

شناخت و راهنمای روش‌های الکترومغناطیسی (EM)

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

شناخت و راهنمای روش‌های الکترومغناطیسی (EM)

آبان ماه ۱۳۸۳

نشریه شماره ۲۵۵-الف

پیش‌گفتار

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

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

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

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

ترکیب اعضای کمیته تهیه کننده :

این راهنما توسط شادروان آقای مهندس باقر مصلحی در چارچوب فعالیتهای کمیته کارست و سازندهای سخت مرکز تحقیقات منابع آب (تماب) [۱۳۶۶-۱۳۶۷] تهیه شده است که متعاقباً در کمیته آبهای زیرزمینی طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور مورد بررسی قرار گرفته است.

اسامی اعضای کمیته آبهای زیرزمینی به شرح زیر است :

آقای رحیم اتحاد	سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور	دکترای آب و خاک
خانم فیروزه امامی	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	فوق لیسانس زمین شناسی
آقای محمدحسین رشیدی	کارشناس آزاد	فوق لیسانس زمین شناسی
آقای محمود صداقت	دانشگاه پیام نور	فوق لیسانس زمین شناسی و آبشناسی
آقای بیژن مهرسا	مرکز تحقیقات منابع آب (تماب)	فوق لیسانس مهندسی آبهای زیرزمینی

لازم به یادآوری است که در تهیه نسخه نهایی این استاندارد، آقای مهندس احمد رجایی (فوق لیسانس آبهای زیرزمینی) نیز همکاری نموده‌اند.

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۲	فصل اول - معرفی و اصول
۲	۱-۱ معرفی
۳	۲-۱ کاربردها
۴	۳-۱ انواع سیستم‌های EM
۴	۱-۳-۱ مقاومت ویژه مغناطیسی (MMR)
۴	۲-۳-۱ سیستم‌های لوپ کوچک
۵	۳-۳-۱ سیستم‌های لوپ بزرگ
۵	۴-۳-۱ سیستم‌های زمان حوزه‌ای
۱۱	۵-۳-۱ فرکانس بسیار پایین (V.L.F)
۱۱	۲-۱ اصول بررسی‌های EM
۱۱	۱-۲-۱ امواج الکترومغناطیس
۱۶	۲-۲-۱ روابط فاز و دامنه
۱۹	۳-۲-۱ پلاریزاسیون (قطبش) بیضی‌وار
۲۰	۴-۲-۱ تعیین سطح پلاریزاسیون (قطبش)
۲۲	۵-۲-۱ عمق نفوذ تابش EM
۲۳	۳-۱ بررسی EM هوابرد
۲۳	۱-۳-۱ سابقه
۲۶	۲-۳-۱ سیستم‌های AEM
۲۶	۴-۱ بررسی EM دریابرد
۲۶	۱-۴-۱ سابقه
۲۹	۲-۴-۱ جزئیات سیستم‌های EM دریایی
۳۳	۵-۱ بررسی EM چاه آزمایشی
۳۹	فصل دوم - سیستم‌ها و کاربردها
۳۹	۱-۲ چکیده
۳۹	۲-۲ سیستم‌های موج پیوسته (CW)
۳۹	۱-۲-۲ روش‌های زاویه کجی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۴۱	۲-۲-۲ سامانه‌های با منبع ثابت (ساندبرگ، تورام)
۴۳	۳-۲-۲ سامانه‌های با منبع متحرک
۴۹	۴-۲-۲ روش‌های تفسیر
۵۶	۵-۲-۲ کاربردها و مطالعات موردی
۷۷	۳-۲ سامانه‌های پالس‌گذرای EM (TEM) یا EM در حوزه زمان (TDEM)
۷۷	۱-۳-۲ برداشت‌های TEM/TEM
۸۱	۲-۳-۲ پردازش و تفسیر داده‌های برداشت‌های TEM
۸۴	۳-۳-۲ کاربردها و کارهای موردی انجام شده
۱۰۰	۴-۲ روش‌های فرکانس بسیار پایین (VLF)
۱۰۰	۱-۴-۲ مقدمه
۱۰۰	۲-۴-۲ اصول کار
۱۰۴	۳-۴-۲ اثر توپوگرافی بر اندازه‌گیری‌های VLF
۱۰۵	۴-۴-۲ صافی کردن و تفسیر داده‌های VLF
۱۰۶	۵-۴-۲ کاربردها و مطالعات موردی
۱۰۶	۱-۵-۴-۲ تعیین موقعیت حفره‌های زیرسطحی
۱۰۸	۵-۲ روش تلوریک
۱۰۸	۱-۵-۲ اصول کار
۱۱۰	۲-۵-۲ اندازه‌گیری‌های صحرایی
۱۱۱	۶-۲ روش مگنتوتلوریک (MT)
۱۱۲	۱-۶-۲ اندازه‌گیری‌های صحرایی
۱۱۵	۲-۶-۲ روش‌های تفسیر
۱۱۸	۳-۶-۲ کاربردها و مطالعات موردی
۱۲۴	منابع و مراجع

مقدمه

کاربرد اکتشافات ژئوفیزیکی با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی، در مقایسه با دیگر روش‌های الکتریکی، به‌طور نسبی جوان‌تر است زیرا در حالی که قدمت استفاده از روش‌های مقاومت ویژه به بیش از ۷۰ سال می‌رسد، کاربرد وسیع روش‌های الکترومغناطیسی به زحمت به چند دهه بالغ می‌گردد. با این وجود، روش‌های الکترومغناطیسی در مقایسه با روش‌های مقاومت ویژه، از دو جنبه مورد استقبال متخصصین و کارشناسان قرار گرفته‌اند:

از دیدگاه فنی در بررسی‌های مقاومت ویژه، وجود ناهمگنی‌های مقاومت الکتریکی مواد سطحی در مجاورت الکترودهای پتانسیل سبب ایجاد خطای زیاد در اندازه‌گیری شده و علاوه بر آن اغلب، در سرزمین‌های خشک مانند ایران، مقاومت زیاد لایه‌های فوقانی موجب جلوگیری از تزریق برق به زمین می‌شود.

از نظر اقتصادی نیز، به‌دلیل سرعت انجام برداشت‌های صحرایی الکترومغناطیسی و عدم نیاز به نیروی انسانی فراوان و به‌تبع آن، کاهش در هزینه انجام مطالعات، کاربرد آن را بیش از پیش مطرح می‌سازد. علاوه بر آن، تنوع این روش‌ها امکان کاربردهای زیاد آن را در مناطق گوناگون نسبت به مقاومت ویژه افزایش می‌دهد که این تنوع، به استفاده روزافزون سیستم‌های الکترومغناطیسی در مطالعات مهندسی زمین‌شناسی ساختگاه سازه‌ها، تعیین مرز جدایی آب‌های زیرزمینی شور و شیرین، آشکارسازی غارها در سنگ‌های کربناته، به نقشه درآوردن زبانه‌های آلوده زیرزمینی در مطالعات زیست‌محیطی، پیگرد خطواره گسل‌ها و ... منجر شده است.

کمیت ژئوفیزیک استاندارد مهندسی آب، به‌منظور شناخت و آشنایی بیشتر کارشناسان، اقدام به تهیه و تدوین این نوشتار نموده است.

فصل اول - معرفی و اصول

۱-۱ معرفی

در میان کلیه روش‌های ژئوفیزیکی، روش‌های الکترومغناطیس دارای وسیع‌ترین گستره سیستم‌های ابزاری نسبت به هر روش دیگر بوده که با گستره کاربردهای قابل ملاحظه آن مطابقت دارد. این روش‌ها همچنین بیشترین تنوع جغرافیایی را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که برخی، به‌طور وسیع ترجیحاً در نواحی‌ای که ابداع و توسعه پیدا کرده‌اند به کار رفته است. به‌عنوان مثال SIROTEM در استرالیا ابداع و گسترش پیدا کرده (توسط سازمان تحقیق صنعتی علمی مشترک‌المنافع استرالیا CSIRO) و سیستم‌های تورام^۱ در سوئد مورد استفاده قرار گرفته است. انواع دستگاه‌های ساخته شده توسط شرکت ژئونیکس^۲ کانادا، در ابعاد وسیعی در آمریکای شمالی، به‌ویژه کانادای شرقی و در حال حاضر در اروپا مورد استفاده می‌باشد. پیشرفت‌های عمده‌ای در خصوص قابلیت حمل و استفاده راحت‌تر از برخی ابزار و کاربرد عام‌تر از تکنیک‌های مورد استفاده به‌وجود آمده است. روش‌های تفسیری موجود، به‌طور گسترده‌ای به ابزار مورد استفاده برای هر برداشت بستگی داشته و اطلاعات درباره تجهیزات موجود به‌صورت وسیعی در نوشتارها در سراسر دنیا انتشار یافته است. به‌هرحال، تنوع تجهیزات موجب تسهیلات لازم به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین وسیله کاری می‌گردد. این تنوع، به‌جای یک عیب، امتیازی عمده محسوب می‌شود. سیستم‌های مدرن EM به تولید یک سری سیستم پر قدرت از دستگاه‌های پیچیده منجر شده‌اند. همراه با پیشرفت‌های زیاد در تکنیک‌های تفسیری رایانه‌ای، متدهای الکترومغناطیس در ابعاد وسیعی به خصوص در مهندسی و مطالعات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

احتمالاً اولین روش الکترومغناطیس در مورد استفاده برای اکتشاف کانه‌ها توسط کارل ساندبرگ^۳ در دو دهه پیش در سوئد، پس از جنگ جهانی اول (ساندبرگ ۱۹۳۱) توسعه یافت. آنچه در حال حاضر به‌عنوان روش ساندبرگ شناخته شده، در سال ۱۹۲۵ ایجاد و همچنین برای تهیه نقشه ساختاری در اکتشاف هیدروکربن (ساندبرگ و هدستروم^۴ ۱۹۳۴) به کار برده شده است. کارهای اولیه دیگری در اوایل ۱۹۳۰ توسط یک ژئوفیزیکدان روسی به نام وی-آر-برسیان^۵ که در غرب چندان شناخته نیست انجام گرفت. روش‌های دیگر الکترومغناطیس، فقط پس از جنگ جهانی دوم به‌صورت تجاری و به‌ویژه اواسط دهه ۱۹۶۰ در دسترس قرار گرفته است. روش‌های EM نه تنها از نظر اکتشاف معدنی و هیدروکربن از اهمیت برخوردار است، بلکه به‌طور روزافزونی، در کاربردهای زیست‌محیطی ژئوفیزیکی به کار می‌رود.

سیستم‌های مختلف الکترومغناطیس موجود، به‌طور خلاصه در بخش ۱-۱-۳ و به‌طور تفصیلی در بخش بعدی شرح داده می‌شود. بحث جامع و تفصیلی پیرامون روش‌های الکترومغناطیسی به استثناء رادار نفوذی زمین^۶ توسط میساک نبیغیان^۷

-
- 1 - Turam
 - 2 - Geonics
 - 3 - Karl Sundberg
 - 4 - Hedstrom
 - 5 - V.R.Bursian
 - 6 - Ground Penetrating Radar
 - 7 - Misac Nabighian

(۱۹۹۱ و ۱۹۸۷) و مؤلفین دیگر تهیه گردیده است. بحث و توضیحات بیشتر در خصوص روش‌های مختلف در مقاله سه جلدی ژئوتکنیکال و ژئوفیزیک زیست‌محیطی توسط استان وارد^۱ (۱۹۹۰) تهیه شده است.

۲-۱ کاربردها

گستره کاربرد روش‌های EM، درحد وسیعی قرار داشته و به نوع تجهیزات مورد استفاده بستگی دارد، بنابراین به‌طور جامع می‌توان مطابق فهرست زیر طبقه‌بندی نمود. البته کلیه روش‌های EM به‌طور یکسان با فهرست کاربردها همخوانی ندارد. به‌عنوان مثال، رادار نفوذی زمین در بررسی مستقیم محل دفن زباله^۲ به‌علت وجود هدایت الکتریکی محیطی بالا و در نتیجه تضعیف زیاد امواج رادیویی نسبت به عمق، بسیار محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بعضی از بررسی‌های باستان‌شناسی، برعکس روش GPR، به نقشه درآوردن هدایت الکتریکی با استفاده از EM دارای قدرت تفکیک لازم نمی‌باشند.

فهرست گستره کاربرد بررسی‌های EM

- اکتشافات معدنی
 - ارزیابی منابع معدنی
 - مطالعات آب‌های زیرزمینی
 - به‌نقشه درآوردن زبانه‌های آلوده
 - بررسی منابع زمین‌گرمایی
 - به‌نقشه درآوردن زمین آلوده شده
 - مطالعات محل دفن زباله
 - آشکارسازی مطالعات حفره‌های طبیعی و مصنوعی
 - محل‌یابی گسل‌های زمین‌شناختی
 - به‌نقشه درآوردن زمین‌شناسی
 - به‌نقشه درآوردن زمین یخ‌زده و غیره
- علاوه براین، GPR را می‌توان با احتیاط در داخل ساختمان‌ها به‌کار برد، درحالی که از روش‌های هدایت الکتریکی زمین، به‌دلیل تداخل نوفه‌های الکتریکی محیطی حاصل از خطوط فشار قوی نمی‌توان استفاده کرد.

یکی از مزایای اصلی روش‌های EM این است که فرآیند القاء، به تماس مستقیم الکترودها با زمین، مثل روش‌های الکتریکی احتیاج ندارد. در نتیجه سرعت مطالعات EM در مقایسه با بررسی‌های مشابه، به مراتب بیشتر از روش مقاومت ویژه متداول است. علاوه براین فرآیند القاء اجازه می‌دهد که این روش را از طریق هواپیما و کشتی، و همچنین به‌صورت درون‌چاهی مورد استفاده قرار داد. مانند روش‌های مقاومت الکتریکی، می‌توان از مدل‌های مقیاس‌دار تجربی، برای نشان دادن ساختارهای

1 - Stan Ward

2 - Landfill

ویژه استفاده کرد. با این حال استفاده از مدل‌های عددی ترجیح داده می‌شود. بنابراین با توجه به مشکلات محاسباتی در تعیین مدل‌های دو و سه بعدی محدودیت‌هایی وجود دارد و مدت زیادی برای محاسبه مورد نیاز است.

۳-۱ انواع سیستم‌های EM*

روش‌های الکترومغناطیس را می‌توان به صورت سیستم‌های زمان حوزه‌ای (TEM) یا فرکانس حوزه‌ای (FEM) طبقه‌بندی نمود. دستگاه‌های فرکانس حوزه‌ای از یک یا چند فرکانس استفاده می‌کند درحالی‌که تجهیزات زمان - حوزه‌ای اندازه‌گیری‌ها را برحسب تابعی از زمان انجام می‌دهد. روش‌های EM می‌تواند با استفاده از سیگنال‌های طبیعی زمین (غیرفعال^۱ مانند مگنتوتلوریک) انجام شود، یا با استفاده از یک فرستنده مصنوعی در میدان نزدیک (هدایت‌سنج الکتریکی زمین) یا در میدان دور با استفاده از فرستنده‌های نظامی پرقدرت برای به نقشه درآوردن VLF^۲ به کار برده شود (فعال^۳).

طبقه‌بندی اساسی سیستم‌های EM در جدول ۱-۱، به نقل از سویفت^۴ (۱۹۸۸) آورده شده است. هر سیستم، به‌طور خلاصه در این بخش توضیح داده شده و VLF، هدایت الکتریکی، EM زمان - حوزه‌ای، سیستم‌های تلوریک و مگنتوتلوریک در فصل بعد به صورت تفصیلی شرح داده شده است.

مطالعات موردی در مواقع لازم برای روشن شدن کاربرد هر یک از روش‌های اصلی ارائه گردیده است. در اغلب موارد، مفهوم هر روش به جای سیستم‌های تجهیزات ویژه که ممکن است در ادامه کار کامل‌تر گردند آورده شده است.

۱-۳-۱ مقاومت ویژه مغناطیسی (MMR)^۵

جریان مستقیم تبدیل شده از طریق دو الکتروود با فاصله زیاد از هم به داخل زمین تزریق می‌گردد. رسانندگی ویژه بی‌هنجار، به نقطه وسط وابسته می‌شود. این کار از طریق اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ثانویه ناشی از عبور جریان با استفاده از مغناطیس‌سنج‌های کم نوفه خیلی حساس که به‌طور عمود بر خط بین الکتروودها قرار گرفته صورت می‌گیرد (شکل ۱-۱).

۲-۳-۱ سیستم‌های لوپ کوچک

یک سیستم EM فرکانس حوضه‌ای که در آن دو پیچه کوچک یکی فرستنده و دیگری گیرنده با فاصله ثابت ۴ تا ۱۰۰ متر جدا شده، در طول یک مقطع برداشت عرضی به حرکت درمی‌آید. میدان اولیه در محل گیرنده، خنثی شده به‌طوری‌که مؤلفه‌های هم‌فاز و تربیعی میدان ثانویه را می‌توان اندازه‌گیری نمود. ترکیب جهت‌های مختلف پیچه در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

* در اینجا انواع سیستم‌های EM فقط به صورت خلاصه معرفی می‌شود. شرح کامل این روش‌ها پس از مبحث اصول بررسی‌های EM آورده شده است.

1 - Passive

2 - Very Low Frequency

3 - Active

4 - Swift

5 - Magneto Metric Resistivity

روش‌های EM شامل سلینگرام مترادف لوپ افقی (HLEM)^۱، بولیدن^۲ تفنگ EM^۳، ماکس مین^۴ و رونکا^۵ می‌باشد. دستگاه‌های اندازه‌گیری رسانندگی ویژه زمینی (GCM)^۶ را می‌توان با استفاده از این نوع روش طبقه‌بندی نمود. در این مرحله، مؤلفه تربیعی غالباً به‌عنوان اندازه خطی رسانندگی ویژه ظاهری زمین به‌حساب می‌آید. پیچ‌های هم‌سطح، به صورت افقی و قائم به کار گرفته می‌شود، تفصیل بیشتر آن در فصل بعدی خواهد آمد.

۳-۳-۱ سیستم‌های لوپ بزرگ

دو آرایش اساسی در این طبقه‌بندی، به نام‌های ساندبرگ و تورام شناخته شده است.

روش ساندبرگ با استفاده از یک سیم بلند، متصل به زمین و عایق‌بندی، و به طول ۱۰۰ متر تا چندین کیلومتر با یک لوپ مستطیل بزرگ انجام می‌شود، (شکل ۳-۱-الف)، به‌طوری که ضلع بلند آن در امتداد خفت زمین‌شناختی قرار می‌گیرد. ابعاد لوپ نوعی ۱۲۰۰ در ۴۰۰ متر می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در امتداد پروفیل‌هایی عمود بر سیم یا ضلع بلند لوپ انتخاب می‌شود. فاز مرجع، با استفاده از یک پیچ تغذیه کننده نزدیک به لوپ یا کابل منبع با استفاده از سیستم جبران کننده که در شکل ۳-۱-ج نشان داده شده است، گرفته می‌شود. عموماً میدان مغناطیسی قائم، با استفاده از پیچ گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که پیچ در سه صفحه متقابلاً عمود برهم به کار گرفته شود، کاملاً می‌توان میدان EM را تعیین نمود.

تکنیک تورام مشکلی را که در برداشت ساندبرگ وجود دارد رفع می‌نماید. این مشکل، عبارت است از لزوم داشتن یک پیچ تغذیه در نزدیکی کابل یا لوپ منبع. در روش تورام دو پیچ، گیرنده مجزا مورد استفاده قرار می‌گیرد که به فاصله ثابت نوعاً ۲۰-۱۰ متر قرار دارند (شکل ۳-۱-د). بعد از هر اندازه‌گیری، پیچ‌ها به‌طوری حرکت می‌کنند که پیچ عقبی جای پیچ قبلی را گرفته و بدین ترتیب به جلو می‌رود. دو پیچ امکان این را بوجود می‌آورد که توسط آن، نسبت دامنه‌های میدان قائم منتجه و اختلاف فاز میدان‌های قائم را در دو نقطه هم‌جوار می‌توان اندازه‌گیری نمود. در نتیجه، با داشتن فاصله ثابت بین دو پیچ و اندازه‌گیری پارامترها در هر یک از دو نقطه، گرادیان افقی فاز میدان قائم منتجه تعیین می‌گردد.

۴-۳-۱ سیستم‌های زمان حوزه‌ای

در صورتی که یک میدان EM همواره توسط یک فرستنده ایجاد شود، میدان ثانویه به دو طریق قابل تعیین است:

الف) از طریق صفر نمودن میدان اولیه به‌طوری که بتوان میدان ثانویه را آشکارسازی کرد، ب) با اندازه‌گیری برآیند میدان‌های اولیه و ثانویه که در نتیجه پارامترهای میدان ثانویه محاسبه می‌شود. ضمناً میدان اولیه در هنگام طراحی شناخته شده است. در EM زمان حوزه‌ای یا گذرا میدان اولیه به‌صورت پالس‌هایی با طول زمانی ۴۰-۲۰ میلی‌ثانیه اعمال می‌شود. میدان ثانویه در فاصله مثلاً ۱۰۰ میلی‌ثانیه بعد از قطع میدان اولیه اندازه‌گیری می‌شود. یکی از مزایای این کار، آن است که پیچ فرستنده را می‌توان به عنوان گیرنده نیز مورد استفاده قرار داد. طراحی‌های اساسی میدان در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.

1 - Horizontal Loop EM

2 - Boliden

3 - EM Gun

4 - Max Min

5 - Ronka

6 - Gorund Conductivity Meters

جدول ۱-۱ - طبقه‌بندی سیستم‌های الکتریکی و الکترومغناطیس

نوع گیرنده				نوع فرستنده
پیچه کوچک (هوایی)	پیچه کوچک (زمینی)	سیم و پیچه کوچک	سیم زمین	
	مغناطیس‌سنجی مقاومت ویژه (MMR) ترکیب مغناطیس و IP (MIP)		مقاومت ویژه IP	سیستم متصل به زمین (گالوانیک)*
	برخی سیستم‌های TEM	CSAMT		القایی
				لوپ کوچک
EM هوابرد	سلینگرام ^۱			
زمان حوزه‌ای	لوپ افقی EM			
گیرنده دنبال هواپیما هلیکوپتر	لوپ قائم EM			
	روش زاویه کجی ^۲			
میله اتصال ثابت کننده	سنج‌های رسانندگی ویژه زمین (GCM)			
	برخی سیستم‌های TEM			
	لوپ هم‌سنگ			
	سیستم‌های درون چاهی			
				لوپ بزرگ (سیم بلند)
	سیستم‌های لوپ بزرگ			
	روش ساندبرگ			
	تورام			
	انواع زیاد سیستم‌های TEM			
	سیستم‌های درون چاهی			
				موج تخت
VLF		VLF - مقاومت ویژه VLF		آنتن قائم
			جریان‌های تلوریک	میدان مغناطیسی طبیعی زمین

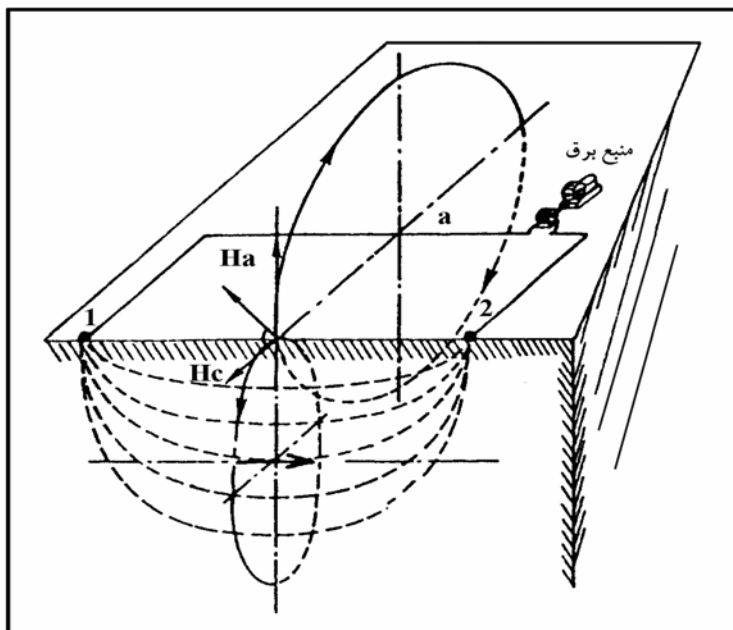
سیم‌های متصل به زمین، اختلاف پتانسیل برحسب طول و در نتیجه میدان الکتریکی را اندازه می‌گیرد. پیچه‌ها یا مغناطیس‌سنج‌های فلاکس‌گیت^۳ یا SQUIDS، میدان مغناطیسی یا مشتق آن را برحسب زمان اندازه می‌گیرد. یک لوپ کوچک یک منبع سه‌بعدی است (دو قطبی مغناطیسی). سیم بلند (یا ضلع بلند یک لوپ بزرگ) یک منبع دوبعدی است. منابع طبیعی الکترومغناطیس به‌صورت منابع یک بعدی فرض می‌شود. گیرنده‌ها ممکن است فرکانس حوزه‌ای (FEM) یا زمان - حوزه‌ای (TEM) یا هر دو باشند. CSAMT = منبع کنترل شده شنیداری مگنتوتلوریک این طبقه‌بندی، که فنون فرکانس بالا (رادار و غیره) را شامل نمی‌شود، براساس طبقه‌بندی سوئیفت ارائه شده است.

* اصطلاح گالوانیک، تزریق جریان پیوسته الکتریکی به داخل زمین از طریق الکترودها است.

1 - Slingram

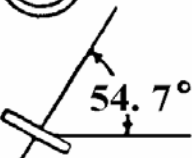
2 - Tilt

3 - Fluxgate

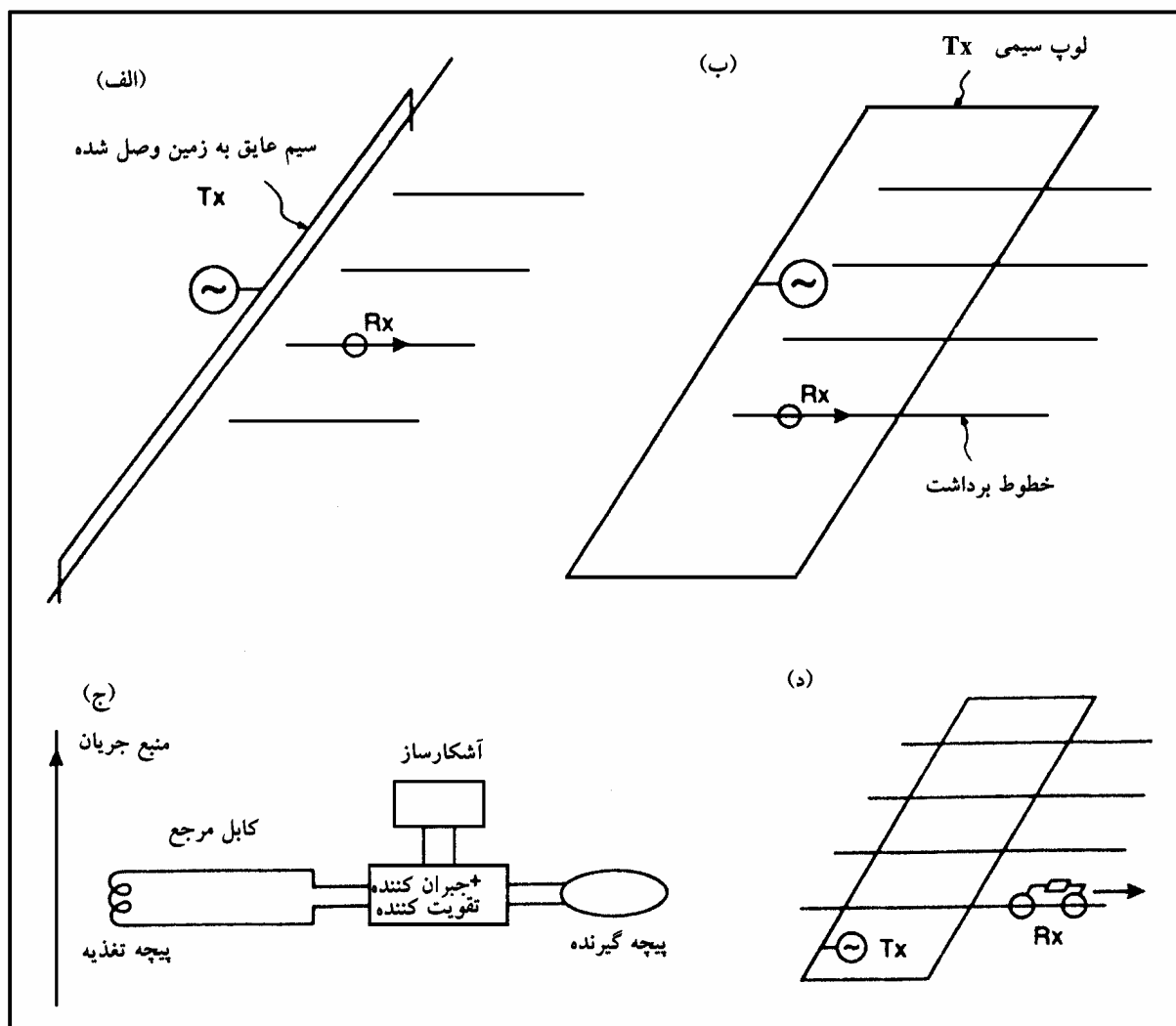


شکل ۱-۱- چگونگی برداشت صحرایی مقاومت ویژه از طریق مغناطیس‌سنجی. الکترودهای (۱ و ۲) برای تزریق جریان مستقیم به داخل زمین مورد استفاده قرار گرفته است. میدان مغناطیسی ثانویه ناشی از عبور جریان در زمین، در نقطه وسط از طریق یک دستگاه مغناطیس‌سنج فوق‌العاده حساس اندازه‌گیری می‌شود.

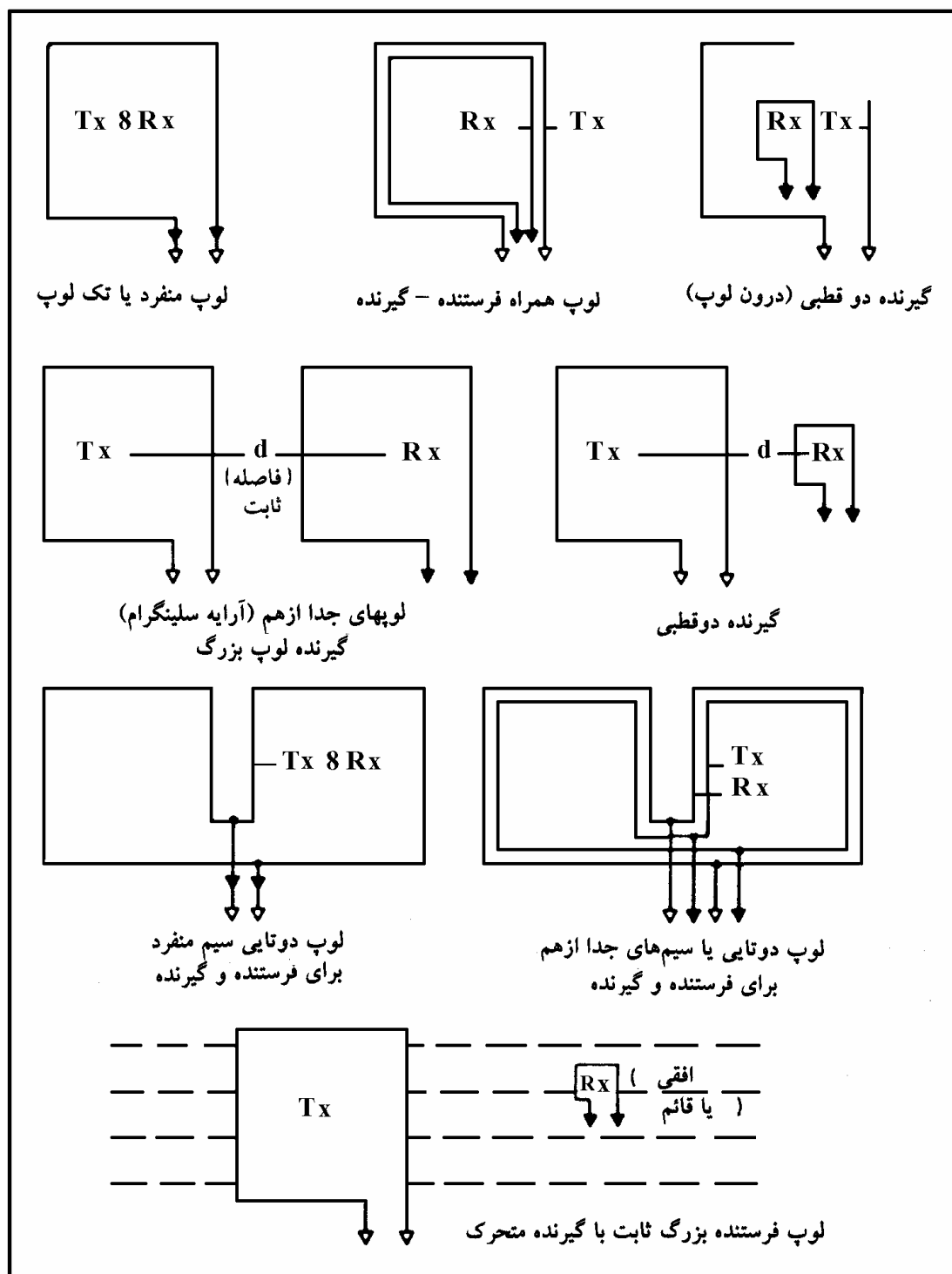
یک پیچه بلند متصل نشده به زمینی نوعی که جریان مستقیم قوی از آن می‌گذرد، به موازات امتداد زمین‌شناختی روی زمین قرار داده می‌شود. یک پیچه گیرنده کوچک در طول خط برداشت عمود بر محور بلند لوپ بدون اتصال به زمین، به منظور تهیه پروفیل‌های مربوط به پارامترهای اندازه‌گیری شده برحسب فاصله در طول خط برداشت حرکت می‌کند. در روش دیگر برداشت، به جای پروفیل‌برداری می‌توان از سیستم‌های TEM به صورت مؤثرتری برای سونداژ زنی‌های عمقی استفاده نمود. افزایش عمق نفوذ از طریق اندازه‌گیری کاهش تدریجی میدان ثانویه، به صورت تابعی از زمان صورت می‌گیرد. با کاهش تدریجی میدان ثانویه، پارامترهای میدان در فواصل زمانی معین (نوعاً لگاریتمی) اندازه‌گیری می‌شود. این روش، شبیه روش قطبش القا (IP) در بررسی‌های مقاومت ویژه است. یک سیستم ویژه (INPUT) در سال ۱۹۵۸ برای کارهای هواپردی (بارینگر^۱ ۱۹۶۲) توسعه یافت. پس از سال ۱۹۷۰، با پیشرفت‌هایی که در تکنولوژی و قابلیت‌های محاسبه به وجود آمد، یک سری سیستم‌های EM توسط مؤسسات علمی و شرکت‌های تجارتی توسعه پیدا کرد. در سال ۱۹۸۸، کلیه تولیدکنندگان ابزارهای فوق، سیستم‌های کاملاً عددی TEM ارائه نمودند.

1. 	 HCP
2. 	 PERP
3. 	 VCP
4. 	 VCA
5. 	 NULL
6. 	 PARALLEL
7. 	 H WAVE TILT
8. 	 V WAVE TILT

شکل ۱-۲- هشت آرایش لوپ دوقطبی متداول (فرستنده: T_x ، گیرنده: R_x). هر مستطیل نشان دهنده وجه بیرونی پیچه است. به عنوان مثال، در آرایه‌های ۱ تا ۳ هر پیچه دور محور افقی چرخیده است. از ۳ تا ۴ هر پیچه دور محور قائم چرخیده است. هم سطح افقی: HCP، هم سطح قائم: VCP، هم محور قائم: VCA، عمود برهم: (گیرنده و فرستنده) PERP، نول: NULL، موازی: PARALLEL، زاویه کجی مولفه افقی: H WAVE TILT، زاویه کجی مولفه قائم: V WAVE TILT



شکل ۱-۳- (الف) آرایش صحرائی برای روش ساندبرگ با سیم بلند به زمین وصل شده، (ب) یک لوپ به زمین وصل شده که خطوط پروفیل آن مشخص شده است، (ج) فاز مرجع با استفاده از یک جبران کننده نزدیک به سیم منبع تعیین می گردد، (د) در روش تورام دوپیکه گیرنده با فاصله ثابت به کار برده می شود.



شکل ۱-۴- میدان برداشت‌های زمان حوزه‌ای EM

به عنوان راهنما و باتوجه به آرایش ها و تجهیزات مورد استفاده، برداشت روزانه ۵۰ سونداژ TEM، غیرمنطقی به نظر نمی رسد. با افزایش تقاضا به منظور استفاده از TEM در کاربردهای زیست محیطی که عمق نفوذ کمتر از ۵۰ متر مورد نیاز است، سیستم های بسیار اولیه TEM (VETEM)^۱ در حال توسعه است. مطالعات VETEM درجایی که نفوذ کمتر از ۲۵ متر ولی تفکیک قائم بالایی مورد نظر است، از جمله بر روی خاکریزهای بسته، مورد استفاده قرار می گیرد.

۱-۳-۵ فرکانس بسیار پایین (V.L.F)

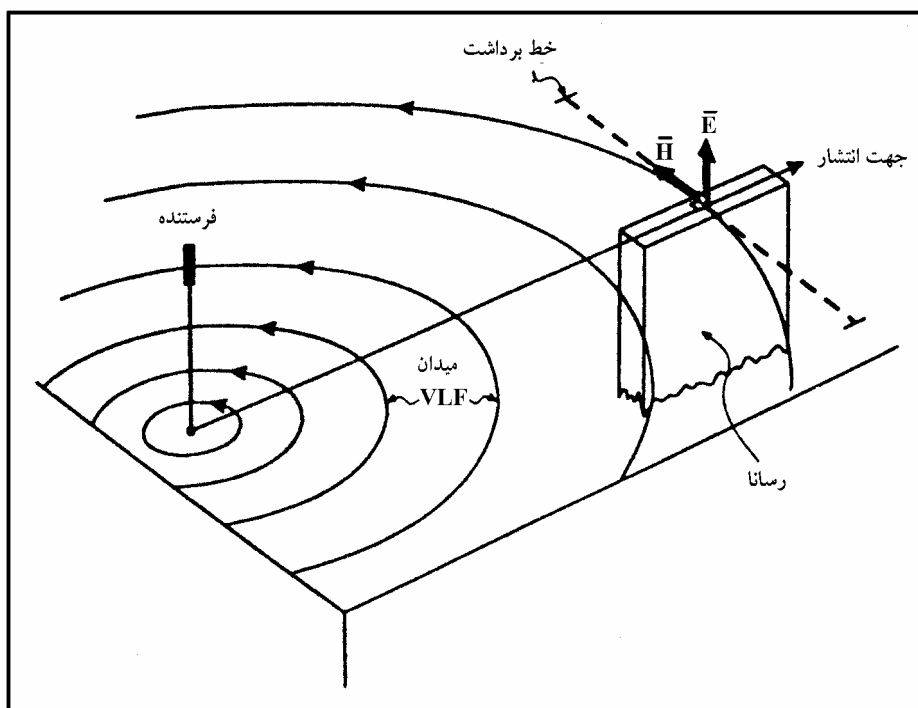
فرستنده های رادیویی نظامی پر قدرت، که با طول موج ۲۴-۱۵ KHZ کار می کنند (فرکانس بسیار کم در امواج رادیویی)، برای ارتباط با زیر دریایی ها، حتی وقتی در زیر آب هستند، برای مکان یابی رادیویی دوربرد مورد استفاده قرار می گیرند. فواصل بسیار دور از فرستنده ها، میدان EM تقریباً به صورت موج تخت که در اکتشافات ژئوفیزیکی کاربرد دارد فرض می شود (شکل ۱-۵)؛ این روش به صورت زمینی یا هوا بر دی مورد استفاده قرار می گیرد.

۱-۲ اصول بررسی های EM

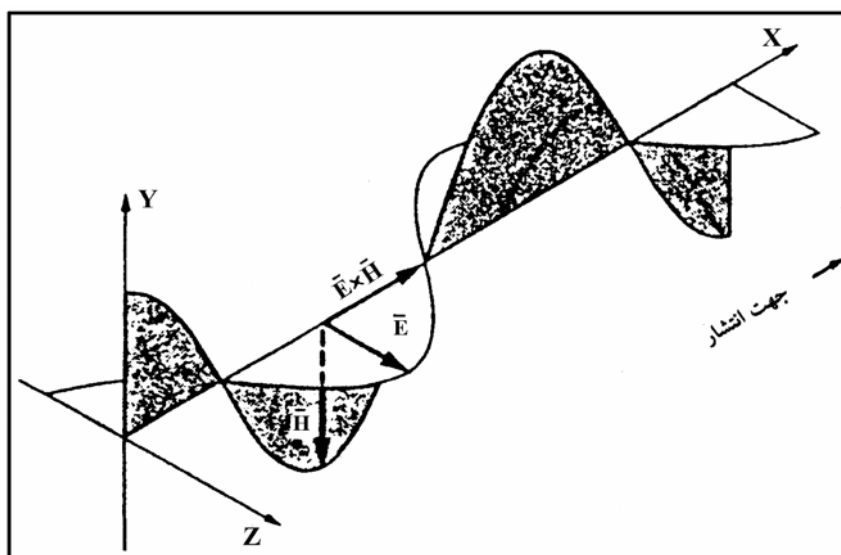
۱-۲-۱ امواج الکترومغناطیس

روش های EM، از پاسخ زمین به انتشار امواج EM متناوب تابشی که از دو مؤلفه برداری عمود برهم تشکیل شده است استفاده می کند. این دو مؤلفه، عبارتند از یک بردار الکتریکی با شدت $\vec{E}$ و یک نیروی مغناطیس کننده $\vec{H}$ (شکل ۱-۶) در صفحه ای عمود بر جهت انتشار. یک میدان الکترومغناطیس از طریق عبور یک جریان متناوب از یک پیچه کوچک شامل سیم های پیچیده شده زیاد یا یک لوپ بزرگ سیمی ایجاد می شود. گستره فرکانسی تابش EM بسیار پهن است (شکل ۱-۷). این گستره از میکروپالس های جوی در فرکانس کمتر از ۱۰ Hz تا باندهای را داری 10^8 تا 10^{11} هرتز و پرتوهای ایکس و گاما با فرکانس هایی متجاوز از 10^{16} هرتز را دربر می گیرد. در این میان، باند مرئی $10^{15} \approx$ هرتز قابل اهمیت است.

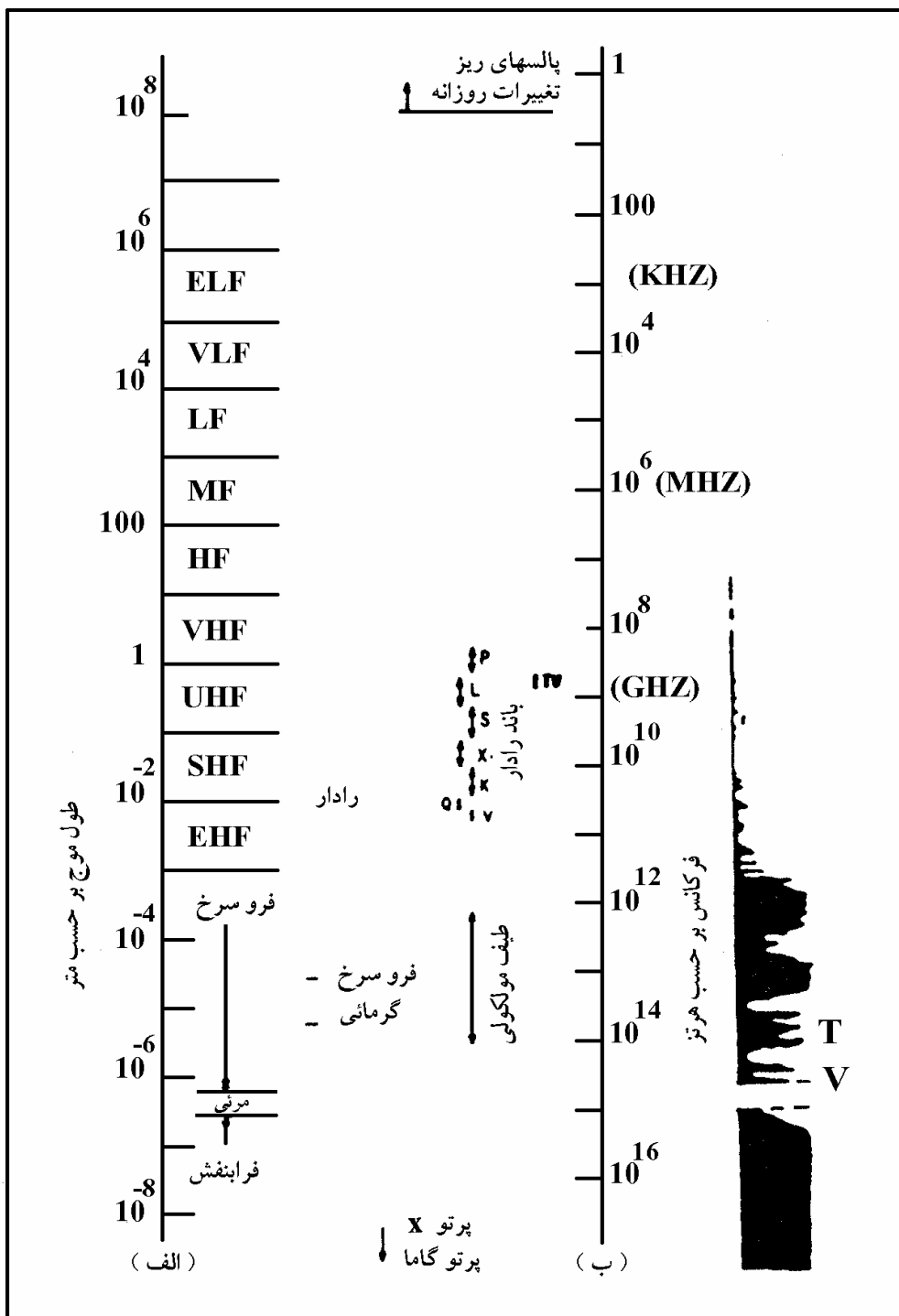
برای کاربردهای ژئوفیزیکی، فرکانس های میدان متناوب اولیه، اغلب از چند هزار هرتز کمتر است. موج اولیه دارای طول موجی بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلومتر است درحالی که فاصله بین گیرنده و منبع نوعی بسیار کمتر (حدود ۴ تا ۱۰۰ متر و بیشتر) است. در نتیجه، انتشار موج اولیه و تضعیف موج مربوطه نادیده گرفته می شود (شکل ۱-۸).



شکل ۱-۵- منبع مصنوعی VLF (مثلاً فرستنده نظامی) یک موج EM اولیه ایجاد می‌کند که در فاصله کاملاً دور، معادل یک موج تخت می‌شود. جهت‌های ترجیحی خط برداشت، روی یک رسانای خطی مماس بر میدان VLF است.



شکل ۱-۶- اجزای اصلی یک موج الکترومغناطیس که دو مؤلفه اصلی الکتریکی $\vec{E}$ و مغناطیسی $\vec{H}$ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۷- طیف الکترو مغناطیسی

الف) قسمت‌های مختلف طیف بر حسب طول موج به متر

ب) قسمت تاریک نمودار، زون‌هایی را که توسط جذب جوی تضعیف شده‌اند نشان می‌دهد. دو پنجره در طیف جذبی قابل توجه است در T (فروسرخ گرمایی) و V (نور مرئی).

در حالت کلی، برای تولید کردن میدان الکترومغناطیس اولیه که در زیر و بالای زمین منتشر می‌شود، از یک پیچه فرستنده استفاده می‌شود. هنگامی که تابش الکترومغناطیس در زیر سطح زمین حرکت می‌کند، نسبت به موجی که در هوا حرکت می‌کند کمی تغییر می‌نماید: اگر محیط رسانا در زیر زمین وجود داشته باشد، مؤلفه مغناطیس ناشی از موج تابشی EM جریان‌های ادی (جریان‌های متناوب) در داخل رسانا را القاء می‌نماید. جریان‌های ادی، به نوبه خود میدان ثانویه EM ایجاد می‌کند که به وسیله گیرنده آشکار می‌شود (شکل ۱-۹). گیرنده، میدان اولیه EM را نیز که از هوا عبور می‌کند آشکار می‌سازد، بنابراین پاسخ کلی گیرنده ترکیبی (برآیند) از اثر میدان‌های اولیه و ثانویه است. در نتیجه، پاسخ اندازه‌گیری شده، هم از نظر فاز و هم از نظر دامنه نسبت به میدان اولیه مدوله نشده متفاوت خواهد بود. درجه تفاوت این مؤلفه‌ها، اطلاعات مهمی در مورد هندسه، اندازه و خواص الکتریکی رسانای زیرزمینی به دست می‌دهد.

اگر زمین تحت بررسی سه مؤلفه القایی (L)، مقاومتی (R)، و ظرفیتی (C) در نظر گرفته شود، می‌توان مدار الکتریکی معادل آن را مطابق شکل ۱-۱۰ نشان داد. ولتاژ متناوب به کاررفته به شکل یک موج سینوسی با فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi f$ و دامنه E_0 که به صورت تابعی از زمان تغییر می‌کند در زیر نشان داده شده است:

$$E = E_0 \sin \omega t$$

شدت جریان (I) در مدار هم ارز عبارت است از (شکل ۱-۱۰):

$$I = E_0 \left\{ \left[\omega L - \left(\frac{1}{\omega C} \right) \right]^2 + R^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \sin(\omega t - \alpha) \quad (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\omega L - \left(\frac{1}{\omega C} \right) \right] / R \quad (2)$$

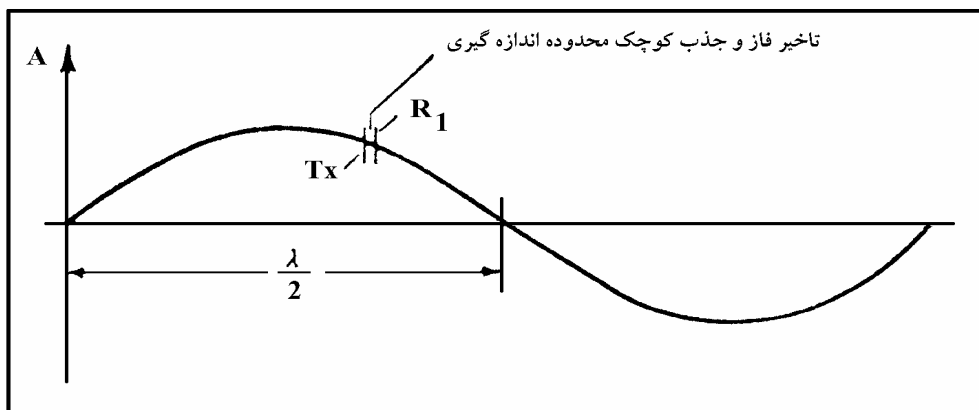
و L خود القا، C ظرفیت و R مقاومت است.

جریان I نسبت به پتانسیل به کار برده شده به اندازه α تأخیر فاز دارد.

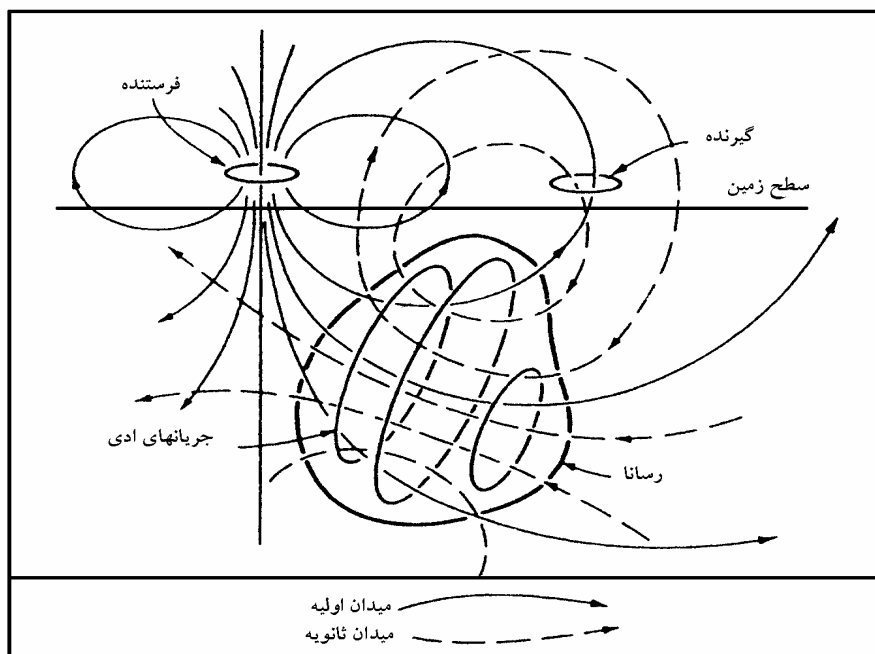
در اکتشاف EM، یک میدان مغناطیسی اولیه (P) اعمال می‌شود که مطابق با خواص موج EM با مؤلفه الکتریکی عمودی آن (E) هم‌فاز است (به شکل ۱-۶ مراجعه شود). در نتیجه، شکل موج مغناطیس اولیه $P = H_0 \sin \omega t$ می‌باشد که در آن H_0 دامنه ماکزیمم موج مغناطیس (شکل ۱-۱۱ الف) است. ولتاژ القاء شده به رسانای کامل ثانویه، در اثر میدان مغناطیس اولیه نسبت به میدان اولیه به اندازه $\frac{\pi}{2}$ تأخیر دارد.

مطابق قانون القایی EM فاراده، بزرگی ولتاژ القاء شده مستقیماً متناسب است با آهنگ تغییر میدان مغناطیسی ولتاژ القاء شده در زمانی که میدان مغناطیسی در حداکثر یا حداقل قرار دارد (شکل ۱-۱۱ ب) صفر خواهد بود. جریان‌های ادی داخل رسانا برخاسته از ولتاژ القاء شده، زمان معینی را برای ظهور نیاز دارد. این زمان ظهور، به صورت تأخیر فاز α ظاهر می‌شود

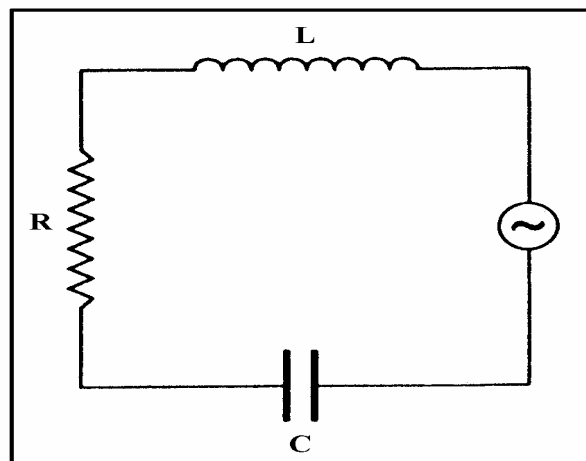
(شکل ۱۱-۱ ج) که به خواص الکتریکی رسانا بستگی دارد. در رساناهای خوب، این تأخیر فاز می‌تواند بزرگ باشد و برعکس در رساناهای ضعیف، تأخیر فاز کوچک است. میدان مغناطیسی ثانویه، پس از ظهور، با میدان اولیه تأثیر متقابل داشته و میدان مغناطیسی منته (شکل ۱۱-۱ د) را به وجود می‌آورد که تأخیر فاز ϕ را نسبت به میدان اولیه خواهد داشت.



شکل ۱-۸- فاصله (فیزیکی) بین فرستنده (TX) و گیرنده (RX) نسبت به طول موج‌های EM با فرکانس‌های بزرگ‌تر از ۳ کیلوهرتز، خیلی کوچک است. در نتیجه تضعیف حاصل از انتشار موج را می‌توان صرف‌نظر کرد.



شکل ۱-۹- روش بررسی EM به صورت طرح‌وار



شکل ۱-۱۰- مدار الکتریکی شامل ظرفیت (C)، خود القاء (L) و مقاومت (R). این سه مؤلفه الکتریکی، رفتار معادل زمین را شرح می‌دهد.

۲-۲-۱ روابط فاز و دامنه

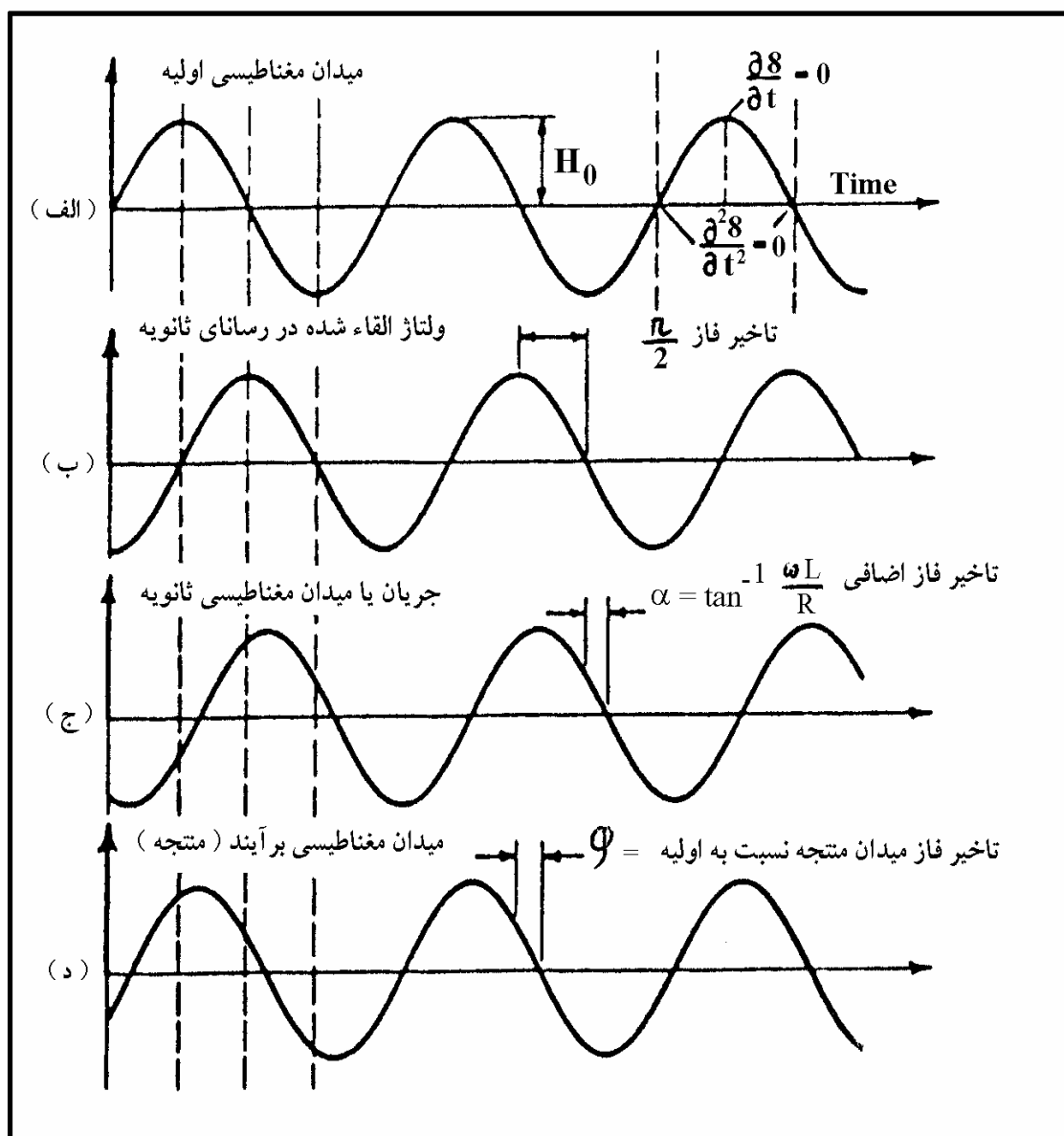
وضعیت میدان‌های اولیه، ثانویه و منتجه که در قبل توضیح داده شد، می‌تواند به‌طور شماتیک توسط مدارهای متناوب نشان داده شود. به‌این ترتیب، درک این میدان‌ها و روابط مربوط به فاز و دامنه آنها ساده‌تر خواهد شد. هریک از میدان‌های مذکور، توسط یک مدار جریان متناوب شامل مقاومت (R) و القا (L) نشان داده می‌شود. برای میدان اولیه (فرستنده) جریان i_p در نظر گرفته شده که در این صورت اختلاف پتانسیل القا شده روی رسانا، توسط جریان i_s در مدار میدان ثانویه نشان داده می‌شود (شکل ۱-۱۲-الف).

