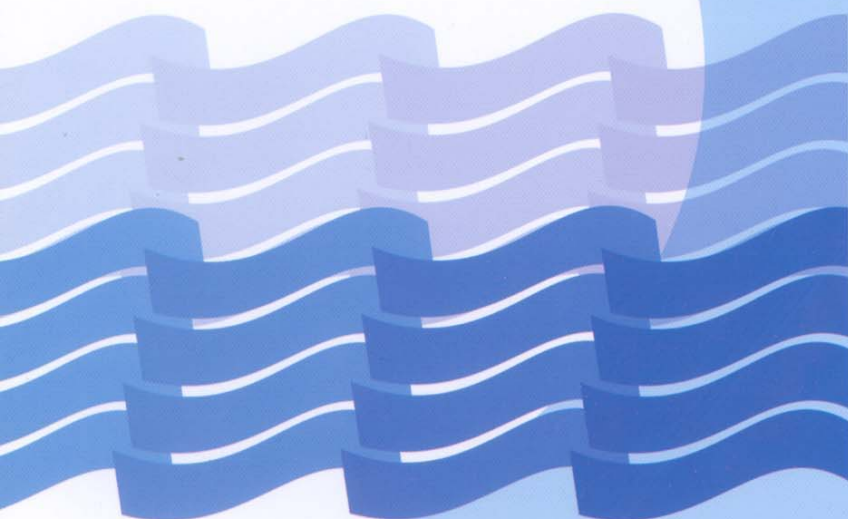


ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب "شناخت روش قطبش القایی (IP)"



ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب
شناخت روش قطبش القایی (IP)

پیشگفتار

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

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

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

- استفاده از تخصصها و تجارب کارشناسان و صاحب نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره کاریها و اتلاف منابع مالی و غیر مالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحب نظرانی که فعالیت آنها با این رشته از مهندسی آب مرتبط می‌باشد موجب امتنان کمیته خواهد بود.

ترکیب اعضای کمیته

این نشریه با مشارکت اعضای کمیته فنی شماره ۱۳-۲ (ژئوفیزیک) طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور تهیه

و تنظیم شده که اسامی آنها به ترتیب الفبا به شرح زیر است:

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

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	۱- مقدمه
۱	۱-۱ کلیات
۲	۲- منشاء اثرهای قطبش القایی
۳	۱-۲ قطبش دانه‌ای (الکترودی)
۵	۲-۲ قطبش غشایی (الکترولیتی)
۷	۳-۲ فرآیندهای قابل مشاهده (ماکروسکوپی)
۷	۴-۲ فرآیندهای یونی
۸	۳- اندازه‌گیری قطبش القایی
۸	۱-۳ اندازه‌گیریهای زمان حوزه‌ای
۱۱	۲-۳ اندازه‌گیریهای حوزه فرکانس
۱۳	۳-۳ طیف IP و مقاومت ویژه مختلط
۱۹	۴-۳ کاهش نوفه و جفت‌شدگی الکترومغناطیسی
۲۰	۴- برداشتهای صحرایی
۲۱	۱-۴ آرایه دو قطبی - دو قطبی
۲۳	۲-۴ آرایه چهار قطبی متقارن (آرایه شلومبرژه)
۲۴	۳-۴ آرایه سه قطبی (قطبی - دو قطبی)
۲۶	۴-۴ آرایه مستطیل
۲۷	۵- شکلهای نمایش داده‌های IP
۳۳	۶- کاربردها و گزارشهای موردی
۳۳	۱-۶ برداشتهای زمین‌گرمایی
۳۴	۲-۶ بررسیهای آب زیرزمینی
۳۶	۳-۶ کاربردهای زیست محیطی
۴۰	منابع

۱-۱ کلیات

پدیده قطبش القایی^۱ در سال ۱۹۱۲ توسط کونراد شلومبرژه^۲ معرفی شد و از اواخر دهه ۱۹۴۰، در طول جنگ جهانی دوم، توسط ویلیام کک^۳ و داوید بلیل^۴، به صورت قسمتی از پروژه نیروی دریایی آمریکا برای آشکارسازی مینهای دریایی تکمیل شد (گرو^۵، ۱۹۸۲). یکی از مظاهر این پدیده بنام اثر ولتاژ اضافی^۶ در قرن نوزدهم شناخته شده بود.

در سالهای ۱۹۸۰ پیشرفتهای زیادی در دستگاهها انجام گرفت و تکنیکهای پیشرفته مثل مقاومت ویژه مختلط^۷ و IP طیفی^۸ (پلتون^۹ و سایرین، ۱۹۷۸) پیدا شد. با وجود این هنوز لازم است پژوهشهای زیادی انجام گیرد تا بتوان دادههای ژئوفیزیکی را با علل زمین شناختی آنها مربوط ساخت. بهمین لحاظ تفسیرهای کمی هنوز با مشکلاتی روبرو می باشند.

مهمترین کاربرد امروزی اکتشافات IP در پی جویی کانسارهای فلزی گله به گله (افشان^{۱۰}) و در درجه دوم در پی جویی های آب زیرزمینی و زمین گرمایی است. از اوایل سالهای ۱۹۹۰ علاقه زیادی در جهت امکان استفاده از روشهای IP در کاربردهای زیست محیطی پیدا شده است، هرچند که این کار هنوز در مرحله پژوهشی قرار دارد. اندازه گیریهای قطبش القایی با استفاده از آرایشهای الکترودی متعارف در روش مقاومت ویژه الکتریکی صورت می گیرد که شامل دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل غیرقابل قطبش است. وقتی جریان اعمال شده قطع گردد، مدت زمان محدودی (چند ثانیه تا چند دقیقه) طول می کشد تا ولتاژ بین الکتروودهای پتانسیل به تدریج نقصان یافته (تخلیه شده) و به صفر برسد (شکل ۱).

این بدان خاطر است که زمین موقتاً بارها را انبار می کند (به عبارت دیگر قطبی می شود) و تا حدودی شبیه یک خازن عمل می کند. وقتی جریان دوباره وصل شود، ولتاژ در یک آن به مقدار بیشینه خود نمی رسد بلکه طی همان زمانی (زمان ازدیاد) که قبلاً به ماکزیمم رسیده بود بتدریج زیاد می شود. زمان نقصان تدریجی ولتاژ و زمان ازدیاد ولتاژ به عوامل دستگاهی و زمین شناختی ارتباط دارند و لذا مشخص کننده طبیعت زمین خواهند بود که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت.

1- induced polarization

2- Conrad Schlumberger

3- William Keck

4- David Bliel

5- Grow

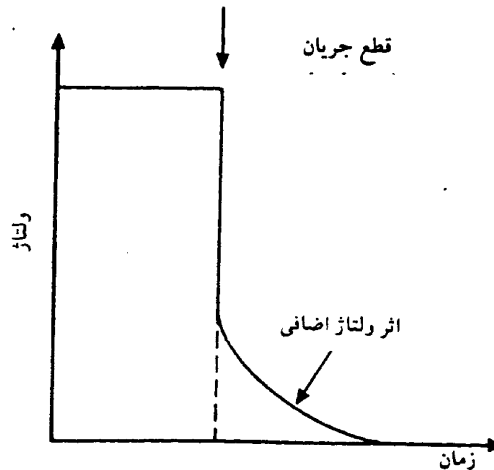
6- Overvoltage

7- Complex

8- spectral

9- Pelton

10- disseminated



شکل ۱- اثر ولتاژ اضافی که در قطبش القایی پس از قطع جریان تولید می‌شود.

چهار سیستم اندازه‌گیری قطبش القایی وجود دارد. تکنیکهای حوزه زمان^۱ (پالس گذرا^۲) ولتاژ اضافی را برحسب زمان اندازه می‌گیرند. روشهای حوزه فرکانس، مقاومت ویژه ظاهری در دو یا چند فرکانس مختلف را اندازه‌گیری می‌کنند (فرکانسها معمولاً پایین‌تر از 10^5 Hz می‌باشند، پاتلاوشیاون^۳، ۱۹۷۷). در تکنیک حوزه فاز، تأخیر فاز بین جریان اعمال شده و ولتاژ اندازه‌گیری شده مشخص‌کننده ماهیت کانی‌سازی زیرزمینی است. در IP طیفی، هم فاز و هم بزرگی دامنه در گستره‌ای از فرکانسها بین 10^{-3} و 4×10^3 Hz اندازه‌گیری می‌شود.

روش قطبش القایی روشی فعال^۴ است زیرا در بررسیهای حوزه زمان ولتاژهایی به بزرگی چندین هزار ولت به زمین داده می‌شود تا بتوان ولتاژهای اضافی قابل اندازه‌گیری تولید کرد. دستگاه مورد استفاده شبیه دستگاه مقاومت ویژه ولی پیچیده‌تر از آن است. روش قطبش القایی زمین را تحریک و سبب ایجاد پاسخی در آن می‌شود که با توزیع و ماهیت دانه‌های کانی موجود ارتباط دارد. این عمل به ویژه بیشترین اثر را وقتی خواهد داشت که دانه‌های کانی بجای آنکه به صورت متراکم با هم جمع شده باشند، به صورت گله به گله باشند. این موضوع در بخش آینده شرح داده خواهد شد.

۲- منشاء اثرهای قطبش القایی

علل پدیده‌های قطبش القایی هنوز به‌طور دقیق روشن نشده است، ولی دو سازوکار عمده که به نحو قابل قبولی

1- time domain

2- pulse transient

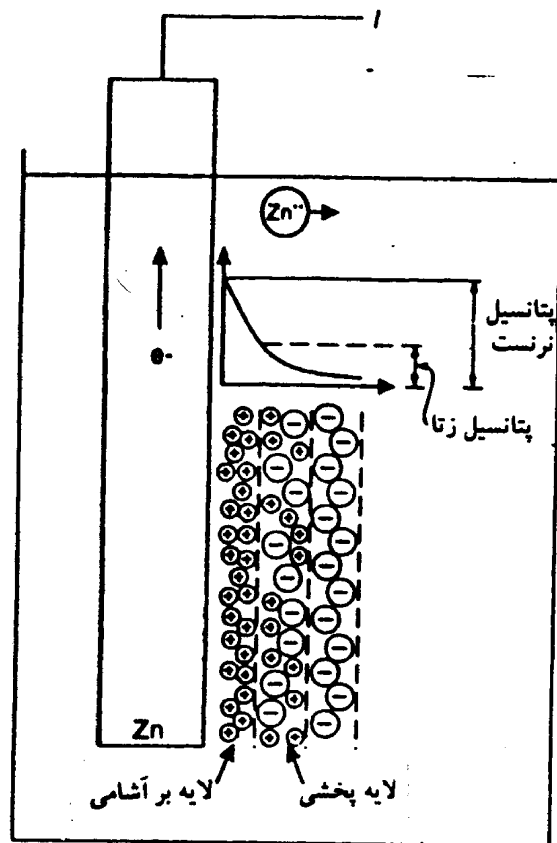
3- Patella and Schiavone

4- active

شناخته شده‌اند عبارتند از: قطبش دانه‌ای (الکترودی) یا ولتاژ اضافی، و قطبش غشایی^۱ (الکترولیتی) که هر دو از راه فرآیندهای الکتروشیمیایی روی می‌دهند.

۱-۲ قطبش دانه‌ای (الکترودی)

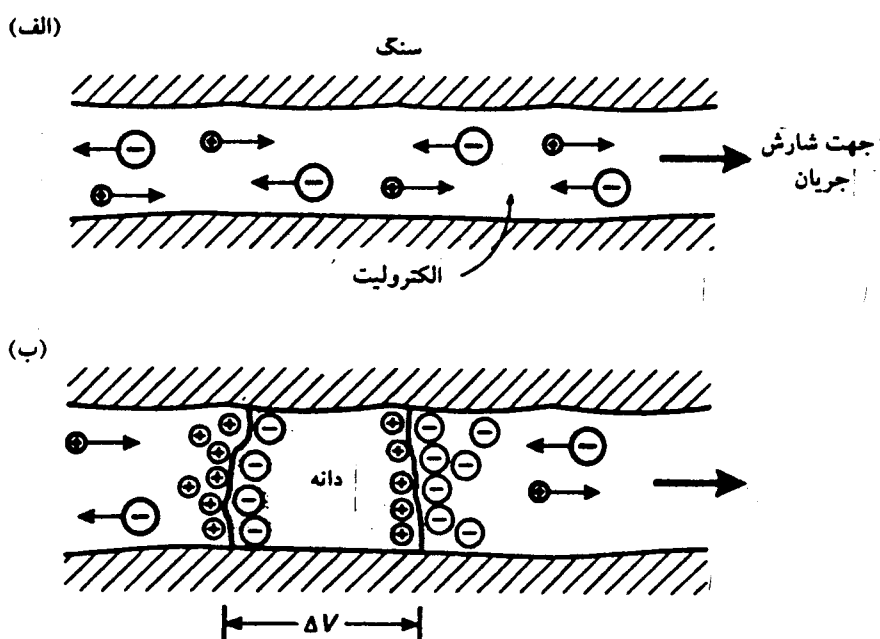
قطبش دانه‌ای یا الکترودی توسط همان فرآیندی روی می‌دهد که در روش خودپتانسیل وجود دارد (نگاه کنید به نشریه ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب، شناخت روش خودپتانسیل (SP)). اگر یک الکتروود فلزی در محلولی یونی قرار گرفته و هیچگونه ولتاژی به آن داده نشود، بارهای با قطبیدگی متفاوت از هم جدا می‌شوند و در نتیجه بین الکتروود و محلول اختلاف پتانسیلی به وجود خواهد آمد (شکل ۲).



شکل ۲- پدیده قطبش الکترودی همراه با فرآیندهای فیزیکی که سبب پیداشدن پتانسیلهای نرنست و زتا می‌شود (از بک، ۱۹۸۱)

بزرگی کل این پتانسیل بنام پتانسیل نرنست^۱ معروف است و یک لایه برآشامی^۲ (جذب سطحی) پتانسیل دیگری بنام پتانسیل زتا^۳ به وجود می آورد. وقتی یک پتانسیل به زمین داده شود، توازن یونی بهم خورده و جریانی به وجود می آورد که اختلاف پتانسیل بین الکتروود و محلول را تغییر می دهد. وقتی که ولتاژ اعمال شده برداشته شود توازن یونی با برگشت یونها دوباره برقرار می شود.

در یک وضعیت زمین شناختی، این جریان توسط حرکت یونها در آب زیرزمینی موجود در توده سنگها صورت می گیرد. این حرکت از داخل خلل و فرج های متصل به هم یا از داخل شکستگیها و خرد ترکه های داخل سنگ انجام می شود. وقتی یک دانه رسانا (مثل یک سولفید فلزی) کانال جریان را مسدود کند، همانند یک پیل الکتروشیمیایی بارها انباشته می شوند (شکل ۳). این وضع با جریان مخالفت کرده و دانه فلزی قطبیده شده و اختلاف پتانسیلی در طول آن به وجود می آید. با قطع ولتاژ اعمال شده، یونها به عقب برگشته و اختلاف پتانسیل طرفین دانه در زمانی معین به صفر برمی گردد و بدین ترتیب سرشتی های نقصان تدریجی ولتاژ اضافی که در سیستم های حوزه زمان اندازه گیری می شود، به دست می آیند.



شکل ۳- قطبش دانه ای (الکتروود)

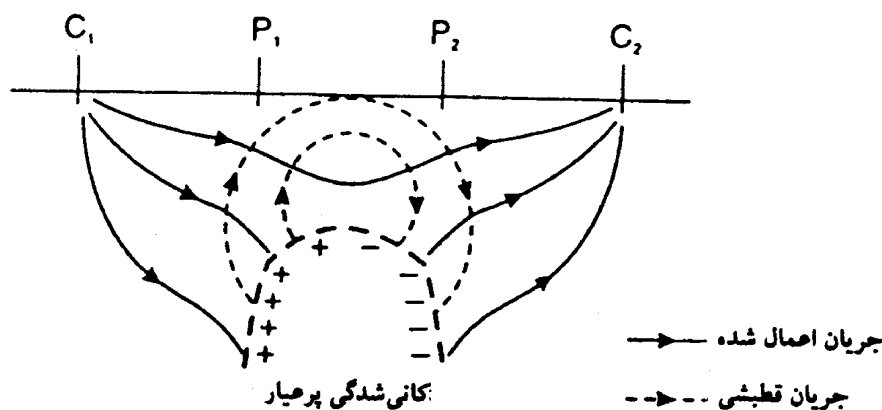
(الف) جریان آزاد الکترولیتی در یک مجرای باز (ب) قطبش یک دانه رسانای الکترونیکی که مجرا را بسته است.

1- Nernst

2- adsorbed layer

3- Zeta

قطبش دانه‌ای اساساً پدیده‌ای مربوط به سطح دانه‌ها است و بهمین دلیل کانه‌های گله به گله (که کل مساحت سطحی آنها زیاد است) پاسخ IP بزرگی به وجود می‌آورند. در مواردی پاسخ IP بر روی هاله‌ای از کانه‌های گله به گله در اطراف یک کانسار توده‌ای دریافت می‌شود. هرچند این تک‌تک دانه‌های کانه‌ای رساناست که قطبیده می‌شوند، ولی کل زونهای دارای عیار قابل توجه می‌توانند یک قطبش یکپارچه به وجود آورند. این وضع یک جریان قطبشی قابل ملاحظه در زمین تولید می‌کند که به صورت پاسخ IP اندازه‌گیری می‌شود. در آرایش الکترونی و نر در شکل ۴، جریان اعمال شده، زون کانه‌سازی را قطبیده می‌کند. وقتی جریان اعمال شده قطع شود، جریان قطبشی گذرای تولید می‌شود که در سطح اندازه‌گیری می‌گردد. این جریان صحرایی برای آرایه الکترونی دو قطبی - دو قطبی^۱ که معمولتر از آرایش و نر است پیچیده‌تر خواهد بود (نگاه کنید به نشریه ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب، شناخت مطالعات الکتریک با روش مقاومت ویژه).



شکل ۴- اثر کلی قطبش دانه‌ای بر روی یک کانسار گله به گله

عوامل مؤثر در برقراری مجدد توازن یونی بسیار پیچیده بوده و ممکن است به شکل و اندازه خلل و فرج، ساخت سنگی، تراوایی، رسانندگی الکترولیتی و غلظت یونی و رسانندگی الکترونی دانه کانه‌ای مربوط باشند. کانه‌های بورنیت، کاسیتريت، کالکوپیریت، گالن، گرافیت، لیمونیت، مگنتیت، پیریت، پیرولوسیت و پیروتیت پاسخهای IP قوی از خود بروز می‌دهند زیرا دارای رسانندگی الکترونی بالایی هستند. در حالی که سولفیدهایی از نوع اسفالریت، سینابر و استیب نیت به علت رسانندگی الکترونی پایین پاسخهای IP خوبی تولید نمی‌کنند. بهمین علت، این کانه‌ها یا جریان خود - پتانسیل ندارند یا جریان آنها خیلی کوچک خواهد بود.

