

جمهوری اسلامی ایران
وزارت صنعت، معدن و تجارت

برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در اکتشافات معدنی

شماره ردیف نشریه در انتشارات
سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور

۵۳۳



انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن
<http://www.ime.org.ir>

وزارت صنعت، معدن و تجارت
معاونت امور معادن و صنایع معدنی
برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن
<http://www.mimt.gov.ir>
<http://www.minecriteria.ir>



انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن
(شماره ثبت ۹۹۶۶)

عنوان و نام پدیدآور :	راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در اکتشافات معدنی
مشخصات نشر :	تهران : انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن ایران، ۱۳۹۳
مشخصات ظاهری :	۱۱۶ص.
شابک :	۹۷۸-۶۰۰-۹۱۴۵-۶۵-۲
وضعیت فهرست‌نویسی :	فیبای مختصر
یادداشت :	این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
شناسه افزوده :	سازمان نظام مهندسی معدن ایران
شناسه افزوده :	ایران. ریاست جمهوری. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی
شناسه افزوده :	ایران. وزارت صنعت، معدن و تجارت. معاونت امور معادن و صنایع معدنی. برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن
شماره کتابشناسی ملی :	۳۷۸۲۵۵۱

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در

اکتشافات معدنی

گردآورنده : برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن - وزارت صنعت، معدن و تجارت

ناشر : انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن

نوبت چاپ : اول

شمارگان : ۱۰۰۰ نسخه

قیمت : ۱۱۵/۰۰۰ ریال

تاریخ انتشار : زمستان ۱۳۹۳

چاپ و صحافی : طراحان نصر

همه حقوق برای ناشر محفوظ است.

پیشگفتار

استفاده از ضوابط، معیارها و استانداردها در مراحل پیشنهاد، مطالعه، طراحی، اجرای طرح‌های اکتشافی، بهره‌برداری و فرآوری مواد معدنی به لحاظ توجیه فنی و اقتصادی طرح‌ها، کیفیت طراحی، اجرا و هزینه‌های مربوطه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی را در کلیه مراحل انجام عملیات معدنی مورد تاکید جدی قرار داده است.

با توجه به مراتب یاد شده، دفتر نظارت و بهره‌برداری وزارت صنعت، معدن و تجارت با همکاری اساتید، صاحب‌نظران، متخصصان، دست‌اندرکاران بخش معدن کشور و با همکاری دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری و به استناد ماده ۱۰۷ آیین‌نامه اجرایی قانون معادن، مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۸۵/۴/۲۰ هیات محترم وزیران و ماده ۳۲ قانون نظام مهندسی معدن با در نظر داشتن موارد زیر اقدام به تهیه ضوابط، معیارها و دستورالعمل‌های مورد نیاز بخش معدن نموده است:

- استفاده از منابع معتبر و استانداردهای بین‌المللی

- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمان‌ها، شرکت‌ها و واحدهای معدنی

- استفاده از تخصص‌ها و تجربه‌های کارشناسان و صاحب‌نظران بخش‌های خصوصی و دولتی

- پرهیز از دوباره‌کاری‌ها و ائتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور

- توجه به اصول و موازین مورد عمل موسسات تهیه‌کننده استاندارد

امید است نشریه "راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی،

الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در اکتشافات معدنی" گام موثری در زمینه یکسان‌سازی فعالیت‌های معدنی در کشور باشد.

همچنین مجریان و دست‌اندرکاران بخش معدن با به کارگیری این نشریه، در راستای هماهنگ‌سازی و تکامل استانداردها مشارکت نمایند.

شورای عالی برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن

مجری طرح

جعفر سرقینی معاون امور معادن و صنایع معدنی-وزارت صنعت، معدن و تجارت

اعضای شورای عالی به ترتیب حروف الفبا

فرزانه آقا رمضانعلی	کارشناس ارشد مهندسی صنایع-سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
بهروز برنا	کارشناس مهندسی معدن-سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
عبدالعلی حقیقی	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
عبدالرسول زارعی	کارشناس ارشد زمین‌شناسی-وزارت صنعت، معدن و تجارت
جعفر سرقینی	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی-وزارت صنعت، معدن و تجارت
ناصر عابدیان	کارشناس ارشد مهندسی معدن-سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
حسن مدنی	کارشناس ارشد مهندسی معدن-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
هرمز ناصرینیا	کارشناس ارشد مهندسی معدن-سازمان نظام مهندسی معدن

اعضای کارگروه اکتشاف به ترتیب حروف الفبا

بهروز برنا	کارشناس مهندسی معدن-سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
محمد پریزادی	کارشناس ارشد مهندسی معدن-سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور
ناصر عابدیان	کارشناس ارشد مهندسی معدن-سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
علیرضا غیاثوند	کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی-وزارت صنعت، معدن و تجارت
عبدالمجید یعقوب‌پور	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی-دانشگاه تربیت معلم

اعضای کارگروه تنظیم و تدوین به ترتیب حروف الفبا

مهدی ایران‌نژاد	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
مصطفی شریف‌زاده	دکترای مهندسی مکانیک سنگ-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
علیرضا غیاثوند	کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی-وزارت صنعت، معدن و تجارت
حسن مدنی	کارشناس ارشد مهندسی معدن-دانشگاه صنعتی امیرکبیر
بهزاد مهرابی	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی-دانشگاه تربیت معلم

پیش‌نویس این گزارش توسط آقای دکتر نوروزی تهیه شده و پس از بررسی و تایید توسط کارگروه اکتشاف، به تصویب شورای عالی برنامه رسیده است.

مقدمه

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مشخص کردن بعضی از خصوصیات فیزیکی زمین از قبیل خواص الکتریکی، الاستیکی و مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها، گرانش زمین و نظایر آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مبنای ژئوفیزیک اکتشافی بر این است که وجود هر ماده معدنی در داخل زمین نوعی تفاوت در خاصیت فیزیکی آن نقطه با نقاط اطراف ایجاد می‌کند. با کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی، اطلاعاتی از ساختارهای مدفون زمین‌شناسی به دست می‌آید که می‌توان از آن‌ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در اکتشاف مواد معدنی، هیدروکربن‌ها، آب‌های زیرزمینی، بررسی‌های مهندسی، زیست‌محیطی و نظایر آن‌ها استفاده کرد. انتخاب نوع روش یا روش‌های ژئوفیزیکی به منظور موقعیت‌یابی یک ذخیره معدنی معین، وابسته به خواص فیزیکی ماده معدنی مربوطه است.

این نشریه با عنوان "**راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در اکتشافات معدنی**"، به شناسایی روش‌های الکتریکی، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در مطالعات اکتشافی مواد معدنی می‌پردازد و راهنمایی‌های لازم را برای استفاده از این روش‌ها ارائه می‌دهد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - کلیات
۳	۱-۱- آشنایی
۳	۲-۱- روش الکتریکی
۳	۱-۲-۱- طبقه‌بندی روش‌های الکتریکی
۴	۳-۱- روش الکترومغناطیسی
۷	فصل دوم - راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش مقاومت ویژه
۱۳	۱-۲- آشنایی
۱۳	۲-۲- معرفی پارامترهای فیزیکی
۱۳	۱-۲-۲- جریان الکتریکی و پتانسیل
۱۴	۳-۲- رسانایی و مقاومت ویژه کانی‌ها و سنگ‌ها
۱۴	۴-۲- توزیع جریان پیوسته در یک زمین همگن و همسانگرد
۱۶	۵-۲- آرایه‌های الکترودی
۱۶	۱-۵-۲- آرایه شلومبرژه
۱۸	۲-۵-۲- آرایه ونر
۱۹	۳-۵-۲- آرایه دوقطبی-دوقطبی
۱۹	۴-۵-۲- آرایه مستطیل
۲۰	۶-۲- مقایسه قدرت تفکیک آرایه‌های ونر، شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی
۲۰	۷-۲- نیمرخ‌زنی مقاومت ویژه ظاهری
۲۱	۱-۷-۲- چگونگی نیمرخ‌زنی و تهیه نقشه مقاومت ویژه ظاهری
۲۲	۲-۷-۲- اثر ناهمگونی‌های مقاومت ویژه در مطالعات نیمرخ‌زنی
۲۳	۳-۷-۲- آرایه‌های ویژه در مطالعات نیمرخ‌زنی
۲۶	۸-۲- دستگاه‌ها و تجهیزات در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه
۲۷	۱-۸-۲- مولدهای جریان الکتریکی
۲۷	۲-۸-۲- دستگاه اندازه‌گیری
۲۸	۳-۸-۲- الکترودها
۲۸	۴-۸-۲- کابل‌ها و قرقره‌های جمع‌آوری آن‌ها
۲۹	۹-۲- مسایل و مشکلات مرتبط با برداشت‌های صحرائی مقاومت ویژه
۳۱	فصل سوم - راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش پلاریزاسیون القایی
۳۳	۱-۳- آشنایی
۳۳	۲-۳- منشا پدیده IP
۳۳	۱-۲-۳- پلاریزاسیون فلزی
۳۵	۲-۲-۳- پلاریزاسیون غشایی (الکترولیتی)
۳۶	۳-۳- اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی

۳۷	.....۳-۳-۱- روش زمان-حوزه‌ای (اندازه‌گیری با جریان پیوسته).
۳۸	.....۳-۳-۲- روش فرکانس-حوزه‌ای (اندازه‌گیری با فرکانس متغیر)
۳۹	.....۴-۳- آرایه‌های مورد استفاده و چگونگی برداشت‌های IP.
۴۱	.....۵-۳- تفسیر داده‌های IP و مقاومت ویژه.....
۴۳	فصل چهارم- راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش الکترومغناطیسی.....
۴۵	.....۱-۴- آشنایی.....
۴۵	.....۲-۴- اصول بررسی‌های الکترومغناطیسی.....
۴۵	.....۴-۲-۱- امواج الکترومغناطیسی.....
۴۷	.....۴-۲-۲- پلاریزاسیون.....
۴۹	.....۴-۲-۳- تعیین سطح پلاریزاسیون.....
۵۰	.....۴-۲-۴- عمق نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی.....
۵۰	.....۳-۴- انواع سیستم‌های الکترومغناطیسی.....
۵۱	.....۴-۴- روش‌های اندازه‌گیری الکترومغناطیسی صحرائی.....
۵۱	.....۴-۴-۱- روش‌های زاویه کجی یا شیب.....
۵۴	.....۴-۴-۲- اندازه‌گیری‌های فاز و دامنه.....
۵۶	.....۴-۴-۳- برداشت‌های الکترومغناطیسی زمان-حوزه‌ای.....
۵۹	.....۴-۴-۴- اندازه‌گیری‌های رسانایی.....
۶۰	.....۵-۴- برداشت‌های الکترومغناطیسی هوابرد.....
۶۱	.....۴-۵-۱- سیستم‌های فاصله ثابت.....
۶۳	.....۴-۶- روش‌های تفسیر داده‌های الکترومغناطیسی.....
۶۳	.....۴-۶-۱- پردازش و تفسیر داده‌های TEM.....
۶۵	.....۴-۶-۲- تفسیر داده‌های رسانایی ظاهری (نیمرخزنی و گمانه‌زنی قائم).....
۶۵	.....۴-۶-۳- تحلیل کامپیوتری.....
۶۷	فصل پنجم- راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش پتانسیل خودزا.....
۶۹	.....۱-۵- آشنایی.....
۶۹	.....۲-۵- عوامل ایجادکننده پتانسیل خودزا.....
۶۹	.....۳-۵- منشا پتانسیل‌های خودزا.....
۷۰	.....۵-۳-۱- پتانسیل‌های الکتروستاتیکی.....
۷۱	.....۵-۳-۲- پتانسیل‌های الکتروشیمیایی.....
۷۱	.....۵-۳-۳- پتانسیل‌های کانی.....
۷۲	.....۵-۴- اندازه‌گیری و برداشت‌های SP.....
۷۴	.....۵-۵- تفسیر ناهنجاری‌های SP.....
	فصل ششم- فهرست خدمات و راهنمای اجرای روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی،
۷۵	الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا.....
۷۷	.....۱-۶- آشنایی.....

۷۷	..... ۲-۶- فهرست خدمات
۷۷	..... ۱-۲-۶- نقشه‌ها و مدارک
۷۷	..... ۲-۲-۶- محدوده مطالعات
۷۷	..... ۳-۲-۶- گستره مطالعات
۷۸	..... ۴-۲-۶- طراحی و اجرای روش‌ها
۷۹	..... ۵-۲-۶- جمع‌آوری اطلاعات
۷۹	..... ۳-۶- فهرست خدمات و نحوه برداشت‌ها به روش‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی
۷۹	..... ۱-۳-۶- هدف
۷۹	..... ۲-۳-۶- برنامه‌ریزی
۷۹	..... ۳-۳-۶- مدارک مورد نیاز
۷۹	..... ۴-۳-۶- انتخاب آرایه و فاصله الکترودها
۸۰	..... ۵-۳-۶- انتخاب شبکه برداشت و فاصله آن‌ها
۸۱	..... ۶-۳-۶- اجرا
۸۳	..... ۴-۶- فهرست خدمات و نحوه اجرای روش الکترومغناطیسی
۸۳	..... ۱-۴-۶- کلیات
۸۵	..... ۲-۴-۶- طراحی و اجرای روش
۸۶	..... ۳-۴-۶- انتخاب سیستم‌ها و روش‌های الکترومغناطیسی
۹۰	..... ۵-۶- فهرست خدمات و نحوه برداشت‌ها به روش پتانسیل خودزا
۹۳	..... فصل هفتم- آرایه گزارش و الگوی نقشه‌ها
۹۵	..... ۱-۷- ساختار گزارش مطالعات ژئوفیزیکی
۹۵	..... ۲-۷- چکیده
۹۵	..... ۳-۷- فهرست مطالب
۹۵	..... ۴-۷- کلیات
۹۵	..... ۵-۷- روش‌های مورد استفاده در مطالعات ژئوفیزیکی (مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل خودزا و الکترومغناطیس)
۹۵	..... ۶-۷- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌ها
۹۵	..... ۱-۶-۷- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی
۹۶	..... ۲-۶-۷- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های الکترومغناطیسی
۹۶	..... ۳-۶-۷- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های پتانسیل خودزا
۹۶	..... ۷-۷- پیوست‌های گزارش
۹۷	..... ۸-۷- استاندارد نشانه‌ها و مشخصه‌های نقشه‌ها
۹۷	..... ۱-۸-۷- راهنمای نقشه‌ها
۹۷	..... ۲-۸-۷- نقشه موقعیت
۹۸	..... ۳-۸-۷- نمودارهای مدلسازی شده
۹۹	..... پیوست - علایم اختصاری

فصل ۱

کلیات

۱-۱- آشنایی

روش‌های ژئوفیزیکی مرز تفاوت‌ها را آشکار می‌سازند. این مرزها جایی است که یک محیط از لحاظ برخی خواص فیزیکی از محیط مجاور خود متمایز می‌شود. به طور کلی روش‌های کاوش ژئوفیزیکی را می‌توان به صورت زیر رده‌بندی کرد:

- لرزه‌ای
- گرانی‌سنجی
- مغناطیس‌سنجی و پارینه‌مغناطیس‌سنجی
- الکتریکی و الکترومغناطیسی
- پرتوسنجی (رادئومتری)
- دماسنجی
- چاه‌پیمایی

در این نشریه راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا ارایه می‌شود. راهنمای سایر روش‌های ژئوفیزیکی در نشریات جداگانه‌ای تشریح شده‌اند. در ادامه به طور مختصر اشاره‌ای به روش‌های کاوش ژئوفیزیکی و کاربرد هر یک از روش‌ها می‌شود.

۱-۲- روش‌های الکتریکی

اساس روش‌های الکتریکی در کاوش‌های ژئوفیزیکی، بر اندازه‌گیری خواص الکتریکی سنگ‌ها استوار است. این روش، برای شناسایی توده‌های کانساری که با سنگ‌های اطراف خود خواص الکتریکی متفاوت دارند و همچنین سطوح ناپیوستگی مانند گسل‌ها و نظایر آن‌ها کاربرد زیادی دارد. روش‌های کاوش الکتریکی در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی بسیار متنوع‌اند. این روش‌ها بر پایه آشکارسازی آثار سطحی که در اثر عبور جریان الکتریکی از درون زمین ایجاد می‌شوند، استوار است. با استفاده از این روش‌ها می‌توان پتانسیل‌ها، جریان‌ها و میدان‌های الکتریکی یا الکترومغناطیسی را که به طور طبیعی یا مصنوعی در زمین ایجاد می‌شوند، اندازه‌گیری کرد. تغییرات هدایت الکتریکی سنگ‌ها و کانی‌ها از ویژگی‌هایی است که استفاده این روش را امکان‌پذیر می‌سازند.

۱-۲-۱- طبقه‌بندی روش‌های الکتریکی

روش‌های الکتریکی اغلب بر حسب نوع چشمه تولید انرژی الکتریکی به دو رده طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. روش‌هایی که در آن‌ها از جریان‌های الکتریکی طبیعی زمین استفاده می‌شود، عبارت‌اند از:

- الف- پتانسیل خودزا^۱
- ب- مگنتوتلوریک^۲

1- SP (Self potential)
2- MT (Magneto-Telloric)

- پ- جریان‌های تلوریک^۱
- ت- میدان مغناطیسی با فرکانس شنوایی^۲
- روش‌هایی که در آن‌ها از جریان‌های مصنوعی الکتریکی استفاده می‌شود، عبارت‌اند از:
- الف- مقاومت ویژه الکتریکی^۳
- ب- الکترومغناطیسی^۴
- پ- پلاریزاسیون القایی الکتریکی^۵
- ت- پلاریزاسیون القایی مغناطیسی^۶

۱-۳- روش الکترومغناطیسی

اگر توده‌ای هادی که در زیر زمین قرار دارد تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی متناوب قرار گیرد، جریان القایی در آن ایجاد می‌شود. این جریان به نوبه خود میدان مغناطیسی ثانویه‌ای ایجاد می‌کند که امکان تعیین محل و حدود این میدان وجود دارد. روش‌های الکترومغناطیسی بر پایه اندازه‌گیری همین میدان‌های ثانویه، که در زیر زمین به وسیله یک میدان اولیه ایجاد شده‌اند استوار است. در روش‌های الکترومغناطیسی معمولاً میدان اولیه با اعمال جریان متناوب در زمین ایجاد می‌شود. میدان اولیه در فضا و در زیر زمین گسترش می‌یابد و مطابق با قوانین الکترومغناطیس جریان‌هایی را در توده‌های هادی زیر سطح زمین القا می‌کند. این جریان‌ها میدان‌های الکترومغناطیسی ثانویه‌ای ایجاد می‌کنند که میدان اولیه را معشوش می‌سازد. میدان‌های ثانویه که به وسیله گیرنده‌هایی ثبت می‌شوند، از نظر مشخصه‌هایی مانند شدت، فاز و امتداد با میدان‌های اولیه متفاوتند. هدف اساسی در روش‌های الکترومغناطیسی آشکار کردن توده‌هایی با هدایت الکتریکی زیاد است. اکثر این توده‌ها کانسارهای فلزی به ویژه سولفیدهای توده‌ای هستند. کانی‌هایی مانند گرافیت، پیروتیت، کالکوپیریت، گالن و منیتیت که قابلیت هدایت‌پذیری الکتریکی خوبی دارند، با روش الکترومغناطیسی به خوبی شناخته می‌شوند، در حالی که کانی‌هایی مثل هماتیت، برونیت و کرومیت که تقریباً از نظر الکتریکی نارسانا هستند، زمانی با این روش قابل شناسایی‌اند که حاوی مقادیر کافی کانی‌های رسانا باشند. در جدول ۱-۱ کاربرد روش‌های مختلف ژئوفیزیکی و در جدول ۲-۱ روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده در مراحل مختلف اکتشاف درج شده‌اند. سایر موارد کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی عبارتند از:

- الف- اکتشاف سوخت‌های فسیلی (زغال‌سنگ، گاز و نفت)
- ب- مطالعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای (مساحت بیش از ۱۰۰ کیلومتر مربع)
- پ- اکتشاف کانسارها
- ت- مطالعات مهندسی

-
- 1- TC (telluric currents)
 2- AFMAG (audio-frequency magnetic field)
 3- RS (Resistivity survey)
 4- EM (electromagnetic)
 5- EIP (electric Induced polarization)
 6- MIP (magnetic induced polarization)

ث- مطالعات آب‌زمین‌شناسی

ج- کاوش فضاهای خالی (طبیعی یا مصنوعی)

چ- تعیین لکه‌های آلودگی و خوردگی خاک

جدول شماره ۱-۱- کاربرد روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در مطالعات گوناگون

موارد کاربرد							پارامتر فیزیکی وابسته	روش ژئوفیزیکی
چ	ج	ث	ت	پ	ب	الف		
p	p	p	p	p	m	m	مقاومت ویژه	مقاومت ویژه
m	m	p	m	p	-	-	اختلاف پتانسیل	پتانسیل خودزا
m	m	s	m	p	m	m	مقاومت ویژه، ظرفیت الکتریکی	پلاریزاسیون القایی
p	p	p	p	p	p	s	رسانایی-خودالقایی	الکترومغناطیس
s	s	s	m	p	m	m	رسانایی	فرکانس بسیار پایین
-	s	s	s	s	p	p	چگالی	گرانی‌سنجی
-	m		s	p	p	p	خودپذیری مغناطیسی	مغناطیس‌سنجی
-	s	s	p	m	p	p	خواص کشسانی، چگالی	لرزه‌نگاری انکساری
-	m	s	s	m	p	p	خواص کشسانی، چگالی	لرزه‌نگاری انعکاسی
s	s	s	m	p	m	m	ضریب دی‌الکتریکی	رادار نفوذی زمین
-	-	m	m	p	p	s	مقاومت ویژه	مگنتوتلوریک
		-	-	p	s	m	پرتو گاما (به طور معمول)	پرتوسنجی
-	s	P*	-		s	s	شیب زمین‌گرایی	دماسنجی

P: روش اصلی (اولیه)، S: روش مکمل (ثانویه)، m: دارای کاربرد بدون بسط، P*: فقط برای این کاربرد است، -: نامناسب

جدول ۱-۲- روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده در مراحل مختلف اکتشاف

مراحل اکتشاف	مقیاس	روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده	نتایج
شناسایی	۱:۱۰۰,۰۰۰	ژئوفیزیک هوایی شامل: مغناطیس، الکترومغناطیس، رادیومتری و گرانی‌سنجی	شناخت و شناسایی پدیده‌های ساختاری، زمین‌شناسی و معدنی (فاصله خطوط پروازی مناسب بین ۵ تا ۱۰ کیلومتر)
پی‌جویی	۱:۲۰,۰۰۰	مغناطیس، الکترومغناطیس، رادیومتری و گرانی‌سنجی	گرانی‌سنجی: تعیین وضعیت ساختاری و تعیین زون‌های گسلی، تفسیر نقشه‌های آنومالی بوگه به همراه نقشه‌های توپوگرافی، تعیین زون‌های مناسب و اولویت‌بندی مناطق آنومالی، تعیین آنومالی‌های ناحیه‌ای، تعیین آنومالی باقیمانده مغناطیس‌سنجی: تفسیر نقشه‌های آنومالی مغناطیسی و تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی سطح‌الارضی با آن‌ها، تعیین زون‌های مناسب به همراه اولویت آن‌ها، تعیین عمق کانی‌سازی، تعیین پی‌سنگ و توده‌های آذرین الکترومغناطیس: تفسیر نقشه‌ها و پروفیل‌های الکترومغناطیس رادیومتری: تعیین آنومالی‌های رادیواکتیو، تعیین زون‌های دگرسانی، تعیین پوشش‌های رسی، شناسایی زون‌های پلاستی و کانی‌های سنگین

ادامه جدول ۱-۲- روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده در مراحل مختلف اکتشاف

مراحل اکتشاف	مقیاس	روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده	نتایج
اکتشاف عمومی	۱:۵۰۰۰	مطالعات لرزه‌نگاری، مقاومت ویژه الکتریکی (گمانه‌زنی و پروفیل‌زنی)، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل خودزا، گرانی-سنجی، مغناطیس، الکترومغناطیس و رادیومتری	لرزه‌نگاری بازتابی: تفسیر نقشه‌های عمقی از لایه‌های مختلف، تخمین پارامترهای پتروفیزیکی، تعیین روند گسل‌ها، تعیین مناطق نمکی و چین‌خوردگی‌ها، تعیین زون‌های شکستگی و مناطق خرد شده
			لرزه‌نگاری شکست مرزی: تعیین ضخامت لایه‌های هوازده و آبرفت‌های سطحی، تهیه مدل‌های عمقی سرعت از لایه‌ها، تعیین آنومالی‌های سرعتی سطحی، تعیین گسل‌های سطحی
			لرزه‌نگاری ویژه: تعیین مدل سرعتی زمین، تعیین آنومالی‌های سرعتی، تعیین زون‌های گسلی و خرد شده، تعیین شکل کانی‌سازی
			مقاومت ویژه الکتریکی: تعیین لایه‌های رسانا و زون‌های هادی، تعیین مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها، تعیین لایه‌های آبدار و تراوا، تعیین لایه‌های آبرفتی، تخمین شکل هندسی توده کانسار
			قطبیت القایی: تعیین کانی‌سازی‌های سولفیدی و فلزی، مدلسازی عمقی توده‌های فلزی، شناسایی برخی از توده‌های اکسیدی مانند منیتیت و ایلپت و کاسیتیت
			پتانسیل خودزا: شناسایی زون‌های سولفیدی، مشخص کردن رگه‌های گرافیتی، مدلسازی توده و تعیین عمق حدودی و گسترش افقی کانسار
			مغناطیس: تفسیر نقشه‌های آنومالی مغناطیسی و تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی سطح‌الارضی با آن‌ها، تعیین زون‌های مناسب به همراه اولویت آن‌ها، تعیین عمق کانی‌سازی، تعیین پی‌سنگ و توده‌های آذرین
			الکترومغناطیس: تفسیر نقشه‌ها و پروفیل‌های الکترومغناطیس
اکتشاف تفصیلی	۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰، ۱:۲۰۰۰	مطالعات لرزه‌نگاری، مقاومت ویژه الکتریکی (گمانه‌زنی و پروفیل‌زنی)، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل خودزا، گرانی-سنجی، مغناطیس، الکترومغناطیس و رادیومتری	لرزه‌نگاری بازتابی: تفسیر نقشه‌های عمقی از لایه‌های مختلف، تخمین پارامترهای پتروفیزیکی، تعیین روند گسل‌ها، تعیین مناطق نمکی و چین‌خوردگی‌ها، تعیین زون‌های شکستگی و مناطق خرد شده
			لرزه‌نگاری شکست مرزی: تعیین ضخامت لایه‌های هوازده و آبرفت‌های سطحی، تهیه مدل‌های عمقی سرعت از لایه‌ها، تعیین آنومالی‌های سرعتی سطحی، تعیین گسل‌های سطحی
			لرزه‌نگاری ویژه: تعیین مدل سرعتی زمین، تعیین آنومالی‌های سرعتی، تعیین زون‌های گسلی و خرد شده، تعیین شکل کانی‌سازی
			مقاومت ویژه الکتریکی: تعیین لایه‌های رسانا و زون‌های هادی، تعیین مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها، تعیین لایه‌های آبدار و تراوا، تعیین لایه‌های آبرفتی، تخمین شکل هندسی توده کانسار
			پوشش‌های رسی، شناسایی زون‌های پلاسری و کانی‌های سنگین
			گرانی‌سنجی: تعیین وضعیت ساختمانی و تعیین زون‌های گسلی، تفسیر نقشه‌های آنومالی بوگه به همراه نقشه‌های توپوگرافی، تعیین زون‌های مناسب و اولویت‌بندی مناطق آنومالی، تعیین آنومالی‌های ناحیه‌ای تعیین آنومالی باقیمانده
			لرزه‌نگاری بازتابی: تفسیر نقشه‌های عمقی از لایه‌های مختلف، تخمین پارامترهای پتروفیزیکی، تعیین روند گسل‌ها، تعیین مناطق نمکی و چین‌خوردگی‌ها، تعیین زون‌های شکستگی و مناطق خرد شده
			لرزه‌نگاری شکست مرزی: تعیین ضخامت لایه‌های هوازده و آبرفت‌های سطحی، تهیه مدل‌های عمقی سرعت از لایه‌ها، تعیین آنومالی‌های سرعتی سطحی، تعیین گسل‌های سطحی

ادامه جدول ۱-۲- روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده در مراحل مختلف اکتشاف

مراحل اکتشاف	مقیاس	روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده	نتایج
اکتشاف تفصیلی	۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰، ۱:۲۰۰۰	مطالعات لرزه‌نگاری، مقاومت ویژه الکتریکی (گمانه‌زنی و پروفیل‌زنی)، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل خودزا، گرانی‌سنجی، مغناطیس، الکترومغناطیس و رادیومتری	قطبیت القایی: تعیین کانی‌سازی‌های سولفیدی و فلزی، مدل‌سازی عمقی توده‌های فلزی، شناسایی برخی از توده‌های اکسیدی مانند منیتیت و اپلیت و کاسیتريت
			پتانسیل خودزا: شناسایی زون‌های سولفیدی، مشخص کردن رگه‌های گرافیتی، مدل‌سازی توده و تعیین عمق حدودی و گسترش افقی کانسار
			مغناطیس: تفسیر نقشه‌های آنومالی مغناطیسی و تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی سطح‌الارضی با آن‌ها، تعیین زون‌های مناسب به همراه اولویت آن‌ها، تعیین عمق کانی‌سازی، تعیین پی‌سنگ و توده‌های آذرین
			الکترومغناطیس: تفسیر نقشه‌ها و پروفیل‌های الکترومغناطیس
			رادیومتری: تعیین آنومالی‌های رادیواکتیو، تعیین زون‌های دگرسانی، تعیین پوشش‌های رسی، شناسایی زون‌های پلاسری و کانی‌های سنگین
			گرانی‌سنجی: تعیین وضعیت ساختمانی و تعیین زون‌های گسلی، تفسیر نقشه‌های آنومالی بگوکه به همراه نقشه‌های توپوگرافی، تعیین زون‌های مناسب و اولویت‌بندی مناطق آنومالی، تعیین آنومالی‌های ناحیه‌ای و تعیین آنومالی باقی‌مانده

در جدول ۱-۳ کانسارها بر اساس نوع ماده معدنی، محیط تشکیل و نوع ترکیب سنگ درونگیر طبقه‌بندی شده‌اند. در این جدول فقط به کانسارهایی که روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف آن‌ها کاربرد دارند، اشاره شده است.

جدول ۱-۳- طبقه‌بندی کانسارها بر اساس نوع ماده معدنی، محیط تشکیل و نوع ترکیب سنگ درونگیر

ردیف	نوع کانسار	توضیح	روش ژئوفیزیک			
			EM	SP	IP	RS
الف- کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی مافیک و اولترامافیک						
۱	مس- نیکل کوماته‌ای	تمرکز سولفیدهای مس- نیکل تنوره‌ای یا عدسی شکل مرتبط با سنگ‌های خروجی کوماته‌ای	√			√
۲	مس- نیکل دونیتی	تمرکز سولفیدهای افشان در دونیت‌های نفوذی	√			√
۳	کرومیت انبانی	تمرکز کرومیت در توده‌های انبانی شکل در بخش اولترامافیک کمپلکس افیولیتی	√			√
ب- کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی مافیک الکان						
۴	تیپ کربنات‌ها	تمرکز کانه‌های آپاتیتی، منیتیتی و خاک‌های نادر که در توده‌های تفریق شده با هسته مرکزی کربناتیت یا برش سینیتی تشکیل می‌شوند.	√		√	
۵*	قلع اسکارنی	تمرکز کانه‌های قلع، تنگستن، بریلیم در اسکارن‌ها، رگه‌ها، استوک‌ورک‌ها و گرابزن‌ها در همبری گرانیت- سنگ آهک		√	√	√

ادامه جدول ۱-۳- طبقه‌بندی کانسارها بر اساس نوع ماده معدنی، محیط تشکیل و نوع ترکیب سنگ درونگیر

ردیف	نوع کانسار	توضیح	روش ژئوفیزیک			
			EM	SP	IP	RS
پ- کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی پورفیر و آفانیتیک فلسیک						
۶	مس پورفیری	تمرکز در کانه‌های سولفیدی هیپوژن مس در محیط‌های پورفیری به صورت افشان و رگچه‌ای			√	
۷	مس-پورفیری-اسکارنی	تمرکز کانه‌های سولفیدی مس (کالکوپیریت) در رگچه‌های استوکورکی که به طور گرمایی دگرسان شده و به شدت تحت تاثیر دگرسانی قرار گرفته‌اند.			√	
۸	مس-طلای پورفیری	تمرکز کانه‌های سولفیدی کالکوپیریت، بورنیت و منیتیت در رگچه‌های استوکورکی درون سنگ‌های نفوذی پورفیری و سنگ‌های آتشفشانی			√	
۹**	مس-مولیبدن پورفیری	تمرکز کالکوپیریت و مولیبدنیت در رگچه‌های استوکورکی درون یا نزدیکی توده‌های نفوذی پورفیری	√			
ت- کانسارهای مرتبط با توده‌های خروجی مافیک و اولترامافیک						
۱۰	سولفید توده‌ای قبرسی	تمرکز کانی‌های سولفیدی نظیر کالکوپیریت، پیریت و اسفالریت توده‌ای در بازالت‌های بالشی	√	√	√	√
۱۱	سولفید توده‌ای بشی	تمرکز کانی‌های پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت ماسیو یا ماسیولایه‌ای درون رسوبات تخریبی و یا توف‌های مافیک با لایه‌بندی بسیار نازک	√	√	√	√
ث- کانسارهای مرتبط با توده‌های خروجی فلسیک تا مافیک						
۱۲	تیپ‌های طلای ای‌ترمال	تمرکز کانه‌های گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، سولفوسالت‌ها، تلوراید‌ها و طلا در رگه‌های کوارتز-کربنات موجود در سنگ‌های فلسیک تا متوسط			√	
		تمرکز طلا، الکتروم، سولفوسالت‌های نقره و آرژانتیت در رگه‌های کوارتز-آدولاریا موجود در سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا متوسط			√	
		تمرکز طلا، کالکوپیریت، سولفوسالت‌ها و آرژانتیت در رگه‌های موجود در سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا متوسط که روی سکانس‌های آتشفشانی یا توده‌های نفوذی قدیمی‌تر قرار می‌گیرند.			√	
		تمرکز طلا، پیریت و انارژیت در رگه‌های پراکنده و برش‌های موجود در مناطق دگرسانی پرآلومین مرتبط با آتشفشان‌های فلسیک			√	
۱۳	سولفید توده‌ای کروکو	تمرکز سولفورهای ماسیو مس و روی در سنگ‌های آتشفشانی زیردریایی با ترکیب فلسیک تا متوسط	√	√	√	√
ج- کانسارهای مرتبط با سنگ‌های رسوبی تخریبی						
۱۴***	مس با میزبان رسوبی	تمرکز سولفیدهای مس به صورت پراکنده و چینه‌کران در بخش احیایی سکانس‌های قرمز رنگ	√	√	√	√
۱۵	سرب و روی رسوبی	تمرکز چینه‌سان کانی‌های سولفیدی سرب و روی و سولفات باریم در رسوبات دریایی			√	

ادامه جدول ۱-۳- طبقه‌بندی کانسارها بر اساس نوع ماده معدنی، محیط تشکیل و نوع ترکیب سنگ درونگیر

روش ژئوفیزیک				توضیح	نوع کانسار	ردیف
EM	SP	IP	RS			
چ- کانسارهای مرتبط با سنگ‌های کربناتی						
		√	√	چینه‌کران اسفالریت و گالن، در حفرات اولیه و یا ثانویه موجود در لایه‌های آهک-دولومیتی و یا آهکی ناحیه سکوی قاره‌ای	سرب و روی تیپ می‌سی‌سی‌پی	۱۶
		√	√	تمرکز کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مس، سرب و روی در سنگ‌های آهکی-دولومیتی برش شده	مس-سرب و روی کیبوشی	۱۷
ح- کانسارهای مرتبط با سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای						
		√		تمرکز طلا در رسوبات شیمیایی غنی از آهن	طلای هومستیک (طلا) آشفشانزاد، طلا با میزبان سازند آهنی)	۱۸****
خ- کانسارهای مرتبط با محیط‌های پلاسری						
		√		تمرکز ایلمنیت و سایر کانی‌های سنگین فرآیندهای ساحلی و هوازدگی	تیتان ساحلی	۱۹
د- کانسارهای ذخایر سیلیکاتی						
			√		خاک‌های دیاتومیت‌دار	۲۰
			√	(در صورتی که باریت با سولفید فلزات پایه همراه باشد.)	ذخایر باریت رسوبی	۲۲
√	√	√	√	گرافیت‌های رگه‌ای، گرافیت فلسی افشانی و گرافیت بی‌شکل	گرافیت	۲۳

* روش‌های الکتریکی تنها برای تعیین شکل هندسی کانسار در جاهایی که احتمال کانی‌سازی بیشتر است در کنار سایر روش‌های ژئوفیزیکی کاربرد دارد.

** در مقیاس محلی بهترین روش تلفیقی از دو روش IP و EM است.

*** در مقیاس محلی روش‌های ژئوفیزیکی کاربرد چندانی ندارد و فقط از این روش‌ها برای شناخت ساختار حوضه‌های وجود طبقات رسوبی ضخیم و سنگ‌های مناسب استفاده می‌شود.

**** در صورت مشاهده سولفیدها تلفیق روش EM و IP توصیه می‌شود.

فصل ۲

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی

به روش مقاومت ویژه

۲-۱-۱- آشنایی

اساس روش مقاومت‌سنجی الکتریکی تعیین مقاومت ویژه الکتریکی زمین است. لایه‌های زمین به دلیل اختلاف جنس مواد تشکیل دهنده، مقاومت ویژه الکتریکی متفاوتی دارند و با استفاده از روش‌های مقاومت‌سنجی می‌توان لایه‌های زیرسطحی را مورد مطالعه قرار داد.

