



ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب

«شنایخت مطالعات الکتریک با روش مقاومت ویژه»



ژئوفیزیک و نقش آن در مهندسی آب

«شناخت مطالعات الکتریک به روش مقاومت ویژه»

به نام خدا

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 مجتمع فنی - تخصصی واگذار شده است.

با درنظر 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 مجتمع 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 صاحبنظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مأخذ 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 غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر

تهیه‌کننده استاندارد

استانداردها ابتدا به صورت پیش‌نویس برای نظرخواهی منتشر شده و نظرات ارسالی پس از بررسی در کمیته تخصصی در نسخه نهایی منظور می‌گردد.

آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحبنظرانی که فعالیت آنها با این رشتہ از مهندسی آب مرتبط می‌باشد موجب امتنان کمیته فنی شماره ۱۳-۲ (ژئوفیزیک) خواهد بود.

ترکیب اعضاي کميته

اعضاي کميته فني شماره ۱۳-۲ (ژئوفيزيك) طرح تهيه استانداردهای مهندسي آب کشور که در تهيه و تدوين اين نشيده مشاركت داشته‌اند، به ترتيب الفبا به شرح زير هستند:

آقاي علی اکبر اسلامي	فوق لisans ژئوفيزيك
خانم فiroزه امامي	ليسانس زمين‌شناسي
آقاي منوچهر بهاور	دكتراي ژئوفيزيك
آقاي حسن حاجب حسينيه	دكتراي فيزيك
خانم وحده زرگر صالح	فوق لisans ژئوفيزيك
آقاي حسين زمرديان	دكتراي فيزيك
شادروان امير حسين موسوي	فوق لisans معدن - مهندس زمين‌شناسي
آقاي امامقلی يوسفی	ليسانس زمين‌شناسي - مهندس ژئوفيزيك

و همچنين در هنگام بررسی نهايی اين نشيده، کميته فني ژئوفيزيك از همکاري کارشناسان زير برخوردار بوده است:

آقاي فرهنگ شirوانi	лисанس زمين‌شناسي - کارشناس ژئوفيزيك
آقاي علی نصيريان	ليسانس زمين‌شناسي - کارشناس ژئوفيزيك
آقاي غلامحسين نوروزي	دكتراي ژئوفيزيك

فهرست مطالب

صفحه		عنوان
۱	مقدمه	-۱
۱	کلیات	۱-۱
۱	هدف	۲-۱
۲	تاریخچه کاربرد ژئوفیزیک	۳-۱
۴	روشهای الکتریکی	۴-۱
۵	روش مقاومت ویژه	۱-۴-۱
۵	روش الکترومغناطیسی (EM)	۲-۴-۱
۶	روش قطبش القابی (IP)	۳-۴-۱
۷	روش خود پتانسیل (SP)	۴-۴-۱
۸	شناخت مطالعات الکتریک به روشن مقاومت ویژه	-۲
۸	مبانی نظری	۱-۲
۹	رسانندگی و مقاومت ویژه واحدهای سنگی	۲-۲
۱۳	مقاومت ویژه الکتریکی طولی و عرضی	۳-۲
۱۴	عمق موثر نفوذ جریان و کاهش چگالی جریان با عمق	۴-۲
۱۶	آرایه‌ها	۵-۲
۱۷	آرایه ونر	۱-۵-۲
۱۷	آرایه شلومبرژه	۲-۵-۲
۱۸	۱- آرایه چهارقطبی غیر خطی نامتقارن	۱-۲-۵-۲
۱۸	۲- آرایه چهارقطبی خطی متقارن	۲-۲-۵-۲
۱۹	۳- آرایه چهارقطبی خطی نامتقارن	۳-۲-۵-۲
۱۹	آرایه هامل	۳-۵-۲
۱۹	آرایه لی	۴-۵-۲
۲۰	آرایه قطبی - دوقطبی یا سه الکتروودی	۵-۵-۲
۲۱	برتریها و نابرتیریهای آرایه‌های شلومبرژه و ونر	۶-۵-۲
۲۲	شیوه‌های صحرابی	۶-۲
۲۲	شیوه گمانه‌زنی الکتریکی	۱-۶-۲
۲۳	شیوه پروفیل زنی الکتریکی	۲-۶-۲

فهرست مطالب

صفحه		عنوان
۲۴	تجهیزات صحرایی	۷-۲
۲۴	چشمه‌های جریان الکتریکی	۱-۷-۲
۲۵	دستگاههای اندازه‌گیری	۲-۷-۲
۲۶	الکترودها	۳-۷-۲
۲۷	کابلها	۴-۷-۲
۲۷	گروه صحرایی	۸-۲
۲۷	پرسنل	۱-۸-۲
۲۸	تراپری	۲-۸-۲
۲۸	بازده عملیات	۳-۸-۲
۲۸	وسایل اندازه‌گیری	۴-۸-۲
۲۸	نقشه‌ها و مدارک موردنیاز	۵-۸-۲
۲۹	برنامه‌ریزی بررسیهای ژئوالکتریکی	۶-۸-۲
۳۰	تفسیر داده‌های صحرایی	۹-۲
۳۰	منحنیهای استاندارد	۱-۹-۲
۳۳	ارائه نتایج	۲-۹-۲
۳۳	نقشه‌ها و نمودار کیفی	۱-۲-۹-۲
۳۴	نقشه‌های کمی	۲-۲-۹-۲
۳۵	گزارش نهایی	۱۰-۲
۳۷	منابع	
۳۸	واژه‌نامه فارسی - انگلیسی	
۴۰	واژه‌نامه انگلیسی - فارسی	

۱-۱ کلیات

در دو دهه گذشته تحولات وسیع و قابل توجهی در کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در صنعت آب و ژئوتکنیک انجام گرفته است . مطالعه معیارهای مالی (مخارج چنین برسیهایی در سال) از یکسو و آماری (تعداد کیلومتر خط ، تعداد اکیپ ماه ، تعداد اندازه‌گیری در سال) و نظایر آن از سوی دیگر ، رشد چشمگیر کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی را در این زمینه نشان می‌دهد . اما برتر از این معیارها ، پیشرفت‌های کسب شده در این مدت زمان است که بازتاب آن بویژه در عوامل زیر مشهود است :

- طبیعت مسایل طرح شده؛
- وسایل موجود و توسعه و تکمیل این ابزارها ، با توجه به نیازها و برای پاسخگویی به مسایل طرح شده .
- روش‌های تفسیر و بهبود و تکامل آنها در مدت زمان کوتاه ، با توجه به افزایش حجم داده‌ها .

هر چند تحولات ذکر شده در مورد کاربرد ژئوفیزیک در دیگر شاخه‌های علوم نیز صادق است ، اما مقایسه‌ای بین نقش ژئوفیزیک در طرحهای مهندسی در دهه ۱۳۴۰ (۱۹۶۰) و نقش گسترده‌تر امروزی آن در این مورد ، روش‌نمی‌کند که تا چه اندازه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مهندسی آب و ژئوتکنیک چشمگیر بوده است . برای مثال در دهه ۱۹۶۰ ، استفاده از ژئوفیزیک در مسائل مهندسی ، با حفر تعدادی چاه آزمایشی (اما با هزینه کمتر) یکسان تلقی می‌شد . اما امروزه کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مهندسی آب از حالتی که صرفاً جایگزین چاههای آزمایشی ، آن هم در موارد تقلیل هزینه‌ها باشد و یا اینکه فقط بصورت ابزاری در مسایل پیچیده زمین‌شناسی مورد توجه واقع شود ، بیرون آمده و بعنوان مهم ترین راه حل مسایل موجود در این زمینه ، یکی از نیازهای برسیهای مهندسی است .

۲-۱ هدف

این نشریه به منظور هماهنگی و برداشت یکسان از " نشریه مطالعات الکتریک به روش مقاومت ویژه " تهیه شده است تا زمینه لازم برای ارائه استانداردها و شرح خدمات این روش را فراهم آورد . استاندارد و شرح خدمات مطالعات الکتریک به روش مقاومت ویژه به ترتیب در نشریه‌های " استاندارد مطالعات الکتریک به روش مقاومت ویژه و " شرح خدمات مطالعات الکتریک به روش مقاومت ویژه " ارائه شده‌اند ، در کلیه نشریه‌ها سعی شده است تا مطالب با توجه به نیازهای جاری کشور ، تجربه‌های موجود از مطالعات انجام شده و هماهنگ با معیارهای شناخته شده جهانی تهیه شوند .

۳-۱ تاریخچه کاربرد ژئوفیزیک

در مقیاس جهانی ، طبق گزارش فعالیتهای ژئوفیزیکی انجمن ژئوفیزیکدانهای اکتشافی^۱ (SEG) ، در سال ۱۹۵۹ (۱۳۳۸) هیچگونه هزینه‌ای در بررسیهای ژئوتکنیکی یا آبهای زیرزمینی گزارش نشده است .

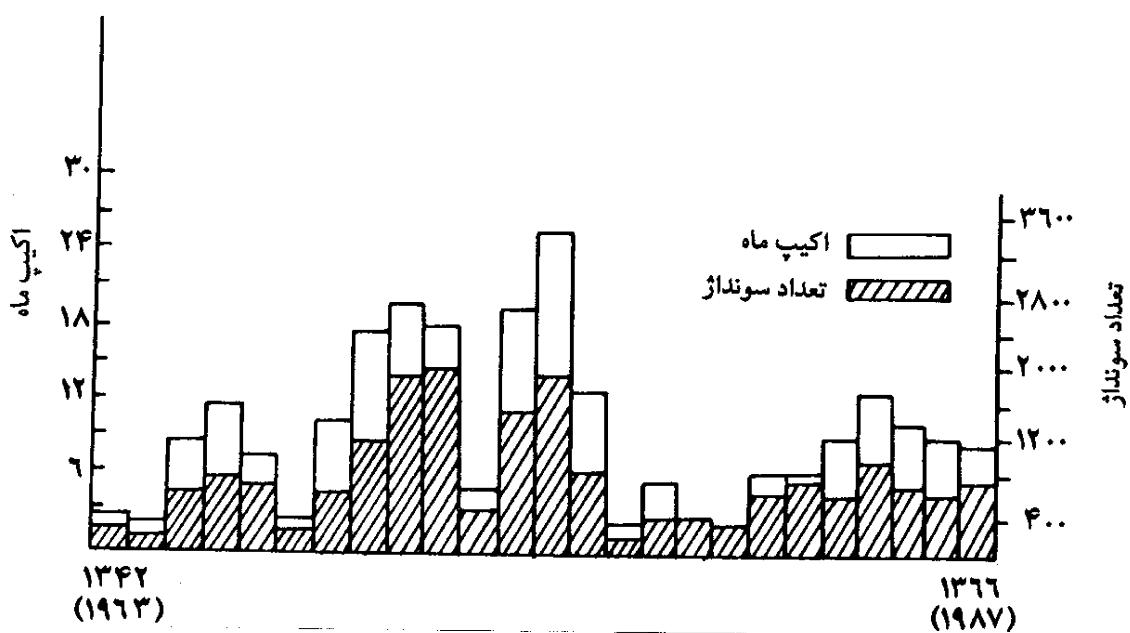
در سال ۱۹۶۹ هزینه سالانه در این زمینه‌ها به ۲۲/۱ میلیون دلار رسید که عامل عمدۀ برای این افزایش فوق العاده ، تعیین محل و ساختمان طرحهای انرژی هسته‌ای در جهان بوده است . بهمین ترتیب هزینه‌ها در سال ۱۹۷۲ تا بیست میلیون دلار گزارش شده است . از این‌رو در این دوره ، بررسیهای ژئوفیزیکی در مهندسی آب که بیشتر به منظور تعیین مشخصات لایه‌های زیرزمینی (نظیر ضخامت ، آبدار بودن ، مدولهای کشسانی و غیره) و پیچیدگیهای ساختاری (نظیر گسلها ، حفره‌ها ، عوارض کارستی و غیره) صورت می‌گرفت ، در جهت پاسخگویی به درخواستهای فوق انجام شده است . با کاهش ساختمانهای انرژی هسته‌ای در بررسیهای ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی پس از سال ۱۹۷۲ (۱۳۵۱) وقفه‌ای بوجود آمد ولی صنایع دیگر براساس طرحهای سازه‌های بزرگ و اکتشاف منابع آب زیرزمینی رونقی به این رشتۀ‌ها دادند . از اواسط دهه ۱۹۷۰ (۱۳۵۰) تاکنون ، انواع مسایل غالباً به سمت ژئوفیزیک ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی گرایش یافته‌اند .