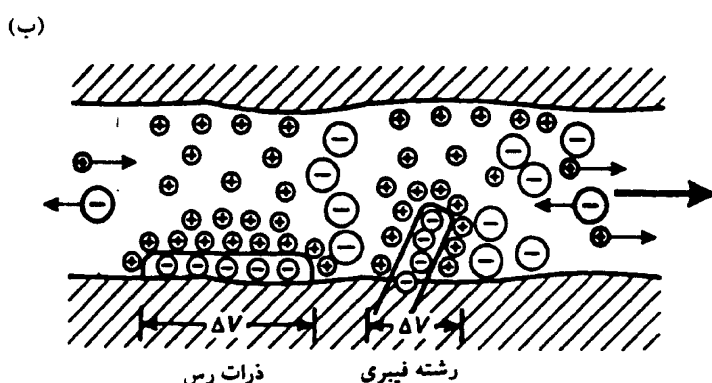
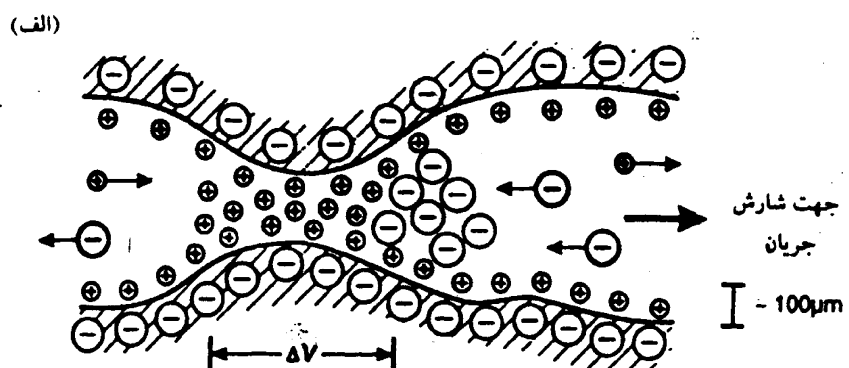
۲-۲ قطبش غشایی (الکترولیتی)

پاسخ IP که بر روی سنگهای فاقد دانه‌های کانی سولفیدی اندازه‌گیری می‌شود ممکن است با اثر ولتاژ اضافی IP که بر

1- dipole - dipole

روی سنگهای دارای کانه‌های گله به گله کم عیار به دست می‌آیند قابل تفکیک نباشد، به‌ویژه اگر روشهای سنتی زمان حوزه‌ای یا فرکانس حوزه‌ای به کار گرفته شوند. ولی سیستمهای IP جدیدتر حوزه طیفی یا حوزه فاز ممکن است نتایج قابل تشخیص کاملی در اختیار قرار دهند.

دو علت برای قطبش غشایی یا الکترولیتی وجود دارد. یکی در اثر وجود تنگ‌شدگی^۱ در داخل مجرای بین خلل و فرج و دیگری در اثر وجود رس در داخل اینگونه مجراها که مثلاً در داخل ماسه‌سنگهای ناخالص بوجود می‌آید. در سطح مشترک بین کانیهای سنگی و مایعات داخل آنها یک بار منفی وجود دارد. لذا بارهای مثبت در داخل مایع موجود در خلل و فرج به سطح سنگ جذب می‌شوند و یک لایه باردار مثبت با ضخامتی تا حدود $100\mu m$ را بوجود می‌آورند، در حالی که بارهای منفی از سطح دور می‌شوند. اگر قطر کانال از این ضخامت کمتر باشد، وقتی ولتاژ خارجی اعمال شود، تنگ‌شدگی مجرا جریان یونها را سد می‌کند. یونهای منفی زون تنگ شده را ترک کرده و یونهای مثبت بر تراکم خود می‌افزایند و بدین ترتیب اختلاف پتانسیلی در طرفین محل سد شده پیدایم شود (شکل ۵-الف). وقتی ولتاژ اعمال شده قطع شود، این تراکم یونی نامتوازن از راه پخش به حالت عادی برگشته و پاسخ IP را تولید می‌کند.



شکل ۵- تولید قطبش غشایی مربوط به (الف) تنگ‌شدگی در داخل مجرای بین دانه‌های کانی و (ب) ذرات رس باردار منفی (فریزر و سایرین، ۱۹۶۴) و اجزاء رشته‌ای در طول کناره‌های مجرا.

دومین علت قطبش غشایی وجود ذرات رس یا الیاف رشته‌ای از کانیهاست که هر دو بار منفی دارند. بارهای مثبت به آنها جذب شده و ابر باردار مثبت در فضای داخل خلل و فرج بوجود می‌آورد. وقتی ولتاژی اعمال شود، بارهای مثبت در داخل این ابر باردار همنام می‌توانند حرکت کنند، ولی جلو یونهای منفی گرفته شده و یک اختلاف تمرکز یونی بوجود می‌آید (شکل ۵-ب). وقتی ولتاژ اعمال شده قطع گردد، وضع غیرمتوازن در تمرکز یونها توسط پخش به سطح معمولی نقصان می‌یابد و پاسخ IP قابل مشاهده تولید می‌شود.

۳-۲ فرآیندهای قابل مشاهده (ماکروسکوپی)

تاکنون کوششهای زیادی شده است تا روش قطبش القایی به صورت کمی (مثلاً توسط برتن و لوب^۱، ۱۹۷۶) و پدیده‌های آن به صورت کیفی (مثلاً توسط شوی و جانسون^۲، ۱۹۷۳؛ سامنر^۳، ۱۹۷۶) شرح داده شود. از نقطه نظر تعبیر و تفسیر این ضرورت وجود دارد که هر نوع فرضیه در این مورد می‌بایست قادر باشد که شکل منحنی نقصان تدریجی ولتاژ اضافی با زمان و تغییرات مقاومت ویژه و فاز با فرکانس را توجیه نماید. در واقع منحنی نقصان تدریجی با زمان، بجای آنکه یک نقصان تدریجی نمایی باشد، بطور پیچیده‌ای متناسب با t^{-n} تغییر می‌کند که در آن t طول زمان از لحظه‌ای است که جریان قطع می‌شود. برای توجیه مطلب، چگالی جریان و ضریب دی‌الکتریک مواد زمین‌شناختی به میان کشیده می‌شود ولی پدیده قطبش القایی را تنها بر حسب ضریب دی‌الکتریک سنگ نمی‌توان توجیه کرد. مدل‌های دو بعدی برای توجیه واقعیت سه بعدی کفایت نمی‌کنند، هر چند هوهمان^۴ (۱۹۷۵) مدلسازی سه بعدی را انجام داده است. بعضی مدل‌ها در شبیه‌سازی مدارهای الکتریکی بصورت سیستمهای مقاومت - خازن موفق بوده‌اند (برتن و لوب، ۱۹۷۶)، ولی این مدارها فرآیندهای فیزیکی داخل زمین را که منجر به قطبش القایی می‌شوند شرح نمی‌دهند.

۴-۲ فرآیندهای یونی

همانگونه که فرضیه‌های ماکروسکوپی قادر به ارائه یک حل کامل نیستند، فرآیندهایی که در سطح میکروسکوپی مورد توجه قرار می‌گیرند نیز بهمین منوال هستند. نیروهایی که بر روی یونها عمل می‌کنند و حرکت‌هایی که از آنها نتیجه می‌شود از طریق فرضیه پخش^۵ از اواخر قرن گذشته مورد توجه قرار گرفته‌اند. دامنه ولتاژ اضافی در اندازه‌گیریهای حوزه زمان می‌بایست با ریشه دوم فرکانس تغییر کند، ولی تجربه چنین نشان نمی‌دهد. اگر علاوه بر پخش کلی، نیروهای الکتریکی نیز مورد توجه قرار گیرند که میدان الکتریکی و قابلیت تحرک یونها را به حساب می‌آورد، امکان دارد پارامترهای دی‌الکتریکی را که خیلی نزدیکتر به پارامترهای اندازه‌گیری شده‌اند بدست آورد. اثر آشفستگی گرمایی^۶ نیز مورد توجه قرار گرفته و متعاقباً مدلسازیهای ریاضی توانسته‌اند ارتباط زمانی کاهش تدریجی ولتاژ

1- Bertin and Loeb

2- Shuey and Johnson

3- Sumner

4- Hohmann

5- diffusion

6- thermal agitation

اضافی را بوجود آورند. البته هنوز توجیه‌های فیزیکی قابل قبول می‌بایست پیدا شوند (شافی^۱ ۱۹۵۸؛ وانگ^۲ ۱۹۵۹).

۳- اندازه‌گیری قطبش القایی

در قطبش القایی جریان توسط دو الکتروود جریان به زمین داده شده، و اثر قطبش القایی بین دو الکتروود پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. این عملیات معمولاً توسط آرایه‌های متفاوت صورت می‌گیرد (نگا. بند ۴). فاصله‌های الکتروودی بطور معمول ده‌ها تا صدها متر انتخاب می‌شود، ولی در بررسی‌های شناسایی وسیع، که آرایه شلومبرژه به کار می‌رود، فاصله الکتروودی حتی بیشتر نیز خواهد بود. نوع دستگاه مورد استفاده بر حجم تر و ماهرانه تراز دستگاه‌هایی است که در بررسی‌های مقاومت ویژه به کار می‌روند. نوع این دستگاه‌ها همچنین به نوع بررسی IP نیز ارتباط دارد. جریان ورودی توسط دستگاه فرستنده به زمین انتشار می‌یابد، و اثرات قطبش توسط دستگاه گیرنده دریافت می‌شود. دستگاه گیرنده مجهز به ظروف متخلخل غیرقابل قطبش است که به الکتروودهای پتانسیل وصل می‌شوند. خطوط برداشت با فاصله‌های الکتریکی ثابت همانند فواصل ثابت در بررسی‌های مقاومت ویژه انجام خواهد گرفت. برای شرح بیشتر در مورد آرایش‌های صحرائی به تلفورد و سایرین^۳ ۱۹۹۰ و میلسم^۴ ۱۹۸۹ مراجعه شود.

۳-۱ اندازه‌گیری‌های زمان حوزه‌ای

وقتی جریان به زمین داده شده و پس از چند لحظه قطع شود، ابتدا در یک لحظه به مقدار معین V می‌رسد و سپس به تدریج مقدار آن اضافه شده و به ولتاژ ثابت V_0 می‌رسد. ولتاژ اضافی را V_p می‌نامند. مدت زمان بین وصل جریان و قطع آن را زمان شارژ (بارگیری) گویند. قطع جریان می‌تواند قبل از شارژ کامل صورت گیرد. در موقع قطع، عکس این موضوع اتفاق می‌افتد. بعبارت دیگر ابتدا یک افت پتانسیل ناگهانی خواهیم داشت و سپس نقصان تدریجی تا رسیدن به صفر ادامه پیدا می‌کند. مدت زمان از قطع جریان تا رسیدن به صفر را زمان دشارژ (تخلیه) می‌نامند. جمع زمان شارژ و دشارژ را دوره اندازه‌گیری می‌نامند (شکل ۶). بزرگی کل ولتاژ مشاهده شده (V_0) برابر است با جمع ولتاژ واقعی (V) حاصل از جریان اعمال شده و ولتاژ قطبشی (V_p) که توسط فرآیندهای قطبش به وجود آمده است. وقتی جریان اعمال شده قطع گردد، ولتاژ به اندازه V ناگهان افت پیدا می‌کند، و ولتاژ پسماند (V_p اضافی) باقی می‌ماند که با زمان نقصان تدریجی می‌یابد. یکی از مقادیر قابل اندازه‌گیری برای IP نسبت V_p/V_0 است که بارپذیری^۵ (M) نامیده شده و معمولاً بر حسب میلی‌ولت بر ولت یا بر حسب درصد بیان می‌شود.

1- Schufie

2- Wong

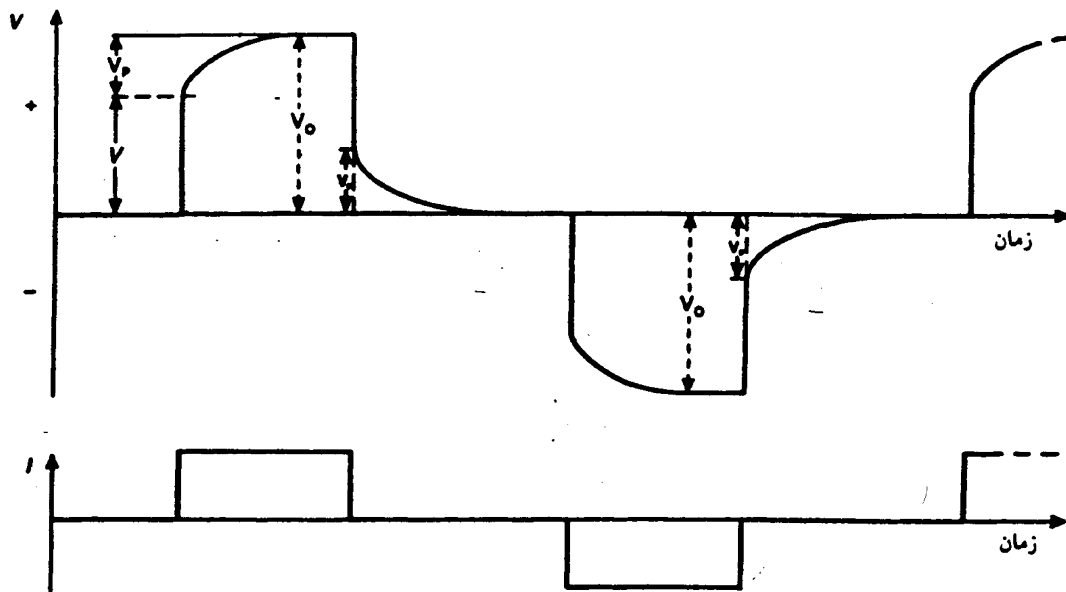
3- Telford et.al.

4- Milsom

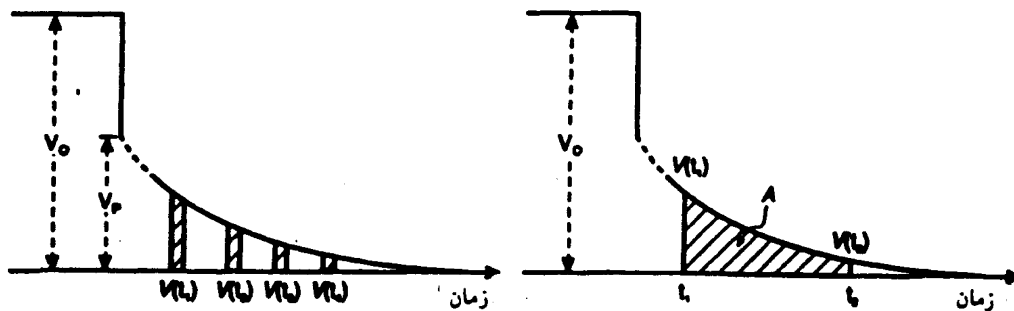
5- chargeability

از نظر دستگاه، اندازه‌گیری V_P در لحظه‌ای که جریان قطع می‌شود بسیار دشوار است، لذا این عمل در زمان معینی بعد از قطع (معمولاً ۰/۵ ثانیه) انجام می‌گیرد. سپس از روند نقصان تدریجی V_P در فاصله‌های زمانی خیلی کوتاه (۰/۱ ثانیه) پس از زمان فوق (۰/۵ ثانیه) اندازه‌گیری‌هایی صورت می‌گیرد. انتگرال‌گیری این مقادیر بر حسب زمان سطح زیر منحنی را می‌دهد (شکل ۶)، که راه دیگری است برای نشان دادن منحنی نقصان تدریجی. وقتی این انتگرال بر V_0 تقسیم شود پارامتر دیگری بنام بارپذیری ظاهری (M_a) به دست می‌آید که واحد آن زمان (میلی ثانیه) است.

(الف)

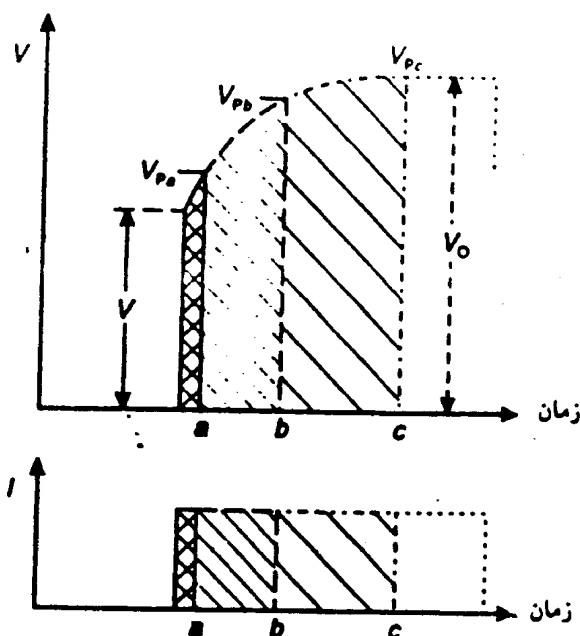


(ب)



شکل ۶- (الف) کاربرد جریان پالسی با قطبیت متناوب، و ولتاژ منتهی اندازه‌گیری شده (V_P) که نشان‌دهنده اثر ولتاژ اضافی و تغییرات آن با زمان است. (ب) دو نوع اندازه‌گیری ولتاژ اضافی، یکی در فاصله‌های زمانی معین $V(t_1)$ و غیره و دیگری توسط سطح زیر منحنی ولتاژ اضافی

در شرایط صحرائی، اندازه‌گیری بارپذیری واقعی تقریباً غیرممکن است، زیرا هر لایه در زیرزمین مقدار مطلق بارپذیری و مقاومت ویژه حقیقی خود را داراست. آنچه اندازه‌گیری می‌شود تابع مختلفی از کلیه مقاومت ویژه‌های حقیقی و کلیه بارپذیریهای مطلق محیطهایی است که در گستره دستگاه از آنها نمونه‌برداری شده است. اگر دوره شارژ کوتاه باشد، پاسخ IP آن از زمان شارژ بلند کمتر خواهد بود (شکل ۷).



شکل ۷- زیاد کردن زمان شارژ (a تا c)، که باعث کم شدن فرکانس اندازه‌گیری می‌شود، سبب زیاد شدن ولتاژ اضافی (V_{pc} تا V_{pa}) می‌شود. در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری در موقعی که فرکانس اندازه‌گیری کمتر است (مثلاً در C)، بزرگتر از موقعی است که فرکانس اندازه‌گیری بیشتر باشد (مثلاً در a).

برای یک شارژ معین و دوره‌های انتگرال‌گیری (که در دستگاههای مختلف IP متفاوت است) بارپذیری ظاهری اندازه‌گیری شده پارامتر تشخیص دهنده‌ای است که می‌توان آن را بر حسب زمین‌شناسی زیرسطحی بطور کیفی تفسیر کرد. اگر زمان شارژ سه ثانیه، دوره انتگرال‌گیری یک ثانیه و عیار حجمی جسم ۱٪ باشد، مقدار M_a برای کالکوسیت ۱۳/۲ میلی‌ثانیه می‌باشد که بیش از دو برابر این مقدار برای برنیت (۶/۳ میلی‌ثانیه) و کمی بیشتر از مقدار مربوط به گرافیت (۱۱/۲ میلی‌ثانیه) است. برعکس بارپذیری ظاهری منیتیت فقط ۲/۲ میلی‌ثانیه و هماتیت صفر است.

