دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکدهٔ معدن و ژئوفیزیک

سمینار کارشناسی ارشد-گرایش ژئوالکتریک

عنوان:

سونداژزنی ژئوالکتریک با استفاده از آرایش شلومبرژه در آبهای زیرزمینی

(اصول ، تفسیر و کاربرد)

تدوین: مهدی رحمانی جوینانی

استاد راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم :

به پدر و مادر عزیزم

دیباچه

این کتاب "سونداژزنی ژئوالکتریک با استفاده از آرایش شلومبرژه در آبهای زیرزمینی[۱]" اولین بار تحت عنوان "تفسیر و اصول سونداژزنی الکتریکی با استفاده از جریان مستقیم[۲]" توسط انتشارات Elsevier در سال ۱۹۶۸ بوسیلهٔ نویسندهٔ مشهور و با سابقه از کتاب حاضر یعنی آقای پترا[۳] انتشار یافت. جلد پیشین اساسش روی سخنرانیها ، کارهای آزمایشگاهی و مشکلات صحرایی سونداژ الکتریکی برای دانشجویان ارشد اکتشافات ژئوفیزیک در انجمن تکنولوژی هندوستان سازماندهی شد. روش تفسیر جزبه جز[۴] در کتاب پیشین بر اساس تکنیک انطباق منحنی ها و همچنین اجتناب از کامپیوتر تا آنجا که عملی و قابل اجرا بود پایه ریزی شده بود. اساس تکنیک انطباق منحنی ها در استفاده از منحنی های کمکی[۵](برای مثال کارهای مونی و وتزل[۶] در سال۱۹۵۶و شرکت فرانسوی Compagnie Generale de Geophysiqe در سال ۱۹۵۵ ، EALG در سالهای ۱۹۶۳و۱۹۶۹) قرار داشت. در حال حاضر از ترکیب این منحنی های کمکی در روش غیر مستقیم[۷]، تفسیر مقدماتی استفاده می شود وپارامترهای تفیسر شده به وسیله این نمودارها به عنوان یک حدس نخستین[۸] برای روش مستقیم[۹] به وسیله کامپیوتر استفاده می شود.

توسعهٔ نرم افزارهای رایانه ای در طی سالیان اخیر ژئوفیزیکدانها را به استفاده از روش مستقیم، از طریق معکوس سازی داده های مقاومت ویژه مجبور کرده است به این طریق که داده های مقاومت ویژه ظاهری(صحرایی) به عنوان ورودی داده شده و مقادیر نهایی پارامترهای لایه (ضخامت هر لایه و مقاومت ویژه آن) به عنوان خروجی به دست می آید. از این رو برنامه های کامپیوتری مدلسازی معکوس و پیشرو[۱۰] در مسائل ژئوفیزیک، در کتاب حاضر به تفضیل گنجانده شده است. بنابراین این کتاب به دانشجویان ژئوفیزیک اکتشافی یک دید وسیع و تکنیکهایی ماهرانه از تفسیر منحنی سونداژ الکتریکی شلومبرژه(VES)[۱۱] را با یک دقت معقول، از یک عدد کمینه بین منحنی و یک عدد مناسب به دست آمده از نرم افزار برای یک هدف مشخص می دهد.

---

[1] Schlumberger Geoelectric Sounding in Ground Water
[2] Direct Current Geoelectric Sounding-Principles and Interpretation
[3] Petra
[4] Interpretation method detailed
[5] Master curves
[6] Moony and Wetzel
[7] Indirect approach
[8] Initial guess
[9] Direct approach
[10] Forward and Inversion problems
[11] Vertical Elecctrical Sounding

اگرچه این کتاب برای دانشجویان در نظر گرفته شده است، استفاده این کتاب می تواند برای زمین شناسان حرفه ای و ژئوفیزیکدانهایی که درگیر با کار سونداژزنی الکتریکی شلومبرژه برای اکتشاف آبهای زیرزمینی هستند نیز سودمند باشد .

مهندسین عمران بویژه آنهایی که به مسائل محیط زیست از قبیل ارزیابی یک زون زیرسطحی، فهمیدن عمق سنگ کف و غیره علاقمند هستند این کتاب یک کمک مفید و یک خودآموز کافی در حرفه آنهاست .

دانشمندان و مهندسین کشاورزی علاقمند به اکتشاف آبهای زیرزمینی برای آبیاری و دیگر پروژه های کشاورزی ، همچنین ممکن است به ارزش این کتاب پی ببرند .

فهرست

فصل اول

مقدمه:

ژئوالکتریک یک شاخهٔ شناخته شده از علم ژئوفیزیک می باشد. ژئوالکتریک باحالتهای الکتریکی زمین سروکار دارد و شامل بحث روی خواص الکتریکی سنگها و کانیها و تأثیر آنها روی پدیدهای مختلف ژئوفیزیکی به واسطهٔ اختلاف الکتریکی محیط می باشد. اکتشافات ژئوالکتریک یک شاخهٔ بزرگ از اکتشافات ژئوفیزیک است که در آن اصول ژئوالکتریکی برای برداشت زمین شناسی ساختارهای پنهان(مدفون) از جمله اکتشاف و پی جویی کانه سنگها ، کانی ها و نفت و همچنین در حل مسائل زمین شناسی مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد.

عقیده بر این بود که روشهای الکتریکی فقط برای اکتشافات کم عمق مناسب است. بنابراین اساساً برای مسائل ژئوفیزیک معدنی و مهندسی استفاده می شد. امروزه ولی با توسعهٔ روشهای جدید و تکنیکهای تفسیر ، عمق جستجو به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا کرده است و ثابت شده است که به وسیلهٔ روشهای ژئوفیزیکی (بویژه از طریق سونداژزنی دو قطبی) می توان با دقتی معقول تا عمق ۸ تا ۱۰ کیلومتر نیز اکتشاف انجام داد.

اکتشاف ژئوالکتریک شامل تکنیکها و اصول بسیار متفاوت و بکاربستن جریان ثابت و متغیر با منشأ طبیعی یا مصنوعی می باشد. یکی از متداولترن روشهایی که در اکتشاف ژئوالکتریکی مورد استفاده قرار می گیرد روش مقاومت ویژه است. در این حالت یک جریان مستقیم یا یک جریان با دامنهٔ فرکانس پایین بوسیلهٔ دو یا چند الکترود به زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل بین دو نقطه که بطور مناسب انتخاب شده با وصل بودن جریان در الکترودهای جریان اندازه گیری می شود. اختلاف پتانسیل حاصل از یک جریان ارسال شده به زمین، در واقع اندازه مقاومت الکتریکی زمین بین دو الکترود پتانسیل است. مقاومت اندازه گیری شده تابعی از وضعیت هندسی الکترودها و پارامترهای الکتریکی زمین است.

به طور کلی(از دید وسیع) اندازه گیریهای مقاومت ویژه را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد.در حالت اول، پروفیل زنی یا نقشه های هم مقاومت ویژه، در این حالت الکترودهای جریان و پتانسیل بدون هیچ تغییری در ترکیب هندسی آنها در امتداد یک خط جابه جا می شوند.

این روش، اطلاعاتی از تغییر زیر سطحی در یک عمق معین و همچنین تغییرات جانبی مقاومت را به ما می دهد. در روش دوم، که به نام سونداژزنی الکتریکی موسوم است، محلهای الکترودها عوض می شود البته با توجه به اینکه مرکز آرایش ثابت باقی می ماند. مرکز آرایش همان مرکز سونداژزنی محسوب می گردد. در این حالت مقادیر مقاومت اندازه گرفته شده در سطح زمین در واقع توزیع عمودی مقادیر مقاومت ویژه (البته بدون پیوستگی افقی) در یک مقطع زمین شناسی است. در این کتاب نویسنده فقط به اصول سونداژزنی مقاومت ویژه پرداخته است.

دو نوع ترکیب الکترودی وجود دارد که اغلب در سونداژزنی مقاومت ویژه مورد استفاده قرار می گیرد.(۱)حالتهای متقارن[1] (۲) دو قطبی، آرایه دو قطبی در کاوش بیش از یک کیلومتر مورد استفاده قرار می گیرد، آرایشهای متقارن (مثل ونر و شلومبرژه[2]) برای جستجو در عمق کمتر، مثل هیدروژئولوژی[3](چرخه آب در داخل زمین) مورد استفاده قرار می گیرد. جدا از آرایشهای متقارن، آرایه شلومبرژه امروزه در اکتشاف آبهای زیرزمینی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد، در جلد حاضر فقط آرایه شلومبرژه مورد بحث قرار می گیرد. اگرچه اساس آرایه ونر و دو قطبی به طور خلاصه در آغاز کار ذکر شده است. مطابق قاعده و به کمک کامپیوتر آخرین روش تفسیر منحنی سونداژ شلومبرژه در این کتاب مورد بحث قرار داده شده و همچنین کاربرد آن در اکتشاف آبهای زیرزمینی نشان داده شده است.

متن اصلی این کتاب به چهار فصل که بطور خلاصه در زیر شرح داده شده، تقسیم بندی میگردد.

فصل دوم: دربارهٔ اصول اساسی تئوری سونداژ ژئوالکتریکی شلومبرژه می باشد. درک پایه ای این فصل برای دانشجویان بخصوص در کارهای صحرایی ضروری است. این فصل به خلق یک پیش زمینه قوی برای شرح فصلهای بعدی کمک می کند. خواننده ای که پایهٔ ریاضی لازم جهت مفاهیم این فصل را ندارد، می تواند این فصل را نادیده بگیرد و در عین حال روشهای تفسیر را که در فصلهای بعدی شرح داده شده است، بدون هیچ مشکلی درک نماید.

فصل سوم: این فصل پیش زمینه ای مفصل و درست از تفسیر مقدماتی منحنی های سونداژ شلومبرژه را می دهد. در این فصل شرح کامل طریقه استفاده از منحنی ها و نمودارهای

---

1 Symmetrical
2 Wenner and Schlumberger
3 Hydrogeological

بازنگری شده و همچنین تئوری منحنی های دو لایه کمکی و نقشه های اِبرت[۴] آورده شده است. پارامترهای لایه های تفسیر شده بوسیله منحنی های کمکی به عنوان ورودی برای مقایسه با روش پیشرو و یا به عنوان حدس نخستین برای معکوس سازی داده های مقاومت ویژه درنظر گرفته می شود.

فصل چهارم: این فصل شامل نکات عمدهٔ روش معکوس سازی مقاومت ویژه در تفسیر نهایی کامپیوتری منحنی های صحرایی شلومبرژه ونیز دادن تغییرات درست در پارامترهای لایه ها می باشد. چندین روش سودمند معکوس سازی برای تفسیر کمی با برنامه هایش در ضمیمه کتاب آورده شده است. عملکرد برخی از این روشها با توجه به کارایی و کاربرد آنها با هم مقایسه گردیده است.

فصل پنجم: در عمل برخی کاربردهای صحرایی سونداژزنی شلومبرژه را در آبهای زیرزمینی شرح می دهد.

[4] Ebert charts

فصل دوم:

این فصل روی نظریهٔ انتشار جریان در داخل زمین با لایه بندی افقی بحث می کند. یک فهم درست از تئوری برای درک روشهای مختلف تفسیر که در فصلهای بعدی مورد بحث قرار می گیرد لازم است. برخی مفاهیم اساسی راجع به آنیزوتروپی[1] و مقاومت ویژه ظاهری بوسیله یک روش تقریبی محاسبهٔ مقاومت ویژه ظاهری معرفی می شود.

۲-۱ انتشار جریان در زمین همگن:

انتشار جریان در حالت معمولی براساس بقاء بار الکتریکی و به وسیله رابطهٔ زیرپایه گذاری شده است.

$$divJ = -\frac{\partial \rho'}{\partial t} \qquad (۲-۱)$$

که J چگالی جریان(A/m^2)، ρ' چگالی بار(C/m^3) است. رابطهٔ (۲-۱) همچنین به عنوان معادله پیوستگی[2] شناخته می شود. برای جریان ثابت معادله (۲-۱)به معادله (۲-۲) یعنی:

$$divJ = 0 \qquad (۲-۲)$$

تبدیل می شود.

اگر ρ مقاومت ویژه(ohm-m) و J چگالی جریان باشد. این دو پارامتر نسبت به شدت میدان الکتریکیE(V/m) رابطه ای دارند که بوسیله قانون اهم بصورت زیر بیان می شود:

$$\bar{J} = \frac{1}{\rho}\bar{E} = -\frac{1}{\rho} gradV \qquad (۲-۳)$$

برای محیط ایزوتروپیک (همسانگرد)، ρ یک تابع اسکالر وJ وE دو بردار هم جهت هستند. در محیط آنیزوتروپیک (ناهمسانگرد) در حالت کلی J وE هم جهت نیستند. در محیط آنیزوتروپیک قانون اهم در شرایط رسانندگی با یک تانسور ۶ مؤلفه ای متناسب است. انتشار جریان در حالت آنیزوتروپیک و دیگر جنبه های آن در ادامه فصل مورد بحث قرار می گیرد. برای محیط ایزوترپیک از معادله (۲-۳) و (۲-۲) داریم:

[1] Anisotropy
[2] Equation of continuity

$$div\left[\frac{1}{\rho}gradV\right]=0 \qquad (۲-۴)$$

یا:

$$grad\left[\frac{1}{\rho}\right]\times gradV+\frac{1}{\rho}divgradV=0 \qquad (۲-۵)$$

این یک معادله اساسی برای بررسی الکتریکی جریان مستقیم است. در یک زمین همگن ρ مستقل از جهت مختصات بوده و از این رو:

$$\nabla^2 V=0 \qquad (۲-۶)$$

این معادله لاپلاس[۳] است که می توان آن را از معادلات ماکسول نیز اقتباس کرد معادلات ماکسول[۴] بصورت زیر بیان می شود:

(۱) قانون فاراده[۵] : $\nabla\times\overline{E}+\frac{\partial B}{\partial t}=0$

(۲) قانون آمپر[۶] : $\nabla\times\overline{H}-\frac{\partial D}{\partial t}=J$

(۳) قانون پیچش[۷] : $\nabla\cdot\overline{B}=0$

(۴) قانون کولمب[۸] : $\nabla\cdot\overline{D}=\rho$

این معادلات به عنوان معادلات ماکسول شناخته می شوند. زیرا ماکسول اولین کسی بود که این قوانین فیزیکی را به شکل دیفرانسیلی پایه ریزی کرده و همچنین ارائه چگالی جریان جابه جایی برای بیان کلی میدانهای الکترومغناطیسی که امری عجیب به حساب می آمد از جمله کارهای ماکسول است . در این کتاب از سیستم MKS پیروی می شود که در این صورت واحدها عبارتند از :

B = القا مغناطیسی در واحد وبر بر مترمربع

H = شدت میدان مغناطیسی در واحد آمپر بر متر

E = شدت میدان الکتریکی در واحد ولت بر متر

---

[3] Laplaces equation
[4] Maxwells equation
[5] Faradays Law
[6] Amperes Law
[7] Solenoidal B
[8] Coulombs Law

D = جریان جابه جایی در واحد کولمب بر مترمربع

J = چگالی جریان در واحد آمپر بر مترمربع

$\overline{\rho}$ = چگالی بار الکتریکی در واحد کولمب بر مترمکعب

از مقایسهٔ J و $\frac{\partial D}{\partial t}$ چگالی جریان جابه جایی شناخته می شود.

معادلهٔ لاپلاس را می توان از یک حالت ویژه یا از نتیجه گیری مستقیم معادلات ریاضی ۱ تا ۴ ماکسول نیز به دست آورد . معادله ۱ را می توان بصورت زیر نوشت:

$$(\nabla \times E) + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \qquad (۲-۷)$$

در شرایط پایدار که تغییرات میدان مغناطیسی با زمان وجود ندارد (حالت ثابت) $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$ و معادله بالا بصورت زیر خلاصه می شود :

$$(\nabla \times E) = 0 \qquad (۲-۸)$$

معادله (۲-۸) به این معنی است که انتگرال خطی شدت میدان الکتریکی E به دور هر مسیر بسته برابر با صفر است. بنابراین چنین میدانی پایستار بوده و حالتی از وجود یک تابع اسکالر می باشد که گرادیان V برابر E است:

$$\overline{E} = -\nabla V \qquad (۲-۹)$$

از معادله (۴) داریم که:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho'}{\varepsilon} \qquad (۲-۱۰)$$

یا:

$$\nabla \cdot \nabla V = \nabla^2 V = -\frac{\rho'}{\varepsilon} \qquad (۲-۱۱)$$

(معادله پواسون[9])

در مراکز خالی از بار $\rho' = 0$ در نتیجه:

$$\nabla^2 V = 0 \qquad (۲-۱۲)$$

(معادله لاپلاس)

قبل از پرداختن به شرح انتشار جریان در زمین به معادله لاپلاس در مختصات قطبی و استوانه ای می پردازیم. هر چند که یادآوری معادله لاپلاس در مختصات دکارتی و استوانه ای آسان است ولی ما آنرا از جانشین سازی به طریقهٔ زیر به دست می آوریم.

---

[9] poisons equation

در مختصات دکارتی، استوانه ای و کروی داریم که:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{h_1h_2h_3}\left[\frac{\partial}{\partial u_1}\left(\frac{h_2h_3}{h_1}\frac{\partial V}{\partial u_1}\right)+\frac{\partial}{\partial u_2}\left(\frac{h_1h_3}{h_2}\frac{\partial V}{\partial u_2}\right)+\frac{\partial}{\partial u_3}\left(\frac{h_1h_2}{h_3}\frac{\partial V}{\partial u_3}\right)\right] \quad (۱۳-۲)$$

مقادیر پارامترها در دستگاههای مختلف با هم فرق می کند.

(۱) در دستگاه مختصات دکارتی داریم:

$$u_1 = x,\quad u_2 = y,\quad u_3 = z$$
$$h_1 = 1,\quad h_2 = 1,\quad h_3 = 1$$

(۲) در مختصات استوانه ای داریم:

$$u_1 = r,\quad u_2 = y,\quad u_3 = z$$
$$h_1 = 1,\quad h_2 = r,\quad h_3 = 1$$

(۳) در مختصات قطبی داریم:

$$u_1 = r,\quad u_2 = \theta,\quad u_3 = \varphi$$
$$h_1 = 1,\quad h_2 = r,\quad h_3 = r\sin\theta$$

در دستگاه مختصات استوانه ای معادله قبل به شکل زیر در می آید:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial V}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial \varphi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(r\frac{\partial V}{\partial z}\right)\right]=0$$

یا:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial V}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0 \quad (۱۴-۲)$$

و در مختصات کروی به شکل زیر در می آید:

$$\frac{1}{r^2\cdot\sin\theta}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\sin\theta\frac{\partial V}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta\frac{\partial V}{\partial \theta}\right)+\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial V}{\partial \varphi}\right)\right]=0$$

یا:

$$\frac{1}{r^2}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial V}{\partial r}\right)+\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta\frac{\partial V}{\partial \theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2}\right]=0 \quad (۱۵-۲)$$

معادلات (۲-۱۴) و(۲-۱۵) در سونداژزنی و پروفیل زنی مقاومت ویژه برای به دست آوردن اطلاعاتی از زیر سطح زمین خیلی مهم هستند.

با توجه به لازمه ارزیابی توزیع پتانسیل در لایه های زمین ابتدا باید پتانسیل نرمال را در سطح زمین نسبت به منشأ جریان محاسبه شود. در مختصات کروی با توجه به متقارن بودن نسبت به جهت φ و θ معادله لاپلاس(۲-۱۲) به صورت زیر تبدیل می شود.

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r}\right) = 0 \qquad (۲\text{-}۱۶)$$

با انتگرالگیری داریم:

$$V = C_1 + \frac{C_2}{r} \qquad (۲\text{-}۱۷)$$

به لحاظ اینکه پتانسیل به دست آمده در فاصلهٔ بی نهایت از منبع صفر است بنابراین ثابت انتگرال $C_1 = 0$ می شود. واضح است که سطوح هم پتانسیل کروی است و خطوط میدان الکتریکی به مانند خطوط جریان، شعاعی می‌باشد. چگالی جریان در فاصله r را می توان به صورت زیر نوشت:

$$J = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{\rho}\frac{C_2}{r^2}$$

بنابراین شارش کل جریان از یک سطح کروی به شعاع r برابراست با:

$$4\pi r^2 J = \frac{4\pi}{\rho} C_2$$

چون $4\pi r^2 J$ برابر با کل جریان وارد شده در نقطهٔ P است ثابت C_2 برابر می شود با $C_2 = \frac{I\rho}{4\pi}$.