شکل ۱-۱ کلیه هزینه‌های ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی را در سالهای ۱۹۷۳-۱۹۸۸ (بدون درنظرگرفتن تورم) که توسط SEG گزارش شده است نشان می‌دهد . افت سریع از هزینه‌های سال ۱۹۷۲ (حدود ۲۰ میلیون دلار) در سالهای ۱۹۷۳ تا ۱۹۷۸ و یک پرش فوق العاده به تراز قبلی و بالای آن پس از سال ۱۹۷۸ بلاfacسله دیده می‌شود . این افت تراز با وقفه عمومی در صنعت انرژی هسته‌ای همخوانی دارد . قسمتی از پرش بین سالهای ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹ ممکن است بدان علت باشد که SEG فرم گزارش‌های فعالیتهای ژئوفیزیکی را گسترش داد و پرسشنامه‌هایی را در آن گنجانید که موجب گزارش بیشتری از فعالیتهای ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی گردید . اما قسمت اعظم این پرش را می‌توان در گوناگونی روزافزون کاربردهای کم ژرف‌جستجو کرد که در بررسیهای دقیق ژئوفیزیکی بسیار موثر بوده‌اند .

در ایران استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مهندسی آب ، بویژه اکتشاف و بررسی منابع آب زیرزمینی ، از سال ۱۳۴۰ (۱۹۶۱) توسط بنگاه مستقل آبیاری سابق با همکاری شرکتهای خارجی آغاز شد . سپس همراه با توسعه سایر مطالعاتی که در امور آب انجام شد ، کاربرد ژئوفیزیک ، خصوصاً روش ژئوالکتریک ، با استفاده از خدمات مهندسین



شکل ۱-۱ نمودار فعالیت جهانی مطالعات ژئوفیزیکی در زمینه آبهای زیرزمینی و ژئوتکنیک



شکل ۱-۲ نمودار فعالیت مطالعات ژئوفیزیکی (ژئوکتریک) در زمینه آبهای زیرزمینی ایران

مشاور ایرانی رویزونی گذاشت ، بطوری که تعداد گمانه های (سوندآژهای) الکتریک انجام شده از حدود ۳۰۰ عدد در سال ۱۳۴۲ (۱۹۶۳) به بیش از ۲۰۰۰ عدد در سال ۱۳۵۱ (۱۹۷۲) افزایش یافت (شکل ۱-۲). در حال حاضر بیش از ۷۰٪ از سطح کلیه دشت‌های کشور با این روش از لحاظ بررسی منابع آب زیرزمینی مورد مطالعه و شناسایی واقع شده است .

امروزه علاوه بر وزارت نیرو ، سازمانها ، موسسه‌ها و شرکتهای زیر نیز در بررسیهای ژئوفیزیکی در امور آب و

مهندسی فعالیت دارند :

- مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
- سازمان زمین شناسی کشور
- شرکت فولاد ایران
- مهندسین مشاور ایرانی

۴-۱ روشهای الکتریکی

روشهای الکتریکی متنوع و گوناگون می‌باشد . در بعضی از آنها مانند روش خود پتانسیل یا پتانسیل خودزا^۱ و روش تلویریک^۲ ، از جریانهای الکتریکی طبیعی زمین استفاده می‌شود و در بعضی دیگر نظری روش مقاومت ویژه^۳ ، الکترومغناطیس^۴ (EM) و قطبش القایی^۵ (IP) جریان بطور مصنوعی به زمین فرستاده می‌شود .

روشهای الکتریکی غالباً جهت اکتشاف مواد معدنی فلزی و غیرفلزی ، منابع آب زیرزمینی ، مطالعه حوزه‌های نفتی و همچنین حل مسایل مهندسی نظری بررسی پی سنگ سدها و سازه‌های بزرگ ساختمانی و خورندگی خاکها ، بکارگرفته می‌شوند .

امروزه روشهای الکتریکی در حل مسایل مهندسی آب چه به لحاظ سرعت عمل و چه بواسطه کمی هزینه ، کاربرد فراوان و موفقی دارند . مهمترین روشهای متداول الکتریکی عبارتند از :

- روش مقاومت ویژه
- روش الکترو مغناطیسی (EM)
- روش قطبش القایی (IP)
- روش خودپتانسیل (SP)

1 - self potential

2 - telluric

3 - resistivity methods

4 - electromagnetic

5 - induced polarization

۱-۴-۱ روش مقاومت ویژه

در این روش معیار سنجش و مطالعه ، مقاومت ویژه الکتریکی زمین است . اکثر سنگها در زمین بعلت وجود آب حاوی املاح در داخل خلل و فرج آنها ، جریان الکتریکی را از خود عبور می دهند . این قابلیت هدایت الکتریکی از قانون اهم تبعیت می کند . مقاومت ویژه الکتریکی سنگ به مقاومت ویژه الکتریکی آب جذب شده، مقدار آب موجود و نحوه توزیع آن در سنگ بستگی دارد . در حالت کلی اگر تخلخل ، درجه شوری یا میزان آب موجود در لایه آبدار افزایش پیدا کند ، مقاومت ویژه الکتریکی آن کاهش می یابد .

انجام بررسیهای الکتریکی با روش مقاومت ویژه می تواند در شناخت کلی لایه های محل سازه ، تشخیص آبخوانهای زیرزمینی و سطح ایستابی ، بررسی شکستگیهای زمین و زمینلغزشها ، تشخیص عمق سنگ کف و پیسنگ ، تشخیص نقاط ضعف در توده سنگها (از قبیل هوازدگی ، فرسایش داخلی ، ترک خورده و غیره) کمک شایان و قابل توجهی بنماید .

- انتخاب تکنیکهای صحرایی و آرایه الکترودی بستگی به شرایط محلی و مسئله مورد بررسی دارد . در مرحله تفسیر و تهیه گزارش ، نقشه ها و مدارک زیر تهیه می گردد :
- جدول مقایس مقاومت ویژه الکتریکی لایه ها
 - مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری
 - نقشه یا نقشه های مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری با فاصله مناسب برای الکترودهای فرستنده جریان
 - مقاطع ژئوالکتریک
 - نقشه پربندی^۱ هم ضخامت رسوبات آبرفتی و واریزه ای سطحی
 - نقشه پربندی هم ژرفای سنگ کف

۲-۴-۱ روش الکترومغناطیسی (EM)

گزارش فعالیتهای جهانی ژئوفیزیکی در زمینه مهندسی و آب، بیانگر این نکته است که روش EM ، حداقل به صورت متداول ، در مقایسه با روش مقاومت ویژه از کاربرد کمتری برخوردار است (مثلاً طبق گزارش SEG ، در سال ۱۹۸۷ در مجموع ۲۹ میل اندازه گیری EM و ۳۷۶۵ میل اندازه گیری مقاومت ویژه در امور مهندسی و آب صورت گرفته است). البته موارد خاصی همچون به نقشه درآوردن ضخامت لایه های منجمد در مناطق شمالگان^۲ و محدودی از بررسیهای آبهای زیرزمینی در معادن زغال سنگ از این گفتار مستثنی هستند . با اینهمه گزارشهای اندکی از کاربرد

1 - contour map

2 - Arctic

روش EM در بررسیهای ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی در دست است . علت را می توان در نوشتة کلر^۱ (۱۹۷۱)

جستجو کرد :

"روشهای جریان مستقیم به مراتب بیش از روشهای الکترومغناطیسی به تغییرات مقاومت ویژه حساسند و از آنجاکه تفسیر داده‌های الکترومغناطیسی دشوار است ، نمی توان ادعا کرد که روشهای الکترومغناطیسی در بررسیهای کم عمق مفید باشند " .

البته این بدان معنی نیست که روش EM در مهندسی آب استفاده ای ندارد ، بلکه موید آن است که نحوه کاربرد آن مشخص و استاندارد نیست . امروزه با توجه بیشتر به استانداردهای محیط زیست ، انتظار می رود که مطالعات آلدگی آبهای زیرزمینی ، میدان وسیعی برای بررسیهای الکتریکی و EM باز نماید . بعلاوه دو تکنیک نسبتاً جدید الکترومغناطیسی یعنی " رادارهای نفوذ کننده در زمین "^۲ و "EM بین چاهی " بطور عمده در مسائل ژئوتکنیکی و آبهای زیرزمینی کاربرد خواهند داشت .

۳-۴-۱ روش قطبش القایی (IP)

حضور ذرات کانی های فلزی در مجاور الکتروولیتهای موجود در سنگها ، سیستمی بوجود می آورد که بر اثر عبور جریان الکتریکی قطبی می شود . اختلاف پتانسیل حاصل از چنین قطبشی پس از قطع جریان با زمان کاهش پیدا می کند . مطالعه اختلاف پتانسیل حاصل از قطبش القایی و نحوه کاهش آن یکی از روشهای اکتشافی کانی های فلزی می باشد . مشاهده پدیده IP در مواردی که کانی های فلزی حضور ندارند و بررسی اثر سرشیهای ^۳ هیدروژئولوژیکی سنگها براین پدیده ، امکان استفاده از روش قطبش القایی را در مطالعات مهندسی آب قابل تصور ساخته است (لاورنی ^۴ ، ۱۹۵۷).

در حالی که روش IP در برخی زمینه های مهندسی و مهندسی آب عملاً مورد استفاده قرار می گیرد ، ولی منشاء این پدیده بخوبی شناخته نشده است . امروزه چنین تصور می شود که پدیده IP غیرفلزی نتیجه اثر چندین فرایند فیزیکی - شیمیائی است که ناشی از اختلاف پتانسیل بین الکتروولیت موجود در منافذ سنگها و کانالهای ارتباطی بین آنها و همچنین حضور ذرات رسی می باشد . (اوگیلوی و کوزمینا ^۵ ، ۱۹۶۹).

1 - Keller

2 - ground penetrating radar

3 - characteristics

4 - Lavernege

5 - Ogilvy and Kuzmina

کاربرد این روش نشان داده است که با اندازه گیری پدیده IP حاصل در سنگهای ماسه‌ای - رسی و سنگهای متراکم می‌توان لایه‌های تا عمق ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر را موردنمطالعه قرار داد. این روش پاسخگوی مسائلی از قبیل مطالعه تجمع آبهای زیرزمینی در لایه‌های ماسه‌ای - رسی برای تعیین عمق سطح ایستابی و میزان شوری آب، تعیین محدوده آبخوانها، بررسی جریان آبهای زیرزمینی در مناطق کارستی و مطالعه لایه‌ها از نظر دانه‌بندی و میزان ذرات رسی موجود در آنها می‌باشد. روش IP رامی توان هم بصورت پیمایشی و هم بصورت گمانه‌زنی مورد استفاده قرارداد. طبیعتاً با توجه به محدودیتهای موجود در استفاده از پدیده IP چنین به نظر می‌رسد که کاربرد واقعی این روش به صورت یک روش جنبی در مطالعات ژئوکتریک برای بررسی مسایل مهندسی و مهندسی آب است.

۴-۴-۱ روش خود پتانسیل (SP)

در سالهای اخیر SP که روشی ساده در ژئوفیزیک معدن یابی می‌باشد، در مهندسی و مهندسی آب نیز مورد توجه قرار گرفته است. معمولاً این روش تنها به مطالعه پتانسیلهای الکتریکی ناشی از واکنشهای الکتروشیمیایی می‌پردازد که براثر حضور کانه در شرایطی مناسب در آبهای زیرزمینی ایجاد می‌شوند. در ژئوفیزیک و مهندسی آب از پتانسیلهای الکتروسینتیکی در سطح زمین استفاده می‌شود که نسبتاً ضعیف می‌باشد و از جریان آب در سنگهای متخلخل و شکسته ناشی می‌شود. در شرایط خاص این پتانسیلهای بخوبی توسط دستگاههای موجود قابل اندازه‌گیری است و داده‌های بدست آمده بسیار مفیدند. اغلب چنین مواردی را می‌توان در مناطق کارستی مشاهده کرد.

