شود:

- تعیین سازند سنگ مخزن آب زیرزمینی،
- تعیین سازندهای سنگ کف احتمالی،
- برآورد تعداد لایه‌های آبدار منطقه،
- برآورد کیفیت آب لایه‌های مختلف در محل‌های متفاوت،
- برآورد امکانات آبدی مخزن آب در نقاط گوناگون،
- برآورد زمین‌شناسی ساختمانی منطقه،
- تعیین موانعی که محدودیت‌هایی را در اجرای روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در منطقه به وجود می‌آورد،
- برآورد محل‌های تغذیه و تخلیه منبع، و
- تعیین سازندهایی که دارای پتانسیل کارستی هستند.

در صورتی که نقشه‌های هم‌عمق و کیفیت آب زیرزمینی وجود نداشته باشد، باید آنها را تهیه کرد.

در پایان این بررسی‌ها، باید هدف از بررسی‌های ژئوفیزیکی و مسائل زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی موجود که مطالعات ژئوفیزیکی را ایجاب می‌کرده، مشخص شود.

۳-۹ انتخاب روش ژئوفیزیکی

ناشناخته‌ها و مسائل موجودی که باید به کمک ژئوفیزیک مورد بررسی قرار گیرد، توسط مسئول پروژه مشخص شده است. مسئول مطالعات ژئوفیزیکی پروژه، باید بر اساس اطلاعات و آمار جمع‌آوری شده، مسائل موجود را بررسی کرده، مناسب‌ترین روش ژئوفیزیکی را با توجه به شرایط طبیعی و محلی انتخاب کند، و سپس بر اساس ناشناخته‌های موجود، عمق مورد بررسی، امکانات روش ژئوفیزیکی انتخابی و غیره، خطوط برداشت و نقاط برداشت را تعیین کند. پس از این مراحل، باید برنامه انجام مطالعات و برنامه زمانی آن را تهیه و به مسئول پروژه پیشنهاد کند تا مسئول پروژه پس از بررسی، در صورت تأیید برای اجرا ابلاغ نماید.

۴-۹ نقشه پایه مطالعات

نقشه پایه مطالعات ژئوفیزیکی، همان نقشه زمین‌شناسی آب منطقه است. در صورتی که در زمان انجام بررسی‌ها، نقشه زمین‌شناسی آب منطقه، حتی به‌طور مقدماتی تهیه نشده باشد، می‌توان از نقشه توپوگرافی منطقه حداقل با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ که روی آن اطلاعات زمین‌شناسی آمده است، استفاده کرد. البته در نهایت، اطلاعات ژئوفیزیکی باید روی نقشه هیدروژئولوژی آورده شود.

۵-۹ عملیات صحرائی

همان‌طور که گفته شد، محل خطوط برداشت ایستگاه‌ها و گمانه‌ها، روی نقشه منطقه مشخص شده است. محل این نقاط باید با دقت کافی روی زمین پیاده شود. در صورتی که برای این کار شواهد و نشانه‌های کافی وجود نداشته باشد، باید این کار به وسیله نقشه‌برداری صورت گیرد. اگر موقعیت محل بعضی از ایستگاه‌ها با خطوط برداشت برای انجام عملیات صحرائی مناسب نبود، باید در مجاورت نقطه مذکور محلی انتخاب شده و نقشه موقعیت محل‌ها نیز تصحیح شود. در خاتمه لازم است که موقعیت نقاط اندازه‌گیری دقیقاً روی عکس‌های هوایی یا نقشه‌های مربوط پیاده شده و کلیه ارتفاع و مختصات هر ایستگاه با G.P.S تعیین شود.

۶-۹ تجهیزات و کادر فنی مورد نیاز و دقت‌های لازم

تجهیزات و کادر فنی مورد نیاز ژئوفیزیک سطحی برای روش‌های مختلف به شرح زیر است:

۱-۶-۹ تجهیزات و کادر فنی در روش ثقل‌سنجی

۱-۱-۶-۹ کادر فنی صحرائی

کادر فنی مورد نیاز عملیات ژئوفیزیک به روش ثقل‌سنجی، شامل یک نفر کارشناس ژئوفیزیک، یک نفر کمک مهندس با تجربه کافی در کاربرد دستگاه‌های ثقل‌سنجی (به منظور انجام اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه‌های مختلف) و یک نفر کمک تکنسین یا کارگر با تجربه (مسئول اندازه‌گیری در ایستگاه ثابت) است. در صورتی که تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری افزایش یابد، لازم است به همان میزان تعداد تکنسین‌ها زیاده‌تر شود.

۹-۶-۱-۲ وسایل اندازه‌گیری

وسایل اندازه‌گیری در روش ثقل‌سنجی، توسط شرکت‌های مختلف و به شکل‌های گوناگون ساخته شده است. معمولاً این دستگاه‌ها مقدار تغییرات جاذبه (g) را توسط عقربه‌ای که روی صفحه مدرجی حرکت می‌کند، نشان می‌دهند. به‌طور کلی، وسایل اندازه‌گیری مقدار g یا Δg را می‌توان آونگ قابل حمل، ترازوی پیچشی، گرانی‌سنج‌های پایدار و گرانی‌سنج‌های نوع ناپایدار دانست.

۹-۶-۱-۳ دقت دستگاه‌های ثقل‌سنجی

دستگاه‌هایی که برای بررسی‌های ثقل‌سنجی به کار می‌رود، باید تا حدود ۵۰۰۰ میلی‌گال را با دقت حداقل ۰/۰۱ میلی‌گال اندازه‌گیری کند.

۹-۶-۱-۴ پیاده کردن نقاط اندازه‌گیری در روش ثقل‌سنجی

یکی از مهم‌ترین تصحیح‌هایی که روی اندازه‌گیری‌های ثقل‌سنجی انجام می‌شود، مربوط به توپوگرافی محل ایستگاه و موقعیت آن نسبت به مبدا است. بنابراین باید محل ایستگاه‌ها به کمک نقشه‌برداری به‌طور دقیق مشخص شود. از این‌رو، در عملیات صحرایی باید برای تعیین محل و ارتفاع ایستگاه‌ها از یک گروه نقشه‌بردار کمک گرفته شود. دقت تعیین ارتفاع محل‌ها باید حداقل تا حدود چند سانتی‌متر باشد. ضمناً لازم است محل ایستگاه‌ها روی نقشه پایه مطالعات و با مقیاس مناسب به‌طور دقیق پیاده شود.

۹-۶-۱-۵ نکات قابل توجه در روش ثقل‌سنجی

در عملیات صحرایی، باید نکات زیر مورد توجه قرار گیرد:

- برای جلوگیری از ضربه خوردن و لرزش دستگاه‌های ثقل‌سنجی باید در حمل آنها دقت کافی مبذول شود. به این جهت، پیشنهاد می‌شود که دستگاه، همیشه توسط شخص، حمل شده و در مسافت‌های طولانی آن را در کف وسیله‌نقلیه قرار ندهند بلکه توسط شخص مواظبت شده و حتی روی پا نگه‌داشته شود.
- در روش ثقل‌سنجی، لازم است حداقل یک ایستگاه ثابت نیز در نظر گرفته شود تا در زمان انجام عملیات صحرایی، اندازه‌گیری در این ایستگاه نیز به‌طور مرتب صورت گیرد.
- تراز کردن دستگاه، مهم‌ترین قسمت اندازه‌گیری بوده که باید با دقت کافی انجام شود.
- چون وسایل آهنی، روی دستگاه‌های اندازه‌گیری تأثیر دارد، باید لباس و ابزار مسئول اندازه‌گیری حاوی قطعات آهنی مانند دکمه، کفش با میخ آهنی، کمربند آهن‌دار و غیره نباشد. در ضمن خودنویس و خط‌کش آهنی مورد استفاده قرار نگیرد.
- از پارک وسیله‌نقلیه در مجاورت ایستگاه اندازه‌گیری خودداری شود.

- محل ایستگاه‌ها با توجه به خطوط راه‌آهن، لوله‌های زیرزمینی و کلیه وسایلی که روی میدان ثقل تأثیر داشته به ترتیبی انتخاب شود که این اثر به حداقل برسد.
- محل ایستگاه‌های نقشه‌برداری، با میخ‌های چوبی و نوارهای پلاستیکی کاملاً مشخص شود.

۹-۶-۲ تجهیزات و کادرفنی روش مغناطیسی

۹-۶-۲-۱ کادرفنی عملیات مغناطیسی

گروه صحرایی مسئول انجام عملیات مغناطیسی، شامل یک نفر کارشناس ژئوفیزیک با تجربه کافی در این رشته، دو نفر تکنسین و چهار نفر کارگر می‌باشد. در برداشت‌های هوایی، کادرفنی پرواز به افراد مورد نیاز انجام اندازه‌گیری در ایستگاه‌های ثابت اضافه می‌شوند.