همان‌طور که قبلاً گفته شد، اختلاف پتانسیل القایی دارای اختلاف فاز 90° درجه نسبت به میدان اولیه است و وجود قابلیت رسانندگی جسم موجود در زیر سطح (سیم‌پیچ ۲) نیز باعث اختلاف فازی برابر φ نسبت به اختلاف پتانسیل القایی می‌شود. بنابراین اختلاف فاز بین میدان‌های اولیه و ثانویه عبارت خواهد بود از :

$$\theta_p - \theta_s = (90 + \varphi), \varphi = \text{Arctg } \omega L_s / r_s$$

حال با رسم نمودار هندسی سه میدان مذکور، می‌توان روابط مربوط به دامنه و فاز را بخوبی درک کرد. در شکل ۱-۱۲-ب، میدان ثانویه (H_s) دارای تأخیر فازی به اندازه $90^\circ + \varphi$ نسبت به میدان اولیه (H_p) می‌باشد (تأخیر فاز در جهت عقربه‌های ساعت در نظر گرفته شده است).

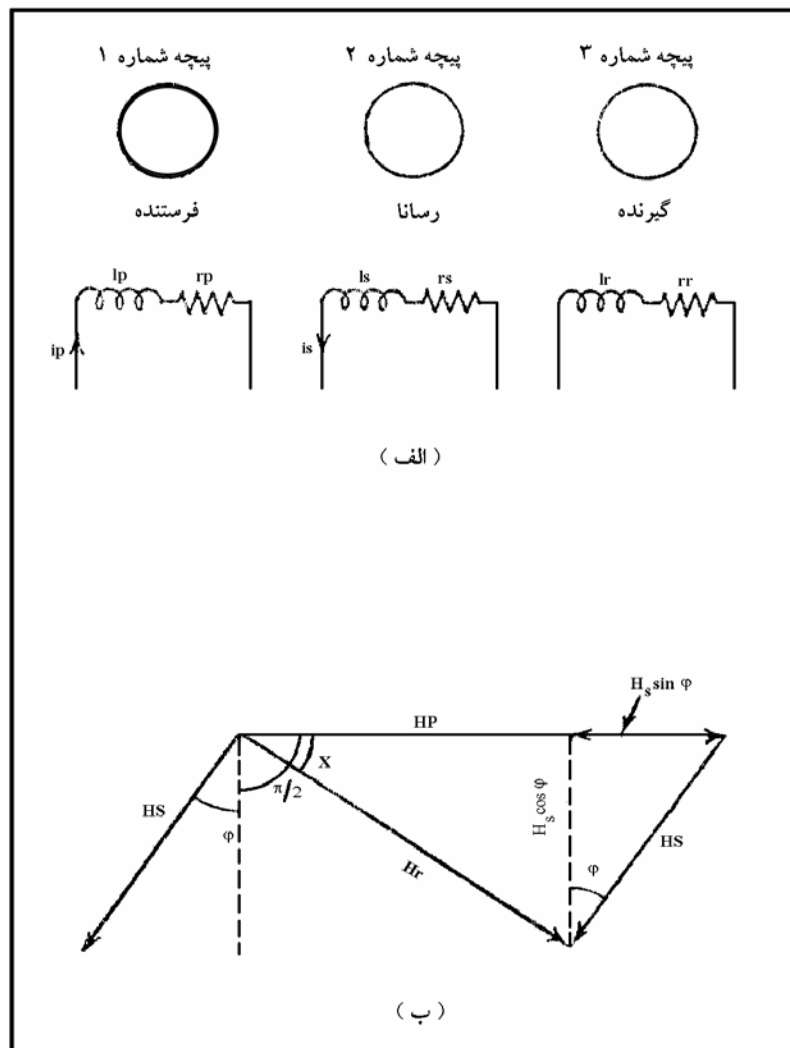
بردار H_p ، منتجه دو میدان اولیه و ثانویه در محل گیرنده است. با توجه به مقدار φ برای مقاومت جسم مورد تجسس می‌توان دو حالت حدی در نظر گرفت:



شکل ۱-۱۱- روابط بین ولتاژهای القایی و تأخیر فازهای مربوطه بین میدان‌های مغناطیسی اولیه، ثانویه و برآیند (منتجه)

الف) وقتی که مقاومت جسم خیلی زیاد باشد ($I_s \rightarrow \infty$) داریم: $\phi = 0$ ؛ در این صورت اختلاف فاز بین میدان اولیه و ثانویه ($\theta_p - \theta_s$) برابر 90° درجه می‌شود.

ب) درحالتی که با یک جسم با رسانندگی خیلی زیاد سروکار داشته باشیم ($I_s \rightarrow 0$) داریم: $\phi = 90^\circ$ و در نتیجه اختلاف فاز بین میدان اولیه و ثانویه برابر 180° درجه خواهد شد.



شکل ۱-۱۲- (الف) تشبیه میدان‌های اولیه، ثانویه و منتجه به مدارهای جریان متناوب ،
(ب) نموداربرداری میدان‌های اولیه (H_s)، ثانویه (H_p) و منتجه (H_r) و اختلاف فاز

به این ترتیب، دیده می‌شود که تعیین تأخیر فاز می‌تواند در شناخت توده‌های مورد تجسس نقش موثری ایفا نماید، زیرا هرچه این تأخیر فاز به 180° درجه نزدیک باشد، جسم یا توده مورد مطالعه از رسانندگی بیشتری برخوردار است. حال به بررسی مؤلفه‌های میدان منتجه پرداخته می‌شود. مؤلفه میدان منتجه در امتداد میدان اولیه که برابر $H_r \cos \alpha$ می‌باشد (شکل ۱-۱۲-ب) با میدان اولیه هم فاز بوده و آنرا مؤلفه حقیقی^۱ یا مؤلفه هم‌فاز^۲ می‌نامند.

1 - Real Component
2 - Inphase Component

تصویر H_r در امتداد میدان ثانویه برابر $H_r \sin \alpha$ می باشد که به اندازه ۹۰ درجه نسبت به میدان اولیه اختلاف فاز داشته و در حقیقت ماکزیمم و می نیمم آن به اندازه ۹۰ درجه پس از ماکزیمم یا می نیمم میدان اولیه اتفاق خواهد افتاد. این مؤلفه را مجازی^۱ یا خارج از فاز^۲ می نامند.

به همین ترتیب می توان میدان ثانویه (H_s) را به دو مؤلفه حقیقی با دامنه ($H_s \sin \phi$) و مجازی با دامنه ($H_s \cos \phi$) تجزیه نمود.

باید توجه داشت که نامگذاری حقیقی و مجازی که در اینجا استفاده شده، فقط به خاطر تفکیک دو مؤلفه مذکور بوده و با معنای لغوی آنها مطابقت ندارد، زیرا در اینجا مؤلفه های مجازی نیز مانند مؤلفه های حقیقی دارای موجودیت می باشند. نسبت دامنه مؤلفه حقیقی میدان ثانویه $(H_s)_e$ به مؤلفه مجازی $(H_s)_{Im}$ آن به اختلاف فاز (ϕ) بستگی داشته $t_g \phi = \frac{(H_s)_e}{(H_s)_{Im}}$ و می توان از این نسبت به جای اختلاف فاز برای تشخیص توده های معدنی استفاده کرد. به این ترتیب برای اجسام مختلف، هرچه نسبت مذکور بزرگ تر باشد، رسانندگی جسم بیشتر است. اما آنچه که باید در این خصوص در نظر داشت این است که در عمل پارامترهای دیگری مانند وضعیت نقطه اندازه گیری نسبت به توده رسانا و فرکانس میدان اولیه نیز روی نسبت مذکور اثر می گذارند.

۳-۲-۱ پلاریزاسیون (قطبش) بیضی وار

دستگاه های گیرنده در مطالعات EM میدان های ثانویه حاصل از توده های مورد تجسس به اضافه میدان اولیه را اندازه گیری می کنند. این میدان که ترکیبی از میدان های اولیه و ثانویه می باشد، یک میدان مغناطیسی است که به صورت بیضی پلاریزه شده که رابطه آن در زیر آمده است. میدان های اولیه و ثانویه را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$H_p = A \sin \omega t, \quad H_s = B \cos(\omega t - \phi)$$

که در آن: A و B توابعی از وضعیت فرستنده، توده رسانا و گیرنده می باشند، با بسط $\cos(\omega t - \phi)$ داریم:

$$\cos(\omega t - \phi) = \cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi = (\sqrt{1 - H_p^2 / A^2}) \cos \phi + \frac{H_p}{A} \sin \phi = \frac{H_s}{B}$$

با مجذور کردن رابطه بالا، پس از ساده کردن آن داریم:

$$\frac{H_p^2}{A^2} + \frac{H_s^2}{B^2} - \frac{2 H_s H_p \sin \phi}{AB} = \cos^2 \phi$$

و

$$\frac{H_p^2}{A^2 \cos^2 \phi} + \frac{H_s^2}{B^2 \cos^2 \phi} - \frac{2 H_p H_s \sin \phi}{AB \cos^2 \phi} = 1$$

1 - Imaginary

2 - Out of Phase

معادله بالا، معادله یک بیضی است. برای به دست آوردن این معادله، دو فرض ساده کننده در نظر گرفته شده است، اول اینکه H_p و H_s برهم عمودند، دوم اینکه H_s تنها از جریان واقع در یک رسانا به وجود آمده است. بیضی قطبش می تواند در هر سطح فضایی قرار گیرد، گرچه این سطح معمولاً از امتداد افقی یا قائم فقط مقدار کمی انحراف دارد، زیرا در اینجا قطر بزرگ بیضی بر H_p منطبق است که در عمل از H_s خیلی بزرگ تر می باشد و چون میدان اولیه (H_p) به صورت افقی یا قائم انتخاب می شود، بنابراین بردار متوجه به میدان اولیه نزدیک تر بوده و از امتداد آن به طور تقریب تبعیت می کند.

دو حالت خاص و مهم که قبلاً نیز گفته شد، در اینجا وجود دارد:
- وقتی $\varphi = 90^\circ$ باشد، معادله بیضی داده شده، به صورت زیر در می آید:

$$B^2 H_p^2 + A^2 H_s^2 - 2AB H_p H_s = 0$$

9

$$\left(\frac{H_p}{A} - \frac{H_s}{B} \right)^2 = 0 \Rightarrow \frac{H_p}{A} = \frac{H_s}{B} \Rightarrow H_s = \frac{B}{A} H_p \quad (H_s \text{ ثابت و } H_p \text{ متغیر است.})$$

رابطه بالا، بیانگر خطی است که از مرکز مختصات می گذرد و ضریب زاویه آن B/A است. این حالت ($\varphi = 90^\circ$) همان طور که قبلاً گفته شد، مشخص کننده وجود یک رسانای بسیار خوب در زیر سطح می باشد. وقتی $\varphi = 0^\circ$ باشد، رابطه بیضی به این صورت تبدیل می شود:

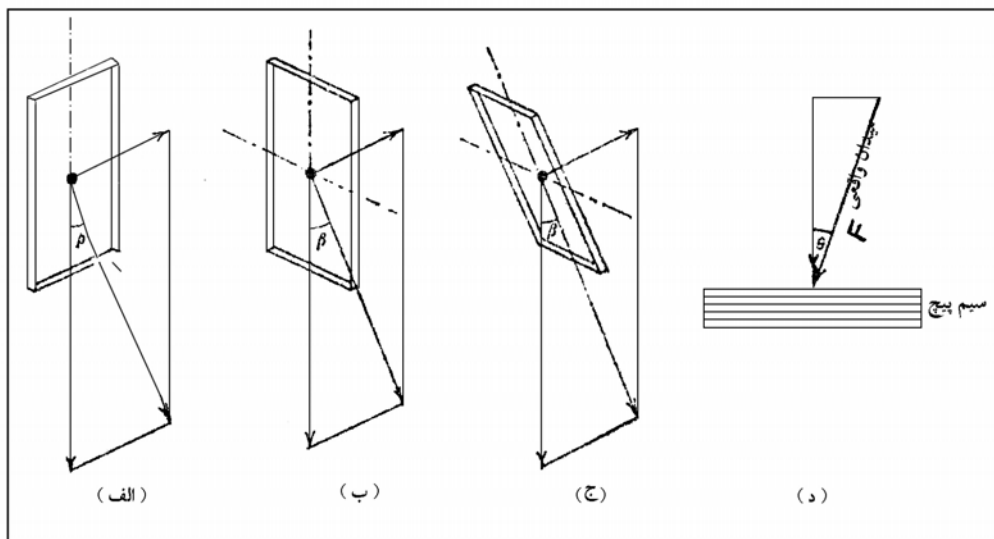
$$\frac{H_p^2}{A^2} + \frac{H_s^2}{B^2} = 1$$

این وضعیت ($\varphi = 0^\circ$)، نشانگر وجود یک جسم مقاوم در زیر سطح می باشد.

۱-۲-۴ تعیین سطح پلاریزاسیون (قطبش)

برای تعیین سطح پلاریزاسیون از سیم پیچی به نام سیم پیچ تجسس که از پیچیدن چند صد دور سیم مسی به دور قاب چهارگوش یا دایره شکل تشکیل شده، استفاده می شود. ابتدا و انتهای سیم به واسطه یک تقویت کننده، به یک جفت گوشی و یا وسیله دیگر برای تشخیص جریان متناوب وصل شده است. سیم پیچ روی یک پایه مناسب، طوری قرار می گیرد که قابلیت چرخش حول محور قائم و افقی را دارا بوده و به این ترتیب می تواند تمام وضعیت های موجود در فضا را اختیار کند. پتانسیلی که در این سیم پیچ القا می شود، متناسب با مؤلفه میدان الکترومغناطیسی در جهت عمود بر سطح سیم پیچ می باشد. بنابراین برای میدانی که با خط عمود بر سیم پیچ زاویه θ بسازد، پتانسیل القایی در سیم پیچ متناسب است با $\cos \theta$ (شکل ۱-۱۳-د).

درحالتی که سطح سیم پیچ در یک میدان اولیه به چرخش درآید، وقتی سطح سیم پیچ عمود بر بردار میدان اولیه باشد، اختلاف پتانسیل حاصل ماکزیمم و اگر بردار میدان اولیه موازی سطح سیم پیچ باشد، اختلاف پتانسیل صفر بوده و در گوسی‌ها صدایی شنیده نمی‌شود.



شکل ۱-۱۳- توجیه سیم پیچ تجسس برای به دست آوردن سطح بیضوی

حال در صورتی که در یک میدان اولیه و در غیاب یک توده رسانا، یکی از قطره‌های سیم پیچ منطبق بر بردار میدان اولیه باشد، با چرخش سیم پیچ حول محور مذکور، خطوط میدان اولیه همواره در سطح سیم پیچ قرار داشته و در نتیجه جریانی در آن القا نخواهد شد.

وقتی که در زیر سطح زمین، یک توده رسانا وجود داشته باشد، همان‌طور که گفته شد، پلاریزاسیون میدان منتجه به صورت بیضوی بوده و فقط یک وضعیت وجود دارد که در آن، پتانسیل در سیم پیچ تجسس صفر می‌شود. در این صورت، سطح سیم پیچ تجسس، با سطح بیضوی پلاریزاسیون منطبق است.

در عمل، برای تعیین سطح پلاریزاسیون، ابتدا سیم پیچ تجسس را آنقدر حول قائم می‌چرخانند تا سیگنال موجود به حداقل خود برسد. پس از آن، سیم پیچ را نسبت به سمت قبلی ۹۰ درجه چرخانده، سپس آنقدر آنرا حول محور افقی می‌چرخانند تا وضعیت می‌نیمم (صفر) به دست آید (شکل ۱-۱۳- الف و ب و ج). پس، سطح سیم پیچ تجسس بر سطح پلاریزاسیون منطبق است.

با انجام عملیات بالا، گرچه سطح پلاریزاسیون مشخص می‌شود، ولی وضعیت بیضی در سطح پلاریزاسیون نامشخص است. به همین منظور، لازم است زاویه کجی^۱ محور بزرگ یا کوچک بیضی معلوم شود. برای این کار، سیم‌پیچ تجسس را در جهت عمود بر سطح خاموشی قرار داده و آن قدر می‌چرخانند تا مثلاً سیگنال ماکزیمم به دست آید، در این حال، خط عمود بر سطح سیم‌پیچ تجسس امتداد محور بزرگ بیضی پلاریزاسیون را مشخص می‌کند.

۱-۲-۵ عمق نفوذ تابش EM

یکی از مزایای اولیه در مطالعه EM عبارت است از عمق نفوذ تابش EM و قدرت تفکیک، که تابعی از عمق می‌باشد. در یک محیط مقاوم همسانگرد، امواج EM به صورت نامشخص حرکت می‌کنند. با این حال، در عمل که رساناهای سطحی قابل ملاحظه می‌باشند، عمق نفوذ غالباً بسیار محدود است. عمق نفوذ در ابعاد وسیع تابعی از فرکانس و رسانایی و محیطی است که تابش EM از آن عبور می‌کند. در فرکانس‌های معمول ($< 5\text{KHZ}$) که در اکتشاف EM مورد استفاده قرار می‌گیرد (به استثناء رادار نفوذی زمین) اثرات تضعیف تقریباً قابل چشم‌پوشی است اما افت سیگنال از طریق پخش اتفاق می‌افتد. یک راهنمایی رایج در مورد عمق نفوذ به عنوان عمق پوست (شریف^۲ ۱۹۹۱) بدین صورت تعریف شده است: عمقی که در آن دامنه یک موج تخت نسبت به دامنه A_0 به اندازه $1/e$ یا ۳۷٪ کاهش می‌یابد.

تعریف ریاضی عمق پوست به شرح زیر می‌باشد:

دامنه تابش EM به صورت تابعی از عمق (Z) نسبت به دامنه اصلی A_0 به صورت زیر است:

$$A_z = A_0 e^{-1}$$

عمق پوست δ (برحسب متر) عبارت است از:

$$\delta = \frac{1}{(2/\omega\sigma\mu)^2} = 503 (f\sigma)^{-1/2}$$

که در آن: $\omega = 2\pi f$ ، f فرکانس برحسب هرتز، σ رسانندگی برحسب S/m و μ تراوایی مغناطیسی (معمولاً معادل یک). در عمق $\delta/5$ تقریبی، یک هادی می‌تواند بی‌هنجاری EM قابل آشکارسازی را ایجاد کند. با داشتن یک فرکانس معلوم برای یک سیستم‌دستگاه مخصوص، آن چیزی که مشخص نیست تغییرات قائم رسانندگی نسبت به عمق خواهد بود. سازندگان دستگاه‌های مختلف، معمولاً عمق مؤثر نفوذ دستگاه‌های خود را عرضه می‌کنند؛ به عنوان مثال شرکت ژئونیکس، عمق نفوذ سیستم‌های FEM (38/EM31/EM34) را به صورت تابعی از فاصله بین پیچ‌ها ارائه می‌دهد.

1 - Tilt & dip angle

2 - Sheriff

۱-۳-۱ سابقه

نخستین سیستم هوابرد شناخته شده (AEM)EM توسط هانس لوندبرگ^۱، در سال ۱۹۴۶ و اولین بار در کانادای شرقی ابداع شد. این سیستم، از دو پیچه تشکیل شده بود که درون کابین هلیکوپتری نصب می‌شد؛ اگر هدف آشکارسازی یک رسانا بود، باید در ارتفاع ۵ متری بالای سطح زمین پرواز می‌کرد. تاریخچه‌ای تفصیلی از توسعه EM هوابرد توسط پمبرتون^۲ (۱۹۶۲)، کولت^۳ (۱۹۸۶)، بکر و همکاران^۴ (۱۹۹۰)، پالاکی^۵ (۱۹۸۶) و وست^۶ (۱۹۹۱) ارائه شده است.

به دنبال اشتیاق اولیه برای AEM، در جستجو برای فلزهای پایه استراتژیک (مس، سرب، روی و نیکل) بسیاری از سیستم‌های هوابرد دیگر توسعه یافت. موفقیت‌آمیزترین سیستم در اواخر دهه ۱۹۵۰ توسعه یافته (بارینگر^۷ ۱۹۶۲)، با نام سیستم INPUT^۸ شناخته شد، و اصول اجرایی آن در شکل ۱-۱۴ آمده است. سپس در اواخر دهه ۱۹۷۰ برای دستیابی به عمق نفوذ بیشتر مورد نیاز در اکتشاف اورانیوم توسعه یافت و حال با نام QUESTEM (بررسی‌های کواستور^۹) و GEOTEM (شرکت ژئوترکس^{۱۰}) از آن استفاده شده است. توسعه بعدی در مورد این سیستم‌ها، در اواسط دهه ۱۹۸۰ با فرستنده قوی و فن‌آوری جدید رایانه انجام گرفت. در این زمان، سیستم دیگری با نام PROSPECT در دسترس قرارگرفت که معادل آن SPECTRUM در آفریقای جنوبی می‌باشد. از نوع سیستم‌های INPUT مربوط به AEM امروزه فقط SPECTRUM، GEOTEM و QUESTEM اجرا می‌شوند.

در اواخر سال ۱۹۷۰، استفاده از دو نوع دستگاه رایج شد: یکی برداشت‌های هلیکوپتری با تفکیک بالا با استفاده از سوندهای دستگاهی که به دنبال هلیکوپتر بسته می‌شد و به‌ویژه برای کارهایی با عمق نفوذ بیشتر به‌کار می‌رفت و دیگری سیستم‌های با بال ثابت بود که از میله‌های صلب که روی نوک بال‌ها نصب شده زائده‌ای که روی بال‌هاست که روی جعبه فیزولیک یا روی دماغ یا دم هواپیما سوار می‌شود (شکل ۱-۱۵).

1 - Huns Lundberg

2 - Pemberton

3 - Collett

4 - Becker et al

5 - Palacky

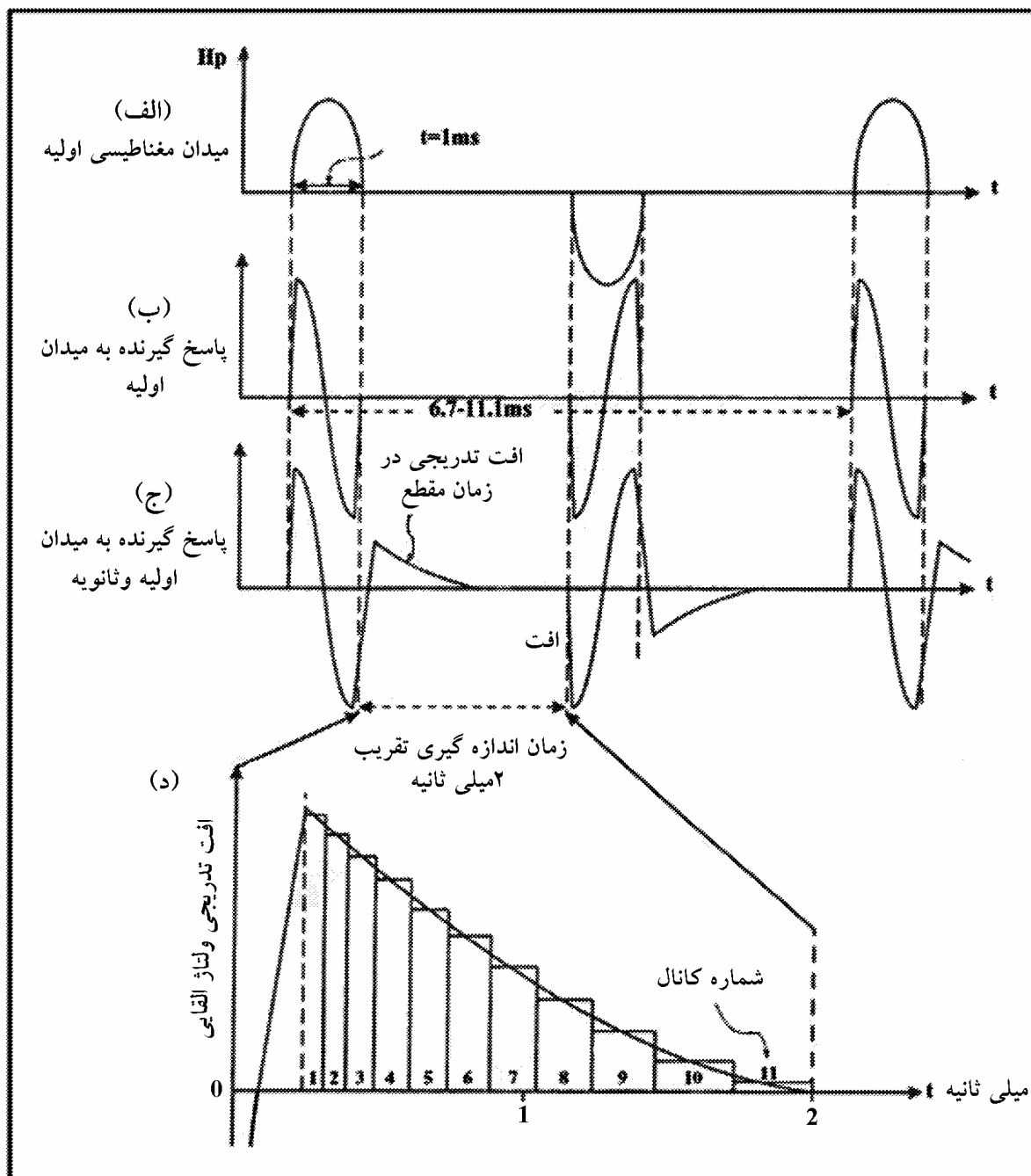
6 - West

7 - Barringer

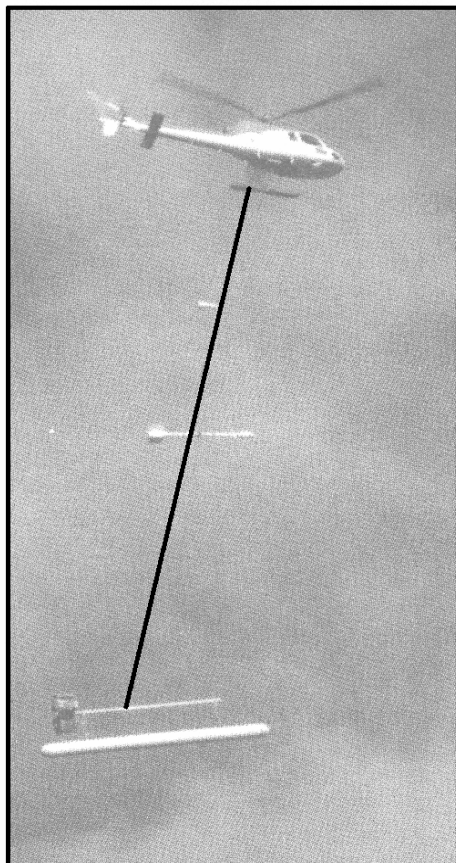
8 - Induced Pulse Transient

9 - Questor

10 - Geotrex



شکل ۱-۱۴- سیستم INPUT TEM برای هوابرد EM (الف) میدان مغناطیسی اولیه که پاسخ گیرنده را تحریک می کند، (ب) پاسخ اندازه گیری شده گیرنده توسط یک عنصر اصلاح می شود، (ج) این عنصر تابعی از خواص زمین است. منحنی افت تدریجی (د) در فواصل زمانی طراحی شده نمونه گیری شده است.



(A)



شکل ۱-۱۵- (الف) یوروکوپتر AS۵۰B در حال یدک‌کشی سه‌عدد سه‌پایه ابزاری. این سه‌پایه‌ها از بالا به پایین برای دستگاه VLF-EM دو کاناله، مغناطیس‌سنج سزیوم^۱ میدان کل، و یک سیستم الکترومغناطیس القایی ۵ فرکانسی می‌باشند. (ب) سسنا^۲ ۴۰۴ با مغناطیس میدان کلی نصب شده در انتهای دم هواپیما

1 - Caesium

2 - Cessna

کاربردهای مطالعه AEM (به استثناء رادار نفوذی زمین) علاوه بر اکتشافات فلز پایه، برای سایر اکتشافات در اواخر سال ۱۹۶۰ با بررسی‌های آب زیرزمینی شروع شد. سپس در دهه ۱۹۷۰ به شکل‌های دیگر از قبیل نقشه‌برداری زمین‌شناختی و اکتشاف کیمبرلیت^۱ در آفریقای جنوبی ادامه یافت. در دهه ۱۹۸۰، برای به نقشه‌درآوردن نهشته‌های کواترنری^۲ در فرانسه، اکتشاف زغال‌سنگ و لینی^۳، آشکارسازی کانال‌های قدیمی، به نقشه‌درآوردن درجه شوری در استرالیا، عمق ژرفاسنجی آب‌های کم‌عمق و تعیین ضخامت یخ‌های دریایی در آمریکا نیز ادامه یافت. جزئیات بیشتر گستره کاربردهای AEM را می‌توان در مجموعه مقالاتی یافت که توسط پالاکی (۱۹۸۶) و فیتزمن (۱۹۹۰) ویرایش شده است. رادار نفوذی زمین به شکل پژواک رادیویی، با استفاده از هواپیما در مناطق قطبی و برای بررسی تخته‌های یخی بزرگ تا آخر دهه ۱۹۵۰ به کار برده شد. این وسیله در عرض جغرافیایی پایین روی یخچال‌ها به کار برده شده است.

۱-۳-۲ سیستم‌های AEM

اصول کلی مطالعه هوابرد EM در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده است. روی هواپیما، فرستنده‌ای قوی به‌منظور ایجاد میدان اولیه در سیستم‌های فعال نصب شده است. در این سیستم، یک گیرنده قرارداد که یا در داخل دستگاهی به‌نام پرنده در زیر هواپیما یدک‌کشی می‌شود یا در قسمت دیگری از هواپیما قرار دارد. متداول‌ترین سیستم‌ها از هلیکوپتر استفاده می‌کنند زیرا می‌تواند به سادگی در ارتفاع پایین پرواز کند و دارای قابلیت مانور بیشتر از هواپیماها دارای بال ثابت می‌باشد.

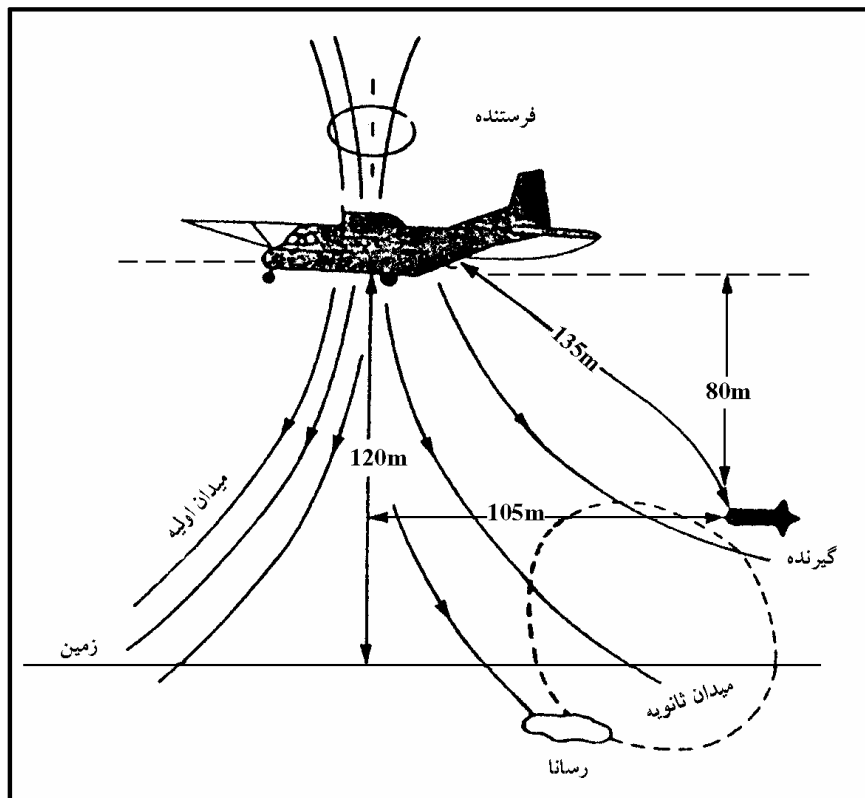
آرایش‌های مختلف سیستم‌های AEM در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است. دو نوع آرایش فرستنده و گیرنده وجود دارد که توسط سیستم‌های ثابت کشیده می‌شود؛ یکی به‌نام دنباله‌رو و دیگری سیستم‌ها میله صلب می‌باشد. در برخی از آرایش‌های هلیکوپتری، فرستنده و گیرنده هر دو در یک دستگاه نصب است که زیر هواپیما به‌صورت معلق می‌باشد.

۱-۴ بررسی EM دریابرد

۱-۴-۱ سابقه

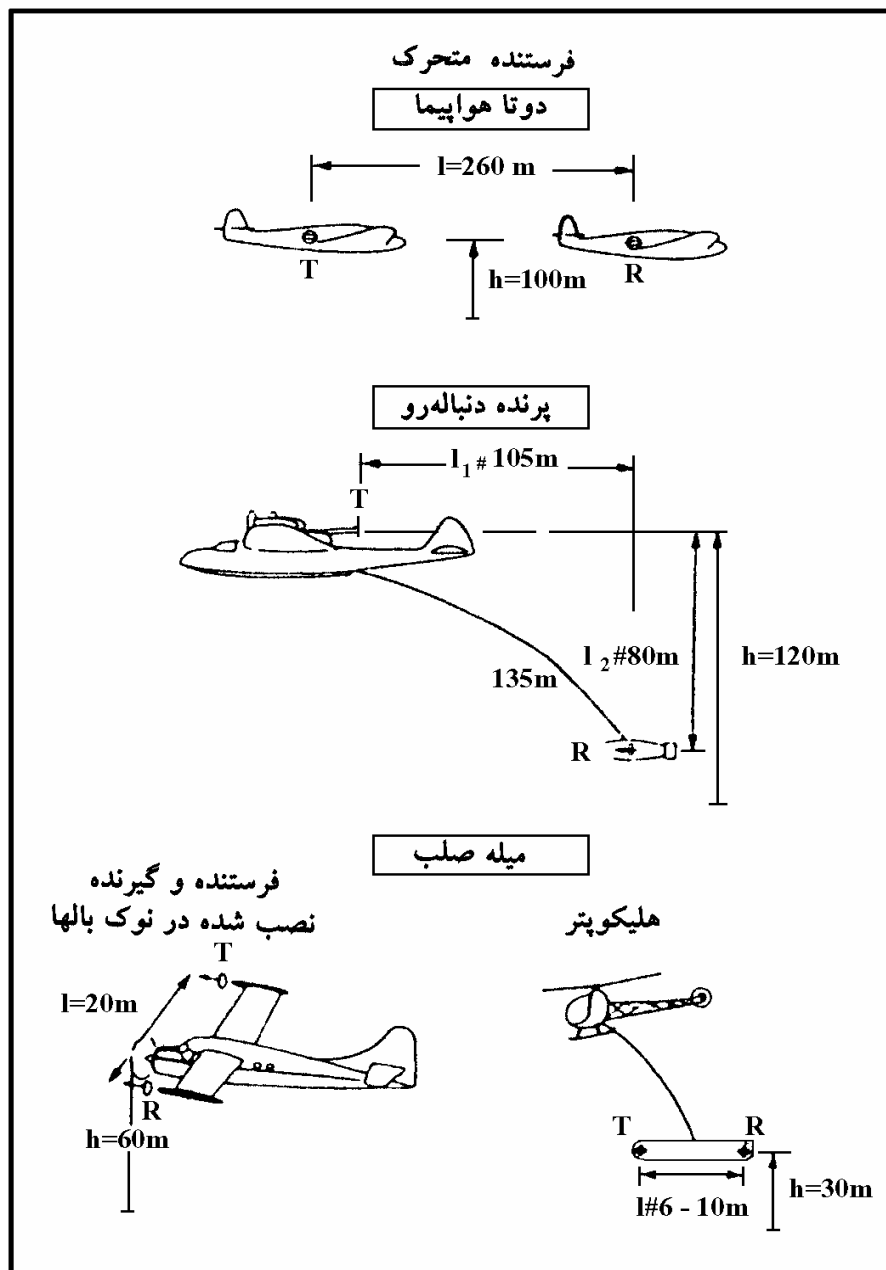
اختلاف اصلی کاربرد الکترومغناطیس هوابرد و دریابرد، بیشتر در مقیاس فاصله‌ها است. درحالی که مطالعه هوابرد ممکن است در ارتفاع پرواز چنده تا صدها متر با فاصله فرستنده و گیرنده ۱۳۵-۲۰ متر صورت پذیرد، در سیستم‌های دریابرد ممکن است این فاصله به ده‌ها کیلومتر برسد. به‌کارگیری سیستم‌های الکترومغناطیس، معمولاً برای تحقیقات پوسته در بزرگ مقیاس بوده و نیز به مجموعه دستگاه‌های ویژه نیازمند است. نمونه‌های محدودی وجود دارد که از سیستم‌های EM زمینی مانند EM^{۳۴} ژئونیکس که روی قایق‌های لاستیکی بادی سوار شده استفاده می‌شود. جهت تحقیقات مهندسی این قایق‌ها روی دریاچه‌ها و رودخانه‌های کم‌عمق با آب شیرین کشیده می‌شوند.

1 - Kimberlites
2 - Quaternary
3 - Lignite



شکل ۱-۱۶- اصول برداشت الکترومغناطیس هوابرد. سیستم نشان داده شده از نوع پرنده دنباله‌رو است.

روش‌های اصلی که متداول شده‌اند، برای استفاده از محیط‌های دریایی عبارتند از سیستم‌های مگنتوتلوریک، مقاومت ویژه مغناطیس‌سنجی و سیستم‌های فرکانس حوزه‌ای و زمان حوزه‌ای. عامل نامساعد در تمام سونداژزنی EM دریایی این است که آب دریا به‌طور شدیدی رسانا بوده و رسانندگی آن خیلی بیشتر از مواد زمین‌شناختی کف یا زیرکف دریا می‌باشد. رسانندگی آب دریا به‌شدت به شوری و دمای آب وابسته می‌باشد. رسوبات فوقانی کف اقیانوس‌ها به‌طور کامل از آب اشباع شده و دارای رسانندگی از 0.1 تا 1 S/m می‌باشد. با افزایش سنگ‌شدگی و میان‌زایی (دیاژنز) که تخلخل‌های درجا را کاهش می‌دهند، این مقادیر نیز کاهش می‌یابند. پوسته بازالتی و گوشته بالایی پریدوتیتی دارای گستره رسانندگی بین 0.1 S/m در قاعده رسوبات پوشاننده تا 10^3 بار کمتر در عمق حدود ۱۰ کیلومتری می‌باشد.



شکل ۱-۱۷- آرایش فرستنده- گیرنده از پنج نوع سیستم‌های هوابرد EM

۱-۴-۲ جزئیات سیستم‌های EM دریایی

۱-۴-۲-۱ روش‌های مگنتوتلوریک (MT)

همه کارهای MT دریایی به خصوص برای تخمین سنگ کره (لیتوسفر)^۱ عمیق و مذاب کره (استنوسفر)^۲ به کار برده شده تا مدل ساختاری EM قائم تا عمق صدها کیلومتر به دست آید. روش MT امروز تنها روش ژئوفیزیکی است که می‌تواند اطلاعات مربوط به خواص الکتریکی در اعماق بیش از ۳۰ کیلومتر را به دست دهد.

تنها دستگاه تجارتي برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی، سنسورهای فلاکس گیت مغناطیسی^۳ هستند که با حساسیت‌های حدود ۰/۵ تا ۱ nT قابل دسترسی می‌باشند. این سنسورها، مستقیماً روی کف دریا قرار می‌گیرند.

دو نوع دستگاه برای اندازه‌گیری مؤلفه الکتریکی وجود دارد:

الف) دستگاه‌هایی با سیم بلند (ب) پل‌های نمکی کوتاه بازو

دستگاه‌های با سیم بلند، از یک سیم عایق‌بندی شده تشکیل شده است که نوعاً ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر طول داشته و الکترودهای g-AgCl به دوسر آن و به دستگاه نگاشت‌بردار وصل می‌باشند. دستگاه پل بازو کوتاه از الکترودهایی با فاصله الکترودی فقط چندمتر و پل‌های نمکی تشکیل شده‌اند؛ هرپل نمکی شامل یک‌لوله توخالی است که یک‌طرف آن به الکتروده Ag-AgCl و طرف دیگر آن به آب دریا وصل می‌گردد. کل دستگاه الکتریکی چهار بازو دارد (پل‌های نمکی و الکترودها) که به‌صورت یک چلیپای افقی قرار گرفته‌اند. این چلیپا، به طور کامل روی یک استوانه قائم که شامل دستگاه‌های ثابت می‌باشد قرار گرفته است. کف این استوانه روی یک سه‌پایه قابل جابجایی قرار گرفته که وقتی به کف دریا فرستاده می‌شود، در تماس با بستر دریا قرار می‌گیرد. هنگامی که اندازه‌گیری‌ها تکمیل شد، مجموعه‌ای که شامل پل‌های افقی است، از سه‌پایه جدا شده و به آرامی برای ادامه کار به بالا کشیده می‌شود.

۱-۴-۲-۲ روش‌های EM با منبع کنترل شده

سیستم‌های EM با منبع کنترل شده، از منابع دو قطبی متغیر الکتریکی و مغناطیسی که دارای هندسه مشخصی برای القای جریان‌های الکتریکی در محیط‌های رسانای داخل زمین می‌باشند استفاده می‌کنند. ویژگی مغناطیسی یا الکتریکی جریان‌های القاء شده را می‌توان تعیین کرد که از آنجا تخمین‌هایی از ساختار رسانندگی الکتریکی مواد زمین‌شناسی مورد نظر مشخص می‌گردد. چهار نوع اصلی منبع - گیرنده وجود دارد ولی می‌توان ترکیب‌های مختلفی را برشمرد. این چهار نوع عبارتند از: دوقطبی‌های الکتریکی قائم و افقی (به ترتیب VED و HED) و دوقطبی‌های مغناطیسی قائم و افقی (HMD, VMD).

برعکس دستگاه‌های مستقر در زمین، در سیستم‌های با منبع کنترل شده EM دریایی، فرستنده و گیرنده در محیط هادی الکتریکی قرار می‌گیرند و ساختار الکتریکی، هم در آب دریا و هم مواد بستر دریا روی کل القاء دریافت شده تاثیر می‌گذارند و

1 - Lithosphere
2 - Asthenosphere
3 - Fluxgate magnetic

بنابراین باید در تفسیرهای مدل‌سازی مورد توجه قرار گیرد. در مواردی که با آب‌های کم‌عمق سروکار داریم، مثل فلات‌های قاره، سطح مشترک تماس هوا و آب (سطح آب) نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

در اینجا، اولین آنها سیستم دوقطبی الکتریکی افقی HED زیردریایی فرکانس حوزه‌ای است که توسط انستیتو اقیانوس نگاری اسکریپز^۱، برای سونداژزنی عمیق سنگ کره اقیانوسی به کار می‌رود. منبع با یک سیم ۱-۵/۰ کیلومتری عایق‌بندی شده است که انتهای آن به الکترودهای فولادی ضدزنگ به طول ۱۵ متر متصل است. گیرنده‌هایی که برای ردیابی میدان الکتریکی افقی به کار می‌روند، به فاصله ۲۰۰-۱ کیلومتر از منبع در روی کف دریا قرار می‌گیرند. دونوع گیرنده الکتریکی وجود دارد (شکل ۱-۱۸):

ثبت‌کننده میدان الکتریکی (ELF) که آزادانه در کف دریا قرار می‌گیرد، و شامل یک جفت آنتن عمودبرهم صلب^۲ ۹ متری می‌باشد و به انتهای آنها الکترودهای Ag-AgCl متصل شده‌اند. گیرنده‌های ELF در فاصله بین ۲۰-۵ کیلومتر از فرستنده قرار می‌گیرند.

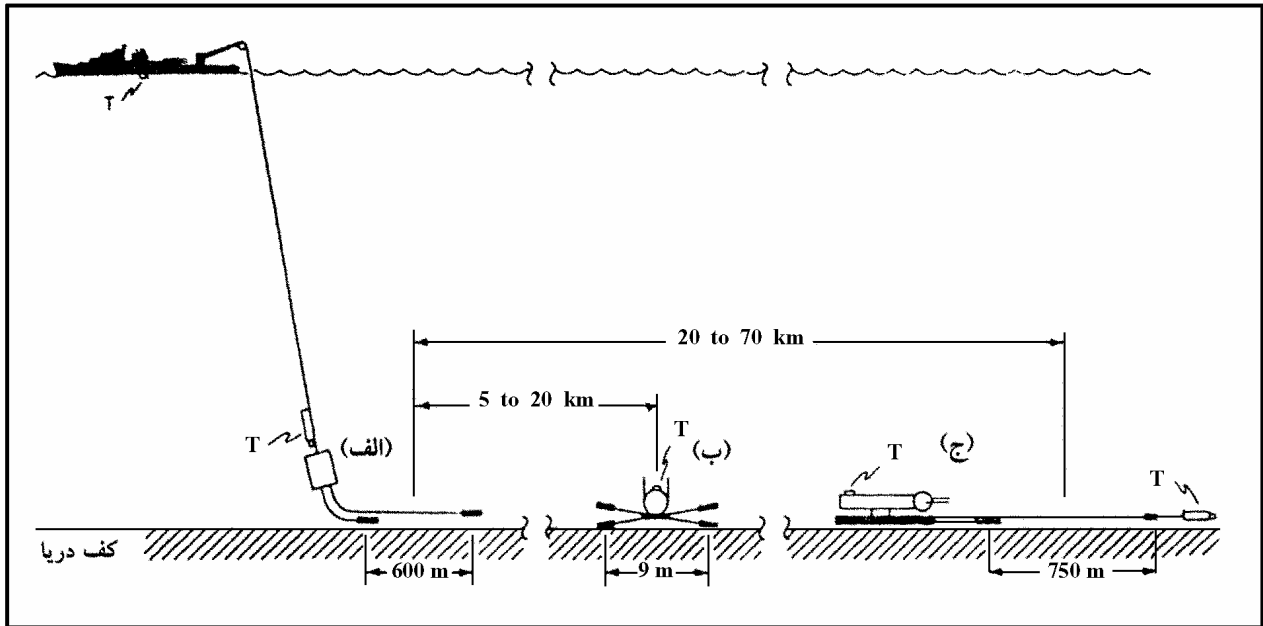
ثبت‌کننده آنتن بلند EM (LEM) شامل یک سیم مسی عایق‌بندی شده به طول ۳۰۰-۲۰۰ متر که به انتهای آن الکترودهای Ag-AgCl متصل می‌شوند. ثبت‌کننده‌های LEM، در فاصله‌های تا ۱۰۰ کیلومتر یا بیشتر از منبع قرار داده می‌شوند.

دومین سیستم اصلی نیز، فرکانس حوزه‌ای است که به وسیله اسکریپز، برای استفاده در روی فلات قاره‌های کم عمق (شکل ۱-۱۹) ساخته شده‌اند. آرایه فرستنده، از دو تیوپ مسی به درازای ۷ متر و قطر ۷ سانتی‌متر ساخته شده است که به یک سیم ۵۰ متری متصل شده و انرژی آنها مستقیماً توسط کشتی مطالعاتی تامین می‌شود. آرایه گیرنده شامل یک رشته الکترودهای Ag-AgCl در امتداد کابلی به طول چندصد متر است که تمام آنها در تماس با بستر دریا قرار دارند. در انتهای جلویی گیرنده، یک دستگاه ثبت‌کننده قرار دارد که به شناور فرستنده رادیویی متصل است. شناور، به وسیله طنابی شناور به کشتی متصل است، که می‌توان طول این طناب را برای تغییر فاصله بین فرستنده و گیرنده تغییر داد. هدف از فرستنده رادیویی سطحی این است که می‌توان زمان حقیقی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط واحد ثبات غوطه‌ور را رله کرد. در ضمن گیرنده، اطلاعات را مستقیماً روی یک نوار مستقر در روی کشتی ذخیره می‌کند.

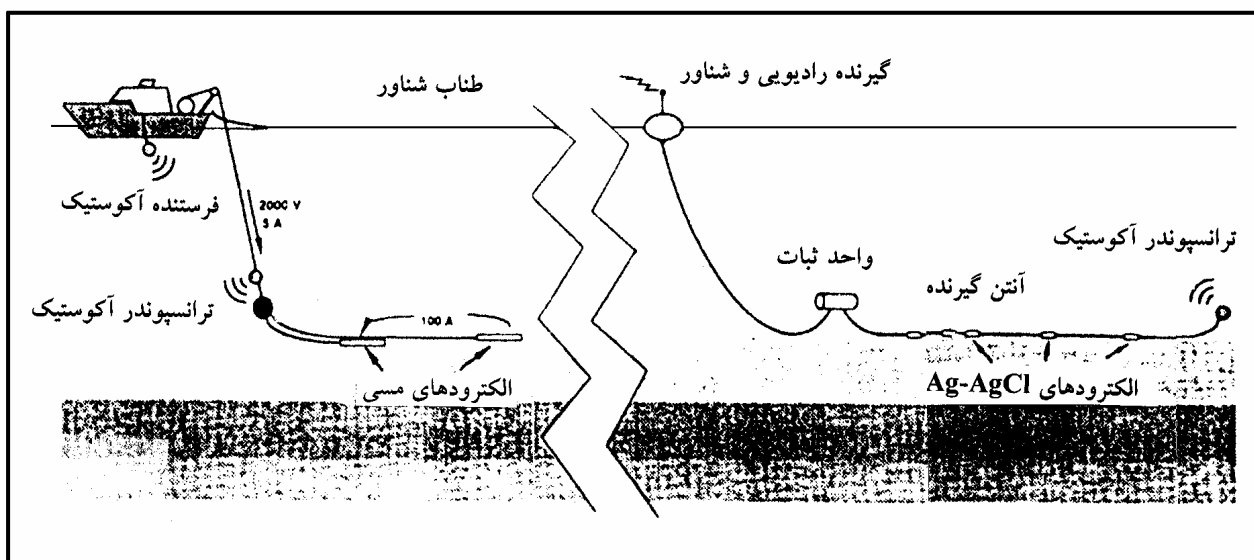
سومین سیستم، سیستم دوقطبی افقی مغناطیسی زمان حوزه‌ای (HMD) (شکل ۱-۲۰) می‌باشد که توسط دانشگاه تورنتو در کانادا ساخته شده است. فرستنده شامل یک استوانه پشم‌شیشه به طول ۲ و به قطر ۱ متر می‌باشد. داخلی این استوانه، صد دورسیم به‌طور یکنواخت جاداده شده است. جریان فرستنده از دو باتری ماشین که در کشتی مطالعاتی قرار دارد تامین می‌شود. جهت جریان هر ۵ میلی‌ثانیه یک‌بار برای ایجاد سیگنال EM گذرا عوض می‌شود. گیرنده شامل یک پیچه دارای مغزه آهنی است که در یک تیوپ پلی‌کربنات قرار داده شده و ۵۰ متر عقب‌تر از فرستنده کشیده می‌شود. کل آرایه فرستنده - گیرنده در بستر دریا قرار داده می‌شود و در طول ۹۰ ثانیه اندازه‌گیری ثابت نگه داشته می‌شود.

1 - Scripps

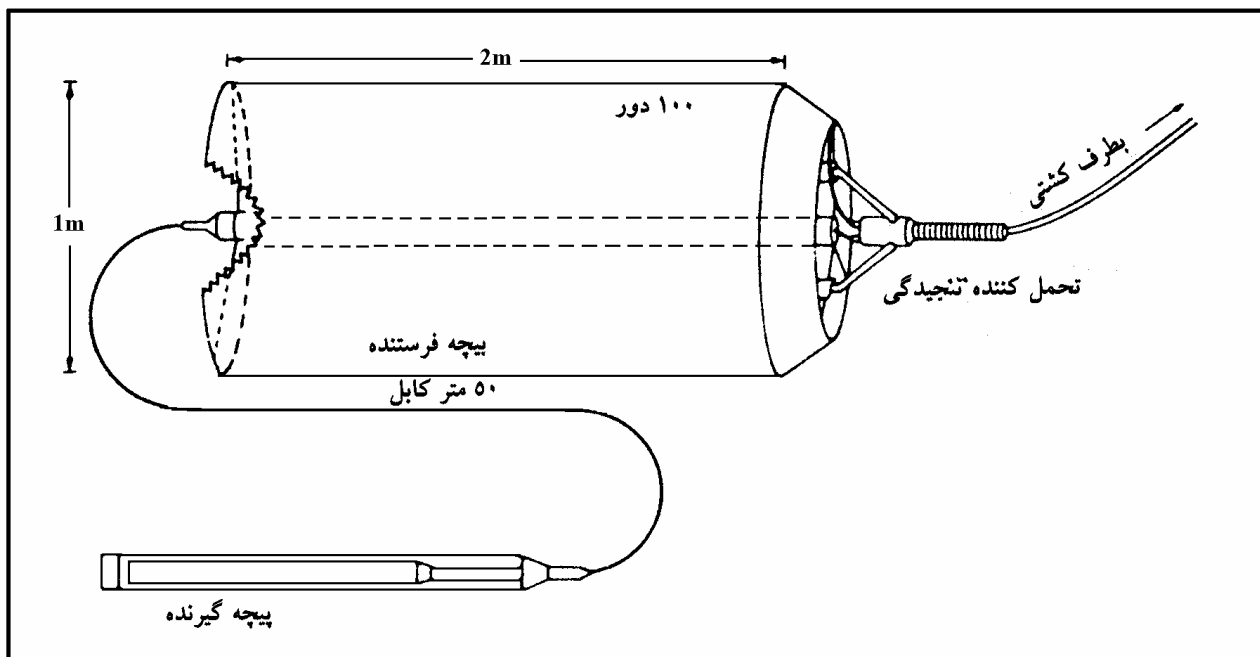
2 - Rigid



شکل ۱-۱۸- آرایش نوعی دوقطبی الکتریکی افقی (HED) برای آزمایش سونداژزنی عمیق؛ نیروی برق از منبع سطحی (مثلاً کشتی) به فرستنده در کف دریا منتقل می‌شود (الف) از طریق یک رسانای تک که برگشت آن از طریق آب دریاست. فرستنده متشکل از آنتن عایق‌بندی شده (با انتهای لخت) با حدود ۶۰۰ متر طول می‌باشد. گیرنده‌ها در گستره‌ای بین ۵ تا بیش از ۷۰ کیلومتر از فرستنده قرار دارند. گیرنده‌ها ممکن است به دو طریق باشند، (ب) یک نگاشت‌بردار میدان الکتریک (ELF) با یک جفت آنتن عمودبرهم به فاصله ۹ متر، (ج) یک نگاشت‌بردار EM با آنتن بلند (LEM)، که پتانسیل دو انتهای سیم مسی به فاصله ۲۰۰-۳۰۰ متر عایق شده انجام می‌گیرد. ترانسپوندرهای^۱ آکوستیکی (T) برای تعیین محل وسایل کف دریا از داخل کشتی به کار برده می‌شوند.



شکل ۱-۱۹- شکل طرح‌وار (شماتیک) برای نشان دادن اجزای یک سیستم پروفیل‌زنی فرکانس حوزه‌ای که به دنبال کشتی کشیده می‌شود. آنتن منبع بلافاصله پشت کشتی تحقیقاتی کشیده شده و توسط ژنراتورهای کشتی تغذیه می‌شود. آنتن گیرنده در فاصله دورتر عقب کشتی و از یک شناور مجهز به رادیو کشیده می‌شود و شامل یک آرایه از الکترودهای Ag-AgCl می‌باشد. ترانسپوندرهای آکوستیکی برای تعیین محل به کار می‌روند.

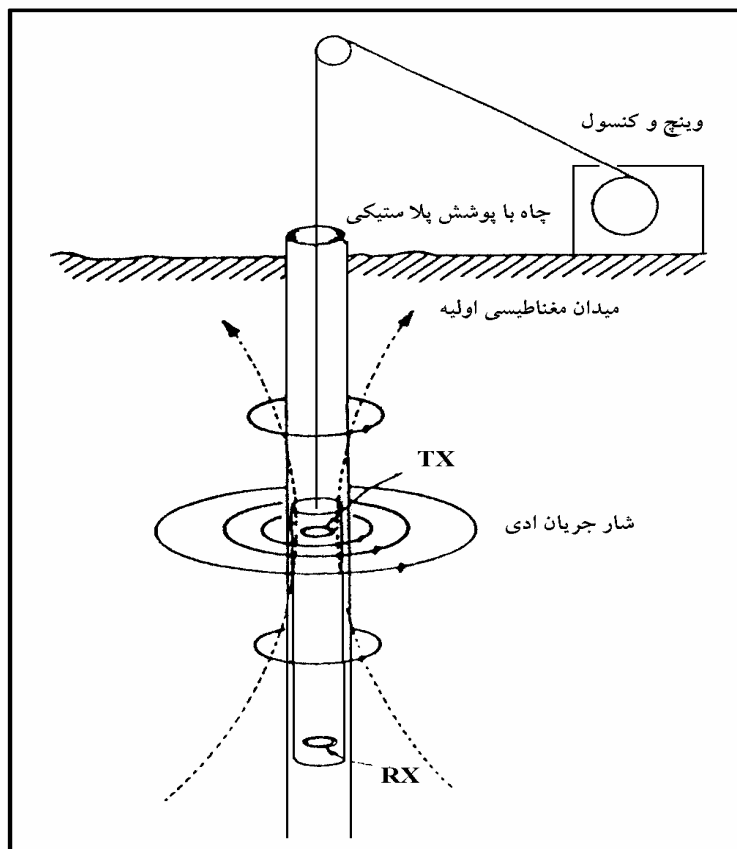


شکل ۱-۲۰- شکل طرح وار (شماتیک) از فرستنده دوقطبی مغناطیسی افقی (HMD) که توسط سیم به کشتی وصل شده است. گیرنده از یک پیچه که دور مغزه آهنی پیچیده شده تشکیل گردیده و در داخل یک غلاف پلاستیکی محفوظ و همه آنها در فاصله ۵۰ متری عقب فرستنده کشیده می شوند.

کشتی مطالعاتی می تواند با کاربرد کابل اضافی در دوره های اندازه گیری و جمع کردن کابل اضافی بین نقاط برداشت، به حرکت خود ادامه دهد. یک امتیاز این سیستم این است که آرایه منبع گیرنده، به طور نسبی کوچک بوده که به افزایش راحتی انجام کار نسبت به سیستم های فرکانس حوزه ای بزرگ تر و در نتیجه با قابلیت کنترل کمتر منجر می گردد. برای هریک از این سیستم ها، برای قابلیت کاربرد تجاری، راحتی کار عامل اصلی است که باید مورد ملاحظه قرار گیرد.