از مطالب فوق با توجه به شکل ۶ برای بارپذیری M نتیجه می‌شود:

$$M = V_p/V_o \text{ (بر حسب mv/v یا \%)}$$

که در آن V_p ولتاژ اضافی، و V_o ولتاژ اندازه‌گیری شده با جریان اعمال شده معین است، و

$$M_a = \frac{1}{V_o} \int_{t_1}^{t_2} V_p(t) dt = \frac{A}{V_o} \quad (\text{بر حسب میلی ثانیه})$$

که در آن $V_p(t)$ ولتاژ اضافی در زمان t ، و سایر پارامترها در شکل ۶-ب تعریف شده‌اند.

مزیت اصلی انتگرال‌گیری و هنجارسازی^۱ توسط تقسیم‌کردن با V آن است که نوفه^۲ حاصل از جفت‌شدگی متقاطع کابلها و پتانسیل زمینه کاهش می‌یابد. در انتخاب فاصله‌های زمانی مناسب باید دقت به عمل آید تا نسبت سیگنال - به - نوفه^۳ به حداکثر برسد، بدون آنکه از حساسیت تشخیص‌دهندگی این روش کاسته شود.

۲-۳ اندازه‌گیریهای حوزه فرکانس

در شکل ۸ منحنی‌های شارژ و تخلیه IP برای دو دوره متفاوت نشان داده شده است (الف و ب). شکل ۸-الف، زمانی است که زمین به حالت شارژ کامل رسیده (زمان T) و پس از قطع جریان نیز زمین کاملاً تخلیه شده است (زمان θ). شکل ۸-ب، زمانهای شارژ و تخلیه کوتاهتر شده ($T' < T$ و $\theta' < \theta$) و علاوه بر آن جهت جریان نیز به‌طور متناوب عکس شده است. چنانکه روی این دو شکل دیده می‌شود، مقدار پتانسیل در حالت شارژ کامل (ΔV_s) بزرگتر از پتانسیل ($\Delta V'_s$) در حالت زمان شارژ کوتاهتر است ($\Delta V_s > \Delta V'_s$). اگر با تقریب اول بپذیریم که پدیده شارژ مشابه پدیده تخلیه است، هرچه زمانهای شارژ و تخلیه کوچکتر باشد تفاوت ΔV_s و $\Delta V'_s$ بیشتر بوده و مقدار آن به مقدار ΔV_{IP} در زمان قطع جریان ($t = 0$) نزدیکتر می‌شود.

یک طریقه بدست آوردن دوره اندازه‌گیری (جمع زمان شارژ و تخلیه) کوتاه استفاده از جریان متناوب با فرکانس کم می‌باشد که بین الکترودهای پتانسیل (M و N) اختلاف پتانسیل متناوبی ایجاد می‌کند که مقدار آن برابر مدولش یعنی ΔV_{alt} می‌باشد. مقدار $\frac{\Delta V_s - \Delta V_{alt}}{\Delta V_s}$ کاملاً قابل تشبیه به پارامتر $\frac{\Delta V_{IPo}}{\Delta V_s}$ ($t = 0$) است.

اگر شدت جریان پیوسته و مدول جریان متناوب یکسان باشند برای یک آرایش مشخص چنانکه دیده شد، پتانسیل حاصل با جریان متناوب کمتر از پتانسیل حاصل از جریان پیوسته است بنابراین با توجه به رابطه مقاومت ویژه ظاهری $\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$ (ρ_a) بزرگتر از مقاومت ویژه با جریان متناوب (ρ_{a1}) می‌باشد.

1- normalizing

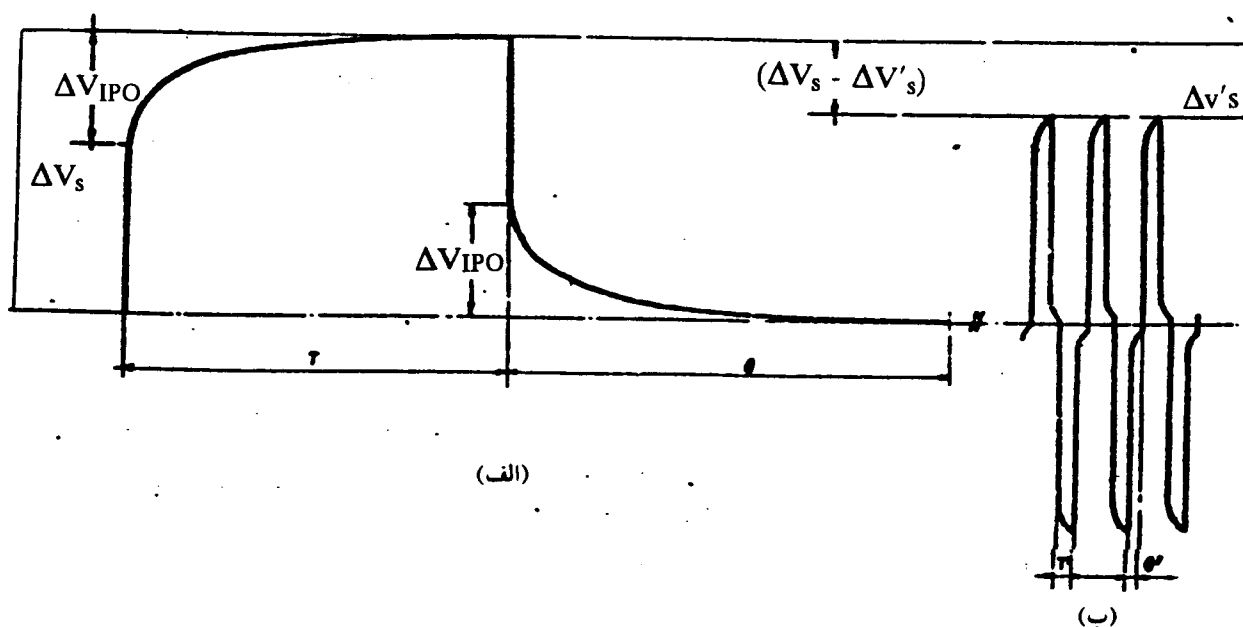
2- noise

3- signal - to - noise

اگر در رابطه $\frac{\Delta V_s - \Delta V_{alt}}{\Delta V_s}$ مقادیر ΔV_s و ΔV_{alt} را با استفاده از رابطه مقاومت ویژه ظاهری جایگزین کنیم پارامتری بنام اثر فرکانس (FE) تعریف می‌شود که عبارتست از:

$$FE = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a0}} \quad \text{یا} \quad \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \quad (\text{بدون واحد})$$

درصد اثر فرکانس (PFE) نیز چنین تعریف می‌شود: $PFE = 100 \left(\frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \right) = 100 \cdot FE$
در مطالعات قطبش القایی حوزه فرکانس (فرکانس متغیر) به جای جریان پیوسته نیز از یک جریان متناوب با فرکانس کم استفاده می‌شود. بنابراین اساس این مطالعات، اندازه‌گیری مقاومت ویژه در دو فرکانس (مثلاً ۰/۱ و ۵HZ یا ۰/۳ و ۲/۵ HZ) می‌باشد که در حقیقت فرکانس پائین (۰/۱ یا ۰/۳) جایگزین جریان مستقیم (پیوسته) شده است.



شکل ۸- مقایسه منحنیهای شارژ و تخلیه IP برای دوره‌های اندازه‌گیری متفاوت

مارشال و مادن^۱ (۱۹۵۹) عبارت اثر فرکانس را اصلاح کرده و پارامتر دیگری بنام عامل فلزی^۲ (MF) (یا عامل رسانش فلزی^۳) را بدست آورد که عبارت است از:

$$MF = A (\rho_{a0} - \rho_{a1}) / \rho_{a0} \rho_{a1} \\ = A (\sigma_{a1} - \sigma_{a0}) \quad (\text{واحد: زیمنس بر متر یا موهو بر متر})$$

1- Marshall and Madden

2- metal factor

3- metal conduction factor

برخی از ژئوفیزیکدانها اعتقاد دارند که داده‌های عامل فلزی زونهای سولفیدی گله به گله را بهتر از داده‌های اثر فرکانس تشخیص می‌دهند.

در فرمولهای فوق σ_{a_0} و σ_{a_1} به ترتیب رسانندگی ظاهری $(1/\rho_a)$ در فرکانسهای پایین و بالا می‌باشند، بطوری که $\rho_{a_0} > \rho_{a_1}$ و $\sigma_{a_0} < \sigma_{a_1}$ و $A = 2\pi \times 10^5$ است.

از طرف دیگر می‌توان نوشت :

$$MF = A \times FE / \rho_{a_0} = A \times FE \times \sigma_{a_0}$$

که در آن FE اثر فرکانس است.

با وجود اینکه کانسارهای گله به گله را می‌توان با داده‌های IP تعیین محل کرد، پارامترهای بارپذیری، اثر فرکانس و عامل فلزی نشانه مناسبی از مقدار نسبی کانی‌سازی فلزی در منبع IP در اختیار نمی‌گذارند. لذا لازم است که به سراغ روشهای ماهرانه‌تری چون طیف IP رفت که حتی تخمینهای چنین روشهایی نیز بدون ابهام نخواهد بود.

روش دیگری که در حوزه فرکانس به کار گرفته شده و بعدها روش طیف IP جای آن را گرفته است روش فاز IP است که در آن تنها یک فرکانس لازم است. در این روش قطبش القایی از تأخیر فاز ϕ که بین جریان اعمال شده و ولتاژ قطبش اندازه‌گیری شده پیدا می‌شود، مشخص می‌گردد.

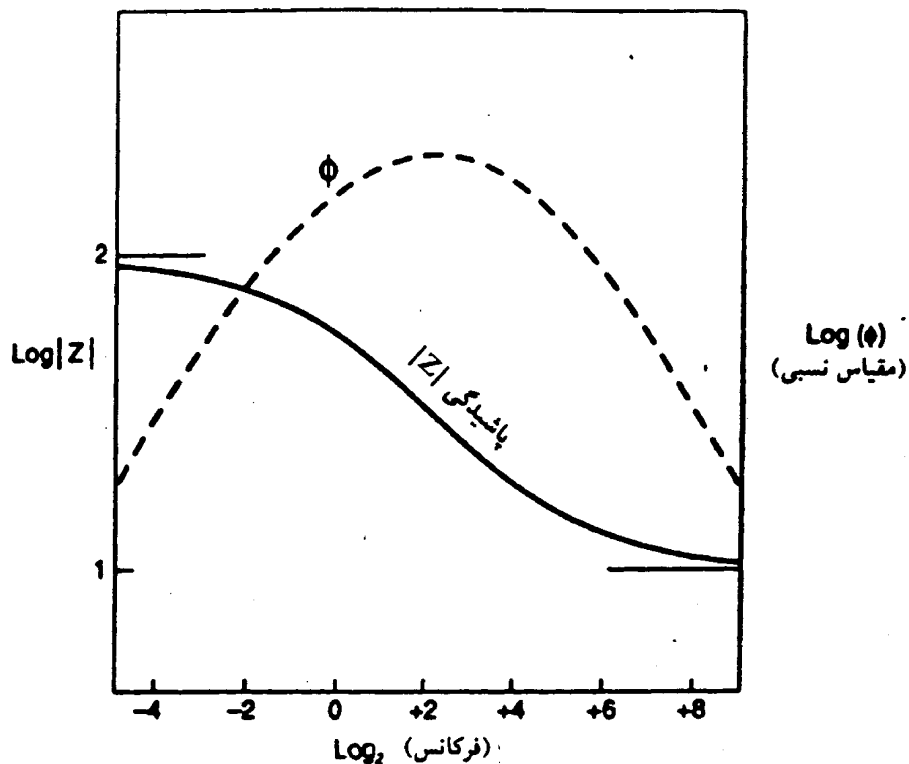
۳-۳ طیف IP و مقاومت ویژه مختلط

طیف IP نام دیگری برای مقاومت ویژه مختلط است که بنوبه خود با اندازه‌گیری ویژگیهای دی‌الکتریک مواد رابطه دارد. مروری بر مبانی نظری و تعبیر و تفسیر داده‌های طیف IP یا مقاومت ویژه مختلط توسط پلتون و سایرین^۱ (۱۹۸۳) ارائه شده است.

در این روش همان آرایش صحرایی بررسیهای حوزه زمان و فرکانس متغیر سستی به کار می‌رود، ولی دستگاه کاملاً پیچیده‌تر است. در این روش لازم است که اندازه‌گیرها تا حد امکان دقیق بوده و هرگونه نوفه‌ای پاک شود.

1- Pelton et. al.

در این روش قدر مطلق مقاومت ویژه مختلط $|Z(\omega)|$ و فاز ϕ ولتاژ قطبش در گستره وسیعی از فرکانس (3° تا 4 KHz) جریان اعمال شده اندازه گیری می شود، و در نتیجه یک نوع پاسخ طیف IP مشخص بدست می آید (شکل ۹). رابطه فرکانس معمولاً بصورت یک تابع دوتایی و به شکل لگاریتمی با پایه ۲ بجای پایه ۱۰ رسم می شود. رفتار بین حد پایین و حد بالای فرکانس را واهلش^۱ سیستم الکتریکی نامند (شوی و جانسون^۲، ۱۹۷۳) و اگر چهار پارامتر الکتریکی زیر معلوم باشند، کل پاشیدگی $Z(\omega)$ قابل تعریف خواهد بود. این چهار پارامتر عبارتند از: مقاومت ویژه DC (ρ_0)، بارپذیری IP (M)، ثابت زمانی پاسخ IP (τ)، که در مطالعات دی الکتریک به زمان واهلش موسوم است)، و نمای فرکانس زاویه ای (ω). چهار پارامتر فوق در پاسخ طیف IP بصورت زیر وارد می شوند:



شکل ۹- یک پاسخ طیفی نوعی IP (پلتون و همکاران، ۱۹۸۳)

$$|Z(\omega)| = \rho_0 \left[1 - M \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right]$$

که در آن ρ_0 مقاومت ویژه DC، M بارپذیری IP، ω فرکانس زاویه ای، τ ثابت زمانی و $i = \sqrt{-1}$ است.

یک شکل از واهلش که بطور متداول مورد استفاده قرار می گیرد طیف واهلش کول-کول^۳ می باشد (شکل ۱۰) که بنام

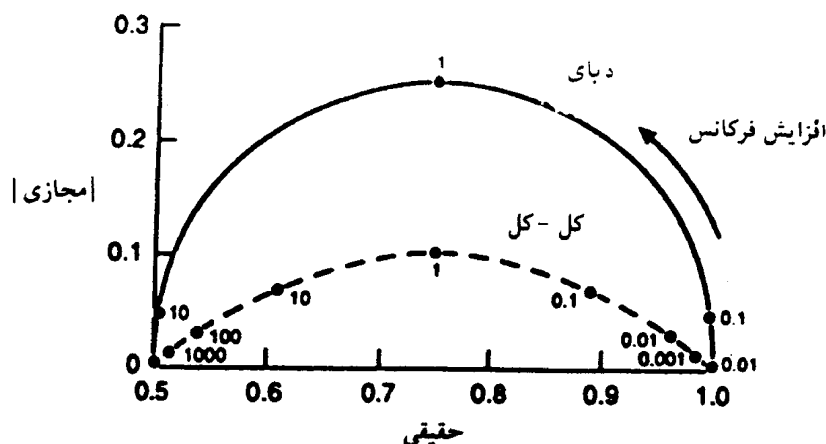
1- relaxation

2- Shuey and Johnson

3- Cole - Cole

بنیان‌گذاران آن به نام کول و کول (۱۹۴۱) نامیده می‌شود. این واهلش می‌تواند توسط فرکانس بحرانی (F_c) که فرکانس ویژه‌ای است که در آن حداکثر انحراف فاز اندازه‌گیری می‌شود مشخص گردد:

$$F_c = [\frac{1}{2\pi\tau} (1 - M)]^{-1/2}$$



شکل ۱۰- طیف واهلش کول - کول برای پاشیدگی دی‌بای و کول - کول با در نظر گرفتن

$$C = \frac{1}{2\pi\tau} \text{ و } \tau = \frac{1}{50} \text{ (پلتون و همکاران، ۱۹۸۳)}$$

که در آن τ ثابت زمانی و M بارپذیری IP می‌باشد.

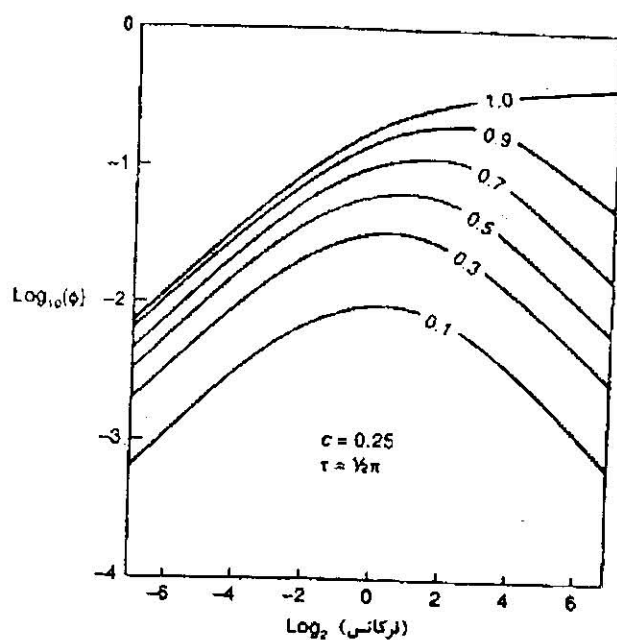
توجه شود که این فرکانس به‌طور کامل از مقاومت ویژه مستقل می‌باشد. زاویه فاز و فرکانس بحرانی با افزایش بارپذیری افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

برازش دو یا تعداد بیشتری از پراکنش کول - کول به طیفهای صحرایی فرآیندی است که وارونگی SIP نامیده می‌شود (سونگ و وزوف^۱، ۱۹۸۵) که وسایلی هستند که به وسیله آنها پارامترهای اصلی دی‌الکتریک به دست می‌آید. بافت کانی‌سازی که توسط اندازه دانه‌ها و توزیع دانه‌بندی ذرات قطبش‌پذیر در داخل هر گروه از دانه‌های کانه مشخص شده اما بستگی کمتر به نوع کانی‌های فلزی موجود دارد، رفتار ثابت زمانی (τ) و نمای فرکانس (C) را دیکته می‌کند. در شرایطی که کانی‌سازی قطبش‌پذیر دانه درشت باشد، زمان واهلش (T) بزرگ بوده و فرکانس بحرانی (F_c) کوچک می‌باشد، (برعکس کانی‌سازی دانه‌ریز). مشابه این امر، کانسار سولفید ماسیو در مقایسه با گرافیت دارای تغییرات زمانی شارژپذیری - واهلش بارز بوده (هالوف و کلین^۲، ۱۹۸۲) و مگنتیت دارای تغییرات زمانی شارژپذیری - واهلش معین در مقایسه با پیروتیت می‌باشد (پلتون و دیگران^۳، ۱۹۷۸) (شکل ۱۲).