در نتیجه برای حالت نیم فضا، وقتی جریان را به زمین همگن تزریق می کنیم شارش کل جریان از یک سطح نیم کره به شعاع r خارج می شود یعنی $4\pi r^2 = \frac{2\pi}{\rho} C_2$ که در نتیجه ثابت C_2 برابر با $\frac{I\rho}{2\pi}$ می شود.

بنابراین پتانسیل در هر نقطه از منشأ جریان در زمین همگن برابر است با:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi}\frac{1}{r} \qquad (۲\text{-}۱۸)$$

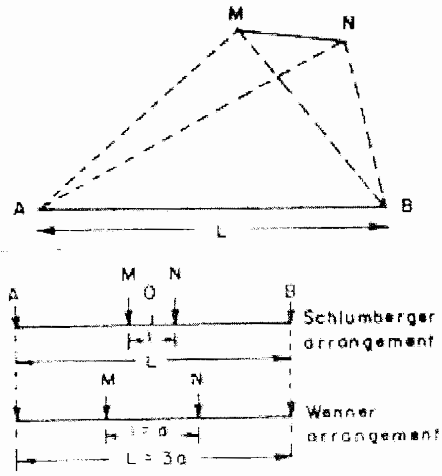
به عنوان تمرین به طور معمول به وسیله دو الکترود، یکی ورودی جریان و دیگری خروجی، جریان را به زمین افقی و همگن وارد می کنیم با بکارگیری معادله (۲-۱۸) مربوط به این دو قطبی به رابطهٔ (۲-۱۹) می رسیم:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \qquad (۲\text{-}۱۹)$$

که r_1 و r_2 بترتیب فاصله از الکترودهای جریان+ و- است.

۲-۲ اندازه گیری مقاومت ویژه

با در نظر گرفتن یک جریان مستقیم به شدت I وارد شده به زمین همگن و ایزوتروپ، به وسیله دو الکترود نقطه ای A و B مانند شکل (۲-۱) اختلاف پتانسیل بین دو نقطهٔ M و N روی سطح، با استفاده از فرمول (۲-۱۹) به صورت زیر به دست می آید:



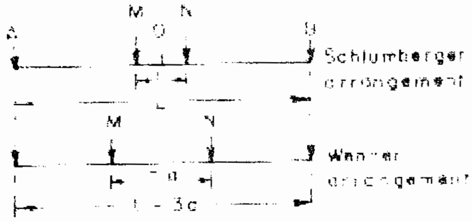
شکل(۲-۱): الکترودهای نقطه ای A و B الکترودهای جریان بوده و الکترودهای نقطه ایMوN الکترودهای اندازه - گیری اختلاف پتانسیل روی سطح زمین همگن و ایزوتروپ می باشد.

$$V = \frac{I\rho}{2\pi}\left[\left(\frac{1}{AM}-\frac{1}{BM}\right)-\left(\frac{1}{AN}-\frac{1}{BN}\right)\right] \qquad (۲۰-۲)$$

ρ مقاومت ویژه زمین است، بنابراین مقاومت ویژه زمین همگن با اندازه گیری روی سطح قابل محاسبه است.

آرایشهای الکترودی مختلفی از ترتیب (A,B,M,N) برای هدفهای مختلف پیشنهاد شده است. آرایشهایی که عموما"برای سونداژزنی مقاومت ویژه بکار می رود یکی آرایش متقارن و دیگری آرایش دوقطبی است.

درآرایشهای متقارن نقاط A و B و M و N در امتداد یک خط مستقیم هستند و الکترودهای M و N بصورت متقارن نسبت به مرکز گسترش AB یعنی O جابه جا می شونند.(شکل ۲-۲)



شکل(۲-۲): دو شکل بالا آرایه های متقارن هستند . شکل بالایی آرایه شلومبرژه و شکل پایینی آرایۀ ونر.

از این رو:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{4}{L-l} - \frac{4}{L+l}\right) \qquad (۲-۲۱)$$

که نتیجه می دهد:

$$\rho = \frac{\pi}{4}\frac{\left(L^2 - l^2\right)}{l}\frac{\Delta V}{I} \qquad (۲-۲۲)$$

در آرایه ونر، L مساوی $3l$ (l بر طبق قرارداد با " a " معرفی شده است بطوریکه " a " برابر است با فاصلۀ جدایی الکترودها) و مقاومت ویژه با رابطۀ (۲-۲۳) بیان می شود.

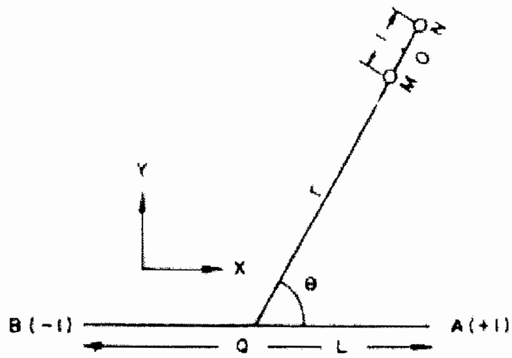
$$\rho = 2\pi a\frac{\Delta V}{I} \qquad (۲-۲۳)$$

اگر $L > 5l$ باشد می توان با یک خطای کمتر از 4% به جای $\left(L^2 - l^2\right)$، عبارت L^2 را قرار داد. این یک امر شناخته شده در آرایه شلومبرژه است (شکل ۲-۲). در این حالت مقاومت ویژه بصورت زیر به دست می آید:

$$\rho = \frac{\pi L^2}{4}\frac{\Delta V}{l}\frac{1}{I} = \frac{\pi L^2}{4}\frac{E}{I} \qquad (۲-۲۴)$$

که $E = \frac{\Delta V}{l}$ تقریبا" برابر شدت میدان الکتریکی در مرکز نقطۀ O است. از این رو، بعضی اوقات آرایه شلومبرژه به عنوان گرادیانی و آرایه ونر به آرایه پتانسیلی شناخته می شود.

شکل کلی آرایۀ دوقطبی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است که r معمولا"خیلی بزرگتر از فاصله AB است . پتانسیل در نقطۀ O متناسب با AB بوده و به وسیله رابطۀ زیر بیان می شود:



شکل۲-۳: شکل کلی سونداژزنی بصورت دوقطبی،AB جریان دوقطبی؛MN اندازه گیری دوقطبی؛ QوO مرکز جریان و مرکز اندازه گیری آرایه دو قطبی است.

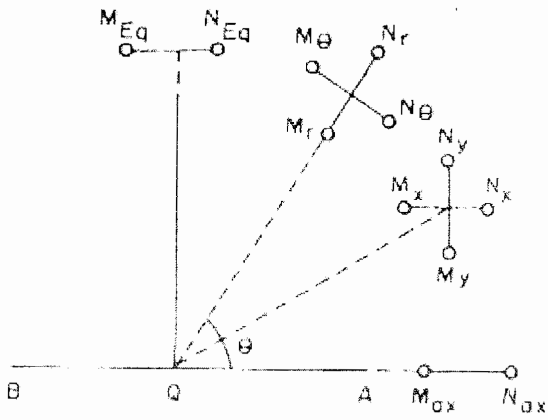
$$V = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{AO} - \frac{1}{BO}\right)$$

که می توان پتانسیل را در یک سری و به صورت زیر بیان کرد:

$$V = \frac{I\rho L\cos\theta}{2\pi r^2} \quad \text{برای} (r >> L): \qquad (۲-۲۵)$$

اگر r بزرگتر $3L$ باشد با یک خطای کمتر از 3%، پتانسیل برابر است با: $\frac{I\rho L}{2\pi}$

اختلاف پتانسیل برای شکلهای مختلف از آرایهٔ دوقطبی با استفاده از فرمول(۲-۲۵) به دست می آید که بررسی آن از حوزهٔ این کتاب خارج است. روش دوقطبی معمولاً برای بیش از یک کیلومتر استفاده می شود.



شکل۲-۴: آرایه های مختلف برای سونداژ دوقطبی:

$M_{ax}N_{ax} =$ محوری　　$M_yN_y =$ عمودی

$M_xN_X =$ موازی　　$M_rN_r =$ شعاعی

$M_0N_0 =$ آزیموتی　　$M_{Eq}N_{Eq} =$ استوایی

۲-۲-۱ مقاومت ویژه ظاهری:

مقاومت ویژه یک ماده بنا بر تعریف برابر با مقاومت بین دو قسمت روبه‌روی هم، از یک مکعب واحد می باشد. مقاومت ویژه برای یک زمین همگن از یک طرف نامحدود، به وسیله آرایشهای مختلف و بکارگیری معادلات ۲-۲۳ و ۲-۲۴ و ۲-۲۵ قابل محاسبه است. برای یک زمین غیر همگن، کمیتی به نام مقاومت ویژه ظاهری $\overline{\rho}$ تعریف می شود. مقاومت ویژه ظاهری یک ساختار زمین شناسی برابر با مقاومت ویژه حقیقی از یک زمین همگن و ایزوتروپیک (همسانگرد) فرضی است بطوریکه اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده حاصل از یک آرایش دلخواه به شدت جریان I با همان اختلاف پتانسیل برای زمین غیرهمگن مورد بررسی برابر است. مقاومت ویژه ظاهری به هندسهٔ آرایش و مقاومت سازند زمین شناسی وابسته است. بنابراین $\overline{\rho} = \overline{K}\left(\Delta V/I\right)$ که $\overline{K}$ فاکتور هندسی با ابعاد متر است.در بخش ۲-۱ فاکتور هندسی برای آرایه های مختلف روی یک زمین همگن مورد مطالعه قرار گرفته و مقادیر آن بصورت زیر داده شده است.

(۱) متقارن:

$$\overline{K}_w = 6.28a \qquad \text{(ونر)}$$

$$\overline{K}_s = 0.785\frac{(L+l)(L-l)}{l} \qquad \text{(شلومبرژه)}$$

(۲) دوقطبی:

شعاعی: $$\overline{K}_r = \frac{\pi r^3}{Ll\cos\theta}$$

آزیموتی: $$\overline{K}_\theta = \frac{2\pi r^3}{Ll\sin\theta}$$

موازی: $$\overline{K}_x = \frac{2\pi r^3}{Ll}\frac{1}{3\cos^2\theta-1}$$

عمودی: $$\overline{K}_y = \frac{2\pi r^3}{3Ll}\frac{1}{\sin\theta\cos\theta}$$

استوایی: $$\overline{K}_{eq} = \frac{2\pi r^3}{Ll}$$

محوری: $$\overline{K}_{ax} = \frac{\pi r^3}{Ll}$$

۲-۳ شارش جریان در یک زمین همگن و آنیزوتروپیک:

ثابت شده است که رسانندگی در یک محیط همگن و غیر ایزوتروپیک، یک تانسور متقارن به وجود می آورد که با ۶ مولفه توصیف می شود. در این حالت معمولاً می توان محورهای مختصات را بصورتی همساز کرد که این محورها، محورهای اصلی ناهمسانگردی را بوجود آورند پس مقادیر اصلی J و E در مختصات دکارتی با رابطهٔ زیر بیان می شود:

$$J_x = \frac{1}{\rho_x} E_x; \quad J_y = \frac{1}{\rho_y} E_y; \quad J_z = \frac{1}{\rho_z} E_z$$

x و y و z محورهای مختصات هستند. بنابراین معادله پیوستگی (رابطهٔ ۲-۲) در مختصات دکارتی بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{E_x}{\rho_x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{E_y}{\rho_y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{E_z}{\rho_z}\right) = 0$$

و برای یک حالت همگن بصورت زیر در می آید:

$$\frac{1}{\rho_x}\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_y}\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_z}\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \qquad (۲۶-۲)$$

یک دستگاه مختصات جدید بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$\xi = x\sqrt{\rho_x}; \quad \eta = y\sqrt{\rho_y}; \quad \zeta = z\sqrt{\rho_z}$$

سپس معادله (۲-۲۶) به معادله لاپلاس تبدیل می شود.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} = 0$$

با حل آن داریم:

$$V = \frac{C}{\left(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2\right)^{1/2}}$$

که C ثابت انتگرالگیری بوده بنابراین حل معادله (۲-۲۶) بصورت زیر در می آید:

$$V = \frac{C}{\left(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2\right)^{1/2}} \qquad (۲۷-۲)$$

از معادله (۲-۲۷) به نظر می رسد که سطوح داده شده با رابطهٔ زیر

$$\left(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2\right) = K^2$$

سطوح بیضواری هستند که محورهای آن بر محورهای اصلی ناهمسانگردی منطبق است.

چگالی جریان بوسیله روابط زیر بدست می آید:

$$C_x = -\frac{1}{\rho_x}\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{Cx}{\left(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$
$$C_y = -\frac{1}{\rho_y}\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{Cy}{\left(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2\right)^{\frac{3}{2}}} \qquad (۲۸-۲)$$
$$C_z = -\frac{1}{\rho_z}\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{Cz}{\left(\rho_x x^2 + \rho_y y^2 + \rho_z z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

این معادلات نسبت زیر را برقرار می سازد:

$$\frac{I_x}{x} = \frac{I_y}{y} = \frac{I_Z}{Z}$$

که نشان می دهد خطوط جریان به مانند حالت ایزوتروپیک خطوط مستقیم هستند و به صورت شعاعی پخش می شوند.

خطوط نیرو در محیط آنیزوتروپیک به شکل خطوط منحنی وار عمود بر سطوح هم پتانسیل است. خطوط نیرو با راستای خطوط جریان منطبق نیستند مگر آنهایی که در امتداد محورهای اصلی قرار دارند.

آنیزوتروپی در ساختار زمین شناسی ممکن است به چندین دلیل باشد. یک امر مسلم و شناخته شده این است که سنگهای لایه لایه یک مسیر مساعد برای شارش جریان الکتریکی به شمار می آید. علت آن می تواند وجود تعداد زیادی کانی بلوری با شکلهای مسطح و طویل مثل خاک چینی، میکا و غیره باشد. که در زمان رسوبگذاری بطور طبیعی بصورت موازی با لایه های رسوبی قرار می گیرند. همچنین سطح خاک هوازده، به سبب رشد گیاهان، زارعت و اشیاء فاسد شدهٔ درون خاک وغیره، یک خاصیت آنیزوتروپی را از خود نشان می دهد.در اکتشافات ژئوالکتریک عمل مرسوم عبارت است از مشخص کردن خواص الکتریکی لایه های زمین بوسیله دو پارامتر یعنی مقاومت ویژه جانبی یا طولی ρ_s (موازی با سطح لایه بندی) و مقاومت ویژهٔ عرضی یا عمقی ρ_t (عمود بر سطح لایه یندی). بنابراین، هر آنیزوترپی(ناهمسانگردی) در صفحهٔ لایه بندی معمولاً در اکثر موارد عملی به علت بسیار کوچک بودن، قابل صرفنظر کردن است.

اگر سطح لایه بندی سطح xy انتخاب شود معادلهٔ (۲-۲۶) تبدیل می شود به:

$$\frac{1}{\rho_s}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right) + \frac{1}{\rho_t}\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \qquad (۲۹-۲)$$

سطوح هم پتانسیل بوسیله رابطهٔ زیر داده می شود:

$$x^2 + y^2 + \left(\rho_t / \rho_s\right) z^2 = constant$$

در نتیجه معادله بالا معادله یک بیضی دوار حول محور z است.

دو پارامتر خیلی مهم زیر برای محیط آنیزوتروپی تعریف می شود:

$$\lambda = \sqrt{\rho_t / \rho_s} \quad \text{و} \quad \rho_m = \sqrt{\rho_t \rho_s} \qquad (۳۰-۲)$$

که λ ضریب آنیزوتروپی و ρ_m مقاومت ویژه متوسط محیط نامیده می شود. از معادله (۲-۳۰) آشکارا به دست می آید:

$$\rho_m = \lambda \rho_s = \frac{1}{\lambda} \rho_t \qquad (۳۱-۲)$$

حل معادلهٔ(۲-۲۹) بصورت:

$$V = \frac{C}{\rho_s^{\frac{1}{2}} \left(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (۳۲-۲)$$

و چگالی جریان بصورت زیر در می آید:

$$J_x = \frac{Cx}{\rho_s^{\frac{3}{2}} \left(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$J_y = \frac{Cy}{\rho_s^{\frac{3}{2}} \left(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$J_z = \frac{Cz}{\rho_s^{\frac{3}{2}} \left(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

آنچنانچه:

$$J = \left(J_x^2 + J_y^2 + J_z^2\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{C\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{\frac{1}{2}}}{\rho_s^{\frac{3}{2}} \left(x^2 + y^2 + \lambda^2 z^2\right)^{\frac{3}{2}}} \qquad (۳۳-۲)$$

برای فهمیدن ثابت انتگرال C، یک کره به شعاع R در اطراف نقطهٔ P در نظر می گیریم و شارش کل جریان را که از سطح کره خارج می شود را محاسبه می کنیم.

بدیهی است که این مقدار با کل جریان در نقطهٔ الکترود P برابر است بنابراین:

$$I = \int_s J ds = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} J R^2 \sin\theta d\theta d\varphi \qquad (۳۴-۲)$$

از آنجا که $x^2+y^2=R^2\sin^2\theta$ و $z^2=R^2\cos^2\theta$ پس معادلۀ(۲-۳۳) تبدیل می شود به:

$$J=\frac{C}{\rho_s^{\frac{3}{2}}R^2\left(\sin^2\theta+\lambda^2\cos^2\theta\right)^{\frac{3}{2}}}=\frac{C}{\rho_s^{\frac{3}{2}}R^2\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\cos^2\theta\right]^{\frac{3}{2}}}$$

و:

$$I=\frac{C}{\rho_s^{\frac{3}{2}}}\int_0^{2\pi}d\varphi\int_0^{\pi}\frac{\sin\theta d\theta}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\cos\theta\right]^{\frac{3}{2}}}=\frac{2\pi C}{\rho_s^{\frac{3}{2}}}\frac{2}{\lambda}=\frac{4\pi C}{\lambda\rho_s^{\frac{3}{2}}}$$

بنابراین:

$$C=\frac{I}{4\pi}\lambda\rho_s^{\frac{3}{2}} \qquad (۲-۳۵)$$

و نتیجتاً معادلات (۲-۲۳) و (۲-۳۳) تبدیل می شود به:

$$V=\frac{I\lambda\rho_s}{4\pi\left(x^2+y^2+\lambda^2z^2\right)^{\frac{1}{2}}}=\frac{I\rho_m}{4\pi R\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\cos^2\theta\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲-۳۶)$$

و:

$$J=\frac{I\lambda\left(x^2+y^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}{4\pi\left(x^2+y^2+\lambda^2z^2\right)^{\frac{3}{2}}}=\frac{I\lambda}{4\pi R^2\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\cos^2\theta\right]^{\frac{3}{2}}} \qquad (۲-۳۷)$$

برای یک زمین ایزوتروپ و بی نهایت همگن آنچنانچه در بخش زمین همگن نشان داده شد: $\rho_m=\rho,\lambda=1$ و: $V=\rho I/4\pi R$ و $J=I/4\pi R^2$.

حالا منشأ جریان I، با فرض اینکه زمین همگن ولی آنیزوتروپ باشد را روی سطح زمین قرار می دهیم.با در نظر گرفتن مقاومت بی نهایت برای هوا، چگالی جریان در هوا صفر می شود. مقادیر V و J باز از معادلۀ ۲-۳۲ و۲-۳۳ به دست می آید. ولی مقدار C در این حالت با درک اینکه کل جریان از یک نیمکره به شعاع Rانتشار می آید به دست می آید در نتیجه به جای معادله(۲-۳۴)خواهیم داشت:

$$I=\int_s Jds=\int_0^{2\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}JR^2\sin\theta d\theta d\varphi$$

که می دهد:

$$C=\frac{I}{2\pi}\lambda\rho_s^{\frac{3}{2}}$$

بنابراین روابط ۲-۳۶و۲-۳۷ با روابط زیر جایگزین می شوند:

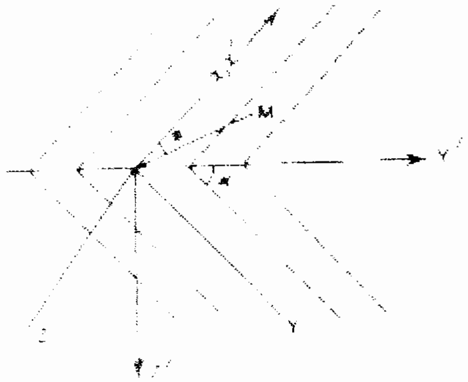
$$V=\frac{I}{2\pi R}\frac{\rho_m}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\cos^2\theta\right]^{\frac{1}{2}}}=\frac{I\rho_m}{2\pi}\frac{1}{\left(x^2+y^2+\lambda^2z^2\right)^{\frac{1}{2}}} \tag{۳۸-۲}$$

و:

$$J=\frac{I}{2\pi R^2}\frac{\lambda}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\cos^2\theta\right]^{\frac{1}{2}}}=\frac{I\lambda}{2\pi}\frac{R}{\left(x^2+y^2+\lambda^2z^2\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{۳۹-۲}$$

همانند یک محیط بی نهایت اینجا نیز سطوح هم پتانسیل بیضی های دواری حول محور z ، یعنی عمود برلایه بندی هستند.