۹-۶-۲-۲ دقت وسایل اندازه‌گیری

دقت وسایل اندازه‌گیری در این روش باید حدود ۰/۱ گاما باشد.

۹-۶-۲-۳ پیاده کردن نقاط و مقاطع

مقاطع و نقاط اندازه‌گیری باید روی نقشه پایه مطالعات، با دقت کافی پیاده شود و در محل‌هایی که عوارض زمینی کافی وجود دارد، می‌توان از عکس‌های هوایی استفاده کرد، در غیر این صورت این کار باید به کمک نقشه‌برداری صورت گیرد. در عملیات هوایی، باید ارتفاع پرواز به وسیله ارتفاع‌سنج اندازه‌گیری و یادداشت شود. ضمناً باید یک ایستگاه مبنا روی زمین انتخاب کرده، اندازه‌گیری‌های مربوط در آن انجام شود تا بتوان تصحیح‌های لازم را اعمال کرد.

۹-۶-۲-۴ نکات قابل توجه در روش مغناطیسی

در زمان انجام اندازه‌گیری‌های مغناطیسی، باید به نکات زیر توجه شود:

- چون میدان مغناطیسی زمین در زمان، تغییر می‌کند، باید علاوه بر انجام اندازه‌گیری‌ها در ایستگاه‌های موردنظر، یک ایستگاه ثابت نیز انتخاب شده و در آن به فواصل زمانی حداکثر ۱ ساعت میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شود. به کمک ارقام به‌دست آمده در ایستگاه ثابت، می‌توان منحنی تغییرات میدان مغناطیسی در طول زمان را رسم و اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه‌ها را تصحیح کرد.
- زمان انجام اندازه‌گیری در هر ایستگاه نیز باید یادداشت شود.
- ایستگاه اندازه‌گیری باید دور از خطوط راه‌آهن، مسیر لوله‌ها، کابل‌های برق، نرده‌های فلزی، ساختمان‌های فلزی، ماشین‌آلات و به‌طور کلی اجسام آهنی انتخاب شود.

- مسئول اندازه‌گیری نباید همراه خود ابزار آهنی یا وسایلی که در آنها آهن به کار رفته (مانند خودنویس، چکش، چاقو، عینک، کمر بند، قطب‌نما و ...) داشته باشد.
- چون در اندازه‌گیری‌ها ارتفاع تأثیر دارد، باید ارتفاع نقاط اندازه‌گیری مشخص شود. به این منظور می‌توان از G.P.S استفاده کرد.

۹-۶-۳ تجهیزات و کادرفنی روش حرارتی

۹-۶-۳-۱ کادرفنی روش حرارتی

در این روش، به یک کارشناس ژئوفیزیک و برای هر دستگاه به یک نفر تکنسین مسئول انجام اندازه‌گیری‌ها نیاز است.

۹-۶-۳-۲ دقت وسایل اندازه‌گیری

دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری درجه حرارت، باید حداقل حدود $0/1$ درجه سانتی‌گراد باشد.

۹-۶-۳-۳ پیاده کردن نقاط و مقاطع

محل انجام اندازه‌گیری‌ها باید روی نقشه پایه مطالعات که دارای مقیاس مناسبی بوده با دقت کافی پیاده شود.

۹-۶-۴ تجهیزات و کادرفنی روش الکترو مغناطیسی

۹-۶-۴-۱ کادرفنی روش الکترو مغناطیسی

کادرفنی مورد نیاز روش الکترومغناطیسی بر حسب نوع مطالعات، شامل یک نفر کارشناس ژئوفیزیک با تجربه و حداقل دو نفر تکنسین و کارگر می‌شود. در برداشت‌های هوایی، به کادرفنی مورد نیاز برای اندازه‌گیری در ایستگاه‌های ثابت، کادر پرواز اضافه می‌شود.

۹-۶-۴-۲ وسایل اندازه‌گیری الکترو مغناطیسی

با توجه به نوع برداشت‌های الکترومغناطیسی، وسایل مختلفی به کار می‌رود. یعنی برای هر مسئله خاص باید نوع دستگاه و آرایش مربوط، به شکلی انتخاب شود تا بهترین نتیجه به دست آید.

۹-۶-۴-۳ پیاده کردن خطوط و نقاط برداشت

در برداشت‌های الکترومغناطیسی زمینی، باید موقعیت ایستگاه‌ها تعیین و توسط پرچم یا پرهای سیمانی روی زمین مشخص شود. همچنین لازم است موقعیت محل این ایستگاه‌ها، روی نقشه‌های پایه با مقیاس $1:20,000$ تا $1:50,000$ تعیین شود.

۹-۶-۵ تجهیزات و کادر فنی روش مقاومت ویژه

۹-۶-۵-۱ کادر فنی روش مقاومت ویژه

کادر فنی مورد نیاز در این روش عبارت است از :

- کارشناس ژئوفیزیک با تجربه حداقل ۵ سال در مطالعات به روش مقاومت ویژه ،
- یک نفر کمک مهندس با آشنایی کامل نسبت به دستگاه‌های اندازه‌گیری مربوط و حداقل دو سال تجربه در این کار، و
- بین سه تا پنج نفر کارگر (با توجه به فاصله الکترودهای فرستنده، جریان).

۹-۶-۵-۲ وسایل مورد نیاز روش مقاومت ویژه

در این روش، وسایل زیر مورد نیاز است:

- یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی قابل حمل،
- دو دستگاه تقویت کننده جریان برای فواصل نزدیک و دور،
- کابل‌ها با توجه به نیاز الکترودهای مناسب و اتصالات مربوط،
- دستگاه مولد جریان الکتریک AC یا DC و دستگاه شارژ باتری،
- ارتفاع‌سنج، قطب‌نمای زمین‌شناسی و متر بلند، و
- دفترچه یادداشت و سایر لوازم مورد نیاز از قبیل استروسکوپ جیبی، خط‌کش، ماشین حساب و غیره.

۹-۶-۵-۳ قدرت و دقت دستگاه‌های روش مقاومت ویژه

در بررسی منابع آب زیرزمینی، حداکثر عمق مورد مطالعه عموماً حدود ۴۰۰ متر است. بنابراین دستگاه‌هایی که می‌تواند با $AB = 2000$ عمق تقریبی حدود ۴۰۰ متر را اندازه‌گیری کند، کافی خواهد بود. دستگاه‌های تقویت‌کننده جریان باید دارای حدود ۱ تا ۱/۵ کیلو وات قدرت بوده و بتواند ۴۰۰ ولت اختلاف پتانسیل را با جریان بین ۲/۵ تا ۵ آمپر تولید کند. دستگاه‌های اندازه‌گیری افت پتانسیل باید دارای دقت تا چند صدم میلی ولت (معمولاً ۰/۰۵ میلی ولت یا کمتر از ۵٪ خطا) برای فواصل $AB = 2000$ متر باشد.

۹-۶-۵-۴ پیاده کردن نقاط

محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری باید دقیقاً روی نقشه‌های پایه مطالعات پیاده شود. در محل‌هایی که عوارض طبیعی زمین کافی بوده، می‌توان این کار را به کمک عکس‌های هوایی انجام داد، در غیر این صورت باید از روش G.P.S نقشه‌برداری استفاده شود. برای مشخص کردن محل اندازه‌گیری‌ها می‌توان از پرهای (نشانه‌های) سیمانی که شماره گمانه الکتریکی روی آنها نوشته شده، کمک گرفت. برای تعیین محل نقاط در زمین می‌توان از متر، زنجیر با طول مشخص، قطب‌نما، G.P.S و ... یا نقشه‌برداری استفاده کرد.