۵-۱ بررسی EM چاه آزمایشی

در حالی که سیستم های سطحی و هوا برد EM دارای شکل های هندسی منظمی از منبع ها و گیرنده ها هستند، افزودن بعد سوم با استفاده از چاه آزمایشی (گمانه) امکانات بیشتری در رابطه با پیچیدگی های تفسیر در اختیار می گذارد. بررسی چاه آزمایشی از طریق EM از روش چاه نگاری القایی که غالباً در صنایع هیدروکربن مورد استفاده است متفاوت می باشد. این موضوع، از اینجا ناشی می شود که برداشت های EM می تواند اجسام رسانای در فواصل زیاد و دور از چاه آزمایشی را آشکار سازی کند. یک وسیله نگاربرداری القایی، فقط ساختارهایی را که چاه آزمایشی واقعاً از آن عبور نموده و یا در اطراف میدان نزدیک چاه آزمایشی باشد احساس می نماید (شکل ۱-۲۱).



شکل ۱-۲۱- اصل اساسی در یک نگاربرداری الکترومغناطیسی، برای استفاده در یک چاه آزمایشی (گمانه)

اصل انجام کار مانند رسانندگی سنج‌های زمین است. سیستم می‌تواند رسانندگی مواد خارج از پوشش پلاستیکی چاه آزمایشی (گمانه) و یا چاهی با گستره قطرهای ۵ تا ۲۰ سانتی‌متر را اندازه‌گیری نماید. این اندازه‌گیری‌ها به سیال‌های معمولاً بسیار رساننده درون لوله‌ها غیرحساس می‌باشد (مک نیل و همکاران^۱ ۱۹۸۸). جریان‌های ادى به‌طور متحدالمرکز در اطراف چاه آزمایشی، با استفاده از فاصله بین پیچ‌های ۰/۵ متری القاء می‌گردند. این آرایش، یک قدرت قائم قابل قبولی را ایجاد نموده درعین حال گستره کافی از اشباع تجسس تداوم می‌یابد (مک نیل ۱۹۹۰). روش‌های درون‌چاهی EM توسط دیک^۲ (۱۹۹۱) مورد مرور واقع گردید. تفصیل بیشتر را در مرور مزبور می‌توان پیدا کرد.

سه‌نوع سیستم برداشت چاه آزمایشی وجود دارد:

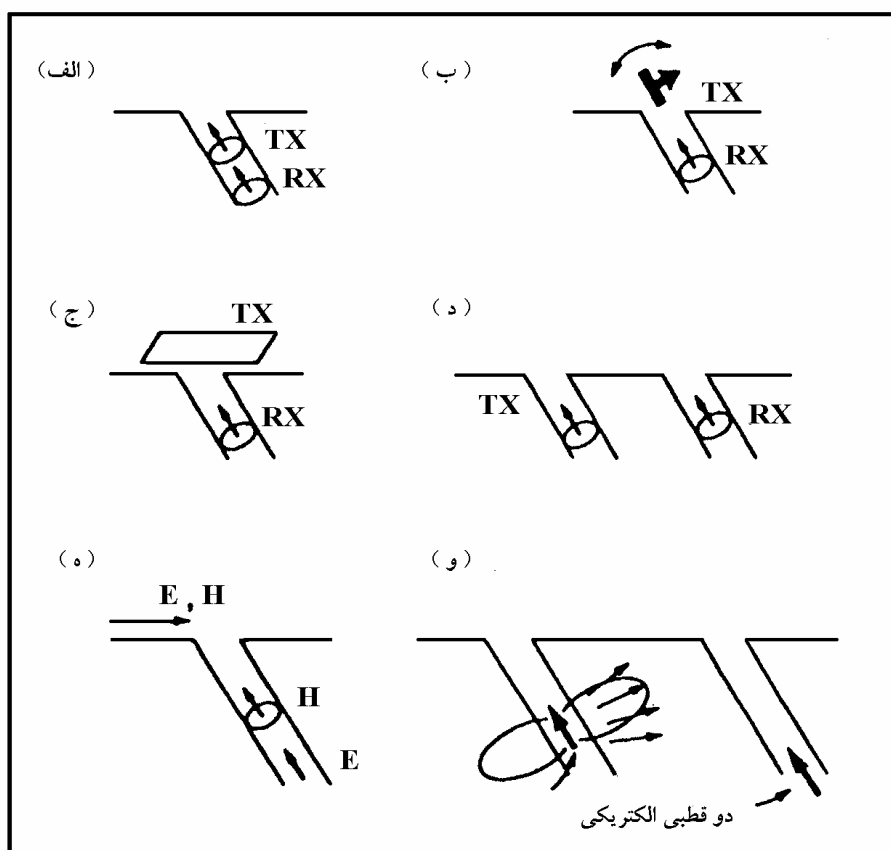
روش‌های EM دوقطبی - دوقطبی، EM با فرستنده قابل چرخش و EM دارای لوپ بزرگ (LLEM) که در بین آنها، مورد اخیر دارای متداول‌ترین استفاده در اکتشاف مواد معدنی است. هندسه‌های اساسی فرستنده - گیرنده در شکل ۱-۲۲ نشان داده شده است.

1 - Mc Neill et al

2 - Dyck

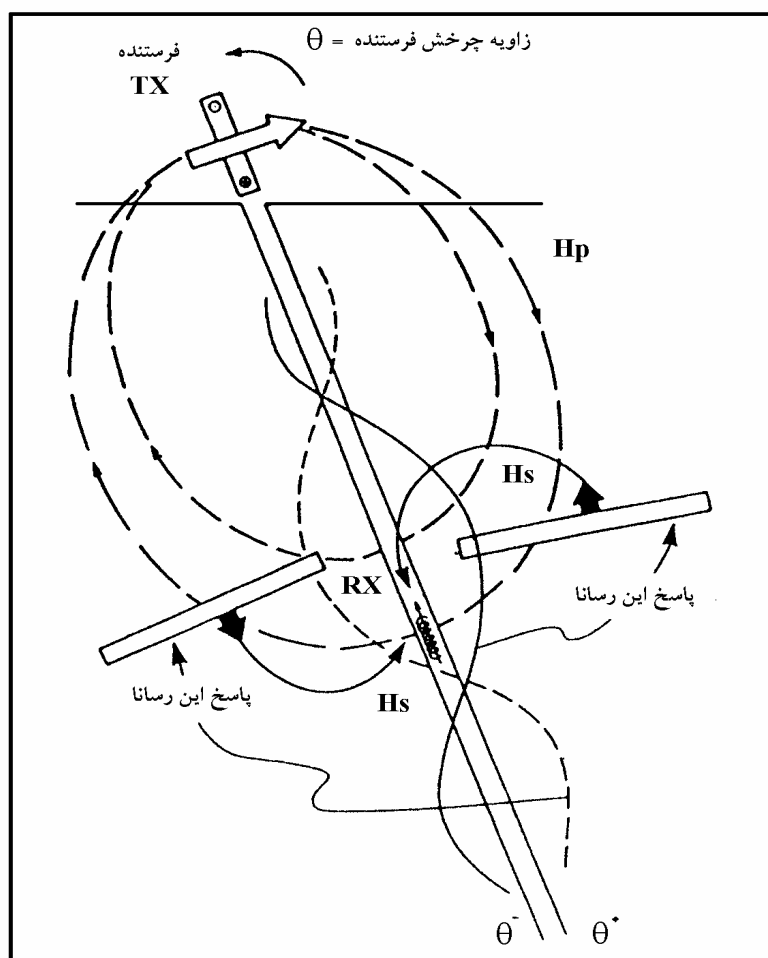
سیستم دوقطبی - دوقطبی دارای دو پیچه هم محور بوده که توسط میله‌های فیبر شیشه‌ای از یکدیگر جدا شده و در آن طرف پایین چاه فرستنده قبل از گیرنده قرار می‌گیرد. نقاط وسط بین فرستنده و گیرنده، به عنوان نقطه اندازه‌گیری در نظر گرفته می‌شود. مؤلفه‌های هم‌فاز و تریبیعی میدان مغناطیسی ثانویه، به عنوان درصدی از میدان اولیه اندازه‌گیری می‌شوند. وقتی سیستم درون چاهی در یک سری میله‌ها آرایش یافت، از این روش می‌توان در چاه‌های تقریباً افقی و دارای تمایل طرف بالادست استفاده نمود. بنابراین محدودیت فقط مربوط به توان حرکت دستگاه‌های درون چاه می‌باشد.

سیستم فرستنده دوار، یک نوع روش دوقطبی - دوقطبی است، اما در تمام طول برداشت، فرستنده در دهانه چاه باقی می‌ماند درحالی‌که گیرنده در درون چاه طرف بالا و پایین حرکت می‌کند (شکل ۱-۲۳). دستگاه گیرنده در درون چاه در بازه‌های چندمتری در زمان معین حرکت می‌کند. در هر نقطه اندازه‌گیری، پیچه فرستنده سطحی تا هنگامی می‌چرخد که یک نقطه صفر در سنسور فرا رسد و زاویه کجی مربوط به آن ثبت شود. این روش، قابل مقایسه با تکنیک زاویه کجی سطحی می‌باشد.



شکل ۱-۲۲- سیستم‌های EM درون چاهی

(الف) EM دوقطبی - دوقطبی (ب) EM با فرستنده قابل چرخش (با فرستنده Tx در کنار چاه) (ج) EM لوپ بزرگ (د) EM دوقطبی از چاه به چاه (ه) EM با فرستنده دور (مثال VLF با منبع رادیویی) برای اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی درون چاهی (و) انتشار موج از چاه به چاه



شکل ۱-۲۳- میدان‌های مغناطیسی تولید شده توسط فرستنده دوار و رسانای مورد هدف. پیچه فرستنده حول محوری عمود بر صفحه نمودار می‌چرخد. رسانای طرف راست چاه حفاری شده، تولید یک مؤلفه منفی (در این حالت به طرف پایین) از میدان ثانویه H_s در موقعیت نشان داده شده گیرنده می‌نماید. برای رسیدن به یک وضعیت صفر، چرخش فرستنده در جهت عکس عقربه‌های ساعت به اندازه $(+\theta)$ لازم است. به فرض آنکه تغییرات جفت‌شدگی فرستنده - گیرنده (وقتی که فرستنده کج می‌شود) قابل صرف‌نظر کردن باشد، در این صورت H_s توسط یک مؤلفه H_p خنثی می‌شود.

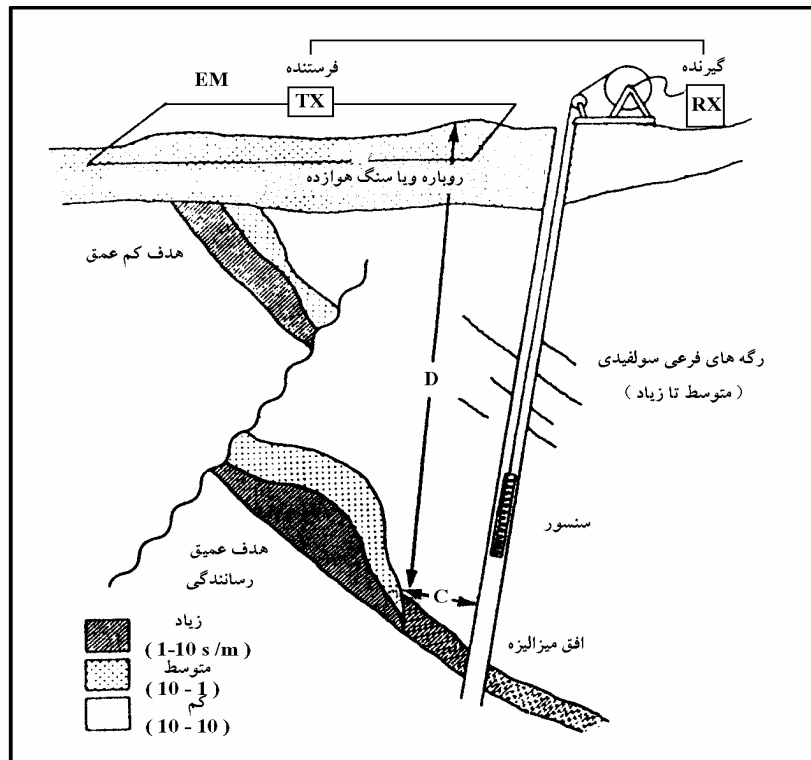
آرایه عمومی برداشت‌های LIEM چاه آزمایشی در شکل ۱-۲۴ نشان داده شده است.

لوپ فرستنده، در بالای سطح زمین و نزدیک چاه آزمایشی قرار داده می‌شود. در داخل چاه آزمایشی، برای دستیابی به پروفیل یک آشکارساز رانده می‌شود. ابعاد نوعی لوپ زمینی، دارای گستره‌ای از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بوده و با عمق چاه حفر شده که باید مورد تجسس قرار گیرد مطابقت دارند. یک لوپ زمینی، برای پروفیل‌های داخل تعدادی از چاه‌های حفاری شده از سطح زمین و داخل یک گالری معدن برای تعیین زیر سطحی کافی می‌باشد (شکل ۱-۲۵-الف)، برعکس اگر فقط یک چاه حفاری در دسترس باشد، یک لوپ به تنهایی نمی‌تواند اطلاعات آزمون‌دار^۱ لازم را برای تعیین محل هدف فراهم کند. در نتیجه، تعدادی از لوپ‌های نهاده شده دور دهانه چاه می‌توانند برای تهیه اطلاعات اضافی مورد نیاز به کار روند (شکل ۱-۲۵-ب).

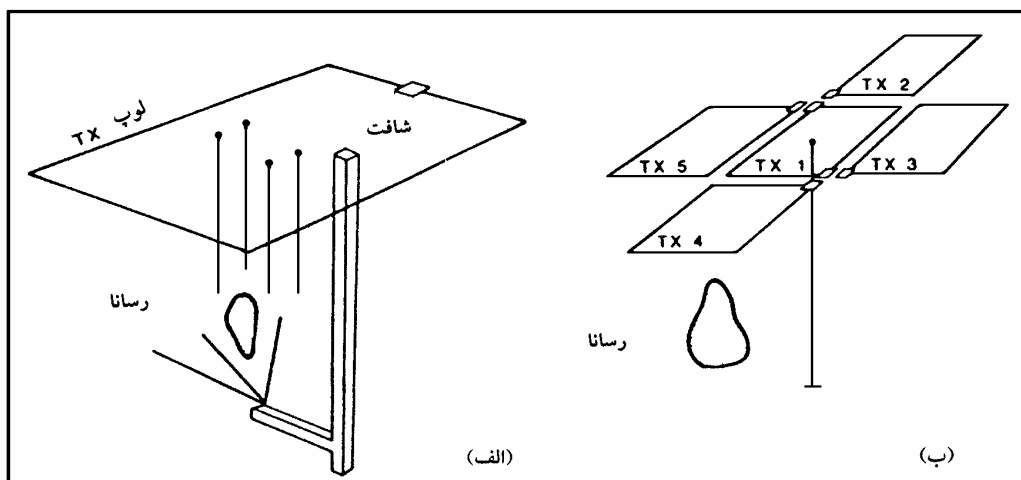
بسته به عمل سیستم در ارتباط با شکل موج اولیه رسیده، سه نوع از سیستم LLEM با نام‌های پالس لحظه‌ای^۲ تابع پله‌ای^۳ (که هردو سیستم TEM محسوب می‌شوند)، و نوع چند فرکانسی (FEM) وجود دارند. سیستم‌های دیگر، شامل VLF درون چاهی و انتشار موج بین چاهی که می‌تواند شامل فن‌های توموگرافی چاه گمانه باشد قابل دسترسی است. سیستم‌های سه‌مؤلفه‌ای (میدان مغناطیسی) به‌طور مداوم در حال توسعه‌اند، اگرچه نخستین نمونه آن توسط بولیدن مینرال^۴ AB در سوئد به‌طور موفقیت‌آمیز به کار گرفته شده است. در این سیستم، از یک لوپ زمینی ۱ کیلومتر در یک سیستم FEM، که با دو فرکانس ۲۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز عمل می‌کرد استفاده گردید.

سه سنسور در یک دستگاه با قطر ۳۲ میلی‌متر نصب شده که در آن، محور همیشه افقی و محور X، موازی محور بلند دستگاه و Z همیشه با زاویه ۹۰ درجه نسبت به X و Y قرار می‌گیرد. باقی‌مانده‌های هم فاز (محاسبه شده بعد از حذف میدان اولیه و پاسخ زمینه ناشی از سنگ میزبان) به‌صورت تابعی از فاصله پروفیل در طول چاه حفاری شده ترسیم گردید. شکل و اندازه انحراف هر مؤلفه از مقدار نرمال، اطلاعاتی را در باره موقعیت (عمق و زاویه سمت) هدف رساننده زیر سطحی به‌دست داده است.

1 - Azimuthal
2 - Impulse
3 - Step - Function
4 - Bolidan Mineral AB



شکل ۱-۲۴- شکل طرح‌واری برای ارائه چگونگی استفاده از روش الکترومغناطیسی چاه حفاری شده با لوپ بزرگ برای اکتشاف سولفید توده‌ای در محیط‌های بسیار مقاوم مانند سنگ‌های پرکامبرین نشان داده شده است. سیستم، متشکل از یک فرستنده Tx و یک گیرنده Rx است که سنسور آن، در داخل چاه قرار می‌گیرد. فاصله C، فاصله‌ای است که پس از آن، سنسور به هدف خیلی رسانا می‌رسد.



شکل ۱-۲۵- آرایش‌های فرستنده برای بررسی‌های (الف) یک گروه از چاه‌های حفاری شده طوقدار (ب) یک چاه حفاری شده منفرد Tx1-5 به ترتیب موقعیت‌های لوپ فرستنده جریان می‌باشد.

فصل دوم - سیستم‌ها و کاربردها

۱-۲ چکیده

معرفی اساسی انواع مختلف سیستم‌های الکترومغناطیسی و اصول اجرای مربوط به آنها در فصل اول ارائه شد. در این فصل، پنج نوع از متداول‌ترین سیستم‌ها به صورت تفصیلی تر همراه با مطالعات موردی، برای ارائه کاربردهای مختلف مورد بحث قرار می‌گیرند. این پنج نوع سیستم را می‌توان در سه گروه طبقه‌بندی نمود:

- سیستم‌های نزدیک - میدان یعنی حالتی که منبع، به طور نسبی نزدیک گیرنده است.
- سیستم‌های دور - میدان یعنی حالتی که منبع بسیار دورتر از گیرنده قرار گرفته به طوری که با موج EM بتوان مانند موج تخت رفتار نمود (برداشت‌های VLF).
- سیستم‌های EM با منبع طبیعی، یعنی در جایی که به دلیل وجود جریان‌های طبیعی زمین، نیازی به تولید تابش الکترومغناطیسی مصنوعی فعال نیست.

گستره هریک از دستگاه‌ها، وسیع است به ویژه اگر سیستم‌های هوابرد، دریابرد و سیستم‌هایی درون چاهی همراه با سیستم‌هایی که فقط در سطح زمین به کار می‌روند در نظر گرفته شوند. بنابراین عمق بررسی کلیه سیستم‌های قابل دسترسی را نمی‌توان پیش‌بینی کرد. انتخاب ارائه شده در اینجا، از نوع فن‌هایی هستند که بیشتر در مهندسی، محیط زیست و باستان‌شناسی کاربرد دارند. اگرچه در برخی از موارد بعضی از تکنیک‌ها تقریباً به طور انحصاری در اکتشاف مواد معدنی مورد استفاده می‌باشند. توضیحات تفصیلی‌تر در مورد انواع تجهیزات ویژه به طور مثال توسط نبیقیان^۱ (۱۹۸۷ و ۱۹۹۱) و همکاران داده شد، ویژگی‌های فنی هریک از سیستم‌های جداگانه را می‌توان از سازندگان تجهیزات به دست آورد.

۲-۲ سیستم‌های موج پیوسته (CW)

۱-۲-۲ روش‌های زاویه کجی^۲

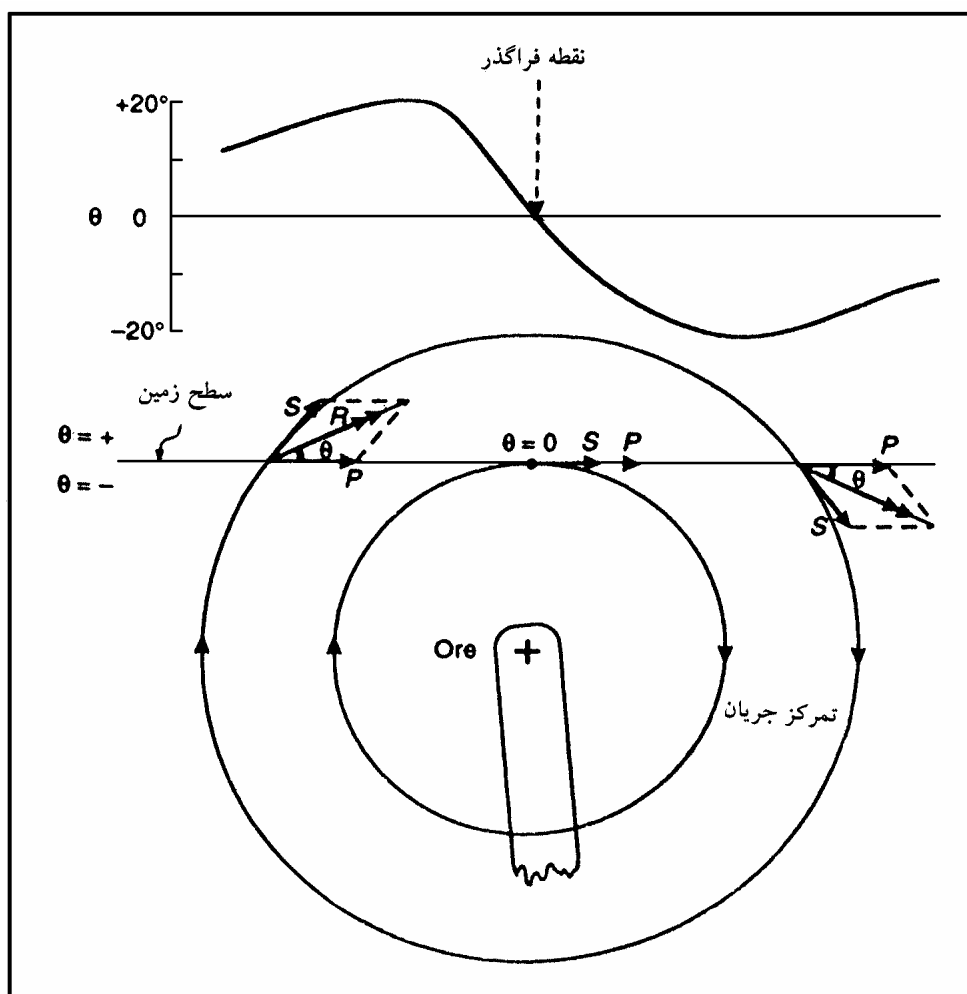
روش‌های زاویه کجی، به طور گسترده، هم در برداشت‌های زمینی و هم در برداشت‌های هوابرد به کار رفته است. این روش، نام خود را از اندازه‌گیری زاویه کجی مربوط به نتیجه میدان اولیه به کاربرده شده و میدان‌های القا شده ثانویه ناشی از پیکره رساننده مدفون (شکل ۱-۲) مانند پیکره کانی سولفید توده‌ای به دست آورده است.

با فرض اینکه جهت میدان اولیه، افقی باشد، جریان‌های ادی در درون یک رسانای مدفون القاء شده و تولید میدان مغناطیسی ثانویه می‌کند. خطوط نیروی این میدان ثانویه در اطراف منبع جریان‌ها متمرکز بوده که این منبع در بالاترین لبه کانسار مزبور قرار می‌گیرد. میدان ثانویه، در طرفی که نزدیک‌ترین فاصله از فرستنده را دارد به طرف بالا کج شده و بنابراین

1 - Nabighian

2 - Tilt-angle

منتجه نیز به طرف بالا میل کرده است (زاویه کجی مثبت). بلافاصله بالای کانسارسانا، هر دو میدان اولیه و ثانویه افقی بوده و در یک جهت می‌باشند، بنابراین زاویه کجی صفر است. در دورترین طرف از فرستنده، میدان ثانویه به طرف پایین تمایل داشته و در نتیجه میدان منتجه نیز به طرف پایین تمایل پیدا می‌کند (زاویه کجی منفی). در یک مطالعه زاویه کجی که در آن محور پیچه قائم است (میدان اولیه افقی) کانسار رساننده در نقطه‌ای که زاویه کجی از مثبت به منفی عبور می‌کند قرارداد (نقطه فراگذر^۱). وقتی میدان اولیه به صورت قائم به طرف پایین باشد، زاویه کجی بالای کانسار حداقل مقدار را خواهد داشت. (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱- پروفیل زاویه کجی (θ) بالای یک کانسار رسانا ناشی از یک موج EM تخت از یک فرستنده قائم؛ دور $\bar{P}$ مشخص کننده جهت بردار میدان اولیه است. $\bar{S}$ و $\bar{R}$ به ترتیب بردارهای میدان ثانویه و منتجه هستند.

وقتی جسم رساننده در نزدیک سطح زمین باشد، شیب زاویه کجی و آهنگ تغییر افقی زاویه کجی بیشتر از حالتی خواهد بود که در بالای جسم رساننده مستقر در عمق ایجاد می‌شود. علاوه بر این، اگر جسم رساننده قائم بوده و پروفیل برداشت عمود بر هدف زیرسطحی باشد، منحنی زاویه کجی در دوطرف نقطه فراگذر متقارن خواهد بود. اگر منحنی غیرمتقارن باشد، در آن صورت میزان عدم تقارن، نشان‌دهنده درجه شیب هدف زیرزمینی خواهد بود. وقتی شیب هدف رسانا کاهش یابد (از حالت قائم بودن نسبت به سطح زمین کاسته شود) در این حالت میزان عدم تقارن افزایش می‌یابد. روش‌های زاویه کجی متداول عبارتند از فنون VLF و AFMAG که به‌صورت تفصیلی در قسمت‌های ۲-۴ و ۲-۶ شرح داده خواهد شد.

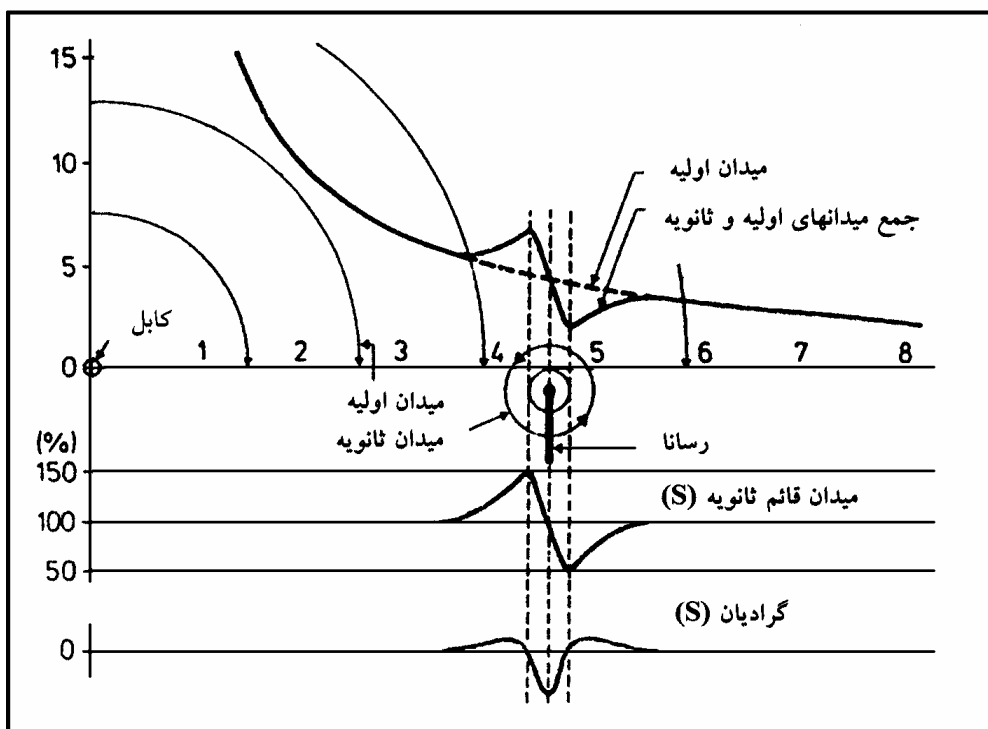
۲-۲-۲ سامانه‌های با منبع ثابت (ساندبرگ، تورام)

در جایی که از منبعی ثابت مانند لوپ بزرگی از یک سیم یا کابل زمینی دراز استفاده شود مانند روش ساندبرگ، میدان مغناطیسی اولیه به طرف زمین تمایل پیدا می‌کند (شکل ۲-۲). در صورت وجود یک رساننده قائم، باریک و به‌صورت جانبی پیوسته، جریان‌های القاء شده ادی در لبه بالایی کانسار زیرسطحی، ایجاد یک میدان مغناطیسی ثانویه نموده که با میدان اولیه تداخل می‌نماید. منتجه یا مؤلفه قائم ثانویه میدان مغناطیسی، به وسیله گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر این می‌توان گرادیان میدان مغناطیسی ثانویه را اندازه‌گیری نمود و به‌صورت یک نمودار نمایش داد.

در حالت یک رسانای باریک قائم، میدان مغناطیسی ثانویه، در حوالی نقطه فراگذر و بلافاصله بالای هدف زیر سطحی به‌طور معکوس متقارن می‌باشد (شکل ۲-۲). در همان موقعیت، گرادیان میدان ثانویه به کمترین مقدار می‌رسد. اگر ورقه رسانا قائم نباشد، بی‌هنجاری‌های تولید شده، درجه عدم تقارن را با کاهش زاویه شیب افزایش می‌دهد.

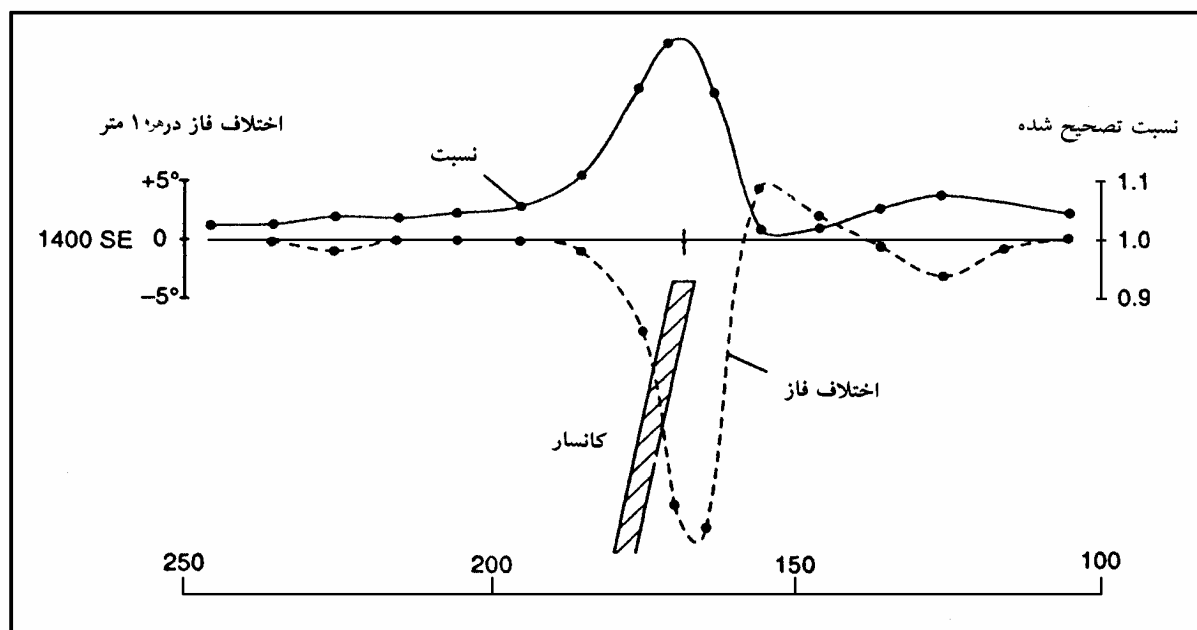
هنگام استفاده از روش ساندبرگ باید مراقب نمود، زیرا مانند سایر فنون EM توپوگرافی در کیفیت داده‌های به دست آمده تاثیر می‌گذارد. اگر سطح زمین که روی آن برداشت انجام می‌گیرد ناهموار باشد، به‌طوری‌که گیرنده دارای اختلاف ارتفاع چشمگیری نسبت به منبع باشد باید، تصحیح توپوگرافی لازم را برای مؤلفه حقیقی داده‌های میدان اولیه قائم به‌کار برد تا این اختلاف جبران گردد.

در حالت مربوط به روش تورام، دو پیچه گیرنده معمولاً افقی به فاصله ثابتی (c) از یکدیگر قرار داشته و با حالت عمود بر سیم منبع در راستای پروفیل‌ها جابه‌جا می‌گردند. در تعداد معینی از ایستگاه‌ها (۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ...) که به نوبت در آنها یک پیچه قرار داده شده، دامنه (V) و فاز (α) میدان الکترومغناطیسی قائم، در هر موقعیت اندازه‌گیری می‌شود. نسبت دامنه‌ها در هر جفت ایستگاه متوالی (مثال $V_1/V_2, V_2/V_3, V_3/V_4, \dots$) و گرادیان افقی فازها $[(\alpha_2 - \alpha_1)/c, (\alpha_3 - \alpha_2)/c, (\alpha_4 - \alpha_3)/c, \dots]$ در نقطه وسط پیچه‌ها در راستای پروفیل رسم شده است. علاوه بر این وقتی میدان اولیه P دور از منبع، از نظر دامنه کاهش می‌یابد، نسبت‌های دامنه اندازه‌گیری شده به نسبت‌های دامنه بهنجار شده تقسیم گردیده ($P_1/P_2, P_2/P_3, P_3/P_4, \dots$) و از آنجا خواهیم داشت: $\dots, V_3 P_4 / V_4 P_3, V_2 P_3 / V_3 P_2, V_1 P_2 / V_2 P_1$. این نسبت‌ها، نسبت‌های تصحیح شده نامیده می‌شوند (RR). اگر هر پیچه یا هر دو پیچه در ارتفاعی متفاوت با کابل منبع قرار گرفته باشند، باید به نسبت‌های تصحیح شده یک تصحیح توپوگرافی اعمال گردد.



شکل ۲-۲- در روش ساندبرگ، منبع، سیم درازی است که میدان اولیه را ایجاد کرده و این میدان به نوبه خود میدان ثانویه را در بالای رسانای زیرسطحی تولید می نماید. بی هنجاری مربوط به رسانای زیرسطحی، به میدان اولیه اضافه شده ولی با جداسازی میدان اولیه می توان آنها را از هم تفکیک نمود. گرادیان افقی میدان ثانویه، حداقل مقدار را در نقطه ای که مستقیماً بالای قله رساننده قرار دارد بدست می دهد.

معمولاً یک پروفیل تورام برحسب نسبت های تصحیح شده و گرادیان افقی فاز رسم می شود (شکل ۲-۳). مانند حالت مربوط به بی هنجاری ساندبرگ، بی هنجاری های متقارن هر دو پارامتر اندازه گیری شده روی رسانای قائم به دست می آید. اگر شیب از حالت قائم کاهش پیدا کند، درجه عدم تقارن افزایش می باید به طوری که ارقام بیشتر نسبت تصحیح شده و ارقام کمتر گرادیان افقی فاز در سمت فروشیب هدف رسانا اندازه گیری می شود.



شکل ۲-۳- نمودارهای تصحیح شده و گرادیان اختلاف فاز در بالای یک رسانای شیبدار که با استفاده از مطالعه تورام به دست آمده است.

۲-۳-۳ سامانه های با منبع متحرک

متداول ترین روش پیمایش EM در محیط زیست و مهندسی زمین شناسی، روش دویپچه ای با منبع متحرک است (مک نیل، ۱۹۹۰). دویپچه جدا از هم که به وسیله کابل مرجع به هم متصل می باشند، اساس سیستم را ایجاد می کنند (شکل ۲-۴). یک پیچه به عنوان فرستنده، به منظور ایجاد میدان اولیه عمل نموده کرده و دیگری نقش گیرنده را ایفا می کند. فاصله بین پیچه ای در اندازه ثابتی باقی می ماند و جفت پیچه ها در امتداد مقطع برداشت در بازه های معین حرکت می کند. نقطه مرجع برای اندازه گیری، معمولاً نقطه وسط بین دو پیچه است. نوعاً سیستم های جفت پیچه ای، فقط مولفه تربیعی و یا هر دو مؤلفه فاز و تربیعی را اندازه گیری می نمایند.

در حالت هدایت سنج های زمینی (GCM) شرکت ژئونیکس، به طور مثال دستگاه برداشت به طور مستقیم مؤلفه تربیعی را به صورت رسانندگی ظاهری زمین σ_a بر حسب میلی مهوس بر متر (معادل واحدهای میلی زیمنس بر متر mS/m در دستگاه SI) نشان می دهند. مؤلفه هم فاز به صورت قسمت در هزار اندازه گیری می شود.

نسبت فاصله بین پیچه ای (s) تقسیم بر ضخامت پوست (δ)، عدد القاء (B) نامیده می شود، که δ از رابطه زیر به دست می آید:

$$\delta = \frac{1}{(2/\omega\mu \cdot \sigma)^2} = \frac{1}{(2i)^2 / \Gamma}$$

$$\Gamma_s = (2i)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{s}{\delta} = (2i)^{\frac{1}{2}} B \cdot \left[B = \frac{s}{\delta} \right]$$

که در آن‌ها:

$\omega = 2\pi f$ (f فرکانس بر حسب هرتز)، $B = s/\delta$ ، μ_0 تراوایی فضای آزاد، $i = \sqrt{-1}$ ، $\Gamma = (i\omega\mu \cdot \sigma)^{\frac{1}{2}}$ ، σ رسانندگی و s فاصله بین پیچه‌ای (متر).

در حالتی که اعداد القا خیلی کمتر از ۱ باشد، نسبت میدان مغناطیسی ثانویه (H_s) به میدان مغناطیسی اولیه (H_p) درگیرنده، نسبت مستقیم با رسانندگی ظاهری (σ_a) دارد. اگر زمین کاملاً همگن و همسانگرد باشد، دستگاه مقدار حقیقی رسانندگی زمین (σ) را به دست خواهد داد، که این مقدار در رابطه زیر صدق می‌کند:

$$H_s / H_p \approx iB^2 / 2 = i\omega\mu \cdot \sigma s^2 / 4$$

دستگاه اندازه‌گیری، طوری طراحی شده که با یک فرکانس انتخابی (f)، فاصله بین پیچه‌ای (s) و مقدار در نظر گرفته شده H_p حاصل از یک فرستنده، مقدار مجهول H_s اندازه‌گیری شود، که در این صورت، می‌توان مقدار σ را به دست آورد. به هر حال، مواد زمین‌شناختی حقیقی متشکل است از مخلوطی از مواد تشکیل دهنده که قابل ملاحظه‌ترین آن خمیره جامد^۱ با فضاهای تخلخل است که به طور بخشی یا کاملاً از سیال درون منفذی اشباع بوده و می‌تواند در بعضی مواقع بسیار رساننده باشد. به علاوه، زمین معمولاً از لایه‌هایی تشکیل شده (مثلاً خاک روی مواد هوازده که روی سنگ کف قرار دارد) که هر ماده‌ای دارای رسانندگی حقیقی قابل تشخیص مربوط به خود بوده و سهمی در رقم رسانندگی ظاهری اندازه‌گیری شده خواهد داشت. مقدار رسانندگی ظاهری، از رابطه زیر به دست می‌آید:

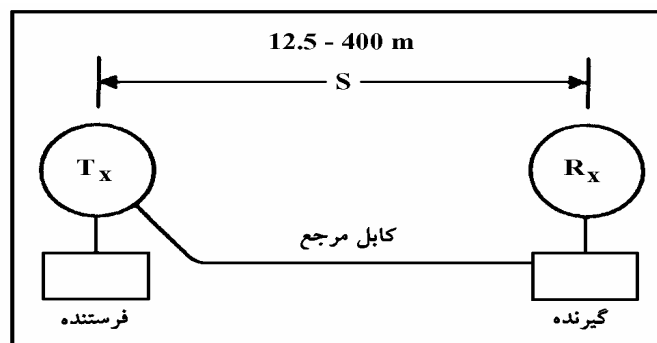
$$\sigma_a = (4/\omega\mu \cdot s^2)(H_s / H_p)q$$

که در آن، اندیس q بیانگر فاز تریبیعی است.

یک رسانندگی سنج زمینی، بسته به جهت‌یافتگی پیچه‌ها، به رسانندگی مواد تشکیل دهنده زمین پاسخ می‌دهد. نوعاً دو مد وجود دارد:

پیچه‌های افقی با یک دوقطبی مغناطیسی قائم (VMD) و پیچه‌های قائم با یک دوقطبی مغناطیسی افقی (HMD). اگر یک لایه نازک یکطرف نامحدود افقی در یک عمق بهنجار شده (Z) قرار گرفته باشد (که در آن Z حاصل تقسیم عمق واقعی بر فاصله بین پیچه هاست)، آنگاه سهم نسبی آن لایه نازک به میدان مغناطیسی ثانویه (H_s) در گیرنده توسط تابع، پاسخ پالس

لحظه‌ای (φ) نامیده می‌شود. شکل این پاسخ، برای هر دو حالت دوقطبی مغناطیسی قائم و افقی (شکل ۲-۵) بسیار مهم است. در حالت دوقطبی مغناطیسی قائم، سهم نسبی لایه‌های نزدیک به سطح کوچک است. در نتیجه، در این آرایش، این روش به طور نسبی به عارضه‌های خیلی نزدیک سطح زمین غیر حساس می‌باشد. بزرگ‌ترین سهم نسبی از عمق بهنجار شده $Z=0.4$ ناشی می‌شود. برعکس، پاسخ نسبی برای میدان دوقطبی مغناطیسی افقی، از ماکزیمی در سطح زمین شروع شده و با عمق کاهش می‌یابد. در این حالت، آرایش دو قطبی، سیستم را به عوارض نزدیک سطح زمین خیلی حساس می‌سازد. اگر زمین تا عمق Z از مواد مختلفی تشکیل شده باشد، به جای سهم نسبی یک لایه نازک منفرد، می‌توان سهم کلیه مواد مذکور را در میدان مغناطیسی ثانوی (رسانندگی ظاهری) در نظر گرفت. جمع همه پاسخ‌های پالس لحظه‌ای برای همه عمق‌ها تا Z ، از نظر ریاضی به صورت انتگرال همه توابع پاسخ پالس لحظه‌ای بیان می‌گردد. سهم کلی که به این طریق محاسبه شد، تابع پاسخ تجمعی^۱ نامیده می‌شود. $R(Z)$ ، برای آرایه‌های VMD و HMD شکل‌های مختلف دارد. (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۴ - سیستم EM جفت پیچه‌ای متحرک، دایره‌ها نشانگر پیچه‌های فرستنده (T_x) و گیرنده (R_x) می‌باشند.

گراف‌های تابع پاسخ تجمعی برای هر جهت یافتگی دوقطبی را می‌توان برای محاسبه رسانندگی حقیقی مدل‌های ساده ۲ لایه یا ۳ لایه به کار برد. برای چنین محاسبه‌ای یک مثال در زیر آمده است:

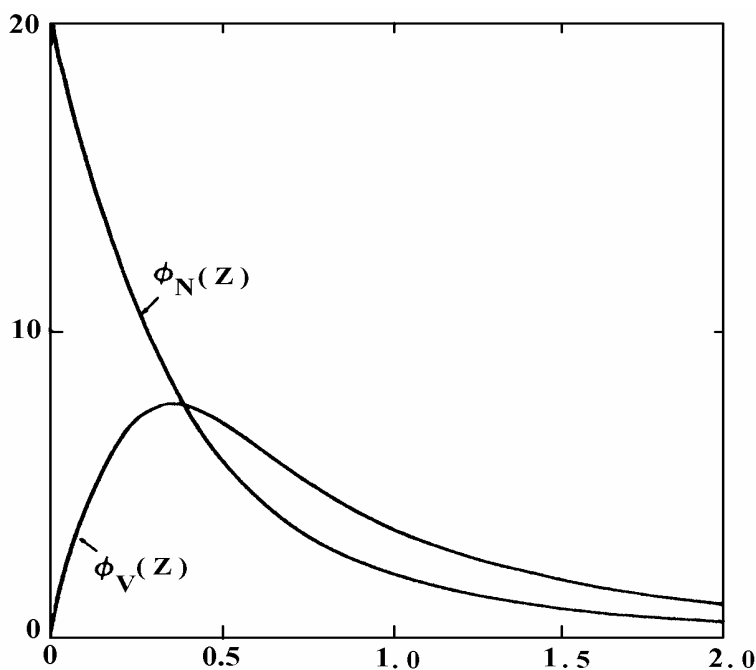
در یک مدل دولایه، سهم لایه بالایی در رسانندگی ظاهری اندازه‌گیری شده عبارت است از:

$$\sigma_a = \sigma_1(1 - R)$$

که در آن: σ_1 رسانندگی حقیقی اولین لایه و R تابع پاسخ تجمعی برای جهت یافتگی دوقطبی مورد نظر (HMD) یا (VMD) می‌باشد. R تابعی از عمق بهنجار شده ($Z = d/s$) بوده که در آن، d عمق واقعی و s فاصله بین پیچ‌ها است. سهم ناشی از لایه تحتانی توسط فرمول زیر معین می‌شود:

$$\sigma_a = \sigma_2 R$$

که در آن، σ_2 رسانندگی حقیقی مواد مربوط به لایه تحتانی است.



شکل ۲-۵- توابع پاسخ لحظه‌ای (ϕ) برای دوقطبی‌های مغناطیسی افقی و قائم برحسب تابعی از عمق بهنجار شده

رسانندگی ظاهری کل عبارت است از جمع این دو سهم به‌صورت زیر:

$$\sigma_a = \sigma_1(1 - R) + \sigma_2 R$$

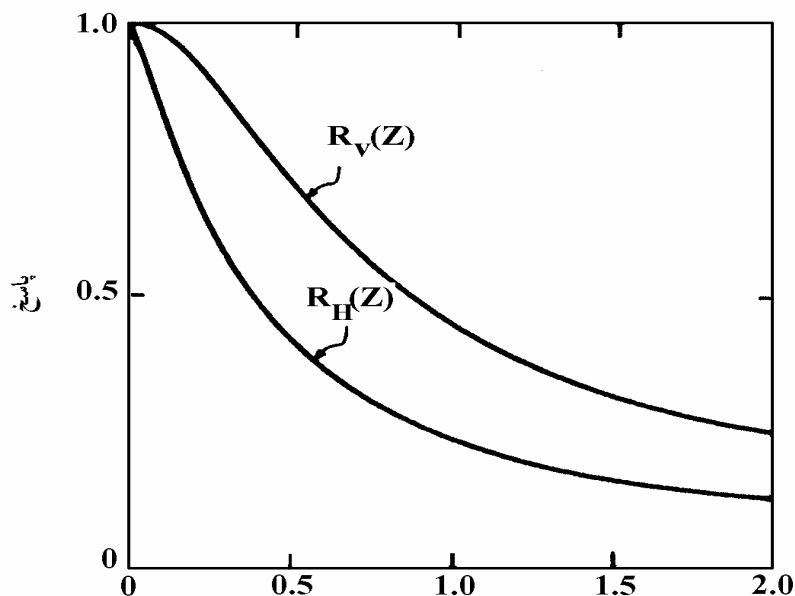
برای حالت سه لایه:

$$\sigma_a = \sigma_1(1 - R_1) + \sigma_2(R_1 - R_2) + \sigma_3 R_2$$

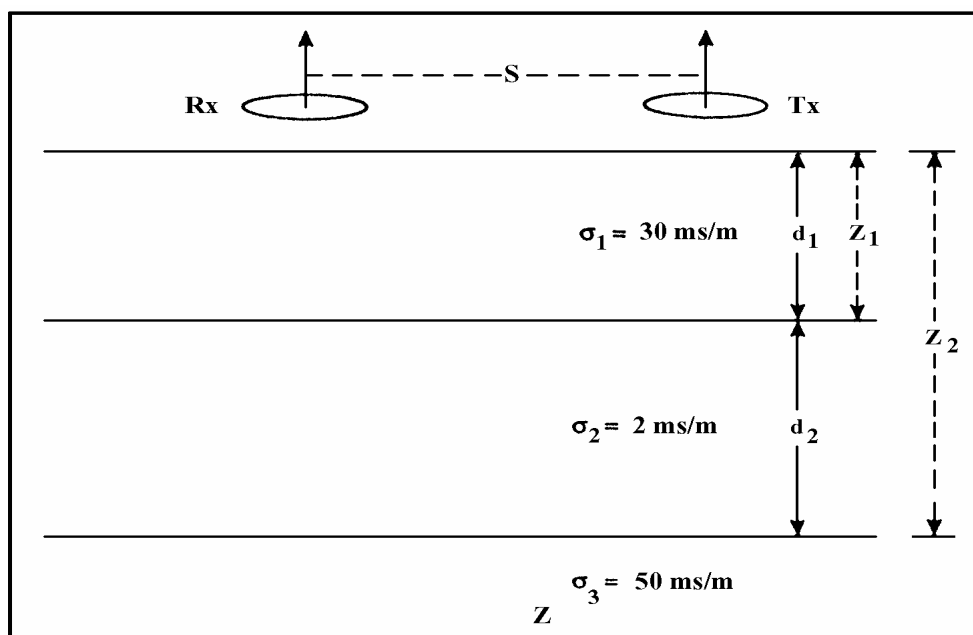
که در آن $\sigma_{(1,2,3)}$ رسانندگی واقعی و $R_{(1,2)}$ ارقام تابع پاسخ تجمعی به ترتیب لایه اول، دوم و سوم می‌باشد. مدلی را در نظر بگیرید که در آن دو لایه یکطرف نامحدود افقی و در شرایطی که فاصله بین پیچهای خیلی کمتر از عمق پوست برای همه لایه‌هاست وجود داشته باشد. رسانندگی ظاهری اندازه‌گیری شده از سهم لایه اول به اضافه مواد زیر آن تشکیل شده است. اثر وزنی سهم رسانندگی توسط تابع پاسخ تجمعی تهیه شده است. همین منطق، در حالت سه لایه نیز صادق است.

مثال عددی: اگر $R_1 = 0/71$ و $R_2 = 0/31$ باشد، با استفاده از شکل ۲-۶، برای $d_1 = 5$, $d_2 = 10$, و $s = 10$ متر داریم:

$$\sigma_a = 30(1 - 0/71) + (0/71 - 0/31) + 50 \times 0/31 = 25 \text{ mS/m}$$



شکل ۲-۶- توابع پاسخ تجمعی برای دو قطبی‌های مغناطیسی افقی و قائم برحسب تابعی از عمق بهنجار شده



شکل ۲-۷- مثالی از استفاده تابع پاسخ پالس لحظه‌ای تجمعی (R) و رسانندگی‌های حقیقی (σ) برای محاسبه ارقام فرضی رسانندگی ظاهری (σ_a) برای مدل زمین سه لایه‌ای.

این نوع محاسبه، برای حالتی مفید است که در آن، مقدار رسانندگی ظاهری تقریبی روی مدلی که رسانندگی‌های لایه‌ای آن و نیز ضخامت‌های لایه‌ها تخمین زده شده مورد نیاز باشد. ارقام رسانندگی ظاهری که به این طریق به دست می‌آید، تخمینی بوده و فقط به همان دقتی خواهد بود که وضعیت مفروضات داده شده اعتبار دارد. اگر زمین به لایه‌های تخت افقی یکطرف نامحدود قابل تشبیه نباشد، مقداری تغییرات جانبی و قائم در رسانندگی و ضخامت وجود خواهد داشت، در این صورت محاسبه در بهترین شرایط فقط یک نتیجه سرانگشتی خواهد بود. اگر در محدوده کره تاثیر سیستم اندازه‌گیری‌های EM، یک شیء سه‌بعدی وجود داشته باشد، یا فصل مشترک بین لایه‌ها شیبدار بوده یا به صورت تخت نباشد، اعتبار این محاسبات اساساً کاهش خواهد یافت.

در حالت یک سیستم دو پیچه APEX MaxMinI-10 که در آن، امکان انتخاب تا ۱۰ فرکانس مختلف (۲۲۰، ۱۱۰، ۴۴۰، ۸۸۰، ۱۷۶۰، ۳۵۲۰، ۷۰۴۰، ۱۴۰۸۰، ۲۸۱۶۰، ۵۶۳۲۰ هرتز) وجود دارد می‌توان فاصله بین پیچه‌ای روی گستره ۲۰ تا ۵۰۰ متر را انتخاب کرد. روش طبیعی عمل، مربوط به لوپ افقی EM (HLEM) است اگرچه اندازه‌گیری‌ها را می‌توان در وضعیت دوقطبی عمودی و آرایش زاویه کجی نیز انجام داد. معمولاً برای به نقشه درآوردن نهشته‌های کواترنر، یک فاصله بین پیچه‌ای ۱۰۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ هر دو مؤلفه هم‌فاز و تربیعی در هر فرکانس در موقعیت یک ایستگاه معین اندازه‌گیری شده و در یک نمودار فازی نمایش داده می‌شوند (شکل ۲-۸).

ارقام اندازه‌گیری روش HLEM به پارامتر پاسخ α بستگی دارد که در آن، α از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \mu \sigma \omega L^2$$

در این رابطه: μ تراوایی مغناطیسی فضای آزاد ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H / m}$)، σ رسانندگی دوباره، ω فرکانس زاویه‌ای در حالی که $\omega = 2\pi f$ باشد، f فرکانس اندازه‌گیری شده مربوط به یکی از ۱۰ فرکانس قابل دسترس و L فاصله بین پیچه‌ای است. نمودارهای منحنی‌های استاندارد فازی، در تفسیر داده‌های اندازه‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند که در قسمت بعد شرح داده خواهد شد.

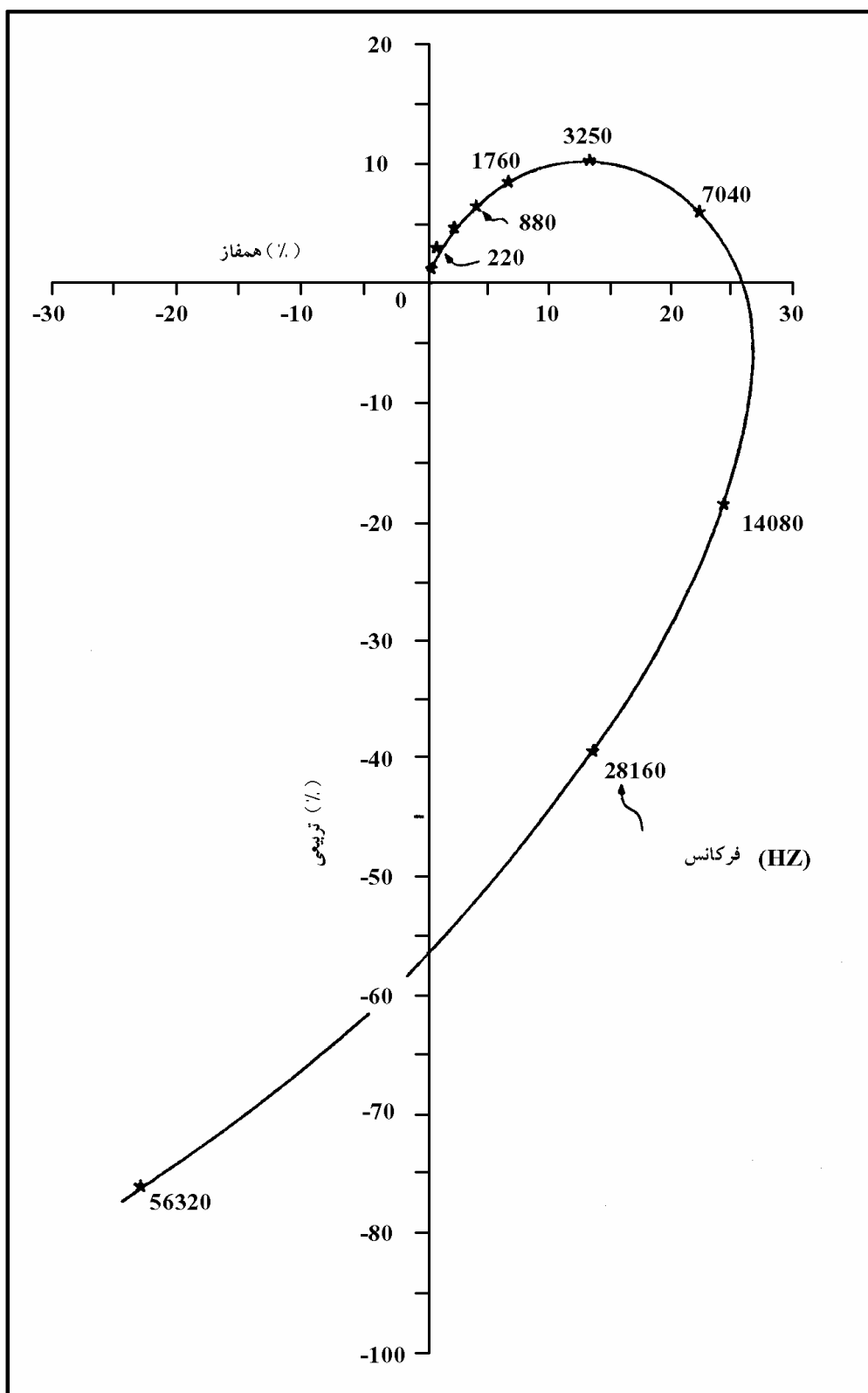
۴-۲-۲ روش‌های تفسیر

۱-۴-۲-۲ پروفیل‌زنی و سوند/ژزنی عمقی

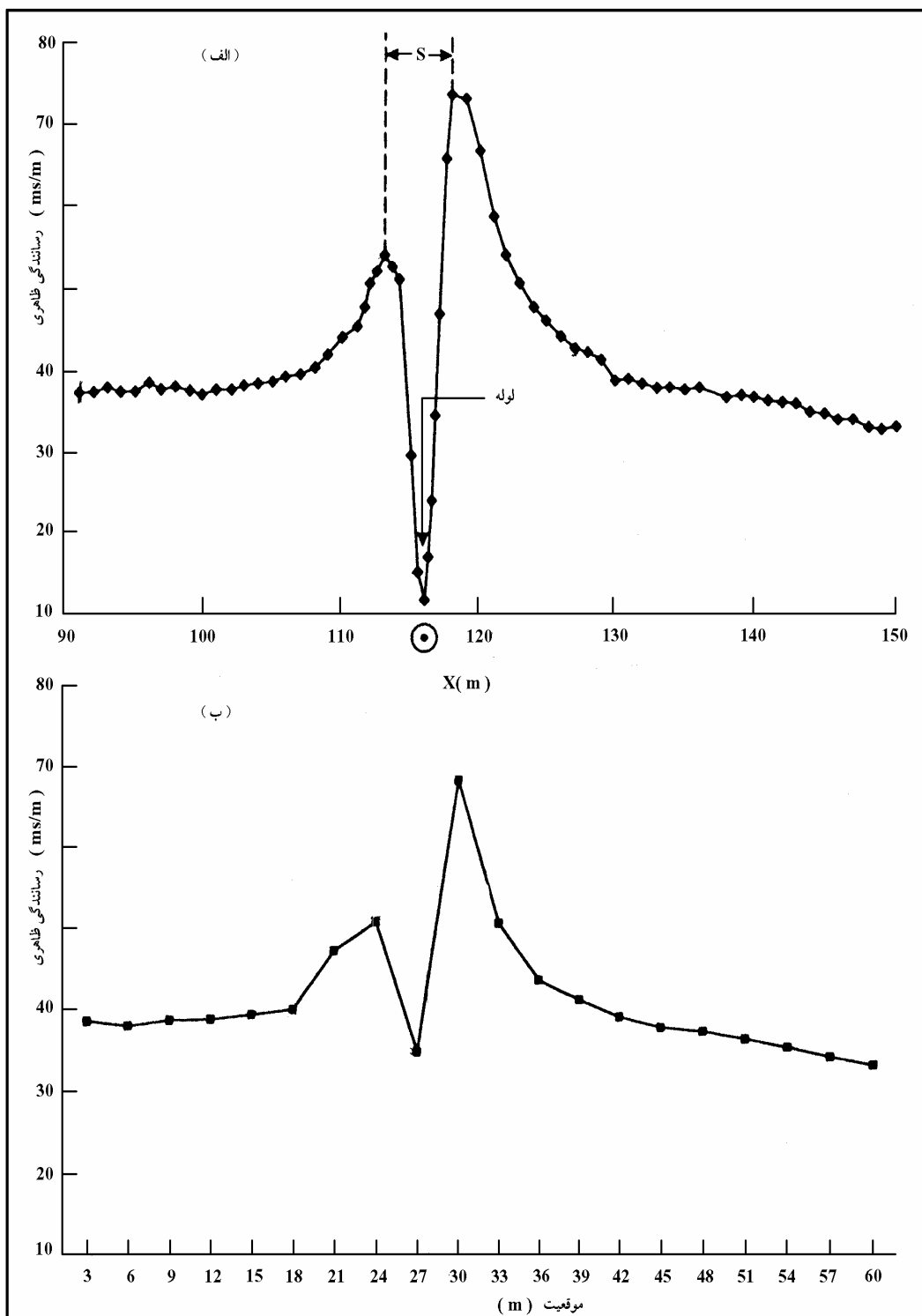
داده‌های الکترومغناطیسی، براساس روشی که به دست آمده‌اند با راه‌های مختلف می‌توانند مورد تحلیل قرار گیرند. پارامترهای اندازه‌گیری شده را ممکن است به‌صورت پروفیل‌ها یا نقشه‌های پربندی حاصل از شبکه‌بندی‌ها رسم نمود، که در روی آنها، زون‌های بی‌هنجار را می‌توان مشخص کرد. این رهیافت‌ها بیشتر به‌صورت کیفی و تفسیرهای مقدماتی می‌باشند.