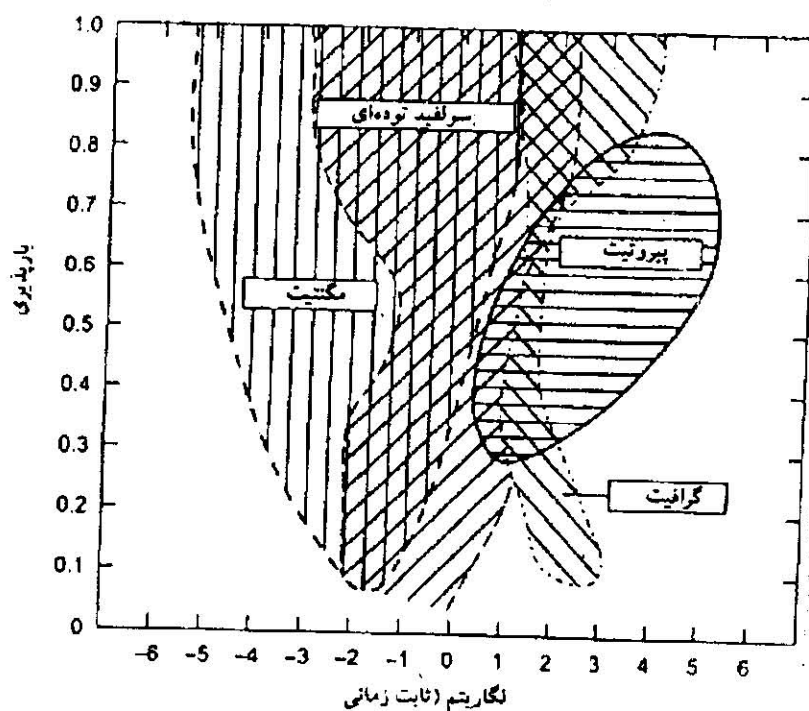
1- Song and Vozoff

2- Hallof and Klein

3- Pelton et al.



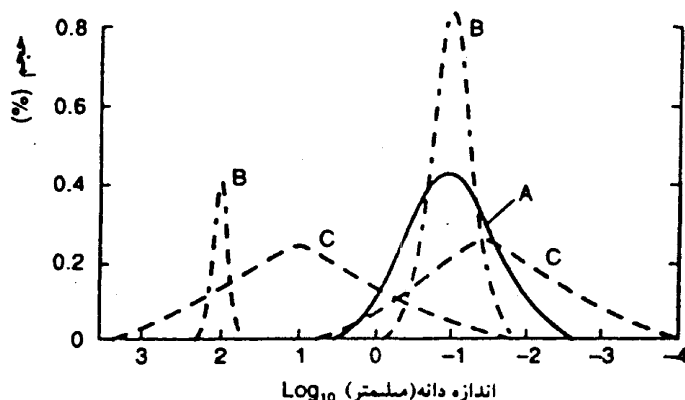
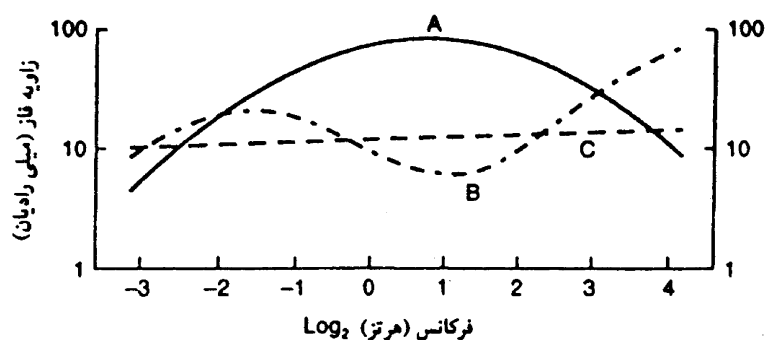
شکل ۱۱- منحنی‌های زاویه فاز برای یک مدل نوعی کول-کول با بارپذیری متفاوت
($M = 0/1-1/0$) (پلتون و همکاران، ۱۹۸۳)



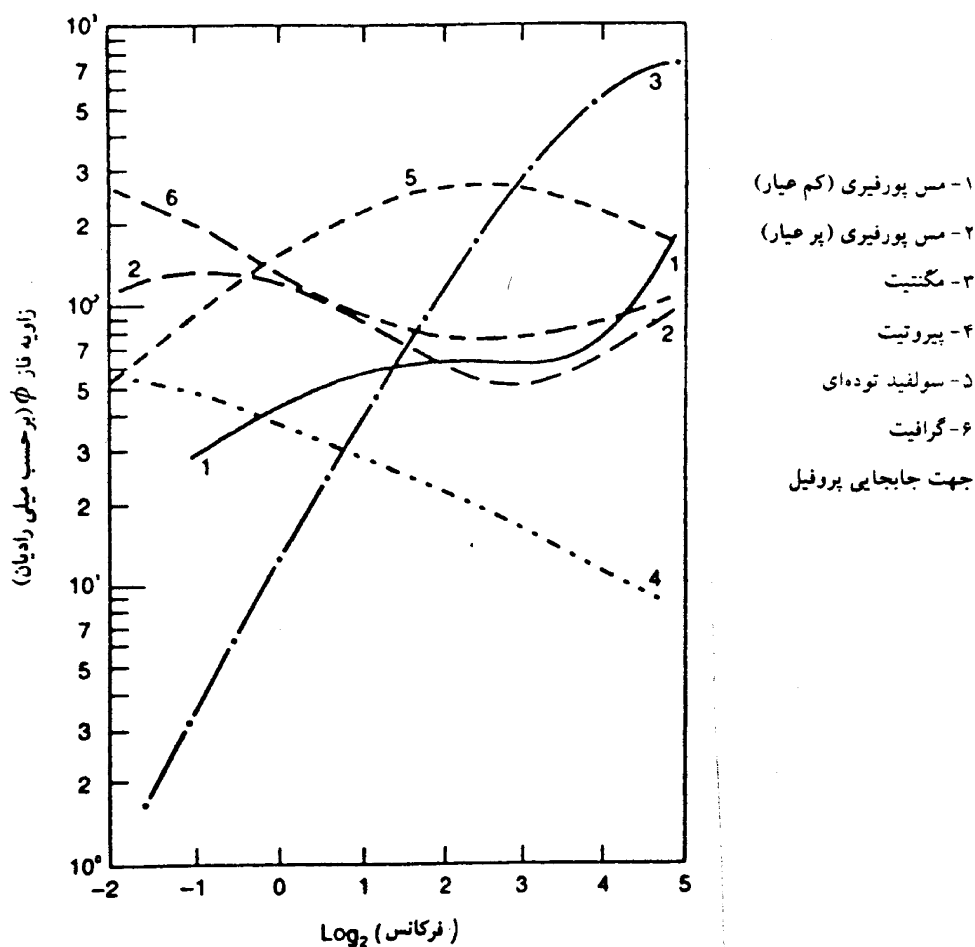
شکل ۱۲- بارپذیری به صورت تابعی از زمان ثابت و اهلهش τ ، نقل از هالوف و کلین، ۱۹۹۲ و پلتون و همکاران، ۱۹۷۸

بیشترین رقم C عبارت از ۰/۵ بوده و برای بیشترین سولفیدهای ماسیو C در گستره بین ۰/۲۵ - ۰/۳۵ است (هالوف، ۱۹۸۳).

مثالهایی از رفتار فاز برای موارد گوناگون با توزیع اندازه دانه بندی مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در جایی که دو توزیع اندازه دانه بندی دارای هم پوشی باشند و یا گستره وسیعی از اندازه دانه ها به طور پیوسته توزیع شده باشد، مقادیر C تا بین ۰/۱ و ۰/۲ افت کرده و منحنی طیفی خیلی تخت خواهد شد. تحلیل کامپیوتری این منحنی های طیفی تخت به تغییرات C و τ غیر حساس بوده و تخمین توزیع اندازه دانه بندی احتمالاً مبهم خواهد شد. طیفهای مربوط به زاویه فاز انواع کانسارها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. اگر داده های بارپذیری بر حسب ثابت زمانی در یک زمین با کانسارهای مختلف هم پوش رسم شوند (مانند مگنتیت و سولفیدهای ماسیو در شکل ۱۲)، در این صورت از طیف زاویه فاز می توان برای تفکیک بین دو نوع کانه استفاده نمود (پلتون و دیگران، ۱۹۷۸). از پارامترهای طیفی IP می توان برای تعیین بافت کانی سازی یک کانسار استفاده نمود و بنابراین می توان زونهای کانی سازی اولیه را که از رگه های کوچک کانه تشکیل شده اند از کانه های افشان شده جدا نمود. در جایی که زونهای طولی از سولفید یا تشکیلات اکسید آهن وجود داشته باشد، IP طیفی می تواند محل افزایش عیار فلز پایه را با تغییرات در بافت طیفی



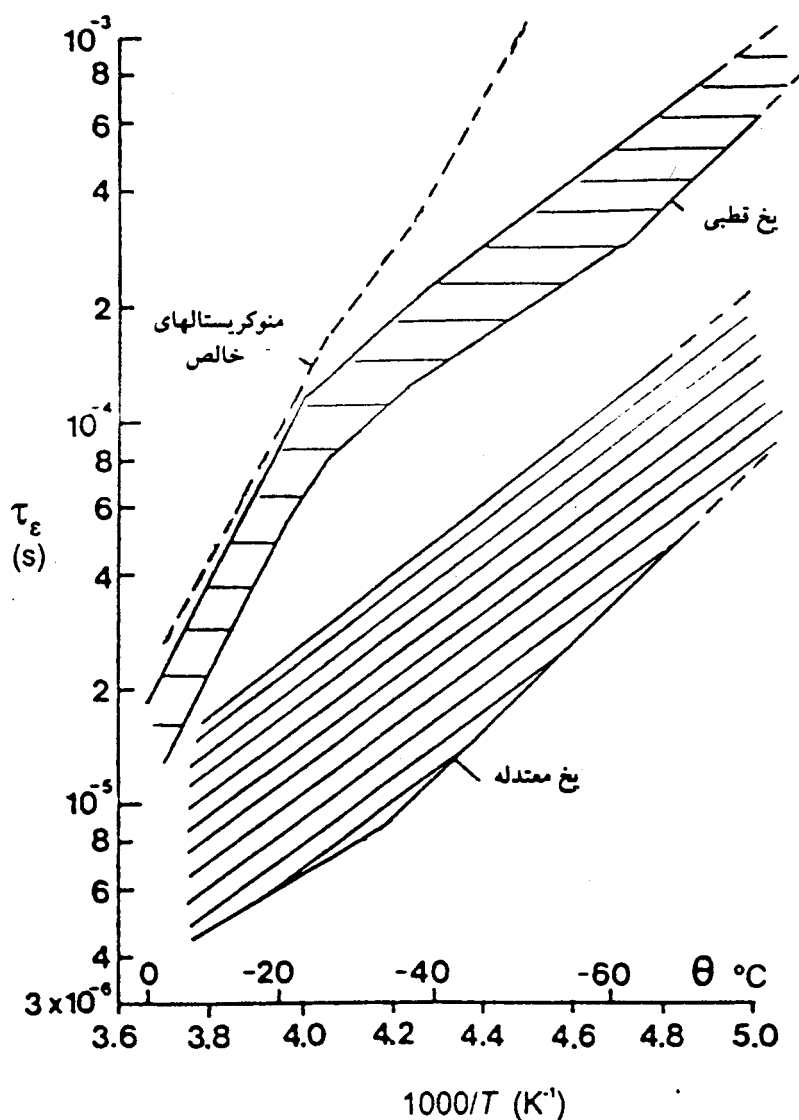
شکل ۱۳ - منحنی هایی از طیف نظری فاز با سه مدل از توزیع اندازه های دانه بندی داده ها از هالوف (۱۹۸۳)



شکل ۱۴- منحنی‌هایی از زاویه فازهای مشخص برای انواع گوناگون کانی‌سازی. داده‌ها از پلتون و دیگران

مشخص نماید. به علاوه تغییرات در بافت و رفتار یک زون پیریتی ممکن است وجود طلا، مس و روی رادر مقایسه با نواحی بکر آن نشان دهد (هالوف، ۱۹۸۳). تفسیر IP طیفی با عدم درک ویژگیهای دی‌الکتریک سنگها محدود می‌شود. رفتار پارامترهای مختلف دی‌الکتریک مانند زمان واهلش ممکن است با شرایط فیزیکی مختلف مانند دما متفاوت باشد. (سنت امان و استرانگوی، ۱۹۷۰ - اجیلوی و کوزمینا، ۱۹۷۲ - رینولدز، ۱۹۸۵).

فرض اینکه پارامترهای دی‌الکتریک هم دما عمل می‌کنند ممکن است منجر به تفسیر نادرست گردد. یک مثال در مورد اینکه این وابستگی دما چه جاهایی دارای امتیاز عملی است به وسیله رینولدز (b ۱۹۸۷ و ۱۹۸۵) ارائه شده است. زمان واهلش برای یخ یخچالی قویاً تابع دما می‌باشد. زمان واهلش یخ یخچالی نواحی معتدله (مثلاً یخ در پیرامون نقطه ذوب) دارای وابستگی دمایی متفاوتی در مقایسه با یخچالهای قطبی می‌باشد (یخ خیلی پایین تر از فشار نقطه ذوب) (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- وابستگی دمایی ثابت زمانی واهلش τ برای یخ یخچالی معتدله و یخ یخچالی قطبی نشان می‌دهد که τ را می‌توان جهت جداکردن رژیمهای دمایی دو نوع یخ به کار برد.

در بعضی از یخچالها که هم در نواحی معتدله و هم در نواحی قطبی وجود دارند بایستی به اهمیت جریان یخچالی و ارزیابی خسارت اشاره نمود که می‌توان از طریق اندازه‌گیری دی‌الکتریک و زمان واهلش نمونه‌های یخ را از همدیگر تفکیک نمود. اندازه‌گیری IP طیفی هنوز بایستی روی یخچالها انجام شود اما اطلاعات به‌دست آمده از نقطه‌نظر یخچال شناختی دارای اهمیت فراوان می‌باشد. IP طیفی همچنین در به نقشه‌درآوردن و تشخیص بین پیکره توده‌های یخی و یخهای بین لایه‌ای در پهنه‌های یخی استفاده دارد.

۴-۳ کاهش نوفه و جفت‌شدگی الکترومغناطیسی

به‌منظور دستیابی به دقت بالای موردنیاز IP طیفی، نوفه و در هم ریختگی الکتریکی پاسخ IP قبل از اقدام به تفسیر

بایستی به حداقل برسد. چهار نوع سیگنال ناخواسته وجود دارد که سه تا از آنها (تغییرات الکترودهای فرستنده جریان، پتانسیل خودزا و جریانهای تلوریک) به عنوان نوفه در کار IP تلقی می‌شوند و سیگنال چهارمی (جفت‌شدگی القایی الکترومغناطیسی) اعوجاجی است که در فرکانسهای بالا اتفاق می‌افتد که می‌بایستی تخمین زده شده و از داده‌ها حذف شود (هالوف و پلتون، ۱۹۸۰ و هالوف، ۱۹۷۴). با استفاده از صافی در درون دستگاه می‌توان مانع سیگنالهای نوفه‌ای گردید. تغییرات الکترودهای جریان به دلیل تعویض جریان الکتریکی و فرکانس جریان به کار برده شده موجب اعوجاجهایی در درون جریان موجی شکل به کار رفته می‌شود. به منظور جبران این پدیده یک وسیله چند کاناله برای اندازه‌گیری ولتاژ به کار برده می‌شود. تا ۶ جفت از الکترودهای پتانسیل جهت اندازه‌گیری همزمان ولتاژ به کار برده می‌شود و شکل موجی هر جفت به‌طور مستقیم با جریان به کار برده شده مقایسه می‌شود، تا اینکه بزرگی دقیق و فاز مربوط به سیگنال موجی شکل را بتوان از هریک از ۶ کانال به‌دست آورد. مسئله‌سازترین تأثیر مربوط به جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بوده که به‌ویژه در فاصله زیاد الکترودهای فرکانسهای بالاتر اتفاق می‌افتد. بالاترین فرکانسهای مورد استفاده در کار IP با پایین‌ترین فرکانسهای مورد استفاده در روشهای اکتشاف الکترومغناطیسی دارای هم‌پوشی بوده که در آنها القا دارای اهمیت می‌شود. هر سیم حامل جریان در مجاورت و موازات سیم دیگر قرار گرفته باشد، جریانی در درون سیم دوم القاء خواهد شد، مانند آنچه که در مجاورت شبکه کابلهای نیرو اتفاق می‌افتد. اگر این القاء در سیمهای مرتبط با الکترودهای پتانسیل اتفاق افتد ولتاژ کاذب اندازه‌گیری خواهد شد. بهترین حالت این است که کابلهای حامل جریان به قدر کافی از کابلهای پتانسیل دور نگهداشته شوند و یا جهت اطمینان دو نوع کابل همدیگر را به صورت زاویه قائمه قطع کنند. علاوه بر این، کابلهای حامل جریان می‌توانند جریانی را در درون زمین القاء کنند که منجر به اعوجاج پاسخ IP شود. خوشبختانه، بستگی فرکانسی مربوط به جفت‌شدگی الکترومغناطیسی به‌طور قابل تشخیص از پاسخ IP متفاوت بوده و اگر فرکانسهای به کار برده شده به قدر کافی زیاد باشند، اثر جفت‌شدگی را می‌توان اندازه‌گیری نمود و بعداً برای گستره تمام فرکانسها تعیین نموده و از داده‌ها حذف کرد. (هوهمان، ۱۹۷۳، وین و زونگ، ۱۹۷۵، سامنر، ۱۹۷۶ و راتر، ۱۹۷۷، پلتون و دیگران، ۱۹۷۸، هالوف ۱۹۸۳)^۱ معلوم شده است که خط لوله‌ها نیز در مطالعات IP ایجاد نوفه می‌کنند (پارا، ۱۹۸۴)^۲

۴- برداشتهای صحرائی

در مطالعات IP می‌توان از کلیه آرایه‌های مقاومت ویژه استفاده کرد. ولی آرایه‌های متداول در این مطالعات عبارتند از: آرایه دو قطبی - دو قطبی، شلومبرژه، سه قطبی و مستطیل که در زیر شرح داده خواهند شد.