کاربرد SP براساس مطالعه تغییرات پتانسیل الکتروسینتیکی در مهندسی و مهندسی آب را می‌توان در زمینه‌های تشخیص نشت در سدها، کف مخازن و ساختارهای زهکشی، تشخیص جریانهای افقی و قائم آب در توده‌های ناپایدار چون زمین لغزشها و همچنین جابجایی آبهای زیرزمینی در یک آبخوان محدود برشمرد. مطالعه پتانسیلهای الکتروشیمیایی برای تعیین محل دفن زباله‌های شیمیایی با استفاده از پتانسیل ناشی از اختلاف یونی آبهای زیرزمینی آلد و غیرآلد و همچنین کنترل لوله و کابلهای زیرزمینی از نظر خورندگی از جمله کاربردهای دیگر روش SP در ژئوفیزیک می‌باشد.

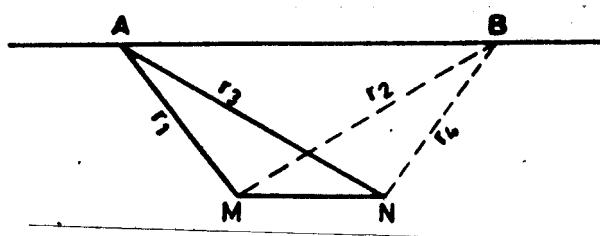
شناخت مطالعات الکتریک به روشن مقاومت ویژه

روش مقاومت ویژه که یکی از متداول‌ترین روش‌های الکتریکی می‌باشد، به علت سهولت عملیات صحرائی و پایین بودن نسبی هزینه از یک طرف و حجم اطلاعات حاصل و قابلیت کاربرد آن در اکتشاف منابع آب زیرزمینی و مهندسی زمین‌شناسی از طرف دیگر، موارد استفاده زیاد دارد.

چون واحدهای مختلف سنگی دارای رسانندگی الکتریکی متفاوتی هستند، با ایجاد جریان الکتریکی و اتصال آن در دو نقطه به زمین و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در نقاط مختلف، نحوه توزیع پتانسیل و در نتیجه مقاومت ویژه الکتریکی سنگها را می‌توان محاسبه و واحدهای مختلف سنگی را از یکدیگر تفکیک کرد.

۱-۲ مبانی نظری

از دو الکترود A و B که الکترودهای جریان نامیده می‌شوند، در زمینی با مقاومت ویژه الکتریکی ρ اهم متر، طبق شکل ۱-۲ شدت جریان I آمپر را می‌گذرانیم عبور داده می‌شود.



شکل ۱-۲ محاسبه پتانسیل در روی زمین

براساس قانون اهم، پتانسیل در نقاط M و N که الکترودهای پتانسیل می‌باشند، به ترتیب چنین هستند (تلفورد و همکاران^۱، ۱۹۸۴):

$$V_M = \frac{\rho_a}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \times I + c$$

$$V_N = \frac{\rho_a}{2\pi} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \times I + c$$

1- Telford et al

بنابراین اختلاف پتانسیل بین الکترود M و N عبارت است از :

$$\Delta V = V_M - V_N$$

$$\Delta V = \frac{\rho_a}{\gamma_\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \times I$$

$$\Delta V = \frac{\rho_a}{\gamma_\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right) \times I$$

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \frac{\gamma_\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right] - \left[\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right]}$$

اگر :

$$K = \gamma_\pi \frac{1}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right] - \left[\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right]} \quad \text{داریم :}$$

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

که در آن :

ρ_a مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری بر حسب اهم-متر

ΔV اختلاف پتانسیل بین دو الکترود M و N بر حسب میلی ولت

I مقدار شدت جریان فرستاده شده به دو الکترود A و B بر حسب میلی آمپر

K ضریبی است که بستگی به فواصل بین الکترودهای پتانسیل و جریان دارد.

در عمل جریان I به الکترودهای جریان داده می‌شود و اختلاف پتانسیل ΔV بین دو الکترود پتانسیل اندازه‌گیری

می‌شود. (شکل ۲-۲).

۲-۲ رسانندگی و مقاومت ویژه واحدهای سنگی

رسانندگی الکتریکی سنگها که عکس مقاومت ویژه الکتریکی آنها است، به نوع کانیها و میزان شوری آب داخل

سنگها ارتباط دارد، به طوری که اگر سنگ مورد مطالعه از مواد همگن^۱ تشکیل شده باشد، مقدار مقاومت ویژه

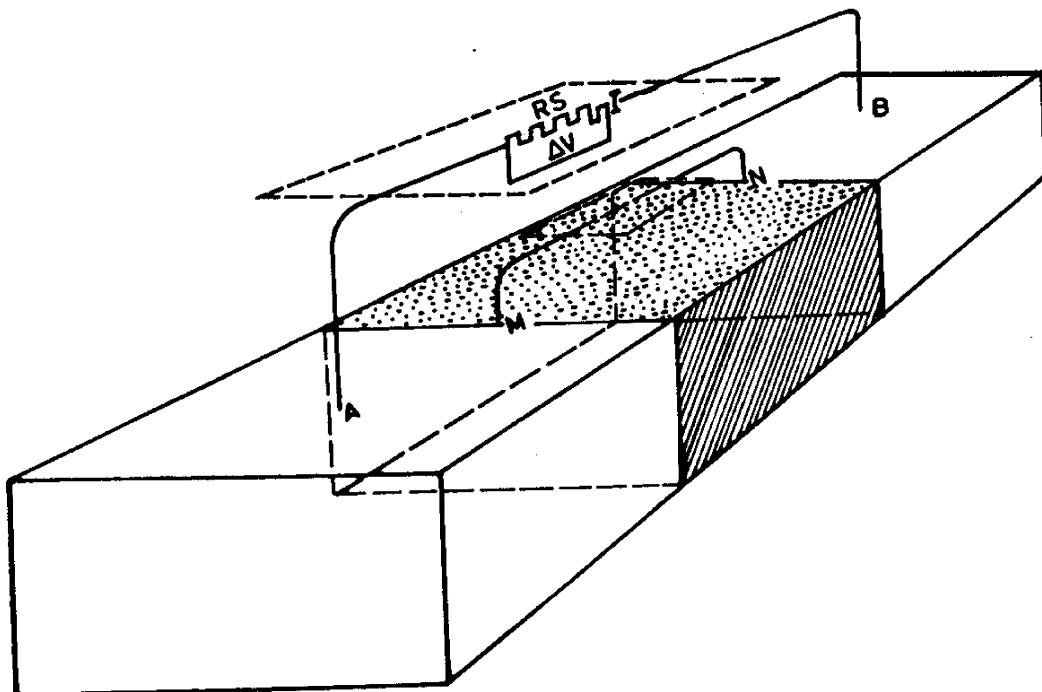
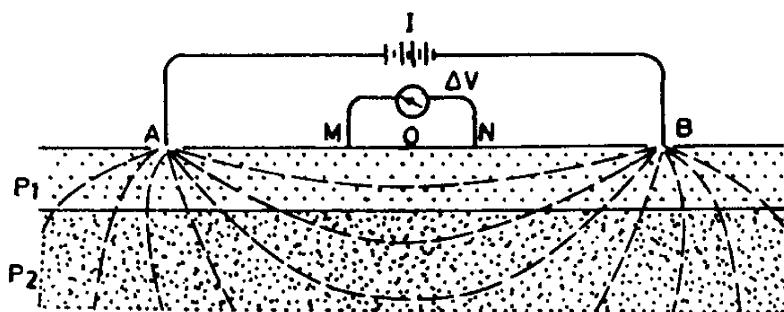
الکتریکی محاسبه شده از رابطه $k = \rho_a \frac{\Delta V}{I}$ بعنوان مقاومت ویژه حقیقی و در غیراین صورت مقاومت ویژه ظاهری^۲

1 - homogeneous

2 - apparent resistivity

می باشد. به طور کلی پدیده رسانش الکتریکی سنگها بیشتر از طریق آب موجود در آنها صورت می گیرد. بنابراین در حالت کلی عاملهای زیر در تعیین مقاومت ویژه الکتریکی سنگها نقش اساسی دارند:

- دانه بندی: در ارتباط با اندازه و نحوه قرار گرفتن ذرات
- رطوبت: در ارتباط با درصد آب موجود در سنگ
- رسانندگی الکتریکی سیال: در ارتباط با املالح موجود



شکل ۲-۲ اندازه گیری مقاومت ویژه واحدهای سنگی

اگر σ_r و σ_e به ترتیب رسانندگی الکتریکی سنگ و رسانندگی الکتریکی آب موجود در سنگ و V_e حجم خلل و فرج پرشده از آب باشند، رابطه تجربی زیر صادق است :

$$\sigma_r = \frac{V_e}{c} \sigma_e$$

c = ضریبی است که بستگی به وضع فضاهای خالی سنگ دارد.
ماکسول برای سنگهایی با دانه‌بندی کروی و تخلخل P رابطه زیر را پیشنهاد کرده است .

$$\sigma_r = \frac{2P}{3-P} \sigma_e$$

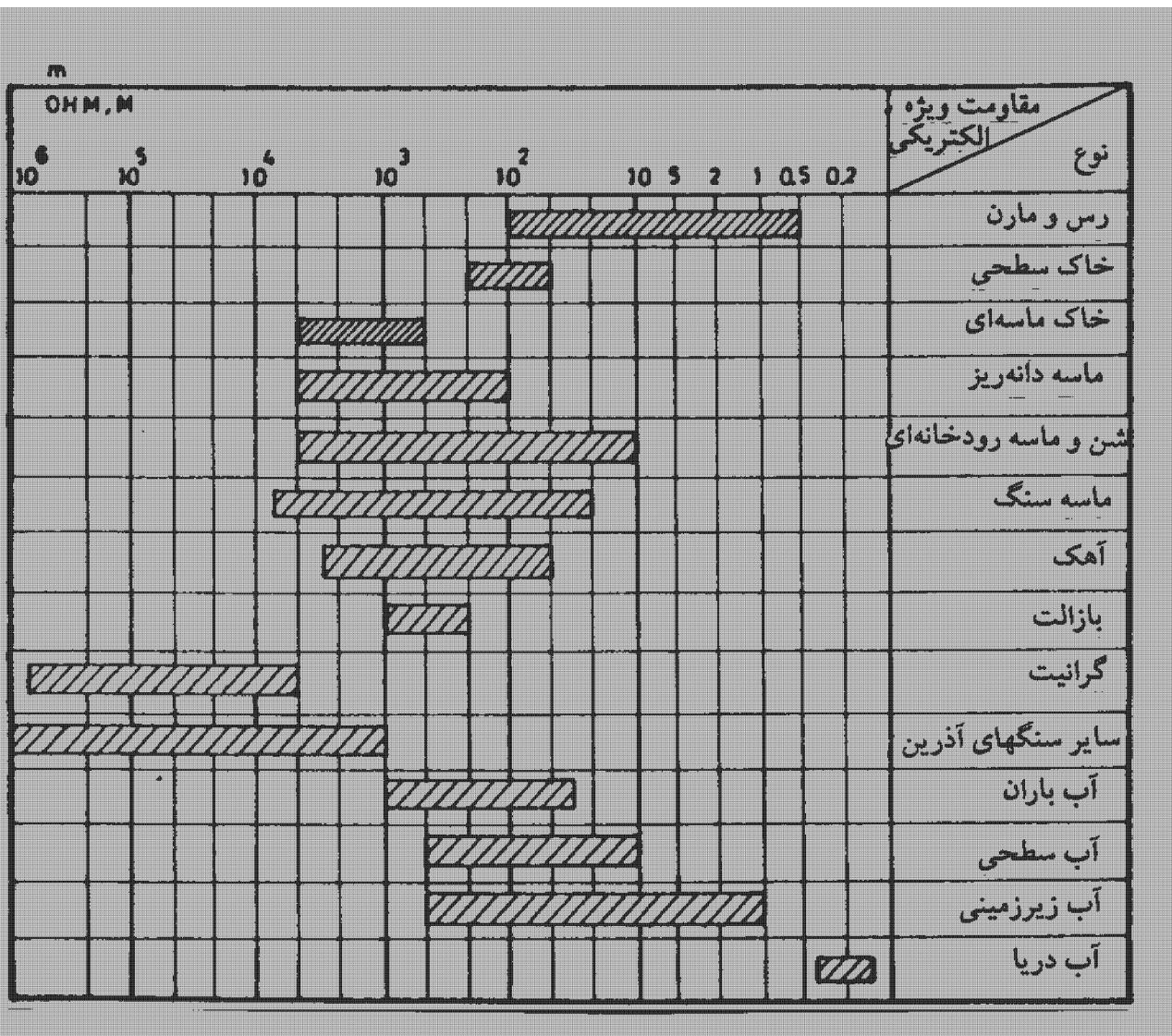
این رابطه اغلب به صورت

$$\rho_t = \frac{a}{P} \rho_\omega$$

نیز نشان داده می‌شود که در آن ρ_t مقاومت ویژه سنگ، ρ_ω مقاومت ویژه آب و a ضریبی است متغیر بین $1/5$ تا 3 . در این رابطه نسبت $\frac{a}{P}$ ضریب مقاومت ویژه سازند (F) و یا ضریب سازند، خوانده می‌شود که بیانگر نسبت مقاومت ویژه الکتریکی سنگ به مقاومت ویژه الکتریکی آب می‌باشد.