برای به نقشه‌درآوردن مرحله‌شناسی یا ردیابی بی‌هنجاری، ممکن است تفسیر کیفی کافی باشد. به هر حال، اگر پاسخ‌های سرشتی عوارض معین تشخیص داده نشود، چالش‌های معینی می‌تواند از بی‌احتیاطی بروز کند. به‌طور مثال، هنگام استفاده از سیستم دویچه‌ای مانند ژئونیکس EM31 که یک هدف تنها پیک منفرد روی یک رساننده باریک تولید کند، تشخیص بی‌هنجاری همراه با سوء تعبیری و خطر است.

یک پروفیل رسانندگی ظاهری نوعی ایجاد شده در بالای لوله فلزی گاز با قطر ۱۰ سانتی‌متر مدفون در عمق حدود ۱ متر را در نظر بگیرید (شکل ۹-۲-الف). دو پیک همراه با یک افت شدید یا حتی منفی، بلافاصله بالای هدف ظاهر شده‌اند. توجه داشته باشید که فاصله بین پیک‌های بی‌هنجاری، مانند طول دو قطبی (فاصله پیچه‌ها) است. همیشه فاصله بین پیک‌ها را کنترل کنید، اگر از آنها، به‌طور دقیق برابر فاصله بین پیچه‌ای استفاده شده باشد، پس هدف ایجاد کننده بی‌هنجاری در نقطه وسط دو پیچه قرار دارد. بسته به فاصله‌های برداشت نسبت به موقعیت هدف، پیک‌ها و افت بی‌هنجاری ممکن است اندکی عریض‌تر یا باریک‌تر از طول دو قطبی باشد. این عمل، در اثر تغییرات فواصل برداشت نسبت به هدف به وجود می‌آید (شکل ۹-۲-ب). همین آثار ممکن است با فاصله بین پیچه‌ای بزرگ‌تر خفیف‌تر شود.



شکل ۲-۸- مثالی از یک نمودار فازی که در آن داده‌های هم‌فاز و تربیعی برای هر فرکانس (که با ستاره نشان داده شده) رسم شده و با یک مدل خط پر برای لوپ سونداژ افقی بهترین برازش را دارد.



شکل ۲-۹- مثالی از اثر یک لوله گاز فلزی روی داده‌های رسانندگی ظاهری (الف)، و آشکارنشدن بی‌هنجاری به دلیل فواصل برداشت نامناسب (ب). توجه شود که فاصله پیک به پیک در (الف) برابر جدایی بین پیچه‌ها است.

عیناً، شکل بی‌هنجاری نیز بسته به راستای دوقطبی استفاده شده تغییر خواهد کرد. یک مثال از اختلاف خروجی از هر دو راستای دوقطبی بالای یک رساننده قائم با فاصله بین پیچ‌های یکسان در شکل ۲-۱۰ نشان داده است. اثر عوامل پوشاننده نیز در داده‌های شبکه برداشت قابل توجه است. اگر فاصله نمونه‌برداری خیلی زیاد باشد، بی‌هنجاری‌های ناشی از هدف‌های کوچک (به ویژه سه‌بعدی)، ممکن است به طور مؤثری نرم شده (دگرنام شده)^۱ و هدف ممکن است از دست برود. در مورد قدرت تفکیک نقشه رسانندگی زمین، در فصل ۲-۲-۳-۴ بحث خواهد شد.

۲-۴-۲-۲ تحلیل کامپیوتری

با استفاده از نرم‌افزار تخصصی، تحلیل کمی بیشتری را می‌توان انجام داد. دو رهیافت ممکن می‌باشد (a)، استفاده از داده‌های EM برای انجام سونداژزنی عمقی در یک نقطه نفوذ و (b) اجرای پروفیل‌زنی EM در راستای یک خط یا روی یک شبکه برای تولید مقطع ژئوالکتریک دوبعدی.

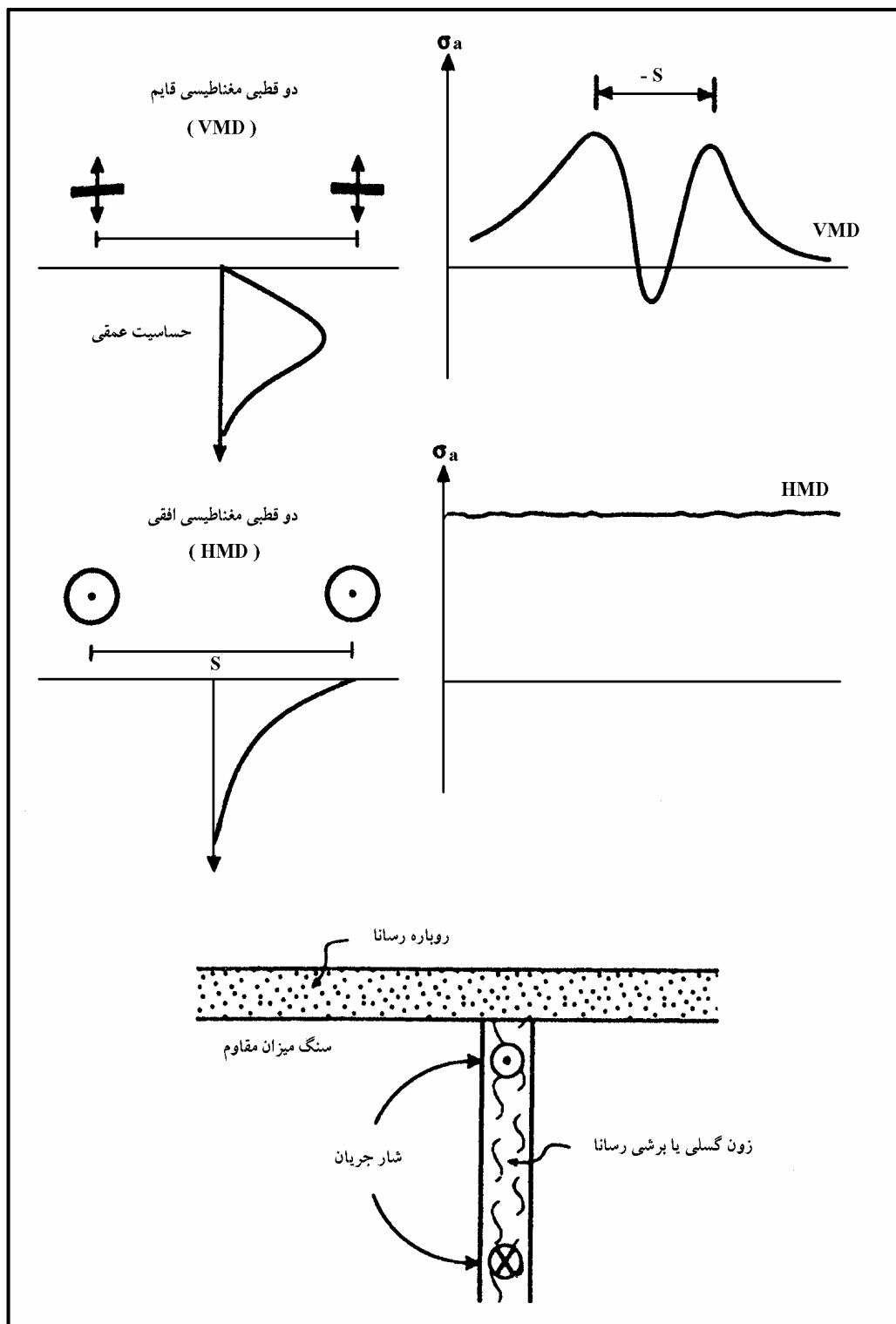
در حالت سونداژزنی عمقی، تعداد محدودی از داده‌ها به صورت تابعی از فاصله بین پیچ‌های و در راستای دوقطبی به دست می‌آید. فاصله بین دو پیچ‌های، تابعی از فرکانس است؛ عمق نفوذ بیشتر با استفاده از فرکانس‌های پایین‌تر و فواصل بین پیچ‌های بیشتر به دست می‌آید. برای این بحث، از گستره رسانندگی سنج‌های زمینی ساخته شده توسط شرکت ژئونیکس استفاده خواهد شد زیرا این ابزار، معمولاً در مطالعات محیط زیست و مهندسی به کار گرفته می‌شوند. داده‌های به دست آمده از سایر دستگاه‌ها را نیز می‌توان به طور مشابه تفسیر نمود.

اگر از هدایت‌سنج زمینی EM34-3 ژئونیکس استفاده شود، سه فاصله بین پیچ‌های و دو جهت یافتگی دوقطبی وجود دارد. به این ترتیب، با استفاده از یک دستگاه در هر نقطه برداشت، حداکثر تعداد ۶ عدد داده قابل دستیابی می‌باشد. مقادیر رسانندگی ظاهری اندازه‌گیری شده در هر فاصله بین پیچ‌های و با هر جهت‌یابی دوقطبی در برنامه مانند EMIX-MM (شرکت اینترپکس)^۲ آمریکا) وارد می‌شوند. اگر از برنامه APEX Max Min I-10 استفاده شود ۱۰ جفت از داده‌های هم‌فاز و تربیعی می‌توانند در همان نرم‌افزار وارد شوند. از این برنامه، برای معکوس‌سازی داده‌ها به منظور ایجاد مدل زمین‌لایه‌ای استفاده می‌شود که در آن، رسانندگی حقیقی هر لایه همراه با ضخامت آن تخمین زده شده و دوباره وارد برنامه می‌شود. ارقام به دست آمده، رسانندگی ظاهری برای مدل انتخابی محاسبه شده و با ارقامی که برداشت شده‌اند مقایسه می‌شوند. مدل کامپیوتری حاصل، به طور خودکار تا زمانی که اختلاف بین ارقام محاسبه و مشاهده شده و رسانندگی ظاهری از نظر بعضی از معیارهای آماری رضایت‌بخش شوند تعدیل می‌گردند، مثلاً وقتی یک خطای RMS^۳ کمتر از ۲٪ به دست آید، خروجی نهایی برنامه عبارت از یک پروفیل رسانندگی حقیقی عمقی می‌باشد.

1 - Aliased

2 - Inter pex

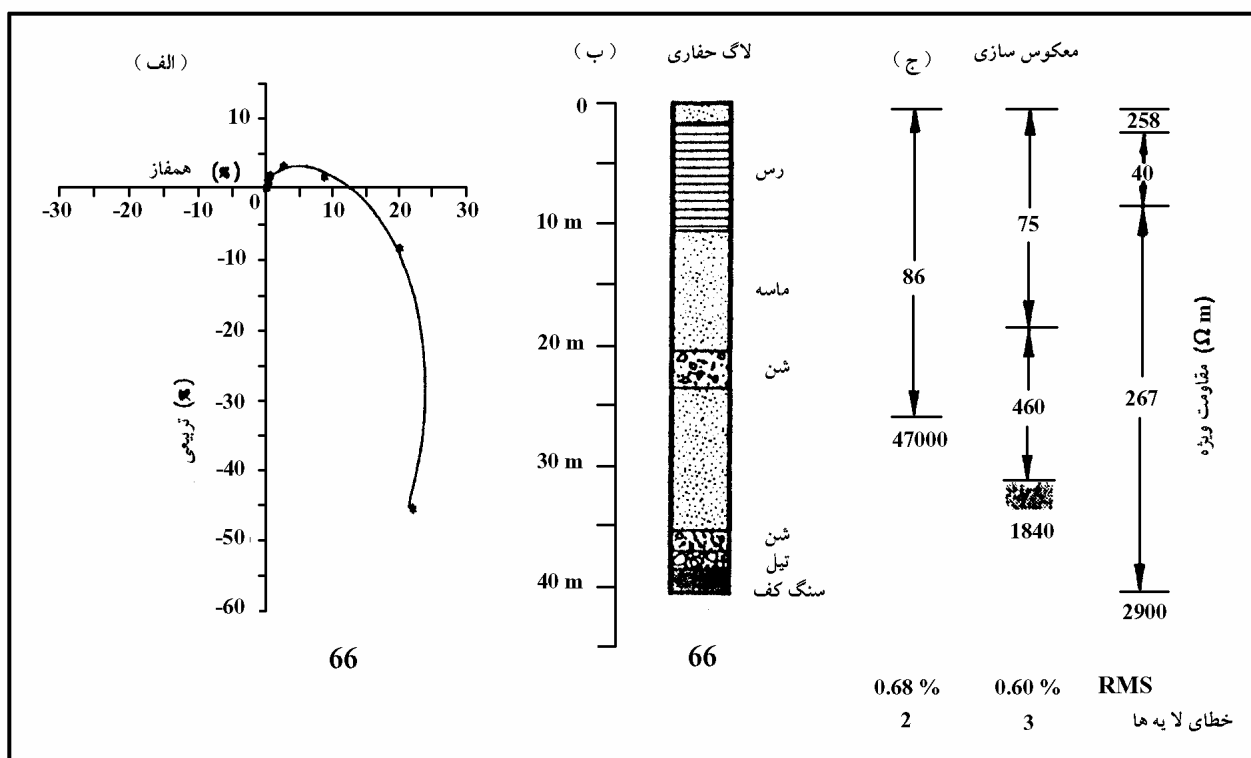
3 - Root mean Square



شکل ۲-۱۰- مثالی از اختلاف در خروجی داده‌های حاصل از دوقطبی‌های مغناطیسی افقی و عمودی بالای یک رساننده قائم برای همان فاصله بین پیچ‌های

همبستگی با داده‌های چاه گمانه می‌تواند ضخامت‌های لایه‌های مدل را برای به دست آوردن ارقام حقیقی رسانندگی میسر نماید.

چنین مدلی، که به این طریق به دست می‌آید، ممکن است از نظر آماری مناسب باشد، ولی سؤال مناسب بودن از نظر زمین‌شناختی هنوز مطرح می‌باشد. برای داده‌های APEX Max Min یک‌سری منحنی‌های تئوری دیاگرام‌های فازی را می‌توان ایجاد کرد و از این طریق، می‌توان تعداد لایه‌ها و ارقام رسانندگی مربوط به آنها و ضخامت‌ها را از برازش با دیاگرام‌های فازی برداشت شده تخمین زد. مثالی از تفسیر در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- استفاده از دیاگرام‌های مدل فازی در تفسیر داده‌های HLEM (الف) هشت داده فرکانسی HLEM با استفاده از APEX به دست آمده است، (ب) نگار حفاری، و (ج) معکوس سازی‌های مختلف با استفاده از مدل‌های ۲، ۳ و ۴ لایه (پالاکي ۱۹۹۱).

تعمیمی از تفسیر سونداژزنی عمقی عبارت است از پروفیل معکوس به‌جای داشتن یک مجموعه از داده‌های سونداژ؛ یک‌سری از ارقام رسانندگی ظاهری برای هر فاصله بین پیچ‌های و راستای دو قطبی در امتداد یک خط برداشت در بازه‌های معین به دست می‌آید. پروفیل رسانندگی ظاهری به دست آمده را می‌توان با استفاده از برنامه کمکی EMIX-MM که

EMIx34 PLUS (شرکت اینترپکس) خوانده می‌شود معکوس‌سازی نمود. خروجی نهایی عبارت است از یک شبه مقطع زمین‌شناسی دوبعدی که نشان‌دهنده رسانندگی‌های حقیقی و ضخامت‌های لایه در امتداد خط پروفیل می‌باشد. این مهم است که داده‌های کافی به‌منظور انجام برداشت‌های مناسب، هم از نظر فاصله و هم به صورت تابعی از عمق جمع‌آوری شود. برای دستیابی به سونداژزنی عمقی یا معکوس‌سازی پروفیل، حداقل سه فاصله جدایی بین پیچه‌ای مورد نیاز می‌باشد. داده‌های اضافی را می‌توان با افزودن EM34-3 ژئونیکس به EM31 و EM38 در جایی که لازم باشد به دست آورد. به‌منظور اطمینان از سازگاری دستگاه‌ها، باید هنگام استفاده از بیش از یک نوع دستگاه در یک خط، مطالعه مراقبت لازم در هم‌سنجی هر دستگاه را مبذول داشت.

۲-۲-۳-۴ قدرت تفکیک

مانند هر فن ژئوفیزیکی، باید توجه لازم در مورد قدرت تفکیک قابل دستیابی مبذول گردد. به طور مثال، در سامانه‌های دویپچه‌ای، اگر هدف، تکمیل موفقیت‌آمیز مطالعات باشد، باید عوامل متعددی را به‌حساب آورد.

سونداژزنی عمق رسانندگی زمین و پروفیل‌زنی، وقتی بهترین برآزش را به ساختارهای لایه‌دار افقی و یا کم شیب دارد که تباین رسانندگی قائم بین لایه‌ها زیاد باشد. به هر حال، در ژئوفیزیک زیست‌محیطی و مهندسی، فنون EM به طور فزاینده در ساختگاه‌های غیر ایده‌آل کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. معیار اظهار شده بالا (ساختگاه ایده‌آل) به ندرت قابل کاربرد می‌باشد زیرا ساختگاه‌ها اغلب ممکن است به وسیله ساختارهای روی زمین، لوله‌ها و کابل‌های قدیمی، ساختمان‌ها، مخازن، نرده‌های فلزی، نقطه نشانه‌های فلزی و غیره شلوغ شده باشد که هر کدام از آنها، اگر موجب از بین رفتن تحلیل‌های کمی نشود، ممکن است موجب ضعیف شدن کیفیت و کم شدن اعتماد پذیری آنها شود. در بعضی از موارد، اگر اثر بی‌هنجاری حاصل از ساختار منفردی مانند خط انتقال برق یا لوله قابل تشخیص باشد، می‌توان آنها را صافی‌سازی نمود.

به‌طور مثال، اثرات کناره در ارتباط با تغییرات شیب، یا حواشی ساختگاه‌ها در خاک‌برداری‌های قدیمی بر کیفیت داده‌ها اثر می‌گذارد. اگر وجود این عارضه‌ها از قبل معلوم باشد، بعضی از این اثرات را می‌توان در مرحله طراحی مطالعات حذف کرد.

عامل دیگری که باید توجه شود، احتمالاً قدرت تفکیک روش برای نوع هدف زیرسطحی است: هرچه هدف از حالت یک‌طرف بی‌نهایت با جنس همگن، نیم فضا (مثالی که فقط در کتاب‌های درسی وجود دارد) انحراف پیدا کند، آشکار ساختن آن مشکل‌تر است. به طور مثال، حالت مربوط به یک ساختار استوانه فلزی را در نظر بگیرید که در عمق ۲ متری زمینی همگن دفن شده است. این هدف، باید به‌آسانی با استفاده از EM31 و با شبکه برداشت با ایستگاه‌های نزدیک به هم تعیین محل شود. اما اگر از یک دستگاه EM34-3 با فاصله‌های بین پیچه‌ای ۴۰ متر استفاده شود، حجم زمین مورد اندازه‌گیری در مقایسه با برداشت زمین اندازه‌گیری توسط دستگاه EM31 به مقدار زیادی افزایش یافته و در نتیجه ممکن است استوانه تعیین محل نشود. مشابه آن، اگر یک هدف رساننده با قطر ۱ متر در عمق ۱۰ متری دفن شود، تشخیص آن با هر روش EM غیر محتمل است مگر اینکه بیشترین مراقبت به عمل آمده و ساختگاه واقعاً خالی از نوفه باشد. به‌علاوه، برای از دست ندادن شانس تعیین محل استوانه با ایجاد فاصله برداشت مناسب، باید از بازه‌های ایستگاهی ۱ متری استفاده شود. توجه بیشتر در تفسیر داده‌های

EM موقعیت هدف های زیر سطحی نسبت به فاصله دوقطبی های دویپچه ای می باشند. اگر یک برداشت با هر دویپچه ها در راستای خط برداشت (یک آرایش در خط) با فرستنده پیش از گیرنده انجام گیرد و یک بی هنجاری رسانندگی ظاهری ملاحظه شود، منبع بی هنجاری ممکن است واقعاً در مسیر خط برداشت قرارنگرفته باشد و با قطر ۱ متر در عمق ۱۰ متری دفن شود؛ تشخیص آن با هرروش EM غیر محتمل می باشد مگر اینکه بیشترین، بلکه در یک طرف قرار گیرد (شکل ۲-۱۲). این عمل، تعیین دقیق موقعیت هدف زیرسطحی مانند ستون معدنی را کاملاً مشکل می سازد. به این دلیل است که اغلب شخص متوجه می شود که موقعیت بی هنجاری رسانندگی ظاهری الزاماً با بی هنجاری مغناطیسی ناشی از همان هدف رساننده فلزی، مطابقت ندارد. این عدم تطابق ظاهری، موجب تفسیر غلط شده و عارضه از دست می رود. به منظور کمک به تعیین تغییرات جانبی در شرایط زیر ممکن است منطقی باشد که در بعضی از ساختگاه ها سیستم دویپچه ای را از حالت در خط به صورت خارج از خط چرخاند.

اگر اندازه گیری های رسانندگی ظاهری خیلی سریع و هنگام استقرار دستگاه انجام گیرد، ارقام بدون دقت به دست خواهد آمد و بنابراین از ارزش کلی برداشت های EM کاسته خواهد شد.

۲-۵ کاربردها و مطالعات موردی

گستره مطالعات موردی اکتشاف معدنی در نوشته ها بسیار وسیع بوده ولی مثال های مستند مربوط به محیط زیست به طور نسبی کم می باشد. درحالی که انواع مختلفی از دستگاه های EM قابل دسترسی می باشند، بیشترین مطالعات موردی زیست محیطی در ارتباط با سیستم های EM به شرکت ژئونیکس مربوط می گردد.

۲-۵-۱ بررسی های آب زیرزمینی

روش های الکترومغناطیسی، از اواخر دهه ۱۹۷۰، خود را به عنوان وسیله ای مناسب و پرتوان در بررسی های هیدروژئولوژیکی نشان داده اند. این روش ها در محیطه ای مؤثرند که تباین رسانندگی بالا بوده ولی شرایط سطح زمین طوری است که روش های ساده مقاومت ویژه DC را نمی توان به کارگرفت. این امر، به دلیل بالا بودن مقاومت سطحی زمین مثل مناطق خیلی خشک می باشد.

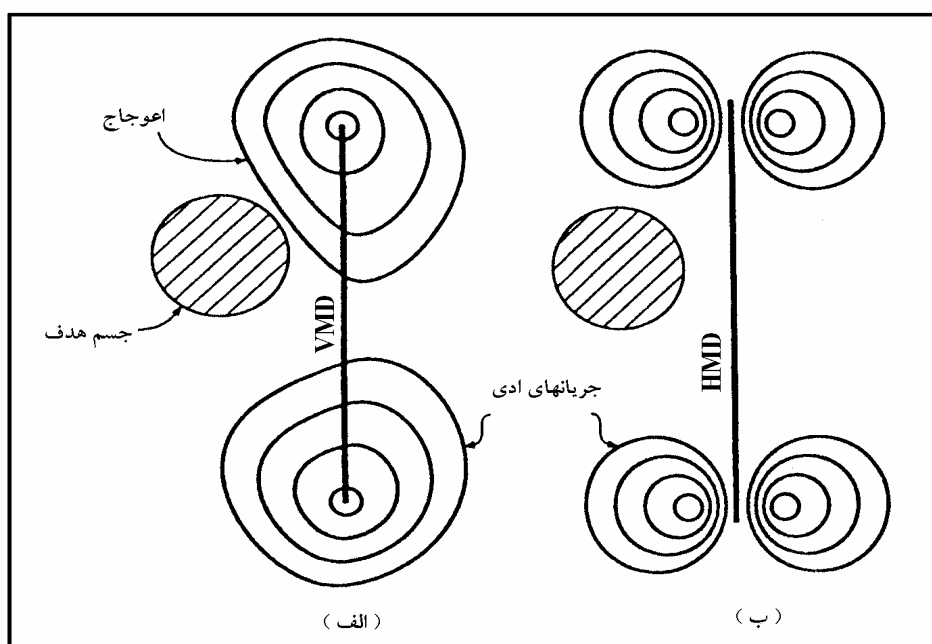
در این باره، دو رهیافت وجود دارد: یکی بررسی عمومی و رژیم های آب زیرزمینی در آبخوان ها و دومی جستجو در سنگ، برای شکاف هایی که ممکن است حاوی مخزن های کوچک ولی قابل استفاده از آب شرب باشند. معمولاً برای بررسی های نزدیک سطح در زمینه بررسی های هیدروژئولوژی، از روش های EM فرکانس - حوزه ای استفاده می شود. برای بررسی های عمیق تر، از روش های TEM استفاده می شود که بعداً شرح داده می شود.

گلدشتاین^۱ (۱۹۹۰) یک مثال موردی ارائه می کند که در آن، با استفاده از اندازه گیری های رسانندگی زمین، آب های آلوده ای را که از یک سری آبیگرهای انباره ای در محله کسترتون مرسد^۲ کالیفرنیا بیرون می زند مشخص می کند. زه آب های کشاورزی با

1 - Goldstein

2 - Kesterton Merced

مقادیر جزئی از سلیوم^۱ و عناصر دیگر سمی به داخل ۱۲ حوضچه انباره‌ای که در یک خط نبوده^۲ و جمعاً $5/2 \text{ Km}^2$ وسعت داشتند تخلیه شده بود. این حوضچه، در طول سال امکان سکونت پرندگان دریایی مهاجر و محلی را فراهم می‌ساخت. درجه بالای سلیوم در داخل زنجیره غذایی محلی، سبب بروز تغییر شکل فیزیکی در جمعیت پرندگان دریایی شده بود. مطالعات زیست‌محیطی بزرگ مقیاس جهت تعیین گسترش و درجه‌آلودگی آغاز شد تا بتوان طرحی برای اصلاح مخزن تهیه نمود.



شکل ۲-۱۲- تصویری برای نمایش تفاوت در جریان ادی (دید از بالا) تولید شده (الف) توسط دوقطبی مغناطیسی قائم (ب) دوقطبی مغناطیسی افقی (استویر ۱۹۸۹) یک هدف رساننده (مقاوم) در یک محیط مقاوم (رساننده) جریان‌های ادی راحت‌تر از مقطع برداشت تغییر شکل خواهد داد.

رسانندگی‌های آب زیرزمینی غیرآلوده محلی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ mS/m بود که با رسانندگی‌های آب زیرزمینی آلوده که به ۱۷۰۰-۱۰۰۰ mS/m می‌رسید، مغایرت داشت. با استفاده از یک‌سری گمانه‌های محلی، معلوم شد که آلودگی تا عمق کمتر از ۴۰ متر و اغلب در اطراف ۲۰ متر محدود می‌باشد.

1 - Selenium
2 - Unlined

اندازه‌گیری‌های رسانندگی زمین در سال ۱۹۸۷ در امتداد یک‌سری از خط‌های برداشت (شکل ۲-۱۳- الف) توسط دستگاه‌های GCM ساخت ژئونیکس (EM31 و EM34) انجام شده است. نقشه‌های رسانندگی ظاهری برای هر دستگاه و هر فاصله معین پیچه‌ای (آرایش دوقطبی مغناطیسی افقی) (شکل ۲-۱۳- ب تا د) تهیه شد. برای حذف اثرهای عوارض رسانی نزدیک سطح، مقادیر رسانندگی ظاهری با استفاده از فاصله‌های بین پیچه‌ای ۲۰ و ۴۰ متر به دست آمده و با استفاده از تکنیکی که توسط مک نیل (۱۹۸۵) شرح داده شده، پردازش گردید. مقدار رسانندگی به دست آمده از فاصله پیچه‌ای ۴۰ متر دو برابر شده و مقدار رسانندگی به دست آمده از فاصله پیچه‌ای ۲۰ متر از آن تفریق گردید تا مقدار رسانندگی ظاهری جدیدی به دست آمد و این مقدار روی نقشه نمایش داده شد (شکل ۲-۱۳ - ه). به‌طوری‌که دیده می‌شود، بی‌هنجاری‌هایی که در نقشه مربوط به داده‌های پردازش شده آمده، خیلی متراکم‌تر از هریک از نقشه‌های رسانندگی ظاهری برای دو فاصله پیچه‌ای جداگانه است. تفسیر نهایی این داده‌ها در شکل ۲-۱۳ و نشان داده شده است. زون A مقادیر رسانندگی زمینه نرمال را نشان می‌دهد. این مقادیر (۲۰۰-۱۵۰ mS/m) مقادیر بالایی هستند ولی نوع خاک‌های منطقه‌ای محلی که درجه شوری زیادی دارند، سازگاری دارند. بالاترین مقادیر رسانندگی ظاهری (>400 mS/m) مجاور به حوضچه‌های ۱ و ۲ (حوزه B در شکل ۲-۱۳- و) یافت می‌شود. تعبیر و تفسیر نشان می‌دهد که لبه پیشرفت زبانه (لکه) آلوده جایی است که مقادیر اندازه‌گیری شده رسانندگی ظاهری، توسط فاصله پیچه‌ای ۴۰ متر به مقادیر زمینه تمایل پیدا می‌کند. این، نشان می‌دهد که جبهه این زبانه در حدود ۳۵۰ متری شرق زهکش سن لویی^۱ قرار دارد. به نظر می‌رسد که بی‌هنجاری C با خاک، با شوری زیاد ارتباط داشته و با محدوده‌ای که در فصول بارانی روی عکس‌های هوایی ظاهر می‌شود، به‌صورت زون تراوش شده^۲ همبستگی دارد. منطقه D، قسمتی از این زبانه شور است ولی به منطقه‌ای که درست در نزدیکی زمین زهکشی است محدود می‌شود. یک زون با رسانندگی کم (منطقه E) در نزدیکی حوضچه ۱ مشخص شده است. به نظر می‌رسد که آب باران محلی در این محدوده (E)، اثر گذاشته و باعث رقیق شدن زبانه شور گشته، زیرا آب زهکشی در طول دو سال قبل از انجام این بررسی، به حوضچه ۱ اضافه نشده است. محدوده F، یک زون با رسانندگی بالاست که به اعماق پایین‌تر رسوخ کرده و به نظر می‌رسد که زبانه‌ای از آب آلوده است که باقی‌مانده آب شور زهکشی قبل از سال ۱۹۸۵ باشد. به نظر می‌رسد زون G که دارای پوشش گیاهی غیرعادی است، حاصل یک عارضه نزدیک سطحی رسانا باشد که به زبانه آلوده ارتباط نداشته ولی احتمالاً تابع فرایندهای شوری خاک محلی می‌باشد.

مونه - ویلیامز و همکاران^۳، بررسی یک زبانه شیرآب‌های^۴ را شرح می‌دهند که از یک محل دفن زباله شهرداری در نزدیکی نووهوریزانت^۵، در ۴۸۴ کیلومتری شمال غربی سائوپالو در برزیل، خارج شده است. موقعیت این محل در شکل ۲-۱۴ آورده شده است. زباله‌ریزی از حدود ۵ سال قبل از این بررسی در حال انجام بوده است. یک چاه در خانه کشاورزی محلی در شمال شرقی، محل دفن زباله آلوده شده بود. زمین‌شناسی محلی شامل رسوب‌های غیر متراکم کرتاسه و آرژیلیتی است که

1 - San Luis Drain

2 - Bleached

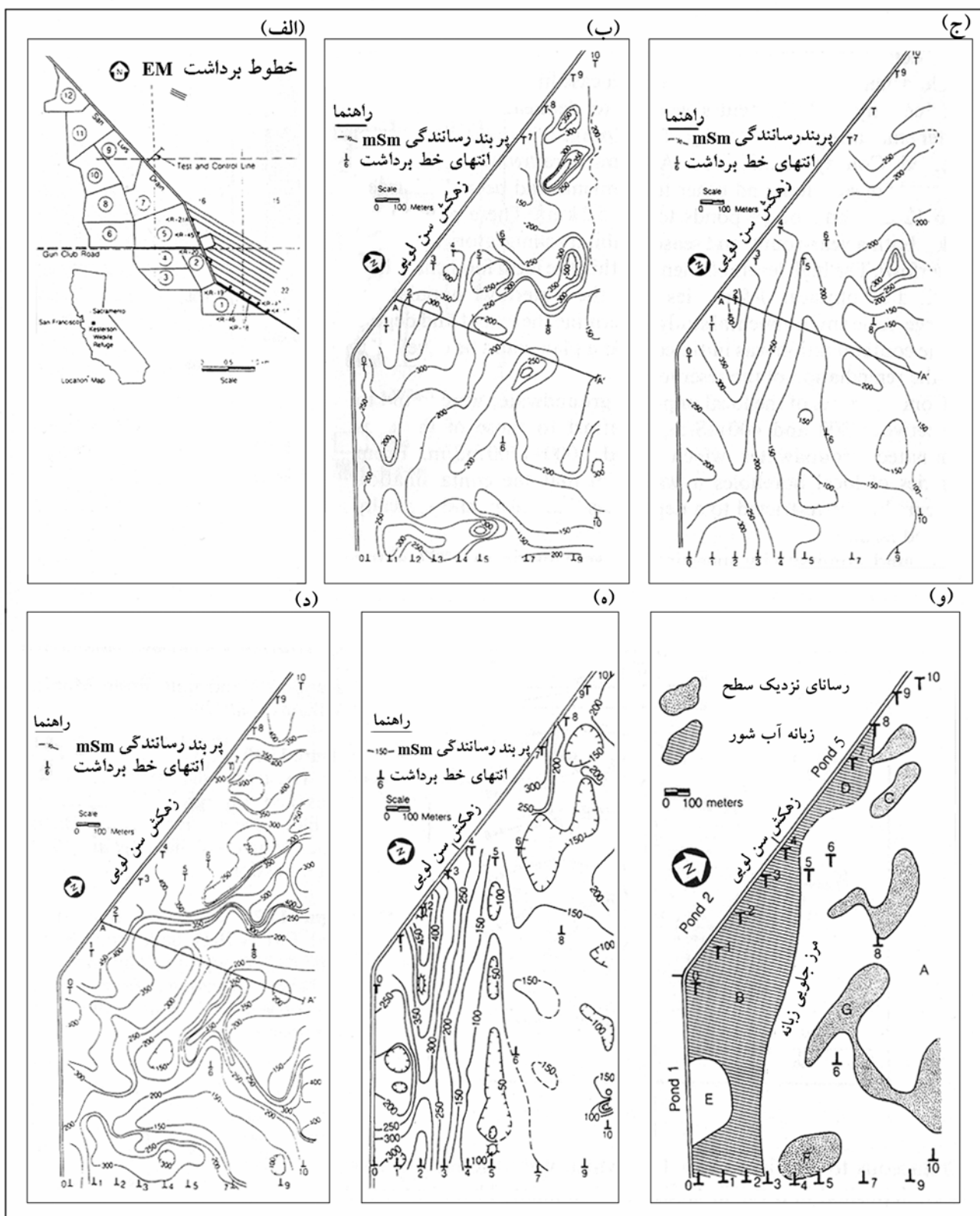
3 - Monier - Williams et al.

4 - Leachate

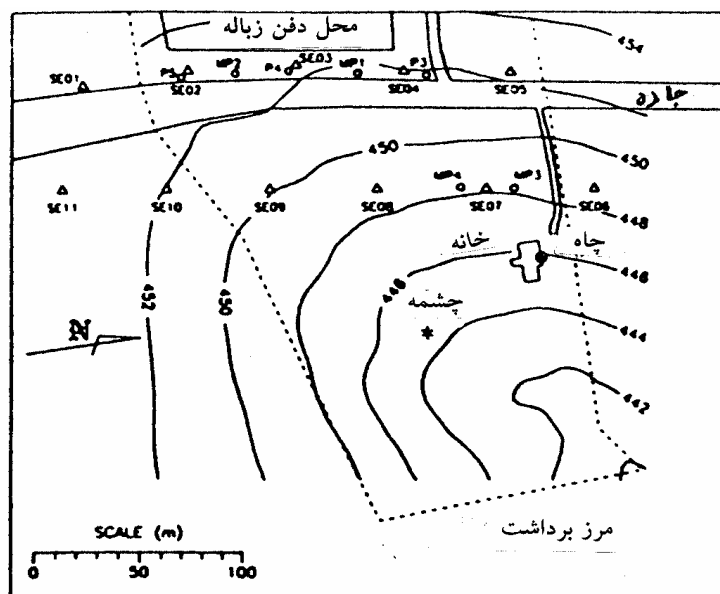
5 - Novo Horizonte

به نظر می‌رسد در یک محیط رودخانه‌ای - دریاچه‌ای رسوب یافته‌اند. این رسوب‌ها، به‌طور ناپیوستگی (ناهمسازی)^۱ روی بازالت‌ها قرار گرفته‌اند. از روی توپوگرافی محلی و اطلاعات به دست آمده از یک‌سری پیزومترها، معلوم شده است که گرادیان آب زیرزمینی از محل دفن زباله به طرف خانه کشاورزی است. از اطلاعات سایر گمانه‌ها، رسانندگی‌های بین $20-50 \mu S/Cm$ برای آب زیرزمینی غیرآلوده به دست آمده است. سونداژزنی مقاومت ویژه نیز در این منطقه انجام شده است (در محل‌هایی که در شکل ۲-۱۴ با مثلث نشان داده شده است).

نتایج این سونداژزنی‌ها و برداشت‌های رسانندگی EM در امتداد همان خط‌ها، در شکل ۲-۱۵ الف و ب نشان داده شده است. از این شکل‌ها، واضح است که زیر لایه خاکی و دور از آلودگی، در داخل ماسه‌های بدون رس مقاومت ویژه‌های بالا وجود دارد. یک افق رسی در هر مقطع، در زیر تراز $432m$ دیده می‌شود. آلودگی باعث می‌شود که مقاومت ویژه‌های کمتر از $40 \Omega m$ در ماسه بالایی پیدا شود که در فصل مشترک ماسه - رس به $250-200 \Omega m$ افزایش می‌یابد. رسانندگی‌های ظاهری بالا که در دو مقطع EM پیداست، به‌طور کامل بالکه (زبان) رس‌انا که از محل دفن زباله خارج می‌شود سازگاری دارد. نقشه‌هایی که مقادیر رسانندگی ظاهری اندازه‌گیری شده و تصحیح توپوگرافی شده را نشان می‌دهند، به ترتیب در شکل ۲-۱۶ الف و ب نشان داده شده‌اند. این مقادیر، توسط دستگاه EM34-10H اندازه‌گیری شده و برحسب واحد دسی‌بل نشان داده شده‌اند. داده‌های تصحیح توپوگرافی یافته، وجود محدوده‌ای رساناتر بین گوشه شمال شرقی محل دفن زباله خانه کشاورزی را نشان می‌دهد.



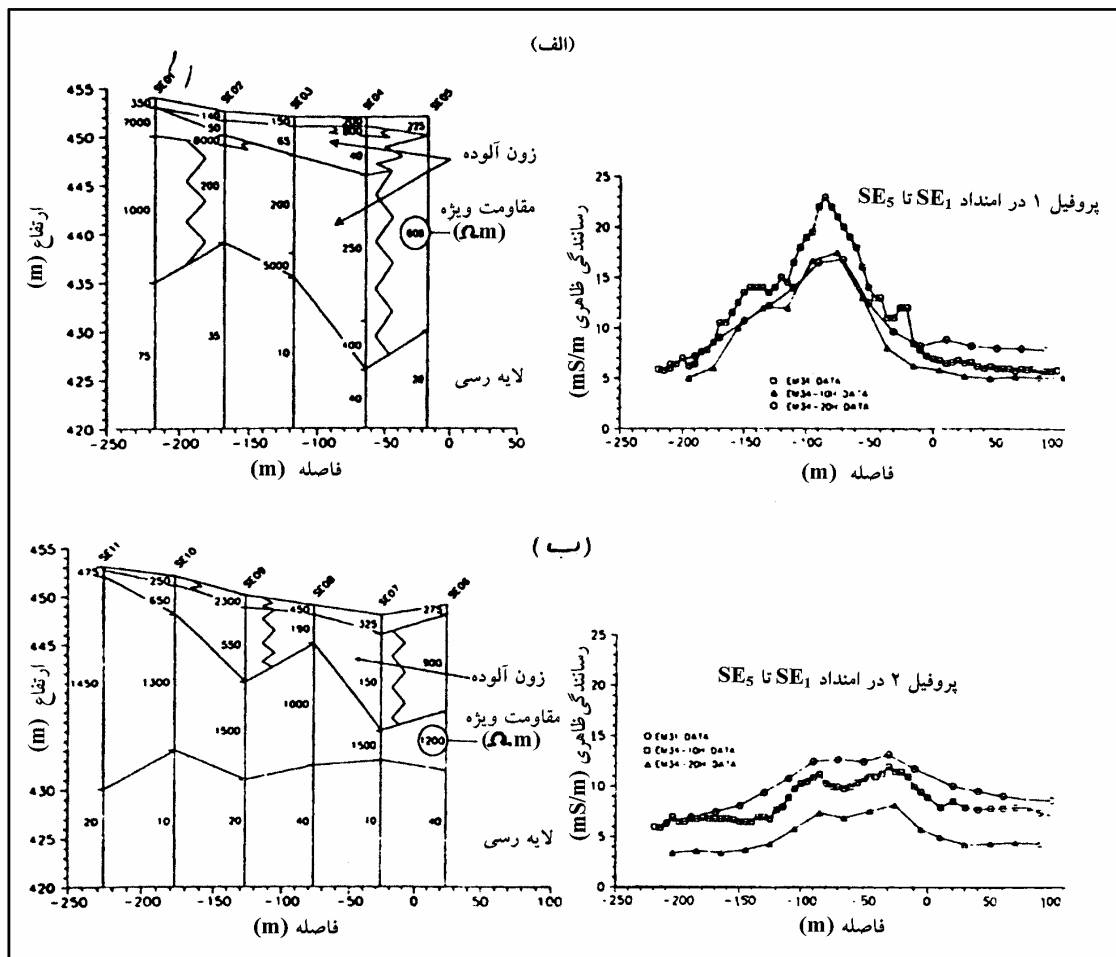
شکل ۲-۱۳- (الف) نقشه موقعیت، (ب) تا (د) یک سری نقشه‌های هم‌رسانندگی، (ه) نقشه‌های هم‌رسانندگی داده‌های پردازش شونده، و (و) نقشه تفسیری در کستر تون کالیفرنیا



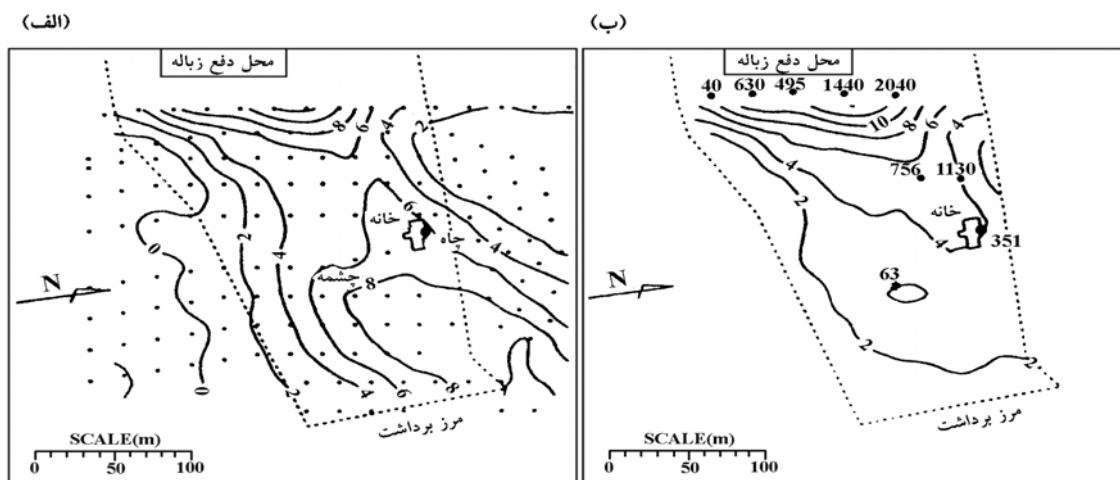
شکل ۲-۱۴- نقشه موقعیت محل دفن زباله شهرداری نوهووریزانت و مزرعه و چاه نزدیک آن

۲-۵-۲-۲ آشکارسازی حفره‌های زیرزمینی

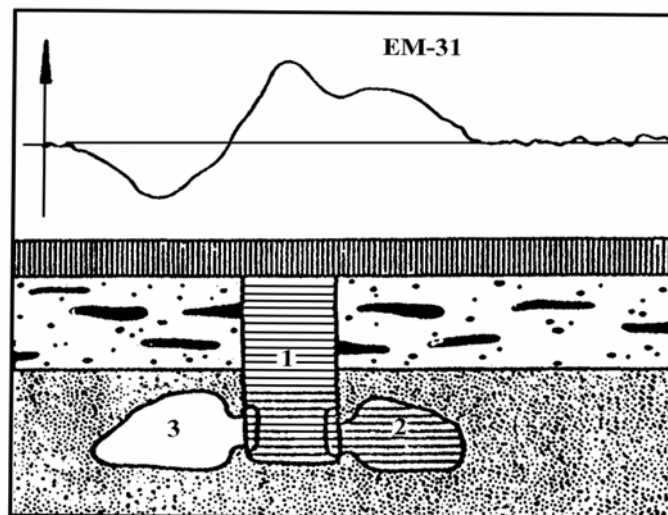
در طول یک بررسی عمده درمورد تاریخ زیست‌شناختی بشر در خاور نزدیک، یک رسانندگی سنج زمینی از نوع EM31 ژئونیکس به کار گرفته شد. این کار، جزیی از مطالعه باستان‌شناسی در باب الزهرا در اردن بود (فرولیش و لنکستر ۱۹۸۶). هدف از این کار، تعیین محل و تشخیص وضعیت شافت‌ها^۱ و حجره‌های مقبره بود. نمونه‌ای از یک پروفیل رسانندگی ظاهری بر روی عارضه‌ای که بعداً معلوم شد یک شافت و دو حجره دفن بوده‌اند در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. در حجره‌ای که سیلتی شده بود، مشاهده گردید که رسانندگی ظاهری نسبت به مقدار زمینه کمی بالاتر بود و در جایی که حجره دست‌نخورده مانده بود (پر از هوا)، رسانندگی ظاهری پایین مشاهده شد. با به نقشه‌درآوردن محل حفاری‌های باستان‌شناسی توسط EM31، زون‌های ناهنجار مختلفی تشخیص داده شد. از هفت محلی که توسط حفاری مستقیم امتحان شد، همه چاه‌های مقبره پرشده‌ای بودند که حدود ۱/۵ متر پهنا و حدود ۲ متر عمق داشتند. هرچا حفره‌ها نسبت به عمق آنها بزرگ باشد و بین حفره و مواد، میزبان تباین الکتریکی خوبی وجود داشته باشد، عارضه‌های قابل آشکارسازی خواهند بود. ولی حفره‌های کوچک با تباین رسانندگی پایین که در عمق دفن شده‌اند احتمال آشکارسازی نخواهند داشت.



شکل ۲-۱۵- تفسیرهای سونداژزنی شلومبرژه مقاومت ویژه پروفیل‌های رسانندگی
زمینی EM در نووهوریزانت برزیل



شکل ۲-۱۶- (الف) داده‌های اندازه‌گیری شده EM34-10H ، و (ب) همان داده‌ها که در نووهوریزانت برزیل
تصحیح توپوگرافی یافته‌اند.



شکل ۲-۱۷- پروفیل رسانندگی ظاهری روی شافت مقبره در باب الزهرا. شافت (۱) که به اطراف حجره‌های (۲ و ۳) دفن شده می‌رسد، رسانندگی ظاهری بالایی دارد. حجره سیلتی شده (۲) و حجره پراز هوا (۳) به ترتیب دارای رسانندگی‌های ظاهری متوسط و پایین هستند.

۲-۵-۳- تعیین محل زمین یخ زده^۱

در مناطقی که تحت تاثیر زمین‌های یخ‌زده گسترده می‌باشند، از نظر مهندسی بسیار مهم است که این زمین‌ها از زمین‌های یخ‌زده تمیز داده شوند. در قطب، وقتی پروژه‌های عمده مثل خطوط لوله طرح‌ریزی می‌شوند، تعیین موقعیت زمین یخ‌زده‌ای که با یخ پیوند دارد بسیار مهم است. در زمین یخ‌زده جامد، برداشت‌های مقاومت ویژه به خاطر مشکلات فروکردن الکترودها و تزریق جریان، محدودیت دارد. در نتیجه، روش‌های دیگر القائی و بدون تماس کاربرد علمی زیادی دارند. این موضوع در دو مثال موردی اول شرح داده می‌شود. در حالی که لرزه‌نگاری بازتابی در برداشت‌های سطح آب کاربرد دارد، پروفیل‌زنی دوپچه‌ای EM را می‌توان خیلی سریع‌تر در پوشش زمینی به کار برد. نمونه‌ای از این کار، در مثال موردی سوم آورده شده است. مروری بر روش‌های ژئوفیزیکی در بررسی‌های زمین‌های یخ‌زده دائمی توسط اسکات و سایرین^۲ (۱۹۹۰) داده شده است.

مورد اول استفاده از دستگاه ژئونیکس EM31 را شرح می‌دهد که روش بسیار سریعی را در به‌نقشه درآوردن گسترش زمین یخ‌زده و یخ‌زده در مصب رودخانه مکنزی، (نواحی شمال غربی) در اختیار قرار می‌دهد (تاد و سایرین^۳ ۱۹۹۱). یک پیمایش ۵ کیلومتری روی یخ، در کانال کوچکی در مصب رود و روی توندرای^۴ یخ‌زده در سرتاسر دریاچه یخی انجام گرفت. پروفیل رسانندگی ظاهری در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. مقادیر رسانندگی ظاهری در حدود ۱/۵ mS/m روی زمین یخ‌زده جامد

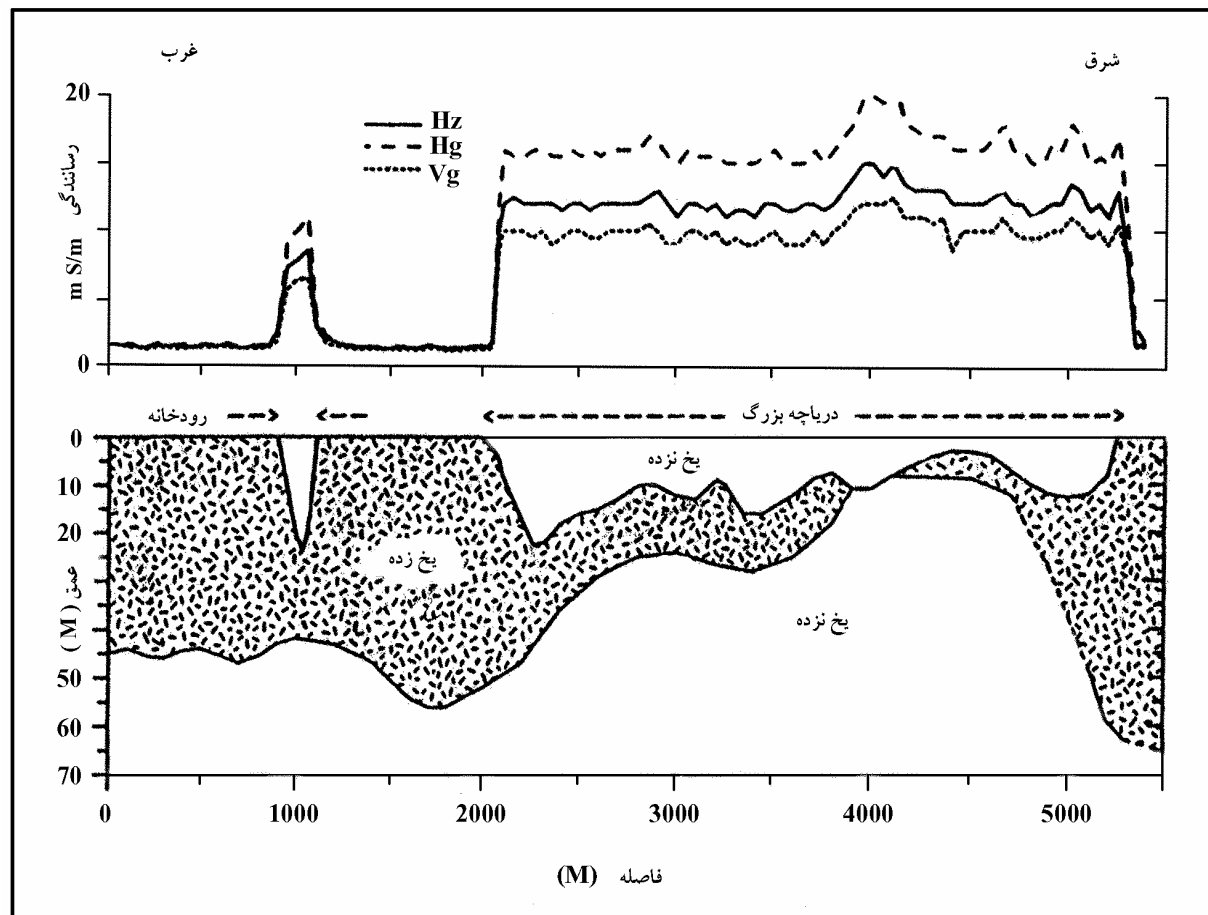
1 - Permafrost

2 - Scott et al.

3 - Todd et al.

4 - Tundra

و 10 mS/m روی رسوب‌های یخ‌نرزه و روی آب به دست آمد. گسترش‌های جانبی قسمت‌های یخ‌نرزه یا یخ‌نرزه، روی یا نزدیک سطح زمین، با تغییرات واضح در مقادیر اندازه‌گیری شده رسانندگی ظاهری کاملاً همبستگی دارد.



شکل ۲-۱۸- پروفیل‌های رسانندگی ظاهری که توسط دستگاه ژئونیکیس EM-31 روی بخشی از مصب رودخانه مکنزی کانادا به دست آمده است. این پروفیل‌ها، نواحی را که تحت تاثیر زمین یخ‌نرزه قرار گرفته نشان می‌دهد.

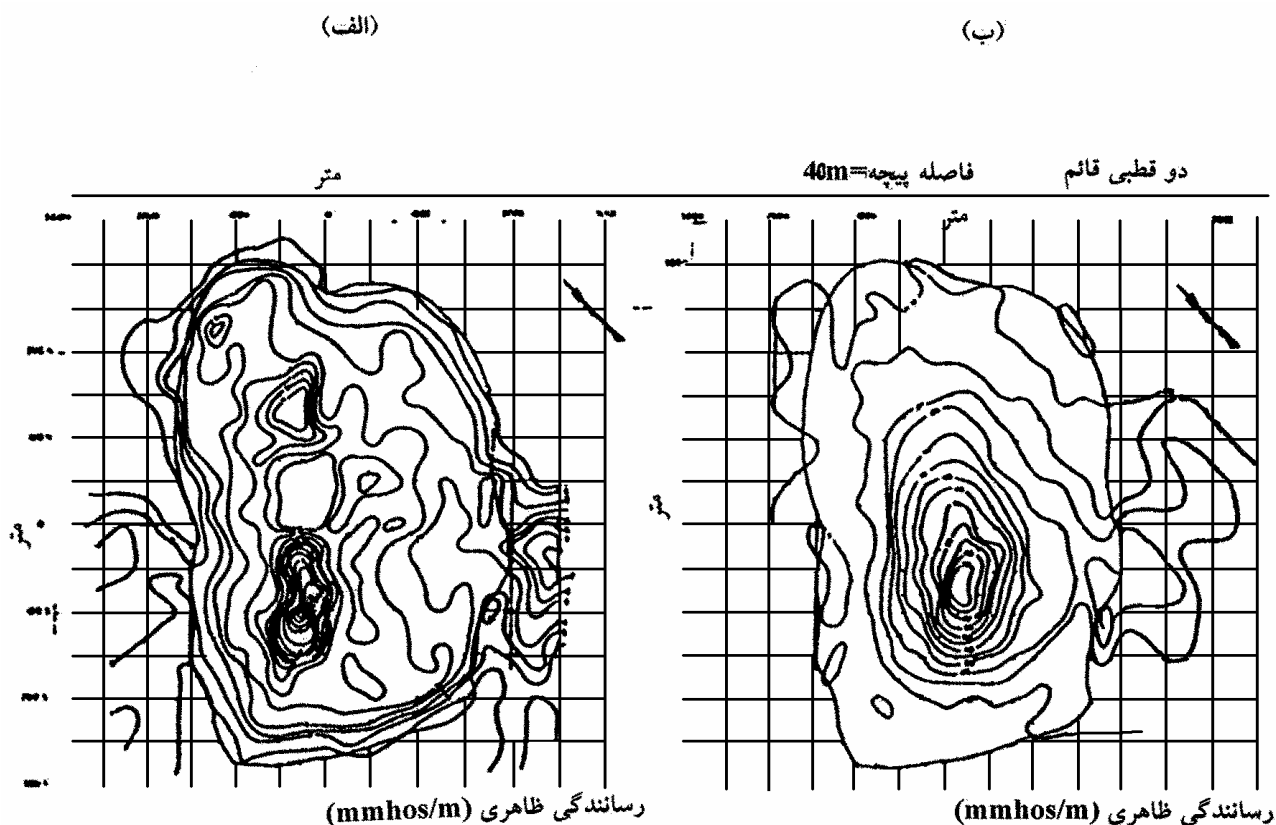
نمونه دوم که توسط سینا و استفنز^۱ (۱۹۸۳) تهیه شد، برداشت رسانندگی زمین توسط EM را روی دریاچه زهکشی شده در ایلیسارویک^۲، (اراضی شمال غربی کانادا) شرح می‌دهد. هر دو دستگاه EM-31 و EM-34 (با هر سه فاصله پیچ‌های) روی

1 - Sinha and Stephens

2 - Illisarvik

شبکه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۶۰۰ متر و در مراکز ۲۵ متری به کار گرفته شد. داده‌های رسانندگی ظاهری از هر دو قطبی‌های مغناطیسی قائم و افقی برای هر سه فاصله پیچه‌ای پربندی شده و شش نقشه رسانندگی ظاهری به دست آمد. نمونه‌هایی از نقشه‌های EM-31 و EM34 VMD در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است. یک بی‌هنجاری رسانندگی ظاهری که مرکز آن در اطراف نقطه ۲۵ متری غرب و ۱۰۰ متری جنوب قرار دارد، به‌طور واضح دیده می‌شود.