در معادلات (۲-۳۸) و (۲-۳۹) فرض شده است که مرز زمین و هوا موازی سطح لایه بندی است. برای عمومیت دادن به این روابط دو سیستم مختصات $x'y'z'$ و xyz در نظر می گیریم (مانند شکل ۲-۵) که $x'y'$ نشان دهندهٔ مرز زمین و هوا و xy سطح لایه بندی است و با در نظر گرفتن زاویه شیب α داریم:



شکل۲-۵: نیم فضای آنیزوتروپیک. xy = سطح لایه بندی، $x'y'$ = سطح مرزی زمین و هوا، α = زاویه شیب، φ = زاویه بین نقطهٔ مشاهده با جهت رخنمون.

حالا:

$$\begin{aligned} x&=x' \\ y&=y'\cos\alpha+z'\sin\alpha \\ z&=-y'\sin\alpha+z'\cos\alpha \end{aligned}$$

با معرفی دستگاه مختصات جدید و قرار دادن $z'=0$ از معادلهٔ ۲-۳۸ داریم:

$$V=\frac{I\rho_m}{2\pi}\frac{1}{\left(x'^2+y'^2\cos^2\alpha+\lambda^2y'^2\sin^2\alpha\right)^{\frac{1}{2}}}=\frac{I\rho_m}{2\pi}\frac{1}{\left[x'^2+\left\{1+\left(\lambda^2-1\right)\sin^2\alpha\right\}y'^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

با نوشتن $r^2=x'^2+y'^2$ و $\varphi=\frac{y'}{x'}$ می رسیم:

$$V = \frac{I\rho_m}{2\pi r}\frac{1}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\sin^2\varphi\sin^2\alpha\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲-۴۰)$$

معادلهٔ (۲-۴۰)پتانسیل را در هر نقطه M روی سطح و در فاصلهٔ r از منبع و در جهت زاویه φ با رخنمون، را می دهد.

از معادلهٔ (۲-۴۰) به نظر می رسد که خطوط هم پتانسیل روی سطح بیضی هستند که محور بزرگ آن در جهت رخنمون لایه است. نسبت نصف محور بزرگ به نصف محور کوچک از رابطهٔ زیر به دست می آید.

$$\frac{a}{b} = \left[1+\left(\lambda^2-1\right)\sin^2\alpha\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۲-۴۱)$$

که به ضریب آنیزوتروپی و زاویه شیب بستگی دارد برای حالت ایزوتروپیک $\lambda = 1$ و همچنین برای لایه های افقی $\alpha = 0$ ، $a/b = 1$ می شود. برای $\alpha = \frac{\pi}{2}$ داریم $a = b\lambda$ و خطوط هم پتانسیل در اطراف منبع بصورت دایره می باشد.

از فرمول (۲-۴۱) می توان برای تعیین ضریب آنیزوپروپی (λ) وقتی که لایه معلوم باشد استفاده کرد یا برعکس برای تعیین زاویه شیب وقتی آنیزوتروپی معلوم باشد. با یک رویه امتحانی می شود خطوط هم پتانسیل را ترسیم کرد و سپس نسبت محورهای a/b را تعیین نمود.

با مشتق گیری از معادلهٔ (۲-۴۰) نسبت به r، یک میدان شعاعی حاصل می شود:

$$E = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{I\rho_m}{2\pi r^2}\frac{1}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\sin^2\varphi\sin^2\alpha\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲-۴۲)$$

طبق تعریف مقاومت ویژه ظاهری برای حالت ایزوتروپیک و برای گسترش آرایش متقارن شلومبرژه، $\bar{\rho} = \left[\frac{E}{I}\right]2\pi r^2$ به رابطهٔ (۲-۴۳) می رسیم:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_m}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\sin^2\varphi\sin^2\alpha\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲-۴۳)$$

طبق معادله بالا در امتداد جهت رخنمون:

$$\varphi = 0; \bar{\rho}_s = \rho_m \qquad (۲-۴۴)$$

و برای عمود بر امتداد رخنمون یعنی $\varphi = \frac{\pi}{2}$:

$$\overline{\rho}_t = \frac{\rho_m}{\left[1+\left(\lambda^2-1\right)\sin^2\alpha\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲-۴۵)$$

بنابراین مقاومت ویژه ظاهری اندازه گرفته شده روی سطحی از تشکیلات همگن و آنیزوتروپیک در امتداد رخنمون لایهٔ، به شیب وابسطه نیست(معادلهٔ۲-۴۴) و از حیث مقدار با مقاومت ویژه متوسط سازند برابر است. ولی مقاومت ویژه ظاهری در امتداد عمود بر رخنمون طبق معادلهٔ (۲-۴۵) به شیب وابسنه است. همچنین از آنجا که مخرج معادلهٔ (۲-۴۵) بزرگتر از واحد است (به استثنای وقتی که $\alpha = 0$):

$$\overline{\rho}_t < \overline{\rho}_s \qquad (۲-۴۶)$$

برای حالت ویژه $\alpha = \frac{\pi}{2}$ داریم:

$$\overline{\rho}_t = \frac{\rho_m}{\lambda} = \overline{\rho}_s \qquad (۲-۴۷)$$

از رابطهٔ(۲-۴۶) می شود فهمید که مقاومت ویژه ظاهری $\overline{\rho}_t$ اندازه گیری شده در جهت عمود بر رخنمون لایه کمتر از $\overline{\rho}_s$ ، مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده در امتداد رخنمون لایه است. با این وجود می دانیم که مقاومت ویژه حقیقی از یک سازند آنیزوتروپیک عمود بر لایه بندی بزرگتر از مقاومت ویژه حقیقی موازی با لایه بندی است. این پدیده دوگانگی آنیزوتروپی[۱۰] نامیده می شود این حقیقت که $\rho_s < \rho_t$ به این خاطر است که چگالی جریان در امتداد سطح لایه بندی بزرگتر از عمود بر سطح لایه بندی است.

آنیزوتروپی مطالعه شده تاکنون در این بخش حاکی بر این امر بود که همگن بودن لایه بندی سنگها با چشم قابل رویت است. در حقیقت ، همگن بودن لایه بندی سنگها یک فرض درست است چرا که در خیلی از حالات در زمین ما این موضوع را به عینه می بینیم. این نوع آنیزوتروپی؛ میکروسکوپی[۱۱] است و ممکن است میکروآنیزوتروپی[۱۲] نامیده شود. در اکتشافات الکتریکی لازم است روی نوع دوم آنیزوتروپی توجه شود که ماکروآنیزوتروپی[۱۳] نامیده می شود. در عمل بعضی وقتها تعیین مرز بین میکرو و ماکروآنیزوتروپی مشکل است.

---

[10] Paradox of anisotropy
[11] Microscopic
[12] Microscopic-anisotropy
[13] macro-anisotropy

تا هنگامی که بتوان به طریقی مثلاً بوسیلهٔ لاگهای الکتریکی در چاه پیمائی لایه های یک محیط را از هم تشخیص داد می توان آنرا یک محیط ماکروآنیزوتروپیک نامید. ماکروآنیزوتروپی به طور خلاصه در پاراگرافهای بعدی شرح داده می شود.

ماکروآنیزوتروپی از تکرار یک در میان صورتهای مختلف سنگهای ایزوتروپیک حاصل می شود. وقتی لایه های مجزای بی نهایت نازک یک در میان تکرار شوند، ما آشکارا به مرز میکروآنیزوتروپی می رسیم. مطالعه این پارامتر (ماکروآنیزوتروپی) یکی از اصول اولیه در ژئوفیزیک است. زیرا توزیع میدان الکتریکی متناسب با دو الکترود جریان در سطح زمین، علاوه بر فاصله بین الکترودی جریان تحت تأثیر مقاومت ویژه و ضخامت لایه های زیر سطحی نیز قرار می گیرد. این مقاومت ویژه موثر و ضخامت موثر بوسیلهٔ آنیزوتروپی کنترل می شود.

در جستجوی الکتریکی، دو پارامتر مهم است یکی مقاومت ویژه جانبی (ρ_s) و دیگری مقاومت عمود برلایه بندی (ρ_t) که معنی فیزیکی از اینها قبلاً شرح داده شده است. با قبول مفاهیم ρ_s و ρ_t برای یک گروه از لایه ها، با پدیدهٔ آنیزوتروپی سروکار خواهیم داشت و می توان لایه ها را به صورت یک لایه مجزا ومنفرد مجازی با آنیزوتروپی معادل λ فرض کرد. این لایه آنیزوتروپیک فرضی را می توان معادل یک لایهٔ دیگر ایزوتروپیک منفرد با مقاومت ویژه مجازی ρ_e و ضخامت مجازی h_e در نظر گرفت. این فرض، اساس روش نقطه کمکی تحلیلی- ترسیمی تفسیر را شکل می دهد. که با جزئیات بیشتر در فصل بعدی بحث خواهد شد.

آنیزوتروپی نقش مهمی در تفسیر پارامتر لایه ها بازی می کند. بدین ترتیب که آنیزوتروپی می تواند به عنوان خطایی معرفی شود که باعث نادیده گرفتن پارامتر لایه ها شود.اندازه گیری سطحی نمی تواند بین یک لایه ایزوتروپیک با ضخامت h ومقاومت ρ را از یک لایه آنیزوتروپیک با ضخامت h/λ و مقاومت ویژه ρ_m فرق بگذارد. λ همیشه بزرگتر از واحد است. این بدان معنا است که هنگامی آنیزوتروپیی وجود دارد اما نادیده گرفته می شود عمق بدست آمده از مفهوم ایزوتروپیک بیشتر از عمق حقیقی است. کنترل داده های زمین شناسی و چاه پیمائی در تفسیر این مواردکمک می کند.

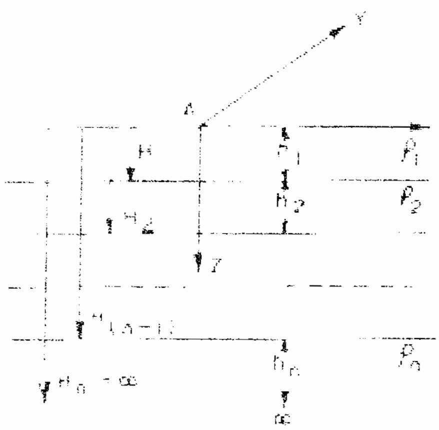
۲-۴: شارش جریان در لایه های افقی زمین:

در جستجوی الکتریکی اغلب تعیین عمق و مقاومت ویژه الکتریکی لایه های افقی یا تقریباً افقی ضروری است. برای حل این مسئله ما باید پتانسیل و میدان الکتریکی به وجود آمده در اثر یک منبع نقطه ای جریان را در هر نقطه روی سطح زمین لایه ای شکل را حساب کنیم.

حال میخواهیم یک سیستم مختصات استوانه ای با مبدأ مختصات در نقطهٔ A و محور z عمود بر سطح، مطابق شکل (۲-۶) در نظر بگیریم. با گذاشتن $\rho_1,\rho_2,...,\rho_n$ برای مقاومت ویژه و $h_1,h_2,...,h_n$ برای ضخامت، و همچنین قرار دادن $H_1,H_2,...,H_n$ که بر ضخامت از انتهای هر لایه تا سطح زمین اشاره دارد، یک زمین n لایه ای را شبیه سازی کرده ایم. همچنین فرض می کنیم که لایه آخر تا بی نهایت گسترده است در نتیجه: $H_n=\infty, h_n=\infty$.

در این حالت معادله لاپلاس (۲-۱۴) در سیستم استوانه ای برای محیط لایه ای شکل در هر نقطه به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial r}+\frac{\partial^2 V}{\partial z^2}=0 \tag{۲-۴۸}$$



شکل ۲-۶: زمین چند لایه ای

در حل عمومی رابطهٔ(۲-۴۸)، رابطه (۲-۴۹) نوشته می شود:

$$V=\int_0^\infty\left[A(m)e^{-mz}+B(m)e^{mz}\right]J_0(mr)dm \tag{۲-۴۹}$$

می دانیم که پتانسیل متناسب با منبع نقطه ای جریان قرار داده شده در سطح زمین همگن برابر است با:

$$V_0=\frac{I\rho}{2\pi}\frac{1}{R}=\frac{I\rho}{2\pi}\frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}$$

که R فاصله بین نقطه A و نقطهٔ مشاهده شده است.

$$V_n = \frac{I\rho_1}{2\pi}\frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \int_0^\infty A_n(m)e^{-mz}J_0(mr)dm$$

بر طبق شرایط مرزی(که پتانسیل و شدت میدان در هر مرزباید با هم برابر باشند) داریم:

$$V_i = V_{i+1}$$
$$\frac{1}{\rho_i}\frac{\partial V_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{i+1}}\frac{\partial V_{i+1}}{\partial z}, z = H_i$$

$2n$ معادله و $2n$ مجهول داریم بنابراین مسئله قابل حل است.

حالا:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}}$$

با استفاده از فرمول انتگرال وبر[۱۴]:

$$\frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} = \int_0^\infty e^{-m|z|}J_0(mr)dm \qquad (۲-۵۲)$$

و با قرار دادن $\frac{I\rho_1}{2\pi} = q$ ، می رسیم:

$$V_1 = q\int_0^\infty e^{-m|z|}J_0(mr)dm + \int_0^\infty A_1(m)\left(e^{mz}+e^{-mz}\right)J_0(mr)dm$$
$$V_i = q\int_0^\infty e^{-m|z|}J_0(mr)dm + \int_0^\infty \left(A_i(m)e^{-mz} + B_i(m)e^{mz}\right)J_0(mr)dm \qquad (۲-۵۳)$$
$$V_n = q\int_0^\infty e^{-m|z|}J_0(mr)dm + \int_0^\infty A_n(m)e^{-mz}J_0(mr)dm$$

از رابطه های (۲-۵۱)و(۲-۵۳) به دستگاه معادلات زیر می رسیم:

(۲-۵۴ الف)

$$\int_0^\infty A_1\left(e^{mH_1}+e^{-mH_1}\right)J_0(mr)dm = \int_0^\infty \left(A_2e^{-mH_1}+B_2e^{mH_1}\right)J_0(mr)dm$$
$$-\frac{q}{\rho_1}\int_0^\infty e^{-mH_1}J_0(mr)dm + \frac{1}{\rho_1}\int_0^\infty A_1\left(e^{mH_1}-e^{-mH_1}\right)J_0(mr)dm$$
$$= -\frac{q}{\rho_2}\int_0^\infty e^{-mH_1}J_0(mr)dm + \frac{1}{\rho_2}\int_0^\infty \left(-A_2e^{-mH_1}+B_2e^{mH_1}\right)J_0(mr)dm$$

---

[14] Webers integral

(۲-۵۴ ب)

$$\int_0^\infty A_i\left(e^{mH_i}+e^{-mH_i}\right)J_0(mr)dm=\int_0^\infty\left(A_{i+1}e^{-mH_i}+B_{i+1}e^{mH_i}\right)J_0(mr)dm$$
$$-\frac{q}{\rho_i}\int_0^\infty e^{-mH_i}J_0(mr)dm+\frac{1}{\rho_i}\int_0^\infty\left(-A_ie^{-mH_i}+B_ie^{mH_i}\right)J_0(mr)dm$$
$$=-\frac{q}{\rho_{i+1}}\int_0^\infty e^{-mH_i}J_0(mr)dm+\frac{1}{\rho_{i+1}}\int_0^\infty\left(-A_{i+1}e^{-mH_i}+B_{i+1}e^{mH_i}\right)J_0(mr)dm$$

(۲-۵۴ ج)

$$\int_0^\infty A_{n-1}\left(e^{mH_{n-1}}+e^{-mH_{n-1}}\right)J_0(mr)dm=\int_0^\infty\left(A_ne^{-mH_{n-1}}\right)J_0(mr)dm$$
$$-\frac{1}{\rho_{n-1}}\int_0^\infty\left(A_{n-1}e^{-mH_{n-1}}+B_{n-1}e^{mH_{n-1}}\right)J_0(mr)dm-\frac{q}{\rho_{n-1}}\int_0^\infty e^{-mH_{n-1}}J_0(mr)dm$$
$$=-\frac{q}{\rho_n}\int_0^\infty e^{-mH_{n-1}}J_0(mr)dm-\frac{1}{\rho_n}\int_0^\infty\left(A_ne^{-mH_{n-1}}\right)J_0(mr)dm$$

چون رابطهٔ (۲-۵۴ الف، ب،ج) باید برای همه مقادیر از r برقرار باشد داریم:

(۲-۵۵ الف)

$$A_1\left(e^{-mH_1}+e^{mH_1}\right)-A_2e^{-mH_1}-B_2e^{mH_1}=0$$
$$A_1\rho_2\left(e^{mH_1}-e^{-mH_1}\right)+A_2\rho_1e^{-mH_1}-B_2\rho_1e^{mH_1}-q(\rho_2-\rho_1)e^{-mH_1}=0$$

(۲-۵۵ ب)

$$A_ie^{-mH_i}+B_ie^{mH_i}-A_{i+1}e^{-mH_i}-B_{i+1}e^{mH_i}=0$$
$$\rho_{i+1}\left(-A_ie^{-mH_i}+B_ie^{mH_i}\right)+\rho_iA_{i+1}e^{-mH_i}-\rho_iB_{i+1}e^{mH_i}-q(\rho_{i+1}-\rho_i)e^{-mH_i}=0$$

(۲-۵۵ ج)

$$A_{n-1}e^{-mH_{n-1}}+B_{n-1}e^{mH_{n-1}}-A_ne^{-mH_{n-1}}=0$$
$$-A_{n-1}\rho_ne^{-mH_{n-1}}+B_{n-1}\rho_ne^{mH_{n-1}}+A_n\rho_{n-1}e^{-mH_{n-1}}-q(\rho_n-\rho_{n-1})e^{-mH_{n-1}}=0$$

بنارابن از دستگاه معادلات(۲-۵۵ الف، ب، ج)از لحاظ تئوری می توان پتانسیل و همچنین میدان را بدست آورد. در سونداژ ژئوالکتریک فقط به فهمیدن پتانسیل روی سطح علاقمندیم و برای این منظور پیدا کردن ضریب A_1 کافی است.

۲-۴-۱ زمین همگن:

$$A_1 = 0$$

و:

$$V = V_0 = \frac{I\rho}{2\pi}\frac{1}{\left(r^2 + z^2\right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{I\rho}{2\pi}\frac{1}{R}$$

۲-۴-۲ زمین دو لایه ای:

با قرار دادن $h_2 = \infty$ در شکل (۲-۶) دستگاه معادلات (۲-۵۵ الف، ب، ج)تبدیل می شود به:

$$A_1\left(e^{-mh_1} + e^{mh_1}\right) - A_2 e^{-mh_1} = 0$$

$$A_1\rho_2\left(-e^{-mh_1} + e^{mh_1}\right) + A_2\rho_1 e^{-mh_1} - q\left(\rho_2 - \rho_1\right)e^{-mh_1} = 0$$

با حل همزمان معادلات بالا با استفاده از قانون کرامر می رسیم $A_1(m) = \frac{N_1}{D}$.

که:

$$N_1 = \begin{vmatrix} 0 & -e^{-mh_1} \\ q\left(\rho_2 - \rho_1\right)e^{-mh_1} & \rho_1 e^{-mh_1} \end{vmatrix} = q\left(\rho_2 - \rho_1\right)e^{-2mh_1}$$

$$D = \begin{vmatrix} e^{mh_1} + e^{-mh_1} & -e^{-mh_1} \\ \rho_2\left(e^{mh} - e^{-mh_1}\right) & \rho_1 e^{-mh_1} \end{vmatrix} = \left(\rho_2 + \rho_1\right) + \left(\rho_2 - \rho_1\right)e^{-2mh_1}$$

با نوشتن $\left(\rho_2 - \rho_1\right)/\left(\rho_2 + \rho_1\right) = K_{12}$ داریم:

$$A_1(m) = q\frac{K_{12}e^{-2mh_1}}{1 - K_{12}e^{-2mh_1}} = q\left(K_{12}e^{-2mh_1} + K_{12}^2 e^{-4mh_1} + \dots + K_{12}^n e^{-2mnh_1} + \dots\right) = q\sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n e^{-2mnh_1}$$

از این رو:

$$V_1 = q\int_0^{\infty} e^{-mz} J_0(mr)dm + q\sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \int_0^{\infty} e^{-2mh_1}\left(e^{mz} + e^{-mz}\right)J_0(mr)dm$$

با دیگر با استفاده از انتگرال وبر یعنی معادلۀ(۲-۵۴) داریم:

$$V_1 = \frac{q}{\left(r^2 + z^2\right)^{\frac{1}{2}}} + q\sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \frac{1}{\left[r^2 + \left(2nh_1 - z\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} + q\sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \frac{1}{\left[r^2 + \left(2nh_1 + z^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (۵۶-۲)$$

معادله (۲-۵۶) پتانسیل در هر نقطه(r,z) از اولین لایه را می دهد برای یافتن پتانسیل روی سطح، z را مساوی صفر قرار می دهیم:

$$V=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r}+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{K_{12}^n}{\left[r^2+(2nh_1)^2\right]^{\frac{1}{2}}}\right] \qquad (۵۸-۲)$$

شدت میدان $E=-\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)$ در سطح برابر است با:

$$E=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r^2}+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{K_{12}^n}{\left[r^2+(2nh_1)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad (۵۸-۲)$$

فرمول (۲-۵۷) و (۲-۵۸) را می توان برای تعیین مقاومت ویژه ظاهری برای هر آرایش الکترودی داده شده در بخش (۲-۲) مورد استفاده قرار داد.