۹-۶-۵ نکات قابل توجه در روش مقاومت ویژه

در انجام گمانه‌های الکتریکی، باید نکات زیر مورد توجه قرار گیرد:

- محل اتصال به زمین دقیقاً در وسط فاصله بین الکترودهای فرستنده جریان AB قرار گیرد، به‌طوری که در هر اندازه‌گیری، آرایش دو طرف نسبت به این نقطه قرینه باشد.
 - کابل‌های فرستنده جریان AB و سیم‌های اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل، یکدیگر را قطع نکرده و حداقل در فاصله ۱ متری و به‌طور موازی با یکدیگر قرار گیرند.
 - کابل‌های قرقره‌ها در دو جهت مخالف همدیگر پیچیده شده باشد تا در صورتی که در مسیر میدان مغناطیسی زمین قرار گرفت، جریان القایی به وجود آمده در دو سیم، به یک اندازه و در دو جهت مخالف هم باشند.
 - طول کابل‌های قرقره‌های A و B به یک اندازه باشد.
 - الکترودهای A و B و همچنین M و N دو به دو از یک جنس مشابه و متحدالشکل باشد.
 - روپوش کابل‌ها کاملاً سالم بوده تا از بروز اتصالی به زمین، به خصوص در مناطق مرطوب جلوگیری به عمل آید.
 - دستگاه اندازه‌گیری روی سه پایه یا میز چوبی و با فاصله از زمین قرار گیرد.
 - در اطراف مرکز اندازه‌گیری (نقطه O)، غیر از دستگاه اندازه‌گیری هیچ نوع وسیله سیمی، فلزی، اتومبیل و غیره نباشد.
 - در شعاع ۱۰ متری از مرکز اندازه‌گیری، جز تکنسین مسئول اندازه‌گیری و یک کارگر، هیچ فرد یا وسیله‌ای وجود نداشته باشد.
 - خطوط OA و OB روی یک خط کاملاً مستقیم قرار گیرند.
 - برای فواصل AB کوتاه، از تولید جریان زیاد پرهیز و از تقویت کننده جریان استفاده شود.
 - در هر اندازه‌گیری، فاصله OM و ON از نظر مساوی بودن کنترل شود.
 - در فواصل زمانی بین اندازه‌گیری‌ها حتماً دستگاه خاموش شود.
 - در تابستان، دستگاه در آفتاب نگهداری نشده و سعی شود درجه حرارتی که دستگاه در آن کار می‌کند از ۲۰- تا ۵۰+ درجه سانتی‌گراد بیشتر نباشد.
 - اندازه‌گیری‌های مشکوک دو تا سه مرتبه کنترل شود.
- به‌طور کلی روش استفاده از هر دستگاه باید طبق جزوه راهنمای آن بوده تا نتایج حاصل، دارای دقت کافی باشد.

۹-۶-۶ تجهیزات و کادرفنی روش لرزه‌ای

۹-۶-۶-۱ کادرفنی روش لرزه‌ای

در روش لرزه‌ای به یک نفر کارشناس لرزه‌نگار، یک نفر تکنسین مسئول اندازه‌گیری و یک نفر تکنسین برای تعیین محل خطوط مبنا، موقعیت محل استقرار ژئوفون‌ها و محل نقاط انفجار نیاز است.

۹-۶-۲ پیاده کردن نقاط انفجار و خطوط برداشت

چون در بررسی نتایج کار به دانستن فاصله دقیق بین نقاط نیاز است، باید محل انفجار و محل‌های استقرار ژئوفون‌ها به کمک یک گروه نقشه‌برداری مشخص شود. ضمناً همان گروه، به کمک ترازیابی، ارتفاع نقاط مذکور را تعیین می‌کند. بر روی نقشه‌های با مقیاس ۱:۱۰,۰۰۰ تا ۱:۲۰,۰۰۰ خطوط برداشت، نقاط انفجار کاملاً پیاده شود. به منظور دقت بیشتر می‌توان محل نصب ژئوفون‌ها را نیز در این نقشه مشخص کرد.

۹-۶-۳ نکات قابل توجه در روش لرزه‌ای

در روش لرزه‌ای، باید به نکات زیر توجه شود:

- استقرار ژئوفون‌ها و دینامیت‌گذاری توسط مسئول انفجار صورت گیرد.
- قبل از انفجار باید کلیه لرزه‌سنج‌ها کنترل شده و از اتصال و همچنین واکنش آنها در مقابل لرزش اطمینان حاصل کرد.
- در زمان انفجار، از ایجاد ضربه و حتی راه رفتن در طول پروفیل خودداری شود.
- قبل از انفجار، باید توسط بلندگو یا وسیله دیگر، افراد را از نقطه انفجار دور کرد.
- قبیل از انفجار، عمق چاه یا چاهک‌ها و میزان مواد منفجره کاملاً کنترل شود.
- ژئوفون‌ها قبل از نتیجه‌گیری و رضایت از منحنی‌های به‌دست آمده، تغییر مکان داده نشوند.
- طول خط مبنا سه تا چهار برابر عمق سنگ کف در نظر گرفته شود.
- در روش شکست مرزی ژئوفون‌ها در طول یک پروفیل به ترتیبی تغییر محل داده شود که حداقل دو ژئوفون با خط مبنا قبلی مشترک بوده و پوشش داشته باشد.

۱۰- پردازش اطلاعات ژئوفیزیکی

نتایج به دست آمده از اندازه گیری های صحرایی، باید بر اساس اطلاعات و آمار موجود و به کمک منحنی های استاندارد مربوط تعبیر و تفسیر شود. در پردازش داده های جمع آوری شده، باید از کلیه اطلاعات موجود استفاده کامل به عمل آید. بدین معنی که نتایج به دست آمده از بررسی های ژئوفیزیکی، با دانسته های زمین شناسی و هیدروژئولوژیکی تلفیق شده و به کمک آن شکل هندسی مخزن در نقاط مختلف تعیین شود. ضمناً پاسخ مسائل و ناشناخته های موجود، در حد امکان داده شود. در مطالعات ژئوفیزیکی باید روی نقشه های منطقه، کلیه اطلاعات مربوط به محل ایستگاه خطوط برداشت و اندازه گیری ها مشخص شود. ضمناً کلیه علایم و مشخصات به کار رفته در این نقشه باید طبق نشریه علامت ها و مشخصه های نقشه های ژئوفیزیکی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور باشد.

برش های ژئوفیزیکی که نتایج حاصل از اندازه گیری ها را نشان می دهد، دارای مقیاس افقی معادل مقیاس نقشه مورد استفاده و مقیاس قائم حداکثر تا ده برابر مقیاس افقی است. ضمناً موقعیت محل این برش ها باید روی نقشه منطقه مشخص شود. در نقشه ها، مقاطع و نمودارهای ژئوفیزیکی، باید ارقام به دست آمده اندازه گیری یا محاسبه شده، در زیر محل ایستگاه نوشته شود.

۱۰-۱ پردازش اطلاعات مربوط به روش ثقل سنجی

۱۰-۱-۱ نقشه موقعیت برداشت های ثقل سنجی

نقشه پایه مورد استفاده در روش ثقل سنجی، همان نقشه توپوگرافی منطقه با کلیه عوارض و خطوط تراز مربوط است. چون یکی از تصحیح های عمده ای که در پردازش داده های این روش انجام می شود، تصحیح توپوگرافی است، به این جهت نقشه توپوگرافی مورد استفاده باید از نظر نشان دادن عوارض پستی و بلندی های زمین دارای دقت کافی باشد.

۱۰-۱-۲ نقشه بی هنجاری بوگه^۱

پس از انجام اندازه گیری های صحرایی، تصحیح های مختلفی مانند تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح توپوگرافی و تصحیح بوگه روی آن صورت گرفته و مقدار بی هنجاری بوگه در هر ایستگاه محاسبه می شود. این مقادیر روی نقشه منطقه منتقل و سپس منحنی های تراز مربوط رسم می شود. فواصل منحنی های تراز با توجه به تغییرات بی هنجاری موجود انتخاب شده که بین ۰/۲ تا ۵ میلی گال است.

1 - Bouguer Anomaly Map

۱۰-۱-۳ نقشه بی‌هنجاری بازماند^۱

نقشه‌های بی‌هنجاری منطقه‌ای توسط سازمان‌های مسئول برای تمام قسمت‌های مختلف مملکت تهیه شده است. پس از تهیه نقشه تراز بی‌هنجاری بوگه، می‌توان نقشه بی‌هنجاری بازماند را با استفاده از رابطه زیر به‌دست آورد:

بی‌هنجاری منطقه‌ای - بی‌هنجاری بوگه = بی‌هنجاری بازماند

فواصل منحنی‌های تراز در این نقشه، به تغییرات ارقام بی‌هنجاری بازماند به‌دست آمده بستگی داشته و معمولاً حدود ۱ میلی‌گال است. در این نقشه، مقادیر بی‌هنجاری بازماند در صورتی که مثبت باشد با علامت مثبت و در صورت منفی با علامت منفی نشان داده می‌شود.

۱۰-۱-۴ نمودارها

ایستگاه‌هایی که در یک امتداد خط برداشت یا روی یک خط قرار دارند با مقیاس نقشه روی محور X آورده شده و تغییرات g یا Δg مربوط به هر کدام نیز بر حسب میلی‌گال روی محور Y منتقل می‌شود. این نمودار تغییرات g یا Δg را در طول خط مورد نظر نشان می‌دهد. نمودار گفته شده، بر حسب نیاز، برای تغییرات بی‌هنجاری بوگه یا بی‌هنجاری بازماند رسم می‌شود. البته بهتر است نمودار مذکور با برش زمین‌شناسی همان خط در یک محل آورده شود تا مقایسه نتایج راحت‌تر باشد. تفسیر نقشه‌ها و نمودارهای بررسی‌های ثقل‌سنجی به کمک سایر نقشه‌ها و با استفاده از اطلاعات موجود صورت می‌گیرد. ضمناً برای دقت بیشتر، بهتر است که از سازندهای موجود در منطقه نمونه‌برداری شده و وزن مخصوص آنها با دقت اندازه‌گیری شود.