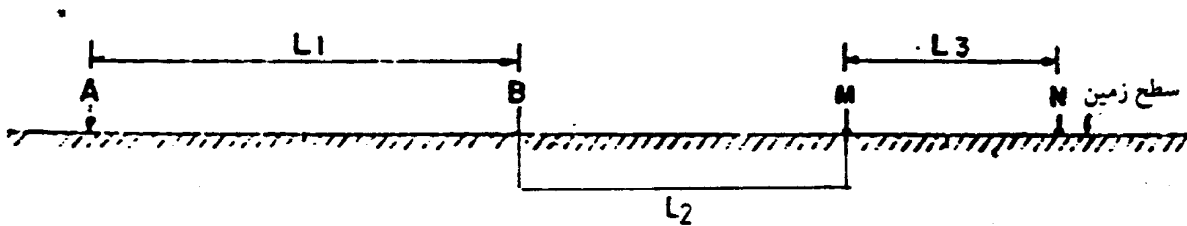
1- Hohmann, 1973, Whnn and Zonge, 1975, Sumner, 1976, Rathor, 1977, Pelton et al., 1978, Hallof, 1983

2- Parra

۱-۴ آرایه دو قطبی - دو قطبی^۱

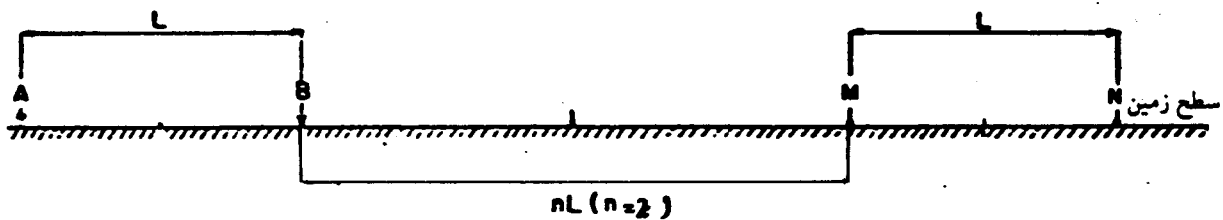
در این آرایه الکترودهای A و B فرستنده جریان و الکترودهای M و N (پتانسیل) در یک ردیف روی یک خط قرار دارند (شکل ۱۶).

این آرایه مطابق شکل زیر توسط طولهای $AB = L_1$ و $BM = L_2$ و $MN = L_3$ مشخص می شود.



شکل ۱۶- آرایه دو قطبی - دو قطبی در حالت کلی

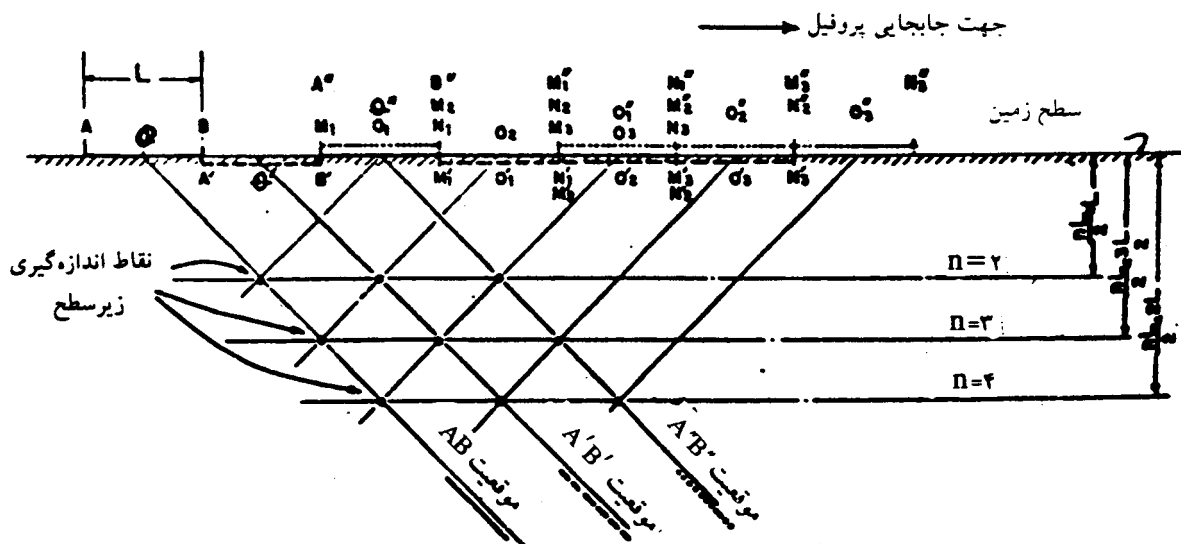
عملاً برای این آرایه از نسبتهای $L_1 = L_3 = L$ و $L_2 = nL$ استفاده می کنند. در اینجا n عدد درستی است که عمق تجسس را مشخص می کند (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- آرایه دو قطبی - دو قطبی متداول

نقطه اندازه گیری روی مرکز BM در نظر گرفته می شود. عمق تجسس با اضافه شدن n افزایش می یابد یعنی با افزایش طول BM.

می‌توان پروفیلها یا مقاطع قطبش را برای یک عمق تجسس ثابت با جابجایی مجموع چهار قطبی AB-MN به اندازه یک فاصله ثابت که معمولاً برابر L می‌باشد، انجام داد. اما اغلب مقاطع قطبش القایی (IP) برای چندین عمق تجسس انجام می‌پذیرد که به ترتیب زیر عمل اندازه‌گیری انجام می‌شود (شکل ۱۸):



شکل ۱۸ - جابجایی دو قطبی - دو قطبی برای اندازه‌گیری در عمقهای مختلف (nL برابر فاصله مرکز AB تا MN در نظر گرفته شده است).

- برای یک وضعیت ثابت AB چندین اندازه‌گیری با جابجایی الکترودهای M و N روی پروفیل با یک فاصله L انجام می‌شود، ایستگاه M_1N_1 , M_2N_2 , $(n=1)$, M_3N_3 , $(n=2)$, M_4N_4 , $(n=3)$ و غیره.
- پس از آن AB با یک جابجایی به اندازه L به وضعیت $A'B'$ می‌رسد و اندازه‌گیریها بین $M'_1N'_1$, $M'_2N'_2$ و غیره انجام می‌پذیرد.
- به همین ترتیب جابجایی الکترودهای فرستنده در $A''B''$ و اندازه‌گیریها بین $M''_1N''_1$ و $M''_2N''_2$ و غیره ادامه پیدا می‌کند.
- بطور تقریب می‌توان هر نقطه اندازه‌گیری واقع در زیر سطح را از تقاطع خطوطی که از نقاط O (وسط AB) و O_1 (وسط M_1N_1) با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد آرایش رسم می‌شوند، بدست آورد (شکل ۱۸).

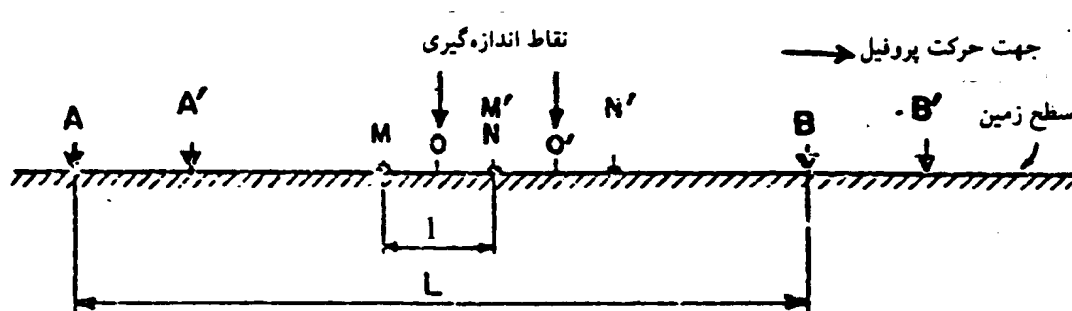
چنانکه مشاهده می‌شود با دور شدن MN مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به لایه‌ها عمیق‌تر می‌شوند. (بطور تقریب عمق برابر $\frac{nL}{4}$ است). پس از اندازه‌گیری روی یک منطقه می‌توان با استفاده از مقادیر M (بارپذیری)، نقشه‌های هم شدت M را بدست آورد. به همین ترتیب در کنار این مطالعات می‌توان نقشه‌های مقاومت ویژه را نیز با استفاده از مقادیر ρ_a بدست آورد. البته طرح اندازه عمق تجسس به این ترتیب ساده کردن مسئله است زیرا چنانکه می‌دانیم این

عمق فقط وابسته به فاصله الکترودها نبوده بلکه به اختلاف مقاومت ویژه لایه‌ها نیز بستگی دارد. بنابراین شمای ارائه شده در شکل ۱۸ نمی‌تواند به عنوان یک مقطع عمق در نظر گرفته شود.

آرایه دو قطبی - دو قطبی موجب بدست آمدن یک ΔV نسبتاً ضعیف می‌شود و در اغلب اوقات در تکنیک فرکانس حوزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این آرایه به علت جدایی کامل خطوط AB و MN در کاهش آثار القایی نوفه‌ای تأثیر بسزایی دارد.

۲-۴ آرایه چهار قطبی متقارن (آرایه شلومبرژه)

الکترودهای گیرنده M و N و الکترودهای فرستنده A و B در یک ردیف قرار دارند و دارای مرکز مشترکی مانند O هستند. MN بین AB واقع شده است (شکل ۱۹).

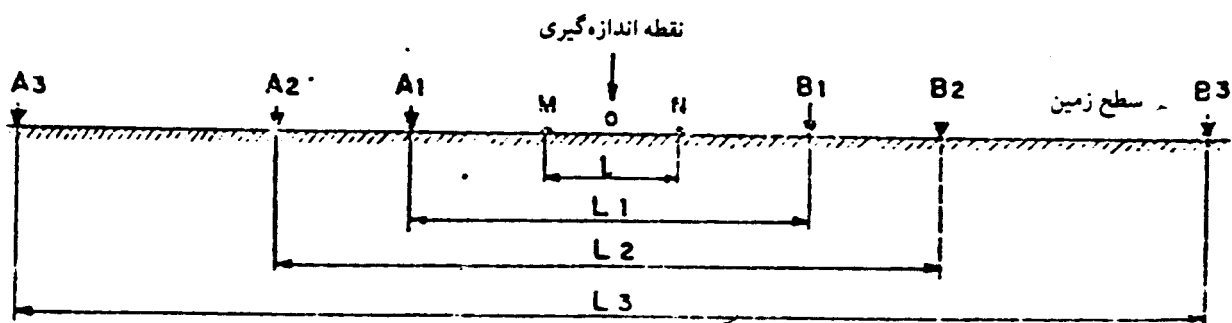


شکل ۱۹- آرایه چهار قطبی متقارن

این آرایه در واقع همان آرایه شلومبرژه می‌باشد که می‌تواند در این مطالعات مورد استفاده قرار بگیرد. چنانکه می‌دانیم در حالت عادی، عمق تجسس با افزایش طول خط فرستنده ($AB = L$) زیاد می‌شود.

برای انجام یک مقطع یا پروفیل، بعد از هر اندازه‌گیری مجموع چهار قطبی AMNB به اندازه فاصله‌ای که اغلب برابر l (فاصله MN) می‌باشد، جابجا می‌شود. می‌توان پروفیل‌های مختلفی را برای چندین عمق تجسس با استفاده از خطوط فرستنده L_1 و L_2 و L_3 و غیره بدست آورد (شکل ۲۰).

چون جابجا کردن همزمان همه الکترودها روی زمین بخصوص اگر توپوگرافی شدید باشد، مشکل است و از راندمان عملیات صحرائی می‌کاهد معمولاً با ثابت نگهداشتن MN فواصل AB را زیاد می‌کنند یعنی ترتیبی که در مطالعات سونداژهای الکتریکی پیاده می‌شود.



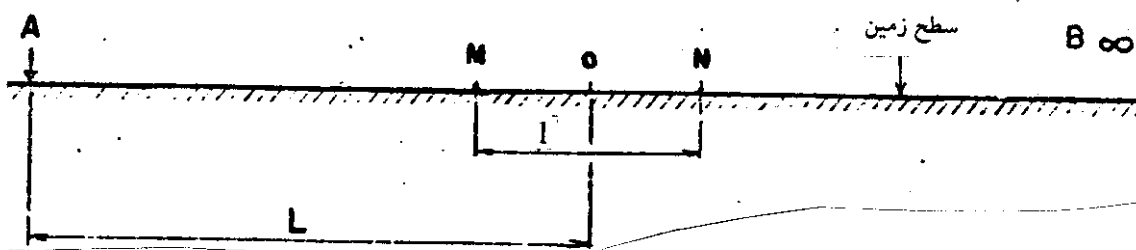
شکل ۲۰- آرایه چهارقطبی متقارن با فواصل الکترودهای فرستنده مختلف

همزمان با این مطالعات (IP) مقادیر مقاومت ویژه ظاهری را نیز بدست می آورند و می توان نتایج حاصل را به توسط پروفیل یا نقشه ارائه کرد.

۳-۴ آرایه سه قطبی (قطبی - دو قطبی)

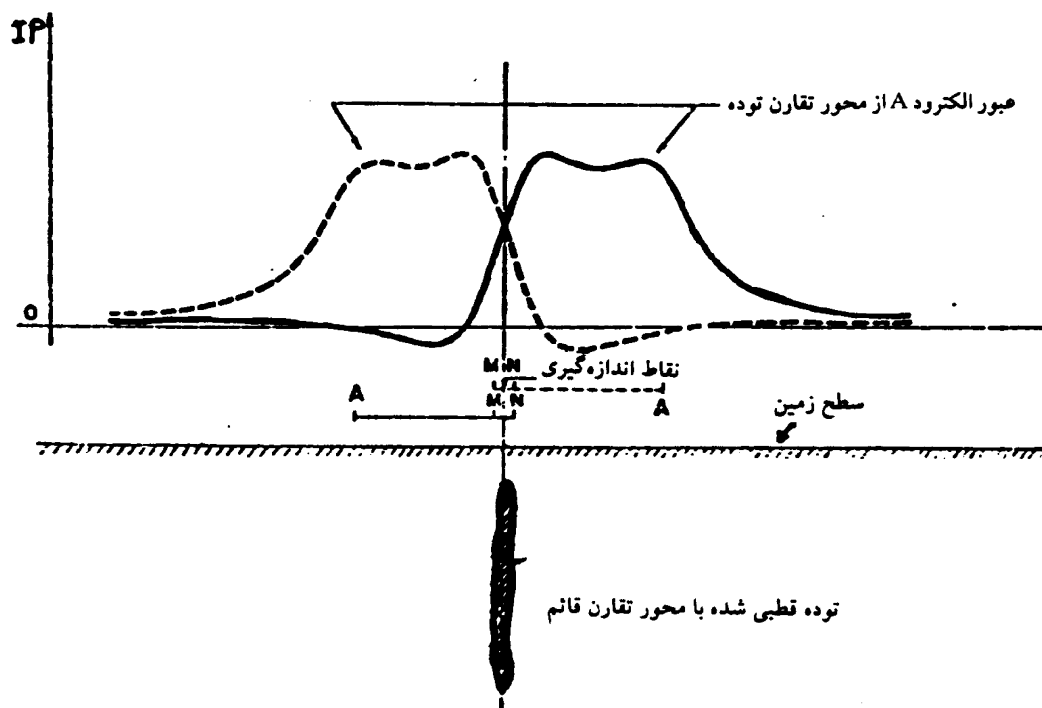
آرایه سه قطبی تشکیل شده از سه الکتروود متحرک A، M و N و الکتروود ثابت B که در یک نقطه ثابت به فاصله زیاد از سه الکتروود متحرک واقع شده است. در اینحال اندازه گیری بین M و N فقط بستگی به جریان فرستنده الکتروود A دارد. این آرایه به توسط طول $L = OA$ و $l = MN$ مشخص می شود و اغلب از نسبتهای $\frac{L}{l} = \frac{3}{4}$ و $\frac{5}{4}$ و $\frac{7}{4}$ استفاده می شود (شکل ۲۱).

پس از هر اندازه گیری، سه قطبی به اندازه ای که اغلب برابر l می باشد، جابجا می شود. عمق تجسس با افزایش طول L زیادتر می شود و به این ترتیب می توان پروفیلهایی با چندین عمق تجسس با استفاده از الکترودهای مختلف A_1 و A_2 و A_3 که در فواصل L_1 و L_2 و L_3 از مرکز MN قرار دارند، تهیه کرد.

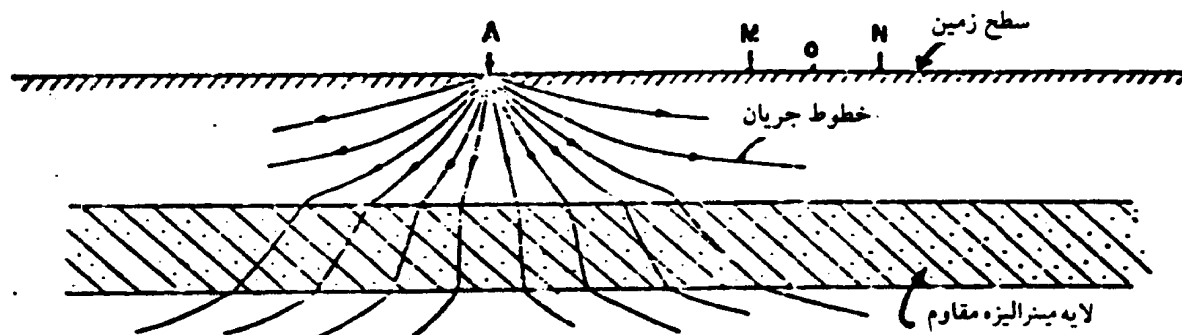


شکل ۲۱- آرایه سه قطبی

اگر محل اندازه‌گیری نقطه O واقع در وسط MN در نظر گرفته شود آنومالی IP مربوطه متقارن نخواهد بود، حتی اگر دارای توده قابل قطبی شدن با محور یا صفحه تقارن باشیم. علاوه بر این ماکزیمم یا ماکزیممهای آنومالی نسبت به محور قائم ساختار دارای جابجایی خواهد بود (شکل ۲۲). برای اینکه بتوان یک تطابق تقریبی بین نقطه ماکزیمم آنومالی و جسم قابل قطبی شدن که به دنبال آن هستیم، بدست آورد، عده‌ای ترجیح می‌دهند که اندازه‌گیری را در مرکز AB یا AN انجام دهند. مزیت آرایه سه قطبی در آن است که در طول یک پروفیل فقط سه الکتروود جابجا می‌شود. علاوه بر آن چون MN همیشه نزدیک A قرار دارد سیگنال ΔV_{IP} بزرگ می‌باشد که امکان انجام اندازه‌گیریهای دقیق را فراهم می‌سازد. از دیگر مزایای این آرایه آن است که سبب قطبش خوبی در نزدیکی الکتروود A برای مینرالهایی که در یک لایه مقاوم تقریباً افقی قرار دارند، می‌شود (شکل ۲۳).



شکل ۲۲- پاسخ آرایه سه قطبی در مقابل یک توده متقارن



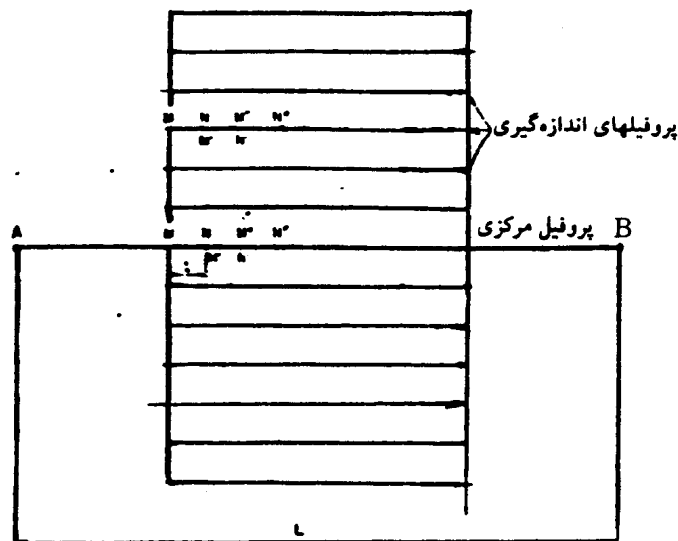
شکل ۲۳- استفاده از سه قطبی برای مطالعه لایه‌های مینرالیزه مقاوم

از معایب این آرایه مشخص نکردن کامل وضعیت توده‌های مینرالیزه است که در این موارد می‌توان از آباکهای تئوری و یا توسط عوض کردن محل الکترودهای A و MN (تغییر سمت) استفاده کرد.