جزیی از این بی‌هنجاری، به باقی‌مانده حوضچه آب سطحی ارتباط دارد. ولی توجه کنید که مرکز بی‌هنجاری رسانندگی روی مجموعه داده‌های با فاصله پیچه‌ای ۴۰ m در نقطه ۲۵ متری شرق و ۷۵ متری جنوب قرار گرفته است. تصور می‌رود که این موضوع به زونی که بخشی از رسوبات آن یخ‌زده است ارتباط دارد. این رسوبات در بستر دریاچه، سه سال قبل از انجام برداشت ژئوفیزیکی و پس از زهکشی مصنوعی به تدریج یخ‌زده‌اند. سینا و استفنز با انجام مدل‌سازی‌های ساده روی داده‌های رسانندگی، تخمین زدند که لایه یخ‌زده در قسمت مرکزی منطقه دریاچه قبلی بین ۱۱ و ۲۳ متر ضخامت دارد، ولی روبه طرف خطوط ساحلی قبلی ضخیم‌تر می‌شود. این زهکشی دریاچه، یخ‌زدگی رسوب‌های زیر دریاچه را ممکن ساخته است.



شکل ۲-۱۹ - نقشه‌های رسانندگی ظاهری ایلیسارویک مناطق شمال غرب کانادا (الف) به دست آمده توسط دستگاه EM31 (ب) به دست آمده توسط دستگاه EM34-3 با فاصله بین پیچه‌ای ۴۰ متر.

در مناطقی که یخ دریاچه‌ای یا دریایی به عنوان سطحی مناسب کار وجود دارد، می‌توان از اندازه‌گیری‌های EM زمینی روی آب دریا، برای تعیین اطلاعات زمین‌شناختی زیرکف استفاده کرد. نمونه‌ای از یک محل که چنین رهیافتی در آن انجام شده، موردی است که توسط پالاکی و استفنز^۱ (۱۹۹۲) شرح داده شده است. عملیات صحرایی، با استفاده از دستگاه لوپ افقی EM توسط سازمان زمین‌شناسی کانادا روی یخ دریایی بوفورت شلف^۲ صورت گرفته است. در این عملیات، بین ۶۰ تا ۸۰ سونداژ در روز انجام شد. برای مقایسه نتایج، اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای بازتابی و شکست مرزی نیز همراه با حفر تعدادی چاه اکتشافی انجام گردید. لایه‌های یخ و آب برحسب ضخامت و رسانندگی مشخص شده است. یخ دریایی مقاوم است ($5000 \Omega m$)، و برخلاف آب دریا و رسوب‌های اشباع از آب دریا ($1 \Omega m$)، زمین یخ‌زده زیر کف که بایخ پیوند دارد نیز مقاوم است ($5000 \Omega m$)، درحالی که رسوب‌های یخ‌زده به‌طور متوسط مقاومت ویژه $2 \Omega m$ داشتند.

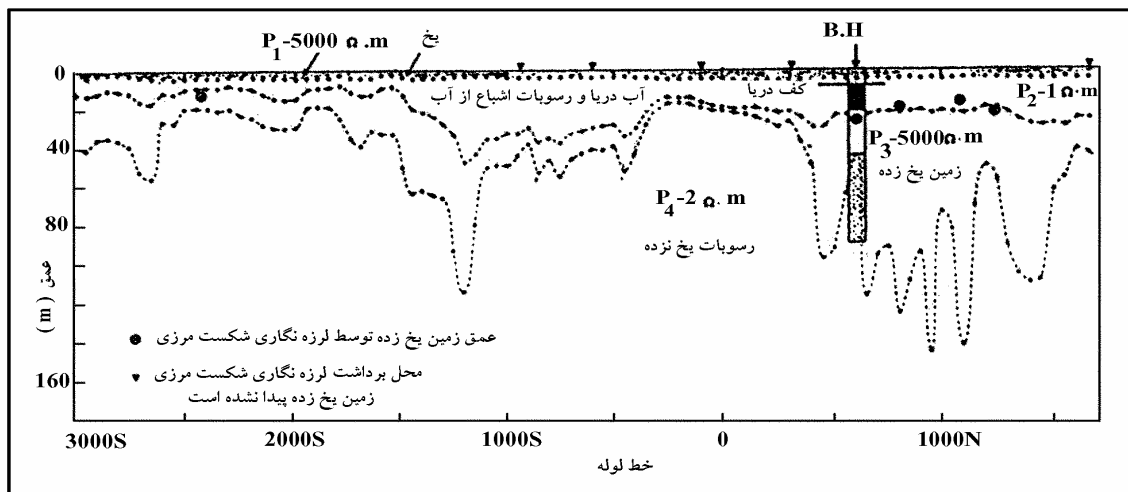
نمونه‌ای از یک پروفیل در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است. آب دریا و رسوب‌های اشباع از آب دریا از هم تفکیک نشده‌اند زیرا بین مقاومت ویژه‌ها تباین کافی وجود نداشته است. عمق تا سرزمین یخ‌زده که با یخ پیوند دارد، توسط علامت‌های ضربدر داخل دایره مشخص شده است. داده‌های لرزه‌ای بازتابی در این منطقه، به مقدار محدودی به کار رفته زیرا انباشت‌های گاز در عمق کم در داخل رسوب‌های کم‌عمق نزدیک سطح پدیده حذف آکوستیکی^۳ ایجاد می‌کند. یک چاه اکتشافی در نقطه‌ای که عمق آب ۱۰ متر بود تا ۷۵ متر زیر کف دریا حفر گردید. ۱۰ متر بالای رسوبات، از رس ماسه‌ای اشباع از آب تشکیل یافته بود. قسمت زمین یخ‌زده با پیوند یخی به‌صورت ماسه‌ریز تا متوسط بین ۱۰ تا ۳۶ متر زیر کف دریا مشخص شد که در زیر آن رس سیلتی و یک واحد ماسه‌ای قرار داشت. چاه اکتشافی توسط سونداژهای لرزه‌نگاری، پرتو گاما و EM نگاربرداری شد. سوند چاه نگاری EM از نوع ژئونیکس EM39 با دوپیچه هم محور به فاصله ۰/۵ متر از هم بود.

تفسیر HLEM با نتایج نگاربرداری EM و نتایج چینه‌شناسی چاه آزمایشی مقایسه شد که در شکل ۲-۲۱ (به ترتیب از الف تا ج) آمده است. درون افق زمین یخ‌زده، مقادیر رسانندگی پایین، مربوط است به واحدهای غنی از ماسه درحالی‌که رسانندگی‌های بالا به افق‌های رس سیلتی ارتباط دارد. واضح است که تفسیر HLEM و نتایج چاه اکتشافی خیلی خوب همبستگی دارند، به‌طوری که هر سه شکل، قاعده افق زمین یخ‌زده را در عمق ۳۶ متر زیر کف دریا نشان می‌دهند. عمق‌های شکست‌مرزی لرزه‌ای تا سر افق زمین یخ‌زده، با تفسیر داده‌های HLEM مطابقت مناسب دارند. این مثال موردی نمونه بسیار خوبی از کارایی روش EM و اطمینان بخشی نتایج آن روی این نوع محیط‌های زمین‌شناختی است. از نظر علمی، روش HLEM ثابت کرد که در شرایط بسیار سرد (تا عمق $30^\circ C$ -) سریع‌تر و آسان‌تر عمل می‌کند، هرچند درجه حرارت‌های پایین، قدرت باطری‌ها، مسئله‌ساز خواهند بود.

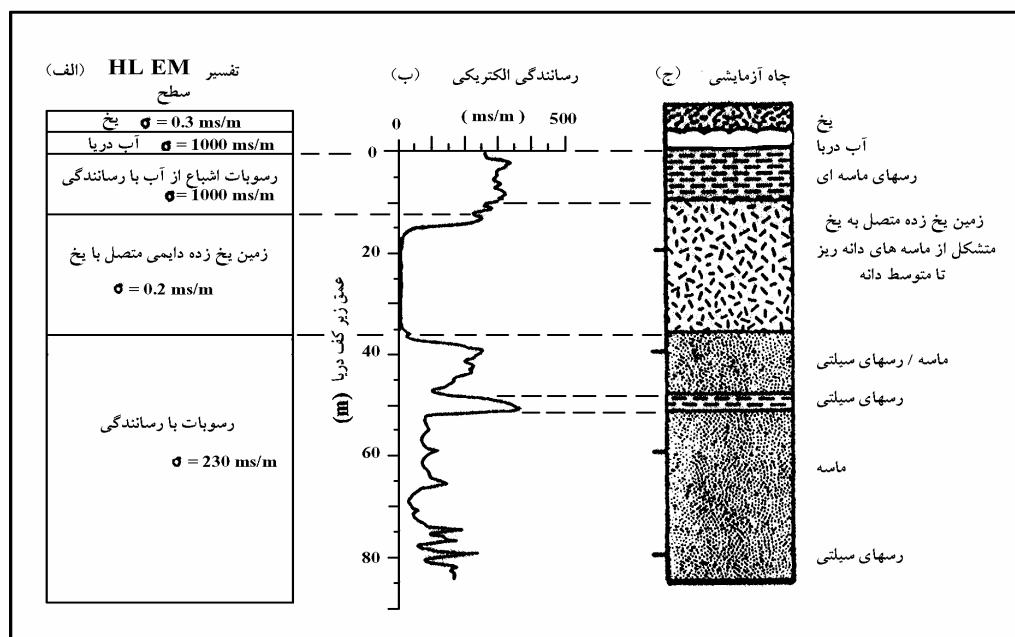
1 - Palacky and Stephens

2 - Beaufort Shelf

3 - Acoustic Blanking



شکل ۲-۲۰- مقطع رسانندگی یک پروفیل ۵ کیلومتری روی بوفورد شلف، اراضی شمال غرب کانادا که با استفاده از دستگاه لوپ افقی EM (HLEM) کارخانه Apex Max Min I انجام شده است. علایم دایره پر، از تفسیر روش لرزه‌ای شکست‌مرزی به‌دست آمده و عمق بالای لایه یخی را نشان می‌دهد. مثلث‌ها، برداشت‌های شکست‌مرزی را در نقاطی که زمین یخ‌زده وجود نداشت نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۱- (الف) مدل رسانندگی بدون محدودیت که از چاه آزمایشی شکل ۲-۲۰ به‌دست آمده است، (ب) پروفیل رسانندگی که از نگاربرداری چاه آزمایشی توسط دستگاه EM39 ژئونیکس با سوندهای دوپیچه‌ای به‌دست آمده است، و (ج) نتایج چینه‌شناسی حفاری.

۲-۲-۴ به نقشه درآوردن زمین آلوده

به نقشه درآوردن با دستگاه EM دو پیچه‌ای، وسیله سریعی است برای برداشت مقرون به صرفه و بدون خطر محیط‌زیستی در محل‌هایی که احتمالاً آلودگی شدید دارند. اداره پژوهش راه‌آهن بریتانیا، یک برداشت آزمایشی ترکیبی از دستگاه EM و مغناطیس‌سنج برروی زمینی به ابعاد 50×50 متر در کارگاه جوشکاری راه‌آهن ریخته‌گری آهن بوده ولی نقشه‌های موجود قابل اطمینان نبود. روش‌های ژئوفیزیکی برای یافتن مجهولات، قدیمی در دینس‌دال^۱، تی‌ساید^۲ و بریتانیا (رینولدز ۱۹۹۴) انجام داد. قسمتی از این کارگاه قبلاً محل قدیمی خصوصاً برای تعیین محل آثار ریخته‌گری آهن به کار گرفته شد. به جز خطوط واضحی که زمانی محل خطوط آهن بوده است ولی با بالاست^۳ راه‌آهن شامل سنگ آهک و دولریت خرد شده پوشیده شده بود، زمین، بدون عارضه بود. این دو نوع مواد در خطوط معین قرار گرفته بودند.

یک دستگاه EM31 روی شبکه 1×1 متر و 2×1 متر در محدوده به کار گرفته شد، و هر دو مؤلفهٔ تربیعی و هم‌فاز ثبت گردید. علاوه بر این، شدت میدان مغناطیسی زمین در دو ارتفاع مختلف از سطح زمین اندازه‌گیری شد و اختلاف بین آنها به صورت گرادیان قائم محاسبه گردید. تصویر ایزومتریک (مکعبی) رسانندگی ظاهری، مؤلفهٔ هم‌فاز و گرادیان مغناطیسی به ترتیب در شکل ۲-۲۲ الف تا ج نشان داده شده است. در هر سه شکل، اثر یک داربست فلزی که برای حرکت دادن خطوط آهن جوش داده شده به کار می‌رفته، به طور واضح مشاهده می‌شود. علاوه بر اثرات این داربست، بی‌هنجاری‌های متعددی در شکل‌ها وجود دارند. مثلاً در شکل الف (رسانندگی)، شش زون رسانا وجود دارد (A تا F)، ولی تنها بی‌هنجاری A روی داده‌های هم‌فاز دیده می‌شود، که نشان می‌دهد عارضه به وجود آورندهٔ آن، هم رسانا و هم فلزی است (زیرا مؤلفهٔ هم‌فاز خصوصاً به اجسام فلزی حساس است). سایر بی‌هنجاری‌ها (B تا F) نیز در این شکل دیده نمی‌شوند، که نشان می‌دهد اثر آنها به علت وجود مواد زیر زمینی رساناست که غیرفلزی هستند. این تفسیر، با نتایج برداشت گرادیان سنج مغناطیسی (شکل ج) مطابقت دارد که در آن، بی‌هنجاری A بازهم به خوبی نمایان است.

خاکبرداری مستقیم در هریک از این زون‌ها نشان داد که بی‌هنجاری A یک‌سری تیر حمال فولادی به شکل I در داخل بتن مسلح است که در عمق ۱ متری دفن شده‌اند. پهنای بی‌هنجاری ۱۲ متر بود و پی بتنی (با قطعه زیرین توخالی آن) ۱۱ متر پهنای داشت و در داخل محدوده بی‌هنجاری قرار گرفته بود. علاوه بر این، آنجا که بی‌هنجاری A از داخل بی‌هنجاری D عبور می‌کند، معلوم شد که پی بتنی متوقف شده و تکه‌پاره‌های سولفوری جوش ظاهر می‌شود. سولفور از جوش شسته شده و روی جوش تشکیل کریستال‌های زردرنگ داده و ظاهراً رسانندگی‌های بالا را به وجود آورده است. بی‌هنجاری‌های E و F نیز معلوم شد که در اثر تکه‌پاره‌های جوش سولفوری باشند. معلوم شد که بی‌هنجاری‌های B و C معلوم شد که اثر تپه‌های خاکسترهای نرم دفن شده می‌باشند.

بی‌هنجاری‌های خطی مشاهده شده برروی هر سه مجموعه داده‌ها به مواد بالاست سطحی ارتباط دارند. جهت‌گیری این بی‌هنجاری‌ها، دقیقاً موازی خطوط قبلی راه‌آهن است. معلوم شد که یکی از عوارض خطی (L_1) با کانال عبور کابلی که به

1 - Dinsdale

2 - Tesside

3 - Ballast

جعبه فلزی (در سطح زمین ختم می‌شود) ارتباط دارد. دامنه اثر این کانال روی داده‌های رسانندگی رو به طرف جعبه فلزی محو می‌شود. چنین می‌توان تصور کرد که این اثر، از نظر افزایش عمق دفن کانال‌کشی در زیر بالاست روبه طرف جعبه باشد. هیچ اثری از لوله کانال‌کشی، نه روی زمین و نه در سه مجموعه داده‌ها در فاصله بین جعبه و محل بی‌هنجاری A مشاهده نشد. در شکل ۲-۲۲- الف نیز دیده می‌شود که هیچ بی‌هنجاری رسانندگی روی این زون وجود ندارد. علی‌رغم اینکه این محل بالقوه دارای نوفه نیز است، و با وجود اینکه بالاست منطقه را پوشانده، برداشت‌های EM و مغناطیسی نشان داد که نه تنها این روش‌ها را می‌توان برای تعیین محل مواد بی‌هنجار در زیر سطح زمین به کارگرفت، که می‌توان انواع مواد را از هم تشخیص داد.

۲-۵-۵ بررسی‌های محل دفن زباله

روش‌های FEM، نه تنها برای آشکارسازی زبانه‌های آلوده حاصل از محل دفن زباله‌ها به کار رفته‌اند، که در سه مرحله از عمر این محل‌ها نیز باموفقیت به کارگرفته شده‌اند. این سه مرحله، عبارتند از (الف) ارزیابی سایت پیش از توسعه تشکیلات زباله، (ب) بررسی پی زیر سایت در زمان خاکبرداری و ساختمان، و معمول تر از همه (ج) روی محل دفن زباله‌های بسته شده.

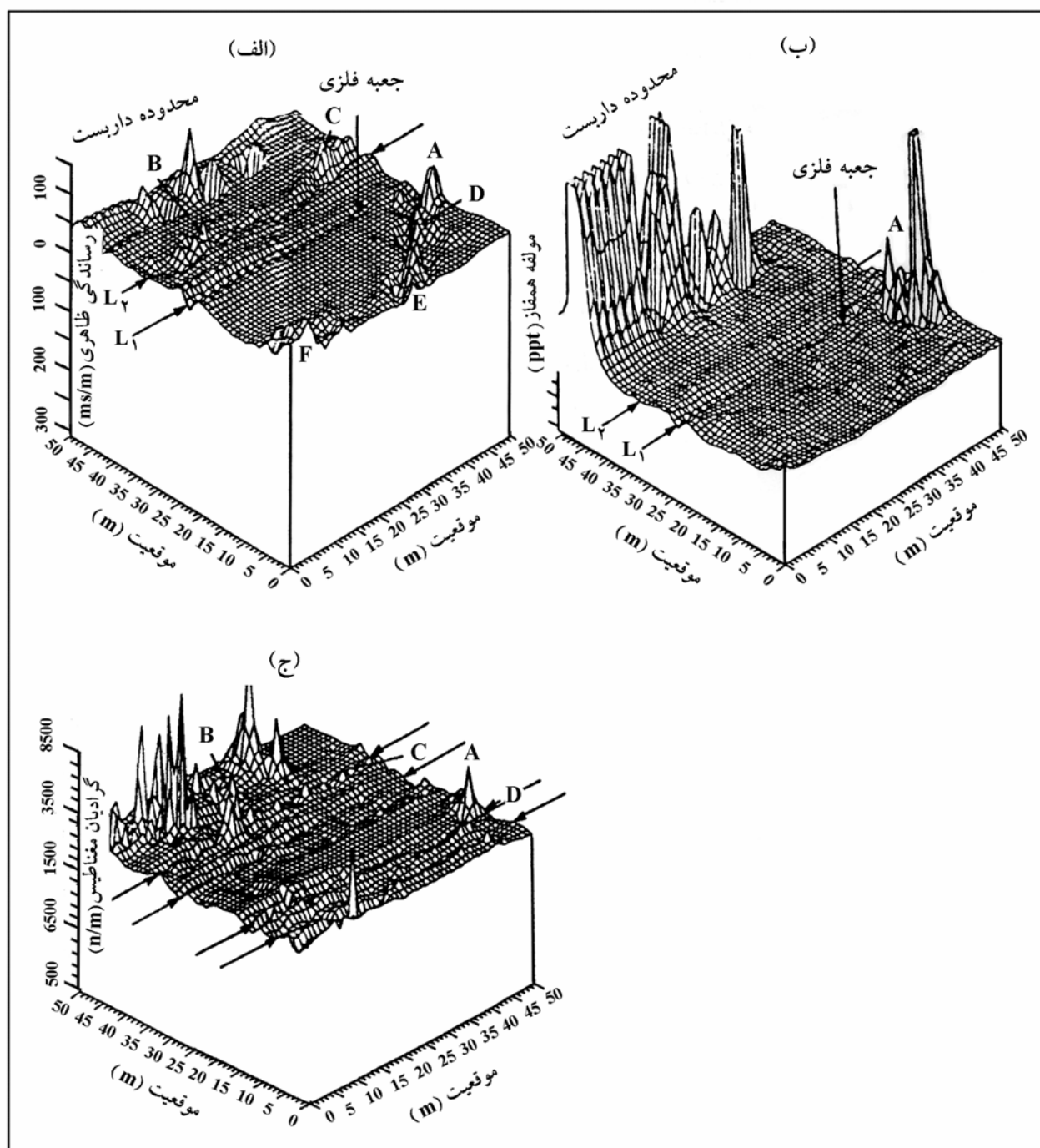
در مواقعی که در نظر است برداشت ژئوفیزیکی بر روی محل دفن زباله، در هر مرحله از توسعه آن، صورت گیرد، بهتر است فاکتورهای ضروری مورد توجه قرار گیرند. این فاکتورها در جدول ۲-۱ (برگرفته از رینولدز و مک‌کان^۱، ۱۹۹۲) فهرست شده‌اند. انواع مواد زباله، ماهیت پی و مواد دیواره‌ها، نوع پوشش رویی و غیره، همگی بر بکارگیری از روش‌های ژئوفیزیکی تاثیر خواهند داشت. مسایل مربوط به موقعیت کناره‌های مواد زباله‌ای، عمق زباله‌های موجود، و هرگونه اطلاعات مربوط به فروشست^۲، مورد توجه خاص دست‌اندرکاران آیین‌نامه‌های زباله‌ها و کسانی است که مسئول سایت‌های محل دفن بسته می‌باشند. در اینجا، سه مثال موردی آورده شده است، اول شرح یک روش ساده برای تعیین کناره یک محل دفن، مثال دوم نشان خواهد داد که چگونه روش‌های EM در مطالعات فروشست به کار گرفته شده‌اند، و سوم نمایش اینکه چگونه رسانندگی سنج زمین (دستگاه EM) را می‌توان برای کسب گستره وسیعی از اطلاعات در مورد نوع مواد محل دفن به کار برد.

اطلاع از مرز زباله‌ها برای کسانی که مسئول دفن‌های بسته متروک می‌باشند بسیار اهمیت دارد. این موضوع، اغلب در رابطه با ساخت املاک جدید در بریتانیا ضرورت دارد زیرا ساخت این گونه املاک تا ۲۵۰ متر فاصله از کناره محل زباله، به سبب خطرات ناشی از گاز و مهاجرت شیرابه‌ها، ممنوع می‌باشد.

مسئله دیگر آن است که فرد مسئول، خیلی وقت‌ها صدها سایت در قلمرو قانونی خود دارد ولی برای بررسی همه آنها بودجه کافی ندارد. آنچه لازم است، روشی است ساده و مقرون به صرفه که بتواند بدون دخالت در سایت به کارگرفته شود.

1 - Reynolds and Mc Cann

2 - Leachate



شکل ۲-۲۲- تصویرهای ایزومتریک از (الف) رسانندگی ظاهری، (ب) مؤلفه هم‌فاز، که هر دو با دستگاه EM31 ژئونیक्स اندازه‌گیری شده‌اند، و (ج) گرادیان قائم مغناطیسی، در یک کارگاه جوشکاری راه‌آهن قدیمی در دینس‌دال، تیساید، بریتانیا.

برای آشکارسازی کناره یک محل دفن، دستگاه EM31 ژئونیکیس نشان داده که ابزاری مفید است. (رینولدز و مک کان ۱۹۹۲). یک محل دفن قبلی، در شمال ویلز شامل زباله‌های خانگی تا ۱۲ متر ضخامت که با ۱ متر خاک لخت^۱ پوشیده شده بود با انواع روش‌های ژئوفیزیکی بررسی شد. این سایت، حدود ۱۵۰ متر درازا و ۸۰ متر پهنا داشت. قبلاً ترانشه‌هایی در کناره‌های این محل دفن برای بهسازی برپا شده بود که دلایل تاکید کننده برای کنترل تفسیرهای ژئوفیزیکی در اختیار قرار داد. پروفیل‌های EM31 کوتاه ($< 25\text{ m}$) روی محل دفن عمود بر پیرامون کناره انجام شد. دوقطبی‌های قائم و افقی به کار گرفته شد، ولی تنها مؤلفهٔ تربیعی (رسانندگی) اندازه‌گیری شد.

یکی از این پروفیل‌ها، در شکل ۲-۲۳ - الف، همراه با اطلاعات ترانشه (شکل ۲-۲۳ - ج) نشان داده شده است. واضح است که مقادیر رسانندگی ظاهری، به سرعت در عبور از مرز محل دفن زیاد می‌شوند. همچنین دیده می‌شود که دوقطبی افقی دستگاه EM31H (EM31H) که نسبت به دوقطبی قائم دارای عمق نفوذ کمتری است، تغییرات کمتری را نشان می‌دهد. این موضوع، بازتاب کناره شیبدار محل دفن است. دوقطبی EM31H، قبل از آنکه در آخر به خود زباله‌ها پاسخ دهد، به خاک سختی که به تدریج ضخیم می‌شود پاسخ داده است. ولی دوقطبی قائم EM31V (EM31V) به مواد عمیق‌تر بیشتر پاسخ می‌دهد که سریع‌تر از خاک لخت به زباله‌ها تغییر می‌کند. برای روشن‌تر کردن این اثر، گرادیان افقی هر مؤلفه نیز محاسبه شده است (شکل ۲-۲۳ - ب). این شکل، نشان می‌دهد که کناره محل دفن، همان‌طور که توسط نتایج EM31H مشخص گردیده، در خارج از کناره‌ای است که توسط EM31V تشخیص داده شده است. این نتایج، به وضوح با مشاهدات در ترانشه همخوانی دارد. با انجام یک سری مقطع‌های EM31 کوتاه عمود بر مرز محل دفن، و به کارگیری معیارهایی که در بالا شرح داده شد، کناره این محل دفن به طور دقیق (تا حد ۱-۲ متر)، با برداشتی توسط یک نفر روز به انجام رسید. نتایج را می‌شد در محل دفن تفسیر کرد و مرز آن را با اطمینان کافی علامت‌گذاری نمود. این رهیافت، خیلی شبیه به رهیافتی است که توسط زالاسیویچ^۲ و همکاران (۱۹۸۵) برای تفسیر داده‌های EM31 و به نقشه درآوردن مرزهای زمین‌شناختی در عمق کم شرح داده شده است. مسئله عمده در بسیاری از محل‌های دفن، شکل‌گیری شیرابه است. تا زمانی که مایعات غیرفرار^۳ در محل مانده و عملیات لازم روی آنها صورت گیرد، مسئله مهمی ایجاد نخواهد کرد. ولی اگر شیرابه شروع به مهاجرت کرده و از محل دور شود، ممکن است ایجاد آلودگی بالقوه در تاسیسات آب شرب محلی نماید. دشواری دیگر، در زمان انجام عملیات روی زباله‌های بعضی کارگاه‌های زغال‌سنگ روی می‌دهد. اکسیده شدن پیریت وابسته به زغال‌سنگ و لایه‌های ذغال دار، خاصیت اسیدی آب معدن را زیاد می‌کند که خود به طور نوعی، شامل تمرکز زیادی از آهن، سولفات‌ها و فلزات کمیاب، به ویژه منگنز و آلومینیم است. لادویگ^۴ (۱۹۸۳) چند نمونهٔ موردی در ارتباط با زهکشی اسید معدن (AMD)^۵ را شرح داده است. یکی از این نمونه‌ها، مربوط است به یک معدن روباز متروکه در استان باتلر در پنسیلوانیا. چنین تصور می‌شود که در ۸ هکتار از محل این معدن در دههٔ ۱۹۵۰، استخراج صورت می‌گرفته ولی سابقهٔ تفصیلی از آن در دسترس نمی‌باشد.

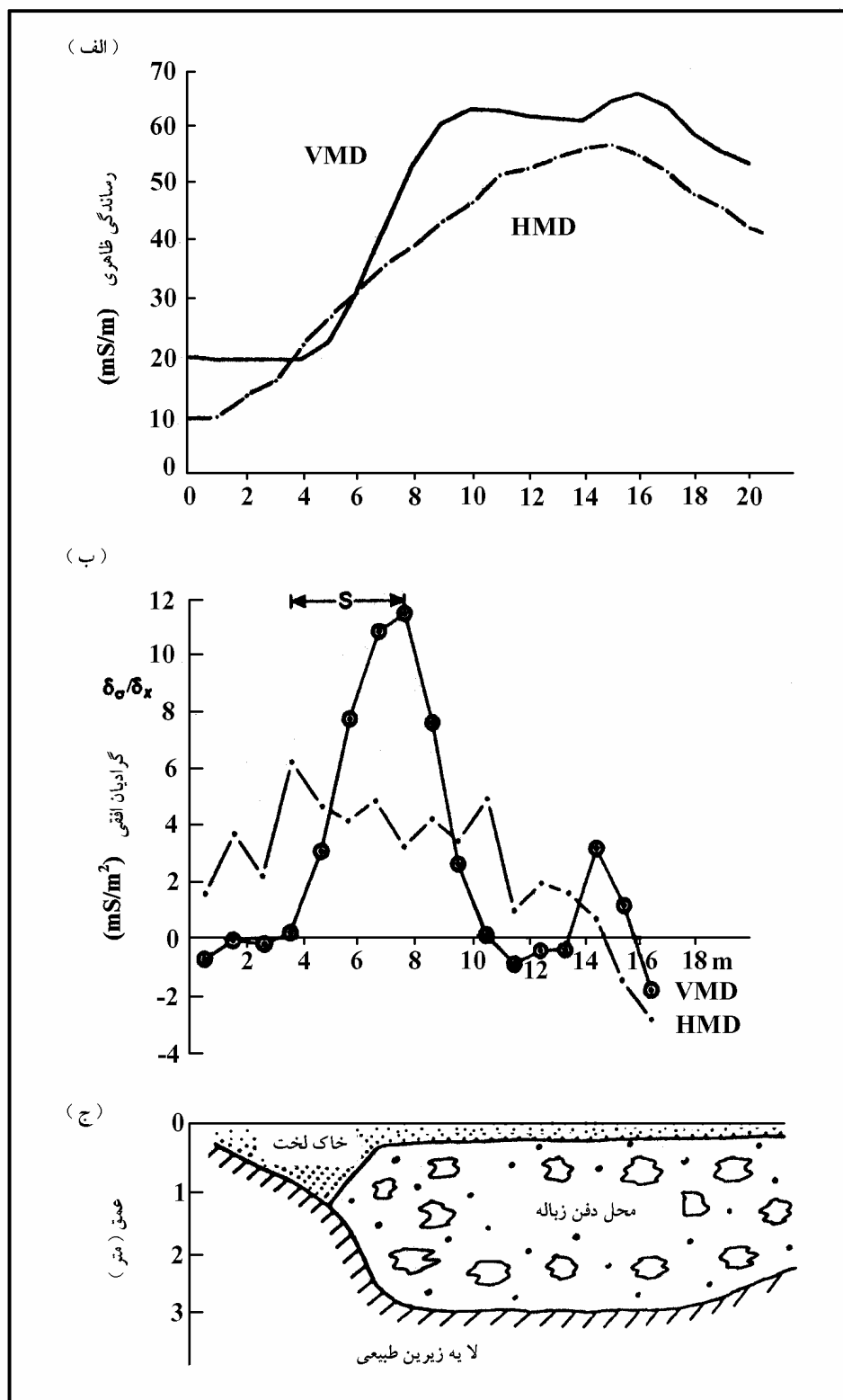
1 - Inert

2 - Zalasiewicz

3 - Liquor

4 - Ladwig

5 - Acid Mine Drainag



شکل ۲-۲۳- (الف) پروفیل‌های رسانندگی ظاهری با دوقطبی‌های مغناطیسی افقی و قائم (VMD و HMD) روی کناره محل دفن زباله کم عمق در ویلز شمالی، (ب) گرادیان‌های افقی رسانندگی ظاهری برای داده‌های (الف)، و (ج) مقطع طرح‌وار یک ترانشه خاکبرداری

جدول ۱-۲ - مجهولات بالقوه برای هر نوع محل دفن

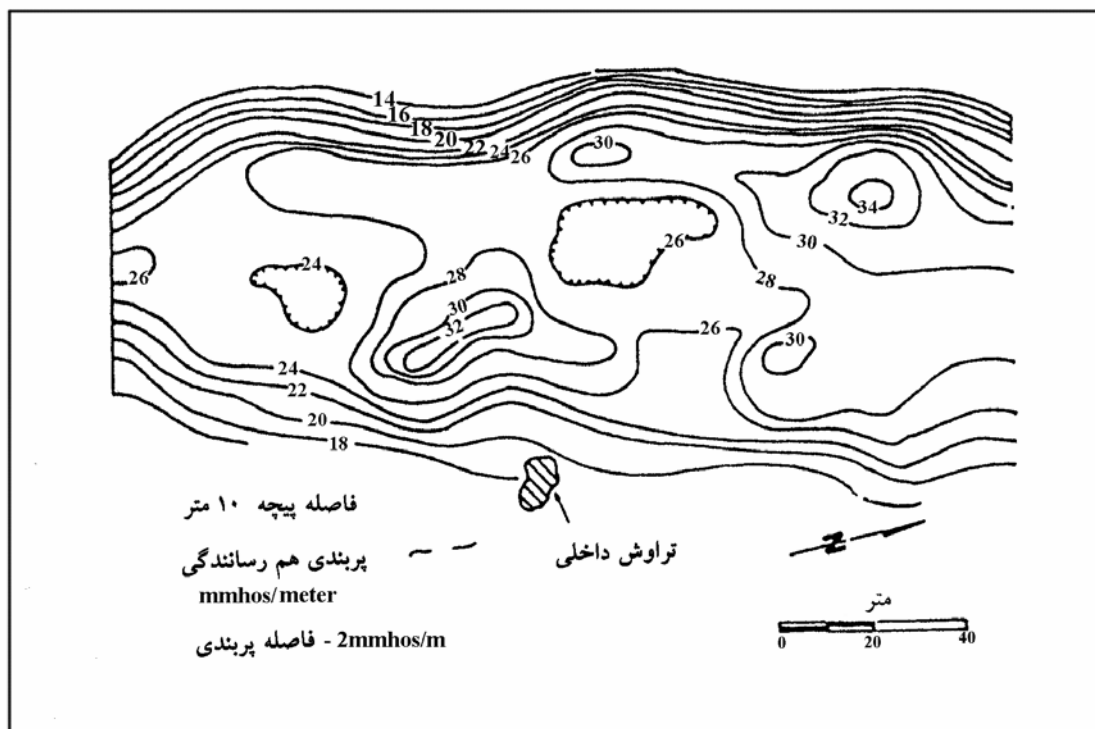
<u>نوع آستر بندی (لاینینگ)</u> بدون آستر آستر کانی (رس متراکم) آستر مصنوعی (مثلاً غشاء زمینی HDPE) آستر ترکیبی (مثلاً کانی + غشاء زمینی، غشاء دوتایی و غیره)	<u>نوع فضای خالی</u> معدن روباز سنگ سخت معدن روباز شن و ماسه معدن روباز خاک آجر دره کم عمق کانال دلتایی سایت مهندسی سایت صنعتی قبلی
<u>ابعاد سایت</u> اندازه فضایی عمق شکل، خصوصاً کناره‌ها	<u>نوع کلاهک</u> بدون کلاهک (هوادهی طبیعی) رس مصنوعی (مثلاً غشاء زمینی HDPE)
<u>عوامل زمین شناسی</u> انواع لایه‌های کم عمق آب زمین شناسی محلی (هیدروژئولوژی محلی) گسلش زیر سایت فعالیت‌های قبلی در سایت یا زیر آن (مثلاً معدن ذغال سنگ، معدن شن و غیره) حفره‌های طبیعی زیر سایت پایداری سایت (شیب)	<u>تاریخچه تل انباری</u> نوع و مخلوط زباله‌ها دوره تل انباری (حدود حجم‌ها) نوع و درجه تراکم و پوشش در طول عمل تل انباری سن
	<u>عوامل مربوط به مواد داخل محل دفن</u> درجه اشباع تولید گاز تولید شیرابه / مایع‌های تخمیری تحرك در رسانندگی شیرابه چگالی تراکم و تغییر پذیری ترکیب مواد (مثلاً نخاله‌های سنگین ساختمانی، مواد فاسد، زباله‌های صنعتی و غیره)

در سال ۱۹۸۱ این معدن دوباره احیا شد و دریاچه‌ای که قبلاً معدن را پر کرده بود زهکشی و فضای خالی با باطله‌های معدن پر و درجه‌بندی شد. روی کمر بالای^۱ معدن تا ۷ متر خاک ریخته شد که در قسمت‌های مرکزی و شرقی محل به کمتر از ۲ متر می‌رسید. یک زهکش زیرزمینی با پوشش سنگ آهک در امتداد قاعده کمر بالا برای بیرون بردن تراوش‌ها ساخته شد. به دنبال تکمیل احیاسازی، مواد تخلیه شده از زهکش زیرزمینی هنوز کمی اسیدی بود (درجه اسیدی ۲۰ mg/lit با آهن ۱۸ mg/lit و سولفات ۲۰۰ mg/lit). علاوه بر این، یک تراوش تناوبی از آب اسیدی در سمت جنوب شرقی محل اتفاق افتاده بود. روی ۱/۶ هکتار از قسمتی از محل در نزدیکی جایی که تراوش مشاهده شده بود، یک سری پروفیل‌های EM رسانندگی زمین با استفاده از EM34 ژئونیکس، با بازه پیچ‌های ۱۰ متر و فواصل ایستگاهی ۱۰ متر، انجام گرفت. برداشت صحرایی ۱/۵ روز طول کشید. نقشه مقادیر رسانندگی ظاهری در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است. پربندهای (کتورهای) نزدیک به هم (۲۴-۱۴ mS/m) در غرب و شرق محل به کناره‌های معدن ارتباط دارند. ازدیاد سریع رسانندگی ظاهری که در این مناطق دیده می‌شود، نمایانگر عبور از سنگ کف مقاوم به باطله درجه‌بندی شده رساناست. رسانندگی ظاهری بالا (۳۴ و ۳۰ mS/m) در قسمت شمال غربی ساختگاه، در ارتباط با زهکشی زیر سطحی می‌باشد. توزیع رسانندگی ظاهری (جدا از عوارضی که بیش از این شرح داده شد) مربوط است به تراوش رسانندگی آب‌های معدنی اسیدی که به طرف پایین بخش شرقی ساختگاه سرازیر شده و در حال تشکیل حوضچه‌هایی در داخل باطله‌ها است. تصور می‌شود که این، به علت رسانندگی بالا تا حد ۳۲ در قسمت جنوبی ساختگاه است. مهاجرت بیشتر آب زیرزمینی آلوده، به واسطه حضور کمر پایین^۲ معدن محدود شده است. این کمر پایین که به صورت پشته سنگ بستر پرمقاومت ماده غیرمعدنی تفسیر شده، زون بی‌هنجار رسانندگی جنوبی را از زون کوچک شمالی جدا می‌کند. محل تراوش تناوبی در سرایشی و بی‌هنجاری اصلی رسانندگی رخ می‌دهد، که دلالت بر وجود حوض شدگی آب‌های زیرزمینی دارد. خلاصه‌ای از تفسیر برداشت‌های EM در شکل ۲-۲۵ نشان داده شده است. با استفاده از نتیجه این برداشت، مدل فیزیکی به عنوان مبنا برای تعیین محل چاه‌های تزریقی و مشاهده‌ای به گونه بخشی از آزمون ترمیم به کار می‌رود که از عوامل ممنوعه AMD استفاده می‌کند.

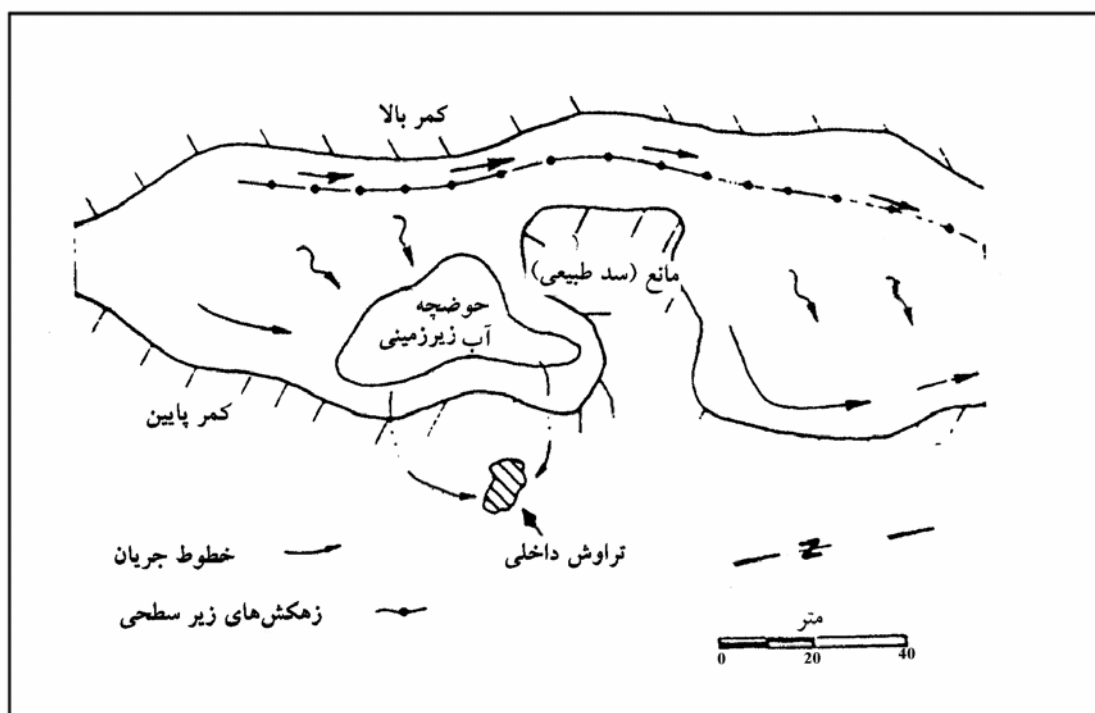
با وجود اینکه انتخاب فاصله ایستگاهی ۱۰ متر به طور کامل رقم زیادی بود، اما شرح و تفصیل، مکان مناسبی برای اهداف برداشت فراهم نمود. با این وجود اگر لازم بود از مرزهای معدن نقشه تهیه شود، فاصله کمتر ایستگاهی لازم می‌شد. در این صورت ممکن بود که کمر بالای معدن با دقتی بهتر از $\pm 2m$ تعیین مکان شود. با دانستن سرعت برداشت‌های EM، ملاحظه می‌شود که چه حجم اطلاعات مفیدی در چنین زمان کوتاهی به دست می‌آید.

1 - High-Wal

2 - Low-Wall



شکل ۲-۲۴- نقشه رسانندگی ظاهری روی معدن روباز قبلی پر شده بوتلر کانتی پنسیلوانیای ایالات متحده آمریکا.



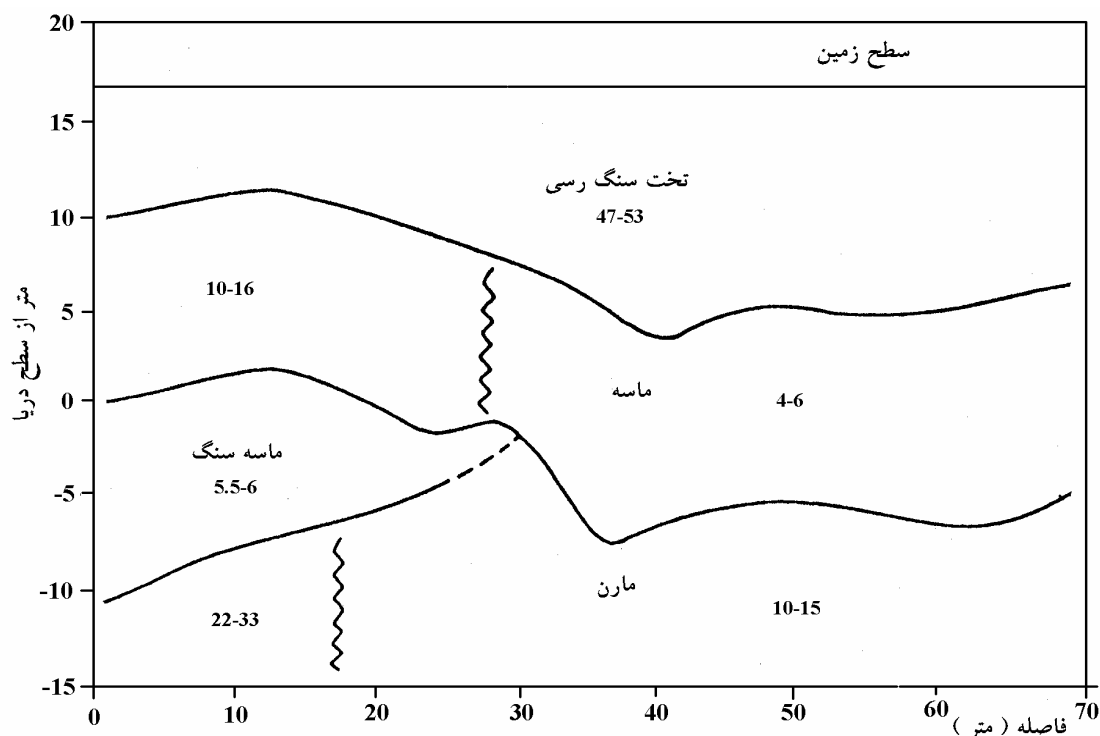
شکل ۲-۲۵- طرح واری از تفسیر داده های EM که در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است.

مثال سوم ترکیبی از برداشت‌های EM31 و EM34 از یک ساختگاه نزدیک منچستر است که در آن، تاسیسات محل دفن تعبیه شده است. هدف از برداشت‌ها، تعیین نقشه ضخامت تخته سنگ رسی^۱ زیر ساختگاه بود، چون یکی از شرایط مجوز ساختگاه ضخامت مشخص تخته سنگ رسی به‌عنوان آستر کانی نفوذ ناپذیر بوده است. برداشت روی مجموعه‌ای از پروفیل‌های موازی با به‌کارگیری هر دو جهت دوقطبی مغناطیسی دستگاه EM34 با فاصله پیچه‌های ۱۰ و ۲۰ متر انجام شده است. نتایج شش مقدار رسانندگی ظاهری برای هر ایستگاه به نرم‌افزار EMIX34PLUS (شرکت اینترپکس) وارد شده تا تفسیری دو بعدی از مقطع‌های ساختگاه ایجاد شود. توالی چین‌بندی کلی عبارت بود از قرارگیری تخته سنگ رسی روی ماسه دانه‌ریز اشباع شده روی سنگ بستر. تفاوت رسانندگی قابل قبولی بین لایه‌های مختلف (که بر پایه مدل‌های تفسیری از هم جدا شده بودند) وجود داشت. نمونه چنین مقطعی در شکل ۲۶-۲ نشان داده شده است.

از اطلاعات چاه آزمایشی (گمانه‌ای) موجود در کناره ساختگاه برای محدود نمودن مدل‌های EM استفاده شده است. همبستگی لازم ضخامت‌های تفسیر شده در امتداد هر خط برداشت، بین خط‌های مجاور برقرار گردید و یک نقشه هم‌ضخامت برای ضخامت رس و یک نقشه برای ارتفاع کف لایه رسی تهیه شد. چون طرح محل دفن، برای مواد باطله قابل استفاده در رابطه با تداوم تجاری به یک فضای خالی مطمئن نیاز داشت، دانستن ضخامت رس و ارتفاع قسمت کف آن لازم بود؛ در نتیجه با برداشت EM، تعدادی دیواره سلولی مختلف در درون خاکریز، دوباره تعیین مکان شدند. برداشت‌های ژئوفیزیکی، برای مجری ساختگاه، اطلاعات با کیفیت مناسب و قابل اعتمادی فراهم نموده‌اند تا بتواند طرح محل دفن را تصحیح کرده و سازه مناسبی ایجاد کند، در نتیجه از مشکلات بالقوه آتی مانند بسیار باریک شدن آستر رسی اجتناب شود.

این سه نمونه موردی، نمایش کوچکی از چگونگی کاربرد رسانندگی سنج‌های زمین را در این باره نشان می‌دهند. ولی بهتر است خاطر نشان شود که در همه موارد، اگر لازم باشد که همه اهداف برداشت برآورد شوند، طرح دقیق برداشت ضرورت دارد. علاوه بر این، در حالی که نقشه‌های هم‌رسانندگی، اطلاعات مکانی کیفی عالی از ساختگاه فراهم می‌آورند، تحلیل کمی دقیق با استفاده از نرم‌افزارهای ویژه می‌تواند مدل‌های دوبعدی با قابلیت اعتماد بالا به دست دهد. هنگام استفاده خط‌های برداشت به‌عنوان قسمتی از شبکه، مدل‌های در امتداد هر خط را می‌توان بین خط‌ها همبسته نموده و مدل شبه سه‌بعدی زیرسطحی را در شرایط درست به وجود آورد. وضعیت‌هایی وجود دارد که مدل رضایت‌بخشی نمی‌توان محاسبه نمود و آن بیانگر آن است که اهدافی سه‌بعدی در درون زمین موجود می‌باشد. این نیز به نوبه خود اطلاعات مفیدی است.

به‌طور مثال، هنگام مدل‌سازی اطلاعات EM روی یک معدن قدیمی زغال‌سنگ در شمال شرقی انگلستان، مدل‌های لایه‌ای سازگار برای قسمت اعظم ساختگاه با موفقیت تهیه شد. با این وجود، در امتداد یک خط، روی فاصله خیلی کوچکی داده‌ها نامعقول بودند و هیچ مدل رضایت‌بخشی قابل ایجاد نبود. چنین تصور شد که این اثر به‌واسطه وجود ستون اطاقک معدن کاری در اعماق کم (کمتر از ۱۰ متر) بوده است. هنگامی که محل زون بی‌هنجار حفاری شد، زمین نرم که نشان‌دهنده ریزش بخشی معدن کاری بوده یافت شد که مؤید نتیجه‌گیری‌های حاصل از مدل‌سازی بوده است.



شکل ۲-۲۶- شبه مقطع زمین‌شناسی که از داده‌های رسانندگی الکترومغناطیسی زمین توسط یک برداشت با EM31/34 روی کف محل دفن که توسط آستر رسی طبیعی ساخته شده بود به دست آمده است. مقادیری که برای مواد زمین‌شناختی در نظر گرفته شده، رسانندگی‌های حقیقی با واحدهای mS/m بوده است.

۳-۲ سامانه‌های پالس‌گذرای EM (TEM) یا EM در حوزه زمان (TDEM)

۱-۳-۲ برداشت‌های TDEM/TEM

در یک برداشت TDEM نوعی، یک جریان مستقیم قوی از یک حلقه فرستنده بزرگ زیرزمینی برای تامین انرژی عبور داده می‌شود. پس از یک دوره زمانی ناپیوسته (چند ده میلی‌ثانیه)، که در طی آن کلیه آثار وصل کردن جریان از بین می‌رود و به نام وضعیت‌گذرای شروع جریان شناخته می‌شود، جریان اعمال شده به صورت ناگهانی قطع می‌شود. اگر در آن نزدیکی، یک رسانا وجود داشته باشد، تغییرات شدید در میدان اولیه، باعث القای جریان‌های ادی در رسانا و در ابتدا تنها روی سطح آن ایجاد می‌شود. این مرحله به نام Early-Time از فرآیند گذرا شناخته شده است. سپس این جریان‌های سطحی، در نتیجه افت اهمی شروع به محو شدن می‌نمایند. پس از آن، زونی که بلافاصله در درون رسانا قرار گرفته، دچار کاهش میدان مغناطیسی شده و در نتیجه در داخل آن جریان‌های ادی ایجاد می‌شود. این عمل، به گونه‌ای مؤثر، شروع پخش داخلی الگوی جریانی است که

توسط جریان‌های ادی به طرف داخل رسانا می‌باشد. این مرحله، به نام « زمان میان مرحله‌ای^۱ از فرآیند گذرا است. مرحله نهایی یا « زمان پایان^۲ از این فرآیند هنگامی است که توزیع جریان القایی با زمان تغییر ناپذیر باشد. تنها تغییر مشاهده شده کاهش در دامنه کلی با زمان است. اگر اندازه رسانای موجود، نسبت به چشمه دوقطبی مورد استفاده خیلی بزرگ باشد، ممکن است جریان‌های ادی به طور جانبی و همچنین در درون رسانا پخش شود. آهنگ تغییر این جریان‌ها و میدان مغناطیسی مربوط به آنها، به اندازه و شکل رسانا و همین‌طور به رسانندگی آن بستگی دارد. برعکس، توزیع اولیه جریان سطحی فقط به اندازه و شکل رسانا بستگی دارد و این، یک پدیده هندسی است و به رسانندگی جسم بستگی ندارد. فرآیند کلی تحریک گام به گام لوپ جریان، بارها تکرار می‌شود (شکل ۲-۲۷) و داده‌ها برای محل مورد نظر انبارش می‌شوند. توضیح تفصیلی روش‌های اکتشاف TEM، توسط نبی‌قیان و مک‌نی (۱۹۹۱) ارائه شد، و از آن برای این بخش به عنوان مبنا استفاده شده است.

میدان الکتریکی گذرا در فاصله‌ای به نام عمق پخش (d) به بیشترین مقدار خود می‌رسد که عمق پخش d در TEM همان عمق پوست^۳ و δ در EM حوزه فرکانس است. عمق پخش d و سرعت V به صورت زیر شرح داده شده است:

در یک محیط با رسانندگی یکنواخت، میدان الکتریکی گذرا در عمق پخش (d) به حداکثر می‌رسد، به طوری که داریم:

$$Z = (2t / \sigma \mu)^{\frac{1}{2}} = d$$

که در آن: σ و μ به ترتیب رسانندگی و تراوایی مغناطیسی محیط می‌باشند. میدان الکتریکی حداکثر با سرعت (V) به طرف پایین حرکت می‌کند، به طوری که داریم:

$$V = (2\sigma \mu t)^{-\frac{1}{2}}$$

سرعت به طرف پایین در نیم فضای رساننده، چنین تعیین شده است:

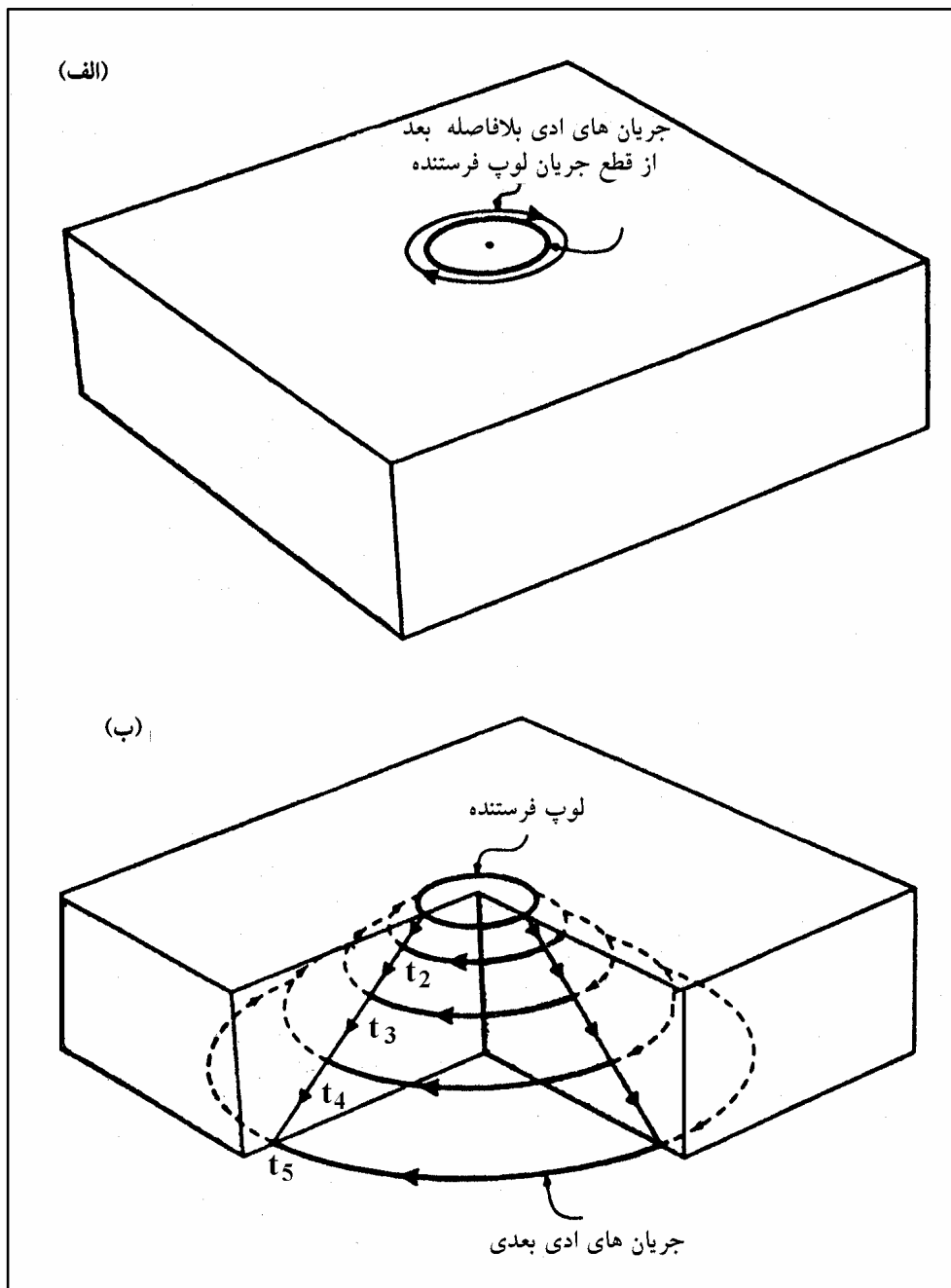
در حوزه زمان، عمق پخش به طور مستقیم متناسب است با $\sqrt{t}$ ، در صورتی که در حوزه فرکانس، $V = 2(\pi \sigma \mu t)^{-\frac{1}{2}}$ متناسب با عکس $\sqrt{\omega}$ است ($\omega = 2\pi f$). این میدان حداکثر محلی با سرعت محدود (V) به سمت پایین منتشر می‌شود.