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_\omega}$$

گستره مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌هایی از سنگ و آب در جدول ۱-۲ نشان داده شده است .



جدول ۱-۲ گستره مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌هایی از سنگ و آب

براساس این جدول نتایج زیر را به طور خلاصه می‌توان در حالت عمومی انتظار داشت :

- مقاومت ویژه سنگهای رسوبی کمتر از سنگهای آذرین است .
- مقاومت ویژه سنگهای قلیائی کمتر از سنگهای اسیدی است .
- مقاومت ویژه سنگهای متشكل از دانه‌های رسی کمتر از سنگهای متتشکل از دانه‌های ماسه‌ای است .
- مقاومت ویژه منابع آب سطحی یا زیرزمینی موجود در مناطق با سازندهای آذرین و دگرگونی بیشتر از مقاومت ویژه این منابع در مناطق با سازندهای رسوبی است.

۳-۲ مقاومت ویژه الکتریکی طولی^۱ و عرضی^۲

در محیط های همگن و همسانگرد^۳ سطوح هم پتانسیل به شکل کروی انتشار می‌باید. ولی در عمل مقاومت ویژه سنگها به علت یکنواخت نبودن دانه‌بندی، بافت و ساختمان، در جهتهای مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشد. بنابراین مقاومت ویژه سنگ به موازات سطح لایه، مقاومت ویژه طولی (ρ_l) و در جهت عمود بر لایه، مقاومت ویژه عرضی (ρ_t) خوانده می‌شود.

معمولًا مقاومت ویژه عرضی از مقاومت ویژه طولی بیشتر است ($\rho_t > \rho_l$). جذر نسبت این دو مقاومت ویژه را ضریب ناهمسانگردی^۴ (λ) گویند.

$$\lambda = \frac{\rho_t}{\rho_l}$$

معمولًا ضریب λ بین ۱ و ۲ تغییر می‌کند.

در یک محیط همسانگرد و همگن، سطوح هم پتانسیل به صورت کروی و $\lambda = 1$ است. در غیراينصورت $\lambda \neq 1$ و سطوح هم پتانسیل بیضوی می‌باشد. در عمل برای پرهیز از بکارگیری فرمولهای پیچیده، مقاومت ویژه الکتریکی میانگینی از این دو مقاومت ویژه در نظر گرفته می‌شود:

$$\rho_m = \rho_t \rho_l$$

چنانچه لایه‌های مورد مطالعه موازی سطح زمین باشند ρ_m همان مقاومت ویژه ظاهری ρ_a خواهد بود. در صورتی که لایه‌ها موازی سطح زمین نباشند و با آن زاویه α بسازند، مقدار مقاومت ویژه ظاهری برابر ρ_m نیست و در این حالت بستگی به مقدار زاویه α دارد. بنابراین مقدار مقاومت ویژه ظاهری به چگونگی توجیه الکترودهای جریان و پتانسیل نسبت به وضعیت لایه‌های زمین بستگی خواهد داشت (جدول ۲-۲).

1 - longitudinal

2 - transversal

3 - isotropic

4 - coefficient of anisotropy

قائم	مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری در سطح زمین		وضع قرار گرفتن لایه‌ها
	عمود بر لایه AB	در امتداد لایه AB	
$\rho_1 = \frac{\rho_m}{\lambda}$		ρ_m	موازی سطح زمین
$\rho_m = \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \alpha}{\lambda^2 + \tan^2 \alpha}}$	$\rho_m = \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \alpha}{1 + \lambda^2 \tan^2 \alpha}}$	ρ_m	مايل نسبت به سطح زمین
ρ_m	$\rho_1 = \frac{\rho_m}{\lambda}$	ρ_m	عمود بر سطح زمین

(RG - GL . Oct ۱۹۵۵ . نشریات داخلی کمپانی ژنرال ژئوفیزیک)

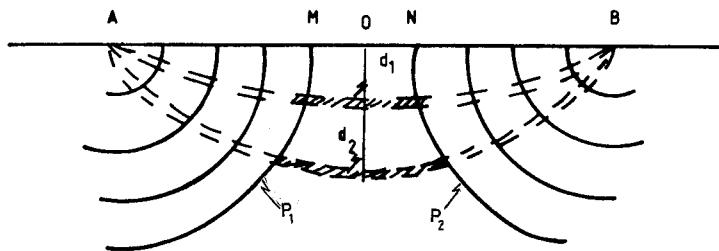
جدول ۲-۲ پیوند مقاومت ویژه ظاهری، آرایش الکترودها و گسترش لایه‌ها

از جدول بالا چنین برمی‌آید که :

- در صورتی که امتداد AB در سطح زمین موازی امتداد لایه‌بندی باشد، مقاومت ویژه ظاهری میانگینی از مقاومتهای ویژه طولی و عرضی است.
- در صورتی که لایه‌ها شیبدار و یا عمودی باشند و جهت AB عمود بر امتداد لایه باشد مقدار ρ_m متناسب با جهت جریان AB است.
- مقادیر مقاومت ویژه ظاهری در سطح زمین تقریباً مساوی ρ_m است ولی هیچ وقت به مقدار ρ_m نمی‌رسد.

۴-۲ عمق مؤثر نفوذ جریان و کاهش چگالی جریان با عمق

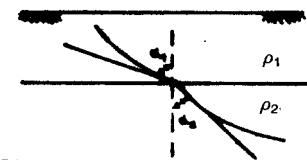
به طورکلی عمق نفوذ جریان الکتریکی با افزایش فاصله AB بیشتر می‌شود و جریان از توده ضخیم‌تری از سنگها و یا خاکها عبور می‌کند. ولی این افزایش عمق نفوذ همراه با کاهش چگالی جریان خواهد بود، زیرا طبق شکل ۳-۲ برای دو سطح هم پتانسیل غیرموازی P_1 و P_2 که فاصله آنها با عمق افزایش می‌یابد چگالی جریان در عمق d_2 کمتر از عمق d_1 خواهد بود.



شکل ۳-۲ کاهش چگالی جریان با عمق

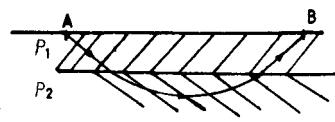
برهمنی اساس عمقی را که بیش از آن نتوان با حساسیتهای دستگاه (حدود صدم میلی ولت) مقدار افت پتانسیل را اندازه‌گیری کرد، عمق مؤثرنفوذ جریان نامند. البته در محیط‌های ناهمگن و ناهمسانگرد عوامل دیگری از جمله تابی رسانندگی علاوه بر فاصله الکترودهای جریان تا حدی در عمق نفوذ جریان مؤثر خواهد بود. در این شرایط به هنگام عبور خطوط جریان از حد فاصل دو لایه، خطوط جریان براساس رابطه زیر منحرف می‌گردد (شکل ۴-۲).

$$\rho_1 \tan \alpha_1 = \rho_2 \tan \alpha_2$$



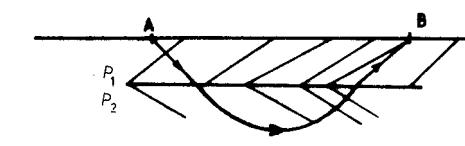
شکل ۴-۲ عبور جریان از حد فاصل دو لایه

که در آن زوایا نسبت به خط عمود بر حد فاصل در محل عبور اندازه گرفته می‌شود. براساس این رابطه چنانچه مقاومت ویژه لایه زیرین کمتر از لایه رویی باشد ($\rho_1 > \rho_2$) خطوط جریان به حد فاصل نزدیکتر می‌شود (شکل ۵-۲).



شکل ۲-۵ عبور جریان از حد فاصل دو لایه ($\rho_1 > \rho_2$)

اگر در لایه زیرین مقاومت ویژه بیش از لایه رویی باشد ($\rho_1 < \rho_2$) خطوط جریان از حد فاصل دور می شود (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶ عبور جریان از حد فاصل دو لایه ($\rho_2 > \rho_1$)

بنابراین مشاهده می شود که علاوه بر افت چگالی جریان با عمق، نحوه تغییرات رسانندگی لایه ها نیز بر عمق نفوذ جریان موثر است، به طوری که در منطقه ای با لایه شور سطحی، خطوط جریان به هم نزدیکتر شده و چگالی جریان در لایه سطحی افزایش می یابد و در نتیجه عمق نفوذ جریان کم می شود (اثر پوست^۱).

۵-۲ آرایه ها^۲

طرز قرار گرفتن الکترودهای پتانسیل نسبت به الکترودهای جریان، آرایه های مختلفی را بوجود می آورد که عبارتنداز: ونر^۳، شلومبرژه^۴، هامل^۵، لی^۶، قطبی^۷، دوقطبی^۸، گرادیان^۹ و غیره ...

1 - skin effect

2 - sarray

3 - Wenner

4 - Schlumberger

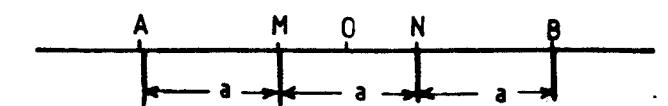
5 - Hummel

6 - Lee

در زیر به شرح متدالترین این آرایه‌ها پرداخته می‌شود:

۱-۵-۲ آرایه ونر

در این آرایه از دو الکترود جریان و دو الکترود پتانسیل استفاده می‌شود، به ترتیبی که فواصل الکترودهای متواالی در هر اندازه‌گیری مساوی است و چهار الکترود روی یک خط مستقیم قرار گرفته‌اند. مرکز تقارن آرایه (۰) نقطه برداشت می‌باشد (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲ آرایه ونر

با استفاده از رابطه بخش ۱-۲ داریم $AM = MN = NB = a$ و $K = 2\pi a$ ولذا:

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

در این آرایه در هر اندازه‌گیری مقاومت ویژه ظاهری قطعه‌ای از زمین که بین M و N تا عمق نفوذ جریان قرار گرفته محاسبه می‌گردد. چون با ازدیاد طول AB اجباراً فاصله MN نیز افزایش می‌یابد، بنابراین تغییرات جانبی مقاومت ویژه در اندازه‌گیریها مؤثرند.