۴-۴ آرایه مستطیل

آرایه «مستطیل AB» عبارتست از پیاده‌کردن یک خط فرستنده ثابت $AB = L$ و انجام اندازه‌گیریها بین الکترودهای M و N که در روی پروفیل‌های موازی با AB جابجا می‌شوند (شکل ۲۴). جابجایی اغلب برابر طول $MN = l$ می‌باشد که فاصله l با توجه به ابعاد توده‌های مینرالیزه مورد مطالعه انتخاب می‌شود.

اندازه‌گیریهای IP و مقاومت ویژه همیشه در مرکز MN قرار دارند. عمق تجسس با طول $AB = L$ در ارتباط است و همیشه می‌توان چندین پروفیل AB را با افزایش طول آن برای عمقهای مختلف بدست آورد. عموماً ایستگاههای اندازه‌گیری در داخل یک مستطیل که مرکز آن O، منطبق بر وسط AB است و ضلع کوچک مستطیل از $\frac{AB}{4}$ یا $\frac{AB}{3}$ بیشتر نیست، واقع شده‌اند.

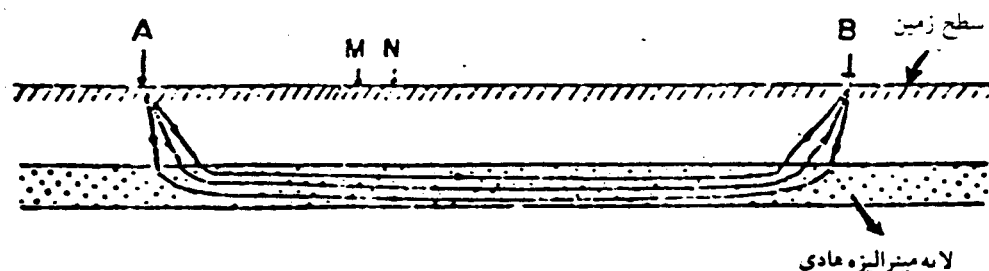


شکل ۲۴- آرایه مستطیل

زمانی که طول AB پوشانده شد (از نظر اندازه‌گیری)، برای اندازه‌گیری یک زون جدید خط جریان AB جابجا می‌شود.

«پروفیل AB» حالت خاصی از مستطیل AB است که در آن الکترودهای M و N روی پروفیل مرکزی AB باقی می‌مانند. آرایه به روش مستطیل AB دارای یک مزیت مهم روی زمین می‌باشد، و آن این است که مافقط یک جفت الکتروود M و N را جابجا می‌کنیم.

این موضوع باعث افزایش سرعت عملیات می‌شود، بعلاوه شدت جریان براحتی می‌تواند ثابت نگهداشته شود. برعکس در اینجا از خطوط جریان AB نسبتاً بزرگ استفاده می‌شود، تا زون مورد مطالعه دارای محدودیت نباشد و نهایتاً پروفیلها کوتاه و ایستگاههای اندازه‌گیری نزدیک بهم نگردند. این موضوع سبب می‌شود تا نسبت $\frac{L}{l}$ بزرگ گشته و سیگنال ΔV_{IP} کوچک گردد، که برای اندازه‌گیریهای دقیق محتاج به یک گروه فرستنده قوی و یک دستگاه گیرنده حساس هستیم.



شکل ۲۵- استفاده از آرایه «مستطیل AB» برای لایه‌های میزرالیزه هادی

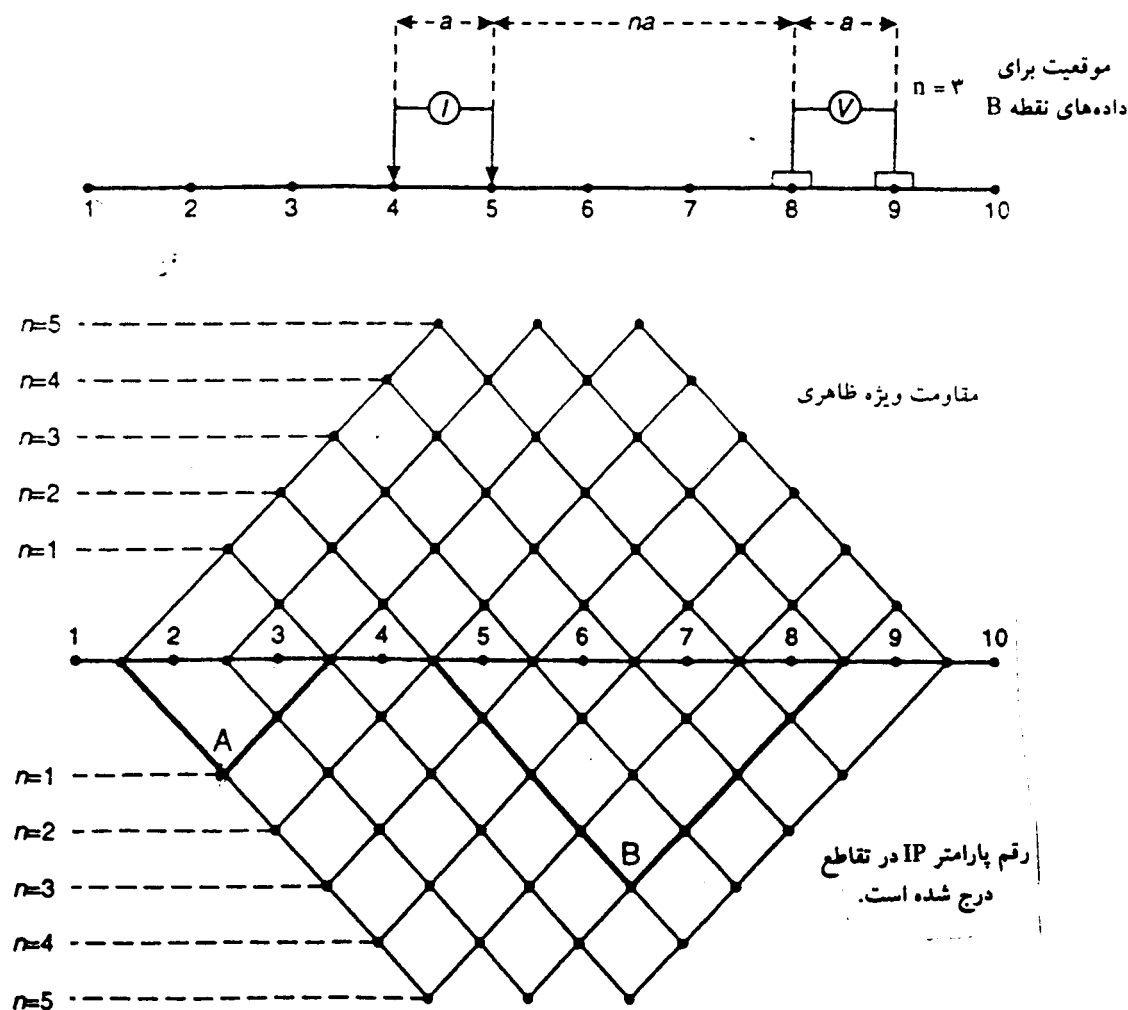
آرایه «مستطیل AB» برای مسائلی که احتیاج به خطوط کوچک AB ندارند دارای مزیت می‌باشند که در زیر دو مثال از کاربرد این آرایه ذکر می‌شود:

- کانی‌سازیه‌های رگه‌ای تقریباً قائم که تا عمق زیادی در داخل پوسته زمین ادامه داشتند. در این حال یک خط AB که عمود بر امتداد کانسار قرار می‌گیرد امکان قطبی کردن صحیح کانسار را فراهم می‌سازد. این قطبش حتی اگر طول AB بزرگ باشد بخوبی انجام می‌گیرد، زیرا خطوط جریان باید اجباراً از این کانسار بگذرند.
- کانی‌سازی در یک لایه تقریباً افقی هادی قرار دارد. در این حالت مطابق شکل ۲۵ خطوط نسبتاً طویل AB ایجاد یک دانسته جریان قوی در داخل لایه هادی می‌کنند که باعث قطبش خوب میزراه‌های موجود در لایه می‌شود. این وضعیت در شرایطی می‌تواند در مورد لایه‌های آبدار خیلی نیز بوجود آید.

۵- شکلهای نمایش داده‌های IP

داده‌های مربوط به قطبش القایی برای فاصله الکترودی معین، به‌ویژه وقتی که به‌صورت زمان حوزه‌ای اندازه‌گیری می‌شود، معمولاً به‌صورت پروفیل‌های ساده و نقشه‌های بارپذیری پیاده می‌شوند. عامل فلزی یا اثر درصد فرکانس در روشهای فرکانس حوزه‌ای وقتی که داده‌ها به‌صورت شبه مقطع پیاده شوند مفیدتر خواهد بود (شکل ۲۶).

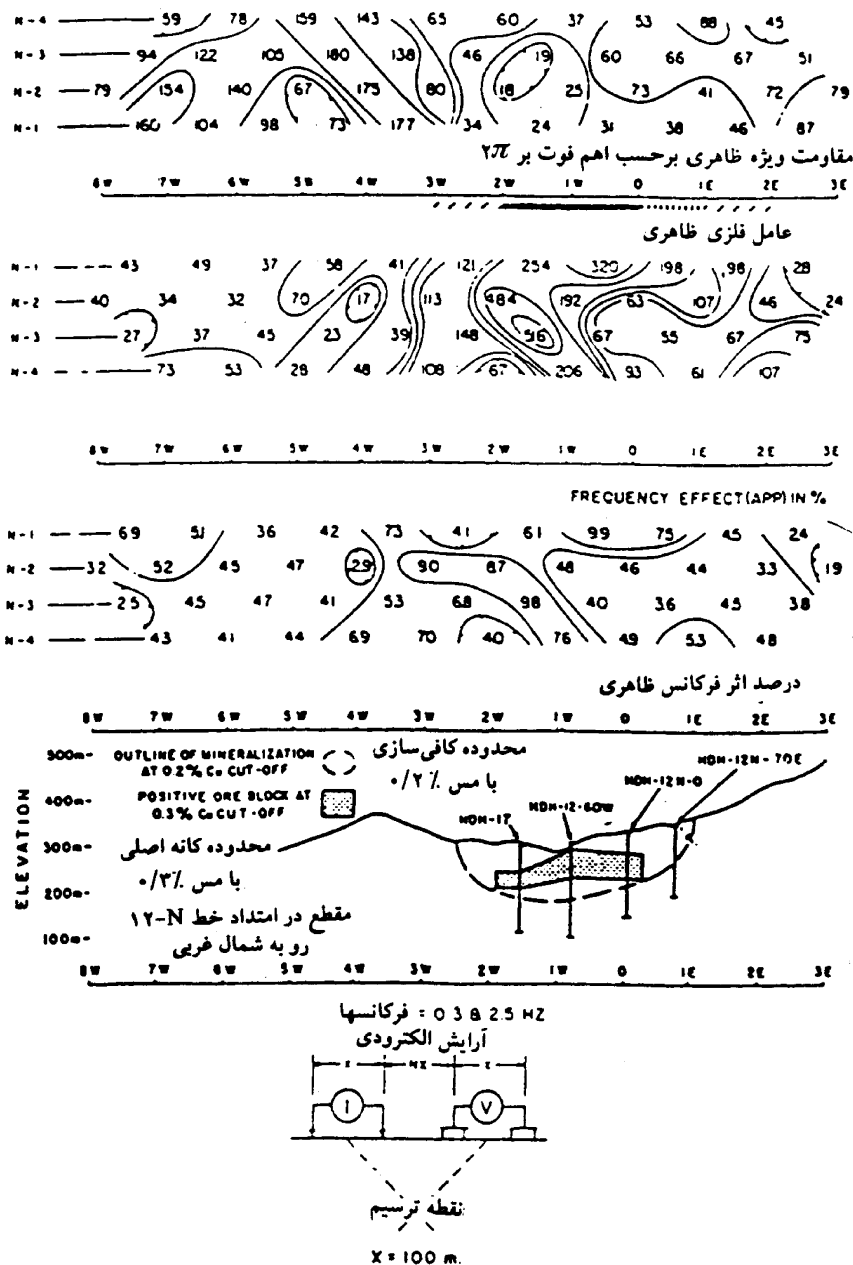
توجه شود که فاصله نقاط داده‌ها بستگی به رقم صحیح n در آرایه دو قطبی - دو قطبی داشته و به‌طول واقعی دو قطبی بستگی ندارد، به‌هر صورت افزایش عمق نفوذ در ارقام زیادتر n به‌صورت ضمنی بوده و به‌عنوان راهنما، عمق تقریبی نقطه‌های اندازه‌گیری برابر $\frac{(n+1)a}{2}$ می‌باشد، بعنوان مثال برای $n = 1$ برابر a است و برای $n = 3$ برابر $2a$ است که در آن a طول دو قطبی می‌باشد. هریک از داده‌ها در تقاطع دو خط ترسیم شده با زاویه 45° از نقطه وسط هر دو قطبی رسم شده است.



شکل ۲۶- یک شبه مقطع را چگونه می توان رسم کرد. برای یک آرایه دو قطبی - دو قطبی با الکترودهای فرستنده جریان و پتانسیل به ترتیب ۱-۲ و ۳-۴ ($n=1$)، نقطه اندازه گیری در نقطه A قرار گرفته است، برای دو قطبی های ۴-۵ و ۸-۹ ($n=3$)، در نقطه B آورده شده است.

دو وضعیت در شکل ۲۶ مشخص شده است برای $n=1$ و دو قطبی های ۱-۲ و ۳-۴ ارقام داده های اندازه گیری شده در نقطه A پیاده شده، برای $n=3$ و دو قطبی های ۴-۵ و ۸-۹ وضعیت در B قرار دارد. ترسیم شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری معمولاً در عکس جهت و بالای ارقام IP رسم می شوند. تصویر سطحی زونهای دارای بی هنجاریهای IP را می توان با توجه به اهمیت آنها به صورت خطوط پیوسته، خط چین و خط چین مورب در بالای شبه مقطع به منظور تعیین موقعیت کانی سازی قطعی، محتمل و ممکن ترسیم نمود (شکل ۲۷).

تفسیر چنین نمایشهایی، در قیاس با دست آوردهای مدل های نظری و یا تجربی مقیاس دار، کیفی می باشد. در شکل ۲۸ مثالهایی از مقاومت ویژه ظاهری، عامل فلزی و اثر فرکانس برای دو مدل داده شده است. در هر دو حالت طرح واره های هر سه پارامتر IP حول وضعیت مرکزی متقارن بوده و طرح واره یک V برگشته را ایجاد می کند.

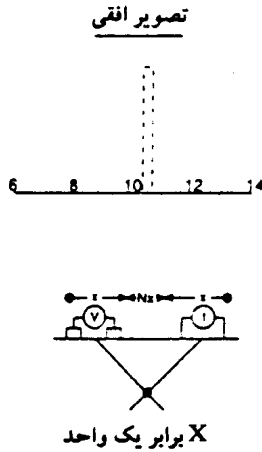


شکل ۲۷- پروفیل‌های مقاومت ویژه، عامل فلزی و اثر فرکانس روی معدن هینوبان که در نمودار پایین مقطع زمین‌شناسی آن بطور طرح‌وار نشان داده شده است. از طول دو قطبی ۱۰۰ متر و فرکانسهای ۰/۳ و ۲/۵ HZ استفاده شده است.

داده‌های مقاومت ویژه ظاهری بر روی بلوک مستطیل شکل افقی، دو زون «کم مقدار» مربوط به اثرهای دو سر بلوک را نشان می‌دهد. همچنین زون «پرمقدار» بی‌هنجاری لوزی شکل در عامل فلزی ظاهری در بالای مدل بلوک قابل توجه است.

از این دو مجموعه داده‌ها اثر فرکانس ظاهری نسبت به مدل کمتر حساس است و نسبت به عامل فلزی ظاهری کمتر قابل تشخیص می‌باشد.

(الف)



	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
($\rho/2w$) ₀												
N-1	10	10	10	99	93	99	10	10	10			
N-2	10	10	10	97	91	91	97	10	10	10		
N-3	10	10	10	97	92	92	97	10	10	10		
N-4	10	10	10	96	93	93	93	93	96	10	10	10

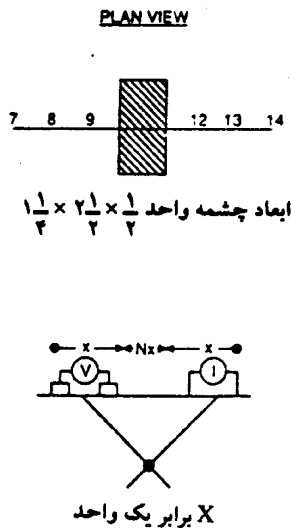
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
(F_0) ₀												
N-1	0	0	-03	0	35	0	-03	0	0			
N-2	0	0	-08	0	36	36	0	-08	0	0		
N-3	0	0	-08	05	45	45	46	05	-08	0	0	
N-4	0	0	-07	08	42	51	51	42	07	-07	0	0

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
(M) ₀												
N-1	0	0	-30	0	376	0	-30	0	0			
N-2	0	0	-79	0	417	417	0	-79	0	0		
N-3	0	0	-79	52	490	490	52	-79	0	0		
N-4	0	0	-70	83	462	546	555	462	76	-71	0	0

$(\rho/2w)_1 = 10$
 $(M)_1 = 0$
 $(\rho/2w)_2 = 241$
 $(M)_2 = 22800$
 $(F_0)_2 = 55\%$

عمق چشمه ۴ واحد

(ب)



	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
($\rho/2w$) ₀												
N-1	250	250	250	235	232	235	250	250	250			
N-2	250	252	251	219	214	214	219	252	252	250		
N-3	250	254	250	210	218	242	219	210	250	254	250	
N-4	250	234	250	207	223	258	258	224	207	250	254	250