در وضعیت یک نیم فضای یک طرف نامحدود، یعنی محیطی لایه‌ای افقی یکنواخت جریان‌های سطحی مرحله آغازین، ابتدا در مجاورت لوپ فرستنده قرار می‌گیرند. با گذر زمان لوپ، جریان القایی با پخش به سوی پایین و بیرون که بسیار شبیه حرکت به سوی پایین حلقه‌های دود می‌باشد، گسترش می‌یابد (شکل ۲-۲۸)، که خود نتیجه کاهش تدریجی دامنه با زمان است. همان قاعده، برای زمینی با لایه‌های افقی به کار می‌رود. به طور معمول، فرض می‌شود که مواد زمین غیرقابل قطبش بوده و رسانندگی، به فرکانس یا تأخیر زمان بستگی ندارد. این آثار قطبش القایی، اعتمادپذیری تفسیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

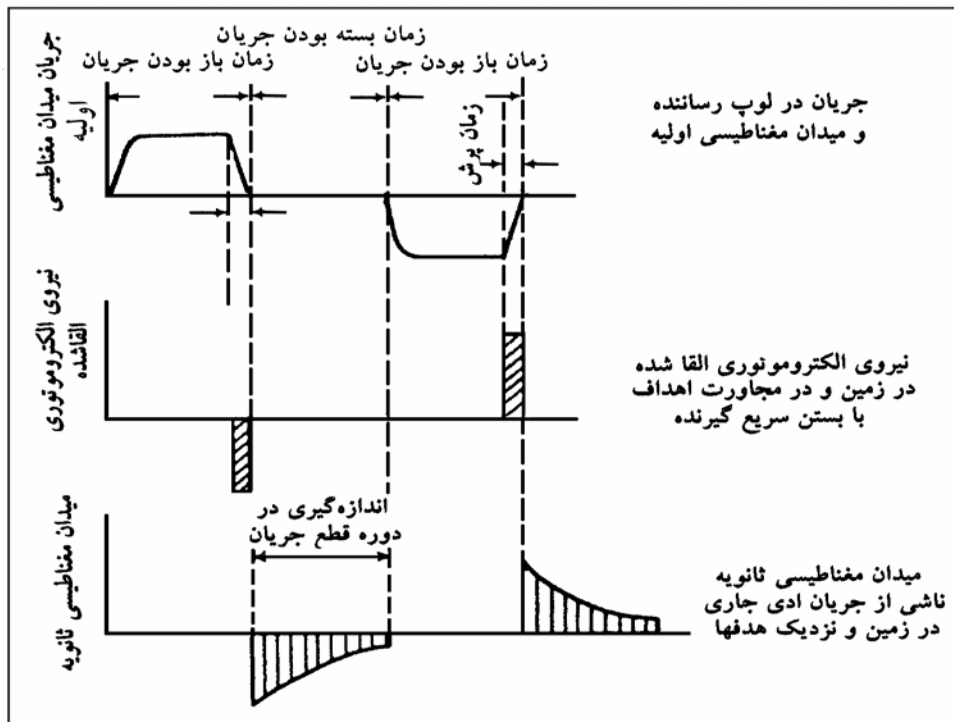
1 - Intermediate - Time

2 - Late-Time

3 - Skinddepth



شکل ۲-۲۷- (الف) شکل جریان ادی بلافاصله بعد از قطع میدان اولیه، و (ب) انتشار به سمت پایین و بیرون رشته جریان ادی در بازه های متوالی زمان ($t_2, t_3, \dots$) روی زمین همگن که بیشتر شبیه حلقه های دود می باشد.



شکل ۲-۲۸- موج نقش‌های EM در حوزه زمان

در محلی که مواد درون زمین، تغییرات جزئی تراوایی مغناطیسی، که نوعاً در حدود ۱٪ شدت میدان مغناطیسی زمین (به‌طورمثال ۵۵۰ nT در یک میدان ۵۵۰۰۰ نانوتسلائی) داشته باشند، آثار کوچک TEM ممکن است قابل آشکارسازی باشد. در این موارد، احتمال افزایش پاسخ TEM تا حدود ۱٪ وجود دارد. جایی که خاک‌های لاتریتی (خاک‌های قرمز حاره‌ای) حضور داشته باشد، ممکن است آثار پارامغناطیسی زیاد باعث ثبت‌های گذرای بی‌هنجار با سیستم‌های SIROTEM شود. چنین فرآیندی، به $\frac{1}{t}$ یک وابستگی آشکار می‌سازد که نتیجه آن، باعث خطا در تعیین مقاومت ویژه ظاهری با زمان می‌شود. همچنین احتمال روی دادن آثار مشابه درجایی که رسانندگی یا تراوایی مغناطیسی زمین برحسب تابعی از فرکانس تغییر می‌کند وجود دارد. با جابه‌جا کردن لوپ گیرنده نسبت به لوپ فرستنده به مقدار ۲ تا ۳ متر، در صورتی که وضعیت آرایه لوپ‌ها انطباقی باشد، می‌توان آثار پارامغناطیسی زیاد را حذف نمود.

سه منبع اصلی خطا در اندازه‌گیری‌های TEM وجود دارد: (الف) خطاهای هندسی در موقعیت‌های فرستنده - گیرنده و اثرات توپوگرافی، (ب) نوفه مصنوعی ایستا^۱، و (ج) نوفه مصنوعی پویا^۲.

1 - Static
2 - dynamic

بیشتر روش‌های TEM تا حد زیادی به خطاهای هندسی غیرحساسند و درحالت یک زمین مقاوم نیز به طور نسبی به اثرات توپوگرافی غیرحساس می‌باشند. با این وجود، درجایی که یک روباره رسانا وجود دارد، توپوگرافی می‌تواند خطاهای جفت‌شدگی شدیدی ایجاد نماید که باید روش‌های دقیقی برای تصحیح این خطاها به کار برده شود (نیقیان و مکنی ۱۹۹۱).

نوفه مصنوعی ایستا، از وجود لوله‌ها، کابل‌ها، نرده‌های فلزی و یا حضور دیگر موارد مشابه در ناحیه برداشت ناشی می‌شود. برخی وسایل فلزی، به‌عنوان کانالیزه کننده جریان عمل نموده و سبب اعوجاج در داده‌های TEM می‌شوند. کابل‌های برق‌دار، اثرات مشخصی در فرکانس‌های بخصوص و هارمونیک‌های آنها دارند، اما این اثرات را می‌توان به‌آسانی با اعمال یک فیلتر (صافی) شکافدار^۱ حذف نمود. اثر کانالیزه شدن را می‌توان با قراردادن لوپ فرستنده به‌طور متقارن روی هریک از موارد پیش‌گفته کاهش داد.

نوفه مصنوعی پویا توسط تعدادی از منابع ایجاد می‌شود. منبع نوفه‌ها در فرکانس‌های کمتر از ۱ هرتز مربوط به سیگنال‌های ژئومغناطیسی از درون و بالای یونسفر زمین است. در فرکانس‌های بالای ۱ هرتز و به‌گونه‌ای نوعی در محدوده ۶-۱۰ هرتز سیگنال‌های تولید شده از تخلیه الکتریکی در آذرخش‌های دور اسفریکز^۲ تولید می‌کنند که خود EM گذرای طبیعی هستند. منابع نوفه با فرکانس بالاتر، خطاهای برق متناوب (۵۰-۶۰ هرتز) و فرستنده‌های VLF (۱۰-۲۵ کیلوهرتز) هستند. در برداشت‌های EM هوابرد و دیگر برداشت‌هایی که در فضاهای باز و وسیع صورت می‌گیرد، نوفه باد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که باعث جنبش سنسورهای میدان مغناطیسی در میدان مغناطیسی زمین می‌شود. میدان‌هایی که در کارهای EM به کار برده می‌شود، به‌طور نوعی ۱۰^۵ مرتبه کوچک‌تر از میدان مغناطیسی زمین هستند.

۲-۳-۲ پردازش و تفسیر داده‌های برداشت‌های TEM

با روش‌های زیادی می‌توان داده‌های TEM را پردازش نمود و این روش‌ها تا حد زیادی به سیستم وسیله‌ای بستگی دارند که داده‌های خام توسط آن به‌دست آمده است. بیشتر سیستم‌های TEM ولتاژهای گذرا را پس از آنکه جریان اعمال شده قطع می‌شود، در بازه‌های زمانی مشخصی ثبت می‌کنند. هر گاه که جریان اعمال و سپس قطع شود، اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود؛ هنگامی که جریان دوباره اعمال و قطع می‌شود، یک‌سری اندازه‌گیری‌های تکراری انجام می‌شود. این فرآیند ممکن است در یک مکان معین ده‌ها بار تکرار شود درحالی که کلیه داده‌ها به‌طور خودکار ثبت می‌گردند. در نتیجه، این داده‌های زیاد را می‌توان برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه پردازش نمود. از طرف دیگر، داده‌های صحرائی برای تکرارپذیری، آزمایش می‌شوند. به‌طور معمول، داده‌ها نسبت به جریان فرستنده یا دیگر پارامترهای سیستم بهنجار شده و اثرات کاهش تدریجی را درعوض با زمان می‌توان با بهنجار کردن میدان مشاهده شده در هر نقطه نسبت به مقدار میدان اولیه در همان نقطه تقویت نمود.

هرچه سیستم‌های اندازه‌گیری میدان پیچیده‌تر شوند و مقدار داده‌ها افزایش یابند، برای پردازش توالی داده‌های موجود که اغلب پیچیده نیز می‌باشند با اندیشه و روش دقیق‌تری به‌کارگرفته شود. به‌عنوان مثال، استفن و همکاران (۱۹۹۱) یک رشته

1 - Notch Filter

2 - Sferics

پردازش داده‌ها را برای گمانه‌زنی «EM گذرا با دور افت طولانی» (LOTTEM) را که در آلمان انجام شده توضیح داده‌اند. در این کار، سه مرحله پردازش داده‌ها به گونه زیر فرمول‌بندی شده بودند:

(الف) پردازش پیش‌انبارش، (ب) انبارش انتخابی و (ج) پردازش پس از انبارش.

پردازش پیش‌انبارش، برای حذف نوفه دوره‌ای ناخواسته توسط یک صافی همانند صافی شکافدار برای حذف نوفه وابسته به خطوط برق AC و شبکه خط آهن برقی آلمان به کاررفته است. از یک الگوریتم انبارش انتخابی برای میانگین‌گیری تنها درصدی از داده‌های اطراف میانه تک‌تک نمونه‌های زمانی استفاده شده است. نتیجه این کار، کاهش محتوای نوفه و به دنبال آن، افزایش نسبت سیگنال به نوفه بود. مرحله پایانی اعمال یک صافی ضعیف نرم‌کننده متغیر زمانی بود. نقطه قوت این پردازش، تولید منحنی‌های لگاریتمی مقاومت ویژه ظاهری برحسب تابعی از زمان کاهش تدریجی بود.

انواع گوناگونی از نمودار داده‌های پردازش شده را می‌توان ترسیم نمود، مانند: نمودارهای لگاریتمی افت تدریجی ولتاژ گذرا (میلی‌ولت) برحسب زمان (میلی ثانیه)، قطع‌های پاسخ (نمودارهای اندازه‌گیری شده ولتاژ در زمان کاهش تدریجی مشخص، در کلیه ایستگاه‌های ناحیه برداشت)، پربندهای پاسخ (داده‌های پروفیل پاسخ که به شکل نقشه رسم شده‌اند)، رسم منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری به صورت پروفیل‌ها و یا نقشه‌ها و نمودارهای برداری و نشان دادن مؤلفه‌های داده‌ها در صفحه‌های عمود برهم (صفحه‌های xz یا yz).

به همان اندازه که نمودار داده‌ها و سیستم‌های مورد استفاده برداشت داده‌ها متفاوت است، روش‌های تفسیر نیز گوناگون می‌باشند. به طور نوعی، تفسیر در دو مرحله صورت می‌گیرد: اولی تعیین محل هدف احتمالی زیرسطحی براساس شکل، اندازه و مکان بی‌هنجاری‌های آشکار شده روی پروفیل‌ها و نقشه‌های مربوط به پارامترها، و دومی که بیشتر کمی می‌باشد، مرحله‌ای است برای تعیین (کیفیت) رسانا با استفاده از ثابت‌های زمانی تعیین شده از روی منحنی‌های کاهش تدریجی شدت میدان که در یک یا چند مکان حاصل شده است.

گونه‌های مختلفی از نمایش پارامترها، برای کاربردهای متفاوت مفیدند. به طور مثال، سونداژهای مقاومت ویژه ظاهری می‌توانند تا حدود زیادی در بررسی‌های زمین‌شناسی آب^۱ و به نقشه درآوردن زمین‌شناسی مفید باشد، ولی اطلاعات ناچیزی برای اکتشاف کانی‌ها در اختیار ما قرار می‌دهند. در کاربرد اخیر، آهنگ‌های کاهش تدریجی با زمان، بسیار ارزشمندتر هستند چنانکه منحنی‌های تولید شده می‌توانند 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 این 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 برده می‌شود. این ثابت‌های زمانی، نشانه انواع متفاوت اجسام تأثیرگذار هستند؛ از این ثابت‌های زمانی برای چهار نوع هدف، مثال‌هایی در جدول ۲-۲ فهرست شده است. یک رهیافت تحلیلی برای محاسبه ثابت‌های زمانی در زیر آورده شده است. برای اکتشاف کانی‌ها، ثابت‌های زمانی در محدوده ۰/۵ تا ۲۰ میلی‌ثانیه مورد علاقه و مهم می‌باشند.

جدول ۲-۲- ثابت‌های زمانی برای چهارنوع هدف متداول

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

رابطه کلی ثابت زمانی τ یک هدف رسانا، با رابطه زیر داده می‌شود (نیقیان و مکنی ۱۹۹۰):

$$\tau = K\sigma\mu A$$

که K یک ضریب عددی و A متناسب با مساحت سطح مقطع مؤثر رسانا است (نگاه، جدول ۲-۲). 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 (برحسب درجه) به طور مستقیم، ثابت زمانی رسانا را می‌دهد. به طور تحلیلی، با داشتن یک دامنه اولیه (A_0)، دامنه کاهش یافته در زمان t (A_t) را می‌توان به دست آورد:

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

با لگاریتم گرفتن از دوطرف می‌توان نوشت:

$$\ln(A_t) = \ln(A_0) - t/\tau$$

که معادله یک خط مستقیم با گرادیان منفی $1/\tau$ است. هرگاه دامنه‌ها در دو زمان t_1 و t_2 اندازه گرفته شوند، ثابت زمانی با رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln(A_1/A_2)$$

اجسام پروتیتی، اغلب دارای ثابت‌های زمانی بسیار بزرگ می‌باشند (ده‌ها میلی ثانیه). چنین اهدافی، اغلب از اهمیت اقتصادی اندکی برخوردارند، به جز زمانی که با نیکل همراه باشند. با این وجود، ثابت‌های زمانی، به‌تنهایی نباید برای اهمیت

زمین‌شناختی یا اقتصادی یک هدف ویژه در نظر گرفته شوند. جهت و درجه شیب را می‌توان از عدم تقارن در مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده هنگامی که به صورت توابعی از فاصله‌های جانبی در طول خط‌های برداشت رسم می‌شوند به دست آورد. در حالی که مدلسازی کامپیوتری به‌طور 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 تحقیق بوده و اجرای آنها روی کامپیوتر بزرگ^۱ بسیار وقت‌گیر است. در نتیجه، این پردازش‌ها تاکنون برای کارهای جاری تجارتي TEM که به مدلسازی سه‌بعدی نیاز دارند به کار برده می‌شود.

با وجود این، برای کاربردهای مهندسی و زیست‌محیطی، تفسیر سونداژ TEM با استفاده از کامپیوترهای شخصی انجام می‌شود؛ نرم‌افزار مناسب در نوع تجاری در دسترس می‌باشد. بحث‌های بسیار مفصلی در مورد پردازش داده‌ها و روش‌های تفسیری جدید برای سامانه‌های متنوع EM توسط سپیس^۲ و فریش نخت^۳ (۱۹۹۱) و نیقیان و مکنی (۱۹۹۱) و سایرین داده شده است.

۲-۳-۳ کاربردها و کارهای موردی انجام شده

۱-۳-۳-۳ بررسی آب‌های زیرزمینی

روش‌های الکترومغناطیسی از مدت‌ها قبل در بررسی‌های هیدروژئولوژی کاربرد داشته است. به‌طور معمول، سامانه‌های حوزه فرکانس، برای بررسی‌های کم‌عمق و سونداژ عمقی مقاومت ویژه الکتریکی برای نفوذ در عمق‌های بیشتر به کار رفته‌اند. اما پیشرفت‌های حاصل در سامانه‌های TEM در دهه ۱۹۸۰، با سریع‌تر شدن آهنگ‌های قطع و جلوتر آمدن زمان نمونه‌گیری به استفاده بیشتر TEM در هیدروژئولوژی منجر شده است. یک رهیافت نظری توسط فیتزمن^۴ و استوارت^۵ (۱۹۸۶) توضیح داده شد که گستره‌ای از پاسخ‌های TEM فرضی برای گستره‌ای از مسایل یافت شده معمولی هیدروژئولوژی را فراهم می‌کند. یک مزیت TEM این است که با اندازه‌های به نسبت کوچک لوپ‌های موجود، اندازه‌گیری‌ها می‌توانند در مکان‌هایی مانند فضا‌های باز عمومی و میدان‌های ورزشی، که اندازه آنها مانع از اجرای سونداژهای مقاومت ویژه می‌شوند انجام شود. به‌علاوه، در محیط‌های شهری که نوفه الکتریکی دینامیک محیطی بسیار وجود دارد، قابلیت انبارش سیگنال در سیستم‌های جدید رقمی، به افزایش نسبت سیگنال به نوفه و بازیافت تمامی سیگنال‌های مهم از نوفه زمینه کمک می‌نماید.

اندازه‌گیری‌های TEM کاربرد فزاینده‌ای در به نقشه درآوردن حد فاصل آب شور- شیرین در مناطق ساحلی پیدا کرده است. یک مثال موردی خوب، که چنین کاربردی را توضیح می‌دهد، توسط میلز^۶ و همکاران (۱۹۸۸) و هوکسترا^۷ و بلوم^۸ (۱۹۹۰) انتشار یافته است. این مثال، به نقشه درآوردن چهار آبخوان را که باهم همپوشی داشته و به‌طور طرح‌وار در شکل ۲-۲۹ نشان

-
- 1 - Main Frame Computer
 - 2 - Spies
 - 3 - Frischknecht
 - 4 - Fitterman
 - 5 - Stewart
 - 6 - Mills
 - 7 - Hoekstra
 - 8 - Blohm

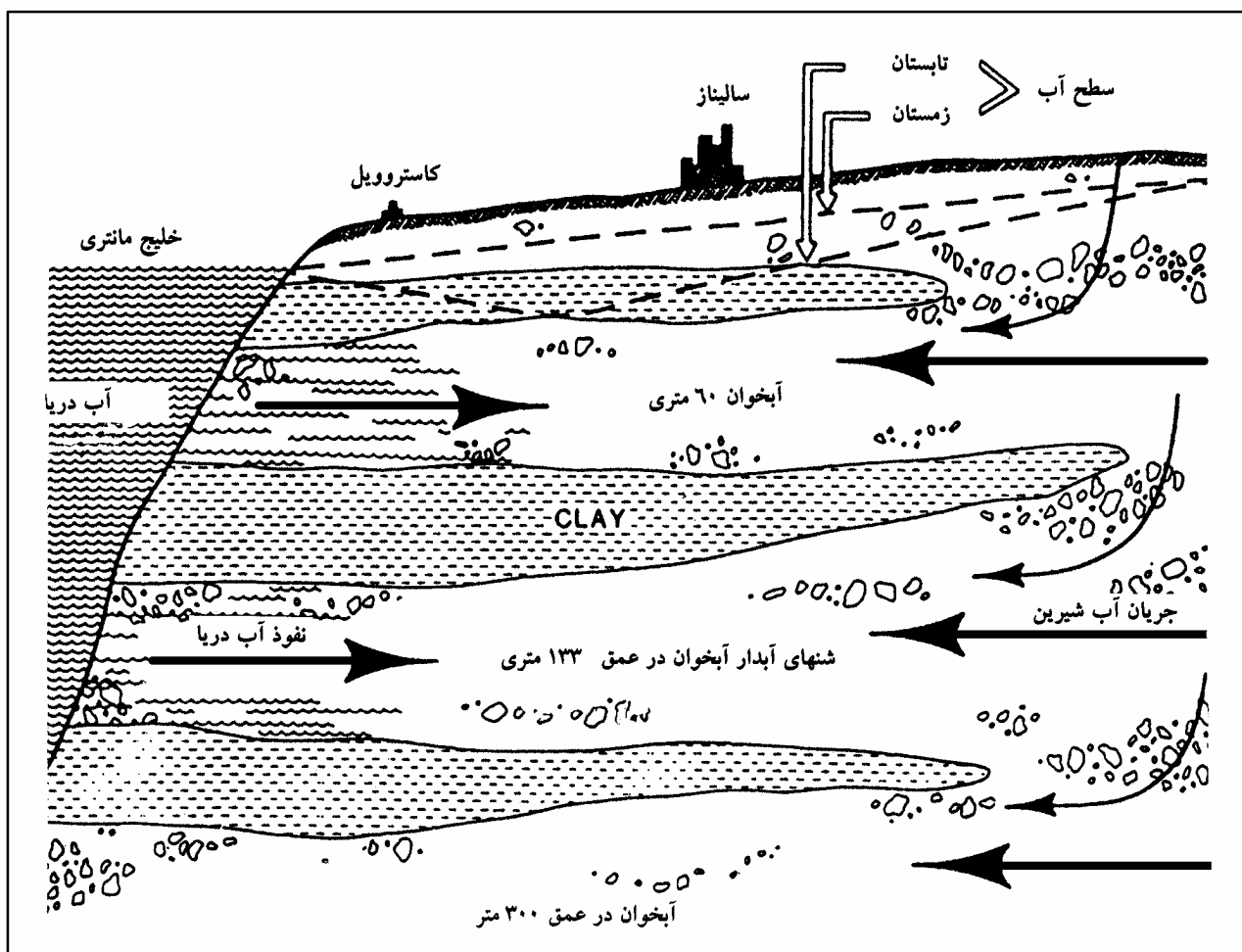
داده شده‌اند، توضیح می‌دهد. اینها در مجموع شامل یک آبخوان معلق^۱ (که در آن آب زیرزمینی شدیداً توسط کود آلوده شده است)، آبخوانی به ضخامت ۶۰ متر (که در آن آب شور دریا در فاصله زیادی رخنه کرده است)، آبخوانی با ۱۲۳ متر ضخامت (که آب شور کمتر در آن نفوذ نموده)، و عمیق‌ترین آبخوان به عمق ۳۰۰ متر (که در زمان بررسی توسط آب نمک آلوده نشده) می‌باشند. توالی لایه‌های اندود کننده رسی آبخوان‌های آلوده شده، مشکلی در مورد نفوذ از بین لایه‌های نمکی وسیع‌تر بالایی به لایه‌های پایین‌تر و آشکارسازی آنها ایجاد می‌کنند. برای رفع این مشکل، یک سیستم TEM با به کارگیری لوپ‌های فرستنده ۱۰۰×۱۰۰ متر برای به نقشه درآوردن آبخوان ۶۰ متری و برای آبخوان‌های عمیق‌تر از یک لوپ فرستنده ۲۰۰×۲۰۰ متری استفاده شد.

چهار منحنی مرحله نهایی سونداژ مقاومت ظاهری، در شکل ۲-۳ همراه با معکوس سازی‌های یک بعدی متناظر نشان داده شده‌اند. این سونداژها مربوط به موقعیت‌های تفسیر مقطع ژئوالکتریکی B-B' نشان داده شده در شکل ۲-۳۱ می‌باشند. به عنوان کمکی به تفسیر، اطلاعات برگرفته از نظارت (مونیتورینگ) چاه‌ها برای محدود کردن لایه‌های به کار رفته در پردازش معکوس سازی داده‌های TDEM مورد استفاده قرار می‌گرفتند. این اطلاعات، همچنین برای همبسته نمودن مقاومت ویژه‌های واقعی به دست آمده با تجمع کلرید هم‌ارز به کار گرفته شد. نتایج، نشان داد که یک مقاومت ویژه تقریباً ۸ اهم‌متری با غلظت نمک طعام ۵۰۰ ppm همبستگی دارد. با استفاده از این اطلاعات و اطلاعات مکانی که از طریق برداشت‌های TDEM تهیه شده، موقعیت‌های تفسیر شده پربندی هم‌ارز ۵۰۰ ppm برای عمق‌های ۶۰ و ۱۳۰ متر آبخوان‌ها به نقشه درآمده و در شکل ۲-۳۲ نشان داده شده‌است. همچنین در این شکل، محل پربندهای هم‌ارز ۵۰۰ ppm که از نظارت چاه‌ها فراهم شده آورده شده است. شرح بیشتر درمورد پربندهای به دست آمده از TDEM با انجام نمونه‌برداری‌های گسترده‌تر و مقایسه برداشت TDEM با آنچه از نظارت چاه‌ها به دست آمده، میسر می‌شود.

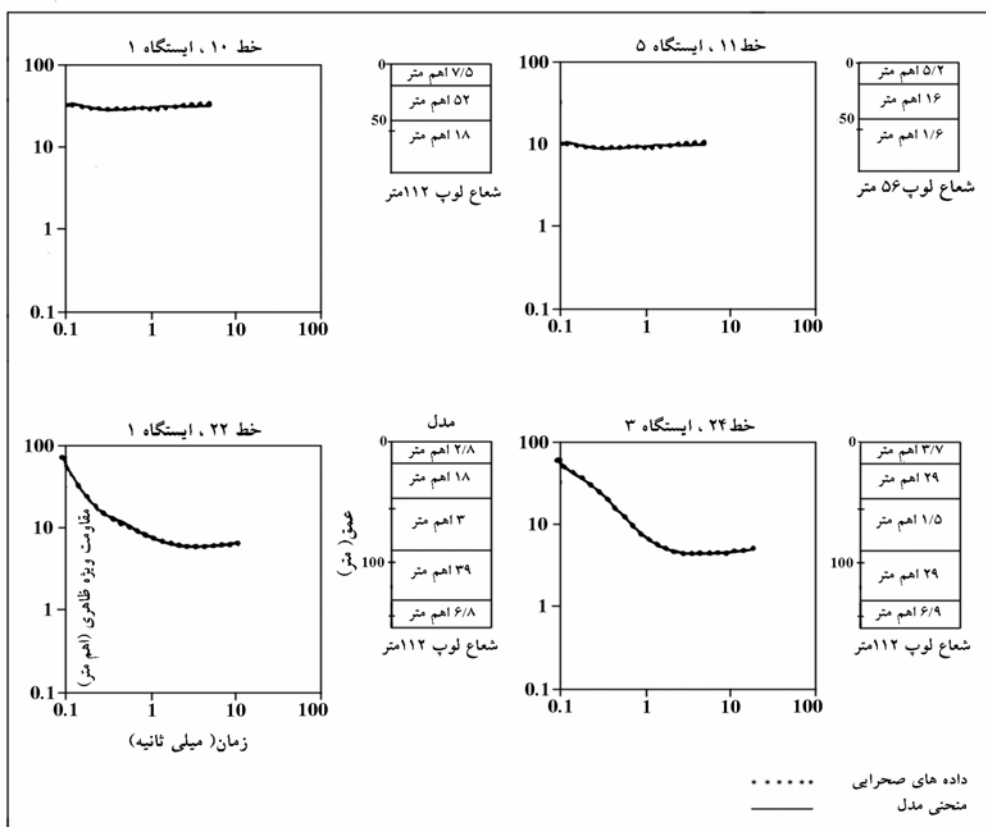
یک کاربرد خیلی مشابه توسط گلدمن^۲ و همکاران (۱۹۹۴)، برای به نقشه درآوردن نفوذ آب شور در نوار ساحلی غرب دریای مرده فلسطین شرح داده شده است. آنها سونداژزنی TDEM را با استفاده از یک ژئونیक्स PROTEM37 با روش معکوس سازی و آزمون هم‌ارزی توسط نرم‌افزار TEMIXGL (شرکت اینترپکس آمریکا) انجام دادند. ویژگی مهم این مثال، استفاده از TDEM برای به تصویر کشیدن زون گذر بین ناحیه نفوذی کاملاً شور و آب شیرین سطح بالایی می‌باشد.

1 - Perched Aquifer

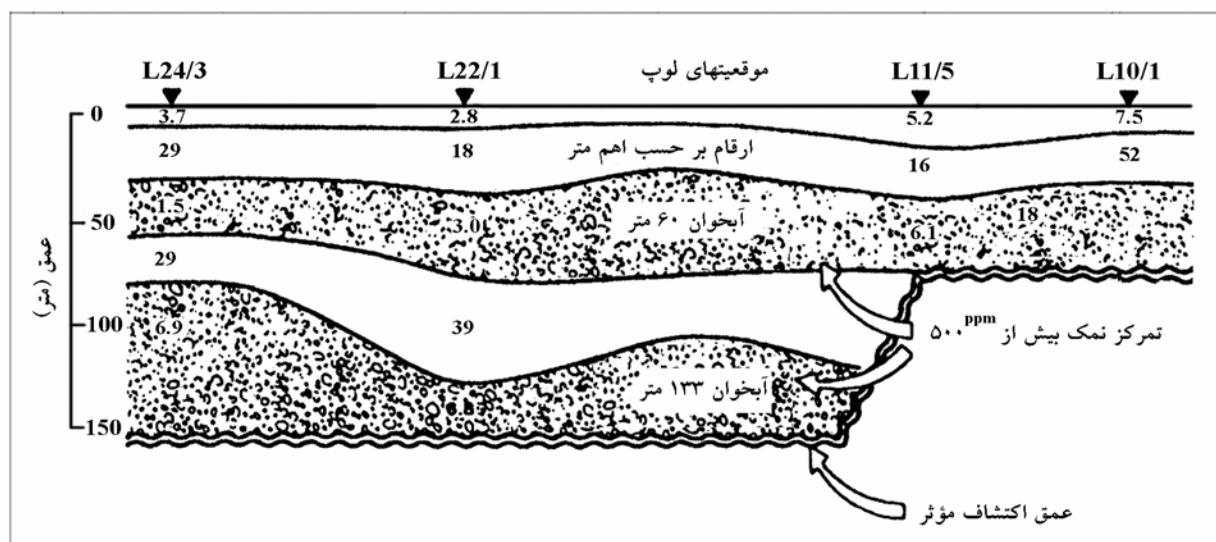
2 - Goldman



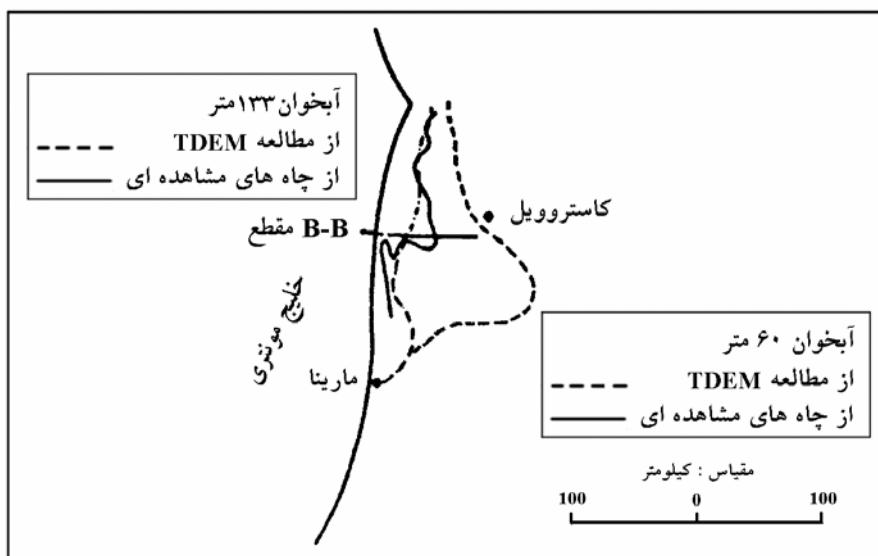
شکل ۲-۲۹- مقطع طرح وار هیدروژئولوژیکی در سالیناز ولی کالیفرنیا



شکل ۲-۳۰- چهار منحنی مرحله آخر مقاومت ویژه ظاهری، و معکوس سازی های تک بعدی مترادف با آن، در طول مقطع B-B' (نگا. شکل ۲-۳۱)



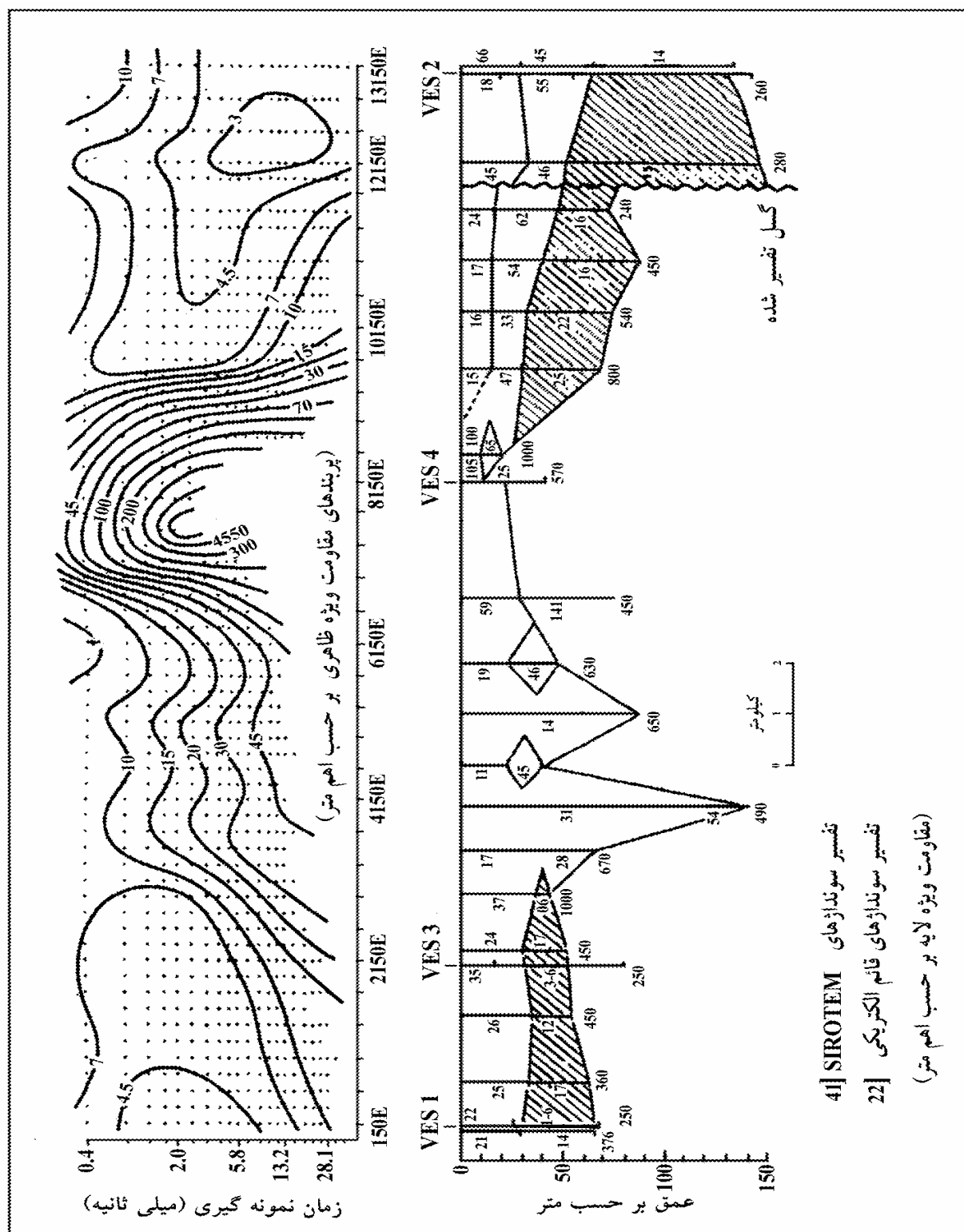
شکل ۲-۳۱- تفسیر مقطع ژئوالکتریکی B-B' استخراج شده از سونداژهای TDEM نشان داده شده در شکل ۲-۳۰.



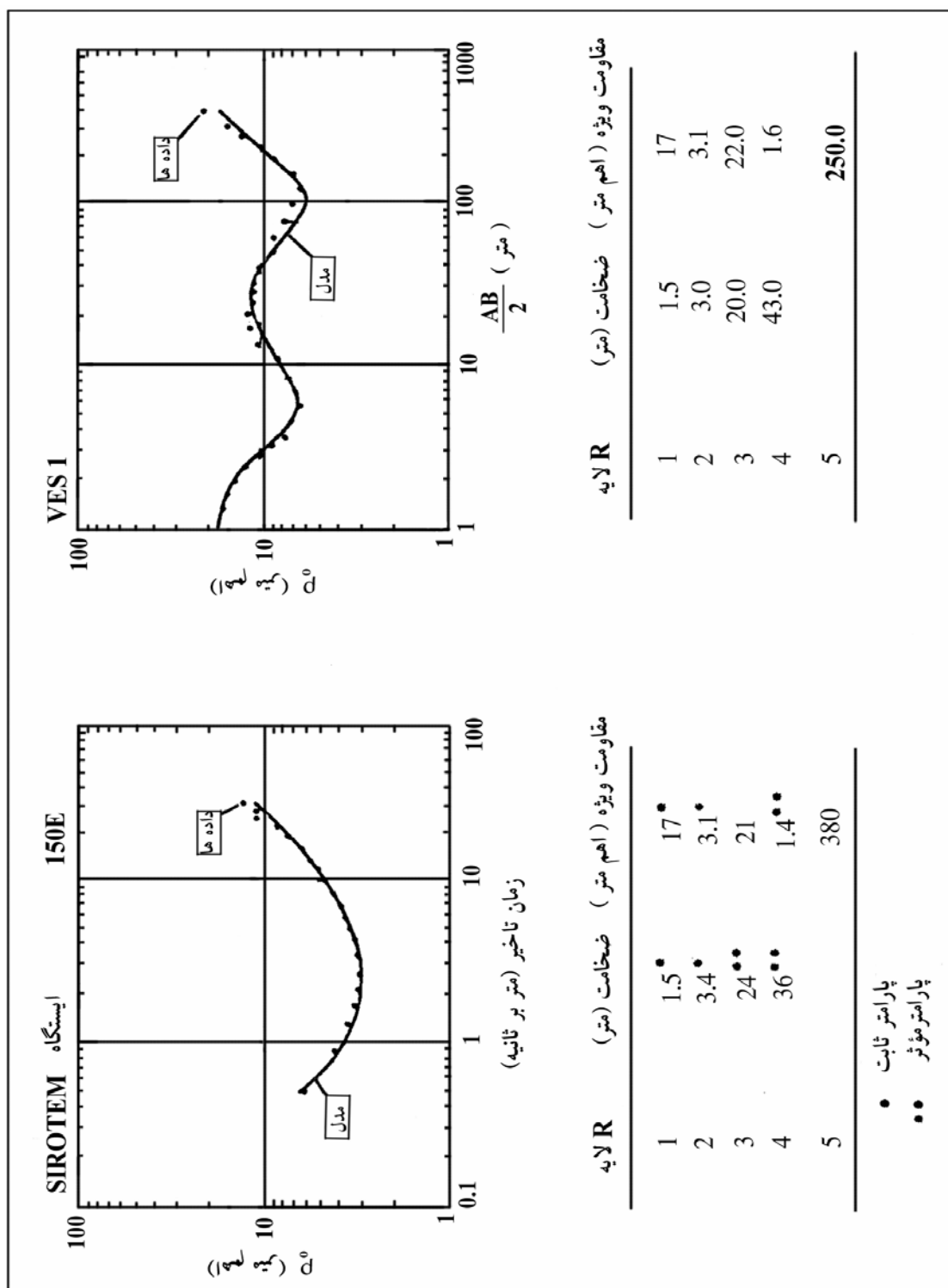
شکل ۲-۳۲- مقایسه وضعیت هم کالر ppm ۵۰۰ در آبخوان های ۶۰ و ۱۳۰ متر

یک مثال از کاربرد به نقشه درآوردن TDEM در ارتباط با مقاومت ویژه، مغناطیس و گرانی سنجی در حوضه مورای^۱، نیوسات ویلز^۲، استرالیا^۳ توسط دادز^۴ و آی ویک^۵ (۱۹۹۰) داده شده است. علاوه بر سامانه ژئونیکیس (FEM)EM34، یک سامانه SIROTEM حوزه زمان با لوپ فرستنده ۱۰۰×۱۰۰ متر با یک گیرنده چند چرخشی در مرکز آن مورد استفاده قرار گرفت. زمان های تأخیر مورد استفاده در گستره ۰/۴ تا ۵۲ میلی ثانیه بودند. یک مثال از شبه مقطع SIROTEM در طول یک خط برداشت همراه با مقطع ژئوالکتریک تفسیر شده در شکل ۲-۳۳ نشان داده شده است. همچنین نتیجه معکوس سازی مقاومت ویژه الکتریکی چهار سونداژ عمقی برای مقایسه در این شکل آورده شده اند. یک زون (قسمت سایه خورده در شکل ۲-۳۳ - ب) با گستره مقاومت ویژه حقیقی ۰/۶ تا ۲/۵ اهم متر به صورت آب شور زیرزمینی تفسیر شده است. یک زون وجود دارد که آب شور زیرزمینی در آنجا یافت نشده و این زون به عنوان یک بالآمدگی پی سنگ تفسیر شده است. این تفسیر، که همچنین با نتیجه های برداشت های مغناطیسی و گرانی سازگار بود، به دنبال آن توسط حفاری به اثبات رسید. یک جنبه این بررسی، آن است که معکوس سازی های VES سپس برای تثبیت پارامترهای لایه، برای دولایه بالایی در جریان معکوس سازی TEM مورد استفاده قرار گرفت. مثال های این مورد، در شکل ۲-۳۴ نشان داده شده است.

1 - Murray Basin
2 - New South Wales
3 - Australia
4 - Dodds
5 - Ivic



شکل ۲-۳۳- (الف) SIROTEM شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری در نیوسات ویلز، استرالیا، با (ب) مقطع ژئوالکتریکی مترادف با آن. آب شور زیرزمینی (زون سایه خورده) در هر پهلوی، سنگ کف بالا آمده دیده می شود.



شکل ۲-۳۴- ترکیب TEM و معکوس سازی مقاومت ویژه با استفاده از سونداژ قائم الکتریکی (VES) به منظور تثبیت پارامترهای لایه برای دولایه بالایی در معکوس سازی TEM.

این مثال‌های موردی، مزیت سونداژزنی TEM و مقاطعی که با سونداژهای نزدیک به هم در مطالعات هیدروژئولوژی انجام شده است را نشان می‌دهد. با ترکیب درست اندازه‌های فرستنده و سونداژهای نزدیک به هم، مقطع‌ها می‌توانند درجه بالایی از قدرت تفکیک قائم و جانبی را ایجاد نمایند. چنین نمونه‌برداری مکانی و افزایش اعتبارپذیری پردازش معکوس‌سازی می‌تواند مقاطع ژئوالکتریک دوبعدی را تولید کند که خیلی کم هزینه‌تر از آنهایی است که به‌تنهایی توسط حفاری چاه‌های آزمایشی صورت می‌گیرد.

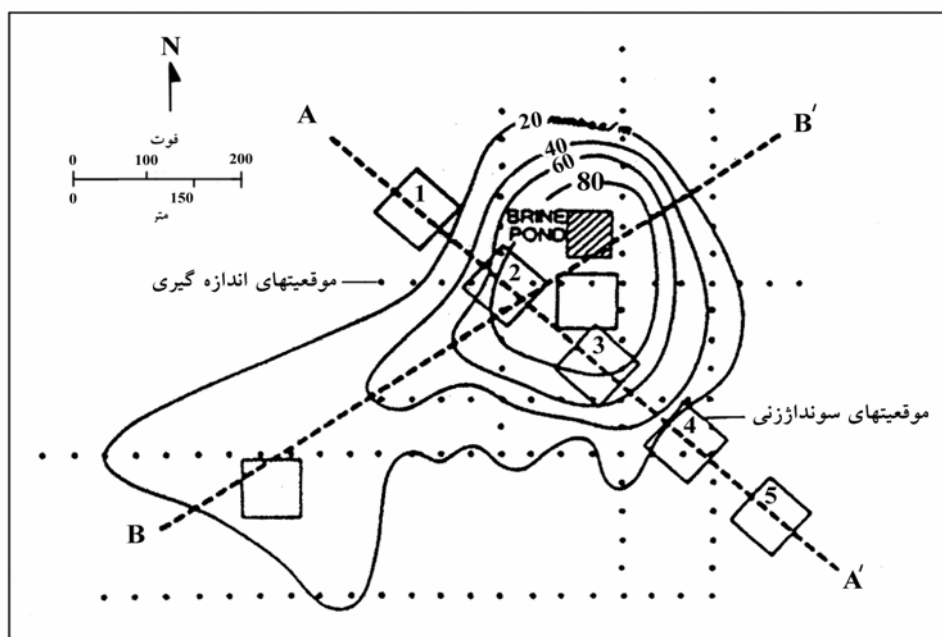
۲-۳-۳-۲ به نقشه درآوردن زبانه آلوده

هوکسترا^۱ و همکاران (۱۹۹۲) کاری موردی که نشان‌دهنده مزیت به‌کارگیری ترکیبی دوسونداژزنی FEM و TEM می‌باشند را انجام داده‌اند. برداشت در مجاورت یک مرداب آب شور در جنوب غربی تگزاس ایالات متحده آمریکا انجام شد. یک سیستم ژئونیکس EM34-20HFEM برای به نقشه‌درآوردن تغییرات رسانندگی ظاهری در اطراف گودال آب شور مورد استفاده قرار گرفته بود. از روی نقشه پربندی به‌دست آمده شکل ۲-۳۵، پیداست که افزایش رسانندگی ظاهری در یک مسافت قابل توجه از گودال آب شور آشکار شده است. با وجود این، آرایش دوقطبی با یک فاصله بین پیچه‌ای ثابت، فقط می‌تواند تأثیر کیفی توزیع این زبانه آلوده رساننده را فراهم کند. اگر هر دو جهت‌گیری‌های دوقطبی با فاصله‌های بین پیچه‌ای ۱۰ و ۴۰ متری مورد استفاده قرار گرفته بودند، معکوس‌سازی کمی، تعیین عمق زبانه را امکان‌پذیر می‌کرد.

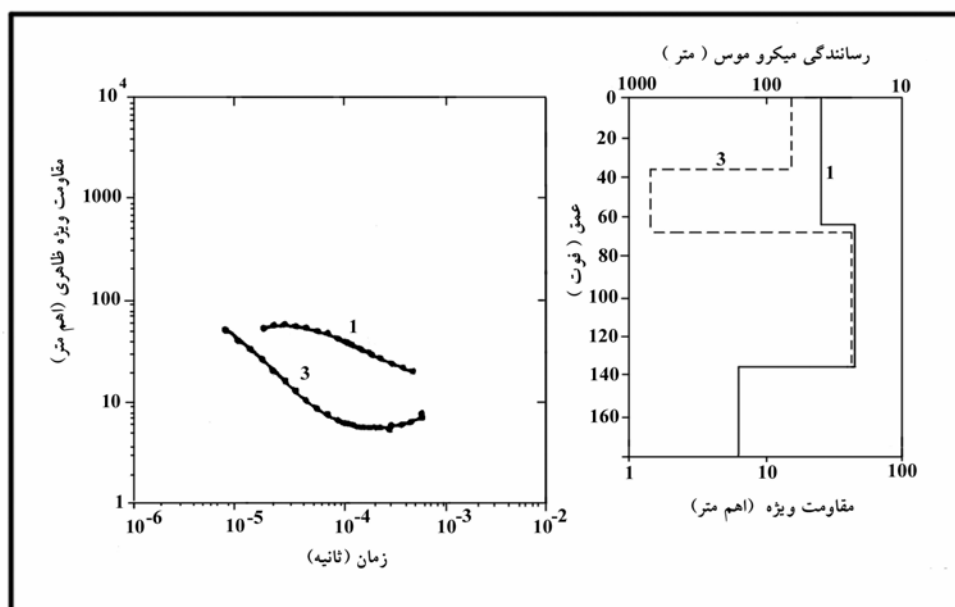
به‌جای افزایش دادن تعداد اندازه‌گیری‌ها با EM34، سونداژهای TEM با استفاده از یک ژئونیکس EM-37 یا یک لوپ فرستنده با طول جانبی ۳۰ متر انجام شده بودند. مثال‌هایی از دو سونداژ TEM به‌همراه نتایج معکوس‌سازی یک بعدی آنها در شکل ۲-۳۶ مشاهده می‌شود. به روشنی دیده می‌شود که به‌لایه‌ای ضخامت تقریبی ۱۰ متر و رسانندگی بالا در سونداژ ۳ وجود دارد که در سونداژ ۱ دیده نمی‌شود، اگرچه برای لایه‌هایی که در اعماق بیشتر واقع هستند رسانندگی در هر دو مورد مشابه است. این زون با رسانندگی بالا به دلیل زبانه آلوده نمکی می‌باشد. با استفاده از یک‌سری سونداژ، یک مقطع ژئوالکتریکی به وجود آمده است (شکل ۲-۳۷) که در آن موقعیت زبانه آلوده مشخص است (محدوده هاشورخورده). مزیت سونداژهای TEM درچنین کار موردی آن است که به کمک مدل‌های TEM (شکل ۲-۳۸) می‌توان مدلی مناسب برای مسیرهای مهاجرت احتمالی آلودگی به‌دست آورد. داده‌های EM را نه‌تنها می‌توان برای به نقشه‌درآوردن موقعیت مکانی زبانه‌های آلوده به‌کار گرفت، بلکه برای تعیین ضخامت آنها نیز یک نشانه به حساب می‌آید. گذشته از این و شاید اساسی‌تر این است که آنها اطلاعات مهمی برای ارتقای یک‌مدل مسیرهای مهاجرت را فراهم آوردند.

بوسلی^۲ و همکاران (۱۹۹۰) مثال‌هایی از به‌کارگیری TEM در به نقشه‌درآوردن زبانه‌های آلوده در نزدیک پرت^۳ در غرب استرالیا تهیه نموده‌اند. یکی از آنها برای بحث در اینجا انتخاب شده است.

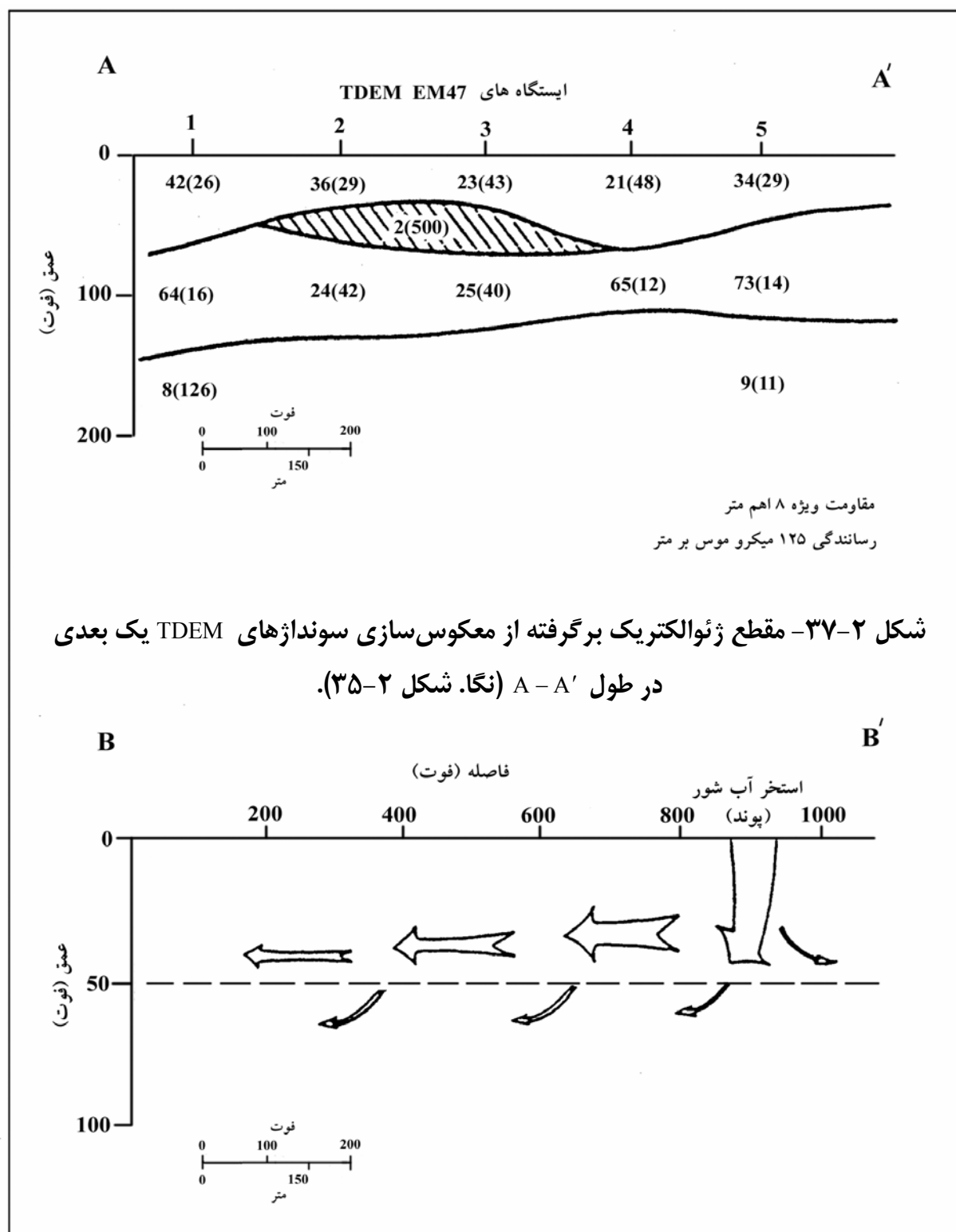
1 - Hoekstra
2 - Buselli
3 - Perth



شکل ۲-۳۵- نقشه موقعیت و نقشه پربندی رسانندگی ظاهری استخراج شده از اندازه‌گیری‌های به دست آمده با یک ژئونیگس EM34 همراه با فاصله پیچ‌های ۲۰ متر، دوقطبی مغناطیسی افقی در اطراف یک گودال تبخیری آب شور. شماره‌های واقع در مربع‌ها نشان‌دهنده محل سونداژهای لوپ ژئونیگس EM47 است.



شکل ۲-۳۶- منحنی‌های سونداژ مقاومت ویژه ظاهری TDEM و معکوس‌سازی‌های یک بعدی مترادف با آنها در امتداد مقطع A - A' (نگاه. شکل ۲-۳۵).

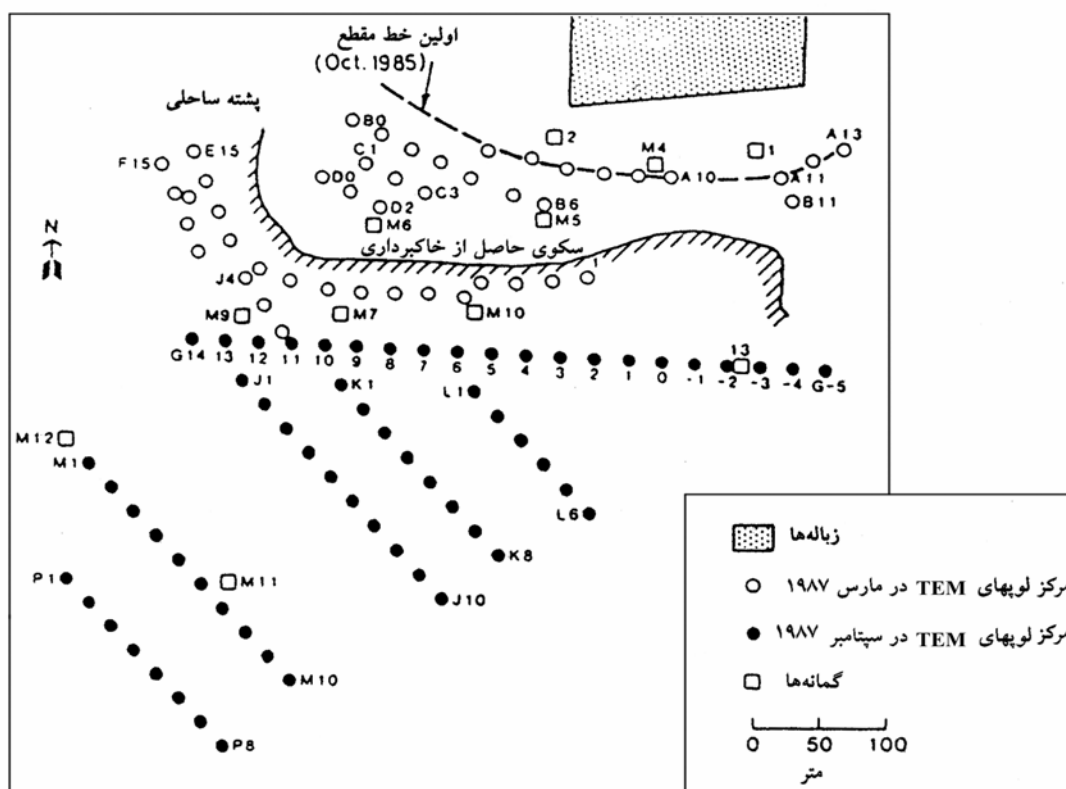


شکل ۳۷-۲- مقطع ژئوالکتریک برگرفته از معکوس سازی سونداژهای TDEM یک بعدی در طول A - A' (نگاه. شکل ۲-۳۵).

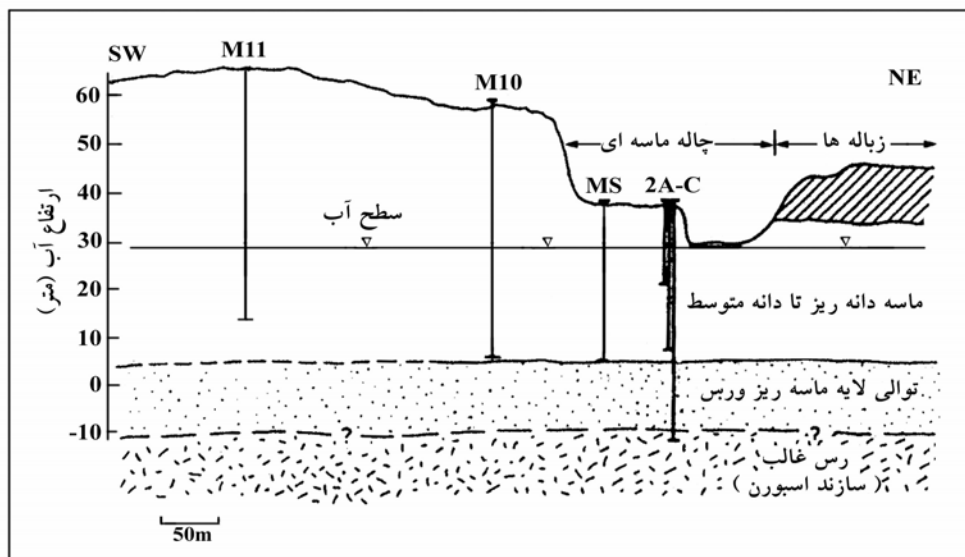
شکل ۳۸-۲- مدل مسیرهای مهاجرت آب شور در طول مقطع B - B' (نگاه. شکل ۲-۳۵) به دست آمده از برداشت های ژئوفیزیکی.