۲-۵-۲ آرایه شلومبرژه

چون در آرایه شلومبرژه معمولاً⁷ از چهار الکترود استفاده می‌شود این آرایه را چهارقطبی شلومبرژه نیز نامیده‌اند. در این آرایه فاصله بین M و N نسبت به AB کوچک و در حدود $\frac{1}{5}$ تا $\frac{1}{10}$ آن انتخاب می‌شود و سعی برآن است که فاصله MN را تا حدامکان ثابت نگهداشته و در موقعی که نتوان مقادیر افت پتانسیل را اندازه‌گیری نمود فاصله MN را افزایش داد. با توجه به طرز قرار گرفتن الکترودها نسبت به هم، آرایشهای مختلفی بشرح زیر بوجود می‌آید:

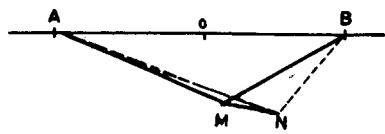
7 - pole-dipole

8 - dipole-dipole

9 - gradient

۱-۲-۵-۲ آرایه چهار قطبی غیرخطی نامتقارن

اگر دو الکترود پتانسیل روی یک خط نبوده و نسبت به مرکز AB (نقطه O) قرینه نباشد (شکل ۲-۸) ، چهار قطبی غیرخطی نامتقارن شلومبرژه تشکیل می شود .



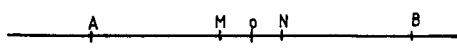
شکل ۲-۸ آرایش چهارقطبی غیرخطی نامتقارن شلومبرژه

در این آرایش ضریب هندسی به صورت زیر نوشته می شود (نگا . ۱-۲)

$$K = 2\pi \frac{1}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right] - \left[\frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right]}$$

۲-۲-۵-۲ آرایه چهارقطبی خطی متقارن

اگر الکترودهای فرستنده جریان و پتانسیل نسبت به نقطه O قرینه بوده و روی یک امتداد قرار داده شوند آرایش چهارقطبی خطی متقارن شلومبرژه بوجود می آید (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹ آرایش چهارقطبی خطی متقارن شلومبرژه

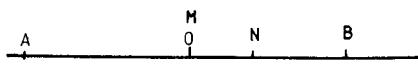
در اینجا :

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

۳-۲-۵-۲ آرایه چهار قطبی خطی نامتقارن

اگر الکترودهای A و B نسبت به نقطه O قرینه باشند و الکترودهای M و N نسبت به نقطه O قرینه نباشند، آرایش چهارقطبی خطی نامتقارن بوجود می‌آید (شکل ۱۰-۲). در حالت خاص که یکی از الکترودهای پتانسیل روی مرکز O قرار گرفته باشد ضریب K از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$k = 2\pi \frac{AN \cdot BN}{MN}$$



شکل ۱۰-۲ آرایش چهارقطبی خطی نامتقارن شلومبرژه

۳-۵-۲ آرایه هامل

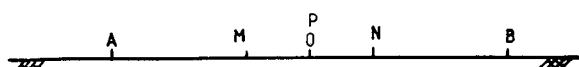
در شرایطی که گسترش کابلها در آرایه شلومبرژه به علت عوارض سطح زمین دارای محدودیت باشد، می‌توان الکترود B را عمود بر امتداد گسترش اصلی و در فاصله‌ای بیش از OA قرار داد. در این صورت آرایه حاصل آرایه هامل خوانده می‌شود. در این آرایه ضریب هندسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$K = \frac{\pi}{2MN} (40A^2 - MN^2)$$

۴-۵-۲ آرایه لی

در این نوع آرایه علاوه بر دو الکترود جریان A و B و دو الکترود پتانسیل M و N که نسبت به مرکز O قرینه هستند از یک الکترود پتانسیل اضافی که در وسط MN و روی مرکز O قرار گرفته استفاده می‌شود. فاصله بین الکترودها مانند آرایه ونر به ترتیب زیر می‌باشند (شکل ۱۱-۲).

$$MP = PN = \frac{a}{2}; AM = MN = NB = a$$



شکل ۱۱-۲ آرایه لی

مقاومت ویژه برای هر AB یکبار از اختلاف پتانسیل بین M و P و بار دیگر از اختلاف پتانسیل بین P و N بدست می‌آید یعنی :

$$\Delta V_1 = V_p - V_M \quad \Delta V_2 = V_N - V_p$$

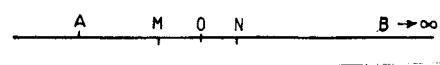
در صورت یکنواخت بودن زمین در دو طرف الکترود P، خواهیم داشت :

$$\rho_a = 4\pi a \frac{\Delta V_1}{I} = 4\pi a \frac{\Delta V_2}{I}$$

۵-۵-۲ آرایه قطبی - دوقطبی یا سه الکترودی

در این آرایه یکی از الکترودهای فرستنده جریان در فاصله نسبتاً زیادی از سایر الکترودها قرار داده می‌شود تا اثر پتانسیل ناشی از آن به حداقل ممکن برسد. در این حالت اگر $MN=AM=a$ باشد آرایه سه الکترودی متقارن به وجود می‌آید (شکل ۱۲-۲).

$$\rho_a = 4\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

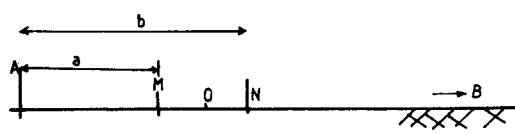


شکل شماره ۱۲-۲ آرایه سه الکترودی متقارن

در این حالت ضریب K از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$K = 4\pi a$$

در صورتی که AM برابر MN نباشد ($AM=a$ و $MN=b$) آرایه قطبی-دوقطبی نامتقارن نامیده می‌شود (شکل ۱۳-۲).



شکل ۱۳-۲ آرایه قطبی - دوقطبی نامتقارن

ضریب K در اینجا :

$$K = 2\pi \frac{a \cdot b}{(b-a)}$$

است.

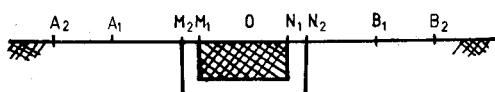
توجه :

بجز آرایه‌های ونر، شلومبرژه و هامل، سایر آرایه‌ها در مسایل خاص و استثنائی کاربرد دارند.

۶-۵-۲ برتریها و نابرتیریهای آرایه‌های شلومبرژه و ونر

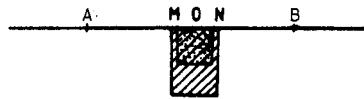
برتریها و نابرتیریهای آرایه‌های شلومبرژه و ونر بشرح زیر خلاصه می‌شود:

آرایه ونر. در این آرایه فواصل الکترودها با هم برابرند، به عبارت دیگر فاصله الکترودهای پتانسیل M و N همیشه برابر $\frac{1}{3}$ طول AB است. بدین ترتیب اندازه‌گیری ΔV سریع و آسان انجام می‌گیرد. در ضمن به علت بزرگ بودن نسبی مقادیر ΔV اندازه‌گیری شده، دقت اندازه‌گیری زیاد است. از طرف دیگر چون فاصله MN زیاد است، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده تحت تاثیر تغییرات جانبی قرار می‌گیرد. بنابراین در هر اندازه‌گیری، علاوه بر تغییرات مقاومت ویژه از سطح به عمق، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی زمین بین M₁M₂ و N₁N₂ نیز در اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارد (شکل ۱۴-۲). همچنین به علت بزرگی فاصله MN جریانهای تلویک می‌تواند بر مقادیر ΔV اثر گذارد و در نتیجه تغییرات پتانسیل مربوط به یک AB معین در این آرایه از سایر آرایه‌ها که فاصله MN نسبت به AB در آنها بسیار کوچک است زیادتر خواهد بود.



شکل ۱۴-۲ تأثیر تغییرات جانبی مقاومت ویژه در آرایه ونر

آرایه شلومبرژه. چون در این آرایه فاصله MN نسبت به AB کوچک است (حدود $\frac{1}{5}$ تا $\frac{1}{10}$)، با ازدیاد فاصله AB مقدار ΔV کوچک شده، اندازه‌گیری آن دشوار، و دقت اندازه‌گیری کم می‌شود. از طرف دیگر چون فاصله MN برای گسترهای از AB ثابت و کوچک است لذا تغییرات جانبی مقاومت ویژه قطعه‌ای از زمین که بین M و N قرار گرفته حداقل می‌باشد (شکل ۱۵-۲).



شکل ۲-۱۵ تاثیر تغییرات جانبی مقاومت ویژه بر آرایه شلومبرژه

از طرفی چون الکترودهای MN نسبت به نقطه O قرینه و دور از A و B می‌باشند لذا اثر پتانسیل الکترودهای M و N و شرایط سطحی روی آنها حداقل است. بعلت کوچک بودن فاصله M و N از هم، جریانهای تلویک کمتر روی آنها اثر می‌گذارد. از مزایای دیگر این روش آشکارسازی اثر عوامل سطحی می‌باشد که با تغییر فاصله MN بازاء فاصله ثابتی از AB میسر می‌گردد.

۶-۲ شیوه‌های صحراوی

بسته به هدف بررسیهای مهندسی، در روش مقاومت ویژه از شیوه‌های متفاوتی استفاده می‌شود که مهمترین آنها به شرح زیر است:

۱-۶-۲ شیوه گمانهزنی الکتریکی^۱

گمانهزنی الکتریکی موقعي به کار گرفته می‌شود که منظور بررسی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از سطح به عمق باشد. در این شیوه در یک ایستگاه فاصله بین الکترودهای فرستنده جریان تدریجی "افزایش داده می‌شود و در هر اندازه‌گیری مقدار مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه می‌شود. حد افزایش طول AB به عمق مورد نظر بستگی دارد که با توجه به وضعیت زمین‌شناسی منطقه و عمق نفوذ جریان برآورد می‌شود. در این شیوه بر حسب نیاز معمولاً "از آرایه‌های ونر و شلومبرژه استفاده به عمل می‌آید.

نمودار تغییرات مقاومت ویژه بدست آمده معمولاً $\frac{AB}{2}$ با مقیاس لگاریتمی به ترتیب بر روی محورهای OY و OX نشان داده می‌شود. منحنی حاصل، نمودار گمانهزنی الکتریکی (دیاگرام سونداث الکتریکی) نامیده می‌شود.

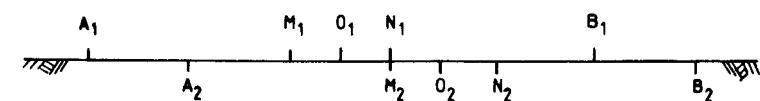
نمودارهای گمانهزنی الکتریکی هر آرایه با منحنی‌های استاندارد یا سرمنحنی‌های آرایه مربوط مقایسه و مقاومتهاي ویژه الکتریکی حقیقی محاسبه می‌گردد. بنابراین هر گمانه الکتریکی معرف نحوه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به عمق در نقطه برداشت است.

روند افزایش طول AB بسته به هدفهای بررسی متفاوت است و معمولاً برای فواصل اندازه‌گیری AB ضریب عددی ۷/۲ منظور می‌شود. با انتخاب این ضریب در هر چرخه از محور لگاریتمی معمولاً ۷ نقطه اندازه‌گیری با توزیع تقریباً یکنواخت قرار می‌گیرد.

۲-۶-۲ شیوه پروفیل زنی الکتریکی^۱

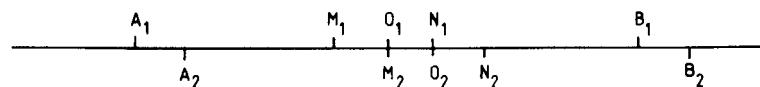
از این شیوه برای تعیین تغییرات مقاومت ویژه در عمق تقریباً ثابت و در امتداد خط برداشت استفاده می‌شود. از این رو به هنگام اندازه‌گیری، فاصله بین الکترودهای فرستنده جریان و طول MN متناسب با عمق مورد نظر انتخاب شده و ثابت نگهداشته می‌شود. اندازه‌گیری در امتداد خط برداشت به گونه‌ای صورت می‌گیرد که تمامی آن با فواصل MN پوشش داده شود. این کار به دو طریق انجام می‌پذیرد، پروفیل زنی ساده و پروفیل زنی تکراری.

در پروفیل زنی ساده فواصل نقاط برداشت برابر فاصله MN خواهد بود (شکل ۱۶-۲).



شکل ۱۶-۲ نحوه جابجایی الکترودها در شیوه پروفیل زنی ساده

در پروفیل زنی تکراری فواصل نقاط برداشت نصف MN است. به عبارت دیگر همواره به اندازه $\frac{MN}{2}$ لپوشی خواهیم داشت (شکل ۱۷-۲).