۲-۲- معرفی پارامترهای فیزیکی

۲-۲-۱- جریان الکتریکی و پتانسیل

بنا بر قانون اهم، زمانی که جریان الکتریکی I ، از یک هادی با مقاومت R عبور می‌کند (شکل ۲-۱)، رابطه اختلاف پتانسیل ایجاد شده (V) به صورت $V=RI$ است و برعکس اگر اختلاف پتانسیل V بین دو سر هادی اعمال شود، از آن جریان I عبور می‌کند. برای مواد مختلف به نسبت پتانسیل تغییر می‌کند. ثابت تناسب بین شدت جریان و پتانسیل، مقاومت الکتریکی (R) نامیده می‌شود و واحد آن اهم است.

الف- مقاومت ویژه و رسانایی الکتریکی

مقاومت الکتریکی اجسام با طول آن‌ها نسبت مستقیم و با سطح مقطع رابطه معکوس دارد.

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (1-2)$$

ضریب تناسب ρ ، بیانگر خاصیت الکتریکی هادی است. اگر R بر حسب اهم، L بر حسب متر و S بر حسب متر مربع بیان شود، واحد این ضریب که مقاومت ویژه نامیده می‌شود اهم‌متر است. بنا به تعریف، یک اهم‌متر عبارت از مقاومت الکتریکی یک رسانا به طول یک متر و سطح مقطع یک متر مربع است. عکس مقاومت ویژه، رسانایی نامیده می‌شود و با C نشان داده می‌شود ($C = 1/\rho$). واحد رسانایی موهو بر متر ($\Omega^{-1}m^{-1} = mho/m$) است که عکس اهم (Ω^{-1}) را زیمنس (S) نیز می‌نامند. در این صورت واحد رسانایی بر حسب زیمنس بر متر (S/m) نیز بیان می‌شود.

ب- چگالی جریان

از آنجا که جریان تزریقی به زمین در یک محیط سه‌بعدی منتشر می‌شود، در نظر گرفتن چگالی جریان (J) به جای شدت جریان الکتریکی (I) در این مطالعات بهتر است. طبق تعریف، چگالی جریان عبارت از شدت جریانی است که از واحد سطح عبور می‌کند، یعنی:

$$J = I/S \quad (2-2)$$

پ- پتانسیل و میدان الکتریکی

میدان الکتریکی (E) برداری است که از پتانسیل V مشتق می‌شود:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3-2)$$

در صورتی که اختلاف پتانسیل بین دو نقطه برابر dV در نظر گرفته شود، برای دو نقطه نزدیک به هم به فاصله dl در محیطی به سطح S ، رابطه زیر برقرار است:

$$\vec{E} = -dV / dl \quad (۴-۲)$$

با توجه به رابطه ۲-۱ و قانون اهم، می‌توان نوشت:

$$dV / dl = \rho I / S \quad (۵-۲)$$

و در نتیجه:

$$\vec{E} = -\rho \cdot \vec{J} \quad (۶-۲)$$

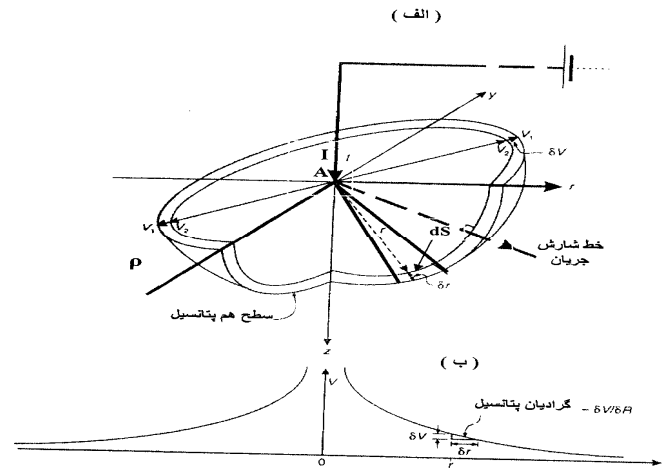
علامت منفی در رابطه ۲-۶ نشانگر افت پتانسیل با افزایش فاصله است.

۲-۳- رسانایی و مقاومت ویژه کانی‌ها و سنگ‌ها

جریان الکتریکی از سه طریق رسانایی الکترولیتی، فلزی (اهمی) و دی‌الکتریکی در محیط منتشر می‌شود. رسانایی الکترولیتی حاصل حرکت نسبتاً کند یون‌های موجود در یک الکترولیت است. این رسانایی به پارامترهای مختلفی از جمله نوع یون، غلظت یونی و قدرت تحرک یون‌ها بستگی دارد. رسانایی فلزی، ویژه فلزاتی است که در آن امکان حرکت سریع الکترون‌ها و در نتیجه انتشار بار الکتریکی فراهم می‌شود. رسانایی دی‌الکتریکی مربوط به موادی با رسانایی بسیار ضعیف (عایق) است و زمانی مصداق دارد که تحت تاثیر یک جریان متناوب خارجی قرار گیرد و دلیل آن جابه‌جایی ضعیف الکترون‌ها نسبت به هسته اتم آن‌ها است. از آنجا که این نوع رسانایی در فرکانس‌های بسیار زیاد فعال می‌شود، در مطالعاتی که از جریان پیوسته و یا جریان متناوب با فرکانس پایین استفاده می‌شود، از آن می‌توان صرف نظر کرد. در بسیاری از سنگ‌ها که به طور معمول عایق هستند، رسانایی موجود از نوع الکترولیتی است. بسیاری از کانی‌های سولفیدی و بعضی کانی‌های دیگر مانند منیتیت و گرافیت رسانایی فلزی دارند. مقاومت ویژه مواد موجود در زمین گستره بسیار زیادی دارد. به طور معمول سنگ‌های آذرین بیشترین مقاومت ویژه را دارند و سنگ‌های رسوبی بسته به درجه تخلخل، نوع و مقدار الکترولیت موجود در خلل و فرج معمولاً مقاومت ویژه کمی دارند. مقاومت ویژه سنگ‌های دگرگونی، حدواسط سنگ‌های آذرین و رسوبی است، اما هم‌پوشانی زیادی با آن‌ها دارد. سن سنگ نیز در مقاومت ویژه آن موثر است. به عنوان مثال مقاومت ویژه یک سنگ آذرین کواترنری بین ۱۰ تا ۲۰۰ اهم‌متر است. در حالی که معادل همین سنگ با سن پراکامبرین مقاومت بیشتری دارد. در واقع با افزایش سن سنگ امکان پر شدن فضاهای خالی سنگ به دلیل تبلور کانی‌ها، افزایش تراکم و در نتیجه کاهش پارامترهای موثر روی مقاومت ویژه مانند تخلخل و مقدار سیال درون سنگ وجود دارد. گرافیت پراکنده در توده سنگ سبب کاهش مقاومت ویژه کلی سنگ می‌شود.

۲-۴- توزیع جریان پیوسته در یک زمین همگن و همسانگرد

اگر از طریق یک الکتروود نقطه‌ای A، جریانی به شدت I در سطح زمینی همگن و همسانگرد به مقاومت ویژه ρ تزریق شود (فرض بر این است که الکتروود برگشت جریان در فاصله بسیار دوری قرار دارد)، شارش جریان به صورت خطوط شعاعی انجام می‌گیرد (شکل ۲-۱). افت پتانسیل (δV)، بین دو نقطه به فاصله r و $r + \delta r$ از نقطه A و گرادیان پتانسیل با $(-\delta V / \delta r)$ نشان داده می‌شود.



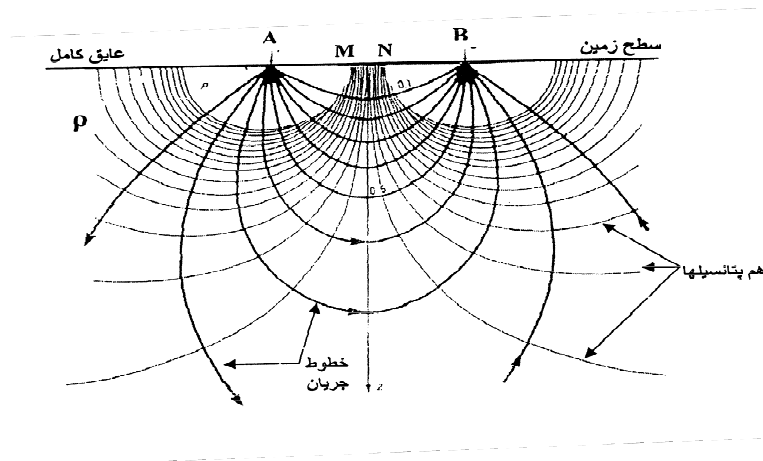
شکل ۲-۱- چگونگی شارش جریان و تشکیل سطوح هم‌پتانسیل در یک زمین همگن و همسانگرد،
الف- خطوط جریان و سطوح هم‌پتانسیل ب- تغییرات پتانسیل بر حسب فاصله

در صورتی که الکتروود برگشت جریان به فاصله نزدیک (نسبت به حالت قبل) قرار گیرد، در این صورت توزیع خطوط شارش جریان و هم‌پتانسیل‌ها مطابق شکل ۲-۲ است. در این حالت پتانسیل نقطه‌ای مانند M (V_M) برابر با حاصل جمع پتانسیل‌های ایجاد شده به وسیله الکترودهای A(+I) و B(-I) هستند.

$$V_M = V_A + V_B \dots, \quad V_M = \left(\frac{\rho I}{2\pi}\right) \left[1/AM - 1/BM\right] \quad (7-2)$$

اگر نقطه دیگری مانند N در نظر بگیریم، پتانسیل این نقطه (V_N) برابر است با:

$$V_N = \left(\frac{\rho I}{2\pi}\right) \left[1/AN - 1/BN\right]$$



شکل ۲-۲- چگونگی توزیع خطوط شارش جریان و تشکیل هم‌پتانسیل‌ها در حالتی که از دو الکتروود جریان نزدیک به هم استفاده می‌شود.

بدین ترتیب اختلاف پتانسیل بین دو نقطه M و N (δV_{MN})، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta V_{MN} = V_M - V_N = \left(\frac{\rho I}{2\pi}\right) \left[\left(1/AM - 1/BM\right) - \left(1/AN - 1/BN\right) \right] \quad (8-2)$$

با استفاده از رابطه ۲-۸ می‌توان مقدار مقاومت ویژه زمین (ρ) را نیز محاسبه کرد:

$$\rho = (2\pi\delta V_{MN} / I)[(1/AM - 1/BM) - (1/AN - 1/BN)] \quad (9-2)$$

در عمل برای به دست آوردن اختلاف پتانسیل و محاسبه مقاومت ویژه از چهار الکتروود (دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل) استفاده می‌شود (شکل ۲-۴)، که می‌توان آرایه‌های مختلفی را برای این چهار الکتروود در نظر گرفت. پتانسیل مقاومت ویژه برای آرایه‌های مختلف با استفاده از رابطه‌های کلی ۲-۸ و ۲-۹ محاسبه می‌شود. برای هر آرایه مشخص با فاصله الکتروودی ثابت عددی وجود دارد، که آن را ثابت یا ضریب آرایه نامیده و به طور معمول آن را با حرف K نشان می‌دهند:

$$K = 2\pi[(1/AM - 1/BM) - (1/AN - 1/BN)] \quad (10-2)$$

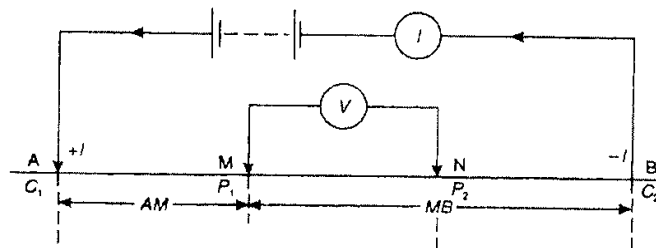
با توجه به مقدار K و $R = \frac{\delta V_{MN}}{I}$ (مقاومت الکتریکی)، مقاومت ویژه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho = K.R \quad (11-2)$$

۲-۵- آرایه‌های الکتروودی

شکل ۲-۳ یک آرایه چهار الکتروودی را نشان می‌دهد. در بیشتر آرایه‌ها چهار الکتروود جریان و پتانسیل در یک امتداد قرار می‌گیرند و در مواردی دو خط جریان و پتانسیل هم‌امتداد نیستند. برای سهولت اجرا و اندازه‌گیری سریع می‌توان از آرایه‌های متقارن و ساده‌تری استفاده کرد. انواع مختلفی از آرایه‌های الکتروودی وجود دارد که از جمله متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به آرایه شلومبرژه و ونر اشاره کرد. آرایه‌های متداول دیگری که بیشتر در مطالعات اکتشافی از آن‌ها استفاده می‌شود، دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی (سه‌قطبی) و مستطیلی هستند. در این روش مقاومت ویژه از رابطه ۲-۱۲ به دست می‌آید:

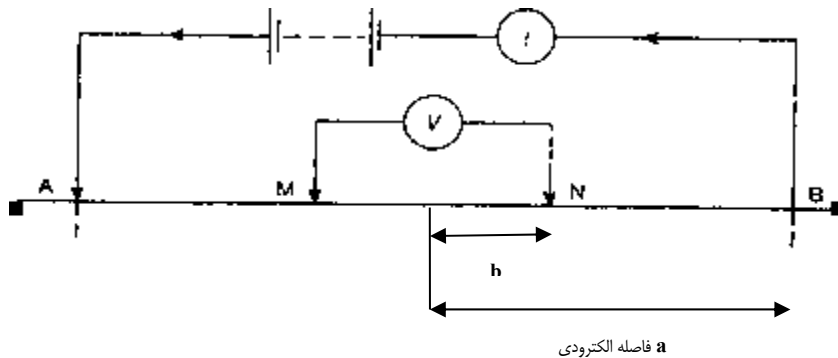
$$\rho = \frac{2\pi V}{I} \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}} \right) \quad (12-2)$$



شکل ۲-۳- یک آرایه چهار الکتروودی که در آن الکتروودهای پتانسیل بین الکتروودهای جریان قرار دارند.

۲-۵-۱- آرایه شلومبرژه

در این آرایه الکتروودها در یک خط قرار دارند. در حالت معمول، الکتروودهای پتانسیل (M و N) به فاصله کم از یکدیگر و بین الکتروودهای جریان (A و B) به گونه‌ای قرار می‌گیرند که مراکز خطوط (MN) و (AB) بر یکدیگر منطبق باشند و آرایه حاصل را آرایه متقارن شلومبرژه می‌نامند (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴- آرایه متقارن شلومبرژه

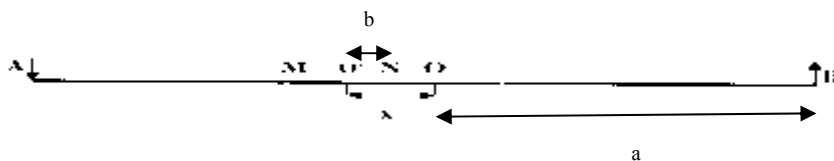
برای این آرایه نصف فاصله (AB) را برابر a در نظر می‌گیرند و آن را فاصله الکترودی می‌نامند. اگر نصف فاصله (MN) با b نشان داده شود، در این صورت ضریب هندسی یا ثابت آرایه متقارن شلومبرژه (K) با توجه به رابطه کلی (K رابطه ۲-۱۰) عبارت است از:

$$K_{sch.} = \frac{\pi(a^2 - b^2)}{2b} \quad \text{و} \quad \rho = \frac{K\delta V_{MN}}{I} \quad (۱۳-۲)$$

در صورتی که فاصله (MN) نسبت به (AB) به اندازه‌ای کوچک باشد که بتوان از b^2 در برابر a^2 صرف نظر کرد، رابطه K به شکل ساده‌تر زیر در می‌آید:

$$a \gg b \rightarrow K_{sch.} = \frac{\pi a^2}{2b}$$

در حالتی که آرایه شلومبرژه نامتقارن باشد، یعنی مرکز (MN) و (AB) بر یکدیگر منطبق نباشد، اگر فاصله این دو مرکز از یکدیگر برابر x در نظر گرفته شود و فاصله بین الکترودهای جریان و پتانسیل از فاصله (MN) خیلی بزرگتر باشد (با ضریب ۱۰ یا بیشتر)، در این صورت مقدار K از رابطه زیر به دست می‌آید (شکل ۲-۵):



شکل ۲-۵- آرایه نامتقارن شلومبرژه

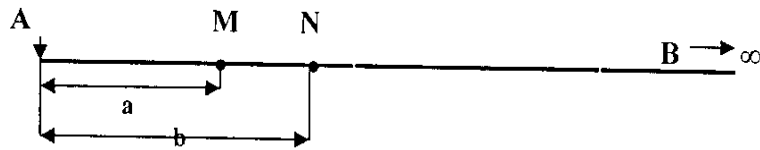
$$K = 2\pi \left[\left\{ \frac{1}{(a-x)-b} - \frac{1}{(a+x)+b} \right\} - \left\{ \frac{1}{(a-x)+b} - \frac{1}{(a+x)-b} \right\} \right]$$

در این حال نیز اگر $a \gg b$ باشد، ضریب K به صورت ساده‌تری در می‌آید:

$$K = (\pi/2b)(a^2 - x^2)^2 / (a^2 + x^2)$$

در صورتی که یکی از الکترودهای جریان B در فاصله دوری از الکتروود دیگر قرار گیرد (شکل ۲-۶) و الکترودهای پتانسیل در نزدیک الکتروود A اندازه‌گیری پتانسیل را انجام دهند، آرایه حاصل را آرایه نیم‌شلومبرژه می‌نامند و مقدار K مربوط به آن برابر است با:

$$K = \frac{2\pi ab}{(b-a)} \quad (۱۴-۲)$$



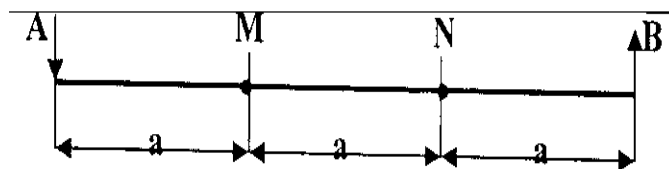
شکل ۲-۶- آرایه نیم‌شلومبرژه

این آرایه که قطبی-دوقطبی نیز نامیده می‌شود در حالتی که افزایش چگالی جریان در محل تزریق جریان مد نظر باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این آرایه زمانی که پلاریزه کردن هدف‌های معدنی رسانا، واقع در سنگ‌های میزبان مقاوم مورد نظر باشد و در مطالعات پلاریزاسیون القایی (IP) استفاده می‌شود.

۲-۵-۲- آرایه ونر

این آرایه در واقع حالت خاصی از آرایه شلومبرژه است. در این آرایه ضمن هم‌امتداد بودن الکترودهای جریان و پتانسیل و انطباق مرکز (AB) و (MN) فاصله چهار الکترودها از یکدیگر نیز یکسان است (شکل ۲-۷). فاصله الکترودهای متوالی (یا یک‌سوم طول کل آرایه) را معمولاً با حرف a نشان می‌دهند و آن را فاصله الکترودها می‌نامند. مقدار ثابت این آرایه (K) برابر است با:

$$K = 2\pi a \quad \rho = 2\pi a \left(\frac{\delta V}{I} \right) \quad (2-15)$$



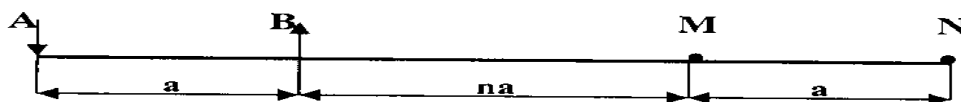
شکل ۲-۷- آرایه ونر

آرایه ونر را به دو صورت به کار می‌برند. در روش اول که به نام گمانه‌زنی الکتریکی موسوم است، پس از هر نوبت اندازه‌گیری فاصله a را به گونه‌ای زیادتر می‌کنند که نقطه وسط الکترودها همواره ثابت بماند و بدین ترتیب با افزایش a مقاومت ویژه اعماق مختلف زمین در محدوده الکترودها تعیین می‌شود.

در روش دوم که به نام ترانسه‌زنی^۱ یا نقشه‌برداری الکتریکی خوانده می‌شود فاصله a ثابت است و پس از هر نوبت اندازه‌گیری مجموعه الکترودها را در طول یک نیم‌رخ معین جابه‌جا می‌کنند و بدین ترتیب مقاومت زمین را در قسمت‌های مختلف ولی در عمق ثابت به دست می‌آورند.

۲-۵-۳- آرایه دوقطبی-دوقطبی

در این آرایه خط فرستنده جریان (AB) و خط اندازه‌گیری پتانسیل (MN) در یک امتداد قرار دارند، ولی (MN) در خارج از (AB) قرار می‌گیرد (شکل ۲-۸). در این آرایه معمولا فاصله (AB) و (MN) یکسان و فاصله دو الکترود M و B برابر مضربی از اعداد صحیح، ضرب در مقدار a انتخاب می‌شود. بدین ترتیب طول آرایش به وسیله مقدار na مشخص می‌شود.



شکل ۲-۸- آرایه دوقطبی-دوقطبی

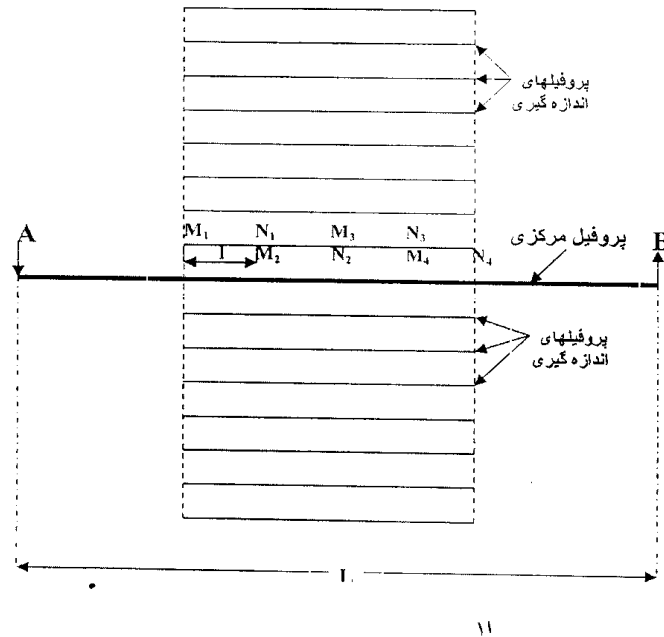
حداقل n برابر یک و حداکثر آن بر اساس عمق مورد نظر و امکان اندازه‌گیری دستگاه محدود می‌شود. در صورتی که فاصله بین الکترودهای میانی M و B خیلی بزرگتر از طول دوقطبی‌ها (AB یا MN) نباشد، ثابت آرایه دوقطبی-دوقطبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \rho n(n+1)(n+2)a \quad \rho = \frac{\pi n(n+1)(n+2)a\delta V}{I} \quad (2-16)$$

از آرایه دوقطبی-دوقطبی اغلب برای تهیه "مقاطع شبه عمق" در مطالعات IP استفاده می‌شود.

۲-۵-۴- آرایه مستطیلی

آرایه مستطیلی شامل یک خط فرستنده ثابت (AB) جریان الکتریکی و انجام اندازه‌گیری‌ها بین الکترودهای پتانسیل M و N واقع در روی نیمرخ‌های موازی با (AB) است (شکل ۲-۹). از این آرایه در مطالعات IP بیشتر استفاده می‌شود. جابه‌جایی الکترودهای پتانسیل را، اغلب برابر فاصله (MN) در نظر می‌گیرند که این فاصله با توجه به ابعاد هدف مورد مطالعه انتخاب می‌شود. اندازه‌گیری‌ها به نقطه وسط (MN) منظور می‌شود و عمق بررسی به طول خط فرستنده (AB) بستگی دارد. به طور معمول خط (MN) و ایستگاه‌های اندازه‌گیری در داخل مستطیلی قرار دارند که مرکز آن منطبق بر وسط فاصله (AB) و ضلع کوچک مستطیل برابر (AB/2) یا (AB/3) است. طول مستطیل به قدرت دستگاه (مولد و فرستنده جریان الکتریکی و حساسیت گیرنده) بستگی دارد. نیمرخ (AB) حالت خاصی از آرایه مستطیلی (AB) است که در آن الکترودهای M و N روی نیمرخ مرکزی (AB) باقی می‌مانند. در آرایه مستطیلی برای تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌ها فقط الکترودهای پتانسیل M و N جابه‌جا می‌شوند که بدین ترتیب ضمن افزایش سرعت برداشت‌ها، برای تعداد زیادی از نقاط اندازه‌گیری شارژ زمین یکسان است و این مزیتی برای دستیابی به داده‌های بهتر است.



شکل ۲-۹- آرایه مستطیل

۲-۶- مقایسه قدرت تفکیک آرایه‌های ونر، شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی

مقایسه کاربرد آرایه ونر، شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی برای مطالعات مختلف مقاومت ویژه در جدول ۲-۳ آورده شده است.

جدول ۲-۳- مقایسه آرایه‌های ونر، شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی برای مطالعات مختلف مقاومت ویژه

ویژگی	دوقطبی-دوقطبی	شلومبرژه	ونر
تفکیک قائم	*	**	***
عمق نفوذ جریان الکتریکی	***	**	*
کارایی در گمانه‌زنی الکتریکی	*	***	**
کارایی در ترانشه‌زنی	***	-	***
حساسیت نسبت به امتداد آرایه	متوسط	دارد.	دارد.
حساسیت نسبت به ناهمگونی	متوسط	متوسط	زیاد
تغییرات جانبی مقاومت ویژه	☀	☀	☀
سختی کار در اجرا	متوسط	متوسط	زیاد
دسترسی به نرم‌افزارهای تفسیر	**	***	***

*: ضعیف، **: متوسط، ***: خوب، -: نامناسب، ☀: زمانی که از کابل چند مغزه‌ای استفاده شود و اجرای آرایه الکترودی به طور خودکار

انجام گیرد از شدت سختی کار کاسته می‌شود.

۲-۷- نیمرخ‌زنی مقاومت ویژه ظاهری

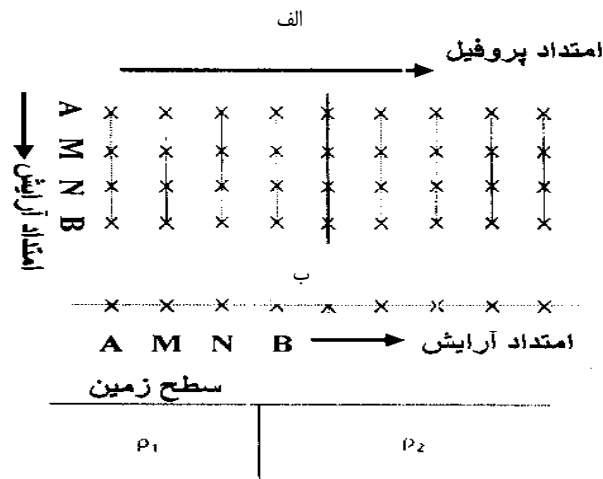
در روش مقاومت ویژه در مطالعات اکتشافی، اغلب شناخت تغییرات جانبی مقاومت ویژه و ناهمگونی‌هایی که مرتبط با کانی‌سازی‌های معدنی هستند مورد نظر است، بنابراین نیازی به برداشت‌های پرهزینه گمانه‌زنی قائم برای تهیه نیمرخ‌ها و نقشه‌های

مقاومت ویژه ظاهری نیست. در این مطالعات با توجه به عمق احتمالی هدف مورد نظر، آرایه مناسبی با فاصله الکترودی ثابت انتخاب و نقاط مورد نظر برداشت می‌شود.

برای آرایه تابع مقاومت ویژه ظاهری $\rho_a = \rho \cdot g(x, y, \theta, a, b)$ می‌توان فاصله آرایه را بدون تغییر در نظر گرفت و اندازه‌گیری مقاومت ویژه را با جابه‌جایی کل آرایه در طول یک نیمرخ انجام داد. بدین ترتیب مقادیر مقاومت ویژه ظاهری به ازای مقادیر ثابت a, b, y_0 و $\theta = 0$ و بر حسب تغییرات x_0 برداشت می‌شود و تابع مقاومت ویژه ظاهری در این برداشتها به صورت $\rho_a / \rho_0 = g(x_0)$ درمی‌آید. رسم تغییرات مقاومت ویژه ظاهری بر حسب تغییرات x در روی یک مقطع، نیمرخ مقاومت ویژه ظاهری را به دست می‌دهد. در صورتی که از طریق خطوط برداشت موازی اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه ظاهری بر روی یک سطح انجام گیرد، تابع یاد شده به صورت $\rho_a / \rho_0 = g(x_0, y_0)$ در می‌آید. بنابراین، تابع مقاومت ویژه ظاهری به صورت نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری آرایه می‌شود.

۲-۷-۱- نیمرخ‌زنی و تهیه نقشه مقاومت ویژه ظاهری

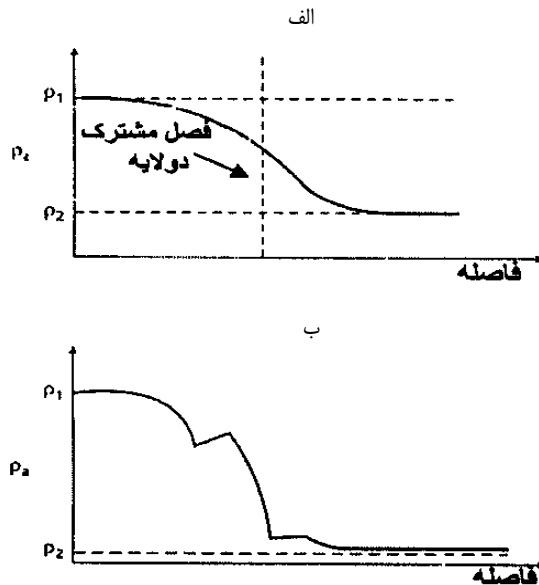
امتداد نیمرخ به طور معمول عمود بر امتداد هدف مورد نظر انتخاب می‌شود. برای این برداشتها بر حسب هدف مورد مطالعه از تمامی آرایه‌های گفته شده می‌توان استفاده کرد. اما از هر آرایه‌ای که استفاده شود، امتداد آرایه نسبت به امتداد نیمرخ برداشت به یکی از دو صورت، یکی عمود بر امتداد نیمرخ و دیگری به موازی آن انتخاب می‌شود. در شکل ۲-۱۰ الف و ب جابه‌جایی آرایه به ترتیب در جهت عمود بر نیمرخ برداشت و هم‌امتداد با آن در روی زمینی که دارای تباين مقاومت ویژه با فصل مشترک قائم است، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰- جابه‌جایی آرایه در روی سطح زمینی با تباين قائم مقاومت ویژه، الف: عمود، ب: هم‌امتداد

در شکل ۲-۱۱ الف و ب منحنی‌های مقاومت ویژه حاصل از برداشتها را برای دو حالت یاد شده و در شکل ۲-۱۱ حالتی که $\rho_1 > \rho_2$ است، نشان می‌دهند. منحنی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای حالت عمود بودن امتداد آرایه بر امتداد نیمرخ برداشت (شکل ۲-۱۱ الف) از مقدار ρ_1 در سمت چپ شروع می‌شود و به تدریج با نزدیک شدن به محل فصل مشترک دو لایه به سمت مقدار ρ_2 میل می‌کند. این منحنی در حالتی که الکترودها روی لایه با مقاومت ویژه ρ_2 قرار گرفته و از محدوده فصل مشترک دو

لایه دور می‌شوند، با مقدار ρ_2 مجانب می‌شود. در حالت هم‌امتداد بودن آرایه و نیم‌رخ برداشت و در نتیجه عمود بودن امتداد آرایه بر فصل مشترک دو لایه، منحنی مقاومت ویژه ظاهری (شکل ۲-۱۱-ب) در عبور هر یک از الکترودهای جریان و پتانسیل از محل فصل مشترک دو لایه دچار تغییرات بارزی به صورت پیک‌های مقاومت ویژه می‌شود، که نسبت به حالت قبل کاملاً متمایز است. در حالی که منحنی مقاومت ویژه ظاهری در حالت اول مشابه منحنی گمانه‌زنی قائم دو لایه افقی است، ولی در حالت دوم می‌توان با تغییراتی در آرایش مورد استفاده محل فصل مشترک را از طریق پیک شاخصی که روی منحنی ظاهر می‌شود، تشخیص داد.

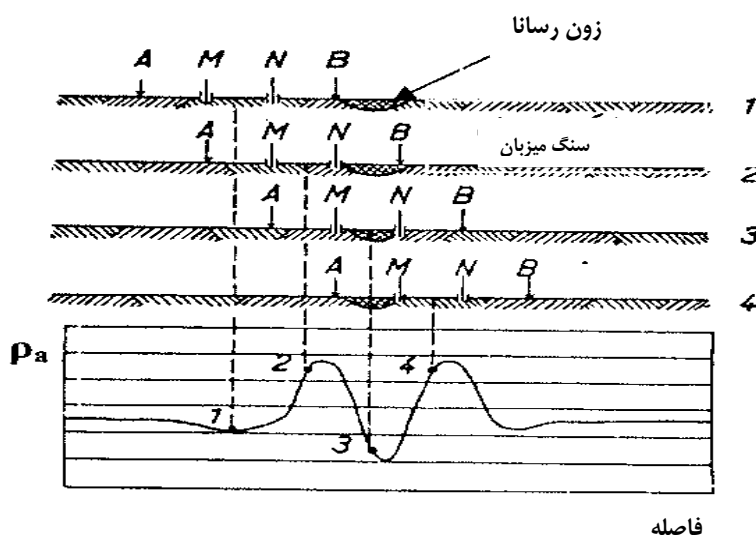


شکل ۲-۱۱- منحنی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری بر روی یک ناهمگونی با فصل مشترک قائم $\rho_1 > \rho_2$ امتداد آرایه عمود بر امتداد نیم‌رخ، ب: هم‌امتداد با آن

۲-۷-۲- اثر ناهمگونی‌های مقاومت ویژه در مطالعات نیم‌رخ‌زنی

ناهمگونی‌های مقاومت ویژه در مواردی مانند مرز جانبی لایه‌ها، گسل‌ها، وجود درزه و شکاف‌ها، رگه‌ها و دایک‌ها و به طور کلی هر عاملی که باعث تغییرات جانبی مقاومت ویژه شود، وجود دارد. در حالتی که امتداد آرایه به گونه‌ای انتخاب شود که فصل مشترک ناهمگونی‌های مقاومت ویژه را قطع کند، مطالعه آن‌ها بهتر از حالت موازی بودن امتداد آرایه و فصل مشترک است. برای توضیح تغییرات مقاومت ویژه در ارتباط با گذر الکترودها از بالای فصل مشترک ناهمگونی‌ها، زون رسانایی در یک سازند مقاوم در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲-۱۲ یک نیم‌رخ مقاومت ویژه با استفاده از آرایه ونر به اجرا در آمده است. مقدار جابه‌جایی آرایه روی نیم‌رخ به اندازه فاصله الکترودی یعنی یک‌سوم طول آرایه انتخاب شده است. در این موارد، چهار حالت زیر ممکن است روی دهد:

الف- الکترودهای جریان B، خیلی نزدیک به زون رسانا قرار دارد. در این حال منحنی‌های هم‌پتانسیل دچار پیچش می‌شوند که این اثر کاهش اختلاف پتانسیل بین الکترودهای پتانسیل M و N را در پی دارد. بنابراین، مقاومت ویژه ظاهری (ρ_a) دارای یک مقدار کمینه در این نقطه می‌شود (شماره ۱ روی منحنی ρ_a). این کاهش به اختلاف مقاومت ویژه زون رسانا و سنگ میزبان و همچنین مقدار حجم زون رسانای موثر روی اندازه‌گیری پتانسیل بستگی دارد.



شکل ۲-۱۲- تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در عبور الکترودها از روی یک زون رسانا

ب- به دلیل وجود زون رسانا افت پتانسیل بین الکترودهای N و B کم می‌شود و به همان نسبت پتانسیل بین M و N افزایش می‌یابد ($\delta V = V_M - V_N$). افزایش اختلاف پتانسیل باعث افزایش مقاومت ویژه ظاهری می‌شود (شماره ۲ روی منحنی ρ_a).

پ- اختلاف پتانسیل بین دو الکترودهای M و N به دلیل قرار گرفتن در دو طرف زون رسانا کم است و در نتیجه مقدار مقاومت ویژه ظاهری به کمترین مقدار خود می‌رسد (نقطه ۳ روی منحنی ρ_a).

ت- این وضعیت در واقع حالت متقارن وضعیت B است و چنانکه در شکل ۲-۱۲ دیده می‌شود، منحنی مقاومت ویژه به یک مقدار بیشینه می‌رسد.

هر چقدر تعداد الکترودهایی که در بالای ناهمگونی قرار می‌گیرند زیادتر و فاصله آن‌ها بیشتر باشد، منحنی هنجار پیچیده‌تری دارد و تعیین محل فصل مشترک دو قسمت ناهمگون مشکل‌تر می‌شود.

۲-۷-۳- آرایه‌های ویژه در مطالعات نیمرخ‌زنی

الف- نیمرخ الکتریکی (نیمرخ شلومبرژه)

این آرایه در واقع آرایه نامتقارن شلومبرژه است که در آن خط فرستنده جریان (AB) ثابت در نظر گرفته می‌شود و اندازه‌گیری در موقعیت‌های مختلف با جابه‌جایی خط گیرنده پتانسیل (MN) با طول ثابت 2b انجام می‌گیرد. 2b تابع حساسیت دستگاه (ρ_a) در اندازه‌گیری پتانسیل و معمولاً مقدار آن کوچک است. علاوه بر آن، میزان متوسط الکتریکی در محدوده یک‌سوم مرکزی خط فرستنده (AB) تغییرات کمی دارد و بنابراین بهتر است که خط (MN) در همین محدوده جابه‌جا شود و اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه انجام گیرد. حالت خاصی که یکی از الکترودهای جریان به فاصله بسیار دوری برده شود نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این صورت آرایه سه قطبی یا قطبی-دوقطبی نامیده می‌شود.

نیمرخ الکتریکی دارای دو مزیت عمده است:

- با ثابت نگه داشتن الکترودهای جریان A و B برای تعداد زیادی از نقاط اندازه‌گیری، زمین پلاریزاسیون یکنواختی خواهد داشت و اثر سیم‌های فرستنده حذف می‌شود.