با توجه به علاقمندی ما به آرایش شلومبرژه (برای MN های کوچک یعنی وقتی $MN\rightarrow 0$) داریم:

$$\overline{\rho}=2\pi r^2\frac{E}{I}=\rho_1\left[1+2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\delta^3K_{12}^n}{\left(\delta^2+4n^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad (۵۹-۲)$$

که:

$$\delta=r/h_1=AB/2h_1$$

۲-۴-۳ زمین سه لایه ای:

با قرار دادن $h_3=\infty$ در شکل (۲-۶) دستگاه معادلات (۲-۵۵ الف، ب،ج) تبدیل می شود به:

$$\begin{aligned}
&A_1\left(e^{-mH_1}+e^{mH_1}\right)-A_2e^{-mH_1}-B_2e^{mH_1}=0\\
&A_1\rho_2\left(-e^{-mH_1}+e^{mH_1}\right)+A_2\rho_1e^{-mH_1}-B_2\rho_1e^{mH_1}-q\left(\rho_2-\rho_1\right)e^{-mH_1}=0\\
&A_2e^{-mH_2}+B_2e^{mH_2}-A_3e^{-mH_2}=0\\
&-A_2\rho_3e^{-mH_2}+B_2\rho_3e^{mH_2}+A_3\rho_2e^{-mH_2}-q\left(\rho_3-\rho_2\right)e^{-mH_2}=0
\end{aligned} \qquad (۶۰-۲)$$

با حل این معادلات می رسیم:

$$A_1(m)=q\frac{K_{12}e^{-2mH_1}+K_{23}e^{-2mH_2}}{1-K_{12}e^{-2mH_1}-K_{23}e^{-mH_2}+K_{12}K_{23}e^{-2m(H_2-H_1)}} \qquad (۶۱-۲)$$

که: $K_{23}=(\rho_3-\rho_2)/(\rho_3+\rho_2)$

بنابراین:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \int_0^{\infty}\frac{\left(K_{12}e^{-2mH_1}+K_{23}e^{-2mH_2}\right)\left(e^{-mz}+e^{mz}\right)J_0(mr)dm}{1-K_{12}e^{-2mH_1}-K_{23}e^{-2mH_2}+K_{12}K_{23}e^{-2m(H_2-H_1)}}\right] \quad (۲-۶۳)$$

برای بیان پتانسیل در یک شکل مناسب بطریقهٔ زیر عمل می کنیم.

باقرار دادن $H_1 = p_1H_0$ و $H_2 = p_2H_0$ که p_1 و p_2 اعدادصحیح و H_0 عدد ثابت می باشد.

و همچنین با نوشتن $g = e^{-2mH_0}$ معادله(۲-۶۱) بصورت زیر در می آید:

$$A_1(m) = q\frac{K_{12}g^{p_1}+k_{23}g^{p_2}}{1-K_{12}g^{p_1}-K_{23}g^{p_2}+K_{12}K_{23}g^{(p_2-p_1)}} \quad (۲-۶۳)$$

از آنجا که p_1 و p_2 اعدادصحیح هستند، $A_1(m)$ تابع گویا از g است یعنی:

$$A_1(m) = q\left(b_1g+b_2g^2+b_3g^3+....\right) = q\sum_{n=1}^{\infty}b_ng^n = q\sum_{n=1}^{\infty}b_ne^{-2mnH_0} \quad (۲-۶۴)$$

از مقایسه معادلات (۲-۶۳) و (۲-۶۴) داریم:

$$K_{12}g^{p_1}+K_{23}g^{p_2} = \left[1-K_{12}g^{p_1}-K_{23}g^{p_2}+K_{12}K_{23}g^{(p_2-p_1)}\right]\sum_{n=1}^{\infty}b_ng^n \quad (۲-۶۵)$$

اصل برابری که ضریب هر g باید عیناً در هر دو طرف معادله مساوی باشد را برقرار می سازیم. از آنجا که بیشترین توان g در سمت چپ p_2 است توانهای بیشتر از p_2 در سمت راست یعنی p_2+t باید مساوی صفر شود داریم:

$$b_{p_2+t} - K_{12}b_{p_2-p_1+t} - K_{23}b_t + K_{12}K_{23}b_{p_1+t} = 0$$

بازبینی رابطهٔ بالا می دهد:

$$b_{p_2+t} = K_{12}b_{p_2-p_1+t} + K_{23}b_t - K_{12}K_{23}b_{p_1+t} = 0 \quad (۲-۶۶)$$

بنابراین با شناخت مقادیر b_t و $b_{p_2-p_1+t}$ و b_{p_1+t}، مقدار b_{p_1+t} محاسبه می شود. ضرایب کمتر از مقدار حداکثر b_{p_2} را می توان از معادلهٔ (۲-۶۵) تعیین کرد. الباقی ضرایب را می توان با استفاده از معادلهٔ بازنگری شدهٔ (۲-۶۶) تعیین نمود.

بنابراین پتانسیل در هر نقطه در اولین لایه بصورت زیر نوشته می شود.

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n}{\left[r^2+\left(2nH_0+z\right)^{\frac{1}{2}}\right]} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n}{\left[r^2+\left(2nH_0-z\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}\right]$$

در سطح $z = 0$:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n}{\left[r^2 + (2nH_0)^2\right]^{\frac{1}{2}}}\right] \qquad (۶۷-۲)$$

و

$$E = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r^2} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n r}{\left[r^2 + (2nH_0)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad (۶۸-۲)$$

بنابراین برای آرایش متقارن شلومبرژه:

$$\bar{\rho} = \rho_1\left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n r^3}{\left[r^2 + (2nH_0)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

در عمل، ضخامت دومین لایه معمولاً بر حسب ضخامت لایه نخست بیان می شود یعنی با $h_1 = H_1$، پس داریم:

$$\bar{\rho} = \rho_1\left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n r^3}{\left[r^2 + (2nH_1)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

یا اگر $r/h_1 = \delta$

$$\bar{\rho} = \rho_1\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n \delta^3}{\left(\delta^2 + 4n^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad (۶۹-۲)$$

۲-۴-۴ زمین چهار لایه:

برای زمین حالت چهار لایه ای ضریب $A_1(m)$ می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$A_1(m) = \frac{q\left(K_{12}g^{p_1} + K_{23}g^{p_2} + K_{34}g^{p_3} + K_{12}K_{23}K_{34}g^{p_3-p_2-p_1}\right)}{\begin{gathered}1 - K_{12}g^{p_1} - K_{23}g^{p_2} - K_{34}g^{p_3} + K_{12}K_{23}g^{p_2-p_1} + \\ + K_{23}K_{34}g^{p_3-p_2} + K_{12}K_{34}g^{p_3-p_1} - K_{12}K_{23}K_{34}g^{p_3-p_2-p_1}\end{gathered}} \qquad (۷۰-۲)$$

در اینجا نیز پتانسیل می تواند در همان شکل معادلهٔ(۲-۶۷) و مقاومت ویژه ظاهری به شکل (۲-۶۹) بیان شود. رابطهٔ بازنگری شدهٔ $A_1(m)$ را به عنوان تابع کرنل[۱۵] شناخته شده و می توان برای

[15] Kernel Function

زمین n لایه ای نیز بکار برد. اما بخاطر توسعه محاسبات کامپیوتری که در آینده به آن خواهیم پرداخت این روش مناسب به نظر نمی رسد.

پیچیدگی در محاسبات با افزایش تعداد لایه ها افزایش می یابد. با استفاده از کامپیوتر رسم یک سری از منحنی های تئوری به نام منحنی های کمکی برای استفاده در تفسیر امکان پذیر شده است. این قبیل منحنی ها توسط بعضی از افراد از قبیل (مونی و وتزل در سال ۱۹۵۶ ؛ Compagnie Generale de Geophysique در سال ۱۹۶۳ ؛ اُرلینا و مونی[۱۶] در سال۱۹۶۶) برای زمینهای دو لایه ای، سه لایه ای و چهار لایه ای انتشار یافت.

لازم به ذکر است که گهگاه برای محاسبه منحنی های تئوری راههای ساده شدۀ گوناگونی پیشنهاد شده است. فلتس[۱۷] در سال ۱۹۵۵ یک روش برای محاسبه منحنی های سونداژ الکتریکی با ماشین حساب معمولی رومیزی معرفی کرد. اما این روش فقط برای مواردی که زمینه(یا زمین) بصورت کاملاً رسانا یا عایق تقریب زده شده باشد مناسب بود. وَن دم[۱۸] در سال ۱۹۶۵ یک روش ساده برای محاسبۀ منحنی های سونداژ الکتریکی که به اندازه کافی دقیق و صحیح بود با یک ماشین حساب دستی معرفی کرد.

یک رویه برای محاسبۀ منحنی های مقاومت ویژه ظاهری برای زمین چند لایه ای و برای ترکیب آرایشهای شلومبژه، ونر،دوقطبی بوسیله مونی و همکارانش در سال ۱۹۶۶ارائه شده است. که در آن از کامپیوترهای دیجیتالی بزرگ استفاده می شود. در این روش، فرمول نسبتاً ساده است و برنامه می تواند به هر تعداد لایه بپردازد در این ویرایش یک مجموعه مجزا از ضرایب ذخیره شده می تواند مکرراً برای فاصله های الکترودی مختلف و برای آرایشهای مختلف الکترودی مورد استفاده قرار گیرد. گفته می شود این روش در مقایسه با روشهای تعریف شده توسط فلتس در سال۱۹۵۵ و Compagnie Generale de Geophysique (CGG) در سال ۱۹۶۳ نسبتاً ساده تر و دقیق تر است. با این حال روش پیشنهاد شده بوسیلۀ وَن دم در سال ۱۹۶۷ تا اندازه ای شبیه به یکی از روشهای شرح داده شده مونی و همکارانش بود این روش ارزش محاسبه با کامپیوتر را دارد.

در روشهای کنونی(CGG در سال ۱۹۶۳؛ فلتس؛ مونی و همکارانش در سال۱۹۶۶) که بر پایه سنجش تابع کرنل بود، برای همگرایی سریع سریهای محاسبه شده لازم است که ضخامت لایه

---

[16] Orellana and Mooney
[17] Flathe
[18] Van Dam

ها چندین برابر برخی ضخامت های معمولی باشد. از دیگر سو محاسبه منحنی های مقاومت ویژه ظاهری با پارامترهای لایه ای معلوم با استفاده از ضرایب فیلتر معکوس گُوش[19] در سال ۱۹۷۱ فاقد چنین محدودیتهایی و سر راست می باشد.این متد در فصل بعدی شرح داده خواهد شد.

۲-۵ اصل هم ارزی:

در این بخش پایه نظری یک نتیجه را ارائه می دهیم که آنچنانچه که بعداً خواهیم دید نقش مهمی را در تفسیر منحنی های سونداژ الکتریکی ایفا می کند. این موضوع به عنوان اصل هم ارزی[20] شناخته شده است.

می دانیم که پتانسیل در سطح زمین سه لایه ای به ضریب A_1 که بصورت زیر داده شده است بستگی دارد:

$$A_1(m) = q\frac{K_{12}e^{-2mh_1} + K_{23}e^{-2m(h_1+h_2)}}{1 - K_{12}e^{-2mh_1} - K_{23}e^{-2m(h_1+h_2)} + K_{12}K_{23}e^{-2mh_2}}$$

که $q = \dfrac{I\rho}{2\pi}$ و $K_{23};K_{12}$ پارامترهایی هستند که قبلاً تعریف شد.

حالت اول:

فرض می کنیم $\rho_2 << \rho_1; h_2 << h_1$ و $\rho_3 >> \rho_2$ سپس:

$$e^{-2m(h_1+h_2)} = e^{-2mh_1} + e^{-2mh_2} \approx e^{-2mh_1}(1 - 2mh_2)$$

$$K_{12} = [2\rho_2/(\rho_2 + \rho_1) - 1] \approx (2\rho_2/\rho_1) - 1$$

$$K_{23} = 1 - [2\rho_2/(\rho_3 + \rho_2)] \approx 1 - (2\rho_2/\rho_3)$$

معادله (۲-۷۱)را می توان بصورت زیر نوشت:

$$A_1(m) = qe^{-2mh_1}\frac{\rho_3 - \rho_1 - m\rho_1\rho_3(h_2/\rho_2)}{-\left[\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_3}\right) - m(h_2/\rho_2)\right]e^{-2mh_1} + \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_3} + m(h_2/\rho_2)} \quad (۲\text{-}۷۱)$$

$$= qe^{-2mh_1}\frac{\rho_3 - \rho_1 - m\rho_1\rho_3 S}{-(\rho_3 - \rho_1 - m\rho_1\rho_3 S)e^{-2mh_1} + \rho_3 - \rho_1 + m\rho_1\rho_3 S}$$

از معادله (۲-۷۱) به نظر می رسدکه $A_1(m)$ به مقدار واقعی ρ_2 و h_2 وابسته نیست بلکه به نسبت آنها یعنی $S = \dfrac{h_2}{\rho_2}$ وابسته است.

---

[19] Ghosh
[20] Principle of equivalence

حالت دوم:

بطور مشابه $\rho_2 >> \rho_1$ و $\rho_2 >> \rho_3; h_2 << h_1$:

$$K_{12} = 1 - \frac{2\rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = 1 - \frac{2\rho_1}{\rho_2}$$

$$K_{23} = \frac{2\rho_3}{\rho_2 + \rho_3} - 1 = \frac{2\rho_3}{\rho_2} - 1$$

و:

$$A_1(m) = qe^{-2mh_1} \frac{\rho_3 - \rho_1 + mT}{(\rho_1 - \rho_2 - mT)e^{-2mh_1} + \rho_1 + \rho_3 + mT} \qquad (۲-۷۳)$$

اینجا نیز $A_1(m)$ فقط به مقدار $T = h_2\rho_2$ وابسته است و به مقادیر مجزای ρ_2 و h_2 وابسته نیست.

آنچنانچه که بعداً شرح داده خواهد شد حالت اول مربوط به مقطع نوع H و حالت دوم مربوط به مقطع K نوع است.

بنابر بحثهای بالا می شود گفت که اگر در منحنی نوع H،لایه میانی در مقایسه با دو لایه دیگر دارای ضخامت و مقاومت ویژه بسیار کوچکی باشد. این منحنی ها به نسبت S با هم هم ارز هستند؛ در مورد منحنی نوع K اگر ضخامت لایه میانی در مقایسه با دو لایه دیگر کوچک اما مقاومت آن بزرگ باشد این منحتی ها به نسبت T با هم هم ارز هستند.

اصل هم ارزی شرطهایی را در تفسیر داده های سونداژ بوسیله مطرح کردن خطا در تعیین دقت ضخامتهای کوچک در مقایسه با عمق اعمال می کند. این ابهام از طریق زمین شناسی و دیگر روشهای کنترل برداشته می شود.

همین طور زمانی که مقاومت ویژه لایه میانی در حد وسط مقاومت ویژه لایه های در برگیرنده آنها باشد با مشکل روبرو می شویم. اگر این لایه ضخامت قابل توجهی نداشته باشد اثرش روی منحنی مقاومت ویژه منعکس نخواهد شد. وقتی که ضخامت لایه افزایش می یابد این افزایش ضخامت باعث افزایش اثر مقاومت ویژه لایه های در برگیرنده می شود که این مسئله توسط اصل اختفاء[21] کنترل می شود.

۲-۶ سونداژزنی الکتریکی

[21] Principle of Suppression

مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده در سطح یک زمین غیر همگن به وسیله فرمول $\bar{\rho} = K\left(\frac{\Delta V}{I}\right)$ بدست می آید. که K فاکتور هندسی، و به آرایش الکترودی الکترودهای اندازه گیری بستگی دارد. به طور کلی اندازه گیری مقاومت ویژه بر دو قسم است. در حالت اول که به عنوان "پروفیل زنی ژئوالکتریکی[22]" یا نقشه های هم مقاومت ویژه شناخته می شود، مقدار K برای یک سری قرائت ثابت باقی می ماند و اندازه گیری به وسیلهٔ تغییرات جانبی الکترودها (جریان و پتانسیل) در یک امتداد نسبت به مرکز آرایهٔ الکترودی انجام می شود. در این روش به، تغییرات در مقاومت زمین در امتداد خطوط از پیش تعیین شده در یک عمق ثابت می رسیم.

در روش دوم که به عنوان "سونداژزنی ژئوالکتریک[23]" شناخته شده، فاصله بین الکترودهای جریان تغییر می کند (عموماً افزایش می یابد) و مرکز آرایش (مرکز گسترش الکترودها) ثابت می ماند. در اینجا مقدار K رفته رفته افزایش می یابد. در این روش مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گرفته شده در سطح زمین منعکس کنندهٔ توزیع عمودی مقادیر مقاومت ویژه در یک مقطع زمین شناسی است. به همین دلیل است که گاهی این روش به عنوان " حفر عمودی الکتریکی[24]" نیز شناخته شده است. در این کتاب فقط با "سونداژزنی عمودی شلومبرژه[25]" سروکار داریم که به اختصار با VES خلاصه شده است.(شکل ۲-۲)

آرایشهای الکترودی متقارنی که بطور گسترده در سونداژزنی مورد استفاده قرار می گیرد یکی شلومبرژه و دیگری ونر است. در اینجا الکترودهای جریانی A و B نسبت به الکترودهای پتانسیلی M و N بطور متقارن قرار گرفته (شکل ۲-۲) و مرکز گسترش، O، نقطهٔ سونداژ است. در روش شلومبرژه بحث شده در این کتاب (در حالت تئوری) سونداژزنی را می توان فقط با حرکت الکترودهای جریان که به طور تدریجی فاصله AB افزایش می یابد انجام داد. با این وجود وقتی AB در مقایسه با MN بزرگ است افت پتانسیل بین M و N آنقدر ممکن است کوچک باشد که قابل اندازه گیری نباشد.

از این رو، در عمل لازم بایستی هر زمان که لازم باشد فاصله بین M و N نیز افزایش یابد. که این موضوع به حساسیت دستگاه اندازه گیری وابسته است. هرگاه یک مقدار MN نسبت به

---

[22] Geoelectric profiling
[23] Geoelectric sounding
[24] Vertical electrical drilling
[25] Vertical electrical sounding

مقدار دیگر دستخوش تغییری ناگهانی شود، مقدار MN و مقادیر متناظر AB طوری انتخاب می شوند که قرائت های روی خط قرار گرفته ای بدست آید (به عبارت دیگر همپوشانی در قرائت را داشته باشیم). توزیع عمومی در مقادیر MN و AB برای یک دستگاه با حساسیت متوسط، و برای یک گسترش به اندازه $AB = 1000m$، در جدول ۲-۱ فهرست شده است.تغییرات مقادیر MNو AB به شرایط زمینی، حساسیت دستگاه و دیگر مشکلات عملی وابسته است. در شروع کار برای رسیدن به مقاومت ویژه سطحی می توان از آرایش ونر استفاده نمود.

در همهٔاین قرائت ها برای انطباق مقادیر $\frac{MN}{2}(m)$ و $\frac{AB}{2}(m)$؛ مقاومت $(ohms)$ از جریان برحسب میلی آمپر (mA) و اختلاف پتانسیل برحسب میلی ولت (mV) محاسبه می شود. مقاومت در مقدار متناظرش از K (جدول ۲-۱) ضرب می شود تا مقدار مقاومت ویژه ظاهری برحسب اهم- متر به دست بیاید.