۱۰-۲ پردازش اطلاعات مربوط به روش مغناطیسی

۱۰-۲-۱ نقشه موقعیت برداشت‌های مغناطیسی

موقعیت محل‌های اندازه‌گیری مغناطیسی یا خطوط برداشت مربوط، باید روی نقشه موقعیت منطقه که حاوی اطلاعات زمین‌شناسی است منتقل شود.

۱۰-۲-۲ نقشه مغناطیسی منطقه^۲

روی نقشه، موقعیت نقاط میزان کمی مقادیر اندازه‌گیری شده پیاده می‌شود و خطوط هم‌تراز مغناطیسی که تغییرات میزان مغناطیسی مجموع و یا میزان مربوط به یکی از مؤلفه‌های قائم یا افقی است رسم می‌شود. فواصل منحنی‌ها با توجه به میزان مغناطیسی موجود، انتخاب و معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰ گاما است.

1 - Residual Anomaly Map

2 - Magnetic Map

۱۰-۲-۳ نمودارهای مغناطیسی

با استفاده از ارقام مغناطیسی به دست آمده در امتداد یک خط و با کمک ارقام نقشه تغییرات میزان مغناطیسی، می توان نمودار تغییرات میدان مغناطیسی را بر حسب فاصله نقاط رسم کرد. این نمودار، با برش زمین شناسی در همان محل با هم آورده می شوند.

تفسیر نقشه ها و نمودارهای مغناطیسی با استفاده از کلیه اطلاعات موجود انجام می شود.

۱۰-۳-۳ پردازش اطلاعات مربوط به روش گرمایی

۱۰-۳-۱۰ نقشه موقعیت برداشت های گرمایی

محل های اندازه گیری درجه حرارت، به طور دقیق روی نقشه موقعیت منطقه آورده می شود. روی این نقشه، سایر اطلاعات توپوگرافی و زمین شناسی نیز وجود دارد.

۱۰-۳-۲ نقشه گرادیان حرارتی

مقادیر حرارت اندازه گیری شده روی نقشه موقعیت نقاط آمده و سپس منحنی های هم تراز درجه حرارت برای منطقه رسم می شود. فواصل منحنی ها با توجه به تغییرات درجه حرارت برای نقاط، مختلف و عموماً کمتر از ۲ درجه می باشد. به کمک این نقشه ها می توان بی هنجاری های حرارتی را مشخص کرد.

۱۰-۳-۳ نمودارهای حرارتی

تغییرات درجه حرارت برای نقاطی که روی یک خط قرار داشته را می توان به کمک نقشه موقعیت ایستگاه ها و ارقام اندازه گیری شده رسم کرد. این نمودارها نیز باید با برش زمین شناسی مربوط همراه باشد.

۱۰-۴-۱ پردازش اطلاعات مربوط به روش الکترومغناطیسی

۱۰-۴-۱۰ نقشه موقعیت بررسی های الکترومغناطیسی

روی نقشه توپوگرافی یا هیدروژئولوژی منطقه، موقعیت پروفیل ها یا خطوط برداشت الکترومغناطیسی پیاده می شود. در برداشت های زمینی، ایستگاه های اندازه گیری با شماره هایی مشخص می شوند. در برداشت هوایی، علاوه بر تعیین موقعیت خطوط برداشت، باید ارتفاع پرواز هواپیما، تعداد اندازه گیری ها در زمان، زمان پرواز و غیره ثبت شود.

۱۰-۴-۲ نقشه هم رسانای الکتریکی

با استفاده از نتایج به دست آمده از عملیات صحرایی الکترومغناطیسی، می توان نقشه هم رسانای الکتریکی منطقه را تهیه کرد. نقشه مذکور، گسترش نواحی با قابلیت هدایت های مختلف را در سطح منطقه نشان می دهد. در اینجا برای نمایش بهتر

محل‌های با هدایت الکتریکی یکسان، می‌توان از رنگ و طیف تجزیه نور مرئی استفاده کرد. نقشه هم‌رسانای الکتریکی با نقشه تغییرات مقاومت ویژه ظاهری که از بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش مقاومت ویژه برای اعماق کم به دست می‌آید، قابل مقایسه و بررسی است.

۱۰-۴-۳ نمودارهای الکترومغناطیسی

نمودارهایی که در روش الکترومغناطیسی تهیه می‌شود، معمولاً تغییرات میدان مغناطیسی را بر حسب موقعیت محلی ایستگاه‌ها یا خطوط برداشت نشان می‌دهد. بدین معنی که روی محور Xها محل ایستگاه‌ها یا خطوط برداشت و روی محور Yها مقادیر زاویه شیب آورده می‌شود. در اکثر روش‌های الکترومغناطیسی، زاویه شیب، جهت میدان حاصل از میدان‌های اولیه و ثانویه است، یعنی میزان انحراف سیم‌پیچ دستگاه حول محور افقی که در ایستگاه‌ها ثبت می‌شود. در بعضی موارد، نسبت مؤلفه قائم به مؤلفه افقی یعنی $\frac{h_h}{h_v}$ روی محور Yها می‌آید.

۱۰-۵ پردازش اطلاعات مربوط به مقاومت ویژه

۱۰-۵-۱ نقشه موقعیت گمانه‌های الکتریکی

روی نقشه زمین‌شناسی عمومی یا زمین‌شناسی آب منطقه و با مقیاس مناسب، محل ایستگاه‌ها و گمانه‌های الکتریکی و همچنین خطوط برداشت^۱ منتقل می‌شود. در صورتی که برای مشخص کردن موقعیت دقیق گمانه‌ها روی نقشه عوارض طبیعی کافی وجود نداشته باشد، باید به کمک نقشه‌برداری این عمل انجام شود.

۱۰-۵-۲ نقشه مقاومت ویژه ظاهری^۲

معمولاً در هر منطقه و با فواصل مختلف بین الکترودهای فرستنده جریان (AB)، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری می‌شود. برای هر یک از طول فرستنده‌های جریان (AB)، نقشه موقعیت مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری جداگانه‌ای تهیه می‌شود. به این ترتیب که برای تهیه هر نقشه، ابتدا ارقام مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در کنار نقاط مربوط نوشته و سپس با توجه به زمین‌شناسی منطقه و به کمک روش درون‌یابی^۳ منحنی‌های هم مقاومت ویژه ظاهری رسم می‌شود. چون فواصل اندازه‌گیری‌ها در گمانه‌های الکتریکی با ضریب $\sqrt{2}$ یعنی $1/414$ بوده، بنابراین پیشنهاد می‌شود که فواصل بین منحنی‌های مقاومت ویژه نیز از همین روند پیروی کنند. البته این فواصل باید طوری انتخاب شود تا مسائل مورد بررسی به‌طور برجسته در نقشه ظاهر شود. برای نمایش بهتر نواحی با مقاومت ویژه الکتریکی متفاوت، از مقیاس رنگی که بر اساس طیف نور مرئی یعنی از قرمز تا بنفش است، کمک گرفته می‌شود.

1 - Profiling

2 - Apparent Resistivity Map

3 - Interpolation

۱۰-۵-۳ برش‌های مقاومت ویژه الکتریکی^۱

مجموعه اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌های الکتریکی را که روی یک امتداد معینی قرار دارند، می‌توان به صورت یک برش یا پروفیل نشان داد. ابتدا باید نمودار مربوط به هر گمانه الکتریکی را به کمک منحنی‌های استاندارد تجزیه و تحلیل کرده و مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی افقی‌ها یا لایه‌های مختلف مربوط به هر گمانه را تعیین کرد. سپس کلیه گمانه‌های هر پروفیل روی محورهای مختصاتی که محور طولی آن فاصله نقاط و محور عرضی آن ارتفاع نقاط را نسبت به مبنای مشخصی (دریا) نشان می‌دهد، آورد. مقیاس فاصله نقاط، همان مقیاس نقشه و برای ارتفاع نیز باید مقیاس مناسبی (معمولاً ۲-۵ برابر مقیاس افقی) انتخاب شود. ارتفاع نقاط مختلف با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه و در صورتی که نقشه توپوگرافی وجود نداشت به کمک ترازبایی تعیین می‌شود. پس از انتقال کلیه اطلاعات مربوط به هر گمانه روی برش، لازم است عوارض طبیعی مانند رودخانه، بیرون‌زدگی‌های زمین‌شناسی و غیره، همچنین محل حفاری‌های انجام شده همراه با مقاطع زمین‌شناسی آنها و سایر اطلاعاتی که روی برش مورد نظر واقع بوده و یا در مجاورت آن قرار دارد، در برش آورده شود. سپس ارقام مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی مربوط به گمانه‌ها را بر اساس این اطلاعات به برش‌های زمین‌شناسی تفسیر کرد.