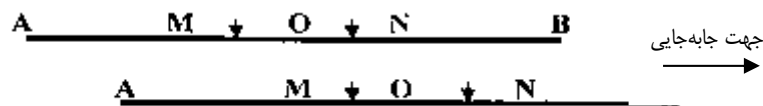
- به دلیل این که الکترودهای جریان ثابت‌اند و فقط الکترودهای پتانسیل جابه‌جا می‌شوند، ضمن افزایش بازه اندازه‌گیری، منحنی مقاومت ویژه ظاهری در ارتباط با اثر فصل مشترک ناهمگونی‌ها (شکل ۲-۱۲) روند منظم‌تری دارد، زیرا فقط دو الکتروود پتانسیل M و N اثر فصل مشترک را قطع می‌کنند.

ب- نیمرخ تکراری مقاومت ویژه

در این آرایه از یک خط فرستنده جریان (AB) استفاده می‌شود و علاوه بر دو الکتروود پتانسیل M و N، الکتروود پتانسیل سوم (O) نیز در مرکز آرایه و با فاصله یکسان از دو الکتروود پتانسیل دیگر قرار می‌دهند (شکل ۲-۱۳). این آرایه در واقع همان آرایه متقارن شلومبرژه است که الکتروود پتانسیل سوم نیز به آن اضافه شده است. در هر ایستگاه دو اندازه‌گیری پتانسیل (δV) به شرح زیر انجام می‌شود:

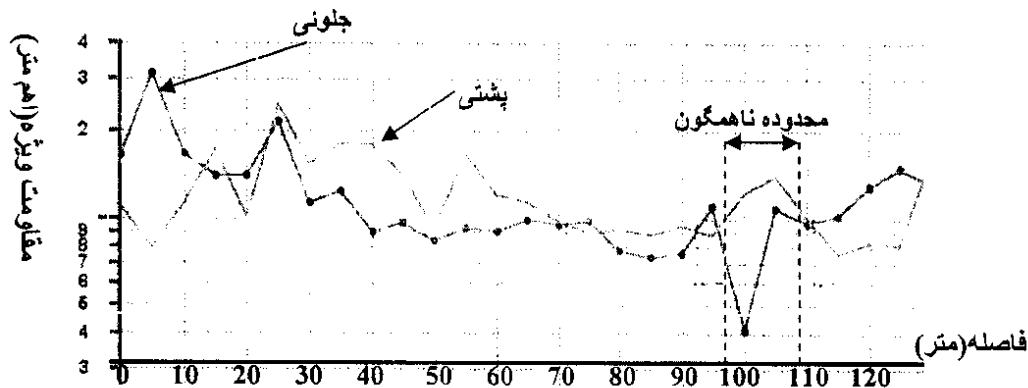
- اختلاف پتانسیل بین الکترودهای O و N که آن را اندازه‌گیری جلویی می‌نامند.

- اختلاف پتانسیل بین الکترودهای O و M که به آن اندازه‌گیری پشتی گفته می‌شود.



شکل ۲-۱۳- آرایه نیمرخ تکراری و چگونگی جابه‌جایی آن

زمانی که اندازه‌گیری در یک ایستگاه انجام می‌گیرد، دو مقدار مقاومت ویژه به دست می‌آید. پس از آن کل آرایه به اندازه فاصله (OM) یا (ON) در امتداد خط آرایه جابه‌جا می‌شود (حالت ۲ روی شکل ۲-۱۳۲) در این صورت محل اندازه‌گیری جلویی حالت دوم منطبق بر محل اندازه‌گیری پشتی حالت اول می‌شود. بدین ترتیب در طول یک نیمرخ، دو منحنی مقاومت ویژه ظاهری (جلویی و پشتی) به دست می‌آید (شکل ۲-۱۴). این منحنی‌ها تا زمانی که سازند مورد مطالعه همگن است، پاسخ یکسانی را از نظر مقاومت ویژه به دست می‌دهند.

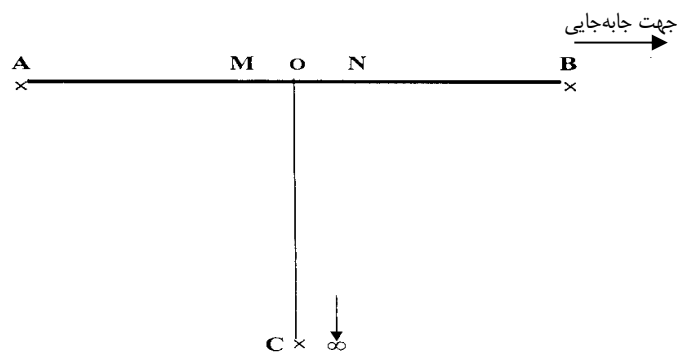


شکل ۲-۱۴- نمونه‌ای از منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری در اندازه‌گیری‌های نیمرخ تکراری

با نزدیک شدن به زون ناهمگن، ضمن تغییر مقاومت ویژه، پاسخ حاصل برای دو منحنی پشتی و جلویی متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب می‌توان با توجه به اختلاف مقاومت ویژه‌ها روی دو منحنی، محل زون ناهمگون را تشخیص داد. به عنوان مثال در شکل ۲-۱۴ یکی از محدوده‌های ناهمگون نشان داده شده است.

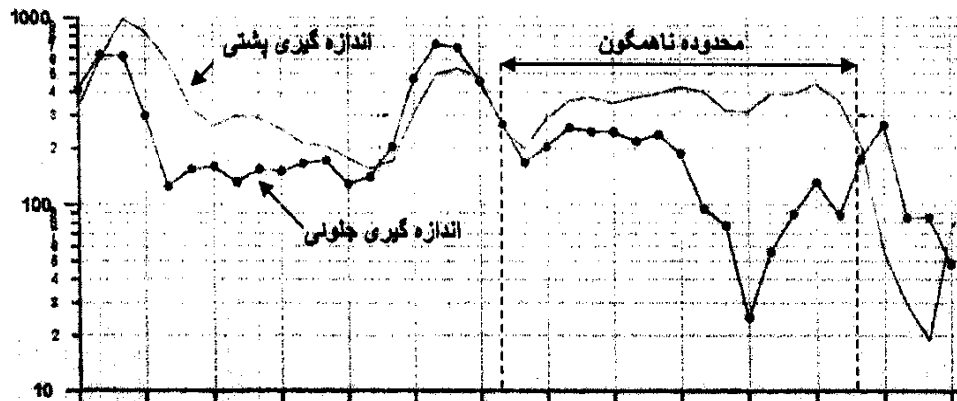
پ- نیمرخ ترکیبی مقاومت ویژه

"نیمرخ ترکیبی مقاومت ویژه" در واقع ترکیبی از دو آرایه قطبی-دوقطبی است که در آن از چهار الکتروود جریان و پتانسیل که در یک امتداد واقع‌اند و یک الکتروود جریان سوم استفاده می‌شود. الکتروود سوم در روی خطی قرار دارد که در مرکز امتداد چهار الکتروود واقع بر امتداد آن‌ها عمود و فاصله آن نیز از مرکز یاد شده زیاد است (شکل ۲-۱۵).



شکل ۲-۱۵- آرایه مورد استفاده در برداشت‌های نیمرخ ترکیبی مقاومت ویژه

فاصله الکتروود C بیش از ده برابر (AB) در نظر گرفته می‌شود، به طوری که اثر آن روی اندازه‌گیری‌ها قابل صرف نظر (کمتر از ۱۰ درصد) باشد. فاصله‌های (AM)، (MN) و (NB) را می‌توان یکسان در نظر گرفت که در این صورت برداشت‌ها آسان‌تر انجام می‌گیرد. با این آرایه همانند روش نیمرخ تکراری، در هر نقطه مانند O، دو اندازه‌گیری مقاومت ویژه یکی اندازه‌گیری جلویی و دیگری اندازه‌گیری پشتی انجام می‌گیرد. این نام‌گذاری بر اساس جهت جابه‌جایی خط (AB) در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۲-۱۵ اندازه‌گیری با استفاده از الکتروودهای جریان B و C جلویی و اندازه‌گیری به کمک الکتروودهای جریان A و C پشتی انجام می‌گیرد. عمق بررسی را بر اساس فاصله الکتروودی (نصف AB) تخمین می‌زنند. مقدار جابه‌جایی خط (AB) (فاصله ایستگاه‌ها) معمولاً به اندازه (MN) انتخاب می‌شود. بدین ترتیب، با این آرایه نیز همانند نیمرخ تکراری، در هر برداشت دو منحنی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری جلویی و پشتی به دست می‌آید. تطابق نسبی این دو منحنی به معنی همگونی زمین مورد مطالعه از نظر مقاومت ویژه است و با رسیدن به محدوده‌های ناهمگون، منحنی‌های مقاومت ویژه جلویی و پشتی جواب‌های متفاوتی آرایه می‌دهند که این موضوع به دلیل فاصله گرفتن دو منحنی از یکدیگر است (شکل ۲-۱۶). بدین ترتیب محل شکستگی‌ها، گسل‌ها، مرزها، رگه‌ها و دیگر ساختارهایی که عامل ایجاد ناهمگونی مقاومت ویژه هستند، مشخص می‌شود.



شکل ۲-۱۶- نمونه‌ای از منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری در برداشت‌های نیم‌رخ ترکیبی

۲-۸- دستگاه‌ها و تجهیزات مورد نیاز در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه

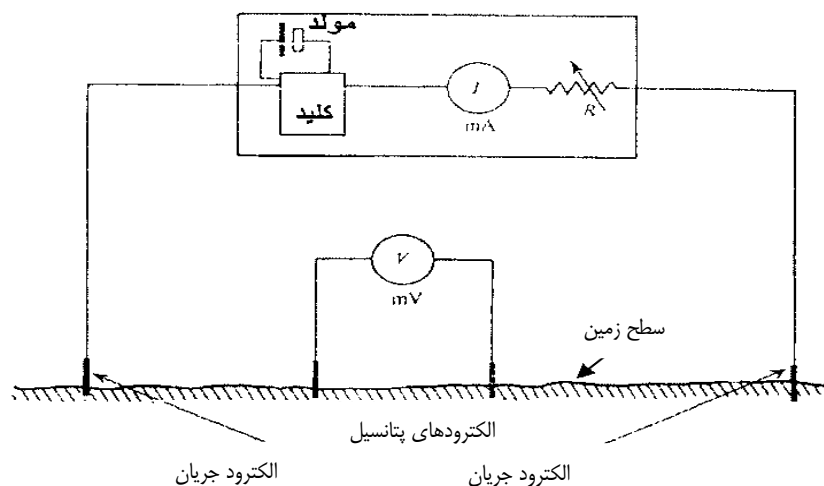
تجهیزات و دستگاه‌هایی که در مطالعات مقاومت ویژه به روش گمانه‌زنی و نیم‌رخ‌زنی به کار می‌روند به شرح زیر است:

- تجهیزات مورد استفاده برای خط فرستنده جریان (AB)

- تجهیزات لازم برای خط گیرنده یا پتانسیل (MN)

روی خط فرستنده، مولد جریان الکتریکی و میلی‌آمپرسنج قرار می‌گیرد. میلی‌آمپرسنج را به طور سری با سیم رابط مولد جریان و الکترودهای (AB) قرار می‌دهند (شکل ۲-۱۷). ولت‌سنج جریان مستقیم یا متناوب با مقاومت ظاهری ورودی زیاد در خط گیرنده قرار می‌گیرد (شکل ۲-۱۷).

لوازم دیگری نیز شامل الکترودها، قرقره‌های جمع‌آوری سیم‌ها، وسایل مورد استفاده برای نگهداری و تعمیر سیم‌ها و نیز دستگاه‌هایی برای کنترل دستگاه‌های اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۱۷- تجهیزات اندازه‌گیری مقاومت ویژه

۲-۸-۱- مولدهای جریان الکتریکی

در حالت استفاده از جریان مستقیم می‌توان مجموعه‌ای از باطری‌ها (۴۵ تا ۹۰ ولت) را به طور سری به هم متصل کرد. این مولدها از نظر جریان محدوداند و عمر کوتاهی دارند. تنها مزیت آن‌ها حمل ساده است. برای مطالعه در مقیاس بزرگ، به کارگیری یک مولد برق با ظرفیت چند صد وات توصیه می‌شود. قابلیت حمل این دستگاه‌ها آسان نیست و در نتیجه با هر تغییر مکان الکترودها، جابه‌جا نمی‌شوند. برای جلوگیری از اثر قطبش (پلاریزاسیون) الکترولیتی که به دلیل انتشار جریان در یک جهت ایجاد می‌شود، قطبیت جریان مستقیم باید به تناوب معکوس شود. این عمل به صورت دستی با استفاده از یک کلید معکوس‌کننده یا به وسیله مبدل مکانیکی انجام می‌گیرد. این تبدیل ممکن است گستره‌ای از چهار بار در دقیقه تا صد بار در ثانیه داشته باشد. در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه، می‌توان از جریان متناوب نیز به جای جریان مستقیم تبدیل شده استفاده کرد. یک نوسان‌کننده ترانزیستوری موج سینوسی با فرکانس پایین همراه مبدلی با خروجی چند وات، منبع قابل حمل مناسبی را تشکیل می‌دهد. برای ایجاد توان‌های بیشتر می‌توان از جریان متناوب استفاده کرد. منبع جریان مستقیم امکان اندازه‌گیری مقاومت ویژه DC یا مقاومت ویژه واقعی را فراهم می‌سازد و در عین حال، پتانسیل‌های خودزا را نیز اندازه می‌گیرد. برای حذف پتانسیل‌های خودزا که خود ممکن است یکی از اهداف اندازه‌گیری به عنوان یکی از روش‌های ژئوالکتریکی باشد، به جای الکترودهای معمول از الکترودهای ویژه‌ای به صورت ظرف‌های گلدانی شکل خلل و فرج‌دار برای اندازه‌گیری پتانسیل استفاده می‌شود. در این حالت، پیش از اتصال جریان الکتریکی به زمین، پتانسیل خودزا اندازه‌گیری و یادداشت شده و سپس از مقدار پتانسیل حاصل پس از تزریق جریان الکتریکی کم می‌شود. در صورتی که مقدار پتانسیل خودزا به عنوان اندازه‌گیری مورد نظر نباشد، می‌توان به کمک یک ولتاژ جبران‌کننده پیش از تزریق جریان به زمین آن را حذف کرد.

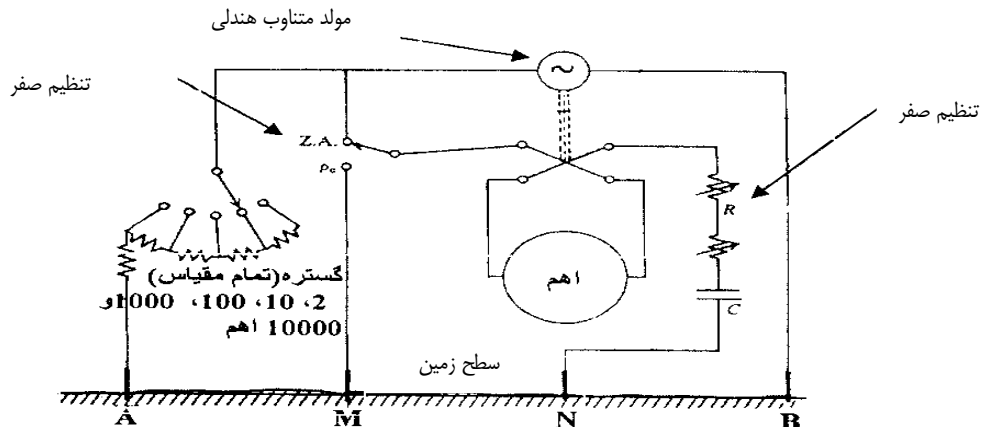
۲-۸-۲- دستگاه اندازه‌گیری

مجموعه‌ای از سنج‌ها (ولتاژ و جریان)، محل وصل سیم‌های جریان (AB) و پتانسیل (MN) و همچنین قسمت‌هایی برای اندازه‌گیری و حذف پتانسیل یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه را تشکیل می‌دهند. در بعضی از این دستگاه‌ها، جریان به کمک یک تنظیم‌کننده ثابت نگهداشته می‌شود، که بدین ترتیب اندازه‌گیری جریان حذف می‌شود. در برداشتهای مقاومت ویژه اغلب از دستگاه دیگری که نسبت پتانسیل به جریان یعنی مقاومت الکتریکی را اندازه‌گیری می‌کند استفاده می‌شود.

توان مورد نیاز از یک مولد جریان مستقیم هندلی^۱ یا مغناطیسی تامین می‌شود، که خروجی آن حدود ۱۰۰ ولت و یک پیچک جریان مستقیم به طور سری به یک طرف آن وصل شده است. جریان خروجی پس از تغییر جهت به وسیله شفت^۲ مولد، به الکترودهای جریان داده می‌شود. آهنگ معکوس شدن جریان ده تا پنجاه بار در ثانیه به وسیله یک تنظیم‌کننده اعمال می‌شود. الکترودهای پتانسیل به یک تغییر جهت دهنده دوم متصل‌اند که با تغییر جهت دهنده اول (شفت) هم‌زمان می‌شوند و پتانسیل جریان متناوب را پس از یک سو کردن به پیچک پتانسیل می‌دهند. پیچک پتانسیل با پیچک جریان به گونه‌ای نصب می‌شوند که انحراف عقربه دستگاه متناسب با نسبت V/I شود (شکل ۲-۱۸).

1- Hand cranking

2- Shaft



شکل ۲-۱۸- دستگاه قابل حمل اندازه‌گیری مقاومت ویژه

۲-۸-۳- الکترودها

در مطالعات ژئوالکتریک معمولاً از الکترودهایی استفاده می‌شود که اغلب به صورت استوانه کشیده (میله‌ای) و یا منشورهای با سطح مقطع مربعی‌اند. جنس فلز این الکترودها برای مولدهای با جریان متناوب از فولاد، آلومینیوم یا برنج است. برای حالتی که از جریان مستقیم استفاده می‌شود، بهتر است الکترودهای گلدانی شکل خلل و فرج‌دار به کار گرفته شوند. معمولی‌ترین الکترودهایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند، نوع میله‌ای با طول نیم تا یک متر و به صورت میخ‌هایی هستند که به دلیل کوبیدن مکرر آن‌ها به زمین باید از فلزی محکم ساخته شوند. برای انتشار مناسب جریان تزریقی مقاومت زمین در اطراف الکترودها نباید زیاد باشد و بنابراین با کوبیدن الکترودها به زمین باید تا حد امکان آن‌ها را به محدوده مرطوب زمین نزدیک کرد. در صورتی که زمین در محدوده مورد مطالعه خشک و در نتیجه مقاومت بالایی داشته باشد، می‌توان با ریختن مخلوط آب با نمک مقاومت زمین اطراف الکترودها را کاهش داد.

۲-۸-۴- کابل‌ها و قرقره‌های جمع‌آوری کابل‌ها

برای خطوط فرستنده جریان با طول خط کوتاه (کمتر از ۵۰۰ متر) می‌توان از کابل‌هایی شامل سیم مسی با سطح مقطع ۰/۵ میلی‌متر مربع و روکش نازکی از مواد پلاستیکی (پلی‌وینیل) استفاده کرد. این نوع روکش علاوه بر این که مقاومت کمی در مقابل سایش دارد، در هوای سرد سخت و شکننده می‌شود. وزن این نوع کابل ۷ کیلوگرم در هر کیلومتر است. به طور معمول استفاده از کابل‌هایی با مشخصات سطح مقطع ۱ میلی‌متر و پوشش مقاوم توصیه می‌شود. ضمن اجرای گمانه‌زنی قائم و نیمرخ‌های مقاومت ویژه، برای جمع‌آوری کابل‌ها بسته به چگونگی امکان جابه‌جایی در روی زمین از قرقره‌های پایه‌دار و یا دارای چرخ استفاده می‌شود. برای خط پتانسیل نیز اغلب از همان کابل‌هایی که برای خط فرستنده توضیح داده شد، استفاده می‌شود.

شرایط مطلوب برای گمانه‌زنی قائم‌الکتریکی آن است که گسترش آرایه مورد استفاده در امتداد خطی مستقیم انجام گیرد. اگر خط آرایه به صورت بارزی از حالت مستقیم خارج شده و تصحیحی برای آن منظور نشود، خطای مربوط در داده‌ها باعث ایجاد قسمت‌های تیز (پیک) در منحنی مقاومت ویژه ظاهری می‌شود. این خطاها در واقع حاصل نادرستی ضریب‌های آرایه در محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری است. وجود چنین پیک‌هایی در منحنی مقاومت ویژه ظاهری، در صورتی که عامل آن مشخص نشود، از نظر تفسیری مشکل‌آفرین و ممکن است با مسایل مربوط به ناهمگونی‌های جانبی اشتباه شود.

در روش نیمرخ‌زنی، اگر ضریب آرایه مورد استفاده در محاسبه مقاومت ویژه ظاهری دقیق باشد، نیمرخ حاصل از نظر تفسیر دچار مشکل خاصی نخواهد شد. بدین ترتیب همیشه باید علاوه بر ثبت داده‌ها در سر زمین با تکیه بر یادداشتهای مناسب به منظور دستیابی به اطلاعات صحیح اقدام کرد.

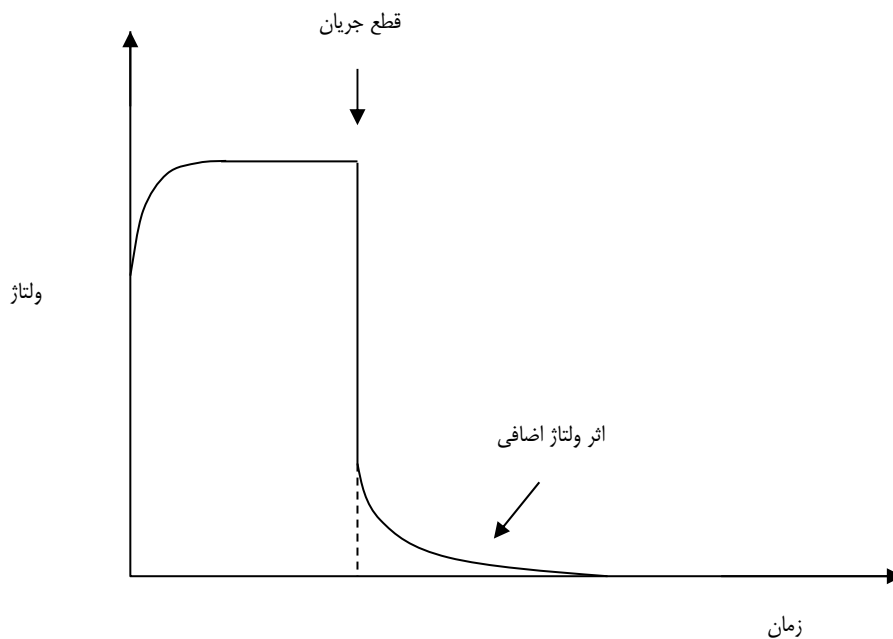
فصل ۳

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی

به روش پلاریزاسیون القایی

۱-۳- آشنایی

اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی (IP) با استفاده از آرایه‌های گفته شده برای مقاومت ویژه که شامل دو الکتروود تزریق جریان و دو الکتروود پتانسیل غیرقابل پلاریزه است، انجام می‌گیرد. زمانی که جریان تزریقی به زمین قطع می‌شود، پتانسیل بین دو الکتروود پتانسیل طی یک زمان محدود (در حد ثانیه تا دقیقه) از مقدار بیشینه خود به صفر می‌رسد (شکل ۱-۳) که این پدیده وابسته به انبارش بار الکتریکی در زمین است و در واقع زمین به نوعی نقش یک خازن الکتریکی را بازی می‌کند. چگونگی واپاشی یا زوال پتانسیل پس از قطع جریان، جدا از اثر دستگاهی، به عوامل زمین‌شناسی نیز مرتبط است.



شکل ۱-۳- اثر ولتاژ اضافی که پدیده پلاریزاسیون القایی (IP) پس از قطع جریان ایجاد می‌کند.

۲-۳- منشأ پدیده پلاریزاسیون القایی (IP)

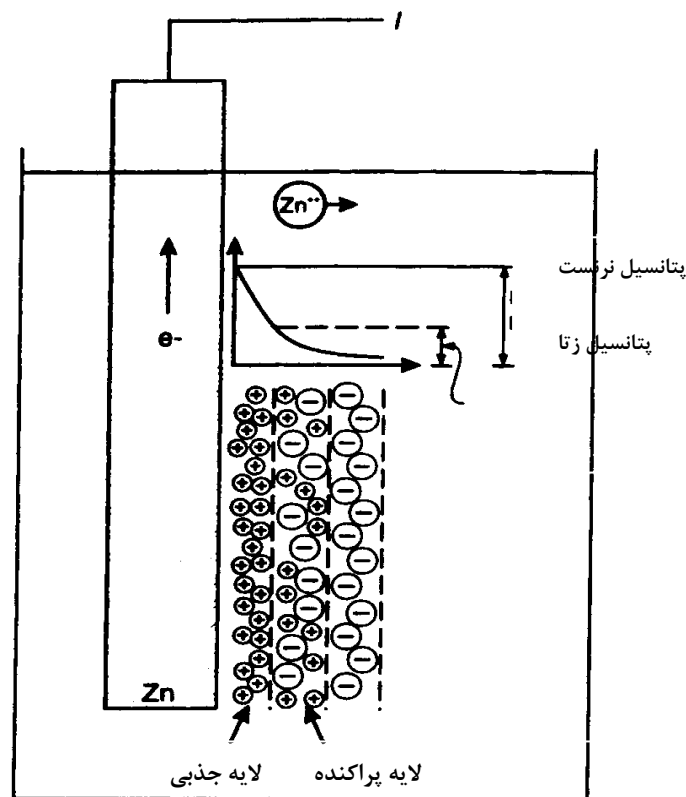
دو ساز و کار اصلی که پدیده پلاریزاسیون القایی (IP) را توجیه می‌کند، پلاریزاسیون فلزی (الکتروودی) و پلاریزاسیون غشایی (الکترولیتی) اند که هر دو در ارتباط با پدیده‌های الکتروشیمیایی هستند.

۱-۲-۳- پلاریزاسیون فلزی

اگر یک الکتروود فلزی بدون اعمال ولتاژ در یک محلول یونیزه قرار گیرد، بارهای الکتریکی مثبت و منفی از هم جدا می‌شوند و پتانسیلی را بین الکتروود و محلول ایجاد می‌کنند (شکل ۲-۳). پتانسیل کلی ایجاد شده را پتانسیل نرنست^۱ و بخش مربوط به پتانسیل لایه جذب سطحی الکتروود را پتانسیل زتا^۲ می‌نامند.

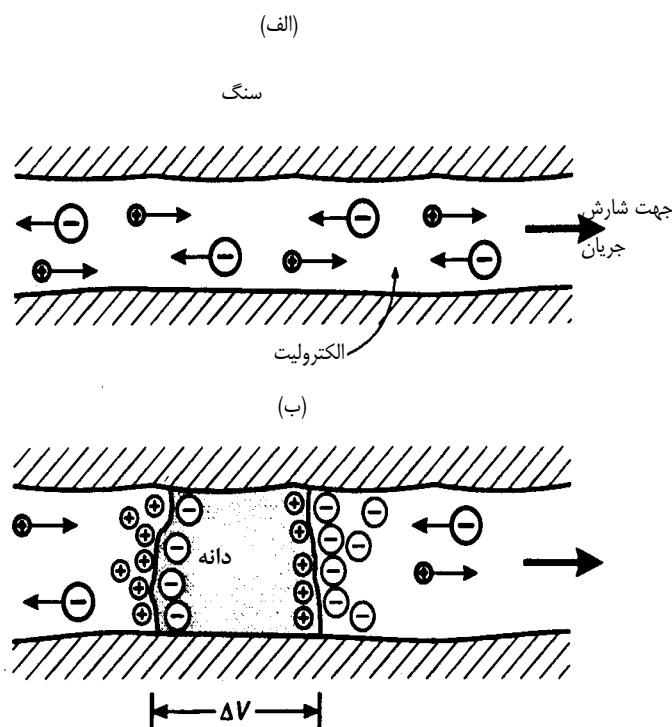
1- Nernst

2- Zeta



شکل ۳-۲- پدیده پلاریزاسیون الکترودی و روند فیزیکی تشکیل آن

زمانی که به این مجموعه ولتاژی اعمال می‌شود، تعادل یونی به هم می‌خورد و در نتیجه باعث شارش جریان می‌شود که تغییر اختلاف پتانسیل بین الکتروود و محلول را به دنبال دارد. هنگامی که ولتاژ اعمال شده، حذف می‌شود، تعادل یونی به واسطه پخش یون‌ها دوباره برگردانده می‌شود. انتشار جریان در زمین در اثر حرکت یون‌ها از طریق آب زیرزمینی موجود در خلل و فرج مرتبط به هم، شکستگی‌ها و ریزدنده‌های موجود در یک سنگ انجام می‌گیرد. زمانی که دانه‌ای رسانا (مانند یک سولفید فلزی) یک کانال شارش جریان را می‌بندد، یک سلول الکتروشیمیایی از بار الکتریکی ساخته می‌شود (شکل ۳-۳) که در تقابل با شارش جریان قرار می‌گیرد و دانه فلزی پلاریزه می‌شود. بدین ترتیب، اختلاف پتانسیلی در دو طرف دانه فلزی به وجود می‌آید. با قطع ولتاژ اولیه، یون‌ها از طریق محیط الکترولیتی پخش می‌شوند و اختلاف پتانسیل ایجاد شده در دانه فلزی، طی زمان کوتاهی به سمت صفر میل می‌کند. این فرآیند مبنای اندازه‌گیری واپاشی ولتاژ در روش اندازه‌گیری زمان-حوزه‌ای است.

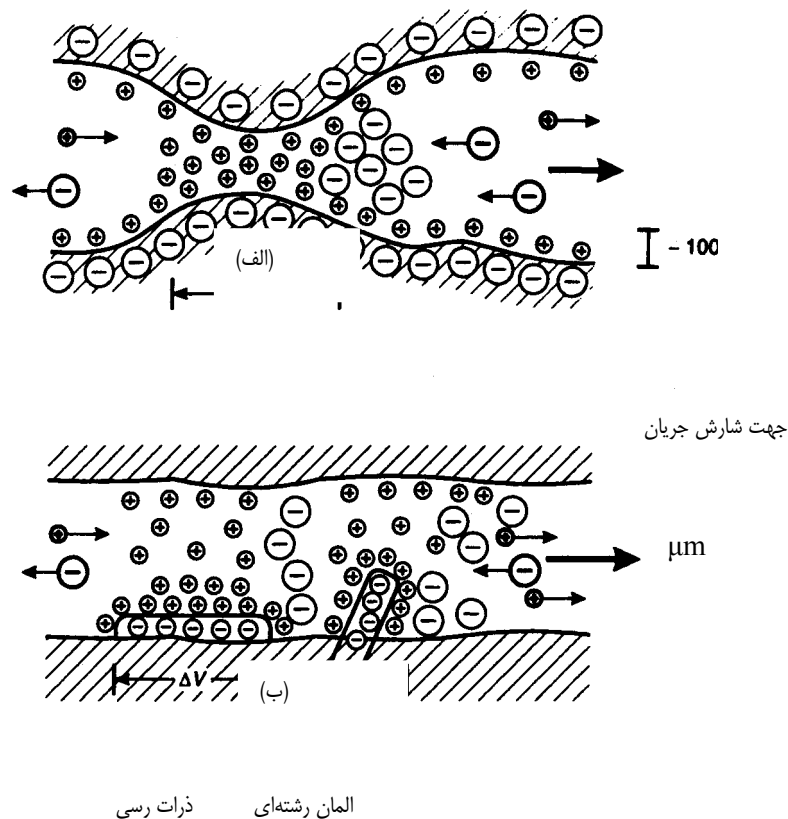


شکل ۳-۳- پلاریزاسیون الکترودی، الف: شارش بدون مانع الکترولیت در یک کانال باز
ب: پلاریزاسیون یک دانه رسا که در کانال ارتباطی سنگ قرار گرفته است.

پلاریزاسیون دانه‌ها به طور عمده یک پدیده سطحی است و این موضوع دلیلی بر پاسخ قابل توجه پلاریزاسیون القایی (IP) برای کانی‌سازی‌های فلزی پراکنده است که یکی از مزیت‌های عمده این روش نسبت به سایر روش‌های الکتربیکی است.

۳-۲-۲- پلاریزاسیون غشایی (الکترولیتی)

پلاریزاسیون غشایی که معمولاً پلاریزاسیون القایی (IP) زمینه را در یک محدوده اکتشافی تشکیل می‌دهد در ارتباط با کانی‌های غیرفلزی تولید می‌شود. ولتاژ اضافی در اثر این پدیده در مواردی ممکن است با ولتاژ مرتبط با کانی‌سازی‌های فلزی ضعیف یکسان شود که در این صورت تفکیک آن‌ها با روش‌های پلاریزاسیون القایی (IP) معمولی (زمان - حوزه‌ای و فرکانس - حوزه‌ای) مشکل است. برای پلاریزاسیون غشایی یا الکترولیتی دو علت وجود دارد، یکی تنگ شدن مقطع کانال‌های ارتباطی خلل و فرج و دیگری حضور کانی‌های رسی در این کانال‌ها مانند ماسه‌سنگ‌های رسی است. بین مرز بخش جامد سنگ (کانی‌ها) و الکترولیت داخل خلل و فرج سنگ بار منفی مشخصی انبار می‌شود. بدین ترتیب، بارهای مثبت الکترولیت به سمت سطح فصل مشترک بخش جامد و آب‌دار سنگ جذب شده و لایه بسیار نازکی از بار مثبت با ضخامت حدود ۱۰۰ میکرومتر تشکیل می‌شود و این در حالی است که بارهای منفی داخل الکترولیت از سطح فصل مشترک رانده می‌شوند (شکل ۳-۴-الف). زمانی که قطر کانال ارتباطی در قسمتی از این کانال کاهش می‌یابد، در حالی که جریانی به زمین اعمال می‌کنند، این تنگ‌شدگی مانع شارش یون‌ها می‌شود. یون‌های منفی زون تنگ شده را ترک می‌کنند، در حالی که یون‌های مثبت در این زون افزایش می‌یابد و در نتیجه در طول این زون اختلاف پتانسیلی به وجود می‌آید (شکل ۳-۴-الف).



شکل ۳-۴- گسترش پلاریزاسیون غشایی، الف: یک تنگ‌شدگی در قسمتی از یک کانال ارتباطی ب: بار منفی حاصل از ذرات رسی و المان رشته‌ای موجود در دیواره کانال ارتباطی

زمانی که جریان تزریقی قطع می‌شود، عدم تعادل به وجود آمده در تمرکز یون‌ها برای برگشت به حالت عادی خود، باعث ایجاد پتانسیل IP می‌شود. دومین علت پلاریزاسیون غشایی مربوط به حضور ذرات پراکنده رس یا کانی‌های رشته‌ای است که باعث تمرکز بارهای منفی می‌شوند (شکل ۳-۴-ب). جذب یون‌های مثبت به طرف این بارهای منفی، تمرکزی از بارهای مثبت را در خلل و فرج و بخش‌های رس‌دار و کانی‌های رشته‌ای به وجود می‌آورد. زمانی که جریان الکتریکی در چنین سنگی تزریق می‌شود، بارهای مثبت جابه‌جا می‌شوند، در حالی که بارهای منفی به دام می‌افتند (شکل ۳-۴-ب). با قطع جریان الکتریکی، بازگشت توزیع یون‌های مثبت و منفی به حالت اولیه باعث ایجاد پاسخ پلاریزاسیون القایی (IP) در اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۳- اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی

برای اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی (IP) چهار روش به شرح زیر وجود دارد:
 - روش زمان-حوزه‌ای (پالس گذرا) که در آن ولتاژ اضافی بر حسب تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌شود.
 - روش فرکانس-حوزه‌ای که در آن مقاومت ویژه ظاهری در دو یا تعداد بیشتری از فرکانس‌های مختلف (به طور معمول کمتر از ۱۰ هرتز) اندازه‌گیری می‌شود.

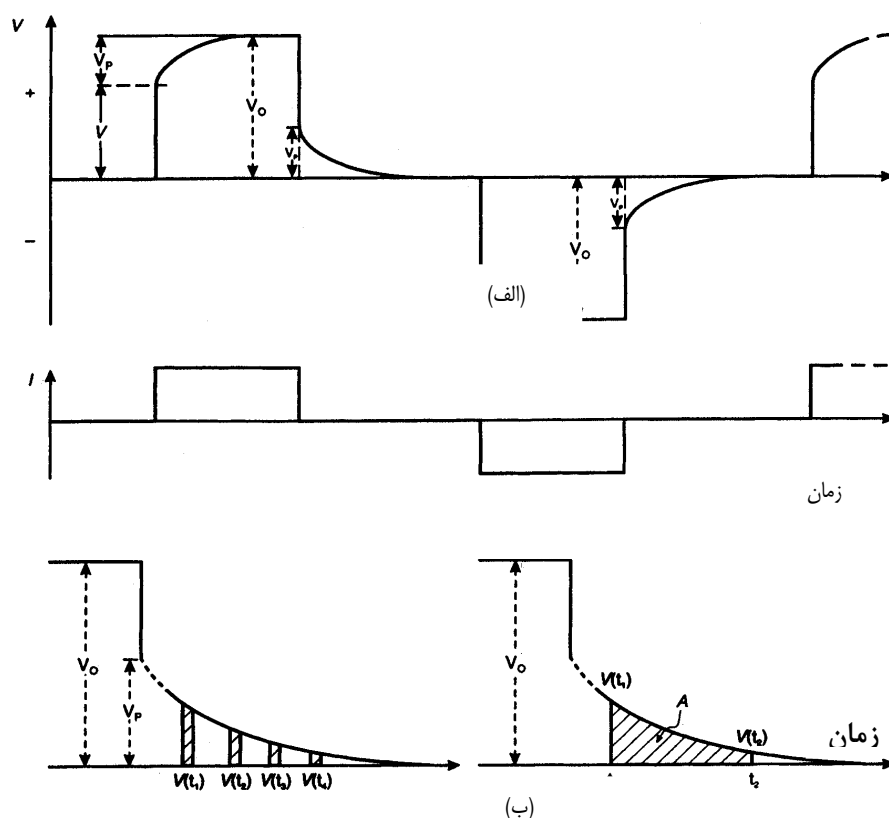
- روش فاز-حوزه‌ای که تاخیر فاز بین جریان تزریقی و ولتاژ اندازه‌گیری شده، هدف اندازه‌گیری است و امکان شناخت ماهیت کانی‌سازی زیرسطحی را فراهم می‌سازد.