یک محل جمع‌آوری مواد زائد در مورلی در نزدیکی پرت تأسیس شده بود. ماسه از سازندهای ماسه‌ای سطحی مربوط به پلیوسن - هولوسن استخراج شده و گودال ایجاد شده با زائده‌های جامد زون اشباع نشده موجود درون ماسه دارای یک مقاومت ویژه ۳۶۰۰ اهم‌متر می‌باشد و بیش از ۵۰ متر ضخامت دارد. زون اشباع شده از سازند ماسه‌ای سطحی، بین ۲۰ و ۳۰ متر ضخامت و یک مقاومت ۵۰ اهم‌متر دارد. سازندهای ماسه‌ای متراکم نشده، شامل ماسه‌های خیلی دانه‌ریز (نرم) تا متوسط است که به تدریج با افزایش عمق درشت شده در تماس با سازند اسبورن شنی می‌شوند. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی به سمت جنوب غربی می‌باشد.

اندازه‌گیری‌های TEM با استفاده از یک سیستم SIROTEM با یک لوپ فرستنده با طول جانبی ۲۵ یا ۵۰ متر، با یک لوپ تودرتو^۱ و یک گیرنده دوقطبی با مساحت مؤثر ۱۰۴ مترمربع که در مرکز لوپ فرستنده جایگزین شده بود انجام گرفت. ابزار، قابلیت اندازه‌گیری پاسخ در یک زمان تأخیر بین ۴۹ میکروثانیه تا ۱۶۰ میلی‌ثانیه را داشت. موقعیت مراکز لوپ TEM در شکل ۲-۳۹ و موقعیت چاه‌های آزمایشی در مقطع شکل ۲-۴۰ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۹- نقشه محل دفن زباله مورلی و محدوده برداشت با مراکز لوپ‌های فرستنده TEM ۲۵ متری و موقعیت چاه‌های آزمایشی



شکل ۲-۴۰- مقطع در امتداد سری چاه‌های M11, M10, M5, 2A-C و محل دفن زباله در مورلی، پرت، وسترن استرالیا

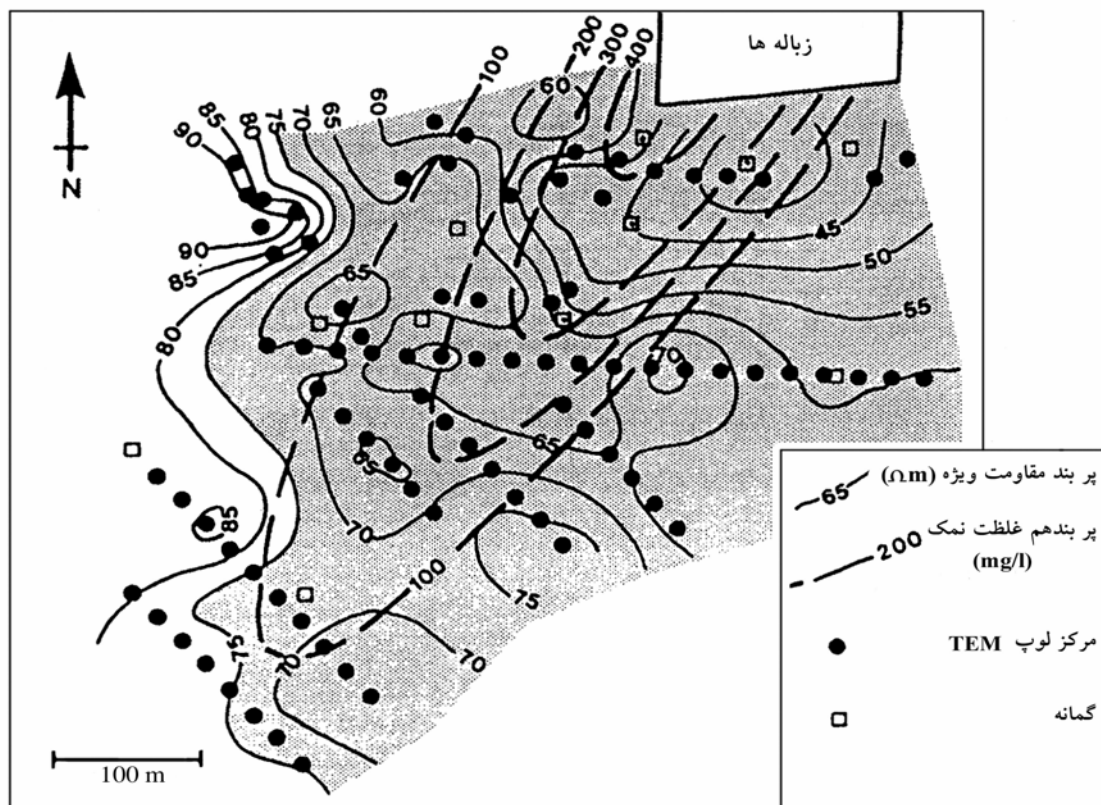
نتایج بررسی TEM در شکل ۲-۴۱ نشان داده شده که در آن مقادیر مقاومت ویژه سازند ماسه‌ای برگرفته از روش معکوس سازی TEM، به صورت خطوط پربندی درآمده‌اند. زبانه آلوده ناشی از محل دفن زباله^۱ به این صورت تفسیر شده است که در این مکان‌ها مقادیر مقاومت کوچک‌تر یا مساوی ۷۵ اهم‌متر تعیین شده بودند (ناحیه سایه‌دار در شکل ۲-۴۱). جهت عمومی این زون بی‌هنجار مانند جهت کلی جریان آب زیرزمینی می باشد. این موضوع توسط برهم نهش^۲ تمرکزهای غلظت‌های هم کلر روی نقشه مقاومت ویژه تأیید شده است. این غلظت‌های هم کلر از تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب چاه‌های مختلف به دست آمده است.

۲-۳-۳-۲ به نقشه درآوردن فضاهای خالی زیرسطحی

یک سامانه SIROTEM برای بررسی یک سری از فروچال‌ها^۳ در طول جاده پیشنهادی آلیس اسپرینگز^۴ تا راه‌آهن داروین^۵ در سرتاسر حوضه ویزو^۶، قلمروهای شمالی^۷ استرالیا استفاده شده است (نلسون^۸ و هی^۹ ۱۹۹۰). وجود فروچال‌ها در این محدوده، به

- 1 - Land-Fill
- 2 - Super Imposing
- 3 - Sinkholes
- 4 - Alice Springs
- 5 - Darwin
- 6 - Wiso Basin
- 7 - Nelson
- 8 - Haigh
- 9 - Doline

خوبی شناخته شده بود، اما یک فروریزش ناگهانی بخشی از بزرگراه بوچانان به درون یک فروچال در سال ۱۹۸۲ اهمیت خطر از دیدگاه مهندسی را چشمگیر نمود، چنان که پس از آن، بلافاصله بررسی تمام عیاری در این مورد انجام شد.



شکل ۲-۴۱- نقشه هم مقاومت ویژه به دست آمده از داده های سونداژ TEM با پربندهایی با غلظت های هم کلر که از تجزیه شیمیایی نمونه های آب به دست آمده، از گمانه ها تهیه شده است. زبانه های آلوده توسط مقادیر مقاومت ویژه کمتر یا مساوی ۷۵ اهم متر، به صورت سایه دار نشان داده است.

روش های گوناگون ژئوفیزیکی، برحسب تأثیر آنها روی زمینی موج دار و نامرتب که هم چنین با خاک لاتریتی پوشیده شده بود مورد آزمایش قرار گرفته است. بدیهی است که حفره های درونی پر از هوا باید سبب بی هنجاری های مقاومت ویژه شده باشند، اما تغییرات مشاهده شده، به قدری کوچک بودند که این روش برای پوشش لازم قطعه های بزرگ زمین ها در امتداد کنارگذر خط آهن پیشنهادی مفید شناخته نشده است. با وجود این، دیوارها و کف دولاین های^۱ شناخته شده در بردارنده مواد غنی از رس هادی الکتریسیته اند، به علاوه فرآیند تشکیل حفره های قیفی آهکی (فروچال) مربوط به شستشوی سیلیس بودند

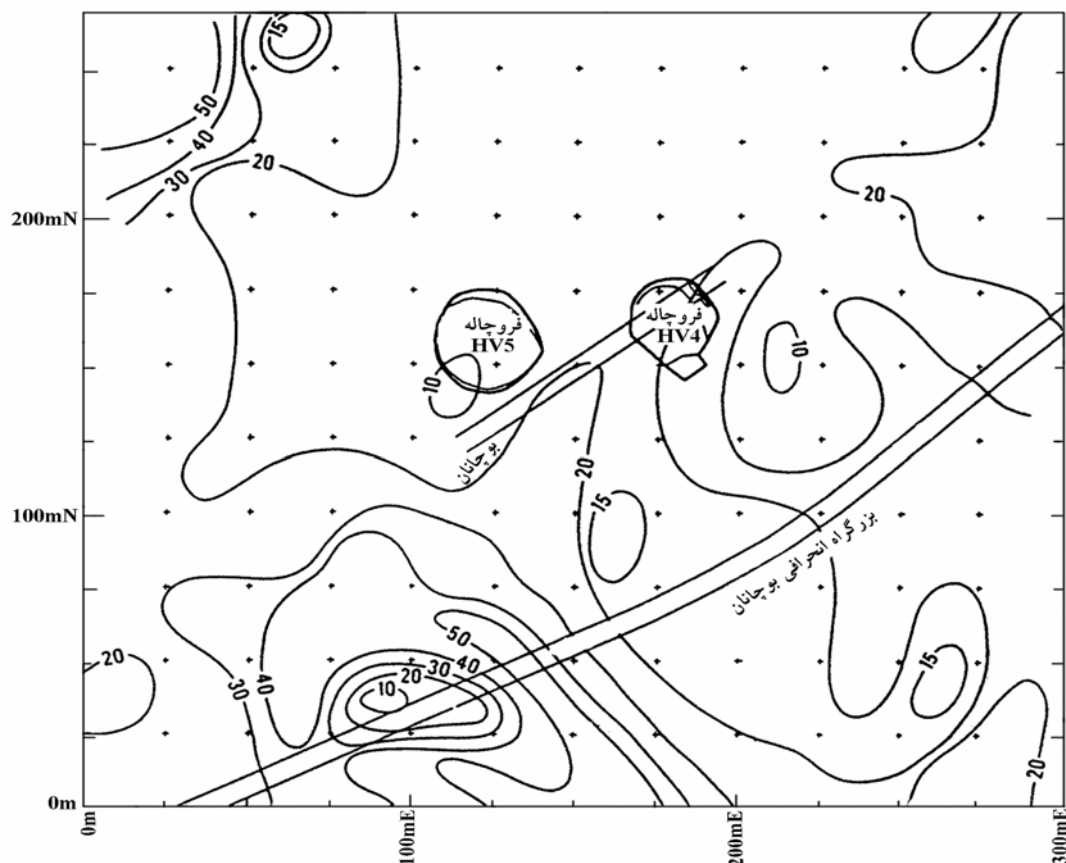
1 - Doline

که لوله‌ها یا ساختارهایی ایجاد کرده‌اند. این لوله‌ها یا با خرده‌ریزهای شستشو یافته، هوازده، حمل شده یا آتره شده‌ای همراه بودند که معلوم شد سرشتی رسانی دارند. در نتیجه، نوع هدف ژئوفیزیکی انتخاب شده، یک فضای زیرزمینی خالی واضح نبوده بلکه هدف‌های ثانویه رسانا بوده‌اند. در واقع TEM برای حفره‌های پر از هوا مناسب نخواهد بود زیرا سرعت پخش موج‌های درون حفره‌ها در ردیف سرعت نور است. به طور مشابه در امواج لرزه‌ای نیز همین عوارض شستشو یافته سیلیسی سبب ایجاد بی‌هنجاری‌های شاخص و قابل آشکارسازی در زمان‌های تأخیر، تضعیف دامنه نسبی و محتوای طیف امواج می‌شود.

در ادامه، کارهای آزمایشی زیادی با روش‌های مختلف، ثابت نمود که لوپ انطباقی SIROTEM بهترین روش برای شناسایی سریع توام با برداشت‌های لرزه‌ای به کار رفته برای عارضه‌های مشخص است. علاوه بر بررسی‌های SIROTEM، کارهای لرزه‌ای توسط نلسون و هی (۱۹۹۰) با جزییات قابل ملاحظه‌ای توضیح داده شده است.

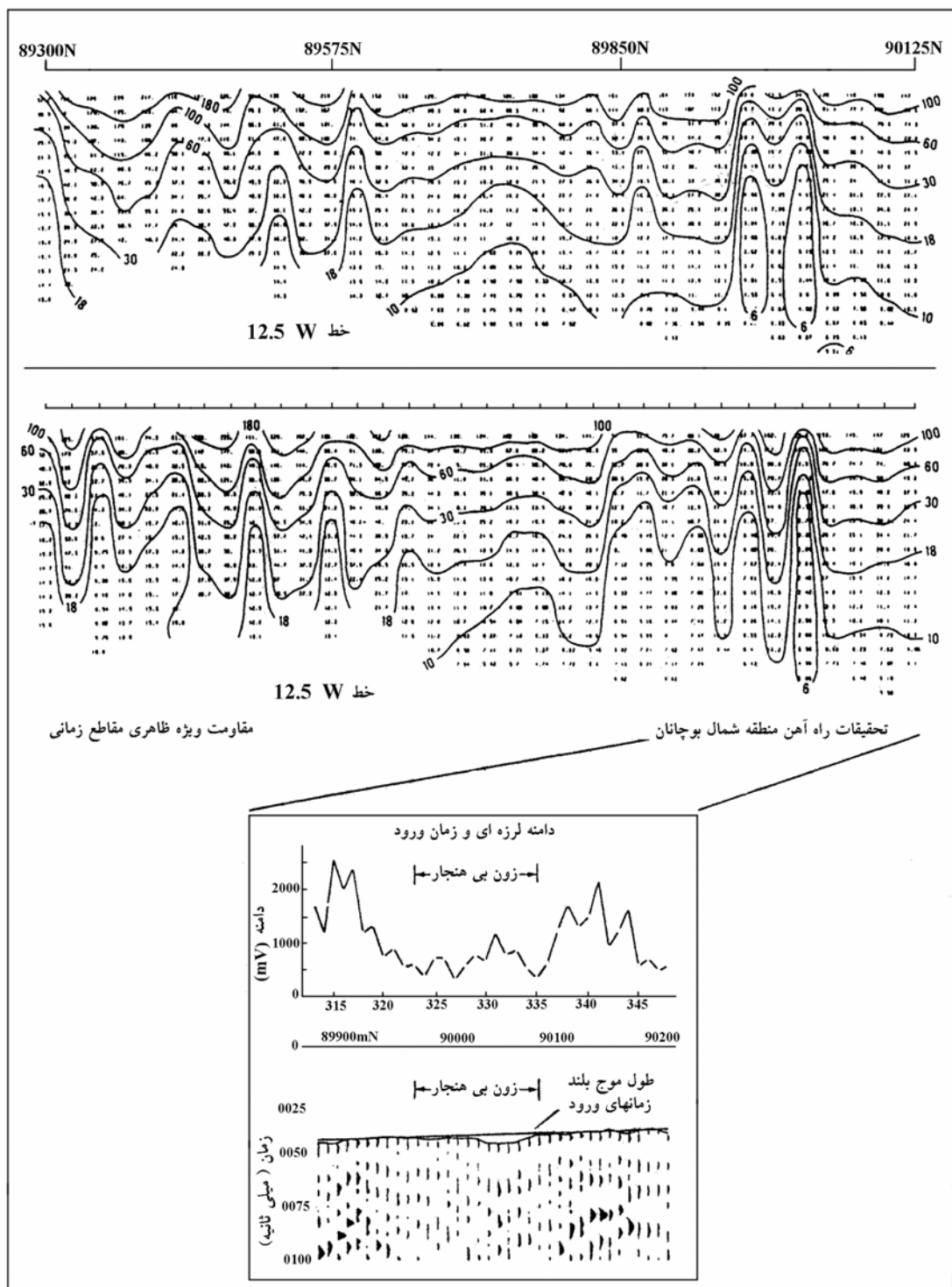
از میان نواحی آزمایشی متعدد سایت آزمایشی بزرگراه بوچانان واقع در ۶۰ کیلومتری غرب بزرگراه استوارت یک زون مهم سازند دولاین‌ها شناخته شده بود. در بخشی از این کار، لوپ ۲۵ متری انطباقی برای برداشت‌های SIROTEM به کار رفت که هر لوپ، چهار دور سیم دارا بود تا توان سیگنال را بهبود بخشد. میزان برداشت‌ها با این سیم، تا ۴ کیلومتر در روز می‌رسید. دو خط موازی به فاصله ۲۵ متر از هم برداشت شدند، به علاوه برای کمک به تعیین محدوده ابعاد عوارض شناخته شده خطوط موازی نیز با فاصله‌های بیشتر مورد بررسی قرار گرفتند.

یافته‌های کلی بررسی‌های SIROTEM آن است که سرشتی زمین‌شناسی محلی توسط توزیع معمولاً یکنواخت مقاومت ویژه، با مقاومت ویژه ظاهری ۵۰-۱۰۰ اهم‌متر، و با ساختارهای لایه‌ای یکنواخت با شیب ملایم مشخص می‌شوند. برعکس معلوم شد که محدوده‌های متأثر از دولاین‌ها دارای افت و خیز جانبی مقاومت ویژه تا سقف ۲۰ اهم‌متر و با ظاهر هندسی ناهمگن و پیچیده‌ای هستند. یک نقشه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری حاصل از به‌کارگیری سیستم SIROTEM برای قسمتی از سایت آزمایشی، جایی که دو دولاین شناخته شده وجود داشت، در شکل ۲-۴۲ نشان داده شده است. فروچال‌های HV4 و HV5 آنهایی بودند که ناگهان در یک شب از سال ۱۹۸۲ اتفاق افتادند. اتومبیلی که درون سوراخ تازه تشکیل‌شده‌ای رانده شده بود، دچار خسارت کلی شده ولی راننده توانست خود را با صدمات جزئی نجات دهد. به دنبال این پیشامد، بزرگراه در طول مسیر عادی نشان داده شده در شکل ۲-۴۲ منحرف شد. با این وجود، کاهش چشمگیر در مقاومت ویژه ظاهری (تا ۱۰ اهم‌متر) روی مختصات (۹۰ mE، ۴۰ mN) تقریباً روی بزرگراه منحرف شده پیدا شد. این عارضه، با بی‌هنجاری‌های زمان رسید لرزه‌ای همبستگی یافته و به صورت فروریزش قریب‌الوقوع عارضه دولاین تفسیر شده است. شکل ۲-۴۳ نتایج ترکیبی دو خط برداشت SIROTEM موازی به فاصله ۲۵ متر از هم را به صورت مقادیر مقاومت ویژه پربندی شده نشان می‌دهد. روی هر دو خط برداشت بین ۸۹ ۹۰۰ N و ۹۰ ۲۰۰ N یک زون بی‌هنجاری پیچیده معلوم شده این بی‌هنجاری در مقایسه با شکل‌های بی‌هنجاری در گستره دولاین‌های شناخته شده سرشتی زمین مستعد فروچال شدن را دارد. بی‌هنجاری SIROTEM با تفسیر نتایج لرزه‌ای شکست مرزی نیز سازگاری دارد. از نظر کاهش تدریجی دامنه و تأخیر زمان رسید روی عارضه بی‌هنجاری نیز سازگاری دارد. همبستگی ترکیبی در زون بی‌هنجاری، اطمینان بیشتری به تفسیرهای کلی بخشیده است.



شکل ۲-۴۲- نقشه بی‌هنجاری مقاومت ویژه ظاهری SIROTEM روی قسمتی از سایت آزمایشی بزرگراه بوچانان، بخش شمالی استرالیا.

شرح کامل بررسی‌ها و کارهای انجام‌شده توسط نلسون، و هی و همکارانشان (۱۹۹۰)، ارزش مطالعه دقیق را دارد چون مثالی عالی از یک بررسی متفکرانه انجام شده است. مانند بسیاری از پروژه‌های نظیر این مورد، عدم وجود حمایت مالی در مراحل بحرانی، مانع انجام مستقیم بررسی‌های نهایی گردید. مجموعه‌ای از گمانه‌های انتخاب شده می‌توانست به آزمایش مدل زمین ریخت‌شناسی تشکیل این عارضه‌ها کمک کند. با توجه به اهمیت فراوان این عارضه‌ها در مهندسی روی قطعه‌های بسیار بزرگی از زمین‌های بخش شمالی استرالیا، عدم تأمین مالی کامل چنین کاری، اشتباهی بزرگ محسوب می‌شود.



شکل ۲-۴۳- شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری SIROTEM، ۲۵ متری لوپ انطباقی در امتداد دو خط به فاصله ۲۵ متر از هم در دو طرف محور راه خط آهن پیشنهادی در بوچانان های وی. مقاطع دامنه و موج نقش لرزه ای روی زون های بی هنجار SIROTEM، احتمال اینکه این مناطق نشانه ای از زمین مستعد فروچال باشند را تأیید می کند.

۴-۲ روش‌های فرکانس بسیار پایین (VLF)

۴-۲-۱ مقدمه

اولین دستگاه VLF زمینی که به‌گونه‌ای تجارتي در دسترس قرار گرفت، در سال ۱۹۶۴ توسط رونکا^۱ ساخته شد و چند سال بعد، دیگران نیز به تولید این دستگاه‌ها پرداختند. گسترده‌ترین برداشت‌های زمینی مورد قبول، بدون شک با دستگاه ژئونیکس EM16 صورت گرفته است. دستگاه EM16R نیز نوع دیگری از دستگاه مذکور است، که به‌خوبی در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه مورد استفاده قرار گرفت. در سال‌های اخیر، دستگاه‌های VLF جدیدی به بازار عرضه شده، که از میان آنها می‌توان به دستگاه WADI از شرکت ABEM، دستگاه ترکیبی EDA شامل مگنتومتر - VLF با نام OMNI IV، 3 - VLF و 4 - VLF از شرکت سینترکس و 2 - VLF از شرکت فونیکس^۲ اشاره کرد. اندازه‌گیری‌های VLF از طریق هوا نیز قابل اجراست، ولی در اینجا فقط سامانه‌های ایستگاه زمینی در نظر گرفته شده‌اند. مک‌نیل و لابسون^۳ (۱۹۹۱) مروری جامع بر روش‌های VLF ارائه داده‌اند.

روش VLF به‌عنوان وسیله‌ای عالی، ارزان و سریع برای نقشه‌شناسایی کانسارهای مینرالیزه و شکستگی‌های حاوی آب ماندگار شناسایی شده است. اما کاربرد آن در کارهای مهندسی و زیست‌محیطی هنوز اندک است. به‌هرحال، با ظهور سامانه‌های مدرن VLF همراه با دیتالاگر ترکیبی^۴، انتخاب خودکار فرستنده‌های مناسب و افزایش روش‌های تفسیر و نمایش، این فن به‌تدریج برای اهدافی غیر از اکتشاف معدن مانند آشکارسازی غارها و به نقشه‌درآوردن محل دفن زباله‌ها، مورد آزمایش قرار گرفته است.

۴-۲-۲ اصول کار

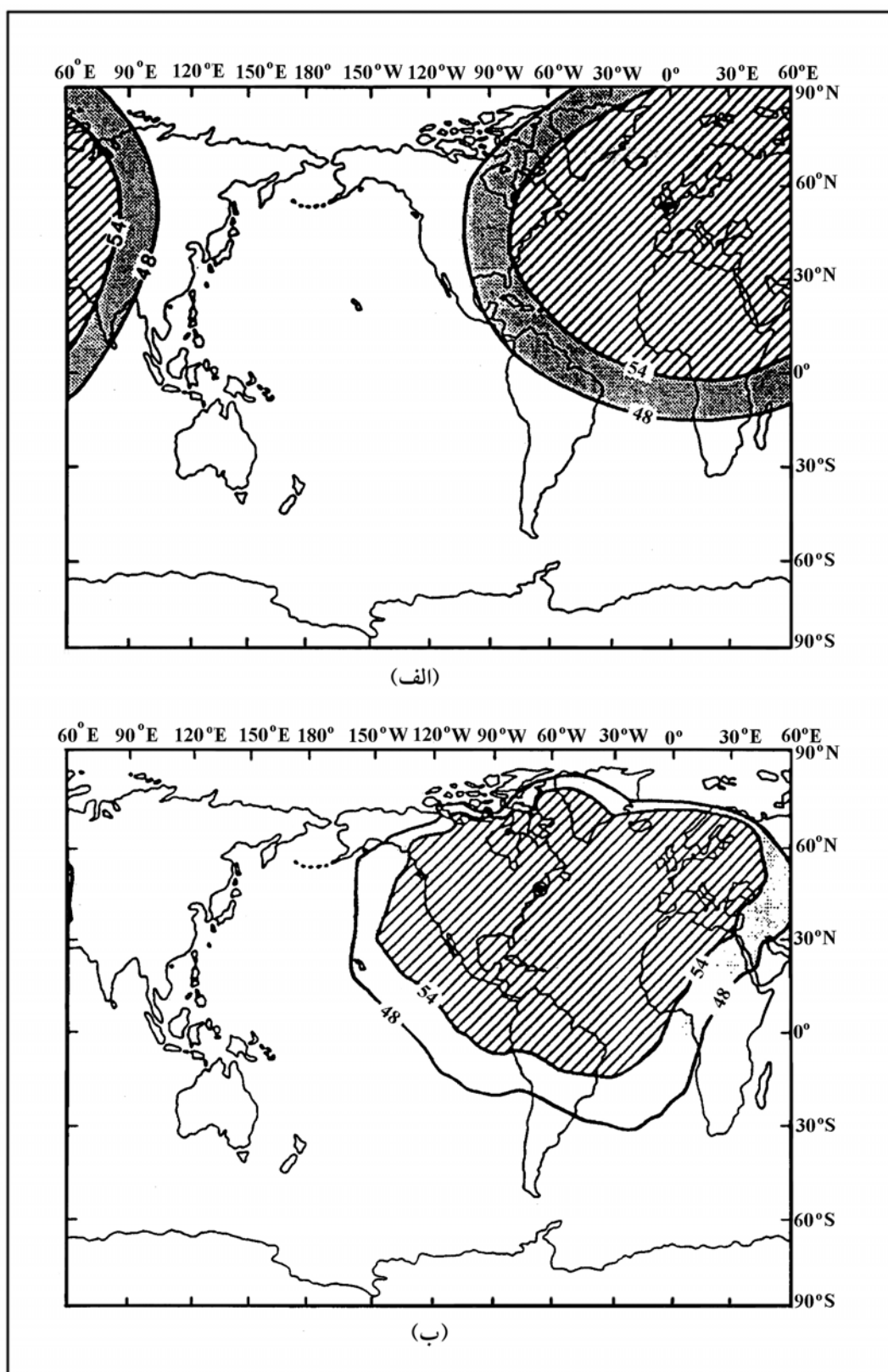
یازده فرستنده اصلی VLF که کاربرد اولیه آن برای ارتباط‌های نظامی در نظر گرفته شده، در جهان توزیع گردیده است. این فرستنده‌ها، امواج پرقدرت EM ایجاد می‌نمایند که در فواصل بیشتر از چند ده کیلومتر مانند امواج تخت عمل می‌کنند به‌طوری که انتشار بیرونی آنها به‌صورت افقی است. پربندهای تراز سیگنال‌ها برای دو فرستنده اصلی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. سطوح محصور شده در پربندهای ۵۴ دسی‌بل دارای قدرت سیگنال خوبی می‌باشند، درحالی‌که سطوح محدود به پربند ۴۸ دسی‌بل، فقط دارای قدرت سیگنال حاشیه‌ای است. سطوح واقع در سمت چپ که به‌صورت سفید نشان داده شده، از نظر قدرت سیگنال‌ها ضعیف‌تر از آن است که این روش بتواند بدون تکنیک‌های ویژه یا به‌طور موثر مورد استفاده قرار گیرد.

1 -Ronka

2 - Phoenix

3 -Mc Neill and Labson

4 -Integrated Data Logger



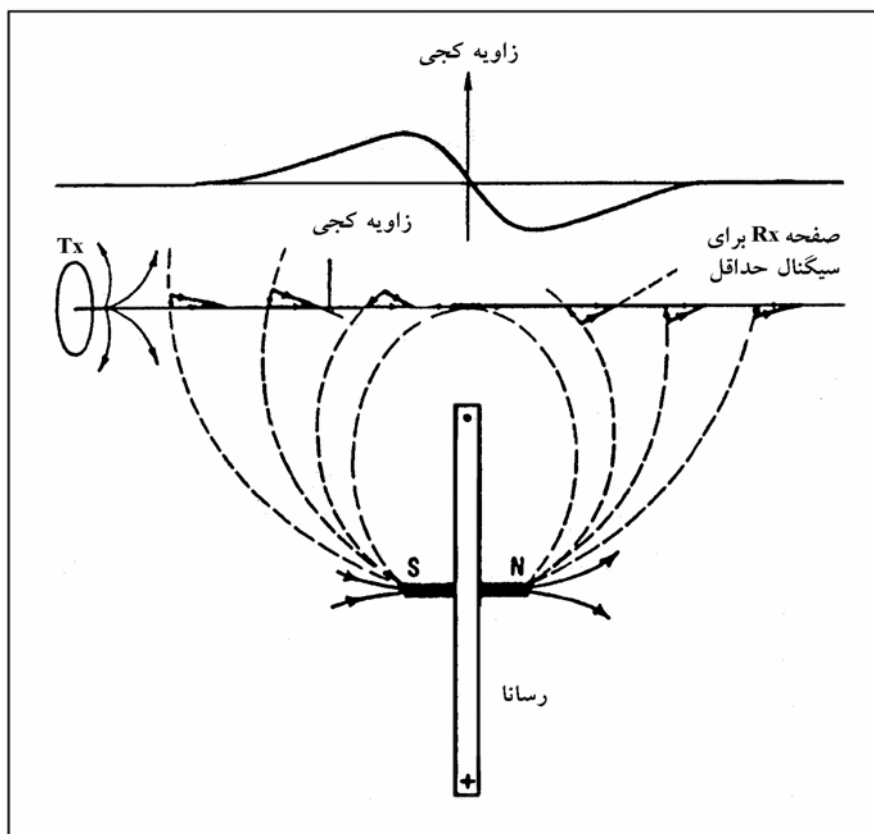
شکل ۲-۴۴- پربندهای تراز سیگنال برای فرستنده‌های VLF: (الف) GBR در راگبی، انگلستان،
(ب) NOAA در کاتلر آمریکا

اگر موقعیت یک صفحه قائم رسانا به گونه‌ای باشد که محور بلند آن در یکی از امتدادهای شعاعی از یک فرستنده فعال قرار گرفته باشد، بردار مغناطیسی به طور مماسی در سرتاسر صفحه رسانا عمل می‌کند (شکل ۱-۵ فصل قبل). جریان‌های ادی در این رسانا، القاء شده و میدان الکترومغناطیسی ثانویه‌ای را به وجود می‌آورد. برای یک رسانا که به ترتیب گفته شده جهت‌گیری نکرده باشد، تولید جریان‌های ادی دارای کارایی کمتری بوده و قدرت میدان ثانویه القایی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

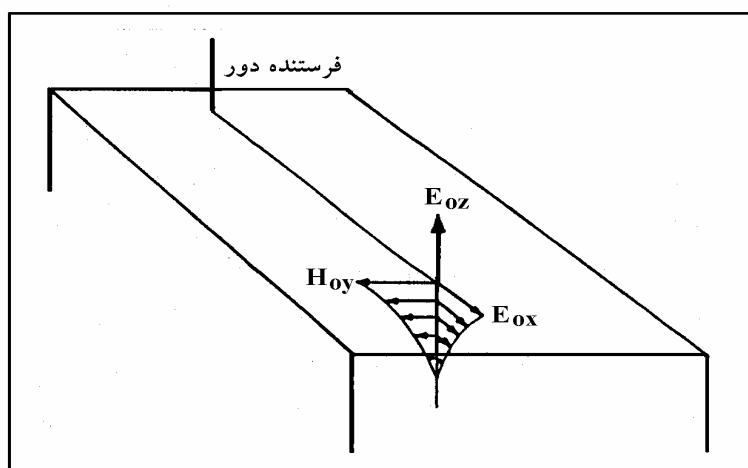
به عنوان مثال، برای یک صفحه قائم رسانای واقع در محیطی مقاوم، وقتی پروفیل برداشت در امتداد بردار مغناطیسی باشد، پاسخ زاویه کجی از جمع برداری مؤلفه‌های اولیه و ثانویه به دست می‌آید (شکل ۲-۴۵). بردار مغناطیسی اولیه افقی است. میدان الکترومغناطیسی القایی از نظر دامنه و جهت برحسب موقعیت آن نسبت به هدف موردنظر، تغییر می‌کند. در یک طرف هدف مورد مطالعه، زاویه بین دوبردار پیش‌گفته به حد اکثر می‌رسد، سپس در طرف دیگر، به مقدار حداقل رسیده و پس از آن در خارج از اثر، هدف مورد مطالعه به مقدار صفر برمی‌گردد. نقطه‌ای که در آن زاویه کجی برای گذر از موقعیت حداکثر به حداقل به صفر می‌رسد، نقطه فراگذر خوانده شده و درست در بالای سر هدف رسانا قرار دارد. اگر هدف مورد مطالعه شبیدار باشد، شکل بی‌هنجاری دچار اعوجاج می‌شود، به طوری که قسمت مثبت یا منفی منحنی بی‌هنجاری تقویت می‌گردد؛ این تقویت به قیمت تضعیف دیگر قسمت آن تمام می‌شود.

بیشترین دامنه مؤلفه‌های مختلف الکتریکی و مغناطیسی، در سطح زمین قرار گرفته و با افزایش عمق، کاهش می‌یابند (شکل ۲-۴۶). برداشت‌های VLF، به طور گسترده برای به نقشه درآوردن اهداف زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش، به دلیل آنکه عموماً دارای عمق نفوذی محدود به نزدیک سطح می‌باشد، برای تعیین اهداف عمقی مناسب نیست. دستگاه VLF شامل یک آنتن هوایی (یا بیشتر) است که مشخصات آنها به فرستنده‌ای ویژه مربوط است. دستگاه EM16 VLF، دارای یک آنتن بلوری مناسب برای فرستنده مشخصی است که بتوان به دستگاه متصل کرد. در استفاده از دستگاه، متصدی مربوط آنرا به طور افقی نگه‌داشته، سپس حول یک محور

قائم آنرا می‌چرخاند تا با استفاده از یک سیگنال شنوایی به موقعیت صفر برسد. در این حال، امتدادی که دستگاه نشان می‌دهد، در جهت خط مؤلفه افقی بردار الکتریکی است. پروفیل‌های برداشت، در امتداد عمود بر راستای خط پیش‌گفته، به عبارت دیگر در امتداد بردار مغناطیسی برای همان فرستنده طراحی می‌شوند. در طول یک پروفیل برداشت در هر ایستگاه، دستگاه حول محور افقی می‌چرخد. متصدی دستگاه، آنرا جلو چشم خود نگه‌داشته و زاویه کجی دستگاه را از طریق یک چشمی مشاهده می‌نماید. برای تشخیص صفر در سیگنال شنوایی، متصدی دستگاه به عقب و جلو جابه‌جا می‌شود. در نقطه صفر سیگنال شنوایی، زاویه کجی از دستگاه خوانده می‌شود. دستگاه‌های VLF می‌توانند با کاربرد یک دوقطبی زمینی با طول بیش از ۵ متر که توسط یک قطعه سیم (که دوطرف آن به زمین وصل می‌شوند)، برای اندازه‌گیری مؤلفه الکتریکی نیز به کار برده شوند. در این نوع آرایش (VLF-R)، مقاومت ویژه ظاهری و فاز میدان افقی الکتریکی در زمین نیز می‌تواند مشخص گردد.



شکل ۲-۴۵- پروفیل زاویه کجی در بالای یک صفحه رسانای قائم



شکل ۲-۴۶- چگونگی کاهش دامنه مؤلفه‌های میدان برحسب عمق به صورت طرح‌وار

در دستگاه‌های جدید، مانند ABEM WADI از سه فرکانس به‌طور همزمان استفاده می‌شود و دستگاه می‌تواند فرستنده‌ای که قوی‌ترین سیگنال را انتشار می‌دهد تشخیص دهد. بدون احتیاج به جهت‌گیری دستگاه، متصدی آنرا در طول پروفیل انتخابی حرکت داده و اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. درحالی‌که این طریقه دارای مزایای مشهودی از نظر کاهش زمان شروع اندازه‌گیری است، دستگاه‌هایی از این نوع که به‌طور خودکار تنظیم می‌شوند، یک عیب اساسی به همراه دارند. عیب آن این است که فرستنده با قوی‌ترین سیگنال در هر زمان از نظر ایجاد سیگنال ممکن است متفاوت بوده و در نتیجه درپاره‌ای اوقات تکرار اندازه‌گیری‌ها در طول یک پروفیل با مشکل روبه‌رو می‌شود. به این ترتیب، ثابت نگه‌داشتن پارامترهای برداشت، با مشکل روبه‌رو می‌گردد.

اشکال دیگری که در ارتباط با هر سیستم VLF وجود دارد، آن است که روش به‌طور کامل وابسته به یک فرستنده ویژه عمل کننده است. مواقعی وجود دارد که فرستنده‌ها خاموش می‌باشند و هیچ منبع سیگنالی از یک فرستنده با زاویه سمت مشخص نسبت به هدف مورد مطالعه در دسترس نیست. بعضی اوقات ممکن است فرستنده مشخصی در میانه یک عملیات برداشت خاموش شود. هیچ‌چیزی در حیطه کنترلی که متصدی دستگاه بتواند انجام دهد تا وضعیت را تصحیح کند، نیست، مگر این‌که فرستنده دیگری با زاویه سمت مناسب در دسترس بوده و دستگاه مورد استفاده دارای آنتن هوایی مناسب باشد. با دستگاه‌های جدید، امروزه امکان اندازه‌گیری میدان‌های مربوطه از دو فرستنده عمود بر هم که یکی از آنها در راستای خط برداشت قرار دارد، فراهم شده است. امتدادی که به یکی از فرستنده‌ها می‌رسد، موازی امتداد هدف مورد مطالعه و فرستنده دیگر عمود بر امتداد قبلی قرار دارد. این دو امتداد، متناسب به مد پلاریزاسیون E و H هستند. بدین ترتیب، با دستگاه‌های جدید، در هر دو مد VLF-EM و VLF-R با استفاده از دو فرستنده عمود بر هم در هر ایستگاه، می‌تواند هشت پارامتر به دست آید (مؤلفه‌های هم‌فاز و تربیعی در مد VLF-EM، مقاومت ویژه و فاز در مد VLF-R برای هر فرستنده).

۲-۴-۳ اثر توپوگرافی بر اندازه‌گیری‌های VLF

توپوگرافی می‌تواند بر اندازه‌گیری‌های VLF اثر منفی داشته باشد و بنابراین قبل از آنکه بی‌هنجاری مورد نظر بتواند آشکارسازی شود، باید تصحیح توپوگرافی صورت پذیرد. اگر توپوگرافی مرتفع مانند یک پشته^۱ موازی امتداد ساختار مورد نظر باشد، و بنابراین عمود بر امتداد خط برداشت قرار گرفته باشد، از شدت اثر توپوگرافی موجود کاسته می‌شود. بدین ترتیب، در صعود به طرف فراشیب، زاویه کجی به مقدار اندکی افزایش می‌یابد و با پایین آمدن از فروشیب، این زاویه کاهش می‌پذیرد. اگر امتداد خط برداشت در راستایی موازی امتداد پشته باشد، در این صورت هیچ ارتباطی را در رابطه با توپوگرافی نمی‌توان مشاهده کرد. پاسخ توپوگرافی واقعی که وابسته به مقاومت ویژه مواد موجود در محل است، می‌تواند پیچیده باشد. اگر پروفیل زاویه کجی منعکس کننده توپوگرافی موجود باشد، در این صورت به‌طور قاطع، حاکی از حضور اثر توپوگرافی است. به‌طور مشابه، اگر بی‌هنجاری‌های با قطبش (پلاریته) مثبت مرتبط با توپوگرافی مرتفع باشد و بی‌هنجاری‌های با قطبش منفی در ته دره‌ها قرار گیرند، نشانگر آن است که اثر توپوگرافی وجود دارد.

داده‌های زاویه کجی VLF، به‌طور معمول فقط به‌صورت کیفی تفسیر می‌شوند. نقطه‌ای که در آن، زاویه کجی برای گذر از مقدار قطبش مثبت به مقدار منفی به صفر می‌رسد، معمولاً به‌عنوان محلی تفسیر می‌شود که سر رسانای عامل بی‌هنجاری قرار دارد. نقطه مذکور، در طول پروفیل، به‌طور معمول کاملاً روشن است. زمانی که داده‌ها به شکل نقشه سه‌بعدی (فضایی) رسم شود، مکان هندسی تمام نقاط صفر (خطی که نقاط فراگذر از پروفیل را به هم وصل می‌کند) به راحتی قابل تشخیص نیست. یکی از راه‌هایی که برای حل این مسئله وجود دارد، استفاده از یک صافی همانند آنچه فریزر^۱ (۱۹۶۹) ارائه کرده، می‌باشد. صافی مذکور، طوری طراحی شده که داده‌های زاویه کجی را ۹۰ درجه تغییر می‌دهد، به‌طوری که نقاط فراگذر و عطف، به‌صورت پیک در می‌آیند. همچنین این صافی طول موج‌های فضایی بلند را برای کمک به فائق آمدن بر بعضی جنبه‌های اثرات توپوگرافی، تضعیف می‌کند. به همین ترتیب، صافی فریزر تغییرات لحظه‌ای شدت سیگنال فرستنده را کاهش می‌دهد. علاوه بر آن، طراحی این صافی طوری است که نوفه‌های موجود در داده‌ها را افزایش نمی‌دهد و ویژگی مهم آن راحتی کاربرد آن است.

برای اجرای صافی فریزر، داده‌های چهار نقطه متوالی که با فاصله منظم برداشت شده‌اند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجرای صافی، به راحتی با استفاده از یک ماشین حساب یا لیست‌های ویژه^۲ امکان‌پذیر می‌باشد. جمع داده‌های زاویه کجی حاصل از اولین و دومین نقطه از مجموع مقدار سومین و چهارمین نقطه کم می‌شود و برای نقطه وسط واقع بین دومین و سومین ایستگاهی که زاویه کجی در آنها اندازه‌گیری شده، منظور می‌گردد. به عنوان مثال، اگر دنباله‌ای از داده‌های زاویه کجی مانند: $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ که در فواصل منظم اندازه‌گیری شده‌اند، در نظر گرفته شود، در این صورت صافی فریزر F_i به‌طریقه زیر اجرا می‌شود:

اولین مقدار صافی شده برابر $F_1 = (M_3 + M_4) - (M_1 + M_2)$ است، و برای نقطه وسط بین ایستگاه‌های ۲ و ۳ منظور می‌گردد. دومین مقدار صافی شده برابر $F_2 = (M_4 + M_5) - (M_2 + M_3)$ و برای نقطه وسط بین ایستگاه‌های ۳ و ۴ منظور می‌شود؛ و به همین ترتیب در طول پروفیل محاسبه ادامه پیدا می‌کند.

نکته حائز اهمیتی که باید به‌خاطر داشت، قطبش زاویه کجی از نظر علامت مثبت یا منفی آن در محاسبه مقادیر صافی شده می‌باشد. برای تفسیر، بی‌تردید بهتر است که از داده‌های خام و صافی شده به‌طور همزمان استفاده شود. اثر صافی شدن داده‌ها می‌تواند باعث جابه‌جایی جانبی پیک بی‌هنجاری در طول خط برداشت شود. بنابراین برای تعیین موقعیت دقیق‌تر هدف مورد مطالعه، از داده‌های خام نیز باید استفاده کرد.

برای تفسیر کمی بیشتر، دو رهیافت را می‌توان اختیار کرد. یکی از آن‌ها استفاده از مجموعه منحنی‌های استاندارد و قسمت‌های الحاقی به عنوان کمک کننده تفسیر است، که توسط مادن و وزوف^۳ (۱۹۷۱) انتشار داده شد. به هر حال، این منحنی‌ها به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفته، زیرا بیشتر مفسران، ظاهراً رهیافتی که بر مبنای تجربه یا نمودگرام‌های

1 - Fraser

2 - Spread Sheet

3 - Maden and Vozoff

محاسبه شده برای رساناهای ورقه‌ای شکل شبیدار را ترجیح می‌دهند (سینها^۱ ۱۹۹۰). برای تفسیر تفصیلی‌تر به‌ویژه در ارتباط با اهداف دوبعدی و سه‌بعدی، شبیه‌سازی عددی می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد (نيسن^۲، ۱۹۸۶، اژیلوی^۳، ۱۹۸۹)، هرچند از این طریقه، بیشتر در کارهای تحقیقاتی استفاده می‌شود تا در راستای برداشت‌های تجارتي. ارزش اصلی برداشت‌های VLF تکیه بر سهولت استفاده در صحرا برای مطالعات شناسایی می‌باشد که در آن، به‌طور معمول تفسیر کیفی کافی است.

۲-۴-۵ کاربردها و مطالعات موردی

۲-۴-۵-۱ تعیین موقعیت حفره‌های زیرسطحی

اژیلوی و همکاران (۱۹۹۱) درخصوص برداشت VLF انجام شده در نزدیکی آلكالای هنارس^۴ که در ۲۰ کیلومتری شرق مادرید اسپانیا قرار دارد، توضیح داده‌اند. در زمان قرون وسطی، برای تامین آب شیرین شهر آلكالا، گالری‌هایی در عمق ۲ تا ۴ متر برای زهکشی سطحی در نهشته‌های تراسی از گراول کواترنری که روی یک سازند رسی ناتراوای مربوط به ترشیری قرار گرفته، حفر شده است. موقعیت و گسترش جانبی این گالری‌ها نامشخص بوده است. کم عمقی گالری‌ها، بدین معنی است که آنها برای ریزش از پتانسیل بالقوه‌ای برخوردارند. درواقع، نشست جاده‌ای که روی یکی از گالری‌ها ساخته شده، نتیجه مستقیم عمل آنها است.

شکل ۲-۴۷ (الف) مثالی از مقطع زمین‌شناسی حفر شده در یک گالری نوعی را نشان می‌دهد. گالری‌ها که به‌طور متوسط ۱ متر پهنا و ۲ متر بلندی دارند، به‌طور گسترده‌ای سرپا بوده و تا فصل مشترک گراول-رس گسترش می‌یابند. گالری‌ها در زمان برداشت خشک بوده و بنابراین تشکیل تونل‌های پر شده از هوا را می‌داده‌اند.

روی قسمتی از گالری‌های شناخته‌شده، شبکه‌ای ۱۰۰×۱۰۰ متر با خطوط عمود بر امتداد گالری‌ها و فاصله ۱۰ متر یا کمتر به‌اجرا درآمده است. برای نمونه‌برداری فضایی از بی‌هنجاری‌های مشاهده شده، فاصله ایستگاه‌ها در طول خط برداشت بین ۵ تا ۱ متر متغیر است. همچنین موقعیت سامانه گالری‌ها توسط تئودولیت و قطب‌نما به‌صورت نقشه زیرزمینی برای تهیه اطلاعاتی برای مقایسه با نتایج VLF، تهیه شده است. دستگاه VLF مورد استفاده، VLF-3 ساخت شرکت سینترکس است که دارای دو فرستنده عمود برهم می‌باشد به منظور دو برداشت VLF-EM و VLF-R. تهیه داده‌های پلاریزاسیون H و پلاریزاسیون E به‌ترتیب از ایستگاه NAA امریکا (۲۴ کیلوهرتز) و Ste Assise فرانسه (۱۶/۸ کیلوهرتز) فراهم گردیده است. در شکل ۲-۴۷ (ب)، چگونگی انتشار جریان در اطراف یک حفره دوبعدی بی‌نهایت مقاوم واقع در یک لایه رسانا، آن‌گونه که توسط گالری‌ها به دست می‌آید، نشان داده شده است. خطوط شارش جریان، با نزدیک شدن به یکدیگر در اطراف گالری، باعث کانالیزه شدن آشکاری می‌گردد. برداشت‌های VLF-EM هیچ‌گونه پاسخی از سامانه گالری به دست نمی‌دهد. با در نظر گرفتن

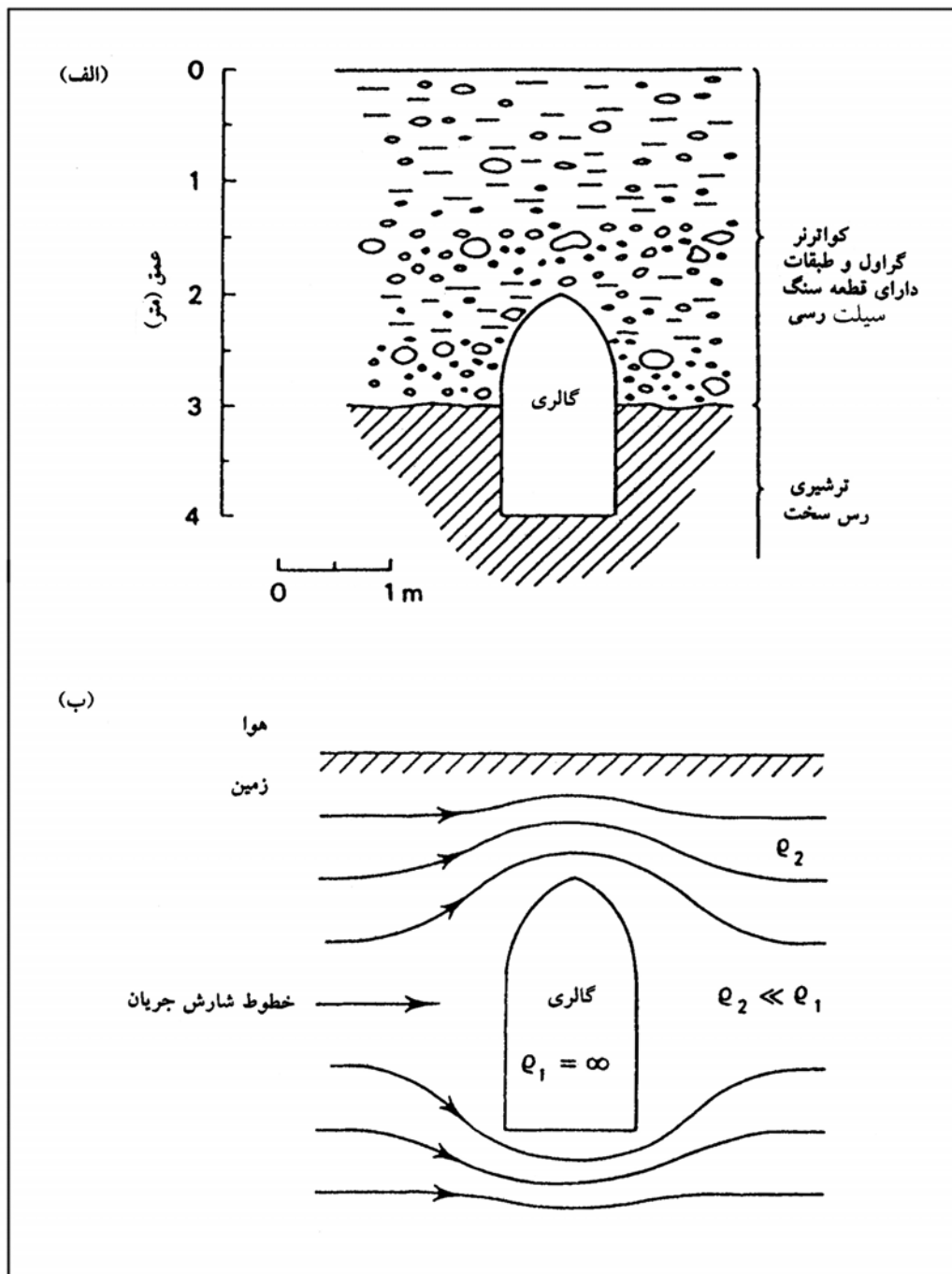
1 - Sinha

2 - Nissen

3 - Ogilvy

4 - Alcalá de Henares

مقاومت ویژه‌های حقیقی طبقات گراول (۲۰۰ اهم‌متر)، رس زیرین (۱۰ اهم‌متر) و نیز شکل هندسی گالری نسبت به پلاریزاسیون H، هیچ گرادیان مغناطیسی قائمی توسط چنین ساختاری ایجاد نمی‌شود.



شکل ۲-۴۷- (الف) مقطع نوعی، (ب) نمایش طرح‌وار خطوط شارش جریان اولیه در اطراف یک گالری زهکش حاوی هوا (بی‌نهایت مقاوم) در آلکالا، نزدیک مادرید اسپانیا

برعکس، نتایج پلاریزاسیون VLF-R و H، بی‌هنجاری‌هایی را ایجاد کرد که به‌طور مستقیم با سامانه گالری می‌توان آنها را همبستگی داد و می‌توان با استفاده از یک معکوس‌سازی دوبعدی معمول، آن را شبیه‌سازی کرد. مقاومت ویژه ظاهری شاخص (۵۲ اهم‌متر) و بی‌هنجاری‌های فاز (۵۰ از یک پیک به پیک مجاور) مستقیماً در بالای گالری، شناخته شده‌ای مشاهده گردیده است (شکل ۲-۴۸). کاهش فاز در بالای گالری نشانگر وجود ساختار مقاومی در زیر بالاترین لایه است. از آنجایی که وجود زیر لایه رسانای رسی شناخته شده است، تنها هدف مقاوم موجود، گالری می‌باشد. این موضوع، نشان‌دهنده کارایی پلاریزاسیون H در اندازه‌گیری‌های VLF-R، برای آشکارسازی حفره‌های خالی موجود در محیط رسانا است.

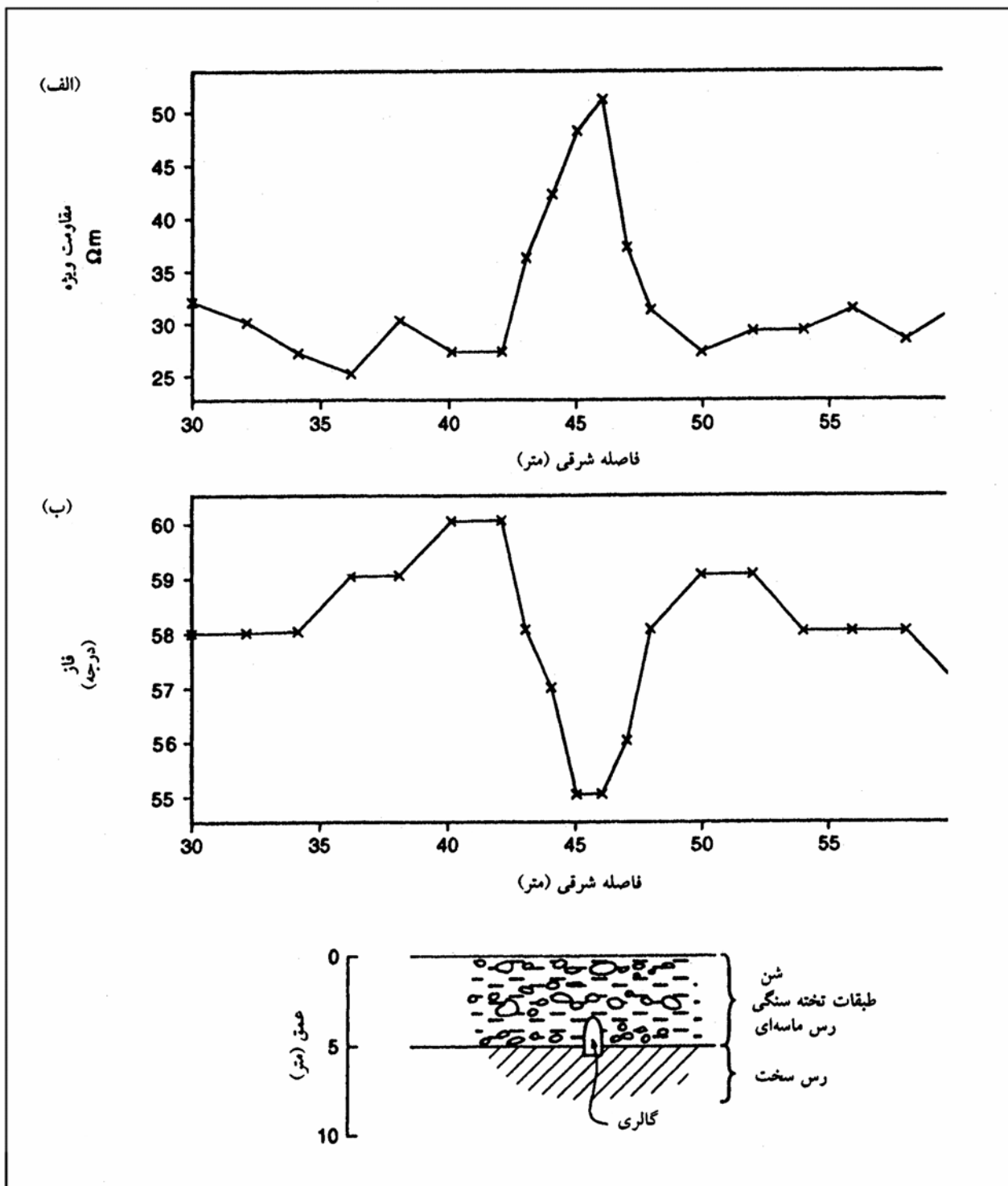
این مثال نیز اهمیت استفاده از فرستنده‌های عمود بر هم را نشان می‌دهد. عدم وجود پاسخ آشکار میدان مغناطیسی VLF-EM برای پلاریزاسیون H، بیانگر آن است که بی‌هنجاری مشاهده شده باید به‌واسطه مؤلفه الکتریکی E_x از نسبت امپدانس مختلط E_x/H_y باشد. هم‌چنین این مورد، مثال خوبی از چیرگی جریان‌های گالوانیک روی شارش جریان گردابی حاصل از انحراف و تمرکز خطوط شارش جریان در اطراف گالری پر شده از هوا می‌باشد. چنین شارش جریانی، باعث گسترده شدن میدان الکتریکی اولیه از حالت نرمال شده می‌گردد که نتیجه آن، افزایش در مقاومت ویژه ظاهری است. بدین ترتیب، مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده در بالای هدف زیاد خواهد بود.

۵-۲ روش تلوریک

۵-۲-۱ اصول کار

یکی از پیامدهای وجود افت و خیز در مگنتوسفر زمین، ایجاد میدان مگنتوتلوریک فرکانس پایین به‌طور طبیعی است، که جریان‌های متناوبی را در زمین القا می‌کند. انتشار این جریان‌ها به موازات سطح زمین بوده و سطوح بسیار گسترده‌ای را می‌پوشاند. این جریان‌ها را براساس افسانه رومن، به‌نام «تلوس»^۱ الهه زمین می‌نامند. جهت و مقدار میدان‌های حاصل از این جریان الکتریکی در هر نقطه به‌طور پیوسته دارای نوسان می‌باشد که این، پاسخی است به تغییرات زمانی موجود در یونسفر و مگنتوسفر، که این تغییرات خود حاصل تأثیرات خارجی (بادهای خورشیدی و غیره) می‌باشد.