شکل ۱۷-۲ نحوه جابجایی الکترودها در شیوه پروفیل زنی تکراری

مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه ظاهری بروی محور قائم بر حسب اهم متر و فاصله نقاط برداشت بروی محور افقی بر حسب متر آورده می‌شود. بدین ترتیب نمودار حاصل نمایانگر تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای عمق ثابت در طول خط برداشت می‌باشد.

۷-۲ تجهیزات صحرایی

تجهیزات صحرایی مورد نیاز در روش مقاومت ویژه الکتریکی بشرح زیر است:

- چشمeh (مولد) جریان الکتریکی
- وسائل اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل
- الکترودهای جریان و پتانسیل
- کابل‌های اتصال جریان از چشمeh به الکترودهای جریان
- کابل‌های رابط
- وسایل کمکی از قبیل: متر و خط کش، ماشین حساب، ارتفاع سنج، قطب نمای زمین شناسی، جعبه ابزار، مجموعه‌ای از پریزها، دوربین صحرایی، چکشهای بزرگ و کوچک و وسایل کمکهای اولیه.

۱-۷-۲ چشمehهای جریان الکتریکی

چشمehهای جریان الکتریکی از نوع مستقیم (dc) و یا متناوب (ac) می‌باشند.

(الف) چشمeh جریان مستقیم

برای تولید جریان الکتریکی مستقیم از چند راه عمل می‌شود:

- جریان مستقیم از باتری‌های خشک که به طور سری بهم متصل شده و مجموعاً تا حدود ۷۰۰-۸۰۰ ولت ایجاد می‌نماید.
- جریان مستقیم از باتری ۱۲ ولت که توسط واگردانگر^۱ با قدرتهای مختلف ۲۵۰، ۲۵۰ یا ۷۵۰ یا ۱۰۰۰ وات، شدت جریانی تا چند آمپر و اختلاف پتانسیلی تا حدود ۱۰۰۰ ولت تولید می‌کند.

1 - converter

(ب) چشمی جریان متناوب

بعضی از دستگاهها با جریان متناوب (ac) قادر به اندازه‌گیری هستند. این جریان توسط چشمی‌هایی که به همین منظور ساخته شده‌اند ایجاد می‌شود. فرکانس‌های بکار گرفته شده معمولاً "پایین (تا ۲۵ هرتز) می‌باشد.

عمق نفوذ جریان متناوب معمولاً "با فرکانس نسبت عکس دارد. یعنی در زمینی با مقاومت ویژه الکتریکی معین هر چه فرکانس جریان کمتر باشد عمق نفوذ بیشتر است (تلفورد و همکاران، ۱۹۸۴):

$$P = 500 \sqrt{\rho/f}$$

که در آن P مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم متر، f فرکانس بر حسب هرتز و ρ عمق نفوذ جریان بر حسب متر است.

۲-۷-۲ دستگاه‌های اندازه‌گیری

دستگاه‌های اندازه‌گیری شدت جریان و پتانسیل که در کارهای اکتشافی بکارمی روند تحت نامهای مختلف و با مشخصات فنی متفاوت ساخته شده‌اند. آنچه در تمام این دستگاهها باید مورد توجه قرار گیرد حساسیت، قدرت و هماندهی^۱ دستگاه است.

حساسیت دستگاه عبارت است از دقت اندازه‌گیری دستگاه . معمولاً " دستگاهها باید بتوانند چند میلی آمپر و چند صدم میلی ولت را اندازه‌گیری کنند.

قدرت دستگاه بیانگر حداکثر توان دستگاه در شرایط مناسب اندازه‌گیری است.

هماندهی دستگاه بیانگر این مطلب است که مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه باید طی اندازه‌گیریهای تکراری ثابت باشد.

در تمام دستگاه‌های ژئوالکتریک اندازه‌گیری‌ها یا بطور مستقیم و یا به صورت تعادلی (روش صفر^۲) که در آن با ایجاد جریان الکتریکی مخالف، جریان ارسالی به زمین را به حالت تعادل در می‌آورند، انجام می‌گیرد. معمولاً " دستگاهها برای حذف اثر خودپتانسیل (SP) مجهر شده‌اند.

1 - fidelity

2 - zero method

۳-۷-۲ الکترودها

الکترودهای جریان معمولاً به صورت میله‌های فلزی و الکترودهای پتانسیل از نوع فلزی یا ظروف سفالی پر شده از الکترولیت می‌باشند.

مقاومت الکتریکی در محل یک الکترود متصل به زمین به دو عامل مهم بستگی دارد:

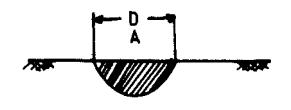
- ابعاد هندسی الکترود

- مقاومت ویژه الکتریکی زمین اطراف الکترود

بنابراین ناهمگنی‌های دور از اتصالات زمین (الکترودها) تاثیری در مقاومت این الکترودها نخواهد داشت.

برای آشنایی در زیر به مقاومت الکتریکی چند نمونه از الکترودها اشاره می‌شود:

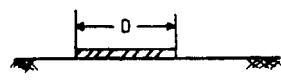
مقاومت الکترود بشکل نیم کره که در زمین چال شده است (شکل ۱۸-۲) برابر است با:



شکل ۱۸-۲ الکترود نیم کره که در زمین چال شده است.

$$R_A = \frac{\rho}{\pi D}$$

مقاومت الکترود بشکل صفحه‌ای به قطر D (شکل ۱۹-۲) برابر است با:



شکل ۱۹-۲ الکترود صفحه‌ای به قطر D

$$R_A = \frac{\rho}{2D}$$

مقاومت الکترود استوانه‌ای به طول l و سطح مقطع πa^2 عبارت است از:

$$R = \frac{\rho \ln(2l/a)}{2\pi a}$$

۴-۷-۲ کابلها

کابلهای مورد استفاده در روش مقاومت ویژه تک سیم هستند و باید دارای خواص زیر باشند:

- کم بودن مقاومت ویژه الکتریکی
- استحکام در مقابل کشش
- مقاوم بودن پوشش در مقابل سرما و گرما و کشیده شدن در روی زمین

چون در روش مقاومت ویژه ارسال شدت جریان و اندازه‌گیری پتانسیل هر دو با مقادیر کم صورت می‌گیرد، لذا باید مقاومت ویژه سیم نیز کم باشد. برای چنین کابلی معمولاً "از سه یا چهار رشته سیم مسی بقطر $4/0$ میلیمتر که مقاومت ویژه آن بسیار کم است استفاده می‌شود (حدود ۲۰ تا ۴۰ اهم در طول یک کیلومتر). برای استحکام این سیمهای مسی در مقابل کشش، معمولاً "از سه رشته سیم فولادی به قطر $4/0$ میلیمتر استفاده می‌شود.

مجموعه سه رشته سیم فولادی جهت استحکام و چهار رشته سیم مسی برای هدایت جریان الکتریکی در یک پوشش از جنس PVC به قطر مجموعاً $3 \text{ تا } 4$ میلیمتر قرار داده می‌شود و مجموعاً "دارای مقاومت الکتریکی در حدود ۳۰ تا ۴۰ اهم در طول یک کیلومتر می‌باشد. فرسودگی و زدگی کابلها باعث نشت جریان الکتریکی به زمین، کم شدن جریان و تغییر در موقعیت واقعی A و B می‌شود که در نتیجه اندازه‌گیری ΔV نادرست و بالنتیجه محاسبه ρ_a دچار خطأ خواهد شد.

۸-۲ گروه صحراایی

گروههای صحراایی بسته به نوع بررسی متفاوت هستند. به طور کلی مشخصات یک گروه صحراایی شامل موارد زیر است:

۱-۸-۲ پرسنل

یک گروه صحراایی شامل یک نفر تکنسین یک نفر مهندس ژئوفیزیک و متناسب با عملیات صحراایی بین ۲ تا ۷ نفر کارگر می‌باشد. تکنسین و کارگران در تمام مدت عملیات صحراایی با گروه کار می‌کنند و مهندس سرپرست اکیپ، برنامه‌ریزی و کنترل برنامه‌ها را بعهده خواهد داشت. مهندس مسئول موظف است ابتدا نقاط برداشت در روی نقشه‌ها را با محل آنها بر روی زمین تطبیق داده و در پایان، اندازه‌گیری‌ها را کنترل و از صحت انجام عملیات صحراایی اطمینان کامل حاصل نماید.

۲-۸-۲ ترابری

حداقل وسیله نقلیه جهت حمل وسایل اندازه‌گیری و پرسنل از محل اقامت گروه تا هر ایستگاه شامل یک خودروی صحرایی خواهد بود. برای سرعت بخشیدن به نقطه‌یابی و برداشت اطلاعات زمین‌شناسی و بازدید منطقه، می‌توان از یک وسیله نقلیه مناسب دیگر برای مهندس مسئول گروه استفاده نمود.

۳-۸-۲ بازده عملیات

بازده عملیات به عمق مورد مطالعه (طول AB)، نحوه بررسی، فواصل بین ایستگاهها، نوع آرایه و شرایط منطقه بستگی دارد و بر حسب تعداد سوندazer در اکیپ روز مشخص می‌شود. بازده اندازه‌گیری پروفیل زنی بستگی به طول AB و MN، دشواری مسیر برداشت، نوع آرایه و عوامل مختلف منطقه دارد و بر حسب تعداد اندازه‌گیری در اکیپ روز مشخص می‌شود.

در تمام برداشت‌های صحرایی دور بودن محل مطالعه یکی از مهمترین مسائلی است که گاهی بیش از ۵۰٪ زمان را به خود اختصاص می‌دهد. به طور کلی برآورد بازده کار صحرایی به عوامل مختلف از قبیل شرایط کلی کار، آب و هوا، دوری منطقه و نقاط اندازه‌گیری، نوع مطالعه و بکارگیری روش‌های مختلف بستگی داشته و متغیر می‌باشد که پس از بازدید از منطقه و برنامه‌ریزی مشخص می‌گردد.

۴-۸-۲ وسایل اندازه‌گیری

وسایل اندازه‌گیری صحرایی و مشخصات فنی آنها با توجه به نوع مطالعه، عمق مورد بررسی و سرعت انجام عملیات صحرایی انتخاب می‌شود. در انجام اندازه‌گیریهای صحرایی نکات زیر باید رعایت شود:

کنترل وسایل، شبکه‌بندی اندازه‌گیری‌ها، نحوه گسترش کابلها، کنترل کابلها و کنترل اتصالها.

۵-۸-۲ نقشه‌ها و مدارک مورد نیاز

چون بررسیهای ژئوفیزیکی اصولاً "در موقعی کارآیی دارند" که بتوان سایر اطلاعات از قبیل اطلاعات زمین‌شناسی و حفاری را با آن تلفیق نمود، لذا جدا از برنامه‌ریزی بررسیهای ژئوفیزیکی، کلیه مطالعات موجود و نتایج آنها جهت برنامه‌ریزی صحرایی، پردازش داده‌ها و تفسیر آنها مورد احتیاج گروههای ژئوفیزیکی است.

بهنگام برنامه‌ریزی و عملیات صحرایی، در اختیار داشتن مدارک زیر (در صورت موجود بودن) ضروری است:

- نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس مناسب.
- نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس مناسب.
- نقشه‌های هیدروژئولوژی شامل نقشه هم عمق سطح آب، محل چاههای اکتشافی، قناتها و رودخانه‌ها.
- ارائه حداقل دو مقطع از نقشه‌های فوق در محلهای مورد نظر منطقه که در صورت امکان با استفاده از رخمنوهای محلی تهیه می‌شود.
- نقشه تغییرات کیفی آب زیرزمینی.
- اطلاعات مربوط به کلیه مطالعات و بررسی‌های ژئوفیزیکی قبلی.
- اطلاعات خاکشناسی کشاورزی یا خاکشناسی برای مهندسی زمین‌شناسی (راهها، تونلهای کانالها و ...).
- چاه‌پیمائی و نگار زمین‌شناسی چاههای اکتشافی و بهره‌برداری در منطقه.