- طیف IP که اندازه‌گیری فاز و شدت پتانسیل در گستره فرکانسی 10^{-3} تا 4×10^3 هرتز اندازه‌گیری می‌شود.

این اندازه‌گیری‌ها از طریق دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل (چهارقطبی) و دو روش اندازه‌گیری معمول که شرح آن‌ها در ادامه آمده است، انجام می‌گیرد.

۳-۳-۱- روش زمان-حوزه‌ای (اندازه‌گیری با جریان پیوسته)

زمانی که جریان پیوسته‌ای طی مدتی کوتاه به زمین تزریق شده و پس از شارژ شدن زمین قطع می‌شود، ولتاژ اضافی (V_p) ایجاد شده طی مدت کوتاهی پس از قطع جریان به مقدار صفر می‌رسد (شکل ۳-۵-الف). مقدار پتانسیل مشاهده شده در حالت شارژ زمین شامل دو قسمت است، یکی پتانسیل حقیقی مربوط به جریان تزریق شده و دیگری ولتاژ اضافی که حاصل اثر پلاریزه شدن زمین است. زمانی که جریان قطع می‌شود، کل پتانسیل ابتدا به صورت لحظه‌ای به اندازه V (شکل ۳-۵-الف) کاهش می‌یابد و سپس ولتاژ اضافی به صورت یک منحنی واپاشی طی زمانی که تخلیه یا دشارژ نامیده می‌شود، به صفر می‌رسد. به طور معمول اندازه‌گیری پتانسیل روی منحنی واپاشی در زمان کوتاهی پس از قطع جریان انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۵- اندازه‌گیری پلاریزاسیون القایی (IP) در روش زمان-حوزه‌ای، الف: منحنی‌های تغییرات پتانسیل در حالت شارژ و دشارژ و تغییرات جریان تزریقی، ب: دو پارامتری که در اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون القایی (IP) از آن‌ها استفاده می‌شود.

از نظر دستگاهی اندازه‌گیری پتانسیل در لحظه قطع جریان امکان‌پذیر نیست. علاوه بر آن، در لحظه قطع جریان آثار القایی پارزیتی نیز شدید است، بنابراین زمان اندازه‌گیری پتانسیل IP که به آن زمان نمونه‌برداری می‌گویند، لحظه‌ای پس از قطع جریان و به طور معمول حدود ۰/۵ ثانیه است. اگر پتانسیل اندازه‌گیری شده در زمان t (پس از قطع جریان) برابر V_t باشد، نسبت این پتانسیل به مقدار پتانسیل در حالت شارژ (V_0) در هر نقطه یکی از پارامترهای اندازه‌گیری IP است (شکل ۳-۵-ب) که آن را بارپذیری (M) می‌نامند که از رابطه ۳-۱ محاسبه می‌شود:

$$M = V_t / V_0 \quad (۱-۳)$$

در صورتی که پتانسیل‌های ولتاژ اضافی را در پریودهای کوتاه (۰/۱ ثانیه) و در یک فاصله زمانی حدود ۰/۵ ثانیه اندازه‌گیری کرده و از نسبت حاصل جمع آن‌ها به پتانسیل V_0 استفاده کنیم، پارامتر دیگری به دست می‌آید که آن را بارپذیری ظاهری (Ma) می‌نامند.

$$M_a = \left(\frac{1}{V_0} \right) \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt = A / V_0 \quad (۲-۳)$$

که در آن:

A عبارت سطح زیر منحنی دشارژ در فاصله زمانی t_1 و t_2 (شکل ۳-۵-ب)

اندازه‌گیری بارپذیری حقیقی در هر نقطه عملاً امکان‌پذیر نیست، زیرا آنچه به عنوان پاسخ زمین دریافت می‌شود حاصل اثر بارپذیری مطلق و مقاومت ویژه حقیقی مجموعه لایه‌ها و سنگ‌هایی است که بر اساس حجم مورد تجسس دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. شدت IP با افزایش زمان شارژ افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هر چه زمان تزریق جریان در یک نقطه کوتاه‌تر باشد، مقدار ولتاژ اضافی کمتر است (شکل ۳-۵). به عنوان مثال با یک زمان شارژ ۳ ثانیه، جمع بارپذیری ظاهری (Ma) در یک دوره زمانی یک ثانیه برای عیار ۱ درصد حجمی از چند کانی در زیر داده شده است:

- کالکوسیت: ۱۳/۲ میلی ثانیه

- بورنیت: ۶/۳ میلی ثانیه

- گرافیت: ۱۱/۲ میلی ثانیه

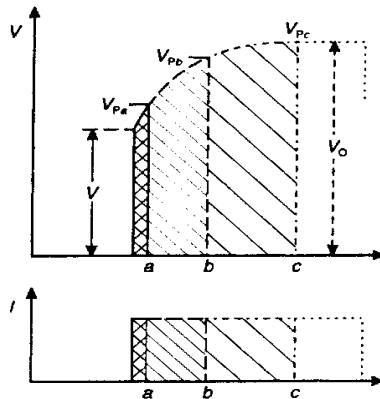
- منیتیت: ۲/۲ میلی ثانیه

- هماتیت: صفر

مزیت اصلی پارامترهای بارپذیری ظاهری آن است که اثر نوفه حاصل از جفت‌شدگی متقاطع کابل‌ها و پتانسیل زمینه را کاهش می‌دهد. انتخاب فاصله زمانی مناسب اندازه‌گیری پارامتر Ma بدون این که کارایی روش در تشخیص اهداف اکتشافی را کاهش دهد، باعث افزایش نسبت سیگنال به نوفه می‌شود.

۳-۳-۲- روش فرکانس-حوزه‌ای (اندازه‌گیری با فرکانس متغیر)

در این روش، مقاومت ویژه ظاهری در دو فرکانس مختلف کمتر از ۱۰ هرتز (به طور معمول ۰/۱ و ۵ هرتز یا ۰/۳ و ۲/۵ هرتز) با همان آرایه‌های گفته شده در روش زمان-حوزه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت ویژه ظاهری سنگ در فرکانس پایین‌تر (ρ_{af}) بیشتر از مقدار نظیر آن در فرکانس بالاتر (ρ_{af}) است (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- افزایش زمان شارژ (کاهش فرکانس) باعث افزایش ولتاژ اضافی می‌شود.

به طوری که در شکل ۳-۶ دیده می‌شود، کاهش فرکانس به معنای افزایش زمان شارژ است که در این صورت مقدار پتانسیل و به دنبال آن مقاومت الکتریکی (R) افزایش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن جریان اعمال شده، مقاومت ویژه ظاهری از رابطه ۳-۳ محاسبه می‌شود.

$$\rho_a = KR \quad (3-3)$$

بنابراین افزایش R، باعث افزایش مقاومت ویژه ظاهری می‌شود.

در روش فرکانس-حوزه‌های پارامتر اثر فرکانس (FE) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FE = (\rho_{af} - \rho_{aF}) / \rho_{aF} \quad (4-3)$$

اثر فرکانس (FE) بدون واحد بوده و می‌توان از درصد اثر فرکانس (PFE) نیز استفاده کرد:

$$PFE = 100 FE \quad (5-3)$$

پارامتر دیگری با نام ضریب فلزی (MF) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MF = A(\rho_{af} - \rho_{aF}) / \rho_{af} \quad (6-3)$$

$$\rho_{aF} = A(\sigma_{aF} - \sigma_{af}) \quad (7-3)$$

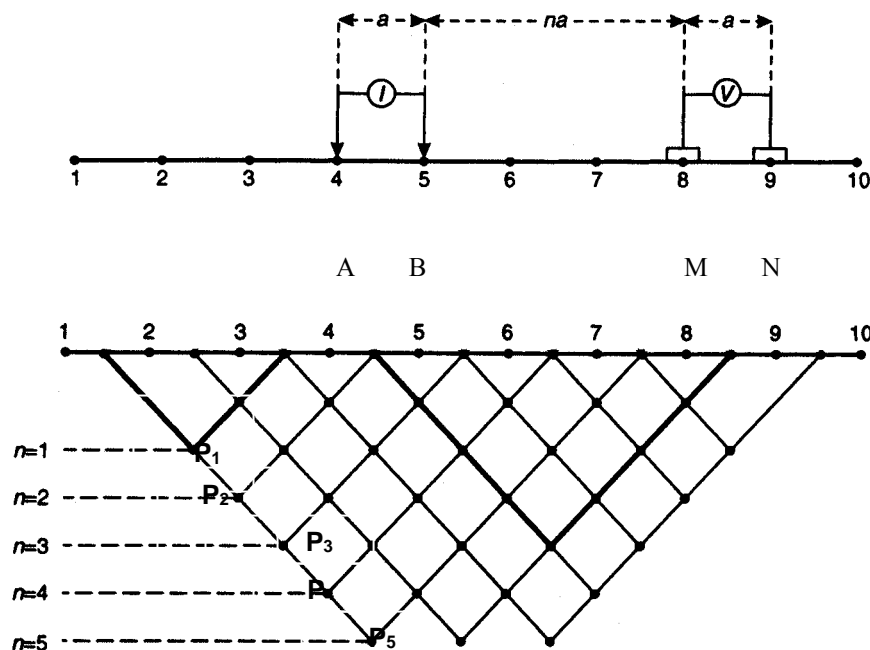
که در آن σ_{aF} و σ_{af} به ترتیب رسانندگی ظاهری در فرکانس بالا و پایین و A ضریب ثابتی برابر $2\pi \cdot 10^5$ است.

پارامترهای بارپذیری ظاهری، اثر فرکانس و ضریب فلزی در شناسایی کانی‌سازی‌های فلزی (به صورت پیوسته و پراکنده) کاربرد دارند، اما قادر به تخمین عیار و ماهیت کانی‌سازی نیستند.

۳-۴- آرایه‌های مورد استفاده و چگونگی برداشت‌های پلاریزاسیون القایی (IP)

تقریباً همیشه اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه همراه برداشت‌های IP انجام می‌گیرد. برداشت‌ها به طور معمول در دو مرحله و با استفاده از دو آرایه انجام می‌گیرد. در مرحله اول از آرایش مستطیلی استفاده می‌شود و پس از آن برای شناخت روند دقیق‌تر کانی‌سازی (گسترش جانبی و عمقی)، آرایه دوقطبی-دوقطبی را به کار می‌برند. بر روی یک نیمرخ برداشت فاصله‌های ۱، ۲، ۳ و ...

با توجه به طول دوقطبی‌ها (a) که برای انتخاب شده است، پیاده می‌شوند (شکل ۳-۷). اگر برداشت‌ها از سمت چپ به راست مد نظر باشد، ابتدا الکترودهای جریان (A) و (B) روی نقاط ۱ و ۲ و الکترودهای پتانسیل (M) و (N) روی نقاط ۳ و ۴ قرار می‌گیرند. در این حالت مقدار n برابر یک است و نقطه اندازه‌گیری از محل برخورد خط‌هایی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به نیم‌رخ برداشت از مرکز (AB) و (MN) رسم می‌شوند، به دست می‌آید (نقطه P₁ در شکل ۳-۷). پس از آن با ثابت نگه داشتن دوقطبی جریان AB، دوقطبی پتانسیل (MN) به نقاط ۴ و ۵ برده می‌شوند (n=2) و بدین ترتیب با توجه به افزایش طول آرایش، نقطه اندازه‌گیری بازتاب عمق بیشتر (نقطه P₂) خواهد بود. بدین ترتیب با ادامه این روند (افزایش n) عمق‌های بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد (نقاط P₃، P₄ و P₅). انتخاب حد بالایی n وابسته به قدرت دستگاه، شرایط زمین از نظر مقاومت ویژه و عمق احتمالی هدف مورد مطالعه است. پس از پوشش زمین تا عمق مورد نظر، دوقطبی جریان (AB) به نقاط ۲ و ۳ منتقل می‌شود و مراحل برداشت همانند حالت قبل (دوقطبی (AB) روی نقاط ۱ و ۲) تکرار می‌شود. شکل ۳-۷ چگونگی اجرای آرایه دوقطبی-دوقطبی برای تهیه شبه مقطع عمق IP را نشان می‌دهد. بدین ترتیب با این روند برداشت می‌توان شبه مقطع عمق را برای داده‌های IP و مقاومت ویژه به دست آورد. بدیهی است که عمق نقاط برداشت در این روش تقریبی و به طور مشخص به مقاومت ویژه رولایه، قدرت دستگاه و طول آرایه (a و n) وابسته است. به عنوان مثال عمق بررسی (p) به طور تقریبی به ازای چند مقدار n در زیر داده شده است:



شکل ۳-۷- چگونگی اجرای آرایه دوقطبی-دوقطبی برای تهیه شبه مقطع عمق

$$p \approx a/2 \quad , \quad n=2$$

$$p \approx a \quad , \quad n=3$$

$$p \approx 2a \quad , \quad n=4$$

۳-۵- تفسیر داده‌های پلاریزاسیون القایی (IP) و مقاومت ویژه

برای تفسیر کیفی نقشه و مقاطع IP و مقاومت ویژه، پس از تعیین مقدار مناسب IP زمینه، می‌توان محدوده آنومالی‌های IP را مشخص کرد، اما ارزیابی و اولویت‌بندی این آنومالی‌ها به تجربه و دانش کارشناس خبره بستگی دارد. در این مورد استفاده از داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و کلیه اطلاعات موجود اعم از زمین‌شناسی، ژئوشیمی، معدنی و دیگر اطلاعات ژئوفیزیکی کمک‌های قابل توجهی در این راستا است.

به طور کلی حداقل اطلاعات مورد انتظار پس از تفسیر این داده‌ها، عبارتند از:

- تعیین محل آنومالی‌ها و تخمینی از گسترش احتمالی آن‌ها

- اولویت‌بندی آنومالی‌های معرفی شده از نظر گسترش حجمی و عیار

- معرفی محل‌های حفاری و اولویت‌بندی نقاط حفاری

تلفیق اطلاعات ژئوفیزیکی و داده‌های اکتشافی تکمیلی دیگر، در کاهش ریسک حفاری‌های بی‌حاصل نقش مهمی دارد و بنابراین، نقشه شبکه حفاری نهایی باید با مشاوره دیگر متخصصان اکتشافی مانند زمین‌شناسی، ژئوشیمی و نظایر آن‌ها طراحی و ارزیابی شود.

فصل ۴

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی

به روش الکترومغناطیسی

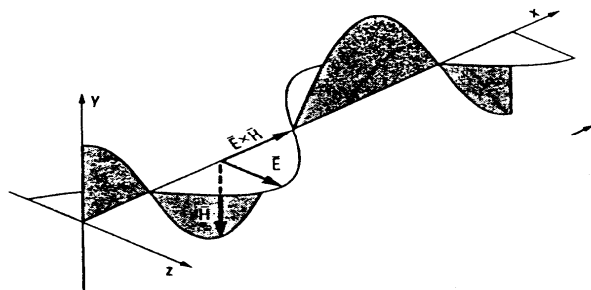
۴-۱- آشنایی

در این روش از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی و به طور گسترده‌تر از میدان‌هایی که به وسیله فرستنده‌ها ایجاد می‌شود، استفاده می‌کنند. اندازه‌گیری‌های میدان القایی از طریق برداشت‌های هوابردی، زمینی و یا روی آب انجام می‌گیرد. در این روش می‌توان برای اکتشاف منابع معدنی به ویژه کانی‌سازی‌های فلزی استفاده کرد که در این راستا اندازه‌گیری‌های پارامترهای زیادی ممکن است مد نظر قرار گیرد که یکی از آن‌ها رسانایی کانی‌ها و سنگ‌ها است. در بررسی‌های مقاومت ویژه، ناهمگنی‌های موجود در مواد سطحی زمین و در مجاورت محل قرارگیری الکترودها موجب خطاهای اندازه‌گیری می‌شود. در مناطق خشک مانند ایران اغلب تزریق جریان الکتریکی به زمین با مشکل روبه‌رو می‌شود که در این حال روش‌های الکترومغناطیسی کارآیی بیشتری دارند.

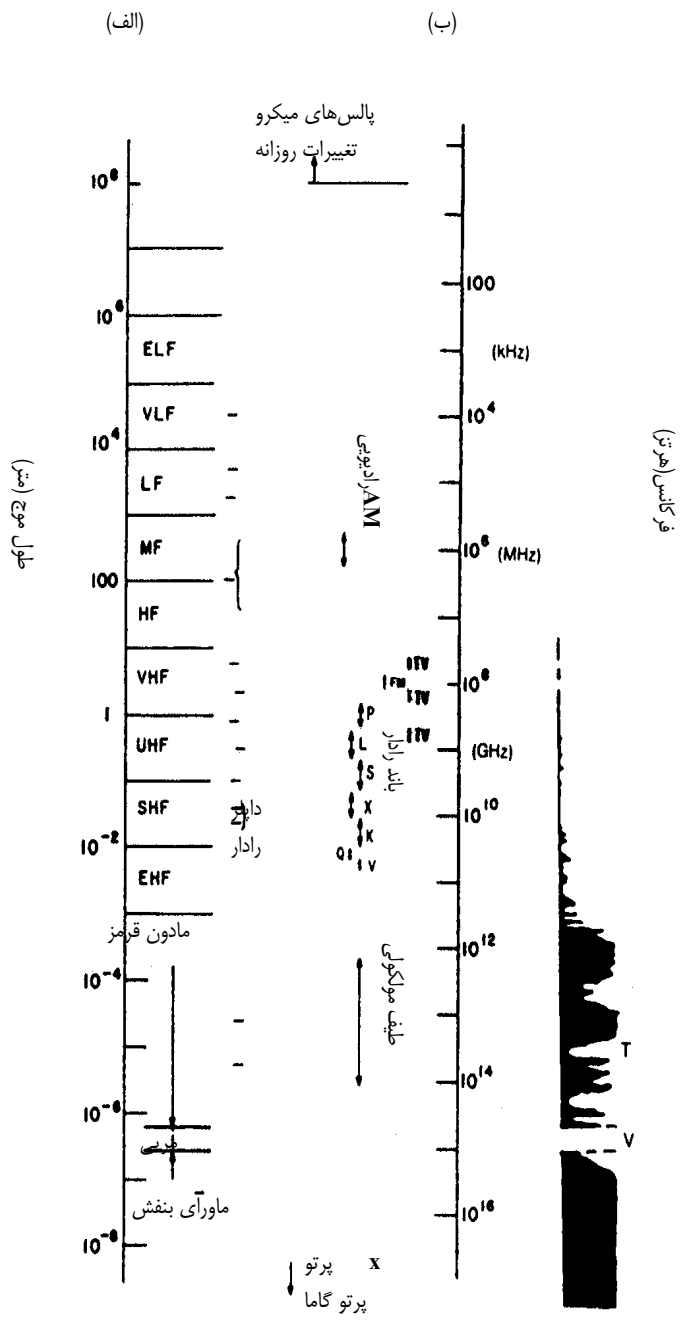
۴-۲- اصول بررسی‌های الکترومغناطیسی

۴-۲-۱- امواج الکترومغناطیسی

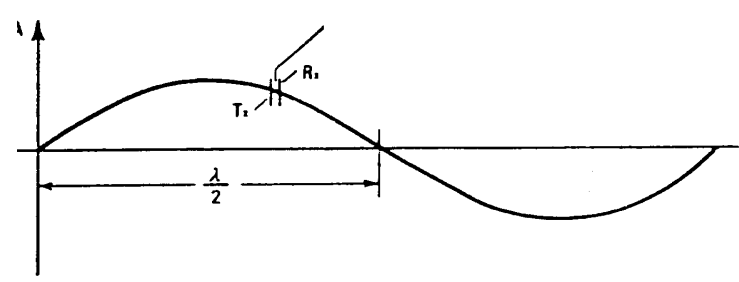
روش‌های الکترومغناطیسی از پاسخ زمین به امواج الکترومغناطیسی اعمال شده به وسیله یک فرستنده یا میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی (روش مگنتوتلوریک) استفاده شود. پاسخ زمین دو مولفه دارد، یکی الکتریکی با شدت E و دیگری مغناطیسی با شدت H است که در صفحه‌های عمود بر جهت انتشار قرار دارد (شکل ۴-۱). میدان الکترومغناطیسی اولیه از طریق عبور جریان متناوب از یک پیچک کوچک (سیم‌های پیچیده شده زیاد یا یک لوپ بزرگ سیمی) ایجاد می‌شود. گستره فرکانسی تابش امواج الکترومغناطیسی بسیار گسترده است (شکل ۴-۲). این گستره از میکروپالس‌های جوی در فرکانس کمتر از ۱۰ هرتز تا باندهای راداری 10^8 تا 10^{11} هرتز و پرتوهای ایکس و گاما با فرکانس‌های بیشتر از 10^{16} هرتز را شامل می‌شود. در مطالعات ژئوفیزیکی، فرکانس‌های میدان متناوب اولیه اغلب از چند هزار هرتز کمتر است. بدین ترتیب موج اولیه طول موجی بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر دارد در حالی که فاصله بین گیرنده و فرستنده امواج بسیار کمتر (حدود ۴ تا ۱۰۰ متر و بیشتر) است. در نتیجه تضعیف موج اولیه را می‌توان نادیده گرفت (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۱- اجزای پایه موج الکترومغناطیسی مرکب از دو مولفه اصلی E و H نشان داده شده است.

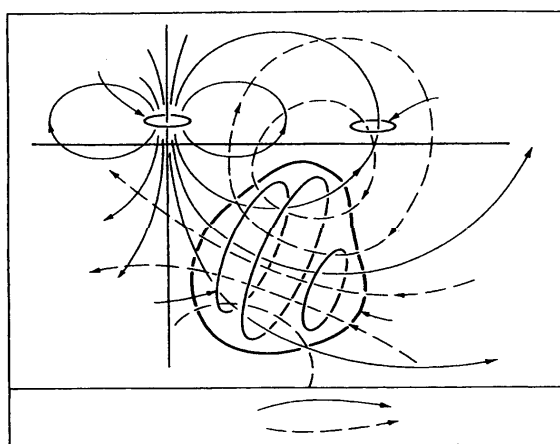


شکل ۴-۲- طیف الکترومغناطیسی، الف: قسمت‌های مختلف طیف بر حسب طول موج
 ب: زون‌های تضعیف شده در اثر جذب اتمسفری (بخش سیاه رنگ)



شکل ۴-۳- مقایسه فاصله فرستنده (Tx) و طول موج گیرنده (Rx) با طول موج‌های امواج مورد استفاده در مطالعات الکترومغناطیسی

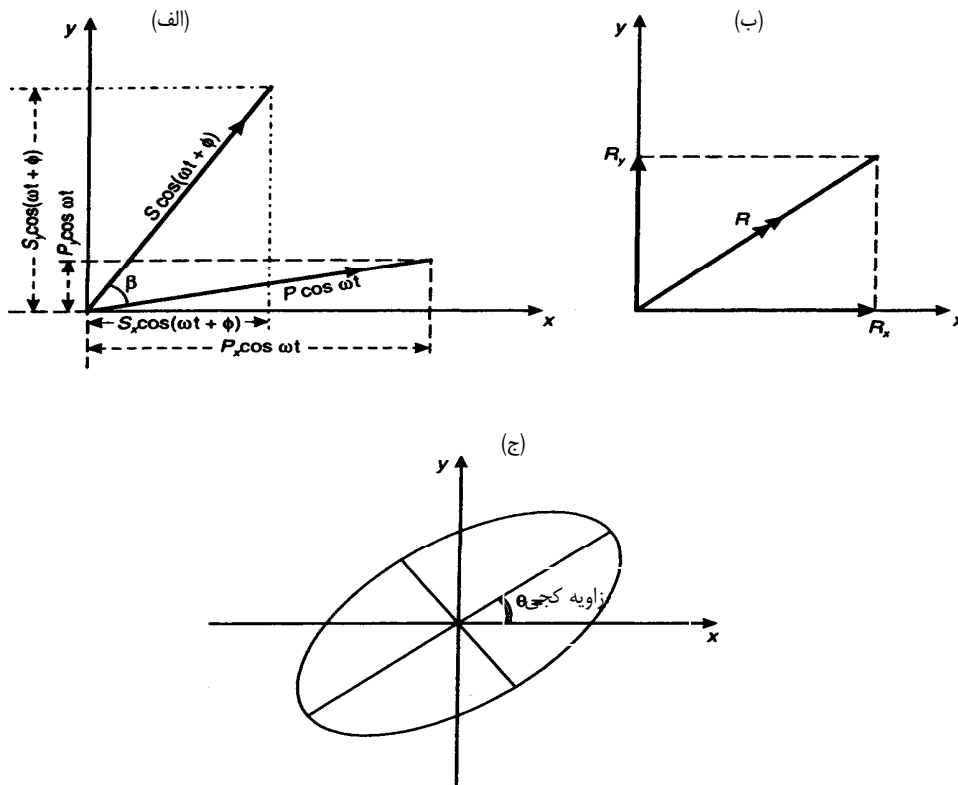
در حالت کلی برای ایجاد میدان الکترومغناطیسی اولیه از یک پیچک فرستنده استفاده می‌شود که این میدان در زیر و بالای زمین انتشار می‌یابد. موجی که در هوا منتشر می‌شود، نسبت به موجی که در زیر زمین حرکت می‌کند کمی تغییر می‌یابد. در حالتی که در زمین، محیطی رسانا مانند یک کانسار فلزی وجود داشته باشد، موج تابشی الکترومغناطیسی داخل زمین با ایجاد جریان‌های القایی ادی^۱ در داخل رسانا باعث ایجاد یک میدان ثانویه الکترومغناطیسی شده که به وسیله گیرنده دریافت می‌شود (شکل ۴-۴). گیرنده میدان اولیه را نیز از طریق هوا دریافت می‌کند. بنابراین، پاسخ کلی گیرنده برآیند میدان اولیه و ثانویه (پاسخ زمین) است که این میدان از نظر فاز و دامنه نسبت به میدان اولیه متفاوت است. تفاوت میان میدان اولیه با میدان برآیند که گیرنده آن را نشان می‌دهد، اطلاعات مهمی در مورد هندسه و خواص الکتریکی رسانای زیرسطحی ارائه می‌دهد.



شکل ۴-۴- چگونگی توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی در یک محدوده کانی‌سازی فلزی

۴-۲-۲- پلاریزاسیون

میدانی که دستگاه‌های گیرنده الکترومغناطیسی دریافت می‌کنند، برآیند دو میدان اولیه (P) و ثانویه (S) است که زاویه بین این دو میدان در فضا برابر β و اختلاف فاز آن‌ها، ϕ در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴-۵-الف). برای محاسبه میدان ایجاد شده ابتدا مولفه‌های افقی (محور x) و قائم (محور y) میدان‌های اولیه و ثانویه محاسبه می‌شود، سپس با جمع مولفه‌های افقی، مولفه افقی میدان به دست می‌آید (Rx) و با جمع مولفه‌های قائم، مولفه قائم میدان (Ry) حاصل می‌شود. بدین ترتیب اندازه میدان حاصله (R) برابر $R_2 = R_{x2} + R_{y2}$ خواهد بود (شکل ۴-۵-ب).



شکل ۴-۵- استفاده از مولفه‌های میدان اولیه و ثانویه برای محاسبه میدان حاصله، الف: چگونگی قرارگیری میدان‌های اولیه و ثانویه و مولفه‌های آن‌ها، ب: استفاده از مولفه‌های افقی و قائم میدان حاصله برای تعیین اندازه میدان، ج: بیضی پلاریزاسیون با زاویه کجی θ نسبت به محور افقی

$$\begin{aligned} \phi_2 - \phi_1 &= \delta \\ R_x &= P_x \cos \omega t + S_x \cos(\omega t + \phi) = X \cos(\omega t + \phi_1) \\ R_y &= P_y \cos \omega t + S_y \cos(\omega t + \phi) = Y \cos(\omega t + \phi_2) \\ R_x^2 / X_2 + R_y^2 / Y^2 - 2 R_x R_y \cos \delta / XY &= \sin^2 \delta \end{aligned} \tag{۱-۴}$$

که در آن:

ϕ اختلاف فاز بین دو میدان

β زاویه بین دو میدان در فضا

ω سرعت زاویه‌ای

رابطه، معادله یک بیضی است که قطر بزرگ آن نسبت به محور افقی زاویه θ تشکیل می‌دهد و اندازه آن از رابطه

$$\text{tg} 2\theta = XY \cos \delta / (X_2 - Y_2) \text{ به دست می‌آید.}$$

از معادله بیضی می‌توان گفت که R در هر حال وجود دارد، اما بزرگی آن به طور پیوسته تغییر می‌کند و در عین حال در فضا نیز

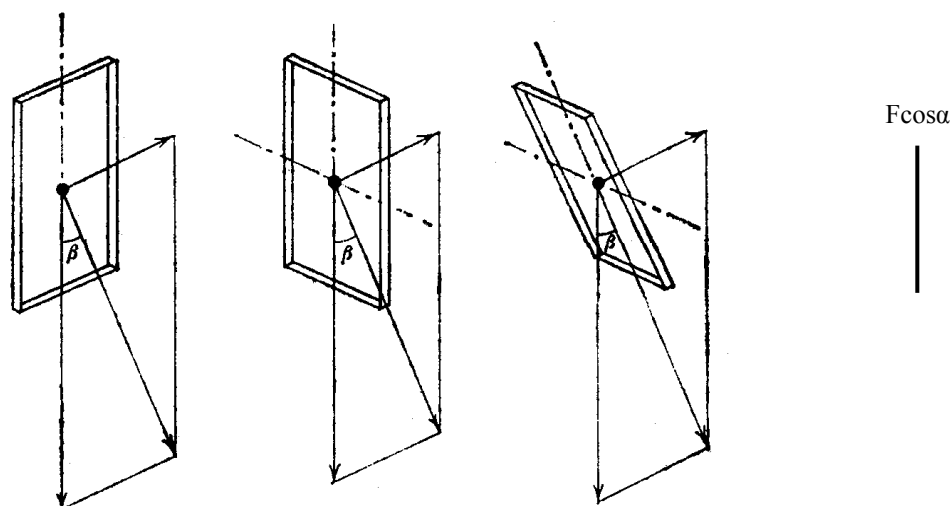
می‌چرخد (تغییر زاویه θ). حرکت نوک بردار R در فضا یک بیضی تشکیل می‌دهد که آن را بیضی پلاریزاسیون می‌نامند (شکل ۴-۵-ج).

محور بزرگ این بیضی با محور افقی زاویه θ تشکیل می‌دهد که "زاویه کجی" یا شیب نام دارد. در روش‌های الکترومغناطیسی

مانند VLF و AFMAG این پارامتر اندازه‌گیری می‌شود که آن‌ها را روش‌های زاویه کجی می‌نامند.

۴-۲-۳- تعیین سطح پلاریزاسیون

برای تعیین سطح پلاریزاسیون از سیم‌پیچی به نام سیم‌پیچ تجسس که از پیچیدن چند صد دور سیم مسی به دور یک قاب چهارگوش یا دایره شکل تشکیل شده است، استفاده می‌شود. ابتدا و انتهای سیم به وسیله یک تقویت‌کننده به یک جفت گوشی و یا وسیله‌ای برای تشخیص جریان متناوب وصل می‌شود. سیم‌پیچ روی یک پایه مناسب به گونه‌ای قرار می‌گیرد که قابلیت چرخش حول محور قائم و افقی را داشته باشد تا بتواند تمام وضعیت‌های موجود در فضا را به خود بگیرد. پتانسیلی که در این سیم‌پیچ القا می‌شود، متناسب با مولفه میدان الکترومغناطیسی در جهت عمود بر سیم‌پیچ است. بنابراین، برای میدان F که با خط عمود بر سیم‌پیچ زاویه α می‌سازد، پتانسیل القایی در سیم‌پیچ متناسب با $F \cos \alpha$ (شکل ۴-۶) خواهد بود. زمانی که سطح سیم‌پیچ در یک میدان به چرخش در می‌آید، در حالتی که سطح سیم‌پیچ عمود بر بردار میدان باشد، اختلاف پتانسیل حاصل، بیشینه و اگر موازی سطح سیم‌پیچ باشد، اختلاف پتانسیل صفر می‌شود که در این حالت صدایی در گوشی‌ها شنیده نمی‌شود. حال در حالی که در یک میدان اولیه و در غیاب یک توده رسانا، یکی از قطرهای سیم‌پیچ منطبق بر بردار میدان اولیه باشد، با چرخش سیم‌پیچ حول محور یاد شده، خطوط میدان اولیه همواره در سطح سیم‌پیچ قرار دارند و در نتیجه جریانی در آن القا نمی‌شود. زمانی که در زیر سطح زمین یک توده رسانا (شکل ۴-۶) در جهت پیچک گیرنده در سطح بیضی پلاریزاسیون وجود داشته باشد، پلاریزاسیون میدان حاصله به صورت بیضی است و فقط یک وضعیت وجود دارد که در آن پتانسیل در سیم‌پیچ تجسس صفر می‌شود. در این حالت، سطح سیم‌پیچ تجسس بر سطح بیضی پلاریزاسیون منطبق است. در عمل برای تعیین سطح پلاریزاسیون، ابتدا سیم‌پیچ تجسس را حول محور قائم آنقدر می‌چرخانند تا سیگنال موجود به کمینه خود برسد. پس از آن سیم‌پیچ را ۹۰ درجه نسبت به سمت قبلی می‌چرخانند و سپس حول محور افقی تا رسیدن به وضعیت کمینه (صفر) آن را به چرخش در می‌آورند (شکل ۴-۶). در این حالت سطح سیم‌پیچ تجسس بر سطح پلاریزاسیون منطبق است. با انجام عملیات یاد شده، گرچه سطح پلاریزاسیون مشخص می‌شود، ولی هنوز موقعیت بیضی پلاریزاسیون در این سطح مشخص نیست. بدین منظور، باید زاویه محور بزرگ یا کوچک بیضی نسبت به محور افقی مشخص شود. برای این کار، سیم‌پیچ تجسس را در جهت عمود بر سطح خاموشی قرار می‌دهند و آن قدر می‌چرخانند تا سیگنال بیشینه به دست آید، در این حالت خط عمود بر سطح سیم‌پیچ امتداد محور بزرگ بیضی پلاریزاسیون را مشخص می‌کند.

شکل ۴-۶- تاثیر میدان F بر سیم‌پیچ

۴-۲-۴- عمق نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی

عمق نفوذ میدان الکترومغناطیسی به فرکانس موج و رسانایی محیطی که موج در آن منتشر می‌شود، بستگی دارد. میدان‌های الکترومغناطیسی در عبور از زمین تضعیف می‌شوند و دامنه آن‌ها به صورت نمایی بر حسب عمق کاهش می‌یابد. عمق نفوذ را می‌توان عمقی در نظر گرفت که دامنه میدان اولیه (A_0) به مقدار $1/e$ کاهش پیدا می‌کند ($A_d = A_0/e$). در این صورت برای عمق نفوذ رابطه زیر برقرار است:

$$d = 503.8 / \sqrt{\sigma f} \quad (2-4)$$

که در آن:

d عمق نفوذ بر حسب متر

σ رسانایی زمین بر حسب S/m

f فرکانس میدان بر حسب هرتز

عمق نفوذ با کاهش فرکانس و رسانایی زمین، افزایش می‌یابد. در برداشت‌های الکترومغناطیسی می‌توان بر اساس عمق‌های احتمالی هدف‌های مورد تجسس و مقاومت ویژه زمین، گستره مناسب فرکانس میدان اولیه را انتخاب کرد. به عنوان مثال، برای زمینی با رسانایی $5 \times 10^{-4} S/m$ ، اگر از فرکانس ۱۰ کیلوهرتز استفاده شود، عمق نفوذ حدود ۲۲۵ متر می‌شود.

در عمل عمقی که از رابطه قبل به دست می‌آید، مقداری نظری است ولی با استفاده از آن می‌توان تحت عنوان "عمق موثر نفوذ" (Z_e) که مقدار بیشینه عمقی است که یک رسانا آنومالی الکترومغناطیسی قابل تشخیص ایجاد می‌کند، استفاده کرد. مقدار Z_e با استفاده از مطالعات تجربی به صورت زیر ارایه شده است:

$$Z_e = 100 / \sqrt{\sigma f} \quad (3-4)$$

رابطه بالا با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر رسانایی سنگ‌های رولایه، هندسه و رسانایی توده معدنی هدف و نوفه‌های دستگاهی ارایه شده است. وابستگی عمق نفوذ به فرکانس، قیدهایی را به برداشت‌های الکترومغناطیسی اعمال می‌کند. بدین ترتیب علیرغم این که در فرکانس‌های کم عمق نفوذ بیشتر است، ولی ایجاد فرکانس‌های بسیار پایین مشکل و عمق دسترسی بیشینه در عمل حدود ۵۰۰ متر است.