آذرخش‌های دور، فرکانس‌هایی در گستره ۱ تا ۴۰۰ هرتز ایجاد می‌کند، تغییرات در چگالی پلاسمای رسانا (باد خورشیدی) در برخورد با میدان مغناطیسی زمین، فرکانس‌هایی بین ۰/۰۰۵ تا ۱ هرتز ایجاد می‌نماید. بزرگی گرادیان میدان الکتریکی در حدود 10 mV/km می‌باشد. نوفه‌های الکتریکی حاصل از طوفان‌های الکتریکی، جریان‌های آب دریا، جریان‌های جوی و منابع مصنوعی (ساخت بشر) مانند خط آهن الکتریکی و خطوط تراموا نیز وجود دارند.



در یک زمین با رسانایی یکنواخت، شارش جریان‌های تلوریک به موازات سطح زمین بوده و دامنه آن با عمق کاهش می‌یابد. در حضور ساختارهای زیرسطحی مقاوم گسترده مانند یک گنبد نمکی یا طاق‌دیس، شارش جریان تلوریک دچار اعوجاج شده و به طرف مواد رساناتر بالاتر کشیده می‌شود. به‌طور مشابه، در صورت وجود یک هدف گسترده رسانا مانند یک کانسار توده‌ای خطوط شارش جریان به طرف مواد رساناتر کشیده می‌شود. روشی اکتشافی برای تعیین محل اعوجاج میدان‌های تلوریک طراحی شده است. روش تلوریک، به‌طور تاریخی برای تعیین محل گنبد‌های نمکی در اکتشاف هیدروکربورها به‌ویژه در روسیه، اروپا و آفریقای شمالی به کار گرفته شده است. در ایالات متحده آمریکا، این روش به‌طور گسترده برای گنبد‌های نمکی به کار گرفته نشده، زیرا به‌طور معمول این گنبدها کوچک‌تر از آن هستند که بتوانند بی‌هنجاری‌های تلوریک قابل توجه ایجاد کنند. این روش، همچنین در کاوش کانسارهای ماسیوسولفیدی و ارزیابی منابع ژئوترمال به کار برده شده است.

۲-۵-۲ اندازه‌گیری‌های صحرائی

اندازه‌گیری گرادیان پتانسیل در میان دو جفت الکترودهای غیرقابل پلاریزه عمود برهم، در ایستگاه مبنایی واقع روی زمینی که از نظر الکتریکی یکنواخت فرض می‌شود یا به دور از نوع هدف مورد تجسس صورت می‌گیرد. یک جفت دیگر از الکترودهای غیرقابل پلاریزه عمود برهم، به عنوان دوقطبی‌های جستجوگر متحرک به کار برده می‌شود. گرادیان پتانسیل در دو سر هر جفت دوقطبی، همزمان هم در ایستگاه متحرک و هم ایستگاه مبنا در طی یک دوره زمانی چند دقیقه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. اگر زمین واقع در زیر ایستگاه، از نظر الکتریکی یکنواخت باشد، صرف‌نظر از زاویه سمت، دو مؤلفه میدان الکتریکی عمود بر هم اندازه‌گیری شده یکسان خواهند بود. بدین ترتیب، مکان هندسی بردار الکتریکی در ایستگاه مبنا، به صورت یک دایره خواهد بود.

در واقع باتوجه به حضور مؤلفه‌های مختلف نوفه الکتریکی که به جریان‌های تلوریک اضافه می‌شوند، بردار میدان ایستگاه مبنا به صورت دایره نخواهد بود. به هر صورت، تابعی ریاضی به داده‌ها اعمال می‌شود تا نتایج حاصل با یک دایره به شعاع واحد مطابقت داده شود. همین تابع ریاضی، به مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده به‌طور همزمان در جفت متحرک دوقطبی‌ها برای تصحیح نوفه و تغییرات زمانی میدان اعمال می‌گردد. با ارجاع سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در دوقطبی‌های متحرک به ایستگاه مبنا، داده‌های حاصل از ایستگاه متحرک به هنجار می‌شود. اگر اغتشاشی در شارش جریان‌های تلوریک وجود نداشته باشد، بردار الکتریکی در ایستگاه متحرک نیز به صورت دایره خواهد بود. در صورتی که به واسطه حضور یک هدف زیرسطحی، اعوجاجی روی جریان‌های تلوریک حاصل گردد، بردار میدان در ایستگاه متحرک به صورت بیضی در خواهد آمد. جهت‌گیری محور بزرگ بیضی در ایستگاه متحرک، در امتداد شارش جریان بیشینه در آن نقطه قرار خواهد گرفت. نسبت سطح بیضی به سطح دایره به دست آمده از ایستگاه مبنا، نشانه‌ای نسبی از بزرگی بی‌هنجاری تلوریک به دست می‌دهد. تفسیر نتایج تلوریک، به ویژه زمانی که روش، برای شناسایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت کیفی است. برای تحلیل‌های کمی بیشتر، اثر بعضی از ساختارهای زمین‌شناختی دوبعدی ساده مانند طاق‌دیس، گسل یا استوانه افقی و شکل‌های سه‌بعدی مانند کره یا بیضوی می‌توانند به صورت نظری محاسبه شوند. می‌توان منحنی‌های مدل ایجاد کرد و بی‌هنجاری‌های اندازه‌گیری شده را با آنها انطباق داد.

۶-۲ روش مگنتوتلوریک (MT)

در روش مگنتوتلوریک، از اندازه‌گیری هر دو مؤلفه الکتریکی و مغناطیسی، میدان‌های طبیعی متغیر برحسب زمان که چگونگی ایجاد آنها در بخش ۲-۵-۱ شرح داده شد، استفاده می‌شود. برتری عمده این روش، کارایی منحصر به فرد آن برای اکتشاف عمق‌های بسیار زیاد (صدها کیلومتر) و همچنین بررسی‌های کم‌عمق است که هردو بدون استفاده از منبع نیروی مصنوعی (به‌استثنای روش منبع کنترل شده) به‌اجرا در می‌آید. گستره فرکانس مورد استفاده منبع طبیعی در روش مگنتوتلوریک از ۳-۱۰ تا ۱۰ هرتز تغییر می‌کند، درحالی‌که روش فرکانس شنوایی MT (AMT یا AFMAG) در گستره فرکانس بالاتر، ۱۰ تا ۱۰۴ هرتز با استفاده از اسفریکس (نوفه‌های جوی)، به عنوان منبع اصلی انرژی به اجرا در می‌آید. اشکال اصلی منبع طبیعی در روش‌های MT، نامنظم بودن قدرت سیگنال است. تغییر پذیری قدرت و امتداد منبع، باعث مقادیر ذاتی زمان انباشش (۵ تا ۱۰ ساعت) در هر محل مطالعه می‌شود که بدین ترتیب، سونداژهای MT را پرهزینه و آهنگ بهره‌دهی آنرا آهسته می‌کند. اندازه‌گیری‌های AMT، به‌دلیل برخورداری از فرکانس‌های نسبتاً بالا با سرعت بیشتری قابل اجراست، اما تغییرپذیری منابع طوفان‌های تندی محلی و تضعیف سیگنال‌های در حدود ۱ و ۲ هرتز می‌تواند کیفیت داده‌ها را کاهش دهد. مثالی از سرعت نسبی اندازه‌گیری‌ها، زمان ۶ ساعته اجرای سه‌سونداژ AMT در منطقه دهانه آتشفشان وایت ایسلند می‌باشد. این منطقه، یک آتشفشان فعال بوده و در ۵۰ کیلومتری شمال نورث ایسلند^۱ در زلاندنو واقع شده است.

اوایل سال ۱۹۷۰، دیوید استرانگ وی^۲ و مایرن گلدشتاین^۳ در دانشگاه تورنتو، اصول یک منبع سیگنال مصنوعی را معرفی کردند که به اندازه کافی قابل اطمینان و قوی بود تا بتواند سرعت برداشت داده‌ها را افزایش داده و اعتبار نتایج را بهبود بخشد. روش‌های MT با منبع کنترل شده به‌طور نوعی، در باند فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ هرتز به‌اجرا در می‌آید. نخستین سامانه‌های تجارتي این روش، از سال ۱۹۷۸ به وسیله شرکت مهندسی و پژوهشی زونگ^۴ ارائه شده است. نوشته‌های جامعی برای تمامی روش‌ها که خانواده MT را نیز شامل می‌شود، توسط وزوف^۵ و برای منبع کنترل شده با فرکانس شنوایی MT (CSAMT) توسط زونگ و هیوگ^۶ ارائه شد.

AMT در بررسی‌های منابع آب‌های زیرزمینی و زمین‌گرمایی، و در اکتشاف برای اغلب کانسارهای فلز پایه با گستره عمقی ۵۰ تا ۱۰۰ متر تا چند کیلومتر مورد استفاده قرار گرفته است. به هر حال، کاربرد اصلی روش MT در اکتشاف هیدروکربور به‌ویژه در زمین بسیار وسیع و برای نفوذ به زمین‌های واقع در زیر مواد آذرین (ولکانیک) می‌باشد، که در هر دو این حالت‌ها، لرزه‌نگاری بازتابی هم بسیار پرهزینه است و هم غیر موثر. این روش (MT)، به تازگی برای بررسی ساختار حاصل از برخورد یک شهاب سنگ در برزیل مورد استفاده قرار گرفته است.

1 - Esland
2 - David Strangway
3 - Myron Goldstein
4 - Zong
5 - Vozoff
6 - Hughes

از نیمه دهه ۱۹۷۰، روش CSAMT با افزایش گستره کاربردها همراه بوده و به‌ویژه از اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی > کاربرد آن در بررسی‌های ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی مرسوم شده است (جدول ۲-۳). به‌نظر می‌رسد که روش CSAMT کمتر به‌کار گرفته شده ولی کاربردهای بالقوه‌ای در آینده خواهد داشت. به‌همین دلیل، روش CSAMT با تفصیل بیشتری شرح داده خواهد شد.

۲-۶-۱ اندازه‌گیری‌های صحرائی

طرح کلی اندازه‌گیری میدان، در یک برداشت مگنتوتلوریک در شکل ۲-۴۹ نشان داده شده است. این مجموعه، شامل دو دوقطبی الکتریکی عمود بر هم برای اندازه‌گیری دو مؤلفه افقی الکتریکی و دو سنسور مغناطیسی موازی با دوقطبی‌های الکتریکی برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های مغناطیسی مربوط به آنهاست. سنسورهای مغناطیسی از پیچیهایی شامل مغزه‌های آهنی با تراوایی مغناطیسی زیاد که صدها دور سیم به‌صورت چند ده‌تایی روی آنها پیچیده شده، تشکیل گردیده است. درازای کلی این سنسورها، به‌طور نوعی ۲ متر می‌باشد. سنسور سوم، مؤلفه قائم مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند. بدین ترتیب، در هر محل ۵ پارامتر برحسب تابعی از فرکانس به‌طور همزمان اندازه‌گیری می‌شود. به‌دنبال اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی (H) و میدان الکتریکی (E) در یک گستره فرکانس، منحنی سونداژ مقاومت ویژه ظاهری به‌دست می‌آید. این منحنی، مشابه منحنی حاصل از مطالعات سونداژهای الکتریکی است با این تفاوت که در اینجا، منحنی مقاومت ویژه به‌جای آنکه تابعی از فاصله الکترودها باشد، تابعی از فرکانس خواهد بود. هرچه فرکانس کوچک‌تر باشد، عمق نفوذ بیشتر است. مقاومت ویژه ظاهری برحسب مؤلفه‌های مختلف و فرکانس، از این رابطه و به‌طور تقریب به‌دست می‌آید:

$$\rho_a = \frac{\theta/2}{f} \left| \frac{E_x}{B_y} \right|^2 = \frac{\theta/2}{f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \frac{\theta/2}{f} |Z|^2$$

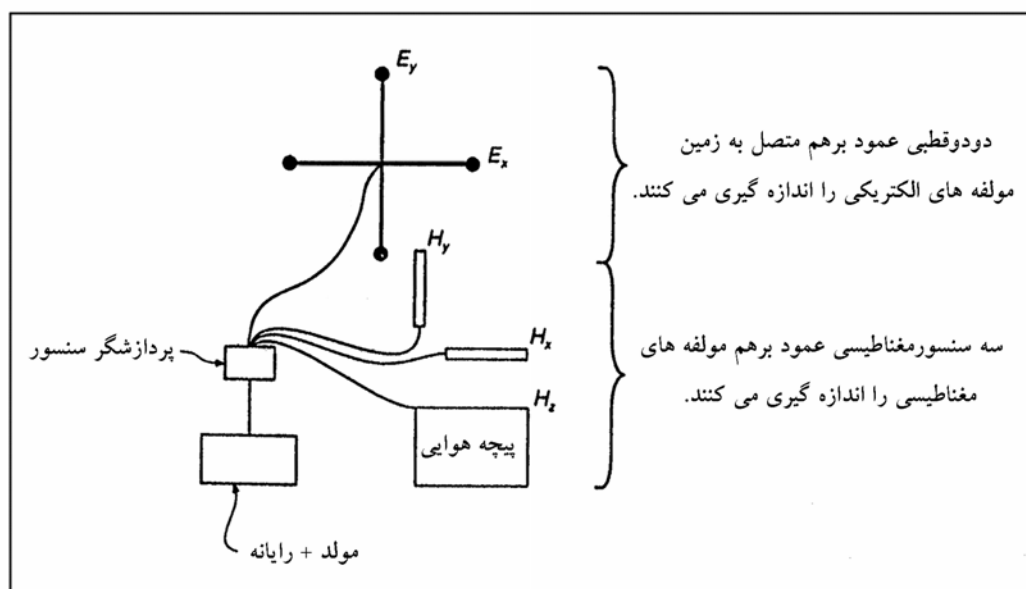
در رابطه بالا، E_x (nv/km) و B_y به‌ترتیب عبارتند از مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی عمود برهم. B_y چگالی، شار مغناطیسی برحسب nT (نانوتسلا) می‌باشد که به‌طور عمودی، در این واحد سنجش برابر نیروی مغناطنده H_y (برحسب A/m) است. پارامتر Z عبارت است از امپدانس کاینار^۲.

داده‌ها به‌صورت تغییرات مقاومت ویژه‌ظاهری برحسب فرکانس (f) یا دوره $\frac{1}{2\pi f}$ روی نمودارهای لوگ-لوگ رسم می‌شود. در بالای یک زمین یکنواخت، فازهای دو مؤلفه عمود بر هم، به‌اندازه $\frac{\pi}{4}$ اختلاف دارند و مؤلفه مغناطیسی نسبت به مؤلفه الکتریکی تأخیر فاز دارد. اگر به هر صورت، اختلاف فاز اندازه‌گیری شده (θ) برابر $\frac{\pi}{4}$ نباشد، یعنی زمین ناهمگن است. تعاریف مبنایی مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از پارامترهای مگنتوتلوریک، به وسیله کاینار فرمول‌بندی شده که مقاومت ویژه

1 - Magnetising

2 - Cagniard

ظاهری و ترم امپدانس که نسبت مؤلفه قائم الکتریکی به مؤلفه افقی مغناطیسی است، با نام این مؤلف داده شده است. برای کاربرد تعاریف در یک زمین لایه‌ای با ساختارهای پیچیده‌تر، باید از تانسور کامل امپدانس استفاده کرد.



شکل ۲-۴۹- طرح عمومی اندازه‌گیری میدان برای یک برداشت مگنتوتلوریک

برای برداشت‌های MT با منبع کنترل شده، از لوپ یا دوقطبی زمینی به عنوان فرستنده (منبع کنترل شده) استفاده می‌شود، که آرایش اندازه‌گیری مانند آنچه در بالا شرح داده شد، خواهد بود. دوقطبی زمینی، به‌طور نوعی بین ۱ تا ۳ کیلومتر طول دارد، که معمولاً برای تامین دو منبع پلاریزاسیون از دو دوقطبی زمینی عمود برهم استفاده می‌شود (شکل ۲-۵۰). منبع، ممکن است از سنسورهای گیرنده چندین کیلومتر فاصله داشته باشد. موقعیت و جهت منبع دوقطبی در تعیین پاسخ زمین روی گیرنده، حائز اهمیت بوده و در چگونگی تفسیرهای مربوطه دخالت دارد. حالت‌های ویژه تاثیر پلاریزاسیون منبع توسط کلت و همکاران^۱ (۱۹۹۴) با توجه به دو کانسار ماسیوسولفیدی در استرالیا بحث شده است.

تنوعی از آرایش‌های صحرائی در دسترس است که گستره‌ای از CSAMT اسکالر ساده شامل اندازه‌گیری‌های دو مؤلفه عمود بر هم الکتریکی و مغناطیسی (شکل ۲-۵۱-الف) تا بردار CSAMT شامل یک منبع و دوسری مؤلفه‌های عمود بر هم (شکل ۲-۵۱-ب) و تانسور کامل CSAMT همراه با منبع‌های هم‌مکان جدا از هم (شکل‌های ۲-۵۱-ج و د) را دربرمی‌گیرد.

جدول ۲-۳ - کاربردهای روش مگنتوتلوریک شنوایی با منبع کنترل شده (CSAMT)

اکتشاف برای:

هیدروکربن ها
ماسیو سولفیدها
فلزات پایه و قیمتی
منابع زمین گرمایی

به نقشه درآوردن زمین شناختی:

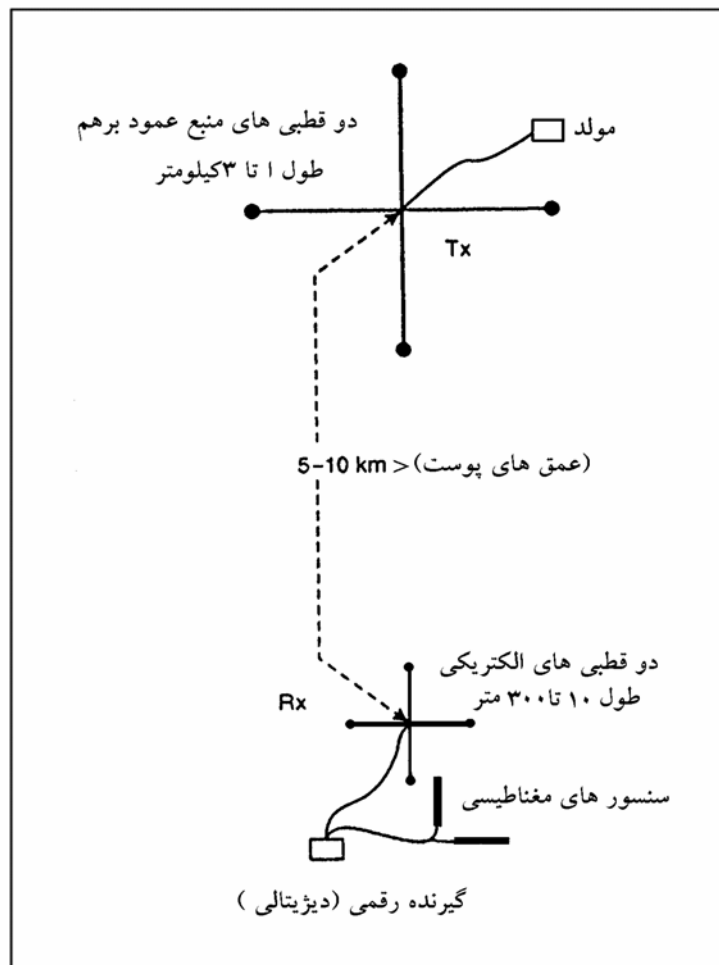
ساختار
لیتولوژی

کاربردهای زیست محیطی:

به نقشه درآوردن آبشست های نمکی از چاه ها
به نقشه درآوردن زبانه های نمکی از تانک های نشت کننده و غیره
به نقشه درآوردن تولیدات نفتی تراوش یافته
کنترل محلول آبشستی در پروژه های بازیافت مس در محل

کاربردهای ژئوتکنیکی:

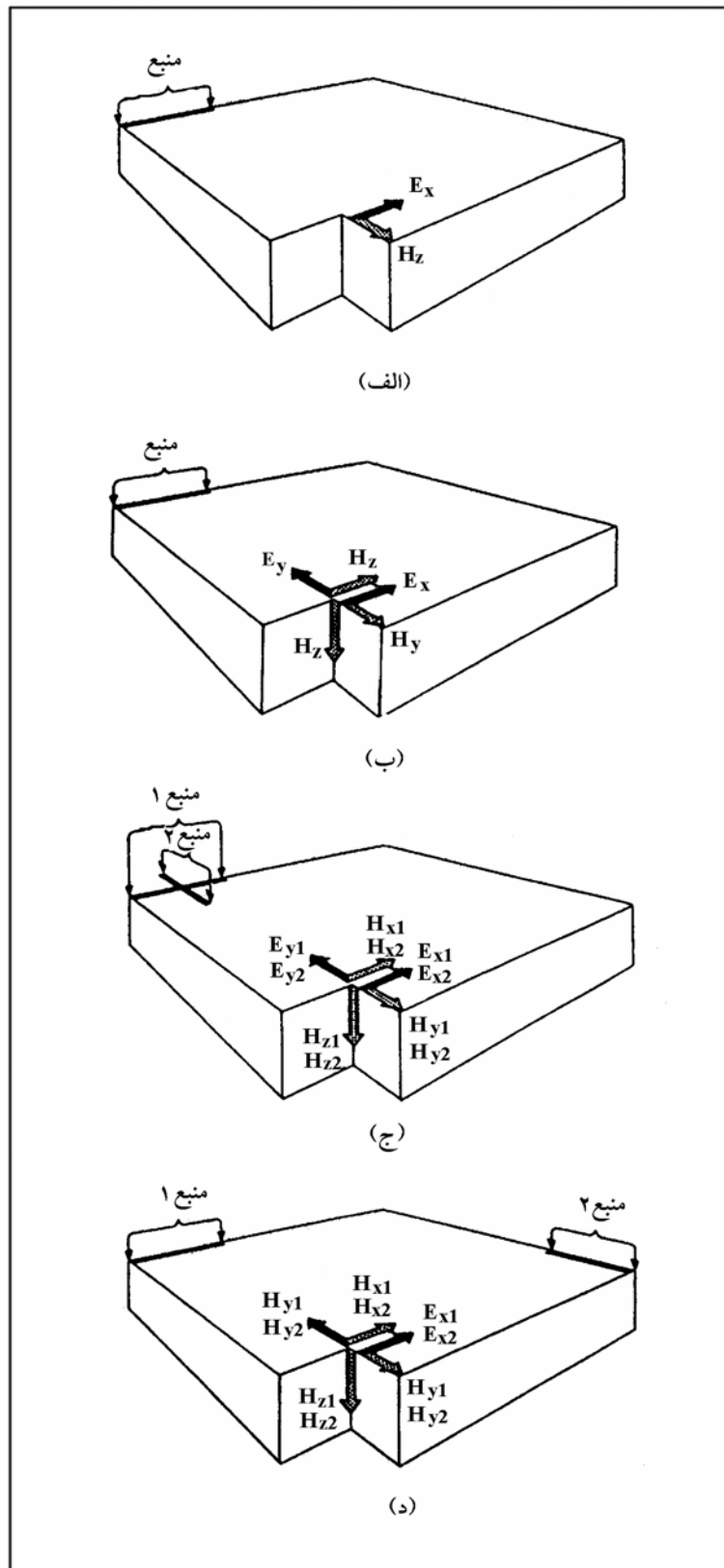
تحلیل های ساختاری در طراحی معدن
آشکارسازی فضاهای خالی در معادن زیرزمینی
به نقشه درآوردن جبهه های سوخته در آتش سوزی معادن ذغال زیرزمینی
کنترل بازیافت نفت اضافه شده



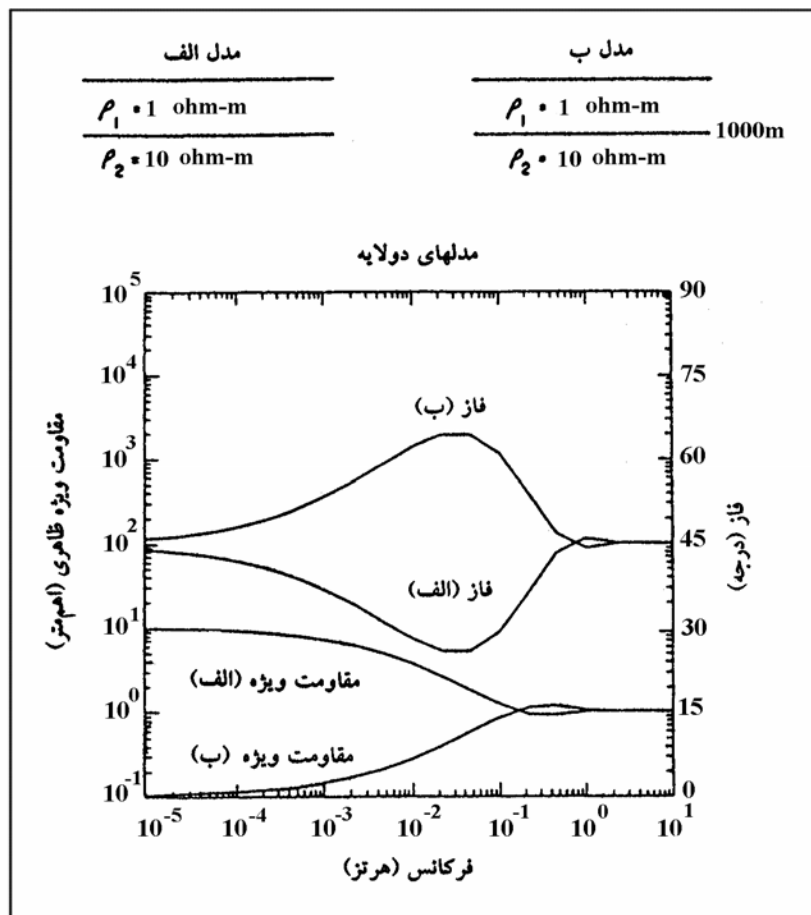
شکل ۲-۵۰- طرح عمومی میدان برای یک برداشت مگنتوتلوریک با منبع کنترل شده

۲-۶-۲ روش های تفسیر

از اوایل سال ۱۹۸۰، پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در تفسیر مگنتوتلوریک و نیز سونداژزنی MT با منبع کنترل شده به وجود آمد، که این پیشرفت به‌ویژه در معکوس‌سازی کامپیوتری منحنی‌های سونداژ قابل توجه می‌باشد. دو مثال از سونداژهای مگنتوتلوریک در شکل ۲-۵۲ نشان داده شده است. به‌طور حتم، تفسیر ترکیبی اختلاف فاز و رسانایی ظاهری می‌تواند مبنای اطلاعات مهمی شود. زمانی که فرکانس کاهش می‌یابد، رفتار مقاومت ویژه را فاز پیش‌بینی می‌کند. برای مثال، مدل الف در شکل ۲-۵۲ مربوط به یک سنگ پی مقاوم است. با کاهش فرکانس، اختلاف فاز تا رسیدن به یک قله (پیک) در وسط گستره فرکانس‌ها تغییر می‌کند، درحالی‌که مقاومت ویژه ظاهری به سمت مقدار مقاومت ویژه سنگ پایه افزایش می‌یابد. برعکس، برای حالت سنگ پایه رسانا، فاز از یک مقدار کمینه می‌گذرد، درحالی‌که مقاومت ویژه ظاهری با افزایش عمق نفوذ کاهش می‌یابد.



شکل ۲-۵۱- شکل‌های طرح‌واره: (الف) سونداز CSAMT با منبع کنترل شده، (ب) بردار CSAMT، (ج) تانسور CSAMT با منبع‌های هم‌مکان، و (د) تانسور CSAMT با منبع‌های جدا از هم



شکل ۲-۵۲- پاسخ‌های مقاومت ویژه و فاز مگنتوتلوریک برای مدل‌های دولایه.

مدل (الف) سنگ پی مقاوم مدل (ب) سنگ پی رسانا

زمانی که مقاومت ویژه ظاهری نامتقارن شده و در فرکانس پایین به یک مقدار ثابت می‌رسد، اختلاف فاز به سمت مقدار 45° ($\frac{\pi}{4}$) بر می‌گردد. به هر حال، پروفیل مقاومت ویژه ظاهری به ناهمگونی نزدیک سطح حساس می‌باشد که این موضوع می‌تواند از اعتبارپذیری معکوس‌سازی مقاومت ویژه به‌تنهایی بکاهد. علاوه بر آن، در فرکانس‌های متوسط و بالاتر، اختلاف فاز نسبت به مقاومت ویژه به ساختارهای عمیق‌تر حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. اهداف بسیار کم‌عمق ممکن است روی سونداژنی اختلاف فاز به‌طور مشهود دیده نشوند، در حالی که امکان پدیدار شدن آنها روی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری وجود دارد.

در برداشت‌های CSAMT، ممکن است لازم باشد که میزان قابل توجهی از پردازش داده‌ها، از معکوس‌سازی صورت گیرد (شکل ۲-۵۳). معمولاً پردازش در دو مرحله انجام می‌شود. پیش پردازش و پردازش تفسیری پیش پردازش با حذف نوفه و خطاها، داده‌های به دست آمده را ارتقا می‌دهد. پردازش تفسیری شامل بهینه‌سازی ترسیم‌های مرسوم برای پارامترهای مشتق

شده یا اندازه‌گیری ویژه می‌باشد. به‌علاوه، بعضی پردازش‌ها مانند بهنجار کردن، تصحیح استاتیکی، پالایش و محاسبات مشتق در جهت افزایش داده‌پردازی می‌تواند به‌اجرا درآید. آن گونه که زونگ و هیوگ^۱ (۱۹۹۱) شرح داده‌اند، بهنجار کردن، اثرات لایه‌بندی را از روی مجموعه داده‌ها توسط تفریق، تقسیم یا نرم‌های دیگر دکنولوشن^۲ فرکانس‌های یکسان یا مقادیر میانگین هم‌عمق حذف می‌کند. حذف اثرات منطقه‌ای که می‌تواند توسط دکنولوشن صورت پذیرد، می‌تواند در جهت افزایش دقت اثرات جانبی در برداشت نواحی با چینه‌بندی پیچیده مورد استفاده قرار گیرد.

با پردازش‌های چندمرحله‌ای، مسئله مهم، مقایسه نتایج پردازش شده با اطلاعات مقاومت ویژه و فاز اولیه است، تا بتوان حقیقی بودن پردازش را دریافت کرد. اگر روندهای خیلی آشکاری که در داده‌های اولیه وجود دارد در نتایج پردازش مشاهده نشود، می‌توان گفت که خطایی در پردازش وجود دارد. مراحل پردازش تفسیری باید روندهای خاص موجود در مجموعه داده‌های اولیه را برجسته‌تر نشان دهند نه اینکه روندهای جدیدی را به وجود آورند.

۲-۶-۳ کاربردها و مطالعات موردی

زونگ و هیوگ مطالعات موردی بسیار خوبی را انتخاب و مهیا کرده‌اند که در اینجا به خلاصه تعدادی از کاربردهای زیست‌محیطی روش CSAMT پرداخته می‌شود:

مثال ۱- به یک شرکت مهندسی مأموریت داده شد تا بررسی هیدروژئولوژی یک سایت ۲/۵ کیلومترمربعی بیابانی که دارای توسعه تجاری بالقوه بوده است در ناحیه شمال فونیکس در آریزونا ایالات متحده را انجام دهد. تهیه آب در این طرح توسعه، نگرانی اصلی بود، زیرا انتقال آب از طریق خط لوله سطحی هزینه بسیار زیاد و مسایل قانونی بالقوه‌ای را به همراه داشت. تهیه آب در سایت سود قابل توجهی را به دنبال داشت.

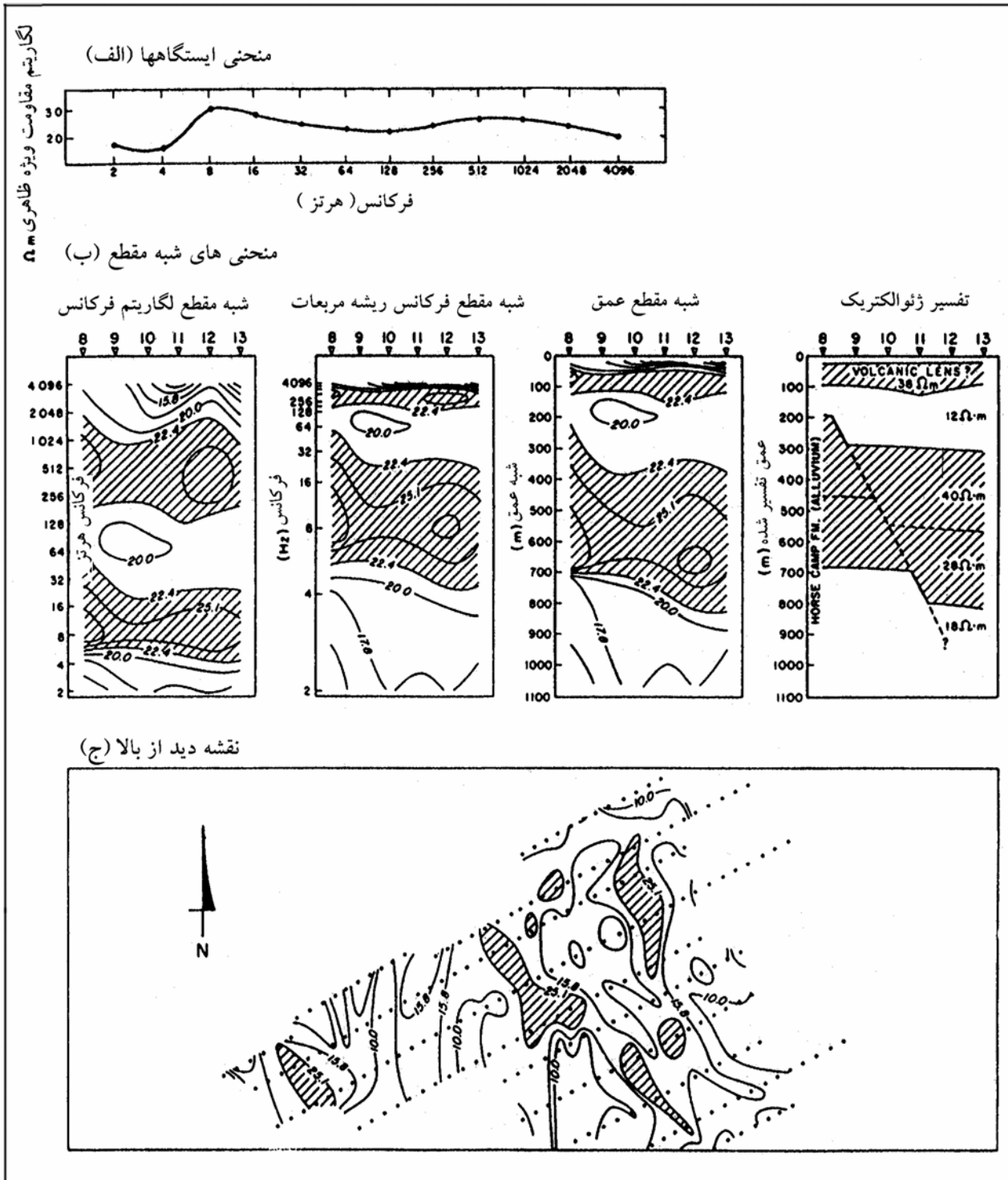
اطلاعات زمین‌شناسی محلی که در ابتدای این پروژه بسیار محدود بود، شامل رخنمون‌های گرانیته با روند N50W با روانه‌های گدازه بازالتی، توف‌ها، آگلومراها و خاکسترها و نیز واحدهای مجزای شیستی می‌شود که ناپیوستگی جانبی همه آنها حاکی از یک کنترل ساختاری در این ناحیه بود. به غیر از پاره‌ای داده‌های گرانی منطقه‌ای و اطلاعات زمین‌شناختی سطحی محدود، اطلاعات زیاد دیگری در دست نبود.

دو گمانه در قسمت جنوبی محدوده به فاصله ۴۵۰ متر از هم و تا عمق حدود ۱۵۰ متر حفر شده بود. در یکی از این گمانه‌ها، آب در عمق ۹۱ متری و در دیگری در عمق ۴۳ متری پیدا شده بود، ولی ارتفاع‌های نظیر فشار حداقل، و زون‌های اشباع کم ضخامت بودند.

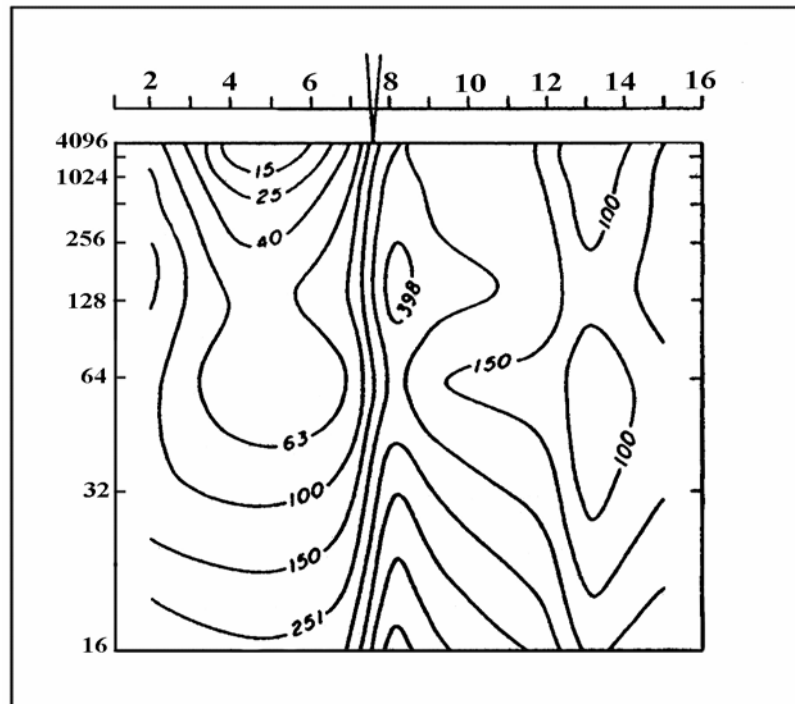
در این مرحله، سه‌خط برداشت CSAMT برای دستیابی به اطلاعات بیشتر درخصوص محیط هیدروژئولوژی زیرسطحی به‌اجرا گذاشته شد. هر سه خط، برداشت شکل‌های یکسانی را روی شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری نشان دادند، که یکی از آنها در شکل ۲-۵۴ نشان داده شده است. یک شکل نزدیکی به قائم مشخص در اطراف ایستگاه ۸ پدیدار گشته که تصور می‌شود مربوط به یک گسل است.

1 - Zong and Hughes

2 - Deconvolution



شکل ۲-۵۳- انواع نمایش داده‌های CSAMT ، (الف) منحنی لگاریتم مقاومت ویژه ظاهری برحسب فرکانس، (ب) نمایش‌های شبه مقطع همراه تفسیر ژئوالکتریک مربوطه، و (ج) منحنی‌های منظر افقی. پارامترهای دیگر مثل فاز نیز به همین طریق رسم می‌شوند.

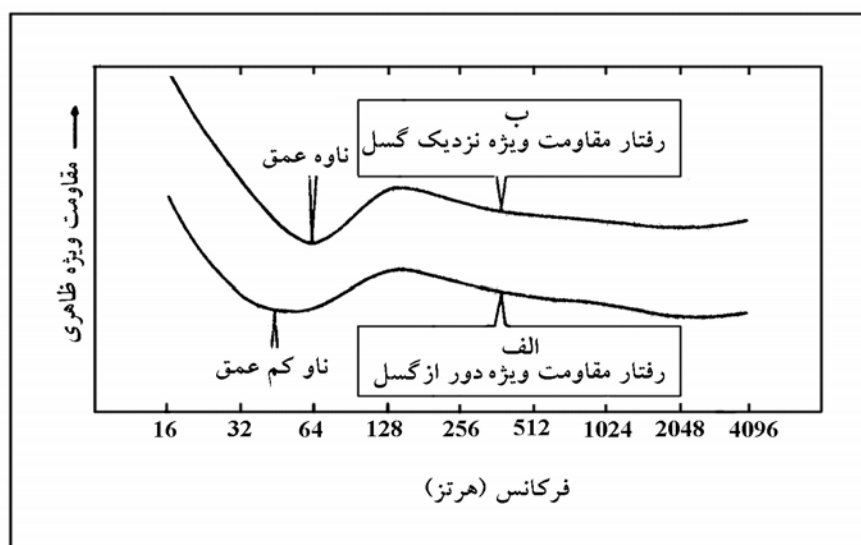


شکل ۲-۵۴- شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری در طول یک زون گسله، فرکانس‌های پایین‌تر
بر عمق نفوذ بیشتر مطابقت دارد.

نمودار مقاومت ویژه ظاهری برحسب فرکانس، وجود یک ناوه را در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱۲۸ هرتز) نشان می‌دهد (شکل ۲-۵۵). با فاصله گرفتن پروفیل مقاومت ویژه از گسل مفروض، داده‌ها یک پراکندگی فضایی را نشان می‌دهند که این موضوع، توسط خط الف در شکل ۲-۵۵ (با یک ناوه در نقطه ۶۴ هرتز) نشان داده شده است.

مقادیر مقاومت ویژه ایستگاه‌های برداشت نزدیک به گسل، رفتاری همانند منحنی ب با ناوه پرشیب‌تری را به نمایش می‌گذارند. شیب‌های دوطرف منحنی، به دلیل تمرکز اثر کاهش مقاومت ویژه در عمق نزدیک به گسل، افزایش یافته‌اند. مدل‌سازی کامپیوتری، حضور یک لایه رسانا را در عمق حدود ۳۰۰ متری نشان داد، که این رسانا می‌تواند حاصل سفره آبداری باشد که پیش از این ناشناخته مانده بود. در نتیجه تصمیم گرفته شد که یکی از گمانه‌ها برای بررسی هدف رسانای حاصل از تفسیر، تا عمق‌های بیشتر ادامه پیدا کند گمانه ادامه یافته، در عمق ۳۱۷ متری به یک زون اشباع از آب مهمم برخورد کرد. زون اشباع حداقل ۶۱ متر ضخامت و ارتفاع نظیر فشار ۳۶۰ Psi در گمانه ۶ اینچی را داشت. تصور می‌شود که با چاهی به قطر ۱۷ اینچ بتوان بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ گالن بردقیقه آب به دست آورد.

کاربرد موفقیت آمیز CSAMT در این سایت، باعث شد که تصمیم‌گیری ناپخته رها کردن املاک یا قبول هزینه‌های سنگین خط لوله‌های سطحی صرف‌نظر شود.

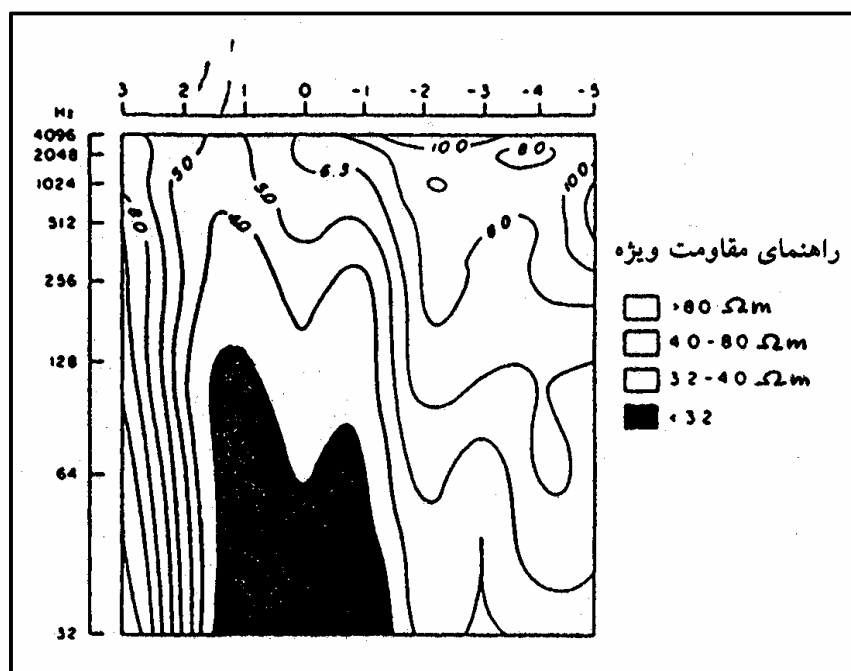


شکل ۲-۵۵- مقایسه پاسخ مقاومت ویژه‌های مجاور در حالت نزدیک و دور از گسل

مثال ۲- در ایالات متحده آمریکا، هزاران چاه نفت و گاز رها شده وجود دارد که به‌طور نامناسبی در پوش‌گذاری شده است. جایی که به دنبال تکنیک‌های بازیافت ثانوی هیدروکربور، افق تولید تحت فشار قرار گرفته است، این چاه‌ها امکان تزریق آب نمک میدان نفتی را در مهاجرت به‌طرف بالای گمانه و ورود آنها به سفره‌های آبدار قابل شرب را مهیا ساخته است. برای مثال، در یکی از میدان‌های نفتی در زمین‌های قبیله ساک و فاکس^۱ واقع در لینکن کانتی^۲ از ایالت اوکلاهما^۳ ایالات متحده آمریکا، نفت از دهه ۱۹۳۰ در واحد ماسه‌ای پرو^۴ بازیافت شده است. تزریق آب‌نمک از دهه ۱۹۵۰ برای بازیافت بیشتر نفت مورد استفاده قرار گرفته است. در همان مکان، سازند واموسا^۵ که پایه آن در اعماق ۴۵ و ۱۳۵ متری قرار دارد، منبع عمده آب آشامیدنی می‌باشد. چاه‌های آزمایشی که در ۱۹۷۹ حفر گردید، تمرکز قابل توجهی از آب‌نمک را نشان داد.

برداشت‌های CSAMT در محدوده، وجود زبانه‌های مواد رسانا را در عمق، در اطراف چاه‌های تزریقی ره‌اشده نشان داد. یکی از مقاطع مقاومت ویژه ظاهری در شکل ۲-۵۶ نشان داده شده، که روی آن زبانه، رسانا به وضوح کامل نمودار گشته است. تعدادی زبانه در عمق‌های کم یافت شدند. به دنبال برداشت‌های CSAMT دو چاه اضافی آزمایشی بر پا شد و نسبت برمید به کلرید تایید کرد که منبع آلودگی بدون شک آب‌نمک ماسه پرو می‌باشد که پیش از این، برداشت‌های CSAMT نشان داده بود.

1 - Sac and Fox
2 - Lincoln County
3 - Oklahoma
4 - Prue
5 - Vamoosa



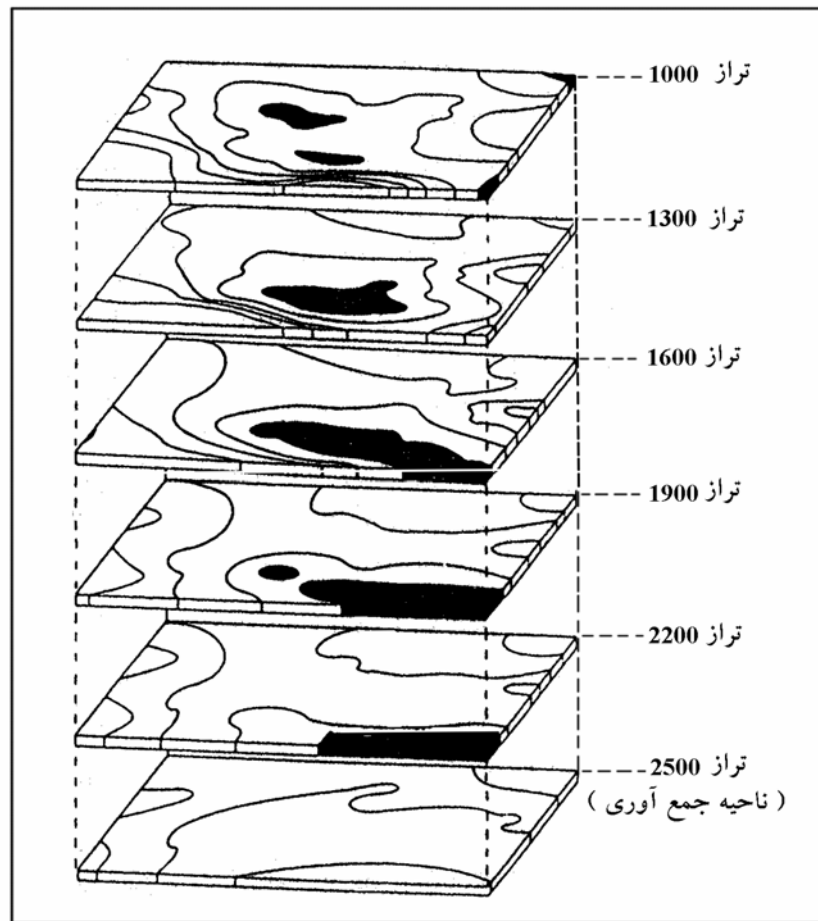
شکل ۲-۵۶- مقطع مقاومت ویژه ظاهری نزدیک یک چاه تزریقی رهاشده، که نشان دهنده زبانه رسانی (سیاهرنگ) وابسته به مهاجرت آب نمک به سمت بالا می باشد.

مثال ۳- در حالت مشابهی، مهاجرت سیالات رسانا از محل آزمایش های معدنی برجا همانند آزمایش های تزریق با استفاده از روش های CSAMT به نقشه درآورده شده است. در یکی از مثال ها، انجام پروژه آب شست در محل، به از دست رفتن ۹۰٪ سیال تزریقی دلالت داشت، بنابراین تشخیص اینکه بقیه مواد تزریقی کجا رفته است با اهمیت بود. اجرای یک برداشت CSAMT و نتایج مقاومت ویژه پردازش شده، برش های مقاومت ویژه را در ترازهای مختلف عمقی به دست می دهد (شکل ۲-۵۷). محدوده های رسانا به صورت سایه در شکل نشان داده شده است.

از شکل ۲-۵۷ مشخص است که پیکره اصلی مواد رسانا در تراز ۱۶۰۰ متمرکز شده است (بیشترین گسترش سطحی در این تراز وجود دارد). به نظر می رسد که سیال، کندتر از آنکه آب شناس ها تصور می کرده اند مهاجرت کرده است. دو برداشت CSAMT دقیقاً در بالای همان زمین ولی به فاصله زمانی یک ماه برای به نقشه درآوردن مهاجرت زبانه رسانا به اجرا درآمد. این مطالعه، مشخص کرد که در قسمتی از محدوده، مقاومت ویژه ظاهری حدود ۱٪ در روز تغییر می کرد.

مانند بسیاری از روش های ژئوفیزیکی، استفاده از روش یا روش های مناسب، می تواند اطلاعات مناسبی درخصوص توزیع فضایی سه بعدی اهداف زیرسطحی به دست دهد. به طور ویژه، در کاربردهای زیست محیطی، تغییرات فضایی برحسب زمان از

اهمیت فزاینده‌ای برخوردار می‌باشد. بدین ترتیب CSAMT همراه با دیگر روش‌های EM و الکتریکی می‌توانند اطلاعات با ارزشی با هزینه مناسب و بدون هرگونه اثرات تخریبی زیست‌محیطی مهیا سازند.



شکل ۲-۵۷- برش‌های مقاومت ویژه تراز عمقی CSAMT؛ زون‌های رسانا به صورت سیاهرنگ (سایه) نشان داده شده است. آلودگی با بیشترین گسترش سطحی در تراز ۱۶۰۰ دیده می‌شود.

- 1- Barringer, A.R. (1962) A new approach to exploration: The INPUT airborne electrical Pulse Prospecting System. Min.Congress Journal, 48:49-52.
- 2- Becker, A., Barringer, A.R. and Annan, P. (1990) Airborne electromagnetics 1978-1988. In: Fitterman, D.V. (ed.), Developments and applications of modern airborne electromagnetic surveys, US Geol. Surv. Bull. 1925:9-20.
- 3- Buselli, G., Barber, C., Davis, G.B. and Salama, R.B. (1990) Detection of groundwater contamination near waste disposal sites with transient electromagnetic and electrical methods. In: Ward, S.H. (ed.), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tusla: Society of Exploration Geophysicists, 27-39.
- 4- Collett, L.S. (1986) Development of the Airborne electromagnetic Technique. In: Palacky, G.J. (ed), Airborne resistivity mapping. Geol. Surv. Can. Paper 86-22: 9-18.
- 5- Dodds, A.R. and Ivic, D. (1990) Integrated geophysical methods used for groundwater studies in the Murray basin, South Australia. In: Ward, S.H. (ed), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tusla: Society of Exploration Geophysicists, 303-310.
- 6- Fitterman, D.V. (ed.) (1990) Developments and applications of modern airborne electromagnetic surveys. US Geol. Surv. Bull., 1925.
- 7- Fitterman, D.V. and Stewart, M.T. (1986) Transient electromagnetic sounding for groundwater. Geophysics, 51(4): 995-1005.
- 8- Fraser, D.C. (1969) Contouring of VLF-EM data. Geophysics, 34(6): 958-967. Fraser, D.C., Keevil, N.B. And Ward, S.H. (1964) Conductivity spectra of rocks from the Craigmont ore environment. Geophysics, 29(5): 832-847.
- 9- Frohlich, B. and Lancaster, W.J. (1986) Electromagnetic surveying in current Middle Eastern archaeology: application and evaluation. Geophysics, 51(7): 1414-1425.
- 10- Goldman, M., du Plooy, A. and Eckard, M. (1994) On reducing ambiguity in the interpretation of transient electromagnetic sounding data. Geophysical Prospecting, 42(1): 3-25.
- 11- Goldstein, N.E., Benson, S.M. and Alumbough, D. (1990) Saline groundwater plume mapping with electromagnetics. In: Ward, S.H. (ed), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tusla: Society of Exploration Geophysicists, 17-25.
- 12- Hoekstra, P. and Blohm, M.W. (1990) Case histories of time domain electromagnetic sounding in environmental Geophysics. In: Ward, S.H. (ed.), Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tusla: Society of Exploration Geophysicists, 1-15.
- 13- Hoekstra, P., Lahti, R., Hild, J., Bates, C.R. and Phillips, D. (1992) Case histories of shallow time domain electromagnetics in invironmental site assessment. Ground Water Mnonitoring Review, Fall, 110-117.

- 14- Ladvig, K.J. (1983) Electromagnetic induction methods for monitoring acid mine drainage. *Ground Water Monitoring Review*, 46-51.
- 15- Madden, T.R. and Vozoff, K. (1971) VLF Model Suite, 2nd edn. 17 Winthrop Road, Lexington, MA 02173, USA.
- 16- McNeill, J.D., Bosner, M. and Snelgrove, F.B. (1988) A borehole induction logger for monitoring groundwater contamination. Geonics Technical Note TN-25, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.
- 17- McNeill, J.D. (1985) EM 34-3 Measurements at Two Intercoil Spacings to Reduce Sensitivity to Near-Surface Material. Technical Note TN-19, Geonics Ltd, Mississauga, Ontario.
- 18- McNeill, J.D. (1990) Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In: Ward, S.H. (ed), *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Vol. 1: Review and Tutorial. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 191-218.
- 19- McNeill, J.D. and Labson, V.F. (1991) Geological mapping using VLF radiofields. In: Nabighian, M.C. (ed), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Vol. 2: Applications, Part B. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 521-640.
- 20- Monier-Williams, M.E., Greenhouse, J.P., Mendes, J.M. and Ellert, N. (1990) Terrain conductivity mapping with topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil. In: Ward, S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Vol. 2: Environmental and Groundwater. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 41-55.
- 21- Nabighian, M.N. (1987) *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 1. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists.
- 22- Nabighian, M.N. and Macnae, J.C. (1991) Time domain electromagnetic prospecting methods. In: Nabighian, M.N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2A. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 427-520.
- 23- Nelson, R.G. and Haigh, J.H. (1990) Geophysical investigations of sinkholes in lateritic terrains. In: Ward, S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Vol. 3: Geotechnical. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 133-153.
- 24- Nissen, J. (1986) A versatile electromagnetic modelling program for 2D structures. *Geophysical Prospecting*, 34(7): 1099-1110.
- 25- Ogilvy, R.D., and Lee, A.C. (1989) KHFILTER: A Computer Program to Generate Current Density Pseudosections from VLF-EM In-Phase Data. British Geological Survey Technical Report WK/89/6R.
- 26- Palacky, G.J. (ed.) (1986) Airborne resistivity mapping. *Geol. Surv. Can. Paper* 86-22.
- 27- Palacky, G.J. and Stephens, L.E. (1992) Detection of sub-bottom ice-bonded permafrost on the Canadian Beaufort Shelf by ground electromagnetic measurements. *Geophysics*, 57(11): 1419-1427.
- 28- Palacky, G.J. and West, G.F. (1991) Airborne electromagnetic methods. In: Nabighian, M.N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2B. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 811-879.

- 29- Pemberton, R.H. (1962) Airborne electromagnetics in review. *Geophysics*, 27(5): 691-713.
- 30- Reynolds, J.M. (1994) Resolution and differentiation of sub-surface materials using multi-method geophysical surveys. In: Forde, M.C. (ed.), *Polluted and Marginal Land-94*, University of Brunel, London. Edinburgh: Engineering Technics Press.
- 31- Reynolds, J.M. and McCann, D.M. (1992) Geophysical methods for the assessment of landfill and waste disposal sites. In: Forde, M.C. (ed.), *Proceedings of 2ND International Conference on Construction on Polluted and Marginal Land*, 30 June-2 July 1992, Brunel University, London, 63-71.
- 32- Scott, W.J., Sellman, P.V. and Hunter, J.A. (1990) Geophysics in the study of permafrost. In: Ward, S.H. (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 1: Review and Tutorial*. Tusla: Society of Exploration Geophysicists, 355-384.
- 33- Sinha, A.K. (1990) Interpretation of ground VLF-EM data in terms of inclined sheet-like conductor models. *Pure & Applied Geophysics*, 132: 733-756.
- 34- Sinha, A.K. and Stephens, L.E. (1983) Permafrost mapping over a drained lake by electromagnetic induction methods. In: *Current Research, Part A*, Geological Survey of Canada, Paper 83-1A, 213-220.
- 35- Stewart, R.R. (1991) *Exploration seismic tomography: fundamentals*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA. SEG Continuing Education Short Course notes.
- 36- Stoyer, C. (1989) *EMIX34 Plus™ User Manual*. Golden, Colorado: Interpex LTD.
- 37- Sundberg, K. (1931) *Gerlands Beitr. Geoph., Ergänzungs-Hefte*, 1: 298-361.
- 38- Swift, C.M. (1988) Fundamentals of the electromagnetic method. In: Nabighian, M.N. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 1*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 5-10.
- 39- Todd, B.J., Pullan, S.E. and Hunter, J.A. (1991) Electromagnetic studies across lakes and rivers in permafrost terrain, Mackenzie River Delta, Northwest Territories, Canada. In: *Expanded Abstracts of 61st Annual International Meeting*, 10-14, Nov. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 565-568.
- 40- Vozoff, K. (1991) The magneto-telluric method. In: Nabighian, M.C. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2: Applications, Part B*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 641-711.
- 41- Zalasiewicz, J.A., Mather, S.J. and Cornwell, J.D. (1985) The application of ground conductivity measurements to geological mapping. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 18(2): 139-148.
- 42- Zonge, K.L. Hughes, L.H. (1991) Controlled-source audio-frequency magnetotellurics. In: Nabighian, M.C. (ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2: Applications, Part B*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 713-809.

۴۳- دکتر حسن حاجب حسینی و دکتر حسین زمردیان، ژئوفیزیک کاربردی (جلد دوم)، ۱۳۶۸، ترجمه کتاب

Applied Geophysics تألیف: Keys, D.A. و Sheriff, R.E. Telford, W.M. ناشر: انتشارات دانشگاه تهران