۱۰-۵-۴ نقشه مقاومت عرضی منطقه^۲

به‌طور کلی، مقاومت عرضی یک سازند (RT) را می‌توان مجموع حاصل ضرب‌های ضخامت هر لایه (h_i) در مقاومت حقیقی آن لایه (ρ_i) دانست یعنی:

$$RT = \sum \rho_i \times h_i$$

از طرف دیگر در مطالعات آبهای زیرزمینی، قابلیت انتقال آبخوان (T) عبارتست از مجموع حاصل ضرب‌های ضخامت هر لایه در ضریب آب‌گذری مربوط (K_i) یعنی:

$$T = \sum k_i \times h_i$$

در این دو رابطه، ضخامت لایه مشترک است. ضمناً در لایه‌های اشباع شده، هر چه تخلخل مؤثر و در نتیجه ضریب آب‌گذری آبخوان بیشتر باشد، مقدار مقاومت ویژه آن نیز بزرگ‌تر است. بنابراین، اگر با استفاده از نتایج بررسی‌های ژئوفیزیکی، نقشه مقاومت عرضی آبخوان منطقه تهیه شود، کمک بزرگی به برآورد ضرایب هیدرودینامیکی آن می‌کند.

بنابراین، پس از تعیین مقاومت ویژه حقیقی لایه‌ها در محل هر گمانه و مشخص کردن عمق سنگ کف با استفاده از نقشه تعیین عمق آب زیرزمینی منطقه (اگر چنین نقشه‌ای قبلاً تهیه نشده باشد، باید به کمک آمار سطح آب چاه‌ها و سایر اطلاعات، نقشه مذکور رسم شود) باید ضخامت آبخوان در محل گمانه‌ها تعیین شود و سپس به کمک روابط گفته شده، مقدار RT در محل هر گمانه محاسبه می‌شود. مقاومت ویژه حقیقی لایه‌های مختلف آبخوان علاوه بر تخلخل مفید، به میزان املاح آب موجود در آن بستگی دارد. بدین معنی که هر چه املاح آب آبخوان بیشتر باشد، مقاومت ویژه آن کاهش می‌یابد. در یک منطقه چون میزان املاح آب آبخوان در محل‌های مختلف تغییر می‌کند (معمولاً از محل تغذیه به سمت محل تخلیه افزایش پیدا می‌کند) بنابراین برای برآورد بهتر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، باید اثر شوری آب در مقاومت ویژه حقیقی لایه‌ها را در نقاط مختلف آبخوان از بین برد. به این منظور در هر منطقه، با استفاده از نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی، شوری پایه انتخاب و کلیه

1 - Electrical Cross Section

2 - Transversal Resistivity Map

ارقام مقاومت ویژه حقیقی مربوط به آبخوان در محل هر گمانه را بر اساس نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی و به کمک روش‌های متداول برای حالت فرضی که آب آبخوان آن محل دارای شوری پایه باشد، تصحیح کرده و مقاومت عرضی مربوط محاسبه می‌شود. سپس ارقام به‌دست آمده بر روی نقشه موقعیت محل گمانه‌ها و در کنار هر گمانه منتقل و با روش درونیابی منحنی‌های مقاومت عرضی آبخوان رسم خواهد شد. در اینجا نیز پیشنهاد می‌شود که فواصل منحنی‌ها با ضریب تقریبی $\sqrt{2}$ انتخاب شود. برای نمایش بهتر مناطق با مقاومت عرضی متفاوت که مشخص کننده نواحی دارای ضرایب هیدرودینامیکی مختلف است، می‌توان از مقیاس رنگی استفاده کرده و بر اساس طیف نور مرئی، یعنی به ترتیب از کم تا زیاد، با رنگ‌هایی از قرمز تا بنفش رنگ کرد.

۱۰-۵-۵ نقشه هم‌ضخامت سنگ مخزن یا نقشه تغییرات عمق سنگ کف

همان‌طور که گفته شد، در محل هر گمانه، بر اساس نتایج به‌دست آمده و به کمک اطلاعات زمین‌شناسی و مقاطع حفاری‌های موجود، می‌توان عمق سنگ کف و در نتیجه ضخامت سنگ مخزن آب را تعیین کرد؛ البته در پاره‌ای از مناطق، مقاومت ویژه سنگ با لایه‌های آبدار تقریباً مساوی بوده و تفکیک آنها میسر نیست. اگر ضخامت سنگ مخزن را که در محل‌های مختلف یک منطقه به‌دست آمده، روی نقشه موقعیت محل گمانه‌ها و در کنار گمانه مربوط منتقل شود، می‌توان به کمک این ارقام، نقشه تغییرات عمق سنگ کف یا نقشه هم‌ضخامت سنگ مخزن را رسم کرد. این نقشه، وضعیت توپوگرافی سنگ کف را نشان می‌دهد.

۱۰-۵-۶ نمودارهای الکتریکی

اگر در بررسی‌های ژئوفیزیکی منطقه، از روش خطوط برداشت استفاده شده باشد، می‌توان نتایج آن را به صورت برش‌های زمین‌شناسی نشان داد. در این برش‌ها، محور افقی، فاصله بین گمانه‌ها با مقیاس نقشه‌های مربوط و محور عمودی ارتفاع ایستگاه‌ها است. مقادیر مقاومت ویژه حقیقی لایه‌ها نیز در محل‌های مربوط می‌آید. این نمودار، محل گسل‌ها یا تغییرات ناگهانی عمق سنگ کف را در امتداد خطوط برداشت مشخص می‌کند.

۱۰-۵-۷ نمودارهای C.R.P

نمایش مقاطع C.R.P ، گسل‌ها و شکستگی‌ها توسط این نمودارها صورت می‌پذیرد.

۱۰-۵-۸ نمودارهای قطبی

از این نمودارها، برای بررسی جهت کارست و بیشترین انیزوتروپی (انیزوتروپی ماکزیمم) استفاده می‌شود.

۱۰-۶ پردازش اطلاعات مربوط به روش لرزه‌ای

۱۰-۶-۱ نقشه موقعیت برداشت‌های لرزه‌ای

در روش لرزه‌نگاری، چون بررسی‌های صحرایی روی خطوط برداشت مختلف که هر کدام شامل محل‌های نقاط انفجار و استقرار لرزه‌سنج‌ها است، صورت می‌گیرد، باید موقعیت خطوط برداشت روی نقشه زمین‌شناسی با مقیاس مناسب منطقه آورده شود. ضمناً چون برای تفسیر داده‌های لرزه‌نگاری به اختلاف ارتفاع محل‌های انفجار و نقاط استقرار لرزه‌سنج‌ها نیاز است، بنابراین ارتفاع مذکور که به کمک نقشه‌برداری به‌دست آمده روی نقشه می‌آید. همچنین اگر مقیاس نقشه کافی باشد، باید موقعیت محل استقرار ژئوفون‌ها نیز روی نقشه مشخص می‌شود.

۱۰-۶-۲ نقشه هم‌عمق سنگ کف

در بررسی‌هایی که منطقه مورد مطالعه توسط خطوط برداشت لرزه‌ای به‌طور کامل پوشش داده شده (فواصل بین خطوط برداشت نسبتاً کم باشد) می‌توان وضعیت توپوگرافی سنگ کف آبخوان را به کمک نقشه‌های هم‌عمق سنگ کف نشان داد. به این منظور، باید ابتدا عمق سنگ کف در نقاط مختلف خطوط برداشت که از بررسی‌ها به‌دست آمده، روی نقشه موقعیت و در کنار نقاط مربوط نوشته شود، سپس به کمک روش درون‌یابی و با در نظر گرفتن زمین‌شناسی ساختمانی منطقه، منحنی‌های هم‌عمق سنگ کف را رسم کرد.

در بررسی‌هایی که فواصل خطوط برداشت نسبتاً زیاد باشد، چنین نقشه‌هایی از دقت کافی برخوردار نخواهد بود، بنابراین نتایج به صورت برش‌های لرزه‌ای ارائه می‌شود.