۴-۳- انواع سیستم‌های الکترومغناطیسی

روش‌های الکترومغناطیسی را می‌توان در دو گروه شامل سیستم‌های زمان-حوزه‌ای و فرکانس-حوزه‌ای رده‌بندی کرد. در سیستم زمان-حوزه‌ای اندازه‌گیری‌ها بر حسب تابعی از زمان و در سیستم فرکانس-حوزه‌ای از یک یا چند فرکانس برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. روش‌های الکترومغناطیسی با استفاده از سیگنال‌های طبیعی زمین مانند روش مگنتوتلوریک و یا ایجاد میدان به وسیله یک فرستنده نزدیک یا فرستنده‌های پر قدرت نظامی دور مانند روش VLF به اجرا در می‌آید. طبقه‌بندی سیستم‌های الکترومغناطیسی در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

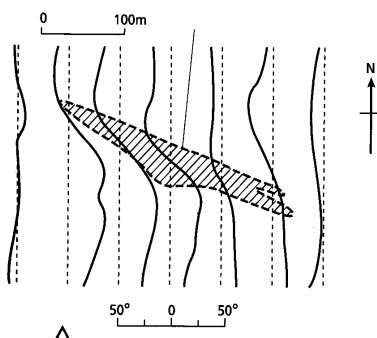
جدول ۴-۲- طبقه‌بندی سیستم‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی

نوع گیرنده			نوع فرستنده
پیچک کوچک (هوایی)	پیچک کوچک (زمینی)	سیم و پیچک کوچک	
	مغناطیس‌سنجی و مقاومت ویژه (MMR) ترکیب مغناطیسی و IP (MIP)		سیستم متصل به زمین (گالوانیک)
	برخی سیستم‌های TEM	CSAMT	القایی
			لوپ کوچک
EM هوابرد	سلینگرام		
زمان- حوزه‌ای	لوپ افقی EM		
گیرنده دنبال هواپیما/ هلیکوپتر	لوپ قائم EM		
	روش زاویه کجی		
میله اتصال ثابت‌کننده	سنج‌های رسانندگی ویژه زمین (GCM)		
	برخی سیستم‌های TEM		
	لوپ هم‌سنگ		
	سیستم‌های درون‌چاهی		
			لوپ بزرگ (سیم بلند)
	سیستم‌های لوپ بزرگ		
	روش ساندبرگ		
	تورام		
	انواع زیاد سیستم‌های TEM		
	سیستم‌های درون‌چاهی		
			موج تخت
VLF		VLF - مقاومت ویژه VLF	آنتن قائم
			میدان مغناطیسی طبیعی زمین جریان‌های تلوریک

۴-۴- روش‌های صحرائی اندازه‌گیری الکترومغناطیسی

۴-۴-۱- روش‌های زاویه کجی یا شیب

تعدادی از روش‌های الکترومغناطیسی شامل اندازه‌گیری تغییرات فضایی زاویه کجی است. میدان اولیه را می‌توان به وسیله یک فرستنده ثابت که به طور معمول شامل یک پیچک قائم یا افقی بزرگ است و یا با استفاده از یک فرستنده متحرک کوچک ایجاد کرد. خط برداشت در محدوده مورد مطالعه، عمود بر امتداد ساختارهای هدف یا ساختارهای زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود. در هر ایستگاه، پیچک تجسس را در حول سه محور عمود بر هم تا رسیدن به یک سیگنال صفر می‌چرخانند که در این حالت صفحه پیچک در صفحه بیضی پلاریزاسیون قرار می‌گیرد. زاویه کجی با چرخش پیچک حول یک محور افقی عمود بر صفحه پلاریزاسیون که در مرحله قبل مشخص شده است، به دست می‌آید. اندازه‌گیری به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که در ادامه به بعضی از آن‌ها اشاره شده است.

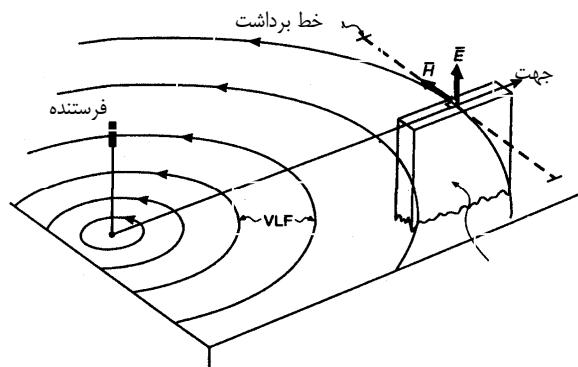


شکل ۴-۸- مثالی از یک برداشت زاویه کجی با فرستنده قائم

اگر توده رسانا نزدیک سطح زمین باشد، دامنه و گرادیان نیمرخ زاویه کجی بزرگ می‌شود. این دو پارامتر با افزایش عمق توده کاهش می‌یابند و در نتیجه می‌توان یک ارزیابی تقریبی از عمق توده به دست آورد. تغییرات زاویه کجی در بالای یک توده معدنی رسانای قائم متقارن و گرادیان آن در دو طرف توده معدنی یکسان است. با کاهش شیب توده معدنی، گرادیان مربوط در دو طرف توده معدنی از حالت تقارن دور می‌شود. بدین ترتیب می‌توان از عدم تقارن منحنی تغییرات زاویه کجی تخمینی از شیب توده معدنی به دست آورد. روش اندازه‌گیری زاویه کجی با فرستنده ثابت به تدریج با روش‌هایی که در آن‌ها فرستنده و گیرنده هر دو متحرک‌اند، جایگزین شده است. روش‌های اخیر اطلاعات کمی بیشتری در مورد توده‌های رسانا ارایه می‌کنند. دو روش دیگر اندازه‌گیری که هنوز از آن‌ها استفاده می‌شود، روش "فرکانس بسیار پایین" (VLF) و "میدان مغناطیسی در حد فرکانس شنوایی" (AFMAG) هستند که هیچ یک احتیاج به فرستنده ویژه‌ای ندارند.

ب- روش VLF

فرستنده‌های رادیویی نظامی پر قدرت که با فرکانس‌های ۱۵ تا ۲۴ کیلوهرتز کار می‌کنند (فرکانس بسیار کم در حیطه امواج رادیویی)، برای ارتباط با زیردریایی‌ها برای مکان‌یابی رادیویی دوربرد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در فواصل بسیار دور از این فرستنده‌ها، میدان الکترومغناطیسی تقریباً به صورت موج تخت قابل استفاده در اکتشاف‌های ژئوفیزیکی در می‌آید (شکل ۴-۹). بدین ترتیب با اطلاع از مشخصات میدان‌های ارسالی به وسیله ایستگاه‌هایی از این نوع می‌توان اندازه‌گیری زاویه کجی را به صورت برداشت‌های زمینی یا هوابرد به اجرا در آورد.



شکل ۴-۹- منبع مصنوعی VLF (مانند یک فرستنده نظامی) که موج اولیه الکترومغناطیسی را ایجاد می‌کند و از آن برای برداشت‌های زاویه کجی استفاده می‌شود.

۴-۴-۲- اندازه‌گیری‌های فاز و دامنه

به دلیل سادگی تجهیزات و قیمت نسبتاً پایین و سرعت برداشت از روش‌های زاویه کجی مانند VLF به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود. اطلاعات کمی حاصل از این روش در مطالعه کانی‌سازی‌های رسانا معمولاً زیاد نیست. سیستم‌های برداشت الکترومغناطیسی که در آن‌ها از تجهیزات پیچیده‌تری در اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود، شامل اندازه‌گیری‌های روابط فاز و دامنه بین میدان‌های الکترومغناطیسی اولیه، ثانویه و به دست آمده هستند. میدان الکترومغناطیسی متناوب را می‌توان با یک موج سینوسی به طول موج 2π (شکل ۴-۱۰-الف) نشان داد. زمانی که چنین موجی در پس موج دیگری قرار می‌گیرد، موج اخیر دارای تأخیر فازی می‌شود که این تأخیر فاز با جداسازی زاویه‌ای موج‌ها همراه است و آن را زاویه فاز (θ) می‌نامند. ارتباط فاز بین امواج الکترومغناطیسی را می‌توان با یک نمودار برداری ساده نشان داد (شکل ۴-۱۰-ب). در این نمودار طول بردارها نشان دهنده دامنه میدان آن‌ها و زاویه بین بردار میدان اولیه و ثانویه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، بیانگر تأخیر فاز میدان ثانویه نسبت به میدان اولیه است.

میدان اولیه فرستنده (P) که به طور مستقیم از طریق هوا به گیرنده می‌رسد، دچار تغییرات قابل توجهی نمی‌شود. تنها تغییر میدان اولیه در محل گیرنده کاهش ناچیزی در دامنه آن است که مربوط به فاصله بین فرستنده و گیرنده است، اما میدان اولیه‌ای که به زمین نفوذ می‌کند، در غیاب یک توده رسانا با کاهش دامنه شدیدتر روبه‌رو می‌شود، ولی هم‌فاز با میدان اولیه ارسالی باقی می‌ماند. در صورتی که زیر سطح زمین توده رسانا وجود داشته باشد، میدان اولیه یک ولتاژ متناوب را در آن القا می‌کند که فرکانس آن با فرکانس میدان اولیه یکسان است و بنابر قانون القای مغناطیسی دارای تأخیر فاز $\pi/2$ نسبت به میدان اولیه خواهد بود. خواص الکتریکی توده رسانا خود باعث تأخیر فازی به اندازه φ می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varphi = \text{tg}^{-1}(2\pi fL/r) \quad (4-4)$$

که در آن:

f فرکانس میدان الکترومغناطیسی

L ظرفیت القایی توده رسانا

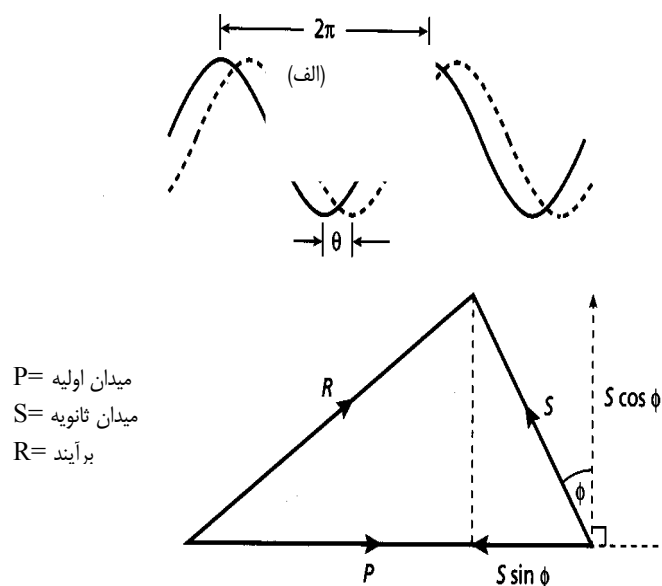
r مقاومت توده رسانا

برای یک توده رسانای خوب، φ به مقدار $\pi/2$ نزدیک می‌شود ($r \rightarrow 0$) در حالی که با کاهش رسانایی (عایق شدن توده، $r \rightarrow \infty$) مقدار φ به سمت صفر میل می‌کند.

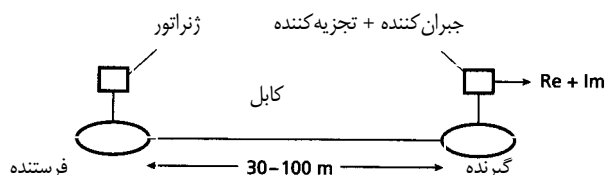
بدین ترتیب تأخیر فاز میدان ثانویه (S) نسبت به میدان اولیه (P) برابر $(\varphi + \pi/2)$ خواهد بود. با توجه به این اختلاف فاز می‌توان میدان ایجاد شده (R) را روی نمودار میدان‌ها نشان داد (شکل ۴-۱۰-ب). تصویر میدان ثانویه روی محور افقی (میدان اولیه) برابر $S \sin \varphi$ و دارای تأخیر فاز π نسبت به میدان P است. این مولفه را، مولفه حقیقی یا هم‌فاز S می‌نامند. مولفه قائم میدان ثانویه برابر $S \cos \varphi$ و دارای اختلاف فاز $\pi/2$ نسبت به میدان اولیه است که مولفه مجازی، ناهم‌فاز یا تریبیعی نامیده می‌شود.

دستگاه‌های اندازه‌گیری امروزی مولفه‌های حقیقی (Re) و مجازی (Im) میدان ثانویه را جدا می‌کنند که بدین ترتیب می‌توان از نسبت Im/Re برای شناسایی توده رسانا استفاده کرد (شکل ۴-۱۱). هر چه این نسبت بیشتر باشد، به معنی رسانایی بیشتر توده است.

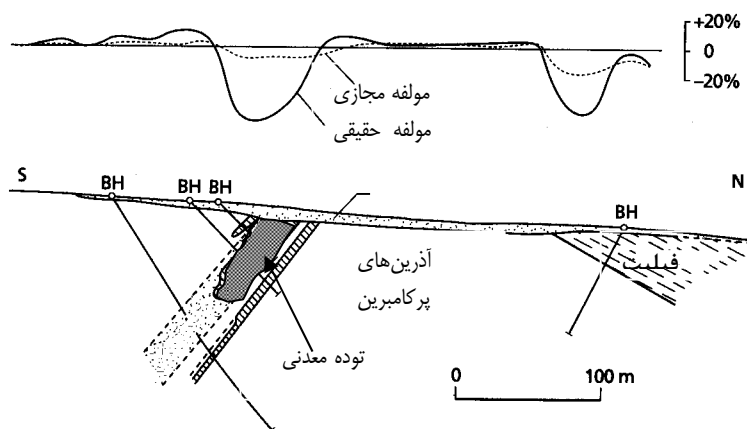
بعضی سیستم‌های اندازه‌گیری مانند الکترومغناطیس هوابردی، زاویه فاز را اندازه می‌گیرند. در سیستم‌های اندازه‌گیری قدیمی‌تر فاز از یک فرستنده ثابت که به طور معمول از لوپ سیمی گسترده‌ای تشکیل شده است، استفاده می‌شود. از جمله این سیستم‌ها می‌توان ساندربرگ و تورام را نام برد که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی تحرک آن‌ها نسبت به سیستم‌های فرستنده-گیرنده متحرک کمتر است. از سیستم‌های دیگر می‌توان به دو پیچکی یا سلینگرام اشاره کرد. عملیات صحرائی در این روش‌ها ساده بوده و گروهی شامل ۲ تا ۳ نفر کافی است. فاصله و جهت‌گیری پیچک‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا درصد کوچکی از خطا در فاصله بین پیچک‌ها باعث ایجاد خطای قابل توجه در اندازه‌گیری پارامتر فاز می‌شود. حالت افقی و هم‌سطح بودن پیچک‌ها نیز باید رعایت شود، زیرا انحراف کوچکی در آن‌ها خطای زیادی را به وجود می‌آورد. حفظ دقت در فاصله و جهت‌گیری در حالت انتخاب فاصله‌های بزرگ بین پیچک‌ها به ویژه در زمین‌های ناهموار مشکل است.



شکل ۴-۱- نمایش امواج در مطالعات دامنه و فاز، الف: اختلاف فاز بین دو موج سینوسی
ب: نمودار برداری که رابطه بین امواج اولیه، ثانویه و ایجاد شده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱- تجهیزات برداشت‌های الکترومغناطیسی با فرستنده و گیرنده متحرک

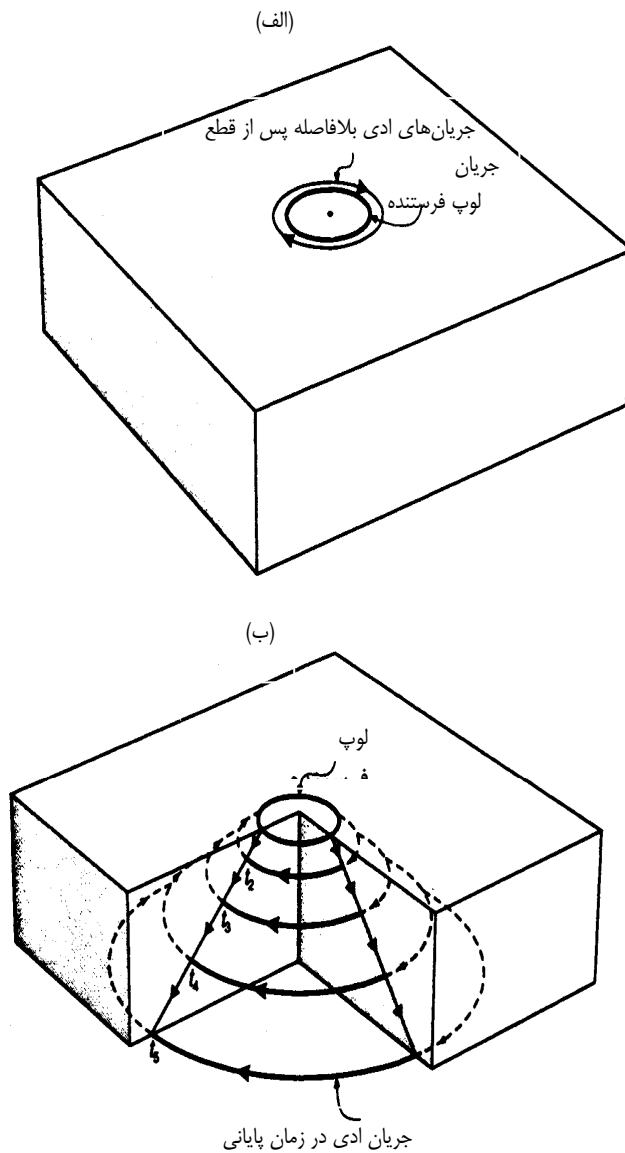


شکل ۴-۱۲- نیمرخ‌های برداشت مولفه‌های حقیقی و مجازی در بالای یک توده معدنی رسانا

همان طور که در شکل ۴-۱۲ دیده می‌شود، یکی از نتایج استفاده از سیستم پیچک‌های افقی هم‌سطح، ایجاد آنومالی‌های منفی مولفه‌های حقیقی و مجازی با دامنه بیشینه در بالای کانی‌سازی رسانا است. عدم تقارن آنومالی، وابسته به شیب کانی‌سازی است که گرادیان بیشینه آن در طرف فروشیب توده معدنی قرار می‌گیرد. در این حالت، نسبت زیاد مولفه حقیقی به مجازی در بالای توده معدنی، نشان دهنده رسانایی بسیار خوب آن است.

۴-۴-۳- برداشت‌های الکترومغناطیسی زمان-حوزه‌ای

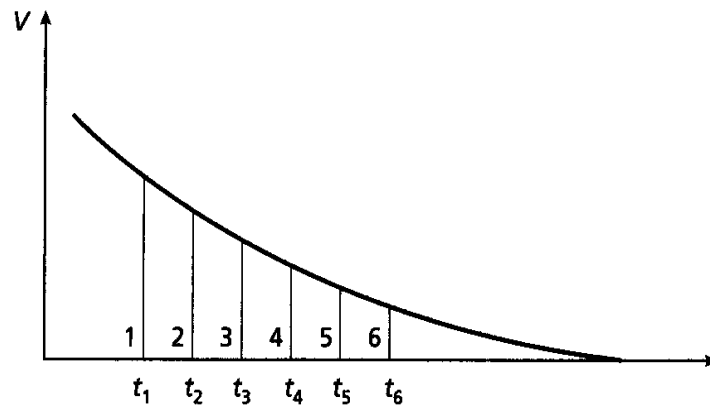
یکی از مسایل قابل توجه در بسیاری از روش‌های برداشت الکترومغناطیسی، کوچک بودن میدان ثانویه مورد نظر در مقایسه با میدان اولیه است که در نتیجه باعث کاهش دقت اندازه‌گیری می‌شود. این مساله با استفاده از برداشت‌های الکترومغناطیسی زمان-حوزه‌ای که آن را "پالس گذرای الکترومغناطیسی" نیز می‌نامند، حل می‌شود. در این روش، میدان اولیه پیوسته نیست، اما شامل یک سری پالس‌هایی است که به دلیل فاصله‌های زمانی از هم جدا می‌شوند. میدان ثانویه حاصل از القای میدان اولیه فقط در فاصله قطع ناگهانی جریان، اندازه‌گیری می‌شود. اگر یک توده رسانا وجود داشته باشد، تغییرات شدید در میدان اولیه باعث القای جریان‌های ادی در سطح رسانا می‌شود. این مرحله را "زمان پیشین" از فرآیند گذرا می‌نامند. این جریان‌های سطحی در نتیجه افت اهمی به تدریج میرا می‌شوند. در زونی که بلافاصله در توده رسانا قرار دارد، کاهش میدان مغناطیسی رخ می‌دهد که نتیجه آن شارش جریان‌های ادی در این زون است. این مرحله شروع پخش داخلی الگوی جریان حاصل از جریان‌های ادی به طرف داخل توده رسانا است. این مرحله از فرآیند گذرا "زمان میان مرحله‌ای" است. مرحله نهایی یا "زمان پایانی" هنگامی است که توزیع جریان القایی با زمان تغییر نمی‌کند. تنها تغییری که مشاهده می‌شود، کاهش کل دامنه با افزایش زمان است. اگر اندازه توده رسانا نسبت به چشمه دوقطبی ایجاد میدان اولیه خیلی بزرگ باشد، ممکن است جریان‌های ادی به طور جانبی و همچنین در درون توده رسانا توزیع شوند. آهنگ تغییر این جریان‌ها و میدان مغناطیسی مربوط به آن به اندازه و شکل توده و نیز رسانایی آن وابسته است اما توزیع اولیه جریان سطحی تنها به اندازه و شکل توده رسانا بستگی دارد، زیرا پدیده‌ای هندسی است و ارتباطی به رسانایی ندارد. عمل ارسال پالس به وسیله لوپ جریان بارها تکرار شده (شکل ۴-۱۳) و برای هر نقطه اندازه‌گیری، داده‌ها انباشت می‌شود.



شکل ۴-۱۳ - چگونگی انتشار جریان‌های ادی، الف: بلافاصله پس از قطع میدان اولیه، ب: انتشار جریان‌های هادی به سمت پایین و بیرون در بازه‌های متوالی زمانی (t_2, t_3, \dots) بر روی زمین همگن

در برداشت‌های صحرائی، میدان پالسی اولیه الکترومغناطیسی از طریق فرستنده‌ای که به طور معمول از یک لوپ مستطیلی که چند ده متر سیم دور آن پیچیده شده استفاده می‌شود. این لوپ روی زمین قرار می‌گیرد و از همین پیچک یا پیچک دیگری می‌توان به عنوان گیرنده استفاده کرد. دوام میدان ثانویه گذرای که در اثر کاهش تدریجی جریان‌های ادی ایجاد می‌شود، کمتر از یک میلی‌ثانیه برای توده‌های با رسانایی ضعیف تا ۲۰ میلی‌ثانیه برای رسانایی خوب تغییر می‌کند. زوال یا فروپاشی میدان ثانویه با اندازه‌گیری تغییرات زمانی دامنه این میدان در تعدادی بازه زمانی مشخص (کانال) پس از قطع میدان اولیه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۴-۱۴). در حضور توده‌هایی با رسانایی خوب، میدان ثانویه ادامه‌دار است و در بیشتر کانال‌ها ثبت می‌شود، اما با کاهش رسانایی توده،

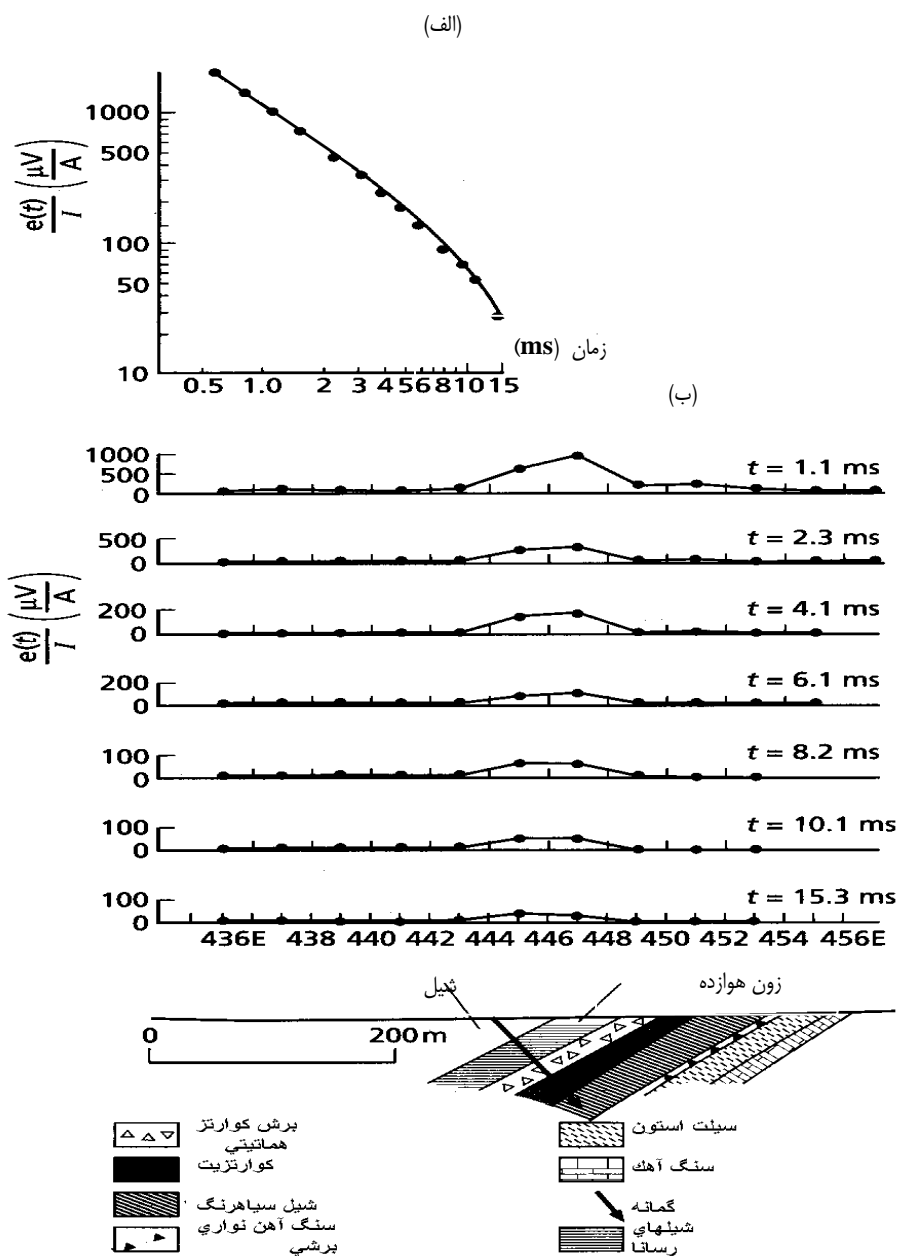
میدان ثانویه فقط در کانال‌هایی که از نظر زمانی به زمان قطع میدان اولیه نزدیک هستند، دریافت می‌شود. با تکرار اندازه‌گیری می‌توان داده‌ها را برای یک نقطه همانند روش لرزه‌نگاری انعکاسی انبارش کرد و بدین ترتیب نسبت سیگنال به نوفه را افزایش داد. موقعیت و وضعیت توده رسانا را می‌توان از تغییر دامنه میدان ثانویه در کانال‌ها تخمین زد. علاوه بر آن، به کمک نیم‌پهنای منحنی آنومالی امکان ارزیابی عمق توده فراهم می‌شود. تفسیرهای کمی از طریق مدلسازی آنومالی‌های حاصل از شکل‌های ساده هندسی مانند کره، استوانه یا ورقه و یا مدلسازی‌های عددی معمول در برنامه‌های نرم‌افزاری امکان‌پذیر است.



شکل ۴-۱۴- ارزیابی کمی فروپاشی پاسخ زمان- حوزه‌ای الکترومغناطیسی با اندازه‌گیری دامنه میدان ثانویه در تعدادی کانال (۱ تا ۶) در بازه‌های زمانی (t1-6) پس از قطع میدان اولیه میسر می‌شود.

روش TDEM را می‌توان برای انجام گمانه‌زنی قائم همانند روش گمانه‌زنی قائم مقاومت ویژه به کار برد. در این روش احتیاجی به انتخاب فاصله زیاد بین فرستنده و گیرنده نیست. برخلاف روش مقاومت ویژه معمول که به دلیل طول خط فرستنده زیاد، تحت تاثیر ناهمگونی‌های رسانایی رولایه قرار می‌گیرد، روش TDEM از ناهمگونی‌های سطحی کمتر تاثیر می‌گیرد، ضمن این که با این روش می‌توان به عمق‌های نفوذ چند کیلومتر نیز رسید.

هدف مورد نظر که از طریق دیگر روش‌های ژئوفیزیکی مورد شناسایی قرار گرفته بود، شامل نواری از شیل‌های گرافیتی سیاه رنگ با رسانایی بالا (بیشتر از ۰/۸ زیمنس بر متر) در شرایط طبیعی بوده است. پاسخ TDEM بر حسب ولتاژ القایی در لوپ [e(t)] که بر حسب جریان ایجاد شده در لوپ فرستنده (I) به هنجار شده، بیان شده است. شکل ۴-۱۵- الف، منحنی فروپاشی میدان ثانویه را در بالای پیک آنومالی نشان می‌دهد. پاسخ زمین در روی یک نیمرخ شرقی-غربی برای تعدادی از بازه‌های زمانی مختلف پس از قطع میدان اولیه به همراه مقطع زمین‌شناسی در محل نیمرخ در شکل ۴-۱۵- ب نشان داده شده است. باقی ماندن میدان در کانال‌های انتهایی (بازه زمانی بیشتر) بیانگر حضور یک رسانای خوب (شیل‌های گرافیتی) است. نامتقارن بودن منحنی‌های آنومالی و تغییر آن از یک کانال به کانال دیگر امکان تخمینی از جهت شیب را فراهم ساخته است. پیک منحنی در کانال اول (t=1.1ms) که پاسخ بخش نسبتاً کم عمق رسانا است، در طرف راست قرار دارد. بیشینه آنومالی در کانال‌های بعدی به سمت چپ جابه‌جا می‌شوند که نشان دهنده عمیق‌تر شدن تدریجی رسانا در نتیجه شیب آن است.



شکل ۴-۱۵- مثال از پاسخ TDEM در مطالعه شیل‌های گرافیتی، الف: منحنی واپاشی در بالای پیک آنومالی، ب: نیم‌رخ‌های TDEM و مقطع زمین‌شناسی

۴-۴-۴ - اندازه‌گیری‌های رسنایی

با استفاده از اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی می‌توان رسنایی زمین را به دست آورد. اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه ظاهری با روش‌های معمول که از طریق تزریق جریان پیوسته به وسیله الکترودها به زمین انجام می‌گیرد، به دلایل مختلف از جمله کوبیدن

الکترودها به زمین، کند و پرهزینه است. علاوه بر آن اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه تحت تاثیر عوامل نوفه‌ای حاصل از تغییرات مقاومت ویژه لایه‌های سطحی و وجود رولایه‌های مقاوم، باعث محدودیت کاربرد و قدرت تفکیک این روش شده است. به دلیل عدم نیاز به اتصال با زمین، اندازه‌گیری به صورت متحرک قابل اجرا است و حجم نمونه‌برداری و میانگین‌گیری آن قدرت تفکیک را به گونه‌ای چشم‌گیر افزایش داده است.

میدان ثانویه الکترومغناطیسی که در یک برداشت با فرستنده-گیرنده متحرک اندازه‌گیری می‌شود تابع کمپلکسی از فاصله بین پیچک‌ها (s) فرکانس فرستنده (f) و رسانایی زمین (σ) است. اگر حاصل ضرب S و عمق نفوذ، که "عدد القایی" نامیده می‌شود، خیلی کمتر از یک باشد، رابطه زیر بین میدان اولیه (HP) و ثانویه (HS) برقرار است:

$$HS/HP \approx i\omega\mu_0\sigma s^2/4 \quad (5-4)$$

که در آن:

μ_0 تراوایی مغناطیسی خلا

$$i = \sqrt{-1}$$

$$\omega = 2\pi f$$

به طوری که دیده می‌شود، HS/HP متناسب با رسانایی زمین است.

با توجه به رابطه $d = 503.8 / \sqrt{\sigma f}$ با ارزیابی اولیه مقدار بیشینه σ می‌توان f را در منطقه مطالعاتی به گونه‌ای انتخاب کرد که عدد القایی (s.d) کوچکتر از یک باشد و در نتیجه بتوان رسانایی را از روابط یاد شده به دست آورد. اگر اندازه‌گیری در شرایط عدد القایی کوچک انجام گیرد، رسانایی ظاهری (σa) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma a = (4 / \omega\mu_0 s^2) HS/HP \quad (6-4)$$

با استفاده از این رابطه، می‌توان تجهیزات الکترومغناطیسی را برای قرائت مستقیم رسانایی زمین طراحی کرد. برای مطالعات کم عمق که بیشتر در مطالعات مهندسی مطرح است، از دوقطبی‌های افقی (برای فرستنده و گیرنده) به فاصله ۳٫۷ متر می‌توان استفاده کرد که در این صورت یک عمق بررسی حدود ۶ متر را می‌توان انتظار داشت.

در مطالعات اکتشافی که عمق‌های بیشتری مد نظر قرار می‌گیرد، معمولاً از پیچک‌های هم‌سطح قائم برای فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود و فاصله آن‌ها بر اساس عمق تجسس مورد نظر انتخاب می‌شود. در صورتی که برداشت برای یک فاصله فرستنده-گیرنده ثابت طراحی شود، اندازه‌گیری مشابه نیم‌رخ‌زنی مقاومت ویژه و در حالتی که اندازه‌گیری در یک نقطه با افزایش تدریجی فاصله بین فرستنده و گیرنده تکرار شود، مشابه گمانه‌زنی قائم مقاومت ویژه خواهد بود.

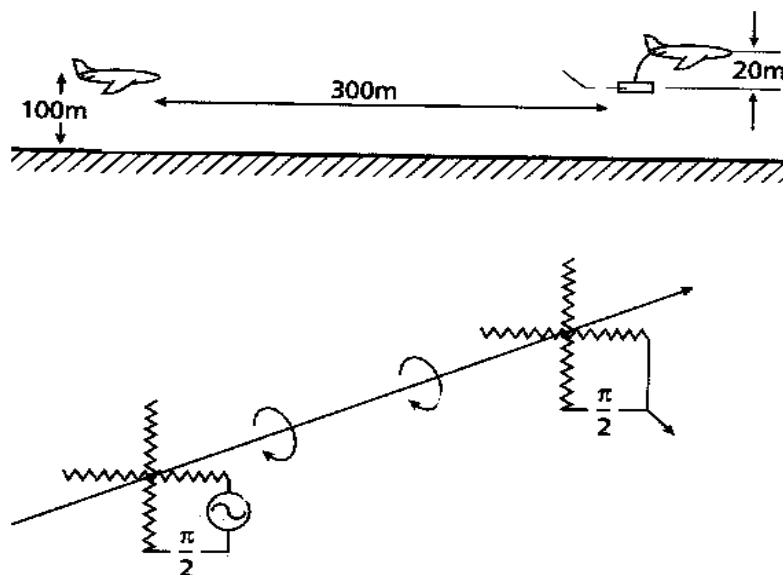
۴-۵- برداشت‌های الکترومغناطیسی هواپردی

به دلیل سرعت و هزینه کمتر از روش‌های الکترومغناطیسی هواپردی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. تعداد سیستم‌های مورد استفاده زیاد است و به طور کلی آن‌ها را همانند برداشت‌های صحرائی به دو دسته سیستم‌های غیرفعال، زمانی که فقط گیرنده در هواپیما نصب می‌شود و فعال، در حالتی که علاوه بر گیرنده از فرستنده هم استفاده می‌شود، تقسیم می‌کنند. سیستم‌های غیرفعال در حقیقت روش‌های VLF و AFMAG هواپردی هستند. در روش‌های فعال از فرستنده استفاده می‌شود، ولی به گستردگی روش‌های صحرائی نیست. سیستم‌های فعال به طور معمول برای مطالعه مناطق با گستردگی زیاد که دسترسی زمینی به آن‌ها مشکل است، به

کار گرفته می‌شوند. این سیستم‌ها معمولاً اطلاعات بیشتری را نسبت به روش غیرفعال زاویه کجی به دست می‌دهند. اصول روش‌ها همانند سیستم‌های فرستنده-گیرنده متحرک در مطالعات صحرایی است و تنها تفاوت آن‌ها، قرارگیری فرستنده و گیرنده در هوا و اتصال آن‌ها به یک سیستم ثبت پیوسته است. سیستم‌های فعال شامل فاصله ثابت و تریبیعی است که شرح سیستم‌های فاصله ثابت در ادامه آمده است.

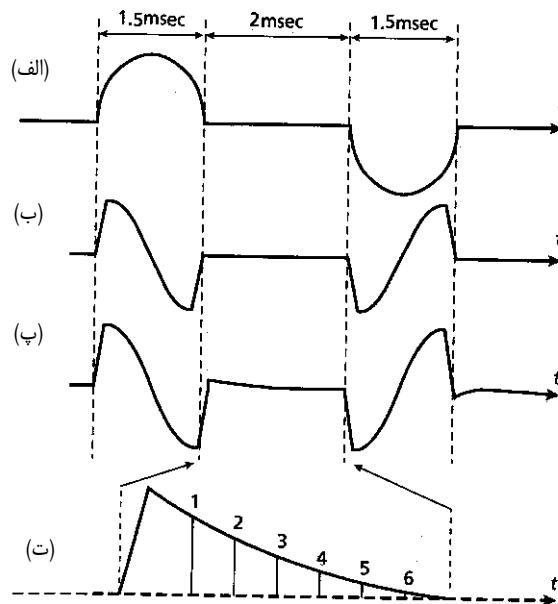
۴-۵-۱- سیستم‌های فاصله ثابت

در این سیستم‌ها فرستنده و گیرنده را در یک فاصله ثابت نگه می‌دارند و مولفه‌های میدان حقیقی و مجازی همانند برداشت‌های صحرایی اندازه‌گیری می‌شوند. پیچک‌ها عموماً قائم و به صورت هم‌صفحه یا هم‌محور آرایه داده می‌شوند. حفظ فاصله دقیق و ارتفاع ثابت فرستنده و گیرنده در این روش از جمله مسایل اصلی است و این هدف را با قرارگیری فرستنده و گیرنده روی بال‌های هواپیما و یا سکویی که در عقب بالگرد کشیده می‌شود، تامین می‌کنند. تغییر وضعیت فرستنده و گیرنده در اثر خم شدن بال‌ها، نوسانات و دما را باید به کمک روش‌های مناسبی تعدیل کرد. به دلیل فاصله کمی که در این روش بین فرستنده و گیرنده برای ارسال و دریافت میدان الکترومغناطیسی در طول خطوط پرواز وجود دارد، تغییرات کوچکی در پارامترهای یاد شده ممکن است باعث بروز اشکال در سیگنال‌های دریافتی شود. سیستم‌های فاصله ثابت در ارتفاع‌های اسمی ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر برای هواپیما و حدود ۲۰ متر برای هلیکوپتر در نظر گرفته می‌شود. برای افزایش عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی می‌توان از دو هواپیمایی که در پشت یکدیگر پرواز می‌کنند، استفاده کرد. در این سیستم هواپیمایی عقبی فرستنده را حمل می‌کند و هواپیمایی جلویی گیرنده را به دنبال خود می‌کشد (شکل ۴-۱۶).