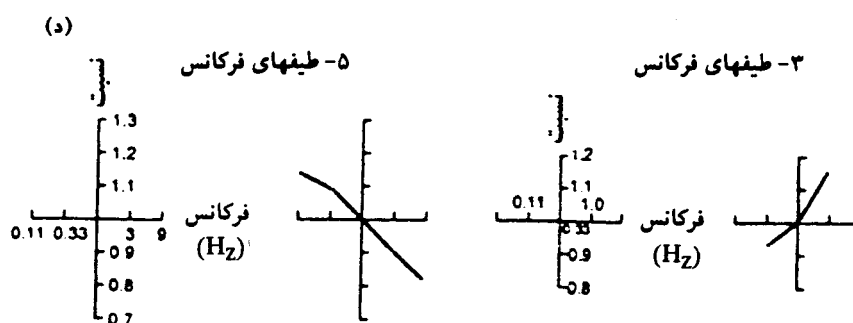
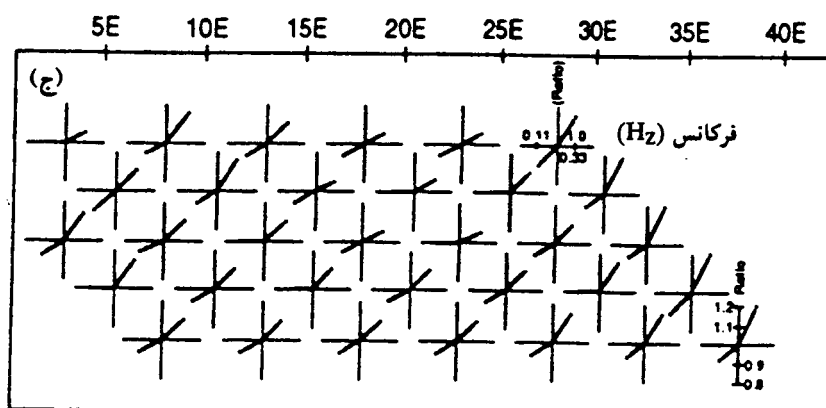
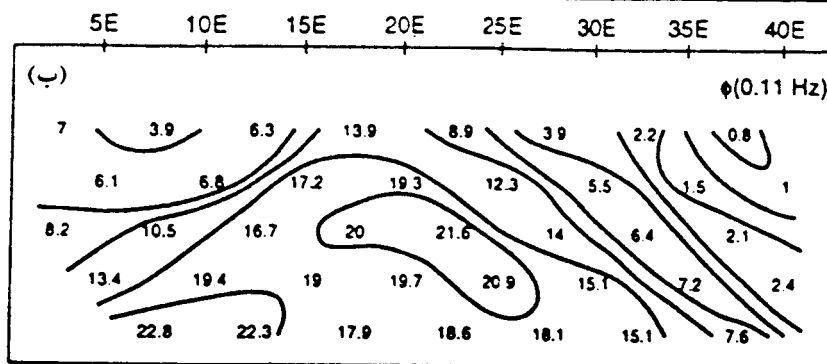
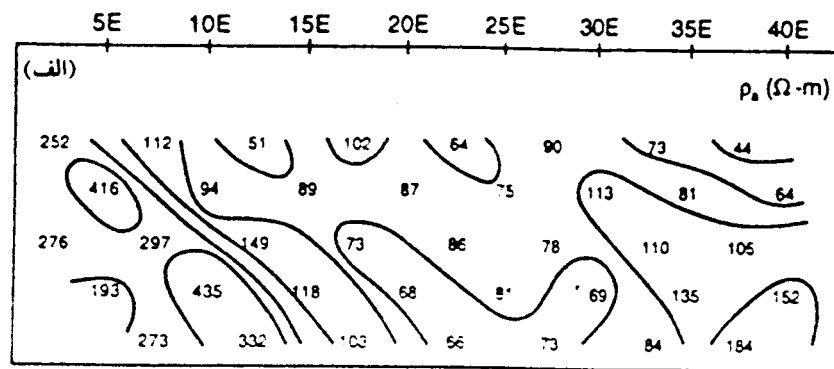
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
(F_0) ₀												
N-1	0	0	0	02	02	02	0	0	0			
N-2	0	0	0	04	08	08	04	0	0	0		
N-3	0	0	0	03	05	02	05	03	0	0	0	
N-4	0	0	0	06	02	0	0	02	06	0	0	0

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
(M) ₀												
N-1	0	0	0	09	09	09	0	0	0			
N-2	0	0	0	18	37	37	18	0	0	0		
N-3	0	0	0	14	23	04	23	14	0	0	0	
N-4	0	0	0	29	09	0	0	09	29	0	0	0

$(\rho/2w)_1 = 250$
 $(M)_1 = 0$
 $(\rho/2w)_2 = 0$
 $(M)_2 = 1250$
 $(F_0)_2 = 125\%$

$d = 1 \text{ UNIT}$

شکل ۲۸- دو مدل تجربی برای نمایش مقاومت ویژه ظاهری، اثر فرکانس و عامل فلزی بر روی (الف) یک منشور قائم باریک و (ب) یک بلوک مستطیلی افقی.

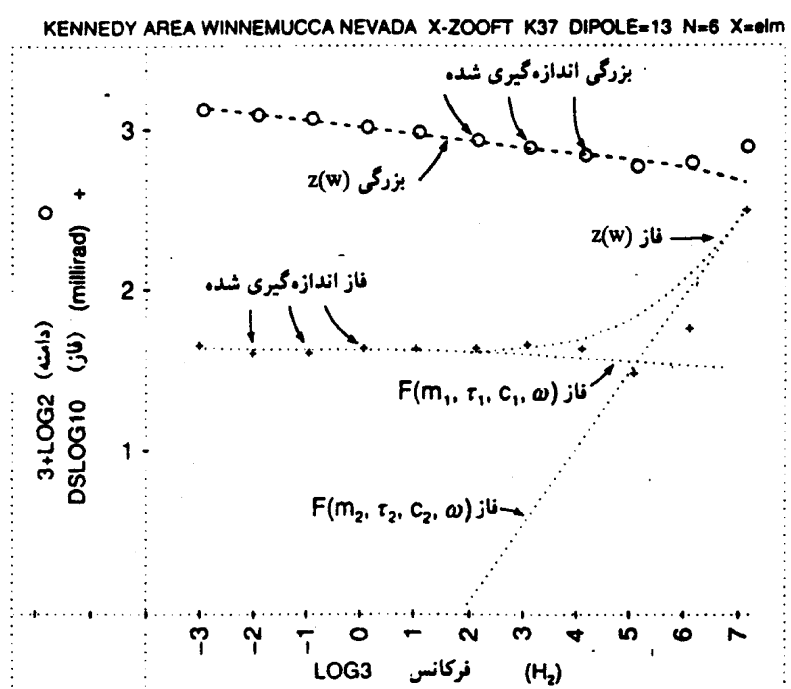


شکل ۲۹- سه شکل نمایشی شبه مقطع از طیف داده‌های IP (الف) مقاومت ویژه ظاهری در یک هرتز (ب) زاویه فاز در ۰/۱۱ هرتز و (ج) نسبت پارامترهای طیفی در سه فرکانس و (د) شرح کامل هر نقطه رسم شده و نشان می‌دهد که اطلاعات نسبت به مقدار فرکانس میانی که اغلب در ۱/۱ بر روی نمودارها (جایی که دو محور همدیگر را قطع نموده‌اند) رسم شده است بهنجار شده‌اند.

دیگر شکل نمایشی به کاربردن طیف سه فرکانسی است که بر روی شکل اصلاح شده یک شبه مقطع رسم می شود (شکل ۲۹). پارامترهای طیف IP که تا پنج فرکانس اندازه گیری شده مثلاً برای ۰/۱۱، ۰/۳۳، ۱/۰، ۳/۰ و ۹/۰ هرتز خلاصه شده از تمامی طیف فرکانس بوده و نسبت به مقدار فرکانس میانی (۱/۰ = نسبت) بهنجار شده به عبارت دیگر پارامترها برای پنج فرکانس نسبت به مقدار یک هرتز و برای سه فرکانس (بین ۰/۱۱ تا یک هرتز) نسبت به رقم ۰/۳۳ هرتز بهنجار شده اند، آنگاه مقادیر بهنجار شده در مقابل فرکانس رسم شده اند (هالوف و پلتون ۱۹۸۱، هالوف ۱۹۸۲) (شکل ۲۹-د).

شکل نمودار در هر وضعیت ترسیمی می تواند به گونه کاو به سوی بالا و کاو به سوی پایین دسته بندی، (فراسر و همکاران ۱۹۶۴) یا در قالبی ویژه و شناختنی بر پایه شیب نمودار گروه بندی شود (زونگ و وین ۱۹۷۵، هالوف و پلتون ۱۹۸۱).

پیشرفت اساسی هر نمایش و تفسیر طیف IP در مدل سازی رایانه ای از مقادیر اندازه گیری شده بزرگی و فاز بر حسب مدل های واهلش کول کول می باشد. چنین برنامه هایی اجازه شناسایی و حذف بعدی جفت شدگی القایی طیف را میسر می سازد، در چنین حالتی چهار پارامتر کلیدی IP (C و τ , M , ρ) که پاسخ IP را تعریف می کنند می تواند به گونه ای دقیق تعیین شود. یک مثال از نمودار دامنه - فاز مربوط به طیف IP در شکل ۳۰ داده شده است. در این شکل می توان دید که در فرکانسهای پایین جفت شدگی القایی دارای اثر کمی می باشد، در حالیکه در فرکانسهای بالا این اثر غالب می شود.

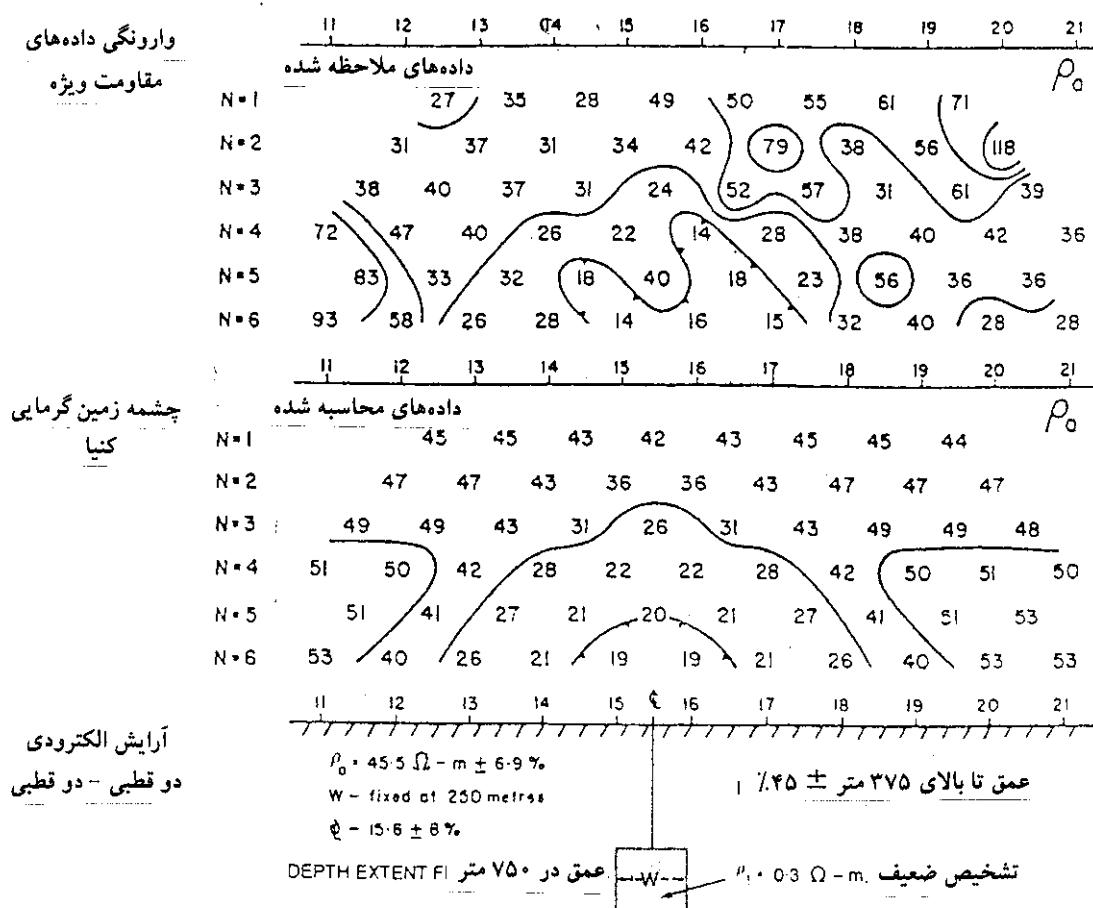


شکل ۳۰- مثالی از یک نمودار دامنه - فاز طیف IP گرا دیان تند در فرکانسهای بالا در نتیجه جفت شدگی القایی بوده در حالی که داده ها در فرکانسهای پایین با نمودار تقریباً تخت را می توان برای به دست آوردن پارامترهای الکتریکی زمین تبدیل کرد.

۶- کاربردها و گزارشهای موردی

۱-۶ برداشتهای زمین گرمایی^۱

چشمه‌های زمین گرمایی اغلب در چرخه آبهای زیرزمینی تحرک سیالی بالایی دارند. این مطلب منجر به مقاومت ویژه‌های کمی می‌شود که می‌تواند توسط روشهای IP آشکار شود. نتیجه‌های برداشت IP بر روی حوزه زمین گرمایی محتمل در کنیا در شکل ۳۱ نشان داده شده است (هالوف و پلتون ۱۹۸۱)، که مقدارهای مقاومت ویژه ظاهری کمی را برای $n = 5$ و ۶ بین موقعیتهای ۱۴ و ۱۷ نشان می‌دهد. تحلیل رایانه‌ای این داده‌ها مدل موجه زمین‌شناختی برای یک رسانای اصلی را ارائه می‌دهد که خوب مشخص نشده است. این مدل در ژرفای بین ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر و پهنای ۲۵۰ متر تعیین شده است. گرچه برداشت نتوانسته است مرکز احتمالی زمین گرمایی را به گونه‌ای قطعی مشخص نماید اما هدف خوبی برای برداشتهای تفصیلی بیشتر فراهم کرده است.



شکل ۳۱- داده‌های مقاومت ویژه ملاحظه شده و محاسبه شده در طول برداشتهای IP

با مقاومت ویژه ظاهری کم ($0.3/0$ اهم متر) چشمه زمین گرمایی در کنیا

زهدي و همكاران^۱ (۱۹۷۳) يك نوع مطالعه تركيبی از مقاومت ویژه، خودپتانسیل و قطبش القایی بر روی حوزه زمین گرمایی با بخار غالب در پارک ملی یلواستون^۲ و ایومینگ آمریکا (شکل ۳۲) را شرح می‌دهد. گستردگی بی‌هنجاری SP که در اثر بالا آمدن آب ایجاد شده است (به گونه‌ای که پیکانها در صفحه‌بندی پایینی شکل نشان می‌دهند)، به سوی جنوب شرقی ادامه می‌یابد زیرا آب زیرزمینی بطور جانبی وارد مواد تراواتر شده و در آنجا رو به پایین حرکت می‌کند.

مقاطع مقاومت ویژه ظاهری توزیع عمومی سازندها را نشان می‌دهد، به طوری که آنهایی که رو به شمال غربی قرار گرفته‌اند مقاومت ویژه حقیقی کمتری (ده تا ۱۳۰ اهم متر) از آنهایی که رو به جنوب شرقی قرار گرفته‌اند (بزرگتر از ۱۳۰ اهم متر) دارا می‌باشند.

مقطع درصد اثر فرکانس دارای مقدار زمینه شاخصی در حدود ۵ درصد است که به مواد رسی و پیریت موجود در لایه‌های سطحی کم عمق نسبت داده می‌شود. بی‌هنجاری IP که به شکل ویژه‌ای توسط یکی از مقاطع (متر ۱۰۰۰ = AO) نشان داده شده است در اثر ازدیاد پیریت گله به گله‌ای می‌باشد که توسط چرخش آبهای گرم نهشته شده‌اند، همانطور که داده‌های گمانه‌های حفاری منطقه نشان می‌دهند.

۲-۶ بررسیهای آب زیرزمینی

وک کوایر و همکاران^۳ (۱۹۵۷) نخستین کسانی بودند که قطبش القایی را با شرح دو نمونه موردی مفید برای بررسیهای هیدرولوژی (آشناسی) بکار بردند. مورد اول برای محل نزدیک کاری زوزو^۴ نیومکزیکو در دره‌ای که مرز جنوب شرقی آن سیرابلانکا است و شامل سنگهای آتشفشانی می‌باشد انجام شده که از آنها آب آشامیدنی گرفته می‌شود. به سوی شمال و غرب رسوبات کرتاسه دره تولاروسا^۵ با آلوده نمودن آبهای زیرزمینی توسط کلرایدها و گچ آنها را غیرقابل مصرف می‌سازد. شکل ۳۳ نقشه‌ای از مقادیر IP را که ده ثانیه پس از قطع جریان اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. پربندها بگونه‌ای تقریبی بسوی شمال - جنوب جهت گرفته‌اند، و بیانگر شبکه زهکشی موجود می‌باشند. مرزهای این شبکه با پربندهای $2 \frac{mv}{v}$ در شرق و $3 \frac{mv}{v}$ در غرب مطابقت دارند. چاه آبیاری ۱-IR با آبدهی در حدود ۴۵۰۰ لیتر در دقیقه و کیفیت آب نسبتاً پایین و از اینرو با IP کم ($\approx 3 \frac{mv}{v}$) مشخص شده است. منحنی بسته شده با مقدار $6 \frac{mv}{v}$ (۱- L) بعداً حفاری شده و آب با کیفیت بهتر، در حدود ۴۵۰ لیتر در دقیقه بدست آمده است.

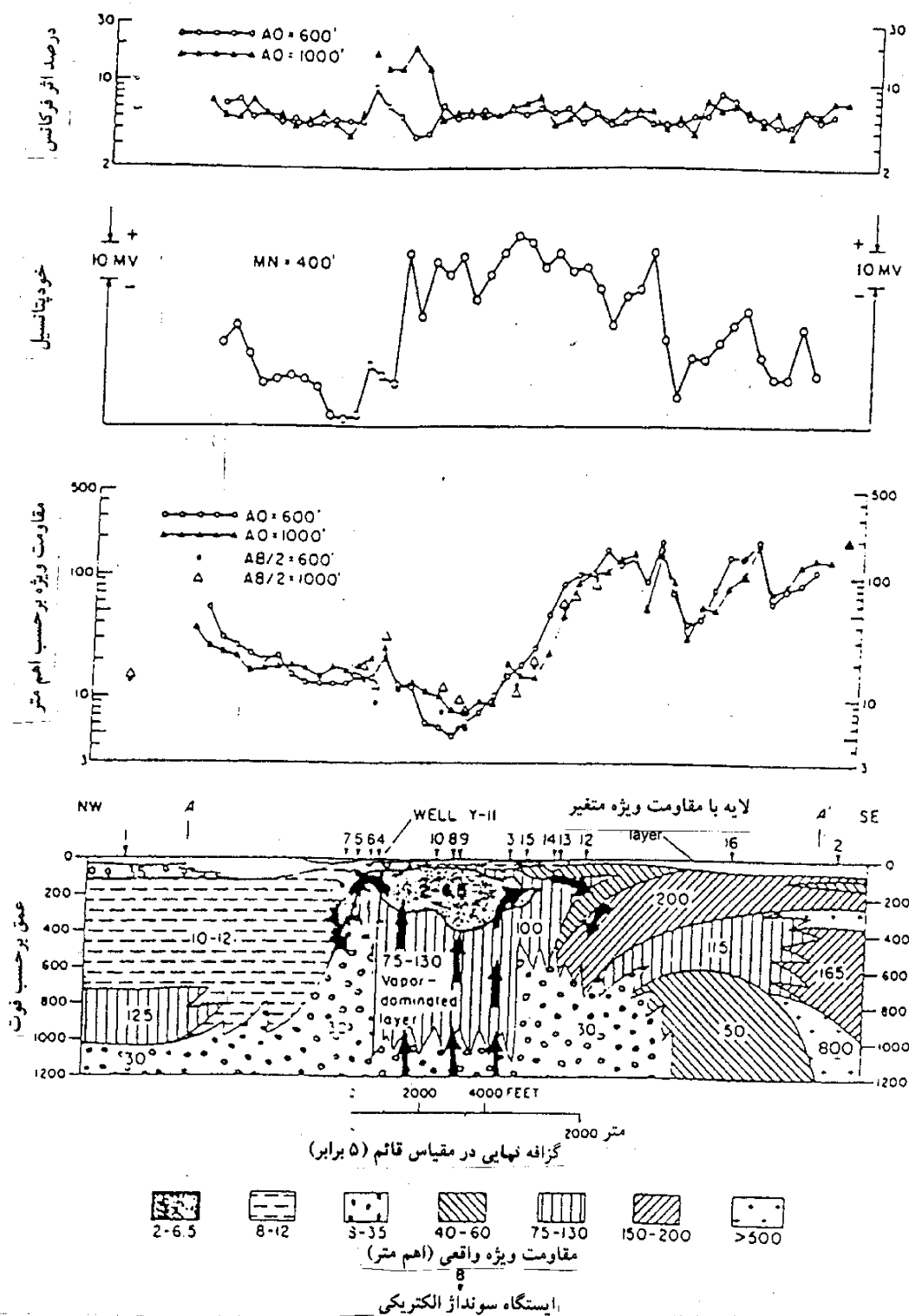
1- Zohdy et al.