Obs. No.	MN/2 (m)	AB/2 (m)	K	Obs. No.	MN/2 (m)	AB/2 (m)	K
1	0.5	1.5	6.28	18	..	60	549.5
2	.	2	11.8	19	..	80	989.1
3	.	3	27.5	20	..	100	1554.3
4	.	4	49.4	21	20	100	753.6
5	1	4	23.5	22	..	120	1099
6	..	6	54.9	23	..	140	1502
7	.	8	99.0	24	..	160	1978
8	.	10	155.0	25	..	180	2512
9	2	10	75.0	26	..	200	3100
10		15	173.0	27	40	200	1507
11	..	20	310.0	28	..	250	2402
12	5	20	118.5	29	..	300	3470
13	.	25	188.5	30	.	350	4824
14	.	30	274.8	31	.	400	6217
15	..	40	494.5	32	..	500	9750
16	..	50	777.0	33	80	400	3485
17	10	50	376.8	34	.	500	4781

جدول ۲-۱: یک نمونه از ترتیب صحرایی برای آرابش شلومبرژه.

۲-۷ رویه محاسبات تقریبی

همانطور که در معادله(۲-۶۹) برای آرایش شلومبرژه نشان داده شد:

$$\overline{\rho} = \rho_1 \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n \delta^3}{\left(\delta^2 + 4n^2\right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

که ضریب b_n توسط معادلهٔ(۲-۶۵) بدست میآید و برای $\rho_2 > \rho_1$ این ضریب توسط فرمول بازنگری شدهٔ (۲-۶۶) بدست می آید .هرگاه مقدار b_n مشخص باشد مقدار $\overline{\rho}/\rho_1$ به آسانی برای مقادیر

مختلف δ (یعنی r/h_1) باکمک کامپیوتر قابل محاسبه است. فرمول بالا را می شود به طریقهٔ زیر بیان کرد:

$$\bar{\rho}\Big/\rho_1 = 1 + \frac{2b_1\delta^3}{\left(\delta^2+4\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{2b_2\delta^3}{\left(\delta^2+16\right)^{\frac{3}{2}}} + \ldots + \ldots$$

در مسائل سه لایه وقتی $\rho_3 = 0$ یا ∞ است محاسبات ساده می شود چون در این حالت ضریب $A_1(m)$ داده شده در معادله(۲-۶۳) بیشتر ساده می شود.

اجازه بدهید به یک حالت ویژه با مقادیر زیر بپردازیم

$$\begin{array}{lll} \rho_1 = 100 ohm-m; & \rho_2 = 5 ohm-m; & \rho_3 = \infty \\ h_1 = 10m; & h_2 = 10m; & h_3 = \infty \end{array}$$

داریم $H_1 = h_1$ و $H_2 = 2h_1$ در نتیجه $p_1 = 1$ و $p_2 = 2$

از مقایسهٔ معادله(۲-۶۳) و (۲-۶۴) می توانیم مقادیر ضریب $A_1(m)$ را بنویسیم:

$$A_1 = \frac{K_{12}g + g^2}{1-g^2} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n g^n \qquad (۲-۷۴)$$

یا:

$$A_1 = a\frac{g}{1-g} + c\frac{-g}{1-g}$$

که:

$$\begin{array}{l} (a-c) = K_{12}; \\ (a+c) = 1, \end{array}$$

یا:

$$A_1 = a\frac{g}{1-g} + c\frac{-g}{1-g}$$

با بسط یک سری:

$$A_1 = a\left(g + g^2 + g^3 + \ldots..\right) + c\left(-g - g^2 - g^3 - \ldots..\right) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n g^n \qquad (۲-۷۵)$$

از رابطهٔ بالا برای اولین قسمت $b_1 = b_2 = b_3 = 1$ و برای دومین قسمت $b_1 = b_2 = b_3 = (-1)$ بدست می دهد و مقاومت ویژه متوسط $\bar{\rho}$ بوسیلهٔ رابطهٔ زیر داده می شود:

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = 1 + \frac{1+K_{12}}{2}\cdot 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\delta^3}{\left[\delta^2 + (2n)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1-K_{12}}{2}\cdot 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\delta^3(-1)^n}{\left[\delta^2 + (2n)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \qquad (۲-۷۶)$$

مقدار $\frac{\bar{\rho}}{\rho}$ را می توان از عبارت بالا برای مقدار معین از K_{12}محاسبه کرد یعنی $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ برای مقادیر مختلف از $\delta = \frac{r}{h_1} = \frac{AB}{2h_1}$.

در این مثال مقدار $K_{12} = 0.905$و متغیرها δ و n می باشند.مقدار n را باید طوری انتخاب شود که بدون خطایی چشمگیر در محاسبات، امکان حذف جملات با درجه بالاتر را طی محاسبات کامپیوتری فراهم آورد. برای یک سری قویاً همگرا، دقت کافی ممکن است در طی چند ده دوره بدست آید.

هرچند برای برخی حالات نامعقول ممکن است لازم باشد کامپیوتر به تعداد جملات بیشتری بپردازد.

در رابطه بالا (۲-۷۶) که مقدار $\frac{\bar{\rho}}{\rho_1}$ را می دهد، یک نکته جالب توجه اینکه معادله بالا را می شود برای امکان استفاده از منحنی دو لایه ای در ترسیم منحنی سه لایه ای بیشتر ساده کرد.

برای زمین دو لایه ای میدانیم که $\rho_2 = \infty$ در نتیجه مقدار $\bar{\rho}$ بصورت زیر است.

$$\bar{\rho}_\infty = \rho_1\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\delta^3}{\left[\delta^2 + (2n)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

و همین طور برای $\rho_2 = 0$می توانیم بنویسیم:

$$\bar{\rho}_0 = \rho_1\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\delta^3(-1)^n}{\left[\delta^2 + (2n)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

بنابراین، معادله(۲-۷۶) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\bar{\rho} = \frac{1 - K_{12}}{2}\bar{\rho}_0 + \frac{1 + K_{12}}{2}\bar{\rho}_m \qquad (۷۷-۲)$$

بنابراین، معادله(۲-۷۷) اشاره دارد به اینکه می توانیم منحنی های کمکی سه لایه ای برای حالت داده شده، با کمک منحنی های کمکی دو لایه ای رسم کنیم. این نظریه اساس ساختار گرافیکی منحنی های سه لایه ای ، چهار لایه ای، برای استفاده در صحرا جایی که کامپیوتر ممکن است در دسترس نباشد را تشکیل می دهد.

فصل سوم:

تفسیر داده ها

در تفسیر داده های سونداژ الکتریکی قائم شلومبرژه (VES) به تعداد زیادی منحنی های کمکی، برای مقایسه با منحنی های صحرایی نیاز است. منحنی های صحرایی در صورت لزوم بوسیله کامپیوتر ترسیم می شوند. از روش معروف انطباق جزبه جز منحنی صحرایی با مجموعه منحنی کمکی برای تفسیر پارامتر لایه ای استفاده می شود. پارامتر های بدست آورده دست کم برای حدس اولیه در روشهای تفسیر مستقیم برای معکوس کردن داده های (VES) استفاده می شود.

این فصل با رویه ها و اصول بنیادی تفسیر منحنی های شلومبرژه هم با استفاده از منحنی های کمکی و هم با آخرین تکنیک های معکوس سازی داده های مقاومت ویژه سروکار دارد.

۳-۱ نوع منحنی های مقاومت ویژه ظاهری شلومبرژه:

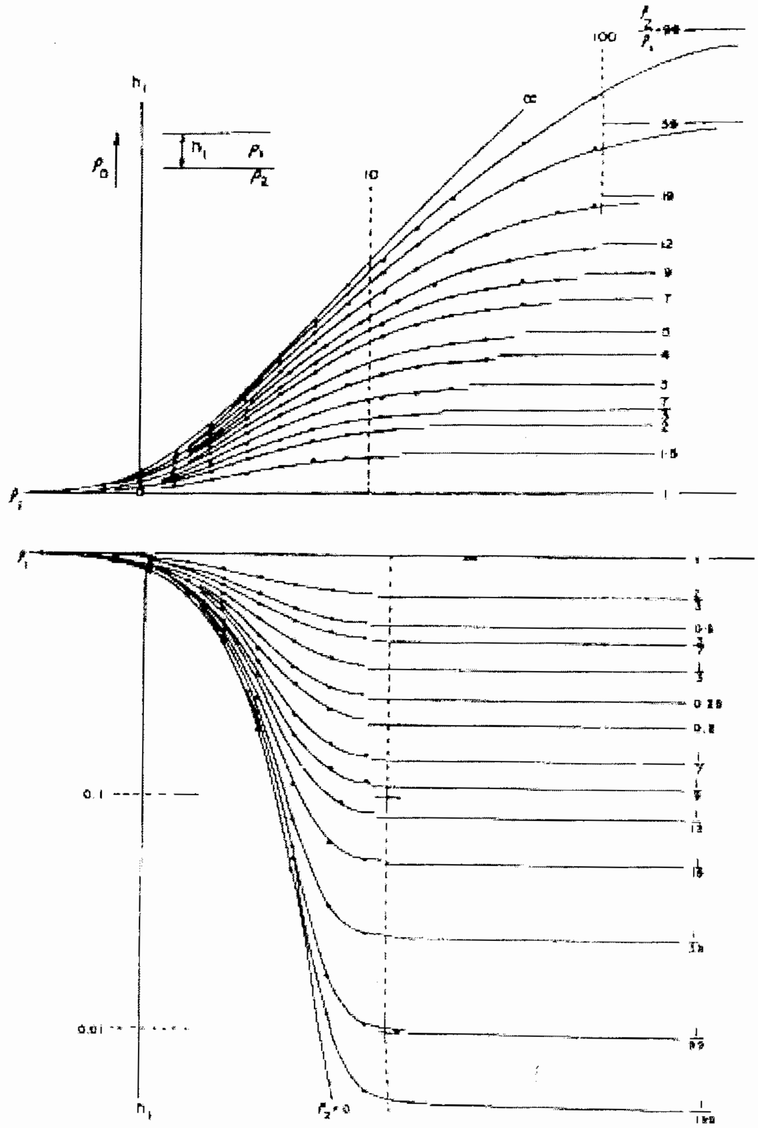
۳-۱-۱ منحنی های دو لایه ای:

دو دسته منحنی کمکی دو لایه ای نظری موجود است. یکی ρ_2/ρ_1 بزرگتر از یک(نوع صعودی) و دیگری ρ_2/ρ_1 کوچکتر از یک (نوع نزولی). مقادیرای از ρ_2/ρ_1 که طبق این مقادیر منحنی کمکی رسم میشود به قرار زیر است.

دسته اول : $\rho_2/\rho_1 = 11/9, 3/2, 13/7, 2, 7/3, 3, 4, 5, 17/3, 7, 9, 19, 39, 99, \infty$

دسته دوم : $\rho_2/\rho_1 = 9/11, 2/3, 7/13, 1/2, 3/7, 1/3, 1/4, 1/5, 3/17, 1/7, 1/9, 1/19, 1/39, 1/99, 0.$

این دسته از منحنی های کمکی در شکل ۳-۱ (الف و ب) روی ورقه هایی که هر دو محور آن لگاریتمی است با مقیاس $62.5mm$ رسم شده است. و این منحنی ها می توانند برای تفسیر منحنی های چند لایه ای مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۳-۱ ب.

۳-۱-۲ منحنی سه لایه:

تمام مجموعه منحنی های سه لایه را بسته به نسبت ρ_3, ρ_2, ρ_1 می توان به چهار گروه تقسیم نمود.

۱- پایین رونده بالا رونده[1]: وقتی $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ، که این نوع منحنی به اسم H شناخته شده است(بر گرفته از اسم $Hummel$).

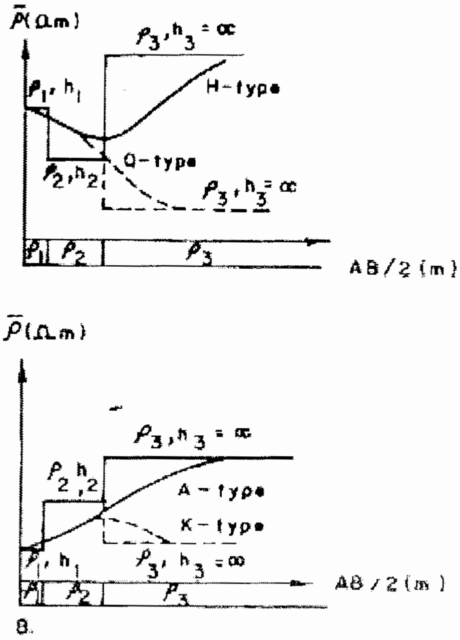
۲- دو بار بالا رونده[1]: وقتی $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ، که این نوع منحنی به عنوان نوع A شناخته می شود.(مطابق با محیطهای آنیزوتروپی).

[1] Minimum type

۳- بالا رونده پایین رونده[۲]: وقتی $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ که این نوع منحنی به عنوان نوع K یا بعضی وقتها به نوع DA شناخته شده است (به معنی جابجا شده یا اصلاح شدهٔ آنیزوتروپی).

۴- دو بار پایین رونده[۳]: وقتی $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ که این نوع منحنی به عنوان نوع Q و بعضی وقتها به نوع DH شناخته شده (به معنی جابجا یا اصلاح شدهٔ *Hummel*).

نمودار تمام حالتهای گفته شده در بالا برای محیطهای سه لایه در شکل ۳-۲ آورده شده است.



الف

ب

شکل ۳-۲ منحنی های سه لایه ای.

الف - نوع H: $(\rho_1 > \rho_2 < \rho_3)$ و نوع Q: $(\rho_1 > \rho_2 > \rho_3)$

ب- نوع A : $(\rho_1 < \rho_2 < \rho_3)$ و نوع K : $(\rho_1 < \rho_2 > \rho_3)$

منحنی های تئوری کمکی سه لایه ای برای آرایش شلومبرژه توسط افراد مختلف به شکلهای زیر انتشار یافته است: (۱) توسط Compagnie General de Geophysique در سال ۱۹۵۵و۱۹۶۳ که شامل ۴۸ مجموعه منحنی که هر کدام آنها شامل ۱۰ منحنی، در مجموع ۴۸۰ منحنی می باشد.(۲) توسط أرلینا و مونی[۴] در سال ۱۹۶۶، که شامل ۷۶ مجموعه منحنی سه لایه ای (برای نوع H و K هر کدام ۲۵ مجموعه و برای نوع A و Q هر کدام ۱۳ مجموعه) در کل ۹۱۲ منحنی

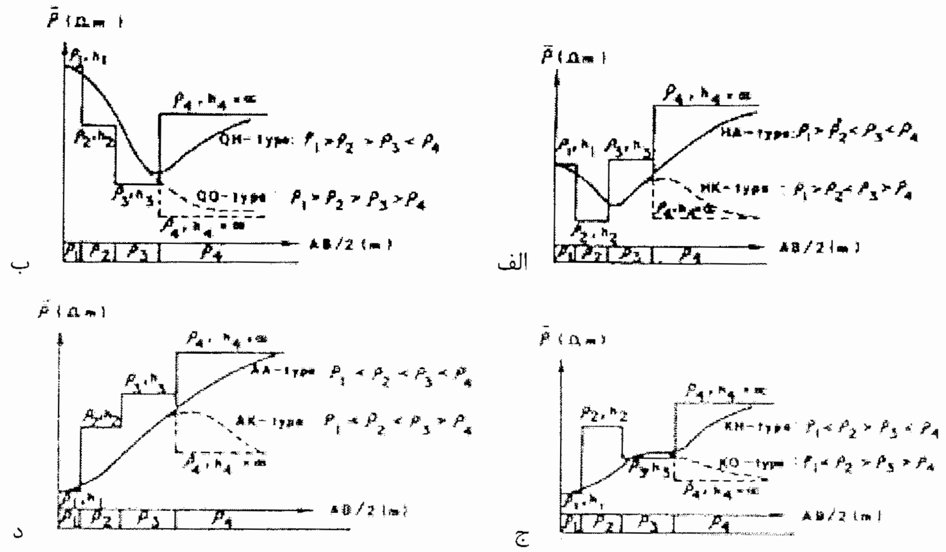
---

[1] Double ascending type
[2] Maximum type
[3] Double descending type
[4] Orellana and Mooney

می باشد. (۳) $EAEG$ در سال ۱۹۶۹ یک مجموعه استاندارد از منحنی های سه لایه ای که شامل یک ویرایش زیبا با ۲۲۶۰ حالت بود انتشار داد (تهیه شده توسط ریجکس ویترستیت[1]).

۳-۱-۳ منحنی چهار لایه:

از ترکیب منحنی های نوع Q, K, A, H (شکل ۳-۲)به آسانی دیده می شود که فقط ۸ نوع منحنی برای محیطهای چهار لایه ای می تواند وجود داشته باشد. این موضوع در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. این منحنی ها را می توان به اسمهای $QQ, QH, KQ, KH, AK, AA, HK, HA$ مشخص نمود. مجموعه منحنی های کمکی برای حالت چهار لایه ای تحت عنوان"Paletka " در نشریه « Anonymous » موجود است. این آلبوم شامل ۱۲۲ مجموعه است که هر ۸ نوع حالت را پوشش می دهد.



شکل ۳-۳ ساختار منحنی های چهار لایه ای

الف. نوع: HA, HK — ب. نوع: QH, QQ

ج. نوع: KH, KQ — د. نوع: AA, AK

مقادیر پارامترها بصورت زیر است:

$$\rho_2/\rho_1 = 1/39, 1/19, 1/9, 3/17, 1/4, 3/7, 2/3, 3/2, 7/3, 17/3, 3, 4, 9 \text{ و } 39 \text{؛}$$

$$\rho_3/\rho_1 = 1/39, 1/19, 1/9, 3/17, 1/4, 3/7, 2/3, 3/2, 7/3, 17/3, 3, 4, 9 \text{ و } 39 \text{؛}$$

$$h_2/h_1 = 1/2, 1, 2, 3, 5, 24 \text{؛}$$

[1] Rijkawaterstaat

$$h_3/h_1 = 1/2, 1, 2, 3, 10, 12 \text{ و } 72$$

منحنی های چهار لایه ای که در سال ۱۹۶۶ توسط مونی و اُرلینا انتشار یافت شامل ۴۸۰ حالت در ۳۰ مجموعه بود.

۳-۲ مقادیر مجانب منحنیهای شلومبرژه:

مقاومت ویژه ظاهری$(\bar{\rho})$ برای یک زمین دو لایه ای و برای آرایش شاومبرژه می تواند بصورت زیر نوشته شود :

$$\frac{\bar{\rho}}{\rho_1} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n (AB/2h_1)^3}{\left[(AB/2h_1)^2 + (2n)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \qquad (۳-۱)$$

که:

$K_{12} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$

$AB =$ فاصلهٔ الکترودی

$h_1 =$ ضخامت اولین لایه

چندین حالت حدی را که می شود از رابطهٔ۳-۱ استخراج کرد عبارتند از:

الف - وقتی $\rho_2 = \rho_1 \Leftarrow \bar{\rho} = \rho_1$، یعنی مقاومت ویژه ظاهری برابر با مقاومت ویژه حقیقی از یک محیط بی نهایت همگن است.

ب - وقتی $AB/2 \to 0 \Leftarrow \bar{\rho} = \rho_1$، یعنی برای زمین دولایهٔ وقتی فواصل الکترودی کوچک باشد مقاومت ویژه ظاهری برابر با مقاومت ویژه حقیقی اولین لایهٔ خواهد بود.

ج - وقتی $AB/2 \to \infty \Leftarrow \bar{\rho} = \rho_2$، یعنی برای مقادیر بزرگ فواصل الکترودی مقاومت ویژه ظاهری برابر با مقاومت ویژه حقیقی دومین لایهٔ خواهد بود.

می توانیم معادله ۳-۱ را به شکل زیر بنویسیم:

$$\bar{\rho} = \rho_1 F(AB/2h_1) \qquad (۳-۲)$$

با فرض اینکه مقدار K_{12} یعنی نسبت ρ_2/ρ_1 ثابت باقی بماند.

اگر از معادله بالا $\bar{\rho}$ را برحسب $AB/2h_1$ با مقیاس حسابی رسم کنیم بر حسب مقادیر مختلف از ρ_1 با وجود ثابت بودن مقدار h_1 به منحنی های مختلفی می رسیم و همین طور برعکس با وجود ثابت بودن ρ_1 و متغیر بودن h_1 این بار نیز به منحنی های مختلفی می رسیم.

اگر از معادله بالا $\overline{\rho}$ را برحسب $AB/2h_1$ با مقیاس حسابی رسم کنیم بر حسب مقادیر مختلف از ρ_1 با وجود ثابت بودن مقدار h_1 به منحنی های مختلفی می رسیم و همین طور برعکس با وجود ثابت بودن ρ_1 و متغیر بودن h_1 این بار نیز به منحنی های مختلفی می رسیم.