شکل ۴-۱۶- سیستم الکترومغناطیسی هواپردی با دو هواپیما و میدان چرخشی

در این حالت نیز هواپیماها باید با سرعت مشخص در ارتفاع و فاصله ثابتی از هم پرواز کنند، ضمن این که از چرخش میدان اولیه برای تعدیل حرکت‌های چرخشی فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود. چرخش میدان اولیه از طریق دو پیچک عمود بر هم که در صفحه‌ای عمود بر خط پرواز قرار دارند، تامین می‌شود. دو پیچک به وسیله یک منبع جریان متناوب تغذیه می‌شوند که با توجه به موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر، جریان در یکی از آن‌ها نسبت به دیگری به اندازه ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد. میدان ایجاد شده در حول خط پرواز می‌چرخد و به وسیله پیچکی مشابه، در گیرنده آشکارسازی می‌شود. سیگنال دریافتی با گذر از یک شبکه انحراف فاز طوری تنظیم می‌شود که مقدار میدان در بالای یک منطقه معمولی (بدون آنومالی) صفر باشد. در این صورت حضور یک توده رسانا به وسیله خروجی غیر صفر پدیدار می‌شود و اندازه‌گیری میدان ثانویه با توجه به تجزیه آن به دو مولفه حقیقی و مجازی به اجرا در می‌آید. با این سیستم ضمن افزایش عمق نفوذ میدان، خطاهای جهت‌ی کاهش می‌یابد. این روش نسبتاً پرهزینه است و تفسیر داده‌های آن به دلیل سیستم پیچک‌های مورد استفاده ساده نیست. با اجرای روش ادامه فراسوی داده‌های الکترومغناطیسی هوابرد، می‌توان تغییرات حاصل از نوسانات ارتفاع پرواز و آنومالی‌های کوچک مرتبط با منابع کم عمق را تعدیل یا حذف کرد. از روش‌های TDEM مانند INPUT1 برای ارتقای اندازه‌گیری میدان ثانویه در برداشت‌های هوابردی هم استفاده می‌شود. میدان اولیه ناپیوسته که در شکل ۴-۱۷-الف، نشان داده شده است، با گذراندن پالس‌های جریان از پیچک فرستنده ایجاد می‌شود. میدان اولیه جریانی را در یک توده رسانای واقع در زیر سطح زمین القا می‌کند. این جریان‌ها در دوره زمانی قطع میدان اولیه، پایدار می‌مانند و در این حالت گیرنده فعال می‌شود. منحنی واپاشی نمایی همانند برداشت‌های صحرائی در چندین فاصله زمانی، بررسی می‌شود.



شکل ۴-۱۷- اصول سیستم INPUT1، الف: میدان اولیه، ب: پاسخ میدان اولیه به تنهایی پ: پاسخ دریافتی در گیرنده زمانی که میدان ثانویه وجود دارد، ت: زوال سیگنال دریافتی در حالتی که میدان اولیه قطع شده است.

روند پاسخ توده‌های رسانا و رساناهای ضعیف همانند آنچه در برداشتهای TDEM صحرایی یاد شده است. هزینه سیستم INPUT نسبت به سایر روش‌های الکترومغناطیسی هواردی بیشتر است، اما به دلیل برداشت پیوسته و دقیق‌تر میدان ثانویه، عمق بررسی بزرگتری (بیشتر از ۱۰۰ متر) دارد.

۴-۶- روش‌های تفسیر داده‌های الکترومغناطیسی

روش مناسب الکترومغناطیسی بر اساس وضعیت اهداف اکتشافی و منطقه مورد مطالعه و همچنین تجهیزات اندازه‌گیری در دسترس باید انتخاب شود. با توجه به پیشرفت قابل توجه نرم‌افزارهای پردازشی و تفسیری و در صورت درک صحیح مفسر از روش‌های الکترومغناطیسی، امکان دستیابی اطلاعات اکتشافی مورد نظر با انتخاب و برداشت دقیق داده‌ها به راحتی میسر می‌شود.

۴-۶-۱- پردازش و تفسیر داده‌های TEM

با روش‌های زیادی می‌توان داده‌های TEM را پردازش کرد و این روش‌ها تا حد زیادی به سیستم وسیله‌ای جریان که داده‌های خام به وسیله آن به دست آمده است، بستگی دارد. در بیشتر سیستم‌های TEM، ولتاژهای گذرا را پس از آن که جریان اعمال شده قطع می‌شود، در بازه‌های زمانی مشخصی ثبت می‌کنند. هر زمانی که جریان اعمال و سپس قطع شود، اندازه‌گیری‌ها انجام می‌گیرد، هنگامی که جریان دوباره اعمال و قطع می‌شود، یک سری اندازه‌گیری‌های تکراری انجام می‌گیرد. این فرآیند ممکن است در یک مکان معین ده‌ها بار تکرار شود در عین حال داده‌ها به طور خودکار ثبت می‌شوند. در نتیجه، این داده‌های زیاد را می‌توان برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه پردازش کرد. از طرف دیگر داده‌های صحرایی برای تکرارپذیری آزمایش می‌شوند. به طور معمول داده‌ها نسبت به جریان فرستنده یا دیگر پارامترهای سیستم به‌هتجار می‌شوند و اثرات کاهش تدریجی با زمان را می‌توان با به‌هتجار کردن میدان اندازه‌گیری شده در هر نقطه نسبت به میدان اولیه، در همان نقطه تقویت کرد.

به همان اندازه که ویژگی داده‌ها و سیستم‌های مورد استفاده برداشت داده‌ها متفاوت است، روش‌های تفسیر نیز گوناگون هستند. به طور نوعی تفسیر در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله نخست، محل هدف احتمالی زیرسطحی بر اساس شکل، اندازه و مکان آنومالی‌های آشکار شده روی نیمرخ‌ها و نقشه‌های مربوط به پارامترها تعیین می‌شود و در مرحله دوم که بیشتر کمی است، برای تعیین رسانایی با استفاده از ثابت‌های زمانی تعیین شده از روی منحنی‌های کاهش تدریجی شدت میدان که در یک یا چند مکان حاصل شده است، انجام می‌گیرد.

به طور مثال، در مقایسه گمانه‌زنی مقاومت ویژه ظاهری اطلاعات کمتری برای اکتشاف کانی‌ها در اختیار قرار می‌دهد. در کاربرد اخیر، آهنگ‌های کاهش تدریجی با زمان ارزشمندترند، زیرا منحنی‌های تولید شده ممکن است مشخصه انواع ویژه‌ای از رسانا باشند. برای مثال، منحنی کاهش تدریجی یک رسانای جدا در محیطی مقاوم در مرحله شروع کاهش تدریجی، افت سریع دامنه نشان می‌دهد، اما تغییرات در مرحله پایانی، تبدیل به یک خط راست می‌شود. گرادیان این قطعه خط راست در ترسیم لگاریتمی، برای استخراج مشخصه ثابت زمانی (τ) به کار می‌رود. این ثابت‌های زمانی، نشانه انواع متفاوت اجسام تاثیرگذار هستند. مثال‌هایی از این ثابت‌های زمانی برای چهار نوع هدف، در جدول ۴-۳ فهرست شده است. یک رهیافت تحلیلی برای محاسبه ثابت‌های زمانی در ادامه تشریح شده است. برای اکتشاف کانی‌ها، ثابت‌های زمانی در محدوده ۰/۵ الی ۲۰ میلی‌ثانیه مهم هستند.

جدول ۳-۴- ثابت‌های زمانی برای چهار نوع هدف متداول

نوع رسانا	ثابت زمانی (τ)
کره‌ای به شعاع a	$\sigma\mu a^2/\pi^2$
استوانه‌ای به شعاع قاعده a	$1/71 \sigma\mu a^2/\pi^2$
صفحه رسانای دوبعدی با گسترش عمقی محدود (I)	$t\sigma\mu l/\pi^2$
منشور نازک به ضخامت t و بعد متوسط (I)	$\sigma\mu l/10$

رابطه کلی ثابت زمانی τ یک هدف رسانا به شکل زیر است:

$$\tau = K\delta\mu A \quad (۷-۴)$$

که در آن:

K یک ضریب عددی

A متناسب با مساحت سطح مقطع موثر رسانا است (جدول ۳-۴).

ثابت زمانی یک هدف رسانا را می‌توان از بخش خط صاف یک نمودار کاهش تدریجی TEM که روی محورهای نیمه‌لگاریتمی ترسیم شده به دست آورد. کتانژانت زاویه شیب (بر حسب درجه) به طور مستقیم ثابت زمانی رسانا را به دست می‌دهد. به طور تحلیلی، با داشتن یک دامنه اولیه A_0 ، دامنه کاهش یافته در زمان t (A_t) را می‌توان به دست آورد:

$$A_t = A_0 \exp(-t/\tau) \quad (۸-۴)$$

با لگاریتم گرفتن از دو طرف می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\ln(A_t) = \left(\frac{-1}{\tau} t + \ln(A_0) \right) \quad (۹-۴)$$

که معادله نشانگر یک خط مستقیم با شیب $-1/\tau$ است. هر گاه دامنه‌ها در دو زمان t_1 و t_2 اندازه‌گیری شود، ثابت زمانی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau = (t_2 - t_1) / L_n(A_1/A_2) \quad (۱۰-۴)$$

اجسام پریدوتیتی اغلب دارای ثابت‌های زمانی بسیار بزرگ هستند (ده‌ها میلی‌ثانیه). چنین اهدافی، به جز زمانی که با نیکل همراه باشند، اغلب اهمیت اقتصادی اندکی دارند. با این وجود، ثابت‌های زمانی به تنهایی نباید برای اهمیت زمین‌شناسی و یا اقتصادی یک هدف ویژه در نظر گرفته شوند. جهت و درجه شیب را می‌توان از عدم تقارن در مولفه‌ای اندازه‌گیری شده هنگامی که به صورت توابعی از فاصله‌های جانبی در طول خط‌های برداشت رسم می‌شوند به دست آورد. در حالی که مدلسازی کامپیوتری به طور فزاینده‌ای در تفسیر داده‌های TEM به کار می‌رود، معکوس‌سازی کلاسیک برای کاربرد در مدل‌های سه‌بعدی بسیار مشکل و پیچیده است. نرم‌افزار چنین پردازش‌هایی تا حد زیادی هنوز یکی از موارد پایه‌ای تحقیق‌اند و اجرای آن‌ها روی کامپیوتر بزرگ بسیار وقت‌گیر است. در نتیجه، این پردازش‌ها تاکنون برای کارهای تجارتي TEM که نیاز به مدلسازی سه‌بعدی دارند، به کار می‌رود.

۴-۶-۲- تفسیر داده‌های رسانایی ظاهری (نیمرخ‌زنی و گمانه‌زنی قائم)

داده‌های الکترومغناطیسی را بر اساس روشی که به دست آمده‌اند، به روش‌های مختلف می‌توان مورد تحلیل قرار داد. پارامترهای اندازه‌گیری شده را ممکن است به صورت نیمرخ‌ها و یا نقشه‌های همتراز حاصل از شبکه‌بندی‌ها رسم کرد و در آن‌ها زون‌های آنومالی را مشخص کرد. این رهیافت‌ها بیشتر به صورت کیفی و تفسیرهای مقدماتی هستند. فاصله بین پیک‌های آنومالی همانند طول دوقطبی (فاصله پیک‌ها) است. همیشه باید فاصله بین پیک‌ها را کنترل کرد، اگر از آن‌ها به طور دقیق برابر فاصله بین پیک‌ها استفاده شده باشد، هدف ایجادکننده آنومالی در نقطه وسط دو پیک قرار دارد. بسته به فاصله‌های برداشت نسبت به موقعیت هدف، پیک‌ها و افت آنومالی ممکن است اندکی عریض‌تر یا باریک‌تر از طول دوقطبی باشد. این پدیده که ناشی از تغییرات فواصل نقاط برداشت نسبت به هدف است. شکل آنومالی نیز بسته به راستای دوقطبی مورد استفاده تغییر می‌کند. اثر عوامل پوشاننده نیز در داده‌های شبکه برداشت قابل توجه است. اگر فاصله برداشت خیلی زیاد باشد، آنومالی‌های ناشی از هدف‌های کوچک (به ویژه سه‌بعدی)، ممکن است ثبت نشوند و هدف از دست برود (شکل ۴-۱۸).

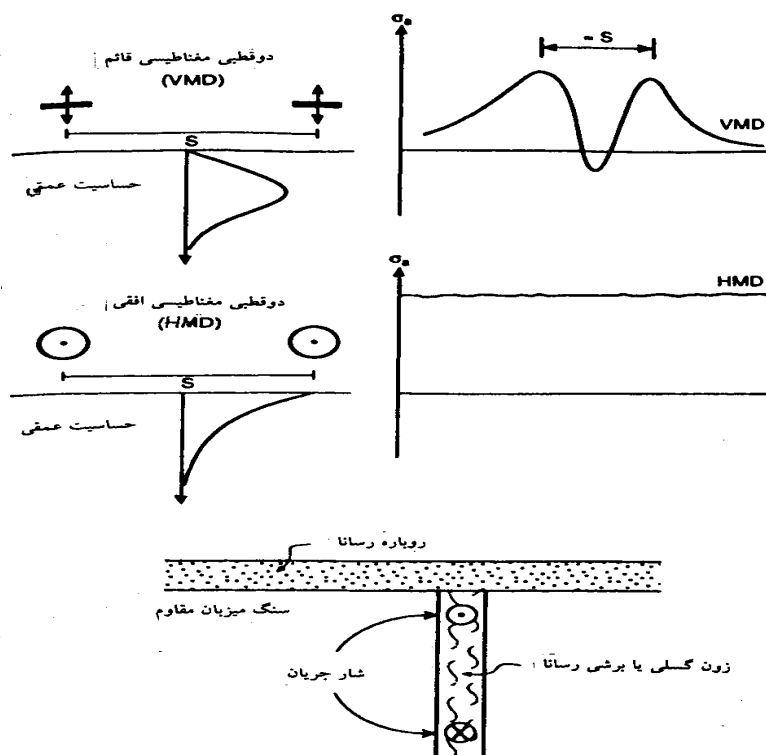
۴-۶-۳- تحلیل کامپیوتری

با استفاده از نرم‌افزار تخصصی تحلیل کمی بیشتری را می‌توان انجام داد. در این مورد دو رهیافت به شرح زیر وجود دارد:

الف- استفاده از داده‌های الکترومغناطیسی برای انجام گمانه‌زنی عمقی در یک نقطه نفوذ

ب- اجرای نیمرخ‌زنی الکترومغناطیسی در راستای یک خط یا روی یک شبکه برای تولید مقطع ژئوالکتریک دوبعدی

در حالت گمانه‌زنی عمقی، تعداد محدودی از داده‌ها به صورت تابعی از فاصله بین پیک‌ها و در راستای دوقطبی به دست می‌آید.



شکل ۴-۱۸- مثالی از اختلاف در خروجی داده‌های حاصل از دوقطبی‌های مغناطیسی افقی و قائم در بالای یک رساننده قائم برای همان فاصله بین پیک‌ها

همبستگی با داده‌های چاه یا گمانه ضخامت‌های لایه‌های مدل را برای به دست آوردن ارقام حقیقی رسانندگی میسر می‌سازد. چنین مدلی که به این طریق به دست می‌آید، ممکن است از نظر آماری مناسب باشد. برای داده‌های APEX Max Min یک سری منحنی‌های تئوری، نمودارهای فازی را می‌توان ایجاد کرد و از این طریق تعداد لایه‌ها و ارقام رسانندگی مربوط به آن‌ها و ضخامت‌ها را می‌توان از برازش یا نمودارهای فازی برداشت شده تخمین زد.

تعمیمی از تفسیر گمانه‌زنی عمقی عبارت از نیمرخ معکوس به جای داشتن یک مجموعه از داده‌های گمانه است، برای هر فاصله بین پیچکی و راستای دوقطبی در امتداد یک خط برداشت یک سری از ارقام رسانندگی ظاهری در بازه‌های معین به دست می‌آید.

فصل ۵

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی

به روش پتانسیل خودزا

۵-۱- آشنایی

این روش در مطالعات آب‌های زیرزمینی، زمین‌گرایی و همچنین مطالعه زون‌های برشی و گسل‌های کم عمق کاربرد دارد. روش SP در میان روش‌های ژئوفیزیکی معمول جزو ارزان‌ترین روش‌ها از نظر تجهیزات مورد نیاز است. اجرای برداشت‌های آن نیز نسبت به سایر روش‌های ژئوفیزیکی سطحی ساده‌تر است.

۵-۲- عوامل ایجادکننده پتانسیل خودزا

روش SP از جمله روش‌های غیرفعال ژئوفیزیکی است و این به معنای وجود اختلاف پتانسیلی است که بین دو نقطه از زمین به طور طبیعی وجود دارد. گستره پتانسیل‌های موجود کمتر از چند میلی‌ولت تا بیش از یک ولت است و به ندرت به چند ولت می‌رسد. علامت SP (مثبت یا منفی)، یکی از فاکتورهای مهم در تفسیر این آنومالی‌ها است. خلاصه‌ای از منابع ایجادکننده SP در جدول ۵-۱ درج شده است. علاوه بر منابع مندرج در این جدول، هندسه ساختارهای زمین‌شناختی نیز ممکن است باعث ایجاد آنومالی‌های SP شوند. پتانسیل‌های طبیعی زمین شامل دو مولفه‌اند که یکی ثابت و تک‌جهتی است و دیگری با زمان تغییر می‌کند. مولفه ثابت مربوط به فرآیند الکتروشیمیایی اولیه و مولفه متغیر در اثر فرآیندهای مختلفی از قبیل جریان‌های متناوب حاصل از القای طوفان‌های تدریجی، تغییرات میدان مغناطیسی زمین و حتی بارش‌های شدید ممکن است ایجاد شود. در اکتشاف مواد معدنی، مولفه‌های SP را به ترتیب پتانسیل کانی و زمینه می‌نامند. SP زمینه ممکن است وابسته به پدیده‌های آب‌زمین‌شناسی یا منابع زمین‌گرایی باشد که خود هدف‌های اکتشافی دیگری را تشکیل می‌دهند.

جدول ۵-۱- انواع آنومالی‌های پتانسیل خودزا و منابع ایجاد آن‌ها

منبع	نوع آنومالی
پتانسیل‌های معدنی	کانسارهای سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، پیروتیت، گالن و نظایر آن‌ها)
	کانسارهای گرافیت
	مینتیت و سایر کانی‌های رسانا
	زغال‌سنگ
	مگننز
پتانسیل‌های زمینه	رگه‌های کوارتزی و پگماتیت‌ها
	جریان سیال، فعل و انفعال‌های ژئوشیمیایی و نظایر آن‌ها
	بیوالکتریک (گیاهان و درختان)
	حرکت آب زیرزمینی
	مثبت با مقدار چند صد میلی‌ولت
	منفی با مقدار چند صد میلی‌ولت
	مثبت با مقدار چند صد میلی‌ولت
	مثبت یا منفی با مقدار کمتر از ۳۰۰ میلی‌ولت
	مثبت یا منفی بیش از چند صد میلی‌ولت

۵-۳- منشأ پتانسیل‌های خودزا

عامل مشترک در میان تمام فرآیندهای ایجاد پتانسیل خودزا، آب‌های زیرزمینی است. جریان الکتریکی از سه طریق در زمین منتشر می‌شود، رسانایی دی‌الکتریکی، الکترولیتی و فلزی (اهمی). رسانایی الکتریکی سنگ‌های متخلخل وابسته به درجه تخلخل سنگ و قدرت تحرک یون‌های آب (یا سیالات دیگر) واقع در درون سنگ است.

۵-۳-۱- پتانسیل‌های الکتروسینتیکی

پتانسیل الکتروسینتیکی (E_k) حاصل عبور الکتروولت از یک محیط متخلخل یا موین است. پتانسیلی که بدین ترتیب ایجاد می‌شود، شامل پتانسیل‌های الکتروفیلتراسیون، الکتروشیمیایی یا جریانی است. بنا بر قانون هلمهلتز، انتشار جریان الکتریکی به شیب هیدرولیکی و ضریب "جفت الکتروفیلتراسیون" یا پتانسیل جریانی (CE) بستگی دارد. ضریب CE وابسته به خواص الکتریکی و فیزیکی الکتروولت و همچنین محیطی است که الکتروولت از آن عبور می‌کند. از عوامل دیگری که بر این پتانسیل تاثیر می‌گذارد، مسیر جریان آب (به موازات مرزهای زمین‌شناختی یا در سطح آزاد لایه) است. مقدار این پتانسیل از رابطه ۵-۱ به دست می‌آید:

$$E_k = \varepsilon \mu C_E \delta P / 4\pi \eta \quad (1-5)$$

که در آن:

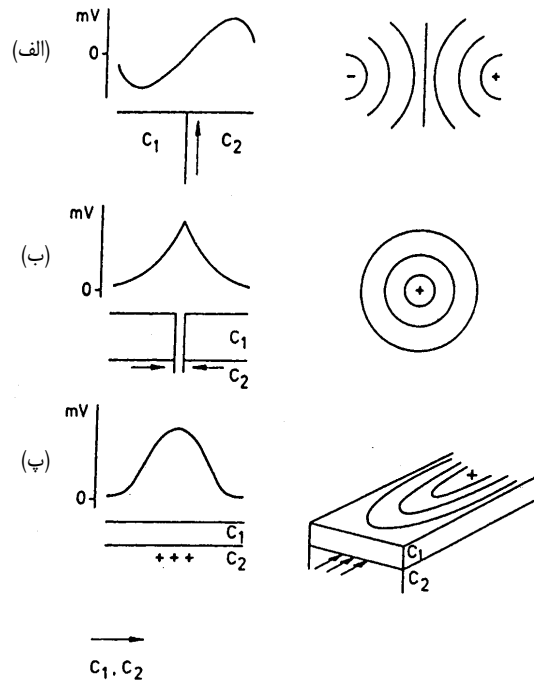
ε ثابت دی‌الکتریکی الکتروولت

μ مقاومت ویژه الکتروولت

η ضریب گرانروی (ویسکوزیته) دینامیکی الکتروولت

δP اختلاف فشار

تغییرات پتانسیل الکتروسینتیکی حاصل از وضعیت‌های مختلف زمین‌شناختی و حرکت الکتروولت در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱- نیمرخ‌ها و نقشه‌های SP الکتروفیلتراسیون در حالت ایده‌آل، الف: مرز قائم لایه‌ها و عبور آب به طرف بالا، ب: پیمایش از یک چاه، پ: جریان آب در مرز افقی دو لایه

به دلیل ایجاد پتانسیل‌های منفی در راس تپه‌ها و قله‌ها که گاه مقدار آن‌ها بسیار زیاد می‌شود، امکان پوشیده شدن پتانسیل‌های منفی حاصل از کانی‌سازی‌های سولفیدی وجود دارد. بنابراین، زمانی که خط‌های برداشت SP روی توپوگرافی‌هایی با زاویه شیب تند (بیش از ۲۰ درجه) قرار می‌گیرد، باید تصحیحاتی به منظور حذف این پتانسیل‌های نوفه‌ای در مطالعات اکتشافی کانسارها انجام گیرد. به طور معمول خطوط برداشت SP باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که نقاط اندازه‌گیری حداقل تغییر ارتفاع را داشته باشند. بدین ترتیب می‌توان تغییرات پتانسیل حاصل از اثر توپوگرافی را به حداقل رساند.

۵-۳-۲- پتانسیل‌های الکتروشیمیایی

هنگامی که دو الکترولیت با غلظت‌های مختلف و در نتیجه قدرت تحرک متفاوت یون‌ها در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، پتانسیل‌های انتشاری (E_d) ایجاد می‌شود. این پتانسیل وابسته به اختلاف غلظت نمک‌ها و نوع آن‌ها است و به چند ده میلی‌ولت می‌رسد. برای ماندگار شدن این پتانسیل، باید عدم تعادل غلظت نمک‌ها حفظ شود، در غیر این صورت با از بین رفتن اختلاف غلظت نمک‌ها در اثر پدیده انتشار^۱، پتانسیل مربوط به این پدیده نیز محو می‌شود. مقدار پتانسیل انتشاری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_d = RT[(I_a - I_c) \text{Log}(C_1/C_2)]/nF(I_a + I_c) \quad (۲-۵)$$

که در آن:

I_c و I_a به ترتیب قدرت تحرک آنیون‌ها (+ev) و کاتیون‌ها (-ev)

R ثابت گازهای کامل (8.34 KJ/mol.k)

T دمای مطلق بر حسب کلونین (K)

n ظرفیت یونی

F ثابت فاراده (96487Cmol^{-1})

C_1 و C_2 غلظت‌های محلول

پتانسیل الکتروشیمیایی دیگر، پتانسیل شیل یا نرنست (E_N) است که در حالت وجود الکترولیت‌هایی با غلظت متفاوت و حضور لایه‌های شیلی ایجاد می‌شود. از این پتانسیل در مطالعات چاه‌پیمایی به عنوان پتانسیل شیل (یا خط مبنای شیل) برای تعیین محدوده‌های متخلخل و تراوا استفاده می‌شود. مقدار پتانسیل نرنست از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_N = RT \text{log}(C_1/C_2) / nF \quad (۳-۵)$$

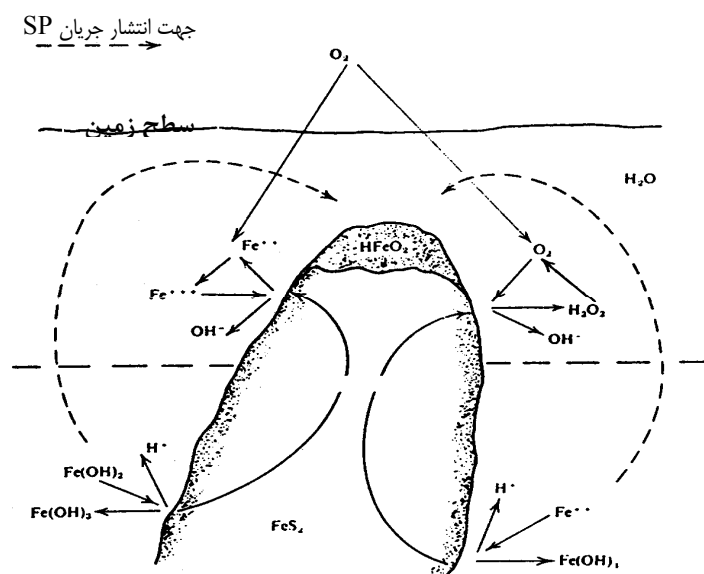
پتانسیل الکتروشیمیایی دیگر مربوط به جذب آنیون‌ها در سطح رگه‌های کوارتزی و پگماتیتی است که آن را پتانسیل جذبی (یا زتا) می‌نامند.

۵-۳-۳- پتانسیل‌های کانی

مهم‌ترین پتانسیل خودزا در اکتشاف کانسارهای فلزی از جمله کانسارهای سولفید توده‌ای، پتانسیل‌هایی است که منشأ فلزی دارند. آنومالی‌های منفی گسترده‌ای در ارتباط با کانی‌های پیریتی، کالکوپیریتی و دیگر کانی‌هایی که رسانندگی الکتریکی بالایی دارند، قابل اندازه‌گیری است (شکل ۵-۲). زمانی که بخشی از یک کانسار سولفیدی در زیر سطح ایستابی و بخش دیگر آن در بالای

این سطح قرار دارد، بخشی از کانسار که در بالای سطح مذکور واقع است، اکسیده می‌شود و یک نیم‌سلول کاتدی را تشکیل می‌دهد و بدین ترتیب تجمعی از بارهای منفی (الکترون‌ها) را در سطح بالایی کانسار به همراه دارد. برعکس، بخش پایینی کانسار که در زیر سطح ایستابی قرار دارد، یک سلول الکتروشیمیایی آندی را به دلیل کاهش اکسیداسیون و از دست دادن الکترون یون‌ها تشکیل می‌دهد. رسانندگی کانسار امکان شارش الکترون‌ها از بخش پایین کانسار به بالای آن را فراهم می‌سازد که جریان حاصل در عبور از زمین یک پتانسیل منفی را به دنبال دارد. گرچه این مدل به طور کامل به تمام حالت‌ها به ویژه زمانی که بیش از یک کانی‌سازی در متن این پدیده قرار می‌گیرد، پاسخ نمی‌دهد، ولی به هر حال کامل‌ترین توضیحی است که تاکنون برای پدیده SP ارائه شده است. ایجاد پدیده SP به عوامل زیر بستگی دارد:

- وجود کانی‌سازی رسانا و پیوسته
- قرارگیری کانسار در بالا و پایین سطح ایستابی
- وجود اکسیژن کافی در بخش بالایی توده و اکسید شدن آن
- نبود رولایه ضخیم (عمق زیاد کانسار) با مقاومت ویژه زیاد
- نبود رولایه کاهنده اکسیژن (مانند کربن) و یا پوشش‌های گیاهی متراکم



شکل ۵-۲- ساز و کار فیزیکی شیمیایی تشکیل SP در یک کانی‌سازی سولفیدی توده‌ای

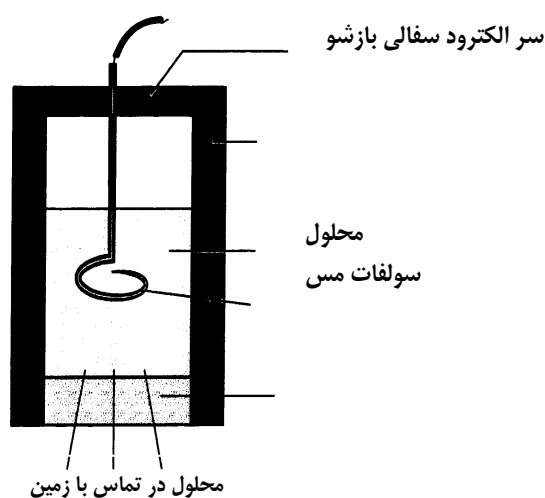
۵-۴- اندازه‌گیری و برداشت‌های SP

برای اندازه‌گیری SP، دو الکتروود سفالی غیرقابل پلاریزه پس از اتصال به زمین از طریق سیم‌های رابط به یک پتانسیومتر دقیق با مقاومت ظاهری (امپدانس) ورودی بیش از ۱۰^۸ اهم متصل می‌شوند. دستگاه اندازه‌گیری باید حساسیت اندازه‌گیری پتانسیل‌های تا یک میلی‌ولت را داشته باشد. هر الکتروود سفالی شامل یک الکتروود مسی است که در محلولی اشباع از سولفات مس قرار می‌گیرد.

بخش پایینی الکتروود سفالی از یک پایه متخلخل تشکیل شده است، که در تماس با زمین قرار می‌گیرد (شکل ۵-۳). الکتروودهای سفالی دیگری مانند الکتروود روی را همراه با سولفات روی نیز می‌توان به کار برد.

برای برداشت‌های SP دو روش وجود دارد که همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی خطوط برداشت عمود بر امتداد احتمالی هدف اکتشافی در نظر گرفته می‌شود. روش اول، اندازه‌گیری گرادیان پتانسیل است که در آن از دو الکتروود با فاصله‌ای ثابت (به طور معمول ۵ یا ۱۰ متر) استفاده می‌شود. حاصل تقسیم پتانسیل اندازه‌گیری شده بر فاصله دو الکتروود، گرادیان پتانسیل بر حسب میلی‌ولت بر متر (mv/m) است که به نقطه وسط بین فاصله بین دو الکتروود نسبت داده می‌شود. روش دوم، اندازه‌گیری دامنه پتانسیل است که در آن یکی از الکتروودهای سفالی به طور ثابت در یک ایستگاه واقع در خارج محدوده کانی‌سازی احتمالی قرار می‌گیرد و الکتروود دوم پس از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در هر نقطه روی خط برداشت، به نقطه بعدی خط مذکور انتقال می‌یابد و اندازه‌گیری ادامه پیدا می‌کند. این روش از تداخل پلاریزه شدن و تجمع خطاها جلوگیری می‌کند. در اجرای این روش باید توجه کرد که اختلاف دمای محل الکتروود سفالی ثابت با الکتروود متحرک زیاد نباشد، زیرا این اختلاف دما، خود ممکن است باعث ایجاد اختلاف پتانسیل شود. ضریب دما برای الکتروود مس- سولفات مس حدود 0.5 میلی‌ولت بر درجه سانتی‌گراد است. SP اندازه‌گیری شده از دو مولفه تشکیل شده که یکی ثابت و تک‌جهتی و دیگری متغیر و تناوبی است. فرکانس مولفه متغیر عموماً بین ۵ تا صفر هرتز و عامل ایجاد آن تاثیر اتمسفر است. پتانسیل مولفه متغیر در حالت زمان تناوب بلند ممکن است دامنه‌ای قابل مقایسه با پتانسیل مربوط به کانی‌سازی داشته باشد. بنابراین، در چنین حالت‌هایی، این گونه نوفه‌ها کیفیت داده‌های SP را کاهش می‌دهند. کیفیت داده‌ها را می‌توان با تکرار اندازه‌گیری روی یک خط برداشت و در زمان‌های مختلف در یک روز و میانگین‌گیری داده‌ها در هر ایستگاه، بهبود بخشید.

گستره عمقی بیشینه برای روش SP حدود 60 تا 100 متر است که به عمق کانی‌سازی و ضخامت رولایه بستگی دارد.



شکل ۵-۳- مقطع یک الکتروود سفالی متخلخل

۵-۵- تفسیر آنومالی‌های SP

بر اساس مدل ارایه شده (شکل ۵-۲)، پتانسیل‌های مربوط به کانی‌سازی‌های سولفیدی پیوسته به صورت قطب‌های مشخص منفی روی نیمرخ‌ها یا نقشه‌های همتراز دیده می‌شوند. بنابراین، تعیین محل این قطب امکان شناخت محل سر کانسار را فراهم می‌سازد. تعیین محل مقدار بیشینه SP منفی در قدم اول و تعیین محل بیشینه مثبت (در صورت موجود بودن) در مرحله بعدی، برای دستیابی به اطلاعات اکتشافی اهمیت ویژه‌ای دارد. به همین ترتیب می‌توان با تجسس قطب‌های منفی و مثبت روی نقشه‌های SP، از محل کانی‌سازی، گسترش و شیب احتمالی آن اطلاع یافت و موقعیت‌های مناسب حفاری‌های اکتشافی را انتخاب کرد.

در تفسیر نقشه‌ها و مقاطع SP، موارد زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

الف- مقدار SP زمینه که ممکن است از مقادیر نزدیک به صفر و به صورت مثبت یا منفی شروع شود، در صورتی که در محدوده مطالعات پدیده ایجاد SP در اثر آب‌های زیرزمینی وجود داشته باشد، مقادیر افزایش می‌یابد و گاه ممکن است به عنوان SP پارازیتی، SP فلزی مورد نظر را بپوشاند.

ب- تعیین مراکز SP که شامل بیشینه SP با علامت منفی (مینیمم) و مقدار بیشینه SP با علامت مثبت (ماکزیمم) است. این دو مرکز نشانگر محدوده بالای کانسار (قطب منفی) و محدوده پایین (قطب مثبت) هستند. هر چه مرکز مثبت بیشتر باشد، به معنای افزایش احتمالی شیب کانی‌سازی است. در حالت کانی‌سازی با شیب قائم، مرکز منفی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و مرکز SP مثبت حذف می‌شود. روش SP به طور مشخص به کانی‌سازی‌های یکپارچه مانند شکل‌های عدسی و شیب زیاد بهتر پاسخ می‌دهد. پاسخ SP برای کانی‌سازی‌های پراکنده، ضعیف یا بی‌حاصل است. عواملی همچون پوشش کانی‌سازی به وسیله سطح ایستابی، افزایش ضخامت و مقاومت ویژه رولایه، عدم اکسیداسیون بخش بالایی کانسار، در کاهش و از بین رفتن اثر SP فلزی موثر هستند.

فصل ۶

فهرست خدمات و راهنمای اجرای

روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون

القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا

۶-۱-۱- آشنایی

برنامه‌ریزی و انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا متناسب با نوع ماده معدنی و تیپ ذخیره مورد نظر (جدول ۱-۳) و مراحل مختلف اکتشاف (جدول ۱-۲) و بر اساس اهداف و ابعاد منطقه مورد مطالعه انجام می‌گیرد.

۶-۲-۲- فهرست خدمات

۶-۲-۱- نقشه‌ها و مدارک

کلیه نقشه‌ها و مدارک بر اساس مقیاس به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الف- نقشه‌های کوچک مقیاس با مقیاس کوچکتر از ۱:۵۰۰۰۰۰

ب- نقشه‌های متوسط مقیاس با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰۰

پ- نقشه‌های بزرگ مقیاس با مقیاس بزرگتر از ۱:۱۰۰۰۰۰

۶-۲-۲- محدوده مطالعات

مطالعات بر اساس وسعت محدوده به سه گروه ناحیه‌ای، منطقه‌ای و محلی به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

الف- مطالعات ناحیه‌ای

مطالعاتی است که با دقتی قابل قبول می‌توان بر روی نقشه‌های کوچک مقیاس انجام داد. مطالعات IP، RS و SP معمولاً در این مقیاس انجام نمی‌شود و معمولاً مطالعات در این مرحله، با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی و مغناطیس‌سنجی هوابردی انجام می‌گیرد و پس از آن مناطق کوچکتری برای مطالعات بعدی انتخاب می‌شود.

ب- مطالعات منطقه‌ای

مطالعاتی است که با توجه به اهداف مطالعه، بر روی نقشه‌های متوسط مقیاس انجام می‌گیرد. در این مرحله مطالعات IP و مقاومت ویژه با استفاده از آرایه‌هایی مانند مستطیلی و قطبی-دوقطبی با بازه بزرگ انجام شده و آنومالی‌های حاصل برای مطالعات محلی معرفی می‌شوند.

پ- مطالعات محلی

این مطالعات با دقت زیاد و آرایه‌های خاص بر روی نقشه‌های بزرگ مقیاس انجام می‌گیرد.

۶-۲-۳- گستره مطالعات

مطالعات ژئوفیزیکی را بر اساس اهداف مطالعه می‌توان به دو مرحله عمده شناسایی و تفصیلی تقسیم کرد:

به طور معمول در مرحله شناسایی، مطالعات پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه از نظر هزینه توجیه‌پذیر نیست و می‌توان از نقشه‌ها و اطلاعات موجود و نیز روش‌های ژئوفیزیکی با سرعت بیشتر و هزینه کمتر مانند الکترومغناطیسی و مغناطیس‌سنجی هوابردی برای معرفی مناطق محدودتر و امیدبخش استفاده کرد. در مطالعات تفصیلی، عمدتاً محدوده‌هایی که از مرحله قبل

(شناسایی) مشخص شده است، برای برداشت‌ها انتخاب می‌شوند. در این مرحله، با استفاده از کلیه اطلاعات موجود، برداشت‌ها برنامه‌ریزی می‌شود. در مطالعات تکمیلی می‌توان بر اساس تلفیق نتایج مطالعات تفصیلی و نتایج بررسی‌های اکتشافی دیگر از جمله حفاری‌های اکتشافی، بخش‌هایی را برای مطالعات تکمیلی پیشنهاد کرد.