2- Yellowstone

3- Vacquier et al.

4- Carrizozo

5- Tularosa



شکل ۳۲- داده‌های درصد اثر فرکانس و مقاومت ویژه ظاهری در طول یک سیستم زمین گرمایی با بخار غالب در پارک ملی یلواستون که با مقطع خودپتانسیل در راستای همان عارضه مقایسه شده است (تفسیر مقطع زمین‌شناسی در پایین صفحه نشان داده شده است).

نقشه نشان داده شده در شکل ۳۳- ب پربندهایی از نسبت مقادیرهای IP اندازه‌گیری شده در پنج ثانیه و ده ثانیه بعد از قطع جریان را نمایش می‌دهد. وک‌کوایر و همکاران از این پربندها در جهت وضوح بیشتر یک کانال مدفون استفاده کرده‌اند با این مفهوم که نسبت‌های بالاتر در ارتباط با مواد ریزدانه‌تر می‌باشد.

اجیلوی و کازمینا^۱ (۱۹۷۲) یک مدل تجربی آزمایشگاهی را برای آزمایش کارایی اندازه‌گیریهای IP حوزه زمان در تعیین محل تجمع آبهای زیرزمینی در روباره ماسه‌ای - رسی انجام داده‌اند. در حالیکه پروفیل با فاصله‌های ایستگاهی ثابت استاندارد بر روی عدسی نیمکره‌ای آب شیرین تولید بی‌هنجاری مقاومت ویژه ظاهری پهن کرده است، بی‌هنجاری بارپذیری IP به دو شکل باریک و شیب‌دار است (شکل ۳۴- الف)، نتیجه‌ای که توسط وک‌کوایر و همکاران نیز گرفته شده بود. اما برای مدلی با همان ابعاد و هندسه ولی با عدسی حاوی آب شور، منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و بارپذیری IP برخلاف نسبت ولتاژ اضافی IP در ۵/۰ ثانیه به ۵ ثانیه پس از قطع جریان، پهن بوده است (شکل ۳۴- ب).

مثالهای وک‌کوایر و همکاران و اجیلوی و کازمینا نشان می‌دهد که برای حوزه زمان IP نقشه‌های نسبت ولتاژ اضافی برای دو زمان مختلف می‌تواند تفکیک دقیق‌تری از پیکره‌های آب زیرسطحی در مقایسه با نقشه‌های ولتاژ اضافی برای اندازه‌گیریهای با زمان منفرد فراهم سازد. در حالیکه روش IP می‌تواند تفسیر مفیدی از پیکره‌های آب زیرزمینی تهیه نماید، کاربرد روش صحرایی آن کمتر از روشهای الکترومغناطیسی القایی جدید می‌باشد و این ممکن است به سبب کمبود مثالهای اخیر مربوط به مصرف IP در بررسیهای آب زیرزمینی باشد.

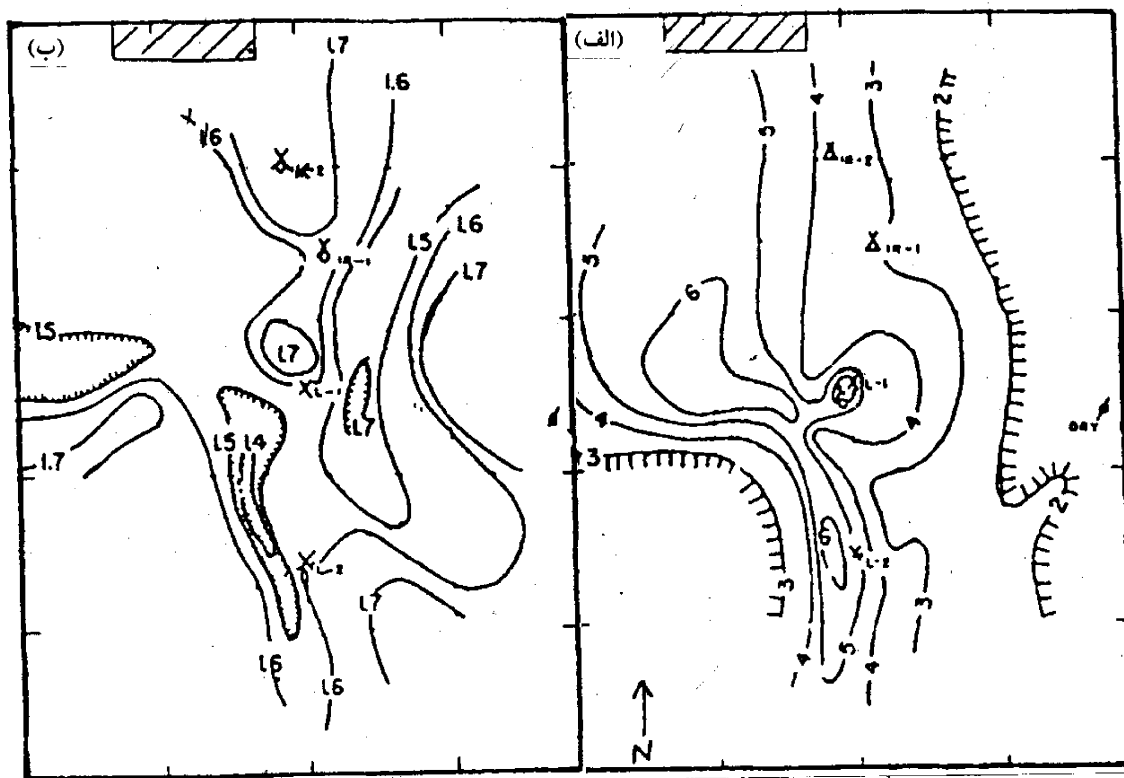
۳-۶ کاربردهای زیست محیطی

از اوایل دهه ۱۹۸۰ به امکان استفاده IP در بررسی محلهای آلوده علاقه نشان داده شده است. به‌طور مثال ال‌هوفت^۲ (۱۹۸۵) سرشتی‌های IP سنگهای آلوده شده به مواد آلی را بررسی نمود. مواد آلی شیمیایی می‌توانند در مقابل کانیهای رسی واکنش نشان دهند بگونه‌ای که پاسخ IP مربوط به مخلوط کانیهای رسی و الکترولیت عوض شود. این کار توسط سوی‌نی‌ن‌وون‌هالا^۳ (۱۹۹۲) ادامه داده شده است، بطور مثال آنها نمونه‌های آزمایشگاهی رسهای یخچالی آلوده با اتیلن‌گلیلی کل را با بکارگیری روش طیف IP بررسی نمودند. آنها دریافتند که هم طیف مقاومت ویژه و هم طیف فاز (که تابعی از فرکانس هستند) نمونه‌های آلوده شده بگونه‌ای مشخص با نمونه‌های غیرآلوده فرق دارند. هنوز تجارتی شدن این تکنیک نیاز به کار بیشتر دارد.

1- Ojilvy and Kuzmina

2- Olhoeft

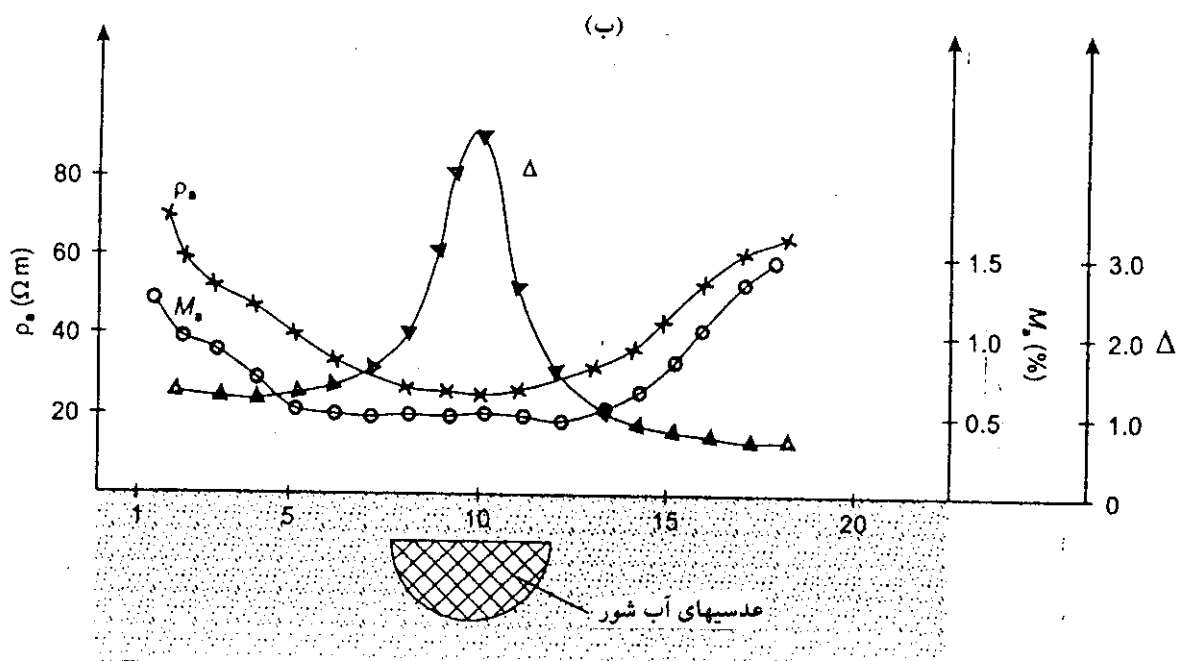
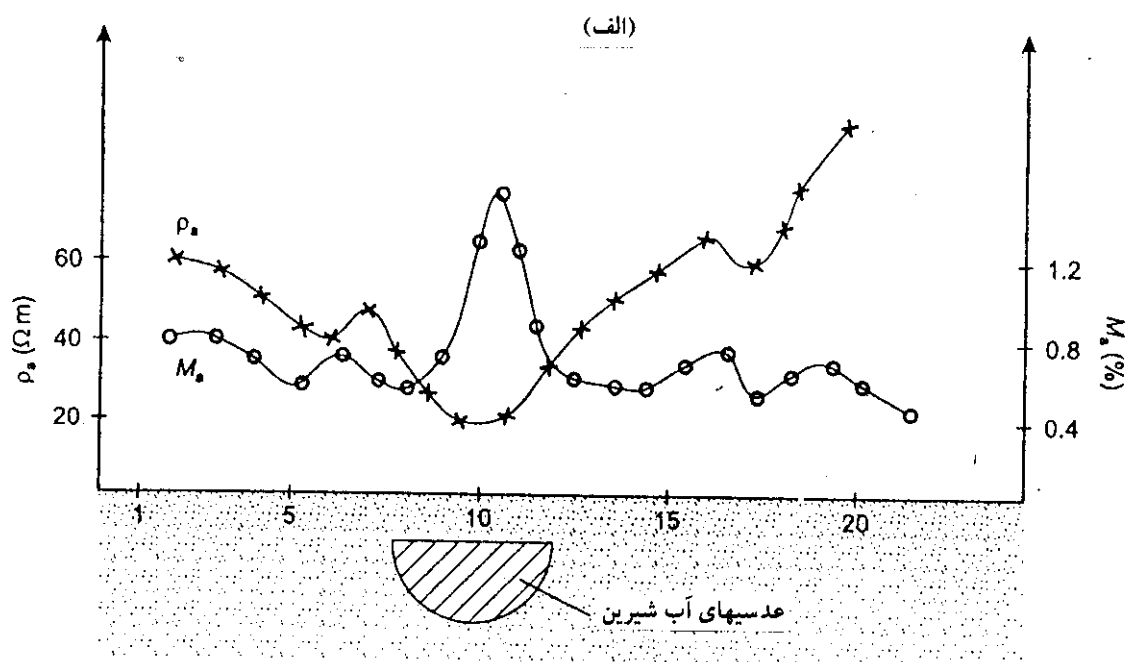
3- Soininen and Vanhala



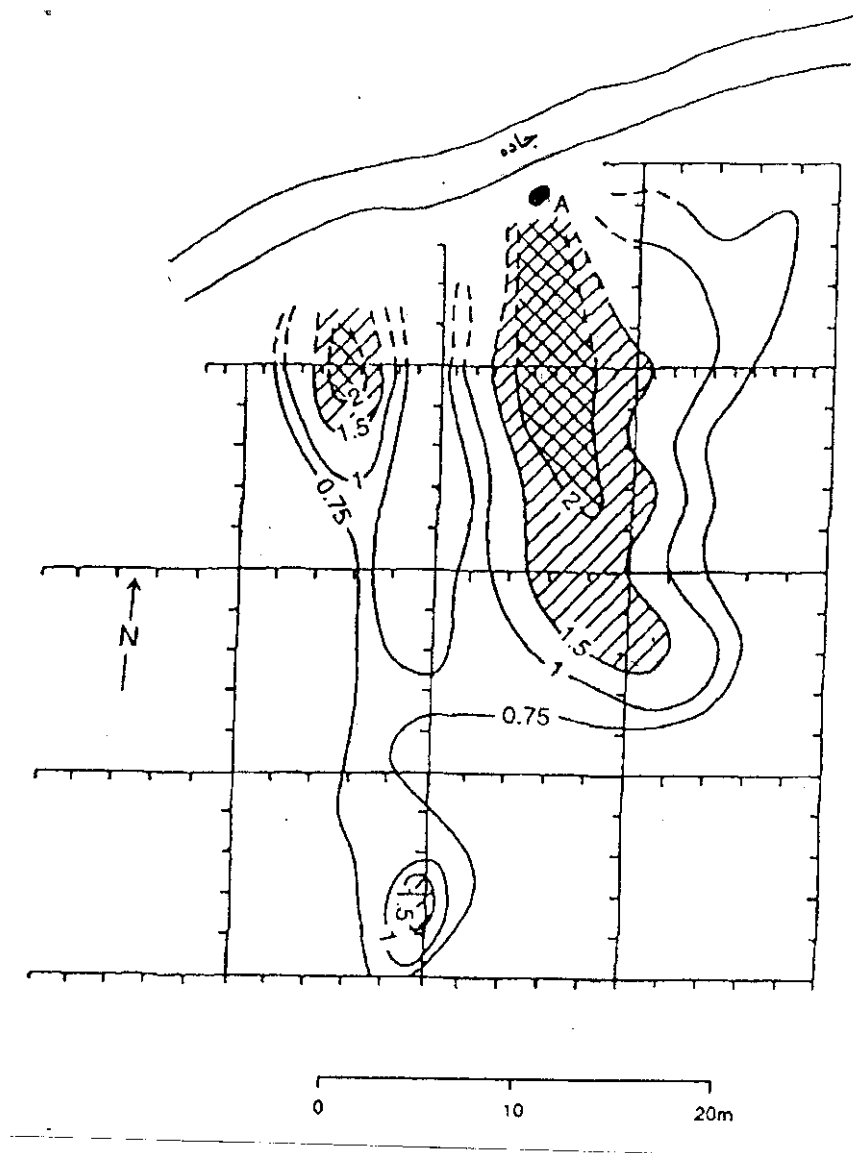
شکل ۳۳- نقشه‌های (الف) قطبش القایی ولتاژ اضافی پس از ده ثانیه (پربندها با فاصله $1 \frac{mv}{V}$)، و (ب) نسبت داده‌های IP پس از ۵ ثانیه و ده ثانیه بعد از قطع جریان بر روی یک دره دارای آبخوان مدفون نزدیک کاری زوزو در نیومکزیکوی ایالات متحده می‌باشد. چاه حفاری شده در L- ۱ با تولید حدود ۴۵۰ لیتر آب مشروب در دقیقه، از وک‌کوایر و همکاران (۱۹۵۷)

گاهی‌نا و همکاران^۱ (۱۹۹۰) موردی ویژه را پیشنهاد می‌نمایند که در آن کاربرد صحرایی IP استاندارد همراه با اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی مناسب وسیله‌ای شد برای به نقشه درآوردن ناحیه‌ای که شدیداً توسط مخلوطهای سیانور آلوده شده بود. منشاء این آلوده‌کننده‌ها تفاله مواد مربوط به کارهای گذشته در مورد جداسازی مواد فلزی است. آنها گمانه‌زنی الکتریکی متداول (با استفاده از آرایه شولومبرژه) و پروفیل‌زنی مقاومت ویژه متقارن همراه با روش IP را بطور توأم (که توسط نگارندگان IP - SRP نامیده شده است) بکار گرفته‌اند. برداشت مقاومت ویژه در آشکارسازی آلودگی حتی با وجود آنکه مستقیماً در بالای نهشته تفاله‌ای انجام شد به نتیجه نرسید. در صورتی که برداشت IP که برای اندازه‌گیری بارپذیری بکار برده شده است، نه تنها محدوده تفاله شناخته شده بلکه محدوده آلودگی را که قبلاً ناشناخته مانده بود نیز آشکار ساخته است. نقشه بارپذیری IP که در آن مراکز آلوده و نواحی تأثیر یافته در اطراف آنها بروشنی نشان داده شده است، در شکل ۳۵ آمده است.

1- Cahyna et al.



شکل ۳۴- مدل مقیاس دار تجربی نتایج مقاومت ویژه ظاهری، باریذیری و نسبت اضافه ولتاژ اندازه گیری شده پس از نیم ثانیه به اضافه ولتاژ در ۵ ثانیه بعد از قطع جریان (Δ). (الف) عدسی آب شیرین و (ب) عدسی آب شور.



شکل ۳۵- نقشه بارپذیری بر روی محلی آلوده شده با مخلوط سیانور. محل برونزد تفاله در A مشخص شده است. پربندها درصد بارپذیری هستند. نواحی هاشور زده بعنوان محدوده زمینهای آلوده تفسیر شده‌اند.

- 1- REYNOLDS, J.M, 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley & Sons pub.
- 2- Bertin, J- "La Prospection Provoquée et Son rôle en Recherches Minières" Annales des Mines, Mars 1969.