با استفاده از مقیاس لگاریتمی برای معادله (۳-۲) تأثیر ρ_1و h_1 روی منحنی بصورت زیر از بین می رود.

$$\log \overline{\rho} - \log \rho_1 = F(\log AB/2 - \log h_1) \qquad (۳-۳)$$

یا:

$$\log(\overline{\rho}/\rho_1) = F(\log AB/2h_1) \qquad (۴-۳)$$

معادله(۳-۴) بیانگر این مطلب است که اگر $\overline{\rho}$ به عنوان محور طولها و $AB/2$ را به عنوان محور عرضها روی یک مقیاسی که هر دو محور آن لگاریتمی است رسم کنیم. با وجود هر نوع تغییر در مقدار ρ_1 و h_1 به شرطی که ρ_2/ρ_1 ثابت بماند شکل منحنی عوض نمی شود. فقط تأثیر آن به این صورت است که وقتی که ρ_1 تغییر می کند منحنی موازی با محور عرضها بالا و پایین می رود و وقتی h_1 تغییر می کند منحنی موازی محور طولها به چپ و راست می رود.(شکل ۳-۴)

بنابراین با فرض ثابت بودن ρ_2/ρ_1 شکل منحنی های شلومبرژه رسم شده روی مقیاسی که هر دو محورش لگاریتمی است از مقاومت ویژه و ضخامت اولین لایه در یک زمین دو لایه ای مستقل است. همچنین می شود فهمید که این موضوع برای مقطع ژئوالکتریک چندین لایه ای نیز بر قرار است.

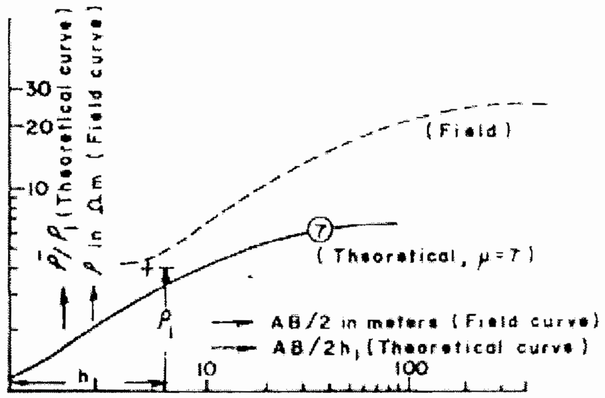
از اندازه گیری صحرایی، مقاومت ویژه ظاهری را به عنوان یک تابع از فاصله الکترودی به دست می آوریم یعنی: $\overline{\rho} = f(AB/2)$

با استفاده از مقیاس لگاریتمی برای این رابطه داریم:

$$\log(\overline{\rho}) = F(\log AB/2) \qquad (۵-۳)$$

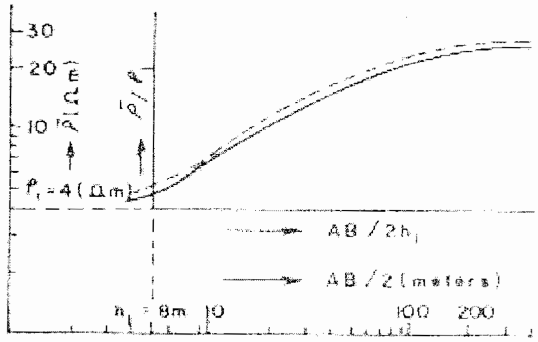
معادلات (۳-۳) و (۳-۵) به ترتیب به شکل $y - b = f(x - a)$ و $y = f(x)$ هستند.

این معادلات شبیه به یگدیگر هستند به استثناء اینکه اولین منحنی موازی با محورها نسبت به دومین منحنی روی مقیاس لگاریتمی جابه جا شده است. این موضوع نشان می دهد که تفسیر منحنی های صحرایی بوسیلهٔ انطباق از طریق استفاده از مقیاس لگاریتمی امکان پذیر است. بنابراین مشروط برآنکه ρ_2/ρ_1 ثابت باقی بماند، برای هر مقدار از ρ_1 و h_1 نیازی به داشتن منحنی های



شکل ۳-۴ : ارتباط بین منحنی های صحرایی و تئوری، منحنی صحرایی دقیقاً همان شکل منحنی تئوری را دارد با این تفاوت که موازی محورها جابه جا شده است.

در شکل ۳-۵ منحنی صحرایی دو لایه ای برحسب $\bar{\rho}$ در برابر $\frac{AB}{2}$ برای مقادیر $h_1 = 8m$ و $\rho_1 = 4\ ohm-m$ و $\rho_2/\rho_1 = 7$ نشان داده شده است. منحنی کمکی دو لایه ای نظری ($\bar{\rho}/\rho_1$ بر حسب $AB/2h_1$) برای $\rho_2/\rho_1 = 7$ در همان نمودار دیده می شود. این دو منحنی می توانند به آسانی در اثر جابه جایی منحنی صحرایی روی منحنی کمکی با توجه به اینکه محورهای مختصات هر دو منحنی با هم موازی بماند، منطبق شوند. در حال حاضر منحنی تئوری می توانند برای هر مقدار ρ_1 و h_1 از منحنی صحرایی، مشروط بر اینکه نسبت ρ_2/ρ_1 در هر دو منحنی یکی باشد منطبق شوند.



شکل ۳-۵ منحنی صحرایی برای حالت دو لایه ای روی یک منحنی کمکی دو لایه ای قرار گرفته است. مبدأ منحنی کمکی روی منحنی صحرایی، ضخامت و مقاومت ویژه لایه رویی (اولی) را می دهد.

روش منطبق کردن برای پیدا کردن ρ_1 و h_1 در شکل ۳-۴ نشان داده شده. این روش به این صورت است که منحنی صحرایی را روی یک ورقه شفاف گرافیکی که هر دو محور آن لگاریتمی است(با همان مقیاس منحنی کمکی) ترسیم میکنند و سپس ورقه شفاف گرافیکی را روی منحنی

کمکی قرار می دهیم. ورقه شفاف گرافیکی را به موازات محورها حرکت می دهیم تا یک جفت شدگی حاصل شود. شکل ۳-۵ چگونگی روش را نشان می دهد. نقطه ای که روی کاغذ شفاف لگاریتمی از انطباق با مبدأ منحنی کمکی (یعنی $\bar{\rho}/\rho_1 = 1, AB/2h_1 = 1$) به دست می آید در امتداد محور عرضها برابر است $\log AB/2 = \log h_1$ یعنی $h_1 = AB/2$ و در امتداد محور طولها $\log \bar{\rho} = \log \rho_1$ یعنی $\rho_1 = \bar{\rho}$ را می دهد.

بنابراین استفاده از مقیاس لگاریتمی، تعیین ρ_1 و h_1 را از منحنی های صحرایی و تئوری امکان پذیر می سازد. گذشته از این برای تغییرات بزرگ مقاومت ویژه و فواصل الکترودی زیاد تنها گزینه منطقی، مقیاس لگاریتمی است. بعلاوه یکی دیگر از خصوصیات مفید استفاده از مقیاس لگاریتمی این است که از اثرات مقاومت ویژه بالا وضخامت کم در اعماق زیاد می کاهد اما برشدت مقاومت ویژه پایین و ضخامتهای کم در اعماق کم می افزاید.

به آسانی می توان دریافت که در مقیاس تمام لگاریتمی، شرایط مقادیر محدود کننده همچنان برقرار است و طبیعت مجانبی منحنی ها حفظ می گردد. بنابراین مقیاس لگاریتمی مضاعف خیلی سودمند است.

حالا می خواهیم مقادیر مجانب مقاومت ویژه ظاهری را وقتی که دومین لایه دارای مقاومت ویژه بی نهایت است را بیابیم. آشکارا است که در فواصل به قدر کافی زیاد از منبع، خطوط جریان موازی سطح و سطوح هم پتانسیل، استوانه ای و عمود بر سطح خواهد بود. اگر یک سطح هم پتانسیل در فاصله زیاد r از منبع در نظر بگیریم جریان بوسیله رابطه زیر بیان می شود که

$$J = E/\rho_1 \quad \text{و} \quad I = 2\pi r h_1 J$$

بنابراین:

$$E = \frac{\rho_1 I}{2\pi r h_1}$$

از این رو مقاومت ویژه ظاهری برای ترکیب شلومبرژه با رابطهٔ زیر بیان می شود:

$$\log \bar{\rho} = \log r + \log(\rho_1/h_1) = \log r - \log(h_1/\rho_1) \qquad (۳-۶)$$

معادله بالا، معادله یک خط شیب دار با زاویه شیب 45° نسبت به محور عرضها است که محور عرضها را در فاصله (h_1/ρ_1) از مبدأ مختصات قطع می کند. بنابراین تحت هیچ شرایطی نباید شیب منحنی صحرایی بیش از 45° باشد و همچنین این موضوع بیانگر این مطلب است که برای

یک زمین n لایه ای (لایهٔ n اُم با مقاومت بی نهایت) نسبت مجانبها معتبر است به شرط اینکه ρ_1 با ρ_S مقاومت ویژهٔ طولی $(n-1)$ لایه و h_1 با H کل ضخامت $(n-1)$ لایه جایگزین شود.

۳-۳ اصل کاهش(تبدیل)[1]:

یک بلوک با سطح مقطع واحد به ضخامت h و مقاومت ویژهٔ ρ در نظر بگیرید. سپس مقاومت T عمود بر سطح بلوک و رسانندگی S موازی با سطح بلوک بوسیله روابط زیر بیان می شود:

$$T = h\rho \qquad (۷-۳)$$

$$S = h/\rho \qquad (۸-۳)$$

که می رسیم به:

$$\rho = \sqrt{T/S} \quad \text{و} \quad h = \sqrt{ST} \qquad (۹-۳)$$

با استفاده از رابطه بالا به ازای هر مقدار از S و T ، مقادیر مقاومت ویژه ρ و ضخامت h یک بلوک را می توان به دست آورد. هم اکنون از معادله (۳-۷) می توانیم بنویسیم:

$$\log\rho = -\log h + \log T \qquad (۱۰-۳)$$

اگر ρ برحسب h روی مقیاس لگاریتمی رسم شود معادله بالا بیانگر یک خط مستقیم شیب دار در یک زاویه 135° نسبت به محور h است و آن را در فاصله T از مبدأ مختصات قطع می کند.

و همین طور اگر از رابطه (۳-۸) لگاریتم بگیریم داریم:

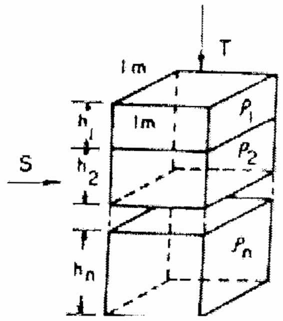
$$\log\rho = \log h - \log S \qquad (۱۱-۳)$$

این رابطه نیز شبیه رابطه (۳-۶) بیانگر یک خط مستقیم شیب دار با زاویه 45° نسبت به محور طولها (محور h) است ومحور h رادر فاصلهٔ S از مبدأ قطع می کند.

نقطه تقاطع دو خط مستقیم به دست آمده از معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱) به عنوان مقاومت ویژه و ضخامت برای یک ترکیب ویژه از S و T تعریف می شود.

حالا یک بلوک که شامل n لایه همگن موازی و ایزوتروپیک، که مقاومت هر یک به ترتیب $\rho_1, \rho_2, ..., \rho_n$ و ضخامتشان $h_1, h_2, ..., h_n$ می باشد را در نظر می گیریم(شکل ۳-۶)

[1] Principle of Reduction



شکل ۳-۶ : یک بلوک n لایه ای با سطح مقطع واحد.

وقتی جریان به صورت عمود بر سطح، بر بلوک تزریق می شود و نشر پیدا می کند مقاومت کل بلوک برابراست با:

$$T = T_1 + T_2 + ... + T_n = \sum_{i=1}^{n} T_i = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + ... + \rho_n h_n = \sum_{i=1}^{n} \rho_i h_i \qquad (۱۲\text{-}۳)$$

$$S = S_1 + S_2 + ... + S_n = \sum_{i=1}^{n} S_i = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + ... + h_n/\rho_n = \sum_{i=1}^{n} h_i/\rho_i \qquad (۱۳\text{-}۳)$$

پارامترهای T و S که بترتیب به عنوان مقاومت عرضی[1](مقاومت در جهت عمق) و رسانندگی طولی[2] تعریف شده اند نقش مهمی در تفسیر داده های سونداژالکتریکی بازی می کنند. لازم به ذکر است میلت[3] در سال ۱۹۷۴ این پارامتر ها را با R و C نشان داده و آنها را به ترتیب عناوین "متغیر Dar Zarrouk " و "تابع Dar Zarrouk " می نامید. زهدی[4] در سال ۱۹۷۳و۱۹۷۴ ، پارامترهایDar Zarrouk را برای تفسیر منحنی های شلومبرژه از طریق یک برنامه کامپیوتری که اتو ماتیک وار پارامترهای لایه را از منحنی های مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می کرد مورد استفاده قرار داد.

برای یک حالت ویژه از بلوک دو لایه می رسیم :

$$T = T_1 + T_2 = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 \qquad (۱۴\text{-}۳)$$

و

$$S = S_1 + S_2 = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 \qquad (۱۵\text{-}۳)$$

اگر ρ_s و ρ_t بترتیب مقاومت ویژه طولی و مقاومت ویژه عرضی از بلوک مورد نظر باشند داریم:

---

[1] Transverse resistance
[2] Longitudinal conductance
[3] Maillet
[4] Zohdy

$$\rho_t(h_1+h_2)=\rho_1 h_1+\rho_2 h_2 \qquad (۱۶-۳)$$

و

$$(h_1+h_2)/\rho_s=h_1/\rho_1+h_2/\rho_2 \qquad (۱۷-۳)$$

بنابراین ضریب آنیزوتروپی λ و مقاومت ویژه متوسط ρ_m بترتیب برابر است با :

$$\lambda=\sqrt{\rho_t/\rho_s}=\frac{1}{h_1+h_2}\left[(h_1\rho_1+h_2\rho_2)(h_1/\rho_1+h_2/\rho_2)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۸-۳)$$

و:

$$\rho_m=\left[\frac{h_1\rho_1+h_2\rho_2}{h_1/\rho_1+h_2/\rho_2}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۱۹-۳)$$

حال فرض می کنیم بتوان این بلوک آنیزوتروپیک (ناهمسانگرد) را به وسیله یک بلوک همگن و ایزوتروپیک (همسانگرد) با ضخامت h_e و مقاومت ρ_e جایگزین نمود که به این پارامترها به ترتیب ضخامت مؤثر[1] و مقاومت ویژه مؤثر[2] بلوک گفته می شود.

سپس:

$$h_e\rho_e=T=h_1\rho_1+h_2\rho_2 \qquad (۲۰-۳)$$

$$h_e\rho_e=S=h_1/\rho_1+h_2/\rho_2 \qquad (۲۱-۳)$$

از این معادلات می رسیم به:

$$h=\left[(h_1\rho_1+h_2\rho_2)(h_1/\rho_1+h_2/\rho_2)\right]^{\frac{1}{2}}=\lambda(h_1+h_2)=\lambda H \qquad (۲۲-۳)$$

$$\rho_e=\left[\frac{h_1\rho_1+h_2\rho_2}{h_1/\rho_1+h_2/\rho_2}\right]^{\frac{1}{2}}=\rho_m=\lambda\rho_s \qquad (۲۳-۳)$$

بنابراین امکان تبدیل یک بلوک دو لایه ای مجزا (هر کدام همگن و ایزوتروپیک) به یک محیط واحد همگن و ایزوتروپیک وجود دارد. یک جداسازی(تجریه) کامل از این نوع در حالت نوع A که $\rho_1<\rho_2<\rho_3$ است امکان پذیر است. در اینجا، ضخامت مؤثر لایه تبدیل شده λ برابرِ ضخامت کل است و مقاومت ویژه مؤثر برابر با مقاومت ویژه متوسط محیط می باشد. از آنجا که λ معمولا بزرگتر از واحد است ضخامت مؤثر لایه های مرکب بزرگتر از کل ضخامت دو لایه است.

۴-۳ اصول یا کاهش(تبدیل) یک زمین سه لایه ای:

[1] Effective Thicknees
[2] Effective Resistivity

حالا یک زمین سه لایه ای را در نظر می گیریم. بخش سمت چپ منحنی های سونداژ در این حالت با یک منحنی دو لایه کمکی که پارامتر $\mu=\rho_2/\rho_1$ آن نزدیک به قسمت اول منحنی سه لایه ای است منطبق می شود. و این انطباق برای فواصل کم از گستردگی AB دقیق تر است. برای فواصل بزرگ از گستردگی AB بخش سمت راست منحنی سه لایه ای را می توان با یک منحنی دو لایه ای که پارامتر μ آن مساوی $\mu_e=\rho_3/\rho_e$ است جایگزین کرد. که در این حالت ρ_3 مقاومت ویژه لایه سوم و ρ_e مقاومت ویژه مؤثر یک لایه همگن جانشین شده توسط دو لایه اول می باشد. مسئله اکنون یافتن پارامترهای (ضخامت مؤثر و مقاومت ویژه مؤثر لایه های اول و دوم) لایه تبدیل شده است. از مطالعه دقیق تعداد زیادی منحنی های تئوری، تجربی و صحرایی بدست آوردن برخی قوانین تجربی برای تعیین این پارامتر ها امکان پذیر شده است. این قوانین برای هر چهار نوع منحنی های سه لایه ای متفاوت است و به شکل مفید وسودمند در ساختار وتفسیر منحنی صحرایی جا گرفته است.

این حالات، هم اکنون جداگانه مورد توجه قرار می گیرد.

۳-۴-۱ حالت اول: نوع_H

در این حالت مقاومت ویژه لایه وسط کوچکتر از لایه های بالا و پایین است. وقتی مقاومت ویژه لایه آخری بزرگ باشد برای مقایر بزرگ AB، منحنی سونداژ شدیداً تحت تأثیر مقاومت لایه زیرین قرار گرفته و شارش جریان در لایه های رویی تقریباً موازی با لایه بندی افقی خواهد بود. بنابراین در این حالت مقاومت عرضی(T) ناچیز بوده و رسانندگی طولی برابر با مجموع رسانش طولی دو لایهٔ بالاتر است.

از این رو اگر دو لایه اول و دوم را بوسیله یک لایه همگن مجزا با ضخامت مؤثر h_H و مقاومت ویژه مؤثر ρ_H جانشین کنیم به آسانی دیده می شود که آنها از روابط زیر به دست می آید:

$$h_H=h_1+h_2 \qquad (۳-۲۴)$$

$$\rho_H=\frac{h+h}{S+S}=\left(h_1+h_2\right)/\left(h_1/\rho_1+h_2/\rho_2\right)=\rho_s \qquad (۳-۳۵)$$

h_H و ρ_H گاهی اوقات یه عنوان پارامترهای Hummels شناخته می شود.

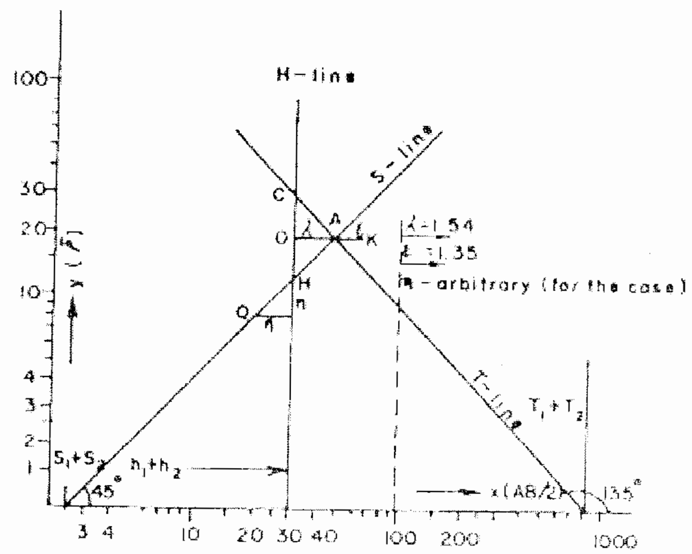
در یک برگه کاغذ که هر دو محورش لگاریتمی است اولین معادله (۳-۲۴) نشان دهندهٔ یک خط موازی با محور yها است و دومین معادله (۳-۲۵) نشان دهندهٔ یک خط مستقیم شیب دار با زاویه شیب 45° نسبت به محور xها است و محور xها را در فاصله S_1+S_2 قطع می کند. نقطه تقاطع از دو خط مستقیم نشان داده شده در شکل ۳-۷ به عنوان نقطهٔHummel (H) شناخته شده و مختصات آن معرف ρ_H و h_H است.