۶-۲-۴- طراحی و اجرای روش‌ها

برنامه‌ریزی برای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل خودزا و الکترومغناطیسی برای

شناخت آنومالی‌ها در یک منطقه اکتشافی باید با توجه به نکات اصلی زیر انجام گیرد:

الف- مشخصات کانسار مورد مطالعه و محیط سنگی در برگرفته آن

ب- ارزیابی نوفه‌های احتمالی در منطقه مورد مطالعه

پ- انتخاب آرایه مناسب فرستنده- گیرنده برای پلاریزه کردن زمین به بهترین نحو و دریافت پاسخ مناسب در ارتباط با

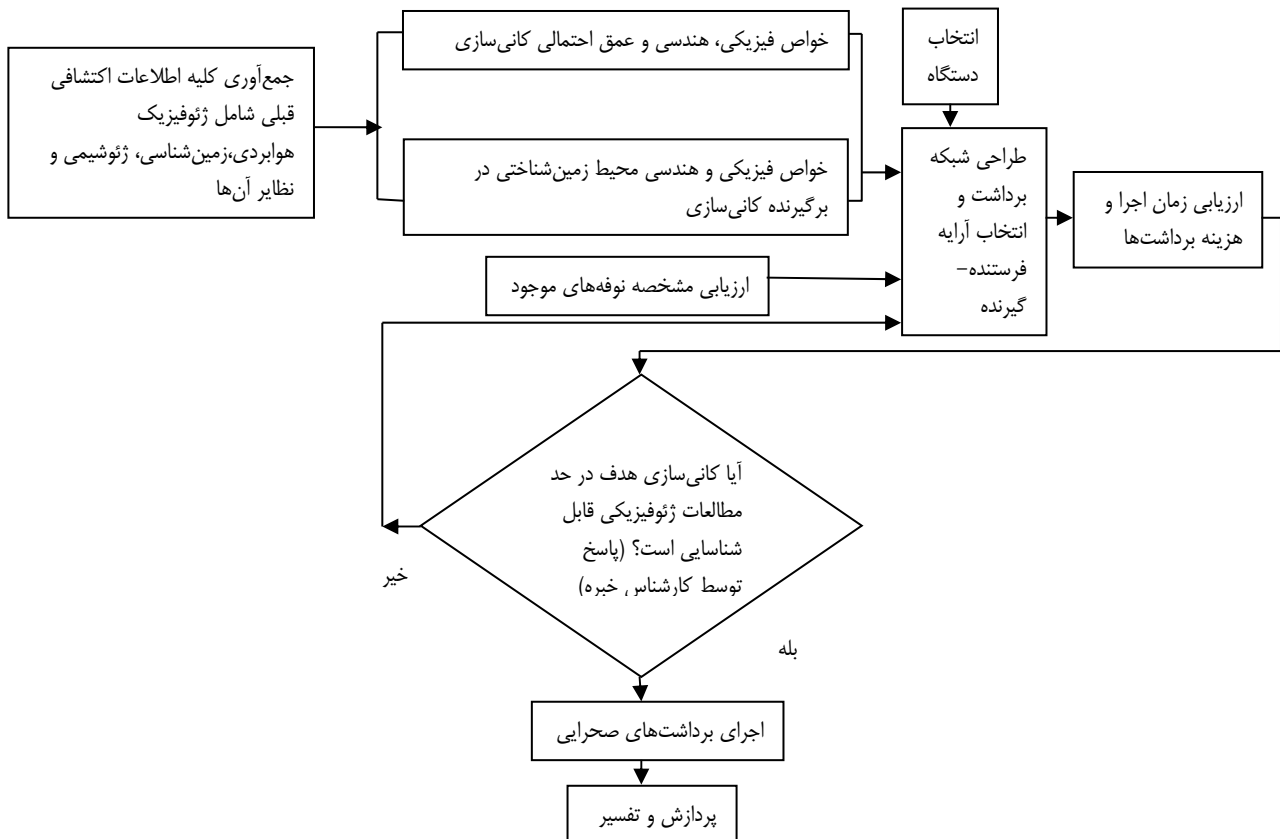
کانی‌سازی

ت- انتخاب شبکه برداشت مناسب شامل امتداد، شکل و ابعاد شبکه

برای دستیابی به یک دستورالعمل مناسب در برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل

خودزا و الکترومغناطیسی، عملیات را مطابق شکل ۶-۱ برنامه‌ریزی می‌کنند تا هدف مورد نظر حاصل شود. به دلیل تنوع اهداف

اکتشافی و محیط زمین‌شناسی آرایه یک دستورالعمل واحد امکان‌پذیر نیست و باید گزارش‌ها به طور موردی تهیه شود.



شکل ۶-۱- طراحی عملیات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، پتانسیل خودزا و الکترومغناطیسی تا مرحله پردازش و تفسیر

۶-۲-۵- جمع‌آوری اطلاعات

این مرحله نقش مهمی در اجرای پروژه دارد. دستیابی به یک طراحی مناسب برداشت، کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از کارهای تکراری از عمده‌ترین مزیت‌های این مرحله است. بنابراین، اطلاع مجری از بانک‌های اطلاعات اکتشافی موجود در کشور لازم و ضروری است.

۶-۳-۳- فهرست خدمات و نحوه برداشت‌ها به روش‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی

۶-۳-۱- هدف

هدف از این مطالعات، شناسایی و آرایه مدل ژئوفیزیکی کنسارها (عمدتا کنسارهای سولفیدی) یعنی تعیین گسترش سطحی و عمقی (به طور تقریب) کانی‌سازی است. تعیین محل‌های مناسب حفاری اکتشافی، با تلفیق این اطلاعات با داده‌های زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی و پیشنهاد ادامه مطالعات تکمیلی (در صورت لزوم) انجام می‌گیرد.

۶-۳-۲- برنامه‌ریزی

برنامه‌ریزی مطالعات مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی متناسب با اهداف پروژه و امکانات محلی برای اجرای عملیات انجام می‌گیرد.

۶-۳-۳- مدارک مورد نیاز

این مدارک شامل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و سایر اطلاعات اکتشافی از جمله اطلاعات ژئوشیمیایی (در صورت امکان) است. از آنجا که به طور معمول این مطالعات در مرحله مقدماتی به اجرا در نمی‌آید، مقیاس نقشه‌های مورد لزوم، باید متوسط یا بزرگ باشد.

۶-۳-۴- انتخاب آرایه و فاصله الکترودها

برای شناخت اولیه کلیه آنومالی‌های موجود در محدوده تعریف پروژه از آرایه‌های زیر استفاده می‌شود:

الف- آرایه مستطیلی

ب- آرایه قطبی-دوقطبی (سه‌قطبی) با خط فرستنده و گیرنده ثابت

پ- آرایه و نر متحرک

آرایه مستطیلی که در ایران از آن زیاد استفاده می‌شود، در شرایط زیر نتیجه بهتری دارد:

- نبود رولایه با مقاومت ویژه کم و ضخامت زیاد یا رولایه ضخیم با مقاومت ویژه بسیار زیاد

- گسترش عمقی مناسب کانی‌سازی

- نبود مقاومت ویژه زیاد برای سنگ درونگیر به ویژه در حالت کانی‌سازی افشان و پراکنده

در شرایط زیر می‌توان آرایه قطبی-دوقطبی را جایگزین آرایه مستطیلی کرد:

- وجود لایه مقاوم

- تشکیل کانی‌سازی در یک محیط سنگی مقاوم

به دلیل بعضی محدودیت‌های آرایه قطبی-دوقطبی، از جمله ظاهر شدن مقادیر خارج از محدوده کانسار به صورت آنومالی، زمانی که الکتروود ثابت تزریق جریان در نزدیکی کانسار قرار می‌گیرد و شکل نامتقارن IP (حتی در حالت تقارن کانسار) تعیین محل کانسار را با مشکل روبه‌رو می‌کند، می‌توان از آرایه ونر متحرک استفاده کرد.

فاصله الکتروودی آرایه‌ها متناسب با عمق مورد انتظار کانی‌سازی انتخاب می‌شود. پس از تعیین محدوده آنومالی‌های IP و مقاومت ویژه، با استفاده از آرایه‌های یاد شده، با توجه به تمامی اطلاعات موجود، به روش زیر عمل می‌شود:

- معرفی تمام آنومالی‌های IP با در نظر گرفتن IP زمینه و کلیه اطلاعات موجود

- اولویت‌بندی آنومالی‌های IP برای اجرای آرایه دوقطبی-دوقطبی روی آن‌ها

- انتخاب فاصله دوقطبی‌ها و مقدار n (تعداد پرش دوقطبی) بر اساس تخمین گسترش عمقی بخش سولفیدی کانسار و نیز کارایی آرایه و قدرت دستگاه اندازه‌گیری

فاصله دوقطبی‌ها در آرایش دوقطبی-دوقطبی به صورت جدول ۶-۱ پیشنهاد می‌شود:

جدول ۶-۱- فاصله دوقطبی‌ها در شرایط مختلف

طول دوقطبی	n
میانگین ضخامت رولایه (به طور تقریب)	۱ تا ۳ $n=$
میانگین ضخامت رولایه	$n > 3$

به طور معمول با افزایش n ، افزایش عمق بررسی IP قابل انتظار است، اما این موضوع همیشه و به ویژه در مواردی که مقاومت ویژه رولایه کم باشد، صادق نیست. برای مقادیر $n > 8$ ، معمولاً نسبت سیگنال به نوفه ضعیف می‌شود. بنابراین، برای افزایش عمق بررسی با آرایه دوقطبی-دوقطبی، به جای انتخاب مقادیر n بزرگتر از ۸، بهتر است طول دوقطبی را افزایش داد.

طول دوقطبی باید با توجه به گسترش احتمالی کانسار انتخاب شود. این طول از ۱۰ متر شروع می‌شود و در مواردی این مقدار ممکن است به ۲۵ متر نیز برسد. اثر اهداف اکتشافی کوچک مانند سولفیدهای طلادار، در فاصله‌های بزرگتر خط آرایه ضعیف‌تر می‌شود. از آرایه ونر متحرک در مرحله تفصیلی هم می‌توان استفاده کرد.

۶-۳-۵- انتخاب شبکه برداشت و فاصله آن‌ها

به منظور پوشش مناسب محدوده مورد مطالعه و آشکارسازی آنومالی‌های موجود موارد زیر توصیه می‌شود:

- انتخاب شبکه برداشت مربعی در صورت عدم شناخت امتداد کانی‌سازی (شبکه مربعی هزینه بیشتری دارد و بنابراین این انتخاب، تحت تاثیر بودجه پروژه نیز هست)

- انتخاب شبکه برداشت مستطیلی در صورت آگاهی از روند کانی‌سازی

فواصل زیر در مرحله مطالعات IP و مقاومت ویژه پیشنهاد می‌شود:

- فاصله خطوط برداشت ۵۰ متر و نقاط برداشت ۲۵ متر برای آرایه مستطیلی در حالتی که شبکه مورد نظر مستطیلی باشد.

- فاصله ۱۰ تا ۲۵ متر برای تهیه مقاطع شبه عمیق با آرایه دوقطبی-دوقطبی. در این آرایه معمولاً فاصله نقاط برداشت برابر

فاصله دوقطبی در نظر گرفته می‌شود.

- امتداد خطوط برداشت عمود بر امتداد کانی‌سازی احتمالی و در صورت نامشخص بودن امتداد کانی‌سازی، عمود بر لایه‌ها انتخاب می‌شود (در آرایه مستطیلی).

انتخاب فاصله خطوط برداشت و ایستگاه‌های اندازه‌گیری متاثر از شکل، گسترش (ابعاد)، شیب و عمق کانی‌سازی است و باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که تعداد کافی داده برداشت شود. عدم برداشت تعداد مناسب داده‌ها، منجر به خطای تفسیر در این مطالعات می‌شود. برای دو آرایه مستطیلی و دوقطبی-دوقطبی، شبکه‌بندی مطابق جدول ۶-۲ پیشنهاد می‌شود. شبکه آرایه شده قابل تغییر است و کارشناس خبره می‌تواند به تشخیص خود با توجه به شرایط منطقه در آن تغییراتی بدهد.

جدول ۶-۲- شبکه‌بندی برای آرایه‌های مختلف

آرایه	AB (متر)	شبکه برداشت (متر)
مستطیلی	بیشتر از ۱۲۰۰	۲۰×۴۰ متر
	۱۲۰۰ تا ۶۰۰	۱۰×۲۰ متر
	کمتر از ۶۰۰	۵×۱۰ متر
دوقطبی-دوقطبی	بزرگتر از ۱۰	بستگی به عمق آنومالی‌ها دارد.

۶-۳-۶- اجرا

پس از برنامه‌ریزی، اجرای عملیات صحرایی طی مراحل زیر انجام می‌گیرد:

الف- پیاده کردن نقاط اندازه‌گیری

در مطالعات تفصیلی استفاده از نقشه‌های توپوگرافی متوسط و بزرگ‌مقیاس برای پیاده کردن نقاط برداشت کافی است. در صورت عدم دسترسی به نقشه‌های توپوگرافی می‌توان از GPS‌های دقیق برای تعیین مختصات نقاط استفاده کرد. در مرحله پردازش داده‌ها، تصحیح توپوگرافی به تفسیر دقیق‌تر آنومالی‌های IP و مقاومت ویژه کمک می‌کند. در مطالعات تکمیلی، در اختیار داشتن نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس لازم است. در صورت نبود نقشه‌های یاد شده، بهتر است نقاط اندازه‌گیری با استفاده از برداشت‌های نقشه‌برداری پیاده شود.

ب- اندازه‌گیری

اندازه‌گیری یکی از مراحل اصلی و پرهزینه برداشت‌های الکتریکی است و دقت نتایج نهایی به این مرحله بستگی دارد. دو عامل مهم که در این مرحله نقش دارند، پرسنل و تجهیزات مورد استفاده هستند.

یک گروه صحرایی برداشت‌های IP و مقاومت ویژه، شامل یک نفر کارشناس خبره آشنا به مسایل IP و مقاومت ویژه، دو نفر تکنسین با سابقه برای اجرای برداشت‌ها و نقطه‌گذاری و متناسب با حجم عملیات صحرایی، ۵ تا ۸ نفر کارگر است. کارشناس خبره به عنوان سرپرست تیم، برنامه‌ریزی و کنترل برداشت‌ها را بر عهده دارد. کارشناس خبره با کنترل داده‌ها در پایان هر روز کاری با توجه به شناخت مساله باید امکان تعدیل، افزایش و اصلاح شبکه برداشت را در حد شرح وظایفی که برای وی تعریف شده است، داشته باشد. این اختیار در صورتی که به کارشناس خبره داده شود، در بهینه‌سازی برداشت‌ها و در نهایت کاهش ریسک و افزایش بازده کار نقش موثری خواهد داشت. تطابق نقاط برداشت در روی نقشه‌ها با محل آن‌ها بر روی زمین از دیگر وظایف سرپرست گروه است.

دستگاه‌های اندازه‌گیری IP و مقاومت ویژه از یک مولد جریان الکتریکی، فرستنده و گیرنده تشکیل شده‌اند که بر اساس نیاز اندازه‌گیری‌ها، مشخصات و کارایی‌های متفاوتی دارند. به طور کلی در ارزیابی دستگاه اندازه‌گیری در ارتباط با یک پروژه برداشت باید نکات زیر در نظر گرفته شود:

- توان تولید جریان الکتریکی مورد نیاز با توجه به عمق بررسی مورد نظر و پاسخ‌گویی به آرایه‌های در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری

- امکان انتخاب گستره‌های مختلف شدت جریان، زمان شارژ و زمان نمونه‌برداری برای برداشت‌های IP نوع زمان-حوزه‌ای و گستره فرکانس مناسب برای برداشت‌های IP نوع فرکانس-حوزه‌ای

- داشتن دقت کافی برای اندازه‌گیری پتانسیل و جریان با دقت حدود $\pm 1\%$ و دارا بودن نسبت سیگنال به نوفه بالا
قرائت‌ها باید عاری از خطاهای معمول باشد که در این مطالعات حاصل پلاریزاسیون الکترودی، پتانسیل ناشی از تماس الکترودها با زمین و همچنین جریان‌های طبیعی زمین است، و تا حد امکان باید نوفه‌های اندازه‌گیری به حداقل برسد. دو اشکال عمده در این مطالعات که باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری IP می‌شود، یکی نشت جریان به زمین به دلیل زدگی و پوسیدگی سیم‌های جریان و دیگری نشت جریان به مدار پتانسیل به علت رطوبت یا مجاورت سیم‌ها با یکدیگر است.

در شروع هر روز کاری با نظارت کارشناس خبره باید از سالم بودن روپوش سیم‌ها و شرایط کارکرد مناسب دستگاه اطمینان حاصل کرد.

پ- مقاومت الکترودی

یکی از مسایل مهم در برداشت‌ها، مقاومت الکترودهای تزریق جریان در محل قرارگیری آن‌ها است. این مقاومت به طور معمول در حد چند هزار اهم است و هر چه این مقاومت بیشتر باشد، از حساسیت دستگاه کاسته می‌شود. مقاومت زمین در محل قرارگیری الکترودها باعث کاهش چگالی جریان تزریقی و مقاومت زیاد الکترودهای پتانسیل سبب حساسیت کم و ابهام در قرائت پتانسیل و به دنبال آن پارامترهای مربوط به IP و مقاومت ویژه می‌شود.

برای کاهش مقاومت الکترودی راه کارهای زیر توصیه می‌شود:

- افزایش تعداد الکترودهای فرعی (الکترودهای چندتایی) که به فاصله یک متر و کمتر، از هم چیده می‌شوند و روی امتداد عمود بر امتداد خط برداشت قرار می‌گیرند و همگی به الکتروود اصلی متصل می‌شوند. به عنوان مثال کاهش مقاومت (R) در محل تزریق با الکترودهایی به قطر ۲۵ میلی‌متر به صورت جدول ۳-۶ است (p مقاومت ویژه زمین در محل الکترودها).

جدول ۳-۶- کاهش مقاومت در محل تزریق با الکترودهایی به قطر ۲۵ میلی‌متر

$R = 1.65 \rho$	یک میله فلزی ۴۰ سانتی‌متری که در زمین فرو رفته باشد.
$R = 0.6 \rho$	یک جفت میله فلزی با فاصله یک متر
$R = 0.8 \rho$	یک میله بلند که یک متر در زمین فرو رفته باشد.
$R = 0.2 \rho$	۱۰ میله بلند به فاصله‌های یک متر

به هنگام استفاده از چند الکتروود در یک نقطه، فاصله آن‌ها باید بیشتر از عمق فرورفتگی آن‌ها در زمین باشد.

- الکترودها در صورت امکان با زمین مرطوب در تماس باشند.

- آب یا آب نمک در اطراف الکترودها ریخته شود. برای کاهش مقاومت الکترودهای پتانسیل برای جلوگیری از پتانسیل تماسی از آب بدون نمک استفاده شود.

- در اندازه‌گیری پتانسیل باید از الکترودهای سفالی استفاده شود.

در مرحله اجرای برداشتها یکی از نکات اساسی کنترل کیفیت داده‌ها توسط کارشناس خبره و تایید آن به وسیله ناظر پروژه است. بنابراین، کارشناس خبره باید کامپیوترهای قابل حمل همراه داشته باشد و در زمان برداشت آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دهد. بدین ترتیب، در پایان مرحله اجرای اندازه‌گیری‌ها، داده‌هایی تا حد امکان دقیق برای تهیه نقشه‌ها، مقاطع و مدلسازی‌های مورد نظر در دسترس قرار خواهد گرفت.

۴-۶- فهرست خدمات و نحوه اجرای روش الکترومغناطیسی

۴-۶-۱- کلیات

برنامه‌ریزی و انجام بررسی‌های الکترومغناطیسی و ژئوالکتریکی باید متناسب با نوع ماده معدنی و کانی‌سازی مورد نظر و مراحل مختلف اکتشاف بر اساس اهداف و ابعاد منطقه مورد مطالعه انجام گیرد و مسایل زیر باید در نظر گرفته شود:

- نقشه‌های مورد استفاده بر اساس کاربرد آن‌ها در سه مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم‌بندی می‌شوند.
- محدوده مطالعات بر اساس وسعت به سه گروه ناحیه‌ای، منطقه‌ای و محلی هم‌خوان با مقیاس نقشه‌ها در نظر گرفته می‌شوند.
- گستره مطالعات بر اساس اهداف مطالعه در سه دسته شامل مقدماتی، تفصیلی و تکمیلی تقسیم می‌شود.

الف- نقشه‌ها و مدارک

کلیه نقشه‌ها و مدارک بر اساس مقیاس به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- نقشه‌های کوچک مقیاس با مقیاس کوچکتر از ۱:۵۰۰۰۰۰

- نقشه‌های متوسط مقیاس با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰۰

- نقشه‌های بزرگ مقیاس با مقیاس بزرگتر از ۱:۱۰۰۰۰۰

ب- محدوده مطالعات

مطالعات بر اساس وسعت محدوده برداشت به سه گروه ناحیه‌ای، منطقه‌ای و محلی به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

- مطالعات ناحیه‌ای: مطالعاتی است که با دقتی قابل قبول می‌توان بر روی نقشه‌های کوچک مقیاس انجام داد. در این مرحله، مطالعات با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی و مغناطیس‌سنجی هواپردی انجام می‌گیرد و پس از آن مناطق کوچکتری برای مطالعات زمینی انتخاب می‌شود.

- مطالعات منطقه‌ای: مطالعاتی است که می‌توان با توجه به اهداف مطالعه بر روی نقشه‌های متوسط مقیاس انجام داد.

- مطالعات محلی: این مطالعات با دقت قابل قبول و آرایه‌های خاص بر روی نقشه‌های بزرگ مقیاس و در محدوده آنومالی‌های

ردیابی شده در مطالعات منطقه‌ای انجام می‌گیرد.

پ- گستره مطالعات

- مطالعات ژئوفیزیکی را بر اساس اهداف مطالعه به سه رده مقدماتی، تفصیلی و تکمیلی تقسیم می‌کنند:
- مطالعات مقدماتی: مطالعات این مرحله به طور معمول تنها با استفاده از روش الکترومغناطیسی هوابردی توجیه‌پذیر است. در صورت برداشت‌های الکترومغناطیسی هوابردی، از این مطالعات می‌توان برای محدود کردن مناطق برداشت زمینی برای اجرای روش‌های الکترومغناطیسی زمینی IP، مقاومت ویژه و SP استفاده کرد. در این مطالعات با استفاده از کلیه اطلاعات و نقشه‌ها، مناطقی برای مطالعات الکتریکی و الکترومغناطیسی پیشنهاد می‌شود.
 - مطالعات تفصیلی: در مطالعات الکترومغناطیسی زمینی محدوده‌هایی که از مرحله قبل مشخص شده برای برداشت‌ها انتخاب می‌شوند. در این مرحله، با استفاده از کلیه اطلاعات موجود، برداشت‌ها تعریف می‌شود.
 - مطالعات تکمیلی: کارفرما می‌تواند بر اساس تلفیق نتایج مطالعات تفصیلی و نتایج بررسی‌های اکتشافی دیگر با نظر مهندس مشاور، بخش‌هایی با مساحت محدودتر را برای مطالعات تکمیلی پیشنهاد کند.
- حفاری‌های اکتشافی باید بعد از خاتمه مطالعات ژئوفیزیکی و تلفیق آن با مطالعات دیگر انجام گیرد.

ت- اجرا

- پس از برنامه‌ریزی، اجرای عملیات صحرایی برداشت‌های الکترومغناطیسی طی مراحل زیر انجام می‌گیرد:
- پیاده کردن نقاط اندازه‌گیری
- در مطالعات تفصیلی از نقشه‌های توپوگرافی متوسط و بزرگ‌مقیاس برای تعیین موقعیت نیمرخ‌ها و ایستگاه‌های برداشت استفاده می‌شود. در صورت عدم دسترسی به نقشه‌های یاد شده می‌توان نقاط برداشت را به وسیله GPS‌های دقیق مشخص کرد. تصحیح توپوگرافی در تمامی روش‌های الکترومغناطیسی (به ویژه روش‌هایی مانند VLF و TDEM) باعث افزایش کیفیت داده‌های خام می‌شود.
- در صورت نیاز برای مطالعات تکمیلی، در اختیار داشتن نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس لازم است. در صورت موجود نبودن این نقشه‌ها بهتر است نقاط اندازه‌گیری با برداشت‌های نقشه‌برداری مشخص شود.

ث- اندازه‌گیری

- اندازه‌گیری پارامترهای مختلف الکترومغناطیسی به طور معمول پرهزینه و دقت نتایج نهایی وابسته به این مرحله از پروژه است. دو عامل عمده مطرح در این مرحله، پرسنل و تجهیزات مورد استفاده است.
- گروه صحرایی برداشت‌های الکترومغناطیسی شامل یک نفر کارشناس خبره آشنا به مسایل الکترومغناطیسی، دو نفر تکنسین برداشت با سابقه، متناسب با حجم عملیات صحرایی ۲ تا ۵ نفر کارگر برای برداشت‌ها و نقطه‌گذاری است. کارشناس خبره به عنوان سرپرست گروه، برنامه‌ریزی و کنترل برداشت‌ها را بر عهده دارد. از وظایف دیگر سرپرست گروه کنترل داده‌های برداشتی در پایان هر روز کاری و داشتن اختیار برای تعدیل، افزایش و اصلاح شبکه برداشت در حد شرح وظایف تعریف شده است. بدیهی است تجهیز گروه به کامپیوترهای قابل حمل که مجهز به برنامه‌های نرم‌افزاری مورد نیاز باشند، در بهینه‌سازی و افزایش بازده برداشت‌ها نقش موثری خواهد داشت. تطابق نقاط تعیین شده روی نقشه‌ها با محل آن‌ها روی زمین و یادداشت نکات حایز اهمیت، که در نهایت به تفسیر داده‌ها کمک می‌کند، از وظایف دیگر سرپرست گروه است.

ج- دستگاه‌ها و تجهیزات

به طور معمول در صورت انتخاب دستگاه‌های مناسب و تجهیزات اضافی وابسته می‌توان چند پارامتر الکترومغناطیسی مانند زاویه کجی، نسبت بین دامنه‌های میدان اولیه و ثانویه و میدان‌های هم‌فاز (حقیقی) و ناهم‌فاز (مجازی) را که در مطالعات اکتشافی کاربرد دارند، برداشت کرد.

این دستگاه‌ها باید قدرت تولید توان کافی برای انتخاب فاصله‌های مناسب بین فرستنده و گیرنده که بر اساس نیاز به ۳۰۰ متر و بیشتر هم می‌رسد، داشته باشند. علاوه بر آن، بر اساس شرایط رسانایی و ضخامت رولایه و عمق کانسار هدف، فرستنده دستگاه باید قادر به ایجاد گستره‌ای از فرکانس‌ها باشد (مثلاً ۳۰ تا ۳۰۰۰ هرتز). داشتن لوپ یا پیچک‌های مناسب فرستنده و گیرنده که ضمن کارایی لازم برای اکتشاف ژئوفیزیکی هدف کانی‌سازی وزن زیادی نداشته باشد، باید مد نظر قرار گیرد. هر چه لوپ فرستنده سطح بیشتری داشته، عمق نفوذ امواج افزایش می‌یابد و در نتیجه تعقیب و شناسایی هدف‌های عمیق‌تر میسر می‌شود. بدیهی است در این حالت، مولد فرستنده باید قادر به ایجاد میدان‌های مناسب برای این گونه لوپ‌های گسترده باشد.

دستگاه‌ها باید از نظر داشتن نسبت مناسب سیگنال به نوفه، که نقش موثری در کیفیت داده‌ها دارد، انتخاب شوند. یکی از عوامل افزایش این نسبت امکان استفاده از فرکانس‌های متنوع و مناسب است. به دلیل کاهش دامنه میدان‌های الکترومغناطیسی، به ویژه در مطالعات هدف‌های عمیق، دستگاه گیرنده باید قادر به اندازه‌گیری دقیق این میدان‌ها باشد.

۶-۴-۲- طراحی و اجرای روش

برنامه‌ریزی برای یک اکتشاف ژئوفیزیکی با روش‌های الکترومغناطیسی و الکتریکی و برای شناخت آنومالی‌ها در یک منطقه اکتشافی باید با توجه به نکات اصلی زیر انجام گیرد:

- مدل پاسخ کانی‌سازی مورد مطالعه و محیط زمین‌شناسی در برگیرنده آن
- ارزیابی نوفه‌های احتمالی در منطقه مورد مطالعه
- انتخاب آرایه مناسب فرستنده-گیرنده در جهت پلاریزه کردن زمین به بهترین نحو و دریافت پاسخ مناسب در ارتباط با کانی‌سازی
- انتخاب شبکه برداشت مناسب شامل امتداد، شکل و ابعاد شبکه

الف- جمع‌آوری اطلاعات

این مرحله از کار نقش مهمی در اجرای تمام مراحل بعدی دارد. دستیابی به یک طراحی مناسب برداشت، کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از کارهای تکراری از عمده‌ترین مزیت‌های این مرحله است. بنابراین، اطلاع و استفاده مجری از بانک‌های اطلاعات اکتشافی موجود در کشور لازم و ضروری است.

ب- برداشت‌های الکترومغناطیسی

هدف از این مطالعات شناخت و آرایه مدل کانسارها (کانسارهای سولفیدی به طور عمده) یعنی تعیین محل و ارزیابی گسترش سطحی و عمقی کانی‌سازی است. به دلیل امکان برداشت‌ها به صورت هواپردی، از این روش‌ها می‌توان در مرحله‌های اکتشافی شناسایی و پی‌جویی نیز استفاده کرد. با توجه به تنوع زیاد روش‌های الکترومغناطیسی زمینی، باید با در نظر گرفتن کانسار هدف از نظر رسانایی، هندسی، عمق احتمالی، شیب و امتداد و همچنین سنگ میزبان، سیستم‌های مناسب الکترومغناطیسی انتخاب شود.

بدیهی است که در این انتخاب، دستگاه‌ها و تجهیزات مورد استفاده تاثیرگذار است. پس از این مطالعات باید تلفیق داده‌های الکترومغناطیسی با سایر داده‌های اکتشافی، امکان پیشنهاد محل‌های مناسب حفاری را فراهم سازد.

پ- برنامه‌ریزی

برنامه‌ریزی مطالعات الکترومغناطیسی صحرائی متناسب با اهداف پروژه و امکانات محلی برای اجرای عملیات، انجام می‌گیرد.

- مدارک مورد نیاز در برداشت‌های صحرائی

این مدارک شامل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و سایر اطلاعات اکتشافی از جمله اطلاعات ژئوشیمیایی (در صورت امکان) است. تعیین موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری در صورتی که در پروژه تعریف نشده و برای آن بودجه‌ای در نظر گرفته نشده باشد، به عهده کارفرما است. از آنجا که به طور معمول این مطالعات در مرحله شناسایی به اجرا در نمی‌آید، مقیاس نقشه‌های مورد لزوم، باید متوسط یا بزرگ باشد. در صورتی که برداشت‌های هواپردی الکترومغناطیسی در مورد منطقه مورد مطالعه قبلاً تهیه شده باشد، باید در اختیار مهندس مشاور قرار گیرد تا بر اساس آن برنامه‌ریزی، انتخاب روش مناسب و طراحی شبکه برداشت الکترومغناطیسی صحرائی به نحو دقیق‌تری انجام گیرد.

۴-۳- انتخاب سیستم‌ها و روش‌های الکترومغناطیسی

دو سیستم کلی اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی شامل سیستم فرکانس - حوزه‌ای (FDEM) و زمان - حوزه‌ای (TDEM) است که سیستم اول از نظر تنوع و کاربردهای اکتشافی اولویت دارد.

به طور کلی انتخاب سیستم و به دنبال آن روش الکترومغناطیسی باید بر اساس عمق احتمالی کانی‌سازی قادر باشد میدان اولیه‌ای ایجاد کند که پس از عبور از رولایه بر اساس هندسه مورد انتظار برای کانسار و رسانایی آن و همچنین رسانایی رولایه و سنگ میزبان، کانسار را به بهترین نحو تحت تاثیر قرار دهد.

الف- سیستم‌های اندازه‌گیری فرکانس - حوزه‌ای (FDEM)

برای اندازه‌گیری و توصیف میدان ثانویه سه سیستم وجود دارد: دامنه و فاز، مولفه‌های هم‌فاز (حقیقی) و ناهم‌فاز (مجازی یا تریبیعی) و زاویه کجی یا تیلت.

- دامنه و فاز با سیستم اندازه‌گیری منبع ثابت: معمول‌ترین سیستم‌های اندازه‌گیری دامنه و فاز میدان ثانویه با منبع ثابت شامل تورام و ساندبرگ است. سیستم تورام در اکتشاف کانی‌های فلزی کاربرد بیشتری دارد.

- انتخاب آرایه و فرکانس برنامه در سیستم‌های تورام و ساندبرگ: در این سیستم‌ها یک سیم بلند عایق‌بندی شده به طول ۱۰۰ متر تا چند کیلومتر به زمین متصل می‌شود. به جای سیم می‌توان از یک لوپ مستطیلی بزرگ با ابعاد ۱۲۰۰ در ۴۰۰ متر نیز استفاده کرد. امتداد سیم یا طول لوپ مستطیلی در امتداد کانسار احتمالی و در صورت عدم شناخت امتداد کانسار در امتداد عارضه زمین‌شناسی محل مورد مطالعه قرار داده می‌شود. لوپ‌های گیرنده در امتدادی عمود بر سیم فرستنده یا طول لوپ فرستنده جابه‌جا می‌شود (شکل ۶-۲).

ابعاد محدوده برداشت به ازای یک بار پهن کردن سیم یا لوپ فرستنده به صورت زیر انتخاب می‌شود:

- محدوده عرضی نیمرخ‌های برداشت یک‌سوم تا دوسوم طول سیم فرستنده (یا طول لوپ مستطیلی)

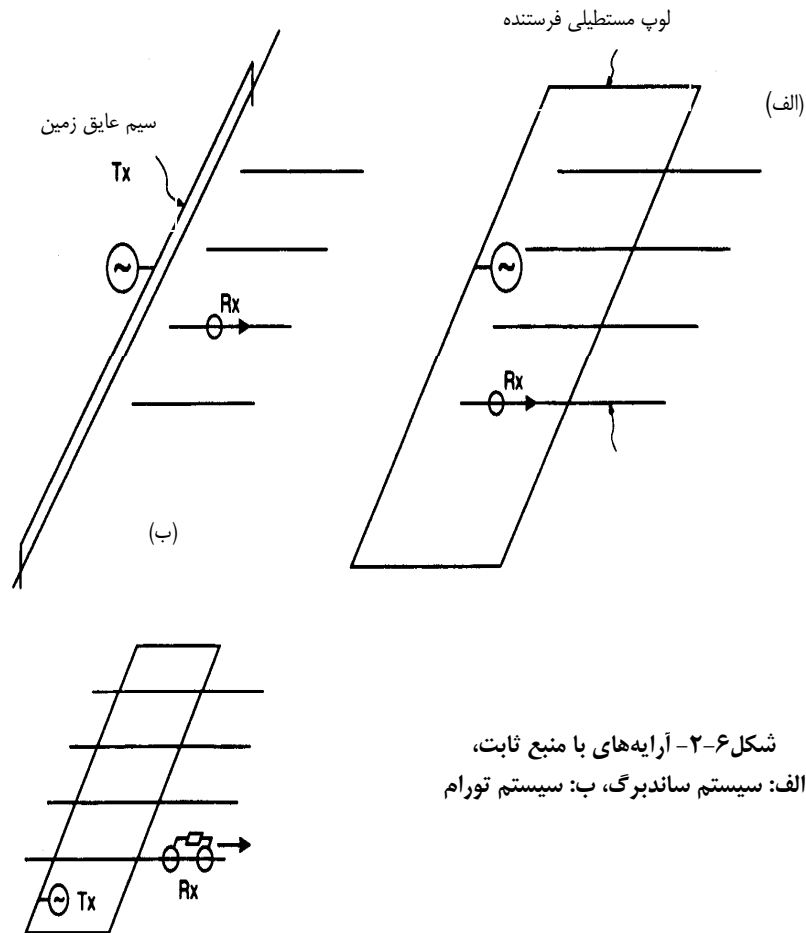
- محدوده طولی هر نیمرخ بین یک‌سوم تا یک‌ششم (بر حسب حساسیت گیرنده) طول سیم یا طول لوپ فرستنده

با توجه به رسانایی (σ) و ضخامت رولایه و در نتیجه عمق احتمالی کانسار هدف، فرکانس (f) برنامه مناسب از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_e = 100 / \sqrt{\sigma f} \quad (۱-۶)$$

که در آن Z_e عمق نفوذ موثر امواج الکترومغناطیسی است.

امتداد جابه‌جایی گیرنده



به عنوان مثال برای یک عمق نفوذ موثر ۱۵۰ متر، اگر مقاومت ویژه رولایه ۲۰۰۰ اهم-متر باشد، فرکانس برنامه مناسب حدود یک کیلوهرتز است.

افزایش عمق نفوذ علاوه بر فرکانس به افزایش فاصله گیرنده از لپ یا سیم فرستنده در روش ساندبرگ و افزایش فاصله بین دو گیرنده در آرایه تورام وابسته است. فاصله بین دو گیرنده در آرایه تورام بین ۱۵ تا ۶۰ متر در نظر گرفته می‌شود.

این آرایه‌ها برای کانی‌سازی‌های رسانا با شیب تند و عمق کم تا متوسط مناسب هستند و روش تورام که از دو گیرنده استفاده می‌شود نسبت به روش ساندبرگ کارایی بیشتری دارد.

- سیستم‌های اندازه‌گیری با منبع متحرک

در این سیستم‌ها علاوه بر میدان ثانویه و مولفه‌های آن، تحت شرایط خاصی از فاصله بین پیچک‌های فرستنده و گیرنده و فرکانس برنامه، رسانایی زمین را هم می‌توان اندازه‌گیری کرد. به همین دلیل این سیستم‌ها علاوه بر کاربرد در اکتشافات معدنی در مطالعات مهندسی و زیست‌محیطی نیز به کار گرفته می‌شوند.