۶-۸-۲ برنامه‌ریزی بررسی‌های ژئوکتریکی

برنامه‌ریزی برداشت‌های صحرایی نقش مهمی در پردازش و تفسیر دارد. بعارت دیگر در موقع تهیه برنامه باید پاسخهای احتمالی بررسی‌های صحرایی قبل "پیش‌بینی و موردنظر قرار گیرد. عملیات صحرائی ژئوفیزیکی کاری مجزا و جدا از تفسیر نیست و تعیین محل مناسب اندازه‌گیریها نقش مهمی در کیفیت تفسیر دارد. برنامه‌ریزی در هر بررسی به دو عامل مهم اقتصادی و زمان محدود می‌گردد، که برمبنای این دو عامل تراکم گمانه‌های الکتریک و فواصل بین خطوط برداشت و قسمت‌های دیگر آن انجام می‌شود.

با استفاده از نقشه‌ها و بررسی‌هایی که قبل انجام گردیده و شناخت کامل منطقه مورد بررسی، از نظر ژئوفیزیکی، برنامه‌ریزی صحرایی و انتخاب روش و آرایه‌ها بشرح زیر خواهد گرفت:

- انتخاب شیوه یا شیوه‌های مقاومت ویژه مناسب بر حسب مورد که بتواند مسئله موردنظر را بررسی کند.
- تعیین فواصل بین نقاط برداشت (گمانه‌های الکتریکی).
- تعیین فواصل بین خطوط برداشت.
- تعیین فواصل AB و MN و تعیین امتداد و جهت برداشت در پروفیل زنی.
- تعیین محل و راستای خطوط برداشت.
- تعیین محل نقاط برداشت برای انجام گمانه‌های الکتریکی نمونه جهت شناسائی مقاومت‌های حقيقی سازندهای زمین‌شناسی مختلف در محل چاههایی که نگار زمین‌شناسی و یا اطلاعات هیدروژئولوژی مشخص دارند یا بر روی رخمنون سازندهای زمین شناختی.

۹-۲ تفسیر داده‌های صحرائی

تفسیر داده‌های صحرائی عبارت است از مقایسه و تطبیق نتایج داده‌های صحرائی با نتایج مطالعات زمین‌شناختی و هیدرولوژی و بعبارت دیگر با مسائل مهندسی زمین‌شناسی در منطقه.

تفسیر داده‌های ژئوالکتریکی در دو مرحله فیزیکی و زمین‌شناختی و به دو صورت کیفی و کمی انجام می‌شود.

در مرحله فیزیکی، داده‌ها از نظر پارامترهای فیزیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند و طی آن حدود و مرز نواحی و لایه‌ها براساس مقاومت ویژه الکتریکی آنها معین می‌شود. در مرحله دوم پارامترهای فیزیکی بدست آمده در مرحله اول با زمین‌شناسی منطقه تلفیق داده می‌شود.

تغییرات کیفی مقاومت ویژه الکتریکی یکی از مهمترین پارامترهایی است که وضع عمومی منطقه را روشن می‌سازد. این تغییرات بر روی نقشه‌های کیفی مانند نقشه‌های هم مقاومت ویژه ظاهری ارزیابی می‌شود. در تفسیر کمی برای بدست آوردن مقاومت ویژه حقیقی و ضخامت لایه‌ها از منحنی‌های استاندارد (سرمنحنی^۱) و نمودار گمانه‌هایی که بر روی سازندهای زمین‌شناختی انجام شده‌اند و یا در محل حفاری‌های آنها شناخته شده‌اند استفاده می‌گردد. این نتایج کمی به صورت مجموعه‌ای از مقطعهای ژئوالکتریک، نقشه هم عمق سنگ کف، نقشه هم ضخامت آبرفت و نقشه مقاومت عرضی (RT) نشان داده می‌شود.

۱-۹-۳ منحنی‌های استاندارد

چون اندازه‌گیری‌هایی که در زمین با شیوه گمانزنی الکتریکی انجام می‌گیرد به صورت نموداری از تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری بر حسب فواصل بین الکترودهای فرستنده جریان و الکترودهای پتانسیل است، لذا نمودارها باید بر حسب ضخامت و مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی لایه‌ها از سطح زمین تا عمق نفوذ جریان تفسیر گردد. سریعترین و راحت ترین راه برای تفسیر این نمودارها، محاسبه منحنی‌های استاندارد برای لایه‌هایی با ضخامت و مقاومت ویژه الکتریکی از قبل مشخص شده می‌باشد. برای بدست آوردن این منحنی‌ها، زمینی را با دو، سه و یا چهار لایه افقی با ضخامت و مقاومت‌های ویژه حقیقی معین در نظر گرفته و برای هر کدام منحنی‌های مربوط محاسبه گردیده است (تلفورد^۲ و همکاران، ۱۹۸۴). اولین سری منحنی‌های استاندارد برای دو لایه در سال ۱۹۴۳ توسط رومن منتشر گردید. در سال ۱۹۳۷ رومن^۳، وتزل و میوری^۴ حدود ۱۰۰ منحنی استاندارد برای ۳ لایه منتشر کردند. این سری تماماً با روش و نر محاسبه گردیده است. در سال ۱۹۵۵ کمپانی ژنرال ژئوفیزیک تعداد ۴۸۰ منحنی استاندارد

1 - master curve

2 - Telford et.al.

3 - Roman

4 - Wetzel and Murry

دو لایه و سه لایه با آرایه شلومبرژه محاسبه و منتشر کرد و سپس منحنی های استانداردی برای چهار لایه به تدریج در سالهای بعد منتشر گردیده است. سپس منحنی های استاندارد به روش ونر بازنگری و به صورت ۲۰ منحنی استاندارد برای دو لایه و ۳۵۰ منحنی برای سه لایه و در حدود ۳۰۰۰ منحنی برای چهار لایه محاسبه و منتشر گردیده است.

در حال حاضر جهت اکتشافات ژئوالکتریکی، دوسری از منحنی های استاندارد با توجه به روش مورد استفاده بیشتر کاربرد دارد:

- برای نمودارهای گمانهزنی الکتریکی به روش چهارقطبی شلومبرژه از سری منحنی های کمپانی CGG (کمپانی ژنرال ژئوفیزیک) منتشر شده در سالهای ۱۹۶۳ و ۱۹۶۵ استفاده می شود. مقیاس چرخه لگاریتمی نمودارها و منحنی های استاندارد باید همانند باشند.
- برای نمودارهای گمانهزنی الکتریک به روش ونر از سری منحنی هایی که توسط دانشگاه مینوسوتا آمریکا منتشر شده استفاده می گردد.

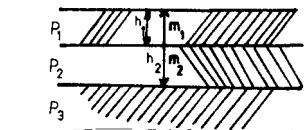
از آن تاریخ تا کنون منحنی زیادی به صورت استاندارد برای چهار لایه و حتی پنج لایه محاسبه شده است. همچنین در دانشگاههای بزرگ دنیا با استفاده از کامپیوتر اقدام به محاسبه و نگهداری منحنی های استاندارد شده است. چون در طبیعت پدیده های کمی و کیفی بسیار متغیر می باشند لذا حالت های خاص و کلاسیک آن به صورت استاندارد محاسبه گردیده تا بتوان مسائل رابا حالت های خاص محاسبه شده مقایسه و نتایج نزدیک به حقیقت را کشف نمود. تفسیر ژئوالکتریک نیز از این روش استفاده می نماید.

منحنی های استاندارد شلومبرژه برای مدل هایی با لایه های افقی و به ترتیب برای دو، سه و چهار لایه محاسبه گردیده اند.

- برای گروه بندی این منحنی ها در حالت سه لایه سه عامل مهم به شرح زیر در نظر گرفته شده اند (شکل ۲-۲۰)
- نسبت مقاومت ویژه الکتریکی لایه دوم به اول (ρ_2 / ρ_1)
 - نسبت ضخامت لایه دوم به اول (h_2 / h_1)
 - مقدار مقاومت ویژه لایه سوم (ρ_3) که برای آن نیز چهار حالت در نظر گرفته شده است :

$$\rho_3 = \infty , \quad \rho_3 = \frac{\rho_2^2}{\rho_1} , \quad \rho_3 = \rho_1 , \quad \rho_3 = 0 \quad m_1=h_1 \quad m_2=h_1+h_2$$

$$m_1=h_1 \quad m_2=h_1+h_2$$



شکل ۲۰-۲ مدل سه لایه زمین

برای نسبت مقاومت ویژه‌ها و نسبت ضخامت‌ها به ترتیب ضرایب زیر در نظر گرفته شده است:

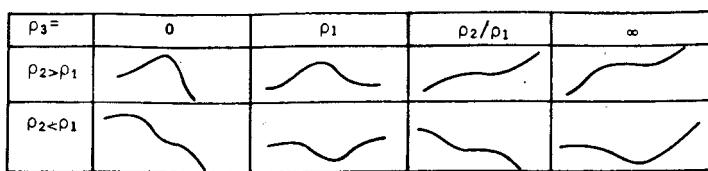
$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{39}, \frac{1}{19}, \frac{1}{9}, \frac{1}{4}, \frac{3}{7}, \frac{2}{3}, \frac{3}{2}, \frac{7}{3}, 4, 9, 19, 39$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 24$$

اگر برای هر نسبت $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ ، بازاء هر $\frac{h_2}{h_1}$ ، یک منحنی استاندارد تهیه و محاسبه شود ۱۲۰ منحنی حاصل خواهد شد و اگر چهار حالت مختلف برای ρ_3 در نظر گرفته شود در مجموع ۴۸۰ منحنی برای سه لایه به دست می‌آید.

این منحنی‌های استاندارد در هشت‌تایی کنگره اتحادیه اروپائی ژئوفیزیکدانهای اکتشافی^۱ (EAEG) در سال ۱۹۵۵ تسلیم گردید و در سال ۱۹۶۳ تجدید نظر و در اختیار کارشناسان قرار گرفت.

شکل ۲۰-۲ این منحنی‌های استاندارد را در ۸ گروه تقسیم‌بندی کرده است.



شکل ۲۱-۲ انواع نمودارهای استاندارد سوندazer الکتریک برای مدل سه لایه

در تمام این سری منحنی‌ها، نسبت ضخامت لایه اول و دوم بصورت $\frac{h_2}{h_1}$ روی منحنی‌ها آورده شده‌اند و ارتباط بین مقاومت لایه سوم با دو لایه دیگر نیز در هر منحنی مشخص شده است.

در منحنی‌های استانداردهای چهار لایه که سه لایه به ضخامت‌های مساوی $h_1 = h_2 = h_3$ دارند، مقاومت‌های ρ_1, ρ_2, ρ_3 به یکدیگر متفاوت و برای هر کدام یک سری منحنی‌های استاندارد محاسبه و به دست می‌آید.

نمونه‌هایی از منحنی‌های استاندارد آرایه چهارقطبی شلومبرژ برای مدل‌های دولایه در شکل ۲-۲ آورده شده است.

۲-۹-۲ آرایه نتایج

پس از گردآوری اندازه‌گیری‌های صحرایی، کلیه اطلاعات زمین‌شناختی، نتایج ستونهای زمین‌شناختی، اطلاعات هیدروژئولوژی، اطلاعات چاه پیمایی و نتایج مطالعات قبلی با تفسیر نمودارهای گمانه‌های الکتریکی تلفیق و به صورت نقشه‌ها، نمودارها و گزارش نهایی ارائه می‌گردند (نگا. نشریه استاندارد مطالعات الکتریک به روش مقاومت ویژه).

۱-۲-۹-۲ نقشه‌ها و نمودارهای کیفی

اندازه‌گیری‌های صحرایی با روش مقاومت ویژه بر روی نقشه‌ای که با مقایس متناسب با سایر مطالعات به طور اعم و خصوصاً "با نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه گردیده است تعیین محل می‌گردند و در صورتی که مطالعات ژئالکتریک تمام منطقه را زیرپوشش قرار دهد و تعداد گمانه‌های الکتریک انجام شده در منطقه مورد مطالعه به اندازه‌ای باشد که بتوان نتایج را بین آنها درونیابی^۱ نمود، نقشه‌ها و نمودارهایی کیفی براساس مقاومت ویژه ظاهری بشرح زیر تهیه خواهند گردید:

- نقشه هم مقاومت ویژه ظاهری

این نقشه که مشخص کننده تغییرات مقاومت ویژه ظاهری به ازای طول معینی از فاصله بین الکترودهای فرستنده جریان (AB) می‌باشد وضع عمومی منطقه را تا عمق متناسب با طول AB نشان می‌دهد. برای تعیین مناطق با مقاومت‌های ویژه ظاهری متفاوت و گسترش این نواحی در سطح و از سطح به عمق لاقل سه نقشه پربندی برای اعمق کم، متوسط و زیاد مورد لزوم است.