معادلات (۳-۲۴)و(۳-۲۵) می توان برای ترسیم نقطه کمکی H نقشه های اِبرت برای تعداد زیادی از مقادیر $\mu_2=\rho_2/\rho_1$ و مقادیرمختلف $\upsilon_2=h_2/h_1$ با مختصات زیر بهره جُست.

$$\text{طول}=x_H/h_1=1+\upsilon_2$$

و

$$\text{عرض}=y_H/\rho_1=\left(\frac{1+\upsilon_2}{1+\upsilon_2/\mu_2}\right)$$



شکل ۳-۷ : مثلث آنیزوتروپی. وضعیتهایی از نقاط K,A,Q با توجه به نقطه H برای یک حالت ویژه که $\eta, h_2=20m, h_1=10m, \rho_2=40\Omega m, \rho_1=5\Omega m$ دلخواه نشان داده شده است.

نمودارهای نقاط کمکی H برای مقادیر مختلف μ_2 و υ_2 در شکل (۳-۸)ب نشان داده شده است. و از این نمودارها می توان مستقیماً برای فهمیدن نقطهH (h_H,ρ_H) استفاده کرد. این شرایط فقط برای نمودارهای نقطه H با $\rho_3=\infty$ برقرار است. با وجود این می توان برای هر مقدار دلخواه از ρ_3 که به اندازه کافی از ρ_2 بزرگتر است از این نقشه برای رسیدن به نقاط H استفاده کرد. این موضوع اساس روش سادهٔ ایجاد منحنی های تجربی نوع H را شکل می دهد.

۳-۴-۲ حالت دوم: نوع ـA

در این حالت مقاومت ویژه لایه وسط از لایه اول بیشتر است (یعنی $\rho_2 > \rho_1$).از این رو، اثرمقاومت عرضی T را نمی توان نادیده گرفت. همچنین از آنجا که $\rho_3 > \rho_2$ مجبوریم رسانش طولی S را نیز حساب کنیم. بنابراین مقادیر Tو Sاز لایه همگن تبدیل شده برابر با مجموع Sو T دو لایه رویی(لایه اول و دوم)خواهد بود. در نتیجه:

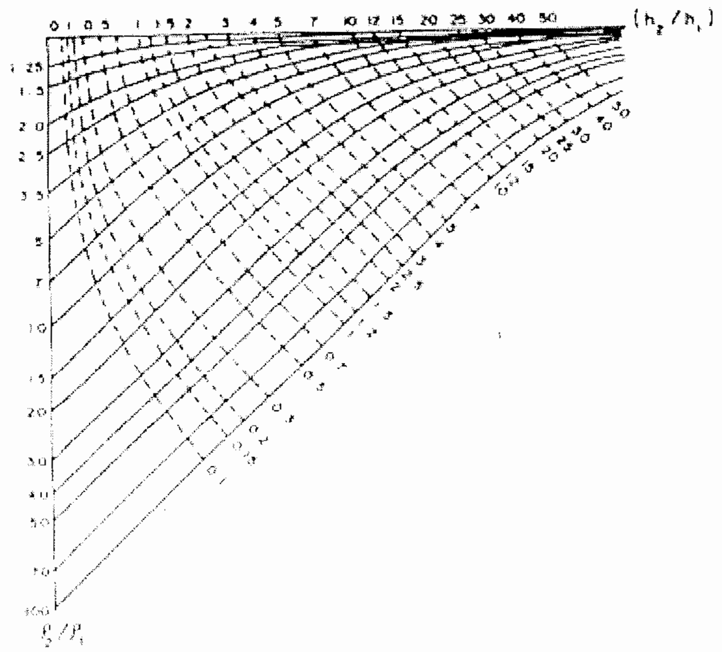
$$T = T_1 + T_2 = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2$$

و

$$S = S_1 + S_2 = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2$$

این حالت قبلاً مورد بررسی قرار گرفته و ضخامت مؤثر و مقاومت ویژه مؤثر بوسیله معادلات مربوطه داده شده است(معادلات ۳-۲۲و۳-۲۳ را ببینید).

نمودار کمکی نوع (A):



شکل(۳-۸)الف.

$$h_A = \sqrt{TS} = \lambda(h_1 + h_2) = \lambda H \qquad (۳-۲۶)$$

$$\rho_A = \sqrt{T/S} = \rho_m = \lambda \rho_s \qquad (۳-۲۷)$$

این نقاط به وضوح مختصات نقطه تقاطع خطوط Sو T هستند (شکل ۳-۷). نقطه A را می توان نقطهٔ آنیزوتروپی نامید. بنابراین ضخامت لایه تبدیل شدهٔ معادل دو لایه نخست (مثل

حالت اول یعنی منحنی نوع H) برابر با مجموع ضخامت دو لایه اول نیست بلکه λ برابر مجموع ضخامت دو لایه اول است. مقاومت ویژه دو لایه تبدیل شده نیز λ برابر مقاومت ویژه طولی دو لایه اول است.

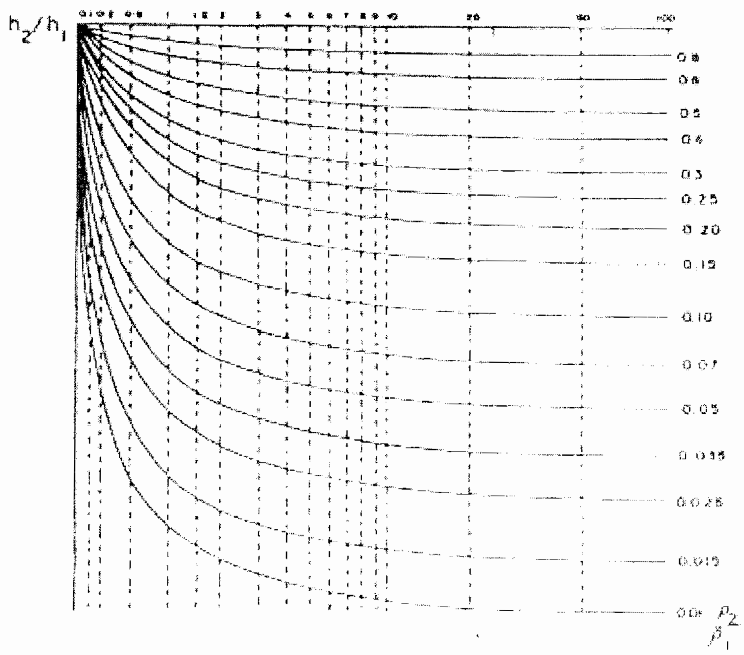
آنچنانچه در حالت اول داشتیم، در اینجا نیز معادلات (۳-۲۶) و (۳-۲۷) می توانند برای ترسیم نقاط کمکی نقشه A برای مقادیر مختلف μ_2 و υ_2 مورد استفاده قرار گیرند. این روابط را می توان بصورت زیر بازنویسی کرد.

$$\frac{x_A}{h_1} = \{(1+\upsilon_2/\mu_2)(1+\upsilon_2\mu_2)\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۲۸\text{-}۳)$$

$$\frac{y_A}{\rho_1} = \left\{\frac{1+\upsilon_2\mu_2}{1+(\upsilon_2/\mu_2)}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

مقادیر بدست آمده از معادله (۳-۲۸) مانند حالت اول رسم شده و در شکل ۳-۸الف نشان داده شده است. مختصات نقطهA (یعنی h_A, ρ_A) را می توان هم بوسیله رابطه ۳-۲۸ و هم از طریق قرائت منحنیهای بدست آمده (منحنی ۳-۸الف) محاسبه نمود.

منحنی کمکی نوع H



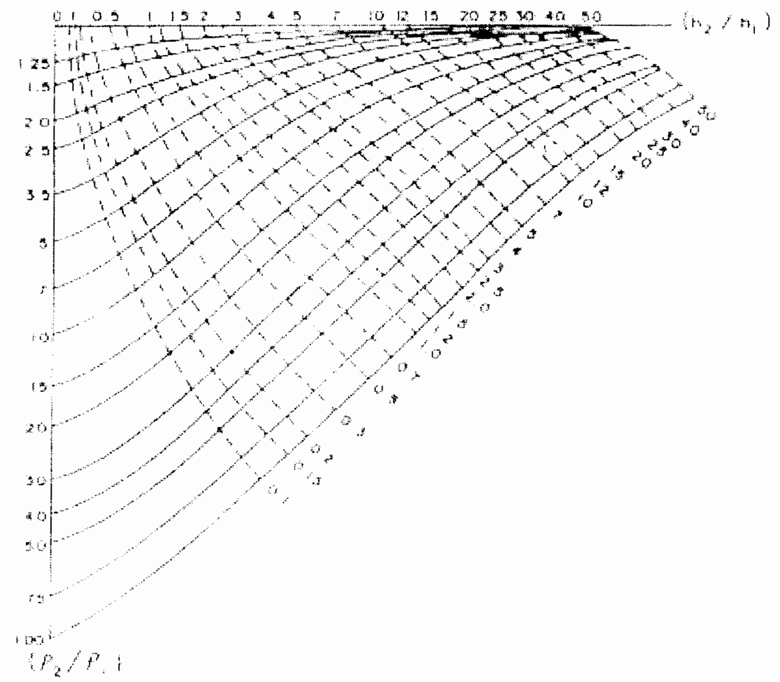
شکل ۳-۸ب.

۳-۴-۳ حالت سوم نوع: K (اصلاح شده نوع A)

در این حالت مقاومت ویژه لایه وسط بزرگتر از دو لایه بالاتر و پایین تر است. شارش جریان در دو لایه اول بویژه در AB های کوچک تا اندازه ای شبیه به حالت دوم یعنی نوع A است. بنابراین، هم T و هم S باید مورد بررسی قرار گیرد. در این حالت زیر لایهٔ دوم یک لایه با مقاومت کمتر قرار دارد و خطوط شارش جریان در لایه دوم دارای مولفه عمودی بزرگتری نسبت به نوعA است، از این رو شرایط تا اندازهای باید از شرایط بخش A متفاوت باشد.

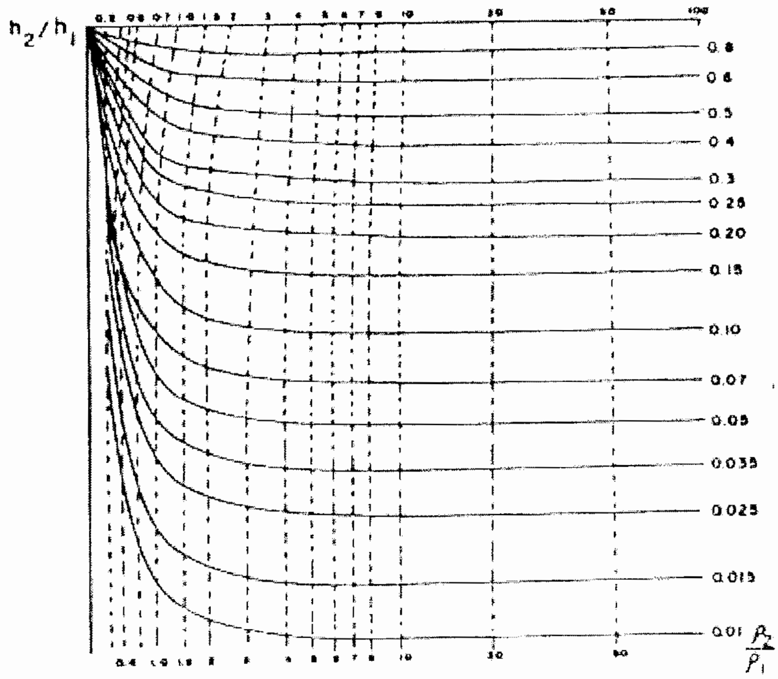
از بررسی منحنی های تئوری فهمیده می شود که در حالت نوع K مقاومت ویژه لایه تبدیل شده تغییری نمیکند و همان مقاومت ویژه نوع A است. ولی ضخامت لایه تبدیل شدهٔ نوع K بزرگتر از لایه تبدیل شدهٔ نوع A است. در اینجا h_K برابر با $\varepsilon\lambda(h_1+h_2)$ که ε تابعی از λ و معمولا بزرگتر از واحد است. روابط تجربی بین λ و ε در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. مقدار ε برای مقادیر مختلف λ را می شود از نمودار شکل ۳-۱۰ خواند.

نمودار کمکی نوع K



شکل ۳-۹ الف

نمودار کمکی نوع Q



شکل ۳-۹ب.

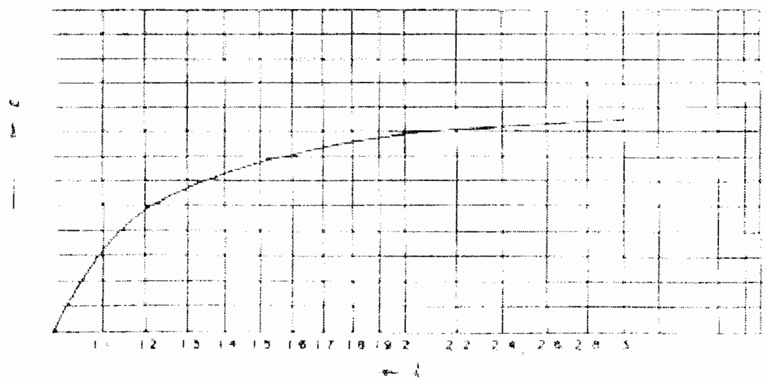
مقادیر λ و انطباقش با مقاریر ε هم بصورت گرافیکی(نموداری) در شکل ۳-۱۰ و هم بصورت جدول (جدول۳-۱) نمایش داده شده است.

جدول۳-۱ تغییرات ε با ضریب آنیزوتروپی.

λ	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.70	2.00	2.50	3.00
ε	1.17	1.17	1.29	1.32	1.33	1.36	1.38	1.40	1.42

بنابراین پارامتر لایه تبدیل شده بوسیله مختصات نقطهٔ K که در زیر آمده تعیین می شود.

$$x_K = \varepsilon\sqrt{TS} \qquad (۲۹-۳)$$
$$y_K = \sqrt{T/S}$$



شکل۳-۱۰ تغییرات فاکتور ε با ضریب آنیزوتروپی λ

نقطه K را می توان نقطهٔ آنیزوتروپی جابه جا[1] شده نامید. در صفحه کاغذ لگاریتمی طول نقطهA برابر $\log[\lambda(h_1+h_2)]$ و طول نقطه H (یعنی O)، $\log(h_1+h_2)$ است که در نمودار شکل ۳-۷ نشان داده شده است. داریم:

$$OA = \log\{\lambda(h_1+h_2)\} - \log(h_1+h_2) = \log\lambda$$

مثلث HAC مثلث آنیزوتروپی[2] نامیده می شود. و ارتفاع OA آن برابر با ضریب آنیزوتروپی λاست. پس موقعیت نقطه K به وضوح روی خط OA قرار داشته و به نحوی است که $AK = \log\varepsilon$ خواهد بود.

معادلات برای ترسیم نقشه ابرت نوع K را می توان بصورت زیر نوشت.

$$\frac{x_K}{h_1} = \varepsilon\{(1+\upsilon_2/\mu_2)(1+\upsilon_2\mu_2)\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{y_K}{\rho_1} = \left\{\frac{1+\upsilon_2\mu_2}{1+\upsilon_2/\mu_2}\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۳-۳۰)$$

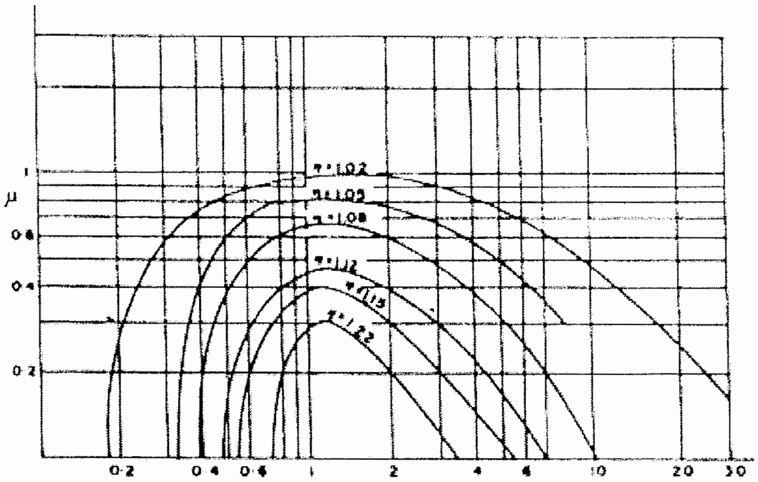
این منحنی ها برای مقادیر مختلف μ_2و υ_2 در شکل ۳-۹الف نشان داده شده است و نقاط K را می شود یا با کمک این نمودار و یا با روابط (۳-۳۰) به دست آورد.

حالت چهارم منحنی نوع: Q (تغییر یافته نوع H)

در این حالت مقاومت ویژه لایه وسط کمتر ار لایه بالاست. از این رو، بخش اول از منحنی های سونداژ در این حالت مانند بخش اول از منحنی H است. ولی نقطه کمکی H این نقشه را نمی توان در نوع Q مورد استفاده قرار داد چون لایه سوم مقاومتش کمتر از لایه رویی است.

در این حالت بصورت تجربی فهمیده می شود که ضخامت کل لایه تبدیل شده به اندازهٔ ضریب η کمتر از h_1+h_2 است. و این ضریب به مقادیر μ_2و υ_2 از بخش الکتریکی وابسته است. مقدار η را می توان از منحنی های داده شده در شکل ۳-۱۱ که برای مقادیر مختلف ازμ_2و υ_2 رسم شده است قرائت کرد.

[1] Displaced anisotropy
[2] Triangle of anisotropy



شکل ۳-۱۱ وابستگی رابطه تجربی بین λ و μ روی فاکتور η .

مقاومت ویژه مؤثر لایه تبدیل شده نیز به اندازه ضریب η کمتر از مقاومت ویژه متوسط طولی است.

مختصات نقطه Q بوسیله روابط زیر داده شده است. داریم:

$$x_Q = \frac{H}{\eta}$$
$$y_Q = \frac{1}{\eta}\frac{H}{S} \qquad (۳۱-۳)$$

به آسانی از شکل ۳-۷ دیده می شود که نقطه Q بصورت ترسیمی با کاهش η برابر طول مختصات نقطهٔ H پیدا می شود. موقعیت نقطهQ با رجوع به نقطهٔ H در مثلث آنیزوتروپی شکل ۳-۷ برای یک مقدار ویژه از η نشان داده شده است. دستگاه معادلات (۳-۳۱) را می توان به ازاء مقادیر مختلف μ_2 و υ_2 برای ترسیم نمودارهای نقاط کمکی Q بصورت زیر بازنویسی کرد.

$$\frac{x_Q}{h_1} = \frac{1}{\eta}\left(1+\upsilon_2\right)$$
$$\frac{y}{\rho_1} = \frac{1}{\eta}\frac{1+\upsilon_2}{1+\left(\upsilon_2/\mu_2\right)} \qquad (۳۲-۳)$$

نقطه Q را می توان از نمودار شکل (۳-۲)ب بدست آورد یا از روابط ۳-۳۲ با کمک شکل (۳-۱۱) محاسبه نمود.

۳-۵ مزایا و معایب اصل هم ارزی:

این موضوع قبلاً در فصل ۲، بخش ۲-۵ ذکر شده است که برای روابط مسلم از پارامترهای یک مقطع سه لایه ای، تغییرات در مقاومت ویژه و ضخامت لایه وسط، موجب تغییر قابل ملاحظه ای در

شکل منحنی سونداژ نمی شود. در این قبیل حالات تمیز دادن لایه های میانی امکان پذیر نیست و تفسیر این مقاطع ممکن است باعث خطا شود.

بنابراین برای بخشهایی از منحنی نوع H یا A اگر مقادیر لایه دوم، یعنی ρ_2 و h_2 تغییر کند بطوریکه نسبت آنها یعنی $h_2/\rho_2 = S_2$ ثابت باشد عملاً شکل منحنی تغییر نمی کند و این تغییرات در لایه دوم با توجه به مقدار S ممکن است معادل هم نامیده شود.

همچنین برای مقاطعی از نوع K و Q اگر h_2 با ضریبی افزایش یا کاهش یابد و مطابقاً ρ_2 با همان ضریب کاهش یا افزایش یابد شکل منحنی تغییر قابل ملاحظه ای نمی کند. و به عبارت دیگر، اگر $h_2\rho_2 = T_2$ یک مقدار ثابت باشد هر تغییر جداگانه از ρ_2 و h_2 تغییر محسوسی را روی شکل منحنی سبب نمی شود. و این بخشها با توجه به مقدار T معادل هم نامیده می شود.