۱۰-۶-۳ نمودارهای لرزه‌ای

عموماً نتایج بررسی‌های لرزه‌ای، به کمک برش‌هایی که در امتداد خطوط برداشت قرار گرفته، نشان داده می‌شود. برای نتیجه‌گیری از بررسی‌های لرزه‌ای، باید موقعیت و ارتفاع کلیه نقاط خطوط برداشت شامل محل‌های انفجار و لرزه‌سنج مشخص شود. پس، مقیاس برش‌های لرزه‌ای را در همه‌جا نمی‌توان معادل مقیاس نقشه موقعیت انتخاب کرد. معمولاً مقیاس طولی برش‌های لرزه‌ای ۲۰۰۰ : ۱ تا ۱۰،۰۰۰ : ۱ و مقیاس عمودی آن تا ده برابر بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود. روی برش‌های لرزه‌نگاری نیز مانند سایر برش‌های ژئوفیزیکی کلیه اطلاعات موجود زمین‌شناسی مانند مقاطع حفاری‌ها، بیرون‌زدگی‌ها و عوارض توپوگرافی نیز آورده می‌شود. همچنین اگر به کمک سایر روش‌های ژئوفیزیکی برای محل مورد نظر اطلاعاتی موجود باشد، روی برش‌های لرزه‌ای مشخص خواهد شد. طبقه هواخورده^۱ سطحی که سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در آن ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر بر ثانیه بوده و ضخامت آن از چند متر تا چند ده متر و در نقاط مختلف تغییر می‌کند، در نتیجه‌گیری‌های بررسی لرزه‌ای دارای اهمیت ویژه‌ای است. بنابراین روی برش‌های لرزه‌ای، ضخامت طبقه مذکور نشان داده خواهد شد.

۱۱- نمایش نتایج مطالعات ژئوفیزیکی

پس از انجام تعبیر و تفسیرها و نتیجه‌گیری‌های لازم، باید کلیه اطلاعات به‌دست آمده، به صورت گزارش عرضه شود. این گزارش، حاوی دو بخش زیر خواهد بود:

۱-۱۱ اطلاعات عمومی

کلیه اطلاعات عمومی که به شناسایی بهتر وضعیت زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه کمک می‌کند، در این بخش توضیح داده خواهد شد.

۱-۱-۱۱ موقعیت جغرافیایی منطقه

این مبحث، شامل موقعیت جغرافیایی منطقه، وسعت آن، ارتباط با مناطق مجاور و همچنین مختصری درباره وضعیت آب و هوایی آن است.

۲-۱-۱۱ زمین‌شناسی منطقه

درباره زمین‌شناسی منطقه به‌خصوص در مورد سنگ مخزن و سازندهای مجاور آن توضیح مختصری لازم است.

۳-۱-۱۱ هدف از بررسی‌های ژئوفیزیکی

طبیعی است که در منطقه ناشناخته‌هایی وجود دارد که برای آنها بررسی‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد شده است. در اینجا درباره مسائل طرح شده و به‌طور کلی، اهداف مطالعات بحث می‌شود.

۴-۱-۱۱ دلایل انتخاب روش مورد استفاده

در هر منطقه با توجه به عوامل متفاوت طبیعی، فنی، محدودیت‌ها و غیره، روش ژئوفیزیکی مناسب انتخاب می‌شود. عواملی که به انتخاب روش مورد استفاده منجر شده، به توضیح نیاز دارند.

۵-۱-۱۱ مدارک و اطلاعات مورد استفاده

کلیه مدارک و اطلاعات مورد استفاده بررسی‌ها از قبیل عکس‌های هوایی، نقشه‌های مختلف، مقاطع و برش‌های زمین‌شناسی، گزارش‌های مختلف، آمارها و غیره با ذکر مآخذ در این قسمت می‌آید.

۶-۱-۱۱ وسایل و تجهیزات مورد استفاده و کادر فنی پروژه

تجهیزات مورد استفاده در عملیات صحرایی و کادر فنی درگیر پروژه، در اینجا گفته می‌شود.

۱۱-۱-۲ مدت/انجام کار

مدت زمان اجرای پروژه و همچنین در صورت وجود تأخیر، درباره موانع موجود و دلایل تأخیر، بحث می‌شود.

۱۱-۲ اطلاعات فنی

کلیه اطلاعات به‌دست آمده از بررسی‌ها، در این بخش می‌آید که شامل سه قسمت است.

۱۱-۲-۱ مطالب

در این مبحث، شرحی درباره موارد زیر داده می‌شود:

- توضیح درباره انجام کار در منطقه،
- توضیح مربوط به جدول‌های مشخصات واحدهای سنگی منطقه در دو روش مقاومت ویژه و لرزه‌ای؛ به‌عنوان مثال: جدول تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی واحدهای سنگی منطقه،
- شرحی درباره چگونگی تهیه و نتایج به‌دست آمده از نقشه‌ها، مقاطع، نمودارهای تهیه شده و مقایسه آنها با نتایج به‌دست آمده از زمین‌شناسی و حفاری، و
- بررسی بی‌هنجاری‌های موجود در سه روش ثقل‌سنجی، مغناطیسی و حرارتی و مقایسه آن با زمین‌شناسی منطقه.

۱۱-۲-۲ نقشه‌ها و نمودارها

کلیه نقشه‌ها و نمودارهای تهیه شده، همراه گزارش خواهد بود. در صورتی که اندازه نقشه بزرگ نباشد، در داخل گزارش و در غیر این صورت ضمیمه گزارش می‌شود.

۱۱-۲-۳ خلاصه نتایج

در انتهای گزارش، خلاصه‌ای از نتایج فنی به‌دست آمده از بررسی‌ها در رابطه با هدف مطالعات بیان می‌شود. ضمناً در این قسمت نواقص موجود و نیز در صورت نیاز، پیشنهاد مطالعات تکمیلی و روش انجام کار توضیح داده خواهد شد. همچنین نتایج به‌دست آمده، با کارشناسان زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی مورد بحث قرار می‌گیرد و محل حفاری با تأیید نظر آنها پیشنهاد می‌شود.

۱۲- نظارت بر بررسی‌های ژئوفیزیکی

هدف از کاربرد ژئوفیزیک در مطالعات آبهای زیرزمینی، حل مسائل زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی است. بنابراین برای این بررسی‌ها، باید برنامه‌ریزی صحیح انجام و سپس عملیات صحرایی طبق استانداردهای لازم صورت بگیرد. همچنین در پردازش اطلاعات و تهیه گزارش، باید دقت کافی به عمل آید تا علاوه بر تعبیر و تفسیر صحیح، اطلاعات به‌دست آمده و گزارش نهایی، کامل و قابل استفاده باشد. به‌طور کلی، می‌توان نظارت بر مطالعات ژئوفیزیکی را شامل نظارت بر برنامه‌ریزی، نظارت بر عملیات صحرایی و نظارت بر کار دفتری دانست.

۱-۱۲ نظارت بر برنامه‌ریزی

همان‌طور که گفته شد، کارشناس ژئوفیزیک و مسئول مطالعات پروژه، برنامه بررسی‌های ژئوفیزیکی را با توجه به مسائل منطقه تهیه می‌کند. به این معنی که قبل از هر چیز، کلیه اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی موجود و همچنین مطالعات ژئوفیزیکی قبلی مورد بررسی دقیق قرار گرفته و برای حل ابهامات موجود، روش ژئوفیزیکی مناسب، خطوط برداشت و فواصل بین ایستگاه‌ها انتخاب می‌شود. مسئول پروژه، در کلیه این امور باید نظارت دقیق داشته باشد تا به منظور پاسخ به ابهامات، از مطالعات، حداکثر استفاده به‌دست آید.

۲-۱۲ نظارت بر عملیات صحرایی

الف- محل خطوط برداشت و ایستگاه‌ها

محل خطوط برداشت و ایستگاه‌ها باید بر اساس برنامه پیش‌بینی شده و با دقت کافی روی زمین مشخص شود. اگر به دلایلی مانند وجود رودخانه، قنات، ساختمان و سایر موانع، امکان اندازه‌گیری در محل پیش‌بینی شده نباشد، باید محل دیگری در مجاورت محل مذکور انتخاب و محل دقیق آن روی نقشه مشخص شود.

ب- اندازه‌گیری‌ها

برای رسیدن به نتایج عملیات، باید اولاً ابزار و وسایل مورد استفاده سالم و دارای توانایی و دقت کافی بوده ضمناً درست به کار گرفته شوند؛ ثانیاً عملیات مختلف ژئوفیزیکی با توجه و آگاهی کامل به عوارض طبیعی و مصنوعی منطقه و اثر آنها روی نتایج اندازه‌گیری، انجام شود؛ ثالثاً تفسیرهای سرزمین و تغییر برنامه برای بهینه‌سازی نیز مدنظر قرار گیرد. به‌طور کلی، نظارت بر عملیات صحرایی روش‌های مختلف ژئوفیزیکی به این شرح است:

۱-۲-۱۲ نظارت بر عملیات ثقل‌سنجی

به‌طور کلی، نظارت بر اندازه‌گیری‌های ثقل‌سنجی را می‌توان شامل مراحل زیر دانست :

- شبکه‌بندی منطقه به منظور مشخص کردن نقاط اندازه‌گیری به‌طور دقیق انجام شده و این نقاط با دقت کافی روی نقشه مشخص شود.