- انتخاب آرایه و فرکانس برنامه

از نظر وضعیت‌های مختلف پیچک فرستنده و گیرنده آرایه‌های متنوعی را می‌توان انتخاب کرد که در اینجا آرایه لوپ‌های افقی (HLEM) که در مطالعات معدنی بیشتر از آن استفاده می‌شود، مورد بررسی می‌گیرد. در این آرایه لوپ‌های فرستنده و گیرنده هر دو افقی و هم‌سطح در نظر گرفته می‌شوند و در نتیجه دوقطبی‌های مغناطیسی در فرستنده و گیرنده به صورت قائم هستند. فاصله بین لوپ‌های افقی فرستنده و گیرنده برای مطالعات کم عمق (مهندسی) حداکثر ۴۰ متر و در مطالعات معدنی تا ۴۰۰ متر هم می‌رسد. لوپ فرستنده از طریق یک سیم مرجع به گیرنده متصل می‌شود.

علاوه بر فرکانس، فاصله بین لوپ فرستنده و گیرنده (S) نیز در ارتباط با عمق موثر اکتشاف (d) تاثیر دارد. برای تعیین فاصله مناسب بین لوپ فرستنده و گیرنده می‌توان از منحنی پاسخ تجمعی بر حسب نسبت $z=d/s$ (شکل ۶-۲) استفاده کرد. با اندازه‌گیری میدان اولیه و ثانویه به وسیله آرایه لوپ افقی، تحت شرایطی از فرکانس و فاصله بین پیچک‌های فرستنده و گیرنده می‌توان رسانایی زمین را اندازه‌گیری کرد. این روش برای زمین‌های لایه‌ای مناسب‌تر است.

- اندازه‌گیری زاویه کجی یا تیلت: این اندازه‌گیری را می‌توان با فرستنده ثابت و یا فرستنده‌های کوچک متحرک انجام داد که در حالت اخیر احتیاجی به اتصال پیچک فرستنده و گیرنده نیست. پیچک فرستنده را می‌توان افقی یا قائم انتخاب کرد. این روش برای کانسارهای سولفیدی شیب‌دار کاربرد مناسب‌تری دارد.

- انتخاب آرایه و فرکانس برنامه مطالعات:

برای اندازه‌گیری زاویه کجی می‌توان هم از پیچک افقی استفاده کرد و هم پیچک قائم، ولی به طور معمول استفاده از پیچک فرستنده قائم (میدان اولیه افقی) پاسخ بهتری دارد. انتخاب پیچک فرستنده به شیب کانسار نیز وابسته است و معمولاً برای کانسارهای شیب‌دار از لوپ فرستنده قائم استفاده می‌شود. هر چه فاصله بین لوپ فرستنده و گیرنده بیشتر باشد، عمق اکتشاف نیز افزایش می‌یابد. برای انتخاب فرکانس مناسب برنامه مطالعات، می‌توان از همان روند گفته شده برای آرایه‌های ساندبرگ و تورام استفاده کرد.

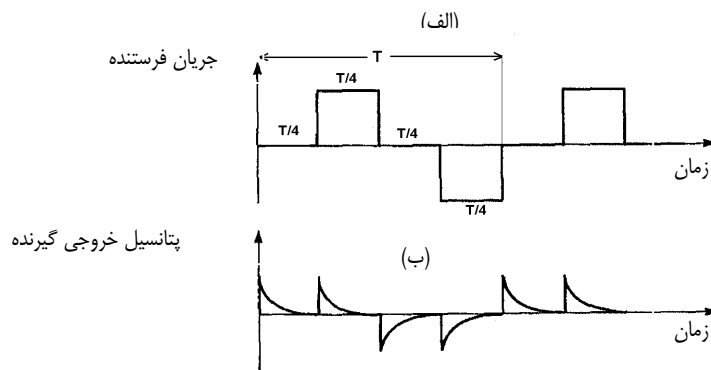
ب- سیستم‌های اندازه‌گیری زمان-حوزه‌ای (TDEM)

در این سیستم با استفاده از پالس‌های گذرا، زوال یا واپاشی پتانسیل در طول زمان اندازه‌گیری می‌شود. این روش‌ها نسبت به روش‌های فرکانس-حوزه‌ای قدمت کمتری دارد. در بیشتر این روش‌ها، جریان فرستنده در حالی که همانند روش‌های فرکانس-حوزه‌ای دوره‌ای است، به صورت پالس در زمان‌های کوتاه تکرار می‌شود. شکل موج اولیه به شکل لوپ فرستنده وابسته است. کاربرد اصلی TDEM استفاده از آن به عنوان نوعی گمانه‌زنی مقاومت ویژه است که نتایج آن قابل مقایسه با گمانه‌زنی الکتریکی DC است و نیز نسبت به روش اخیر امتیازاتی دارد. اندازه‌گیری پتانسیل در زمان قطع جریان و در بازه‌های زمانی مختلف انجام می‌گیرد. با استفاده از این پتانسیل‌ها می‌توان تغییرات مقاومت ویژه ظاهری را نیز بر حسب زمان (و در نتیجه عمق‌های مختلف) به دست آورد.

سیستم TDEM نسبت به سیستم FDEM دارای مزیت‌های زیر است:

- حساسیت کمتر نسبت به تغییر فاصله بین لوپ فرستنده و گیرنده
- مدت زمان اندازه‌گیری کمتر و در نتیجه راندمان بیشتر
- عمق بررسی بیشتر
- همچنین گمانه‌زنی‌های TDEM در مقایسه با گمانه‌زنی‌های الکتریکی DC دارای مزیت‌های زیر است:
 - افزایش سرعت برداشت‌ها
 - اصلاح قدرت تفکیک جانبی
 - حل بهتر مساله رسانندگی الکتریکی معادل (اکی‌والانس)
 - حذف مشکل مربوط به تزریق جریان در رولایه‌های با مقاومت الکتریکی زیاد
 - محدودیت‌های سیستم TDEM عبارتند از:
 - عدم کاربرد مناسب در سنگ‌های با مقاومت الکتریکی زیاد
 - قیمت بیشتر تجهیزات و دستگاه‌های اندازه‌گیری
 - انتخاب آرایه و دوره برنامه

لوپ فرستنده به صورت دایره‌ای یا مربعی انتخاب می‌شود که استفاده از لوپ مربعی با یک دور سیم‌پیچ متداول‌تر است. طول ضلع لوپ یا شعاع لوپ دایره‌ای فرستنده بر اساس مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌های پوشاننده و در نتیجه عمق هدف اکتشافی مورد انتظار انتخاب می‌شود. به عنوان مثال برای بررسی‌های کم عمق (کمتر از ۴۰ متر) در زمین‌های نسبتاً مقاوم، اندازه لوپ ۵ تا ۱۰ متر در نظر گرفته می‌شود. لوپ گیرنده دارای چندین دور سیم‌پیچ به صورت دایره‌ای است و در مرکز لوپ فرستنده قرار می‌گیرد. لوپ گیرنده از طریق یک سیم رابط کوتاه به دستگاه گیرنده متصل می‌شود. در حالتی که زمین ناهمگونی قابل توجه داشته باشد و به ویژه در روش گمانه‌زنی TDEM برای آگاهی از این ناهمگونی علاوه بر قرارگیری لوپ گیرنده در مرکز لوپ فرستنده، از لوپ‌های گیرنده خارج از مرکز نیز باید استفاده کرد. انتخاب اندازه لوپ فرستنده با توجه به ضخامت و مقاومت ویژه رولایه (عمق بررسی مورد نظر) اهمیت زیادی دارد، به همین دلیل برنامه‌های کامپیوتری وجود دارد که با تعریف پارامترهای یاد شده اندازه لوپ مناسب را مشخص می‌کند. پالس جریان برای اندازه‌گیری شامل تقسیم زمان تناوب (T) به چهار قسمت مساوی است (شکل ۶-۳-الف) که در هر زمان تناوب کامل شارش جریان، چهار پتانسیل گذرا ایجاد می‌شود (شکل ۶-۳-ب). اندازه‌گیری با دو مقدار پتانسیل در زمان قطع جریان انجام می‌گیرد. جریان فرستنده در حد چند آمپر است که این مقدار بر اساس عمق بررسی مورد نظر و اندازه لوپ فرستنده انتخاب می‌شود. زمان تناوب یا فرکانس جریان فرستنده نیز بر اساس عمق بررسی انتخاب می‌شود. برای مطالعات کم عمق از پریود کوتاه (فرکانس زیاد) و برای افزایش عمق، بررسی از زمان‌های تناوب بلند استفاده می‌شود. مقدار زمان تناوب در حد یک میلی‌ثانیه است. اندازه‌گیری موقعیت‌های زمانی پتانسیل از چند میکروثانیه تا ده‌ها یا حتی صدها میلی‌ثانیه پس از قطع جریان انجام می‌شود.



شکل ۶-۳- چرخه کامل اندازه‌گیری در روش TDEM، الف: فرم موجی جریان فرستنده، ب: فرم موجی خروجی گیرنده

- انتخاب شبکه برداشت و فاصله آن‌ها

به منظور پوشش مناسب محدوده مورد مطالعه و شناخت آنومالی‌های احتمالی موارد زیر توصیه می‌شود:

- انتخاب شبکه برداشت مربعی در صورت عدم شناخت امتداد کانسار هدف

- انتخاب شبکه مستطیلی در صورت آگاهی از روند کانی‌سازی

انتخاب ابعاد شبکه برداشت وابسته به ابعاد، شیب و عمق کانسار است. به طور معمول، با انتخاب فاصله بین پیچک‌های فرستنده و گیرنده (S) یا فاصله بین دو گیرنده (در سیستم فرکانس - حوزه‌ای) که تابعی از عمق بررسی مورد نظر و همچنین ابعاد مورد انتظار کانسار است، فاصله نیمرخ‌ها و ایستگاه‌های برداشت به صورت زیر انتخاب می‌شود:

- نیمرخ‌ها با امتدادی عمود بر امتداد کانسار (یا عمود بر لایه‌بندی منطقه برداشت) با فاصله‌های کمتر از گسترش طولی احتمالی کانسار انتخاب می‌شود. هر چه تعداد نیمرخ‌های برداشتی که اثر کانسار در سطح را قطع می‌کنند بیشتر باشد، قدرت تفکیک افزایش یافته و مدل کانی‌سازی دقیق‌تر به دست می‌آید.

- فاصله ایستگاه‌های اندازه‌گیری روی هر نیمرخ برداشت بر اساس پهناى کانسار که پارامتر S یعنی فاصله بین پیچک فرستنده و گیرنده یا فاصله بین دو پیچک گیرنده نیز بر این مبنا انتخاب شده، برابر یک سوم یا یک دوم S (تابعی از قدرت تفکیک مورد نظر و بودجه طرح) در نظر گرفته می‌شود.

مبنای انتخاب ابعاد شبکه برداشت در سیستم TDEM علاوه بر ابعاد، شیب و عمق کانسار به اندازه لوپ فرستنده وابسته است. در زمین‌های ناهمگون فاصله ایستگاه‌ها برابر ضلع لوپ مربعی یا شعاع لوپ دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود.

در صورت انتخاب نادرست ابعاد شبکه برداشت نسبت به ابعاد مورد انتظار کانسار و عمق آن، تفسیر آنومالی‌ها به ویژه در مرحله مدلسازی دچار خطا می‌شود.

۶-۵- فهرست خدمات و نحوه برداشت‌ها به روش پتانسیل خودزا

الف- هدف

هدف از این مطالعات، شناسایی مدل ژئوفیزیکی کانسارهای فلزی با استفاده از پتانسیل‌های طبیعی ایجاد شده به وسیله آن‌ها است.

ب- برنامه‌ریزی

برنامه‌ریزی مطالعات SP در مرحله تفصیلی انجام می‌شود و به دلیل شرایط خاص ایجاد پتانسیل‌های طبیعی قابل اندازه‌گیری، ممکن است در مواردی این روش پاسخ مناسبی به همراه نداشته باشد. در صورتی که این روش در پروژه پیشنهادی تعریف شده باشد، باید شرایط پاسخ آن مورد بررسی قرار گیرد.

پ- مدارک مورد نیاز

این مدارک شامل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و سایر اطلاعات اکتشافی از جمله اطلاعات ژئوشیمیایی (در صورت امکان) است. از آنجا که به طور معمول این مطالعات در مرحله شناسایی به اجرا در نمی‌آید، مقیاس نقشه‌های مورد لزوم، باید متوسط یا بزرگ باشد.

آرایه SP که شامل فقط دو الکتروود برای اندازه‌گیری پتانسیل است، به دو شکل است:

- آرایه گرادیان که یکی از الکتروودها ثابت و دیگری متحرک است.

- آرایه برشی که در آن هر دو الکتروود پتانسیل جابه‌جا می‌شود.

ت- انتخاب شبکه برداشت و فاصله آن‌ها

شبکه برداشت SP معمولاً هماهنگ با شبکه برداشت IP و مقاومت ویژه انتخاب می‌شود، اما به دلیل پتانسیل‌هایی که اغلب ضعیف هستند، برای پوشش مناسب محدوده کانی‌سازی احتمالی بهتر است از شبکه برداشت با تعداد نقاط اندازه‌گیری بیشتر نسبت به شبکه IP استفاده شود. افزایش تعداد نقاط اندازه‌گیری در روش SP، باعث افزایش قابل توجه هزینه برداشت نخواهد شد. فواصل زیر در مرحله مطالعات تفصیلی برای SP پیشنهاد می‌شود:

- فاصله خطوط برداشت ۴۰ تا ۵۰ متر

- فاصله ایستگاه‌ها روی هر پروفیل ۱۰ تا ۲۵ متر

ابتدا خطوط برداشت عمود بر امتداد کانسار احتمالی و در صورت نامشخص بودن امتداد کانسار، عمود بر امتداد لایه‌بندی انتخاب می‌شود.

انتخاب فاصله خطوط برداشت و ایستگاه‌ها تحت تاثیر شکل، گسترش، شیب و عمق کانسار بوده و باید به گونه‌ای انتخاب شود که:

- اثر SP منفی در تعداد نقاط کافی برداشت شود.

- در صورت شیب کم کانی‌سازی احتمال دریافت SP مثبت نیز وجود دارد که در این حالت باید تعداد نقاط کافی از SP مثبت نیز اندازه‌گیری شود.

ث- اجرا

پس از برنامه‌ریزی اجرای عملیات صحرائی SP طی مراحل زیر انجام می‌شود:

- پیاده کردن نقاط اندازه‌گیری: در مطالعات تفصیلی استفاده از نقشه‌های توپوگرافی متوسط و بزرگ مقیاس برای پیاده کردن نقاط برداشت کافی است. در صورت عدم دسترسی به نقشه‌های توپوگرافی با توافق کارفرما می‌توان از GPS‌های دقیق برای تعیین

موقعیت نقاط استفاده کرد. در مرحله پردازش داده‌ها، تصحیح توپوگرافی به تفسیر دقیق‌تر آنومالی‌های SP کمک می‌کند، ولی اثر توپوگرافی در این مطالعات به اهمیت بعضی از روش‌های ژئوفیزیکی مانند گرانی‌سنجی نیست. در مطالعات تکمیلی در اختیار داشتن نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس لازم است. در صورت موجود نبودن نقشه‌های مذکور، بهتر است نقاط اندازه‌گیری با استفاده از برداشت‌های نقشه‌برداری پیاده شود.

ج- اندازه‌گیری

دو عامل مهم که در این مرحله نقش دارند، عبارتند از:

- پرسنل: اندازه‌گیری‌های SP به تنهایی احتیاج به پرسنل زیاد ندارد و توسط یک نفر تکنسین و حداکثر ۲ تا ۳ نفر کارگر قابل انجام است. یک نفر کارشناس خبره به عنوان سرپرست گروه نیز جزو پرسنل برای برداشت‌ها در نظر گرفته می‌شود. وظایف سرپرست گروه برنامه‌ریزی و کنترل برداشت‌ها و تطابق نقاط برداشت در روی نقشه‌ها با محل آن‌ها بر روی زمین است. وی با کنترل داده‌ها و شناخت مساله، امکان تعدیل، افزایش و اصلاح شبکه را بررسی می‌کند و در بهینه‌سازی برداشت‌ها و در نهایت کاهش ریسک و افزایش بازده کار نقش موثری دارد.

- دستگاه‌ها و تجهیزات: برای برداشت‌های SP به تنهایی، احتیاج به یک دستگاه پتانسیومتر با حساسیت بالا ($\pm\%$) است. همچنین برای اندازه‌گیری دقیق پتانسیل باید از الکترودهای سفالی خاص این برداشت‌ها استفاده شود. کنترل سیم‌های رابط در مورد نداشتن زدگی اهمیت خاصی دارد.

در مرحله اجرای برداشت‌ها کنترل کیفی داده‌ها اهمیت خاصی دارد که باید به وسیله سرپرست گروه انجام گیرد. تعیین SP زمینه، SP مثبت و به ویژه SP منفی حایز اهمیت است، زیرا مرکز منفی SP منطبق بر سر کانسار و مرکز مثبت منطبق بر انتهای کانی‌سازی است. بدین ترتیب، در صورتی که تعداد نقاط کافی از محدوده کانی‌سازی و همچنین محدوده سنگ میزبان برداشت شود، می‌توان نقشه‌ها و مقاطع مناسبی را برای تفسیر ارایه داد.

فصل ۷

ارایه گزارش و الگوی نقشه‌ها

۷-۱- ساختار گزارش مطالعات ژئوفیزیکی

سرفصل‌ها و بخش‌های گزارش مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا به شرح زیر توصیه می‌شود:

۷-۲- چکیده

۷-۳- فهرست مطالب

۷-۴- کلیات

در این بخش موارد زیر ذکر می‌شود:

- مشخصات قرارداد، کارفرما و مشاور، تاریخ شروع و خاتمه عملیات صحرائی، اسامی تکنسین‌ها، کارشناس و یا کارشناسان خبره و نویسنده گزارش
- موقعیت جغرافیایی محدوده عملیات و هر گونه اطلاعات در مورد آن از جمله راه‌های دسترسی
- خلاصه‌ای از زمین‌شناسی منطقه
- هدف از مطالعات

۷-۵- روش‌های ژئوفیزیکی به کار گرفته شده (مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا)

در این بخش به موارد زیر پرداخته می‌شود:

- ارایه اطلاعات کلی از روش مورد استفاده
- دستگاه‌های مورد استفاده
- نحوه اجرای عملیات صحرائی و حجم برداشت‌ها
- نحوه پردازش، تفسیرها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

۷-۶- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌ها

۷-۶-۱- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی

- در این بخش نتایج مطالعات که شامل تفسیر و بررسی نقشه‌های مختلف زیر است، ارایه می‌شود:
- مشخصات شبکه برداشت، حجم کار، نقشه موقعیت مقاطع و شبه‌مقاطع
 - بحث و بررسی نقشه‌های زیر و ارایه تفسیر و ارتباط آن‌ها با داده‌های زمین‌شناسی

- نقشه تغییرات مقدار شارژپذیری IP
- نقشه تغییرات مقاومت الکتریکی RS
- شبه‌مقاطع
- نیمرخ‌های مدلسازی شده
- نقشه تفسیر و موقعیت
- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۶-۲- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های الکترومغناطیسی

در این بخش موارد زیر ارایه می‌شود:

- شرح نقشه‌ها و مقاطع EM و جداسازی آنومالی‌ها
- به دلیل تنوع پارامترهای برداشت در مطالعات EM توصیف آنومالی‌ها به صورت جداگانه با هر پارامتر و تلفیق آن‌ها با یکدیگر و با اطلاعات اکتشافی دیگر باید در گزارش آورده شود. پس از آن در صورت تعدد آنومالی‌های EM بر اساس ویژگی‌های پارامترهای اندازه‌گیری شده و در حد کارایی روش، این آنومالی‌ها از نظر عیار احتمالی و حجم کانی‌سازی اولویت‌بندی شود.
- مدلسازی دوبعدی یا سه‌بعدی آنومالی‌ها
- به کمک روش‌های نرم‌افزاری پس از معرفی کوتاهی از نرم‌افزار و کارایی آن باید داده‌های EM پردازش شده و مدل نهایی کانی‌سازی ارایه شود.
- نقشه موقعیت و تفسیر

۷-۶-۳- بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های پتانسیل خودزا

در این بخش موارد زیر ارایه می‌شود:

- مشخصات سیستم برداشت، حجم کار، نقشه موقعیت مقاطع
- بحث و بررسی نقشه‌ها و ارایه تفسیر و ارتباط آن‌ها با داده‌های زمین‌شناسی
- شرح نقشه‌ها و مقاطع SP

۷-۷- پیوست‌های گزارش

در این بخش کلیه داده‌های صحرائی با تفکیک برای هر منطقه و همچنین مختصات نقاط خط مبنا و ایستگاه‌های اندازه‌گیری و منحنی‌های زمان-فاصله، با ذکر موقعیت آن‌ها در نقشه موقعیت ارایه می‌شود.

۷-۸- استاندارد نمادها و مشخصه‌های نقشه‌ها

۷-۸-۱- راهنمای نقشه‌ها

توضیح علامت‌ها و اطلاعات نقشه‌های ژئوفیزیکی، در قسمت راهنمای نقشه آورده می‌شود. صفحه راهنما در اندازه A₄ و در گوشه‌ای از نقشه بر حسب مورد آورده می‌شود تا پس از تا کردن نقشه، صفحه راهنما در رو قرار گیرد. صفحه راهنما شامل سه بخش بالایی، میانی و پایینی به شرح زیر است:

الف- بخش بالایی

بالای صفحه و در وسط، عنوان نقشه به فارسی و در زیر آن به انگلیسی آورده می‌شود.

ب- بخش میانی

شامل نمادهای ژئوفیزیکی به کار رفته در نقشه به شرح زیر است:

شرح نمادها به فارسی در سمت راست و معادل آن‌ها به انگلیسی در سمت چپ و خود نماد در وسط. مهم‌ترین نمادهای ژئوفیزیکی بر اساس استاندارد روش‌ها شامل، محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری، منحنی‌های تراز با مقادیر کمی، گسل‌ها، محدوده‌ها و محورهای آنومالی، محل حفاری‌های اکتشافی پیشنهادی است.

پ- بخش پایینی

در پایین صفحه، جدول مشخصات شامل اطلاعات زیر به فارسی و انگلیسی قرار می‌گیرد:

- کارفرما

- نوع بررسی و عنوان نقشه

- منطقه مورد مطالعه

- شماره نقشه و تاریخ

- مقیاس نقشه


- تهیه‌کنندگان نقشه

- کنترل‌کننده نقشه (امضای مسوول صلاحیت‌دار)

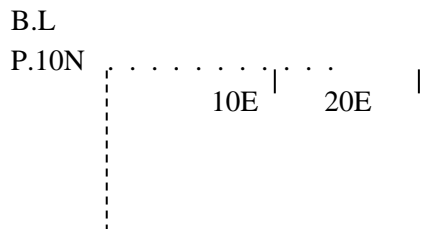
۷-۸-۲- نقشه موقعیت

این نقشه علاوه بر این که نشان دهنده عارضه‌های طبیعی و مصنوعی و همچنین زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه است باید شامل اطلاعات زیر نیز باشد:

- خط مبنا که اغلب موازی امتداد زمین‌شناختی، عمود بر راستای نیم‌رخ‌های برداشت بوده با علامت B.L نشان داده می‌شود که شامل شماره‌بندی مقاطع نیز است.

B.L 

- نیمرخ‌های برداشت که ایستگاه‌های اندازه‌گیری در روی آن مشخص است و شماره مقطع در انتهای مقاطع نوشته می‌شود، اگر طول مقاطع زیاد باشد، هر ۱۰۰ یا ۲۰۰ متر فاصله آن‌ها از خط برداشت همراه با جهت برداشت نوشته می‌شود.



۷-۸-۳- نمودارهای مدل‌سازی شده

این قسمت شامل اطلاعات کلی استاندارد شده نمودارها و اطلاعات اختصاصی زیر است:

- منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده با خط ممتد با رنگ قرمز
- منحنی‌های محاسبه شده با خط چین و با مقیاس منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده، با رنگ آبی

پیوست

علایم اختصاری

پیوست - علایم اختصاری

SP (Self potential)	روش پتانسیل خودزا
MT (Magneto-Telloric)	روش مگنتوتلوریک
TC (telluric currents)	روش جریان‌های تلوریک
AFMAG (audio-frequency magnetic field)	روش میدان مغناطیسی با فرکانس شنوایی
RS (Resistivity survey)	روش مقاومت ویژه الکتریکی
EM (electromagnetic)	روش الکترومغناطیسی
EIP (electric Induced polarization)	روش پلاریزاسیون القایی الکتریکی
MIP (magnetic induced polarization)	روش پلاریزاسیون القایی مغناطیسی
VLF (very low-frequency)	روش فرکانس بسیار پایین
TDEM (time domain electromagnetic)	برداشت‌های الکترومغناطیسی زمان-حوزه‌ای
TEM (transient electromagnetic)	برداشت‌های الکترومغناطیسی زمان-حوزه‌ای
FDEM (frequency domain electromagnetic)	برداشت‌های الکترومغناطیسی فرکانس-حوزه‌ای
VMD	دوقطبی مغناطیسی قائم
HMD	دوقطبی مغناطیسی افقی
Ek	پتانسیل الکتروسینتیکی
CE	پتانسیل جریانی

عناوین پروژه‌های اکتشاف برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن

ردیف	عنوان پروژه	شماره نشریه در معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	شماره نشریه در سازمان نظام مهندسی معدن ایران
۱	تعاریف و مفاهیم در فعالیت‌های اکتشافی	۳۲۸	-
۲	فهرست خدمات مراحل مختلف اکتشاف زغال سنگ	۳۵۱	-
۳	دستورالعمل رده‌بندی ذخایر معدنی	۳۷۹	-
۴	راهنمای ملاحظات زیست‌محیطی در فعالیت‌های اکتشافی	۴۹۸	۱۳
۵	دستورالعمل تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی - اکتشافی بزرگ مقیاس رقومی (۱:۲۵۰۰۰)	۵۳۲	۲۰
۶	فهرست خدمات مراحل چهارگانه اکتشاف سنگ آهن	۵۳۶	۱۷
۷	علائم استاندارد نقشه‌های زمین‌شناسی	۵۳۹	۲۳
۸	دستورالعمل اکتشاف ژئوشیمیایی بزرگ مقیاس رسوبات آبراهه‌ای (۱:۲۵۰۰۰)	۵۴۰	۲۴
۹	فهرست خدمات مراحل چهارگانه اکتشاف مس	۵۴۱	۲۵
۱۰	فهرست خدمات اکتشافی سنگ‌ها و کانی‌های صنعتی (باریت، بنتونیت، زئولیت، سلسنتین، سیلیس، فلدسپار، فلوتورین)	۵۶۶	۳۶
۱۱	واژه‌ها و اصطلاحات پایه اکتشاف، استخراج و فرآوری مواد معدنی	۵۶۷	۳۷
۱۲	فهرست خدمات مراحل چهارگانه اکتشاف مس سرب و روی	۵۸۱	۴۰
۱۳	راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی اکتشافی به روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری در اکتشافات معدنی	۵۹۴	۲۸
۱۴	فهرست خدمات مراحل چهارگانه اکتشاف آنتیموان	۵۹۵	۳۴
۱۵	فهرست خدمات مراحل مختلف اکتشاف سنگ‌ها و کانی‌های قیمتی و نیمه‌قیمتی	۵۹۹	۴۳
۱۶	فهرست خدمات و راهنمای مطالعات دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی	۶۱۵	۴۵
۱۷	فهرست خدمات و دستورالعمل مراحل مختلف اکتشاف مواد اولیه سیمان	۶۱۷	۴۷
۱۸	فهرست خدمات و دستورالعمل بررسی‌های چاه‌پیمایی	۶۱۸	۴۸
۱۹	فهرست خدمات مراحل مختلف اکتشاف عناصر نادر خاکی	۶۴۸	۵۱
۲۰	فهرست خدمات مراحل مختلف اکتشاف قلع	۶۴۹	۵۲
۲۱	دستورالعمل آماده‌سازی و اندازه‌گیری عناصر در سنگ آهن	۶۵۲	۵۴
۲۲	دستورالعمل آماده‌سازی، تهیه نمونه و مطالعات میکروسکوپی و سیالات درگیر برای نمونه‌های اکتشافی	۶۵۵	۵۵
۲۳	دستورالعمل اکتشافات ژئوشیمیایی محیط‌های سنگی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰	۶۷۱	۶۲
۲۴	دستورالعمل یکسان‌سازی اسامی مواد معدنی	۲۳۱	۶۵
۲۵	راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مقاومت ویژه، پلاریزاسیون القایی، الکترومغناطیسی و پتانسیل خودزا در اکتشاف مواد معدنی	۵۳۳	۶۶
۲۶	فهرست خدمات و دستورالعمل اکتشاف سنگ‌ها و کانی‌های صنعتی - بخش ۳ (پرلیت، دیاتومیت، ورمیکولیت و شیل‌های منبسط شونده) فهرست خدمات اکتشافی	در دست تدوین	
۲۷	فهرست خدمات مراحل مختلف اکتشاف طلا	در دست تدوین	
۲۸	فهرست خدمات و دستورالعمل اکتشاف سنگ‌ها و کانی‌های صنعتی - بخش ۱ (نسوزها): خاک نسوز، منیزیت - هونتیت، بوکسیت، نسوزهای آلومینو سیلیکاته (کیانیت، سیلیمانیت و آندالوزیت)، گرافیت، دولومیت	در دست تدوین	
۲۹	دستورالعمل بررسی‌های ژئوشیمیایی به روش ژئوشیمیایی و ژئوبوتانی	در دست تدوین	
۳۰	دستورالعمل اکتشاف ناحیه‌ای طلا و سایر فلزات گرانبها به روش بلگ	در دست تدوین	
۳۱	راهنمای اکتشافات ژئوفیزیکی به روش رادیومتری در مراحل مختلف اکتشاف	در دست تدوین	

عناوین پروژه های کمیته استخراج بر نامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن

ردیف	عنوان پروژه	شماره نشریه در معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	شماره نشریه در سازمان نظام مهندسی معدن ایران
۱	تعاریف و مفاهیم در فعالیت‌های استخراجی	۳۴۰	-
۲	مقررات تهویه در معادن	۳۵۰	-
۳	مقررات فنی آتشیاری در معادن	۴۱۰	-
۴	دستورالعمل تهیه نقشه‌های استخراجی معدن	۴۴۲	۸
۵	راهنمای ارزشیابی دارایی‌های معدنی	۴۴۳	۹
۶	دستورالعمل فنی روشنایی در معادن	۴۸۹	۱۰
۷	دستورالعمل امداد و نجات در معادن	۴۸۸	۱۸
۸	راهنمای تهیه گزارش‌های طراحی معدن	۴۹۶	۱۱
۹	دستورالعمل ترابری در معادن	۵۰۶	۱۴
۱۰	دستورالعمل توزیع هوای فشرده در معادن	۵۳۱	۱۹
۱۱	دستورالعمل طراحی و اجرای سیستم نگهداری تونل‌های معدنی	۵۳۷	۲۱
۱۲	دستورالعمل تحلیل پایداری و پایداری‌سازی شیب‌ها در معادن روباز	۵۳۸	۲۲
۱۳	راهنمای محاسبه قیمت تمام شده در فعالیت‌های معدنی	۵۴۲	۲۶
۱۴	دستورالعمل نگهداری و کنترل سقف در کارگاه‌های استخراج	۵۵۳	۲۹
۱۵	واژه‌ها و اصطلاحات پایه اکتشاف، استخراج و فرآوری مواد معدنی	۵۶۷	۳۷
۱۶	راهنمای آبکشی در معادن	۵۷۳	۳۸
۱۷	دستورالعمل طراحی هندسی بازکننده‌ها و حفاریات زیرزمینی	۵۷۹	۴۱
۱۸	راهنمای ملاحظات زیست‌محیطی در فعالیت‌های استخراجی	۶۱۱	۴۴
۱۹	راهنمای ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن	۶۱۶	۴۶
۲۰	راهنمای انتخاب روش استخراج ذخایر معدنی	۶۲۳	۴۹
۲۱	دستورالعمل تعیین مرز تغییر روش استخراج از روباز به زیرزمینی	۶۲۵	۵۰
۲۲	دستورالعمل کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معدن	۶۵۶	۵۶
۲۳	راهنمای ارزیابی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE) در معادن	۶۶۹	۶۰
۲۴	راهنمای امکان‌سنجی پروژه‌های معدنی	۵۵۸	۶۴
۲۵	راهنمای محاسبه بار و توزیع برق در معادن		در دست تدوین
۲۶	دستورالعمل طراحی و اجرای سیستم ابزاربندی و رفتارنگاری در معادن روباز		در دست تدوین
۲۷	ضوابط پر کردن کارگاه‌های استخراج معدن زیرزمینی		در دست تدوین
۲۸	دستورالعمل گاززدایی در معادن زغال سنگ		در دست تدوین
۲۹	دستورالعمل کنترل رقیق‌شدگی در معادن		در دست تدوین
۳۰	دستورالعمل ارزیابی و کنترل نشست در معادن		در دست تدوین
۳۱	دستورالعمل بازرسی و تعمیر سیستم‌های نگهداری حفاریات معدنی		در دست تدوین
۳۲	علایم استاندارد نقشه‌های استخراجی مواد معدنی		در دست تدوین
۳۳	دستورالعمل تخریب در کارگاه‌های استخراج		در دست تدوین
۳۴	دستورالعمل رفتارنگاری و ابزاربندی در معادن زیرزمینی		در دست تدوین
۳۵	راهنمای جانمایی و احداث تاسیسات سطحی در معادن		در دست تدوین
۳۶	راهنمای طراحی و احداث شبکه‌های زیرزمینی		در دست تدوین
۳۷	راهنمای متره و برآورد در فعالیت‌های استخراج معدنی		در دست تدوین

عناوین پروژه‌های فرآوری برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن

ردیف	عنوان پروژه	شماره نشریه در معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	شماره نشریه در سازمان نظام مهندسی معدن ایران
۱	راهنمای اکتشاف، استخراج و فرآوری سنگ‌های تزئینی و نما	۳۷۸	-
۲	تعاریف و مفاهیم در فعالیت‌های کانه‌آرایی	۴۴۱	۷
۳	فهرست خدمات طراحی پایه واحدهای کانه‌آرایی و فرآوری مواد معدنی	۴۹۷	۱۲
۴	علایم استاندارد نقشه‌های کانه‌آرایی	۵۰۸	۱۵
۵	راهنمای نرم‌افزاری علایم استاندارد نقشه‌های کانه‌آرایی مواد معدنی	۵۰۸	۲۷
۶	دستورالعمل مکان‌یابی واحدهای کانه‌آرایی و فرآوری	۵۱۵	۱۶
۷	ضوابط انجام آزمایش‌های کانه‌آرایی در مقیاس آزمایشگاهی، پایه و پیشاهنگ	۵۴۴	۳۱
۸	راهنمای محاسبه تعیین ظرفیت ماشین‌آلات و تجهیزات واحدهای کانه‌آرایی	۵۴۵	۳۲
۹	راهنمای انباشت مواد باطله در واحدهای کانه‌آرایی و فرآوری	۵۵۹	۳۳
۱۰	راهنمای سنگ‌جوری مواد معدنی به روش‌های دستی یا خودکار	۵۵۴	۳۰
۱۱	راهنمای حمل و نقل مواد معدنی در مدارهای کانه‌آرایی	۵۶۴	۳۹
۱۲	شناسایی مواد معدنی و آزادسازی آن‌ها در کانه‌آرایی	۵۶۵	۳۵
۱۳	واژه‌ها و اصطلاحات پایه اکتشاف، استخراج و فرآوری مواد معدنی	۵۶۷	۳۷
۱۴	ضوابط و معیارهای انتخاب آسیای خودشکن و نیمه‌خودشکن	۵۸۰	۴۲
۱۵	دستورالعمل کنترل و خنثی‌سازی آرسنیک، سولفید و سیانید در آزمایشگاه‌های فرآوری	۶۵۱	۵۳
۱۶	دستورالعمل نمونه‌برداری در کانه‌آرایی	۶۶۰	۵۷
۱۷	راهنمای تعیین شاخص خردایش در آسیاهای مختلف	۶۶۱	۵۸
۱۸	راهنمای آزمایش‌های جدایش ثقلی در مقیاس آزمایشگاهی	۶۶۲	۵۹
۱۹	راهنمای انتخاب مدار خردایش مواد معدنی	۶۷۰	۶۱
۲۰	راهنمای افزایش مقیاس در واحدهای کانه‌آرایی	۶۷۲	۶۳
۲۱	فهرست خدمات مهندسی تفصیلی واحدهای کانه‌آرایی		در دست تدوین
۲۲	دستورالعمل دانه‌بندی مواد معدنی		در دست تدوین
۲۳	راهنمای تهیه دفترچه محاسبات در آزمایشگاه‌های کانه‌آرایی		در دست تدوین
۲۴	راهنمای پذیرش و انبار نمونه در مقیاس آزمایشگاهی فرآوری مواد معدنی		در دست تدوین
۲۵	راهنمای آزمایش‌های خشک‌کردن، تشویه و تکلیس در مقیاس آزمایشگاهی		در دست تدوین
۲۶	معیارهای فنی کنترل بار ورودی، مواد در حال کانه‌آرایی و محصولات تولیدی در واحدهای کانه‌آرایی		در دست تدوین
۲۷	دستورالعمل تجهیزات استحضاطی و الگوی پوشش ایمنی کارکنان در واحدهای کانه‌آرایی		در دست تدوین
۲۸	ضوابط و معیارهای آماده‌سازی نمونه‌ها در فرآوری مواد معدنی		در دست تدوین
۲۹	راهنمای فنی کنترل و پایش تجهیزات فرآوری		در دست تدوین
۳۰	راهنمای مخلوط‌سازی بار ورودی واحدهای فرآوری		در دست تدوین
۳۱	راهنمای تهیه فهرست اسناد مناقصه پروژه‌های معدنی (فارسی - انگلیسی)		در دست تدوین
۳۲	راهنمای نگهداری تجهیزات مدار سنگ‌شکنی		در دست تدوین

Islamic Republic of Iran
Ministry of Industry, Mine and Trade

Mining Technical Criteria Benchmarking Program

Guidelines for RS, IP, EM & SP Survey in Mineral Exploration

(Publication No. 533)
of
(Management and Planning Organization)



Ministry of Industry, Mine and Trade
Deputy of Mine Affairs and Mineral Industries
Office for Mining Supervision Affairs
<http://www.mimt.gov.ir>
<http://www.minecriteria.ir>

Published by
Iranian Mining Engineering Organization
<http://www.ime.org.ir>