مقایسه این سه نقشه، گسترش نواحی مختلف با مقاومت‌های ویژه کم، متوسط و زیاد، وضع رسوبگذاری، جهت افزایش و یا کاهش شوری آب و گسترش سازندهای مختلف را در منطقه آشکار می‌سازد. این نقشه‌ها باید با آگاهی کامل از وضع زمین‌شناسی، نحوه قرار گرفتن لایه‌ها و جهت حرکت آبهای زیرزمینی تهیه گردد. در کلیه مطالعات ژئالکتریک، نحوه تهیه این نقشه‌ها باید در حدی باشد که جوابگوی ابهامات موجود بوده و ارائه نقشه‌ها در استفاده از هر نوع آرایه‌ای متناسب با طبیعت روش به کار رفته باشد.

1 - interpolation

- شبیه مقطع‌های مقاومت ویژه ظاهری

برای بررسی تغییرات مقاومت ویژه ظاهری از سطح به عمق در امتداد خط برداشتها، شبیه مقطع‌های هم مقاومت ویژه ظاهری تهیه می‌گردند. تفسیر این مقطع‌ها باید با آگاهی از لایه‌های سطحی و لایه‌های زیرزمینی انجام گیرد چراکه عدم توجه به مقاومت‌های لایه‌های سطحی و لایه‌های عمیق ممکن است نتایج گمراه‌کننده‌ای را به همراه داشته باشد.

۲-۹-۲ نقشه‌های کمی

نتیجه تفسیر گمانه‌های الکتریک راکه بر روی یک خط برداشت قرار دارند می‌توان به صورت مقطع‌های ژئوالکتریک (مقاومت ویژه حقیقی) نشان داد . با هماهنگ کردن این مقطع‌ها با زمین‌شناسی منطقه ، مقطع‌های ژئوفیزیکی - زمین‌شناسی بدست می‌آید .

"ضمناً" در این مقطع‌ها، ارتفاع هر ایستگاه و به طورکلی وضع توپوگرافی خط برداشت نسبت به مبداء رعایت می‌گردد. در این مقطع‌ها کلیه اطلاعات و محل حفاری‌ها با عمق و لایه‌های زمین‌شناسی آورده می‌شوند . ارتباط سازندگان سخت ، ارتباط آبرفت و سازندگان حاشیه منطقه و کلیه اطلاعات زمین‌شناسی روی این مقطع‌ها نشان داده خواهد شد .

- نقشه هم ضخامت آبرفت یا هم عمق^۱ سنگ کف

این نوع نقشه‌ها را وقتی می‌توان تهیه کرد که سنگ کف در تمام و یا اکثر نمودارهای گمانه‌های الکتریک بوضوح مشخص باشد و بتوان ضخامت رسوبات آبرفتی و یا عمق سنگ کف (هادی یا مقاوم) را در تمام سطح منطقه مورد مطالعه محاسبه ، و سپس منحنی‌های پربندی‌های هم ضخامت یا هم عمق سنگ کف را رسم و نقشه مورد نظر را تهیه نمود . با تفسیر این نقشه، وضع توپوگرافی سنگ کف و یا ابعاد هندسی آبخوان یا منابع قرضه یا روبار در سطح منطقه مورد مطالعه آشکار می‌گردد .

۲ - نقشه پربندی مقاومت عرضی

مقاومت عرضی (RT) لایه‌آبدار عبارت است از :
$$RT = (h-d)\rho$$
 که در آن h و ρ به ترتیب ضخامت آبرفت و مقاومت ویژه حقیقی آن و d سطح ایستابی آبهای زیرزمینی می‌باشد .

1 - isodepth map

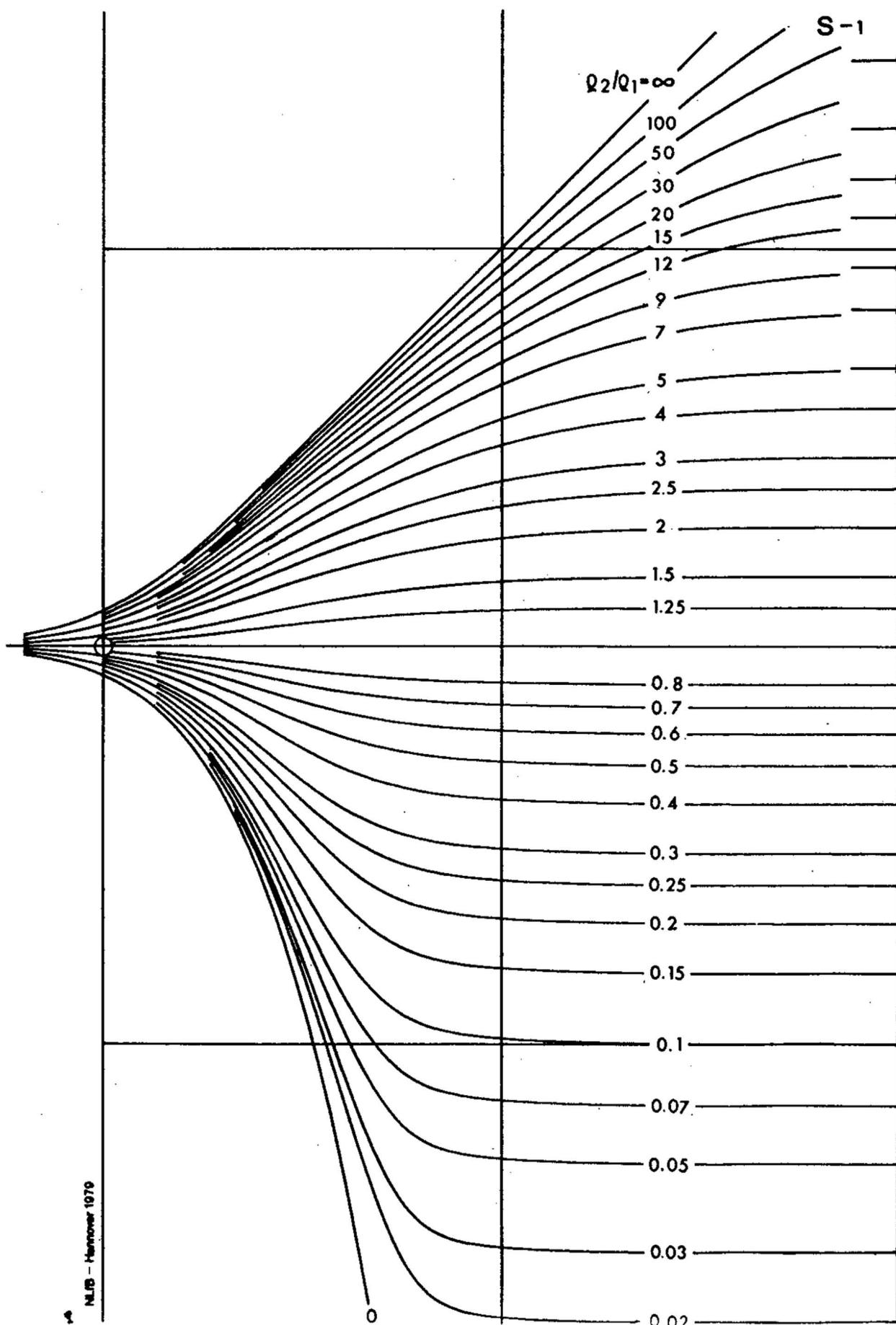
2 - transversal resistance map

برای تهیه نقشه مقاومت عرضی آبخوان باید اطلاعات عمق آب در منطقه و یا نقشه تغییرات سطح آبهای زیرزمینی منطقه در دسترس باشد.

تهیه این نقشه به مشخص کردن مسیر آبهای زیرزمینی ، مسیل‌های قدیمی رودخانه‌ای یا دره‌ها، مناطق مهم از نظر بهره‌برداری آبهای زیرزمینی و محل‌های تغذیه آبخوان کمک می‌نماید.

۱۰-۲ گزارش نهایی

بررسی‌های مقاومت ویژه بر حسب برنامه‌های انجام شده صحرائی و تفسیر نتایج همراه نقشه‌ها و نمودارها در گزارش نهایی به شرح مندرج در بخش استانداردها ارائه می‌گردد.



شکل ۲۴-۲ مجموعه منحنی های استاندارد دولایه برای آرایه شلومبرژه

مراجع :

Lavergne, Michel, 1957, Prospecting for ground-water by induced electrical polarization,
Geophysics, V. 22, no. 3, P. 660-687

Ogilvy and Kuzmina, 1969, Geophysical studies of Water Leakages from reservoirs,
Geophysical Prospecting V. 17, P. 36-62

Telford, W.M., et. al., 1984, Applied geophysics, Cambridge University Press.

Wetzel, W.W., and Mc Murry, H.V., 1937, A set of curves to assist in the interpretation of the
three-layer resistivity problem: Geophysics, v.2, P. 329-341

P. Lasfargues

Masson et C^{ie}, Paris 1957.

فارسی - انگلیسی

array	آرایه
skin effect	اثر پوست
electromagnetic (EM)	الکترومغناطیس
electrical profiling; continuous resistivity Profiling (CRP)	پروفیلزنی الکتریکی
telluric	تلوریک
self potential (SP)	خودپتانسیل
interpolation	درونیابی
dipole - dipole	دوقطبی - دوقطبی
ground penetrating radar	رادار نفوذکننده در زمین
Zero method	روش صفر
resistivity method	روش مقاومت ویژه
characteristics	سرشیها
master curves	سرمنحنیها
Schlumberger	شلو مبرژه
Arctic	شمالگان
Coefficient of anisotropy	ضریب ناهمسانگردی
longitudinal	طولی
transversal	عرضی
induced polarization(IP)	قطبیت القایی
pole - dipole	قطبی - دوقطبی
gradient	گرادیان
vertical electrical sounding (VES); electrical sounding	گمانهزنی الکتریکی
Lee	لی
apparent resistivity	مقاومت ویژه ظاهری
contour map	نقشه پریندی
transversal resistance map	نقشه مقاومت عرضی
isodepth map	نقشه هم عمق
converter	واگردانگر

Wenner	ونر
Hummel	هامل
fidelity	هماندھی
isotropic	ہمسانگرد
homogeneous	همگن

انگلیسی - فارسی

apparent resistivity	مقاومت ویژه ظاهری
Arctic	شمالگان
array	آرایه
characteristics	سرشتهها
Coefficient of anisotropy	ضریب ناهمسانگردی
continuous resistivity profiling (CRP)	پروفیلزنی الکتریک
contour map	نقشه پربندی
converter	واگردانگر
dipole - dipole	دوقطبی - دوقطبی
electrical profiling	پروفیلزنی الکتریکی
electrical sounding	گمانهزنی الکتریک
electromagnetic (EM)	الکترومغناطیس
fidelity	هماندهی
gradient	گرادیان
ground penetrating radar	رادر نفوذکننده در زمین
homogeneous	همگن
Hummel	هامل
induced polarization (IP)	قطبیش القابی
interpolation	درونيابی
isodepth map	نقشه عم عمق
isotropic	همسانگرد
Lee	لی
longitudinal	طولی
master curves	سرمنحنیها
pole - dipole	قطبی - دوقطبی
resistivity method	روش مقاومت ویژه
Schlumberger	شلو مبرژه
self potential (SP)	خودپتانسیل

skin effect	اثر پوست
telluric	تلوریک
transversal	عرضی
transversal resistance map	نقشه مقاومت عرضی
vertical electrical sounding (VES)	گمانهزنی الکتریکی
Wenner	ونر
Zero method	روش صفر