- نقشه‌برداری با دقت پیش‌بینی شده باشد.
- دستگاه‌های مورد استفاده، سالم و دارای دقت مورد نظر بوده و در هر ایستگاه آزمایش شود.
- دقت‌های لازم در این روش شامل دور بودن از وسیله نقلیه، نداشتن وسایل آهنی و غیره مراعات شود.
- ایستگاه‌ها در نزدیکی چاه‌های عمیق با لوله‌های آهنی، انبار مواد آهنی، پل‌های آهنی، لوله‌های آب، نفت و گاز و به‌طور کلی، همه عواملی که باعث اختلال در میدان ثقل زمین در محل اندازه‌گیری شده انتخاب نشود.
- در ایستگاه‌های مبنا، در فاصله زمانی‌های مشخص بین ۱۵ تا ۳۰ دقیقه، اندازه‌گیری به‌عمل آید.
- دستگاه پس از خواندن در هر محل، به منظور انتقال به ایستگاه جدید باید کاملاً بسته و با دقت کافی تغییر مکان یابد.

۱۲-۲-۲ نظارت بر عملیات مغناطیسی و الکترو مغناطیسی

- عواملی که باید در روش‌های مغناطیسی و الکترو مغناطیسی رعایت شود، به شرح زیر است:
- محل خطوط برداشت و ایستگاه‌ها، با توجه به مشخصات منطقه، انتخاب و پیاده شود و روی نقشه پایه با شماره‌های مربوط آورده شود.
 - دقت شود که مسئول اندازه‌گیری، دارای وسایل و ابزاری که در میدان مغناطیسی اختلال‌هایی به وجود می‌آورد (از قبیل حلقه کمر بند، چکش قطب‌نما، کفش یا میخ آهنی، ماشین حساب، چاقو و غیره) نباشد.
 - محل ایستگاه‌ها دور از انبارهای وسایل آهنی، لوله‌های آهنی، پل‌های فلزی، نرده آهنی، کابل‌های برق و غیره انتخاب شود.
 - ارتفاع پرواز در برداشت‌های هوایی، تا حد امکان یکنواخت باشد در غیر این صورت تصحیح‌های لازم صورت گیرد.
 - ایستگاه‌های مبنا بر حسب نیاز، طبق برنامه پیش‌بینی شده کنترل و اندازه‌گیری مربوط انجام شود.
 - گرما بر حساسیت عقربه‌های مغناطیسی که به‌طور مرتب در میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، تأثیر دارد. بنابراین باید اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های با تغییرات درجه حرارت کم انجام پذیرد.

۱۲-۲-۳ نظارت بر عملیات مقاومت ویژه

- به‌طور کلی، نظارت بر عملیات صحرایی مقاومت ویژه را می‌توان شامل موارد زیر دانست:
- محل ایستگاه‌ها به کمک نشانه (رپر) سیمانی یا میخ‌های چوبی روی زمین مشخص و به‌طور دقیق روی نقشه پایه پیاده و علامت‌گذاری شود.
 - کابل‌های مورد استفاده، از نظر سالم بودن کنترل شود تا بدون زدگی و پاره‌گی روپوش باشد.
 - کابل‌های AB و MN یکدیگر را قطع نکرده و حتماً در هنگام کار، موازی و با فاصله حدود ۲ متری از یکدیگر قرار گیرند.
 - قرقره‌های A و B عکس یکدیگر پیچیده شده باشد.
 - ایستگاه‌ها، در نزدیکی کابل‌های فشار قوی راه‌آهن و لوله‌های آب، گاز و نفت نباشد.

- اتصال به الکترودهای مسی و آهنی، درست صورت گیرد و محل اتصال مرتباً به وسیله سمباده تمیز شود.
- الکترودهای A ، B ، M و N کاملاً در زمین فرو روند.
- بین الکترودهای M و N هیچ پدیده طبیعی و مصنوعی از قبیل قنات، چشمه، ماشین، بیل، چنگک، چکش، سیم و الکترودهای اضافی قرار نگرفته باشد.
- A و B نسبت به O قرینه بوده و بین A و B اختلاف ارتفاع زیاد نباشد.
- نظر به اینکه گرما باعث اختلال‌هایی در اندازه‌گیری‌ها می‌شود، در هنگام کار در هوای آفتابی برای محافظت دستگاه باید از چتر آفتابی استفاده شود.
- اندازه‌گیری در حداقل زمان ممکن انجام گرفته و دستگاه بلافاصله خاموش شود.
- با طول AB کوتاه، از شدت جریان کم استفاده شود.
- کلیه وسایل، قبل از عملیات، توسط تکنسین مسئول بازرینی و کنترل شود.
- باتری‌ها قبل از عملیات کنترل و شارژ شود.
- کلیه عوارض طبیعی و مصنوعی نزدیک سونداژها یا دستگاه‌های اندازه‌گیری یادداشت شود.
- جهت گسترش کابل AB به کمک قطب‌نما مشخص و روی گمانه، در دفترچه اندازه‌گیری یادداشت شود.

۱۲-۲-۴ نظارت بر عملیات لرزه‌نگاری

اهم نظارت بر عملیات لرزه‌نگاری شامل موارد زیر است:

- محل خطوط برداشت و خطوط مبنا روی نقشه پایه با دقت پیاده شود.
- قبل از انفجار کلیه دستگاه‌ها از قبیل ژئوفون‌ها، تقویت کننده‌ها، صافی، دستگاه ثبات، فیلم‌ها و کابل‌ها کنترل شود.
- ابتدا برای کنترل دستگاه‌ها و مشخص کردن بهترین علایم لرزه‌ای، یک انفجار آزمایشی انجام گیرد.
- تا حد امکان سعی بر این باشد که خطوط برداشت و نقاط انفجار، در یک امتداد باشند تا پردازش آنها با اشکال مواجه نشود.
- مگر در مواردی استثنایی، فواصل ژئوفون در طول خطوط برداشت مساوی باشد.
- در زمان انفجار، از راه رفتن در مجاورت لرزه نگارها پرهیز شود.
- محل ژئوفون‌ها با دقت لازم نقشه‌برداری شود.

۱۲-۲-۵ نظارت بر عملیات گرمایی

در روش گرمایی، عملیات زیر نیاز به کنترل دارد:

- خطوط و گمانه‌های حرارتی با دقت کافی روی زمین و نقشه پیاده شود.
- حرارت سنج‌ها قبل از اندازه‌گیری آزمایش شود.
- اندازه‌گیری درجه حرارت با دقت و حوصله کافی صورت گیرد.

۳-۱۲ نظارت بر عملیات دفتری

در تفسیر نتایج اندازه‌گیری‌ها، باید از کلیه اطلاعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروشیمی و مطالعات ژئوفیزیکی قبلی استفاده کامل بشود و نتایج به‌دست آمده، به صورت نقشه‌ها، نمودارها و گزارش نهایی کامل عرضه شود. فردی که پردازش اطلاعات را انجام می‌دهد، باید در مورد ژئوفیزیک و زمین‌شناسی اطلاعات کافی داشته باشد.

۱-۳-۱۲ نظارت بر عملیات دفتری ثقل‌سنجی

نظر به اینکه در ثقل‌سنجی، عوامل متعددی روی اندازه‌گیری‌ها اثر می‌گذارد و اثر این عوامل گاهی از بی‌هنجاری مربوط به پدیده زمین‌شناسی بیشتر است، بنابراین در تفسیر داده‌های ثقل‌سنجی، انجام تصحیح‌های زیر لازم است:

الف - تصحیح بوگه

بی‌هنجاری بوگه از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$g_B = g_r - g_o + \text{تصحیح هوای آزاد} + \text{تصحیح بوگه} + \text{تصحیح توپوگرافی}$$

که در آن :

$$g_B = \text{بی‌هنجاری بوگه}$$

$$g_r = \text{مقدار } g \text{ به‌دست آمده در ایستگاه مربوط،}$$

$$g_o = \text{شتاب ثقل زمین در منطقه مربوط که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:}$$

$$g_o = 978.04911(0.52884 \sin^2 \phi - 0.00059 \sin^2 2\phi)$$

که در آن :

$$\phi = \text{زاویه عرض جغرافیایی ایستگاه مربوط است.}$$

$$\text{تصحیح هوای آزاد} = \text{Free air corr} = 0.3086 \text{ h}$$

$$\text{تصحیح بوگه} = \text{Bouger corr} = 2\pi\sigma_r fh$$

که در آن :

$$h = \text{ارتفاع ایستگاه از سطح دریا است،}$$

$$f = \text{ضریب ثابت ثقل جهانی و در دستگاه C,G,S معادل } f = \frac{200}{3} \times 10^{-9} \text{ است،}$$

$$\sigma_r = \text{متوسط چگالی سازنده که برای تصحیح بوگه در دستگاه C,G,S معادل } \sigma_r = 2.67 \text{ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.}$$

$$\text{ب - تصحیح هوای آزاد برای هر متر ارتفاع } 0.3086 \text{ میلی‌گال است.}$$

اگر وزن مخصوص سازند ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شود، تصحیح بوگه برای هر متر ارتفاع معادل ۰/۱۱۱۸ میلی‌گال است.