اثبات ریاضی این اصول تحت شرایط معین از ضخامت و مقاومت ویژه لایه وسط توسط معادلات ۲-۷۳و۲-۷۲ داده شده است. هم اکنون میخواهیم چند مثال از چهار نوع منحنی هم ارز را بررسی کنیم

الف) نوع H : $\rho_3 = \infty$ در این حالت منحنی $\frac{h_2}{h_1} = 1$ و $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{19}$ یعنی $\frac{S_2}{S_1} = 19$ تقریباً با منحنی $\frac{h_2}{h_1} = 2$ و $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{9}$ یعنی $\frac{S_2}{S_1} = 18$ معادل است(رجوع کنید به مجموعه ای از نمودارهای $84_S, 85_S$ در COMPAGNIE GENERALE DE GEOPHYSIQUE سال ۱۹۵۵و۱۹۶۳).

ب) نوع A : $\rho_3 = \infty$ اینجا منحنی های معادل توسط خصوصیات زیر داده شده است.

$\upsilon_2 = 2; \mu_2 = 39 \Rightarrow S_2/S_1 = 1/19.5$ (به مجموعه 96_S مراجعه شود)

و

$\upsilon_2 = 1; \mu_2 = 19 \Rightarrow S_2/S_1 = 1/19$ (به مجموعه 97_S مراجعه شود)

ج) نوع K: $\rho_3 = 0$ مجموعه منحنی معادل برابر است با:

$\upsilon_2 = 2; \mu_2 = 19 \Rightarrow T_2/T_1 = 38$ (به مجموعه 91_S مراجعه شود)

و

$\upsilon_2 = 2; \mu_2 = 39 \Rightarrow T_2/T_1 = 39$ (به مجموعه 92_S مراجعه شود)

د) نوع Q: $\rho_3 = 0$

$$\upsilon_2 = 2; \mu_2 = 1/39 \Rightarrow T_2/T_1 = 1/19.5$$ (به مجموعه 80_Sمراجعه شود)

و

$$\upsilon_2 = 2; \mu_2 = 1/19 \Rightarrow T_2/T_1 = 1/19$$ (به مجموعه 79_Sمراجعه شود)

معادل هم هستند.

اصل هم ارزی همانطور که در بالا نشان داده شد فقط برای مقادیر کوچک $\upsilon_2 = h_2/h_1$ بکار می رود. نسبت $\upsilon_2 = h_2/h_1$ برای مقادیر مختلف $\mu_2 = \rho_2/\rho_1$ و $\mu_3 = \rho_3/\rho_1$ متفاوت خواهد بود. برای تفسیرداده های سونداژ شناخت ماکزیمم مقدار h_2/h_1 مهم است. چون بیش از این مقدار اصل هم ارزی دیگر معتبر نیست. در جدول ۳-۲ مقادیر ماکزیمم υ_2 برای بعضی از نسبتهای μ_2 و μ_3 از هر چهار منحنی سه لایه ای نشان داده شده است. علاوه براین، برای تفسیر منحنیهای صحرایی، شناخت محدوده هایی که h_2, ρ_2 در آن محدوده ها تغییر می کند، بدلیل مصداق هم ارزی منحنیها از اهمیت عملی برخوردار است.

جدول۳-۲ محدودیت مقادیر υ_2و μ_2 با توجه به S و T.

Equivalent with respect to S			Equivalent with respect to T		
Maximum value of υ_2 for which μ_2 and υ_2 can be decreased without limit		Maximum possible value of factor of increase of υ_2 and μ_2	Maximum value of υ_2 for which μ_2 can be increased and υ_2 decreased without limit		Maximum possible factor of decrease of μ_2 and increase of υ_2
H-type ($\rho_3 = \rho_1$)			K-type ($\rho_3 = \rho_1$)		
μ_2	υ_2		μ_2	υ_2	
1/39	2	1.6	39	9	1.7
1/19	1	1.6	19	5	1.6
1/9	1	1.6	9	2	1.6
1/4	1/2	1.4	4	1/2	1.5
3/7	1/3	1.4	7/3	1/2	1.5
2/3	1/5	1.4	3/2	1/3	1.5
A-type ($\rho_3 = \infty$)			Q type ($\rho_3 = 0$)		
39	3	without limit	1/39		–
19	2	-do-	1/19	1/3	2.6 - 2.3
9	1	3.8	1/9	1/3	2.2 - 2.1
4	1	2.5	1/4	1/3	1.9 - 1.9
7/3	1	1.7	3/7	1/3	1.8 - 1.8
3/2	1	1.5	2/3	1/3	1.5 - 1.5

با فرض اینکه خطا در اندازه گیریها 5% است. می توان گفت که منحنی ها انحراف کمتر از 5% را دارند و نمی توان فرقی بین آنها گذاشت. برای مثال، منحنی های تئوری از نوع K را که در آن T_2/T_1 ثابت و مقدار $\rho_3 = 0$ و نسبتهای h_2/h_1 و ρ_2/ρ_1 متغییر است را در نظر می گیریم.

دیده می شود که به ازاء $\rho_2/\rho_1 > 9$ منحنی ها با خطای 5% با هم معادل هستند، به عبارت دیگر برای $\rho_2/\rho_1 =$ ۱۹،۱و۳۹ منحنیها تقریباً برهم منطبق هستند و می توان برای $\rho_2/\rho_1 = \infty$ و $T_2/T_1 = h_2\rho_2/h_1\rho_1 =$ ۱۲ همان انطباق قبلی حاصل شود. بنابراین اگر $\rho_2/\rho_1 =$ ۹ و $T_2/T_1 =$ ۱۲ باشد، با شروع از بیشترین مقدار $h_2/h_1 =$ ۱/۳ بدون هیچ محدودیتی می توانیم ρ_2/ρ_1 را افزایش دهیم و به همان نسبت h_2/h_1 را کاهش دهیم بدون اینکه هیچ تغییر قابل ملاحظه ای در شکل منحنی ایجاد شود. وبه همین ترتیب اگر مقدار ρ_2/ρ_1 به ۱۹ برسد ماکزیمم مقدار h_2/h_1 مساوی ۰/۶خواهد بود.

مسئله هم ارزی با جزئیات بیشتر بوسیله بِتچِریا و پترا[1] در سال ۱۹۶۸ شرح داده شده است. و شامل نمودارهایی برای هر چهار نوع منحنی سه لایه ای است و مقادیر حدی ρ_2 و h_2 برای معتبر بودن این اصل را می دهد. این نمودارها در صفحات ۵ تا ۸ درنشریه Bhattacharya,Patra (۱۹۶۸) موجود است. از آن نمودارها ما می توانیم مقادیر عددی از حدود شایان توجه اصل هم ارزی را برای نوعهای مختلف از مقاطع را بیابیم. برخی مقادیر عددی از ماکزیمم حد اصل هم ارزی در جدول ۳-۲ آورده شده است.

فهمیده می شود که دامنه هم ارزی در حالت نوع Q به طور قابل ملاحظه ای کمتر از حالت A,H وK است.

اصل هم ارزی علاوه بر نقش مهمی که در ساختار گرافیکی منحنی های صحرایی ایفا می کند. نقش آن درتفسیر منحنی های صحرایی نیز حائز اهمیت است. برای مثال حالتی را در نظر بگیرید که لازم است یک منحنی از نوع H را با پارامترهای $\mu_2 = 1/30, \upsilon_2 = 4$ و $\rho_3 = \infty$ بیابیم. منحنی تئوری با این پارامترها در منحنیهای کمکی انتشار یافته موجود نیست. نزدیکترین منحنی تئوری مقدار $\mu_2 = 1/39$ را دارد. نمودارهای Pylaev نشان می دهد که برای پارامترهای داده شده، μ_2در حدود هم ارزی می تواند تغییر کند. بنابراین مقدار مطابق با υ_2 بوسیله رابطهٔ $\upsilon_2/\mu_2 = 120 = \upsilon_2'/\mu_2'$ مقدار $\upsilon_2' = 120/39 = 3.1$ را بدست می آورد. بنابراین می توانیم از منحنی با مشخصهٔ $\mu_2 = 1/39, \upsilon_2 = 3$ و $\rho_3 = \infty$ به جای منحنی صحرایی $\mu_2 = 1/30, \upsilon_2 = 4$ و $\rho_3 = \infty$ با خطایی در حدود 5% استفاده کنیم. همچنین برای رسیدن به معادل یا هم ارز منحنی نوع K نسبت به T، برای مقادیر $\mu_2 = 30, \upsilon_2 = 4$ و $\rho_3 = 0$ می توانیم از نسبت های $\upsilon_2' = \upsilon_2\mu_2/\mu_2'$

[1] Bhattacharya and Patra

و $\mu_2' = \upsilon_2\mu_2/\upsilon_2'$ استفاده کنیم. که در نتیجه مقادیر منحنی هم ارز جدید از نوع K برابراست با $\mu_2 = 39, \upsilon_2 = 3$ و $\rho_3 = 0$.

به خاطر داشته باشید که رویه بکار گرفته برای مقاطع نوع Q وA به ترتیب و بطور دقیق شبیه نوع K وH است.

اصل هم ارزی در مواقعی که ضخامت لایه های پایینی در مقایسه با عمق قرارگیری آنها کوچک است سبب ایجاد یک ابهام در تفسیر دقیق منحنی سونداژ می شود. این ابهام از طریق کنترل زمین شناسی و دیگر شرایط بر طرف می شود.

اکتشاف لایه ای که دارای مقاومت ویژه ای کمتر از لایه های مجاور هستند مشکل است.(یعنی نوع Q,A). اگر چنین لایه ای به اندازه کافی ضخیم نباشد اثری از آن روی منحنی های مقاومت ویژه ظاهری منعکس نمی شود. وقتی مقاومت لایه وسط افزایش می یابد این افزایش ضخامت باعث افزایش اثر مقاومت ویژه لایه های احاطه کننده آن می شود که در نتیجه باعث جبران اختفاء لایه وسط می شود این موضوع توسط اصل اختفاء کنترل[1] می شود.

۳-۶ روشهای تفسیر

تفسیر داده های سونداژالکتریکی عمودی (VES) به دست آمده از منحنی های صحرایی، بر اساس تجزیه و تحلیل تابع کرنل است. تابع کرنل در واقع محاسبه پتانسیل روی سطح زمین با لایه بندی افقی یعنی معادلات (۲-۵۳) می باشد.

بیان عمومی برای پتانسیل روی یک زمین لایه ای شکل را می توان بصورت زیر نوشت:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r} + 2\int_0^\infty A(m)J_0(mr)dm\right] \qquad (۳-۳۳)$$

با استفاده از فرمول انتگرال وبر معادله (۳-۳۳) به شکل زیر در می آید.

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi}[1 + 2A(m)]J_0(mr)dm \qquad (۳-۳۴)$$

که $A(m)$ انتگرال کرنل[2] است و مقدارش بوسیله مقادیر پارامتر های لایه برای زمینی با لایه بندی افقی تعیین می شود. ارزیابی تابع کرنل در بخش ۲-۴-۲ برای زمین دو لایه ای و بخش ۲-۴-۳ برای زمین سه لایه ای نشان داده شده است.

---

[1] Principle of suppression
[2] Kernel of integral

تابع کرنل به شخص " استفنس کرنل یا استفانس کرنل[1] " بر می گردد.دیگر روابط مناسب برای تفسیر در زیر بیان شده است.

$H(m)$:تابع کرنل در نظر گرفته شده توسط کوفد.

$G(m)=\dfrac{H(m)-\frac{1}{2}}{H(m)+\frac{1}{2}}$: اصلاح شده تابع کرنل توسط کوفد.

$K(m)=[1+2A(m)]$:تابع کرنل اِسلیچتر[2].

$T(m)=\rho_1 K(m)=\rho_1[1+2A(m)]$:مقاومت ویژه تغییر یافته[3].

برخی روابط مهم دیگر از مقاومت ویژه تغییر یافته و مقاومت ویژه ظاهری که در تفسیر مهم است در زیر آورده شده است. معادله (۳-۳۴) می دهد.

$$V=\frac{I}{2\pi}\int_0^\infty \rho_1[1+2A(m)]J_0(mr)dm=\frac{I}{2\pi}\int_0^\infty T(m)J_0(mr)dm \qquad (۳\text{-}۳۵)$$

و:

$$E=\frac{I}{2\pi}\int_0^\infty T(m)J_1(mr)mdm \qquad (۳\text{-}۳۶)$$

و:

$$\bar{\rho}=2\pi r^2(E/I)=r^2\int_0^\infty T(mr)mdm \qquad (۳\text{-}۳۷)$$

مقادیر $A(m)$ برای حالت دو لایه و سه لایه به ترتیب در بخش ۲-۴-۲ و۲-۴-۳ داده شده است. که می توان برای محاسبه منحنی های تئوری کمکی از طریق حل پیشرو برای سری معادلات (۲-۵۹ و۲-۶۹) سونداژ الکتریکی استفاده کرد. از این منحنی های کمکی برای تفسیر منحنی های سونداژ الکتریکی شلومبرژه به صورت دستی استفاده می شود این نحوه تفسیر را روش تفسیر غیر مستقیم[4] می گویند.

۳-۶-۱ روش غیر مستقیم:

---

[1] Stefanesque or Stafanesco Kernel
[2] Slichters kernel function
[3] Resistivity transform
[4] Indirect Approach

روش تفسیر غیر مستقیم منحنی VES ، خلق منحنی های تئوری و مقایسه آن با منحنی های صحرایی است تا یک انطباق حاصل شود. در سالهای آغاز استفاده از این روش برای یک زمین چند لایه ای، پارامترهای شناخته شدهٔ هر لایه به عنوان ورودی به تابع کرنل داده می شد تا منحنی آن بصورت تئوری ایجاد شود. گُوش در سالهای ۱۹۷۰و۱۹۷۱ بجای محاسبهٔ سری طویل تابع کرنل، روش فیلتر معکوس سریعی را که اساسش روی یک حالت ویژه از تغییر شکل وتسون[1] بود معرفی کرد. در روش فیلتر معکوس گُوش یک فرآیند پیچشی[2] جای انتگرال را گرفته و دیگر هیچ قید مکانی نسبت به تعداد کل لایه ها یا ضخامت آنها وجود ندارد.

روش فیلتر معکوس گُوش یک روش سریع از محاسبه منحنی مقاومت ویژه ظاهری براساس پارامترهای معلوم لایه ها، و بکارگیری یک فیلتر خطی از طریق مفهوم $T(m)$ (معادله ۳-۳۷) مرتبط با تابع استفانس کرنل (معادله ۳-۳۵) است.

$$V = \frac{I}{2\pi}\int_0^\infty T(m) J_0(mr) dm$$

مسائل پیشرو با استفاده از ضرایب فیلتر معکوس گُوش در فصل ۴ شرح داده شده است. این روش اساس شیوه معروف " انطباق منحنی[3] " را تشکیل می دهد.

۳-۶-۲ تقریب مستقیم:

در این روش از خود منحنی مقاومت ویژه شلومبرژه (VES) مستقیماً برای ارزیابی پارامترهای لایه استفاده می شود. در این روش برای ارزیابی پارامترهای لایه از تفسیر دستی با منحنی کمکی استفاده نمی شود، روش مستقیم یک تضاد زمینه ای (پایه ای) با روش غیر مستقیم گفته شده در بخش ۳-۶-۱ را دارد. بدنبال اسلچتر در سال ۱۹۳۳ و پیکرز[4] در سال ۱۹۴۰ ، کوفد در سال ۱۹۶۸ اولین جزئیات از تفسیر مستقیم منحنی VES را ارائه کرد. که در آن مفاهیم تابع $H(m)$ (تابع در نظر گرفته شده کرنل توسط کوفد) و $G(m)$ (تابع اصلاح شده کرنل) برای استخراج پارامترهای لایه استفاده شد. گوْش در سال ۱۹۷۱ یک مثال و یک رویه سریع برای رسیدن به مقادیر مقاومت ویژه تغییر یافته $T(m)$ متناسب با $A(m)$ وبه طبع پارامتر لایه ها با استفاده از روش فیلتر گوْش را طرح کرد.(فصل ۴ استفاده از روش فیلتر معکوس گوْش)

[1] Watsons transform
[2] Convolution process
[3] Curve matching
[4] Pekeris

۳-۷ منحنی انطباق شلومبرژه و نقشه های اِبرت:

تئوری و روش نقاط کمکی از تفسیر سونداژ شلومبرژه، با کمک منحنی های استاندارد دو لایه ای و نقشه های اِبرت در سال ۱۹۶۸ توسط بُتچریا و پترا ارائه شده است. به نتایج این قبیل تفسیرها، تفسیر ابتدایی[1] گفته می شودکه این تفسیر ابتدایی یک تصویر نسبتاً صحیح از پارامترهای لایه های زیرین را می دهد و چگونگی مطلوب بودن نتیجه با کنترل زمین شناسی مناسب مورد بررسی قرار می گیرد. لکن این روش، روشی ترسیمی- تحلیلی برای تفسیر ابتدایی سونداژهای الکتریکی بوده و ذاتاً همراه با خطا است و مقادیر پارامترهای ژئوالکتریک به دست آمده از این طریق به طور کامل قابل اعتماد نیست. بنابراین برای ارزیابی داده ها یک معیار یا درجه برای سنجش میزان خطا لازم است. برای این منظور یعنی بررسی اعتبار نتایج تفسیر اولیه، این نتایج به عنوان ورودی به کامپیوتر داده شده و منحنیهای سونداژ ساختگی (مصنوعی) بدست آورده می شود. مقایسه ای بین این دو منحنی (صحرایی و مصنوعی) انجام شده و تفسیر نهایی از طریق آزمون و خطا، اگر لازم باشد، صورت می گیرد.

تکنیک انطباق منحنی ها برای تفسیر منحنی هایVES، با استفاده از منحنی های دو لایه ای کمکی (شکل ۳-۱) و نقشه های اِبرت (شکلهای ۳-۸و۳-۹) به طریقه زیر می باشد.

الف) هر شاخه از منحنی های مقاومت ویژه را می شود با یک دو لایه ای مجزا تقریب زد.

ب) مختصات نقطه تقاطع این منحنی دو لایه را می توان به عنوان ضخامت و مقاومت ویژه یک لایه ساختگی در نظر گرفت که جانشین لایه های کم عمق قبلی می شود.

ج) برای رسیدن به پارامترهای لایهٔ ساختگی به مجموعه ای از نمودارها نیاز است. مختصات روی این گرافها، نسبت ضخامت لایه جانشین شده به ضخامت اولین لایه و همچنین مقاومت ویژه لایه تبدیل شده به اولین لایه است. این پارامترها (نسبت ضخامتها و نسبت مقاومتهای ویژه) روی ورقهایی با طول و عرض لگاریتمی با مقیاس $62.5mm$ رسم شده است.

د) چهار مجموعه از این نقشه های نقطه کمکی، برای انواع منحنی های A,H,K و Q در شکلهای ۳-۸و۳-۹ موجود می باشد.

۳-۷-۱ تفسیر منحنی دو لایه ای

---
[1] Preliminary interpretation

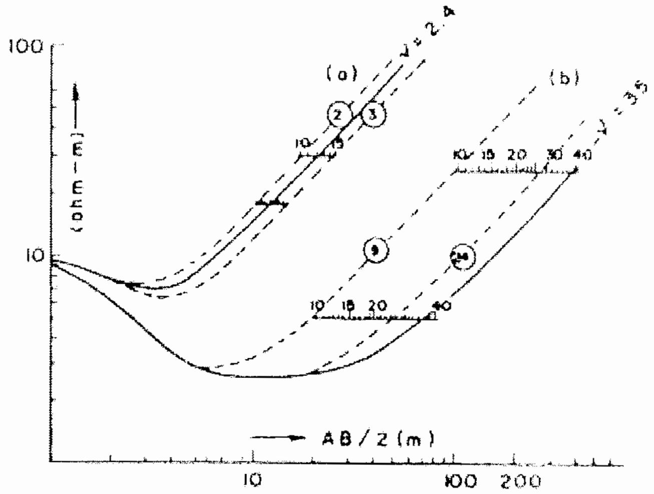
از پارامترهای به دست آمده توسط تکنیک اتطباق منحنی بصورت دستی می توان هم در روش پیشرو (بخش ۳-۶-۱) برای به دست آوردن منحنی تئوری که قرار است با منحنی صحرایی مقایسه شود استفاده کرد و هم تحت عنوان حدس اولیه برای معکوس سازی مقاومت ویژه (بخش ۳-۶-۲) استفاده کرد.

شکل ۳-۴ و۳-۵ احتیاج به توضیح برای تفسیر منحنی های دو لایه صحرایی با منحنی های انطباق ندارند.روش انطباق برای پیدا کردن ρ_