ج - تصحیح توپوگرافی نیز به وضع‌پستی و بلندی بین ایستگاه‌ها بستگی داشته و با توجه به آنها محاسبه می‌شود.

۱۲-۳-۲ نظارت بر عملیات دفتری روش‌های مغناطیسی و الکترومغناطیسی

همان‌طور که گفته شد، از روش مغناطیسی و الکترومغناطیسی، معمولاً برای شناسایی عمومی منطقه استفاده شده و معمولاً همراه با سایر روش‌ها مانند ثقل‌سنجی و مقاومت ویژه انجام می‌شود. در پردازش اطلاعات مربوط به این روش‌ها، باید از کلیه اطلاعات موجود استفاده شود.

۱۲-۳-۳ نظارت بر عملیات دفتری در روش مقاومت ویژه

در تعبیر و تفسیر اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه، باید از کلیه اطلاعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروشیمی و نتایج ژئوفیزیکی گذشته استفاده کامل بشود. ضمناً :

- به‌خصوص در پردازش داده‌ها از مقاطع حفاری‌های موجود استفاده شود.
- زمین‌شناسی منطقه و بیرون‌زدگی‌ها در تهیه نقشه‌های مختلف مورد توجه باشد.
- برای تهیه نقشه مقاومت عرضی منطقه، سطح آب زیرزمینی در کلیه ایستگاه‌ها مشخص و عامل شوری در نظر گرفته شود.
- با استفاده از مقاطع زمین‌شناسی حفاری‌های موجود و سایر اطلاعات هم‌ردیف، مقاومت الکتریکی لایه‌های مختلف زمین تعیین شود.
- نمودارهای الکتریکی گمانه‌های الکتریکی مطالعات قبلی دوباره مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفته و نتایج آنها در بررسی‌ها استفاده شود.
- در تهیه کلیه نقشه‌ها، عوامل زمین‌شناسی، بیرون‌زدگی‌ها، گسل‌ها، جهت جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته شود.

۱۲-۳-۴ نظارت بر عملیات دفتری در روش لرزه‌نگاری

عملیات دفتری روش لرزه‌ای شامل تفسیر و پردازش اطلاعات صحرایی به‌دست آمده و تطبیق نتایج به‌دست آمده با زمین‌شناسی منطقه است. به‌طور کلی، این عملیات را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد :

- کنترل عملیات صحرایی با برنامه پیش‌بینی شده،
- دقت در انجام تصحیح‌های لازم از قبیل تصحیح لایه هوازده و غیره،
- تلفیق نتایج لرزه‌ای (سرعت‌های V_p و V_s) با لایه‌های زمین‌شناسی،
- استفاده از مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی قبلی، و
- شرح مقاطع لرزه‌ای و تلفیق نتایج لرزه‌ای با نتایج بررسی‌ها به سایر روش‌ها.

۱۲-۳-۵ نظارت بر عملیات دفتری در روش حرارتی

اهم نظارت بر عملیات دفتری در روش حرارتی عبارت است از :

- معمولاً روش گرمایی با یک یا دو روش ژئوفیزیکی دیگر همراه است، بنابراین نتیجه به دست آمده از این روش با نتایج سایر روش‌ها باید کنترل شود.
- نتایج به دست آمده با نقشه‌های تغییرات مقاومت ویژه در عمق‌های مخلف مقایسه و تعبیر و تفسیر شود.
- نقشه‌های هم‌گردیان گرمایی با نقشه عمق سنگ کف مقایسه شود.
- تغییرات حرارت آب زیرزمینی منطقه با گردیان حرارتی زمین در عمق بررسی شود.
- نمودارهای حرارتی چاه‌های حفر شده در بررسی‌های گرمایی استفاده شود.
- نتایج کلیه مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و کیفیت آب زیرزمینی در تفسیر اطلاعات گرمایی به کار رود.

منابع و مراجع

- ۱- اکتشافات ژئوفیزیکی به روش الکتریک، مؤسسه آشناسی ایران، مهندس فریدون قاسمی، ۱۳۴۹، نشریه شماره ۴۶
- ۲- ژئوفیزیک مطالعات ژئوترمال (دوره مطالعات ژئوترمال در دانشگاه کیوشو ژاپن در سال ۱۹۷۸)
- ۳- ژئوفیزیک کاربردی، تألیف دبلیو تلفورد ال پی، جلدات ازای شریف، دی ۱ - کنر، برگردان به فارسی آقای دکتر حسن حاجب حسینی و آقای دکتر حسین زمردیان، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، جلد اول و دوم
- ۴- مجموعه گزارش‌های مطالعات و بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش الکتریک در بیش از ۵۰ منطقه مختلف ایران، گروه مهندسان مشاور آب و خاک، محمود نراقی
- ۵- مجموعه مطالعات آب‌های زیرزمینی بیش از ۴۰ منطقه مختلف در ایران توسط عطارزاده
- ۶- مجموعه مطالعات ژئوفیزیک به روش الکتریک در بیش از ۳۰ منطقه مختلف در سرتاسر ایران توسط کمپانی ژنرال الکتریک باریه، نراقی، کارفرما اداره کل مستقل آبیاری، ۱۹۴۲، وزارت آب و برق
- ۷- مطالعات ژئوفیزیکی به روش الکتریک در منطقه شاپور ارومیه، محمود نراقی، شرکت مهندسی مشاور آب و خاک، کارفرما وزارت آب و برق، طرح مطالعات شاپور ارومیه توسط مهندسین مشاور الکتروپروژکت یوگسلاوی
- ۸- مطالعات و بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش الکتریک در منطقه مهران غرب، مؤسسه آشناسی ایران، محمود نراقی، کارفرما وزارت آب و برق «اداره کل آب‌های زیرزمینی».
- 9- A.Duprat L.Sinter P.Ungemach : Universite de Strasbourg Service Geologique d' Alsace et de Lorrain.
Contribution de la Prospection Electricue a la Recherche Des Caracteristiques Hydrodynamiques d'un Milieu Aquifere.
- 10 Astier J.L. 1951 Note Sur L'inter Pretation et la Construction Approchee, des Sondages Electeique a Trois Terrain Isotrope et Horizontal.
- 14 A. Attarzadeh and J.Schwartz 1969 (Tir 1343) Analog Modei of the Ghazvin Grouncwater Aquifer.
- 12 Bosschart PhD.P Eng : Ground EM Prospecting Selection and Adapting of Method, Published by, Mining in Canada Scintrex Limited.
- 13 Favre (1958) Course de Gesphysiques; Les Methodes Electriques, Magnetique, Gravimetrique, Seismiques Institut Francais du Petrole.
- 14 Compagine Generale de Geophysique C.G.G.1958 .
Prospection Electrique Manuel Operation Sur le Terrain Par G.Lemanse.
- 15 Compagnie Generale de Geophysique Juin 1958
Prospection Electrique TRAITE Par G.Kuhetz.
- 16 Compagnie Generale de Gesphysique 1961
Contribution de la Prospection Par Sondage Electrique a la Decouver de la Otracture de Scheibenhard (Alsace).

- 17 Compagnie Generale de Geophysique.
Exemple de Construction Approchee de S.E. a 4 Terrains et Horizontaux a Partir de L'abaque C.G.G
et de Courbes 3 Terrains.
- 18 Geophysical Exploration for Geothermal Field. By : Seibe Onodera, Proff of Exploration Geophysics
Facully of Engineering Kyushu University.
- 19 G. Kovacs and Associates : Subteramean Hydrology.
- 20 J.J .Breusse 1961Groundwater Geological Surveys of the Area East of ROME .
- 21 Master Curves for Electrical Sounding prepared by C.G.G 1963Published by European Association of
Exploration Geophysicists.
- 22 Milton, B Dobrin ; Introduction to Geophysical Prospecting.
- 23 Petur. J. Milanovic : Karst Hydrogeology.
- 24 UNESCO : Guide to the Hydrology of Carbonate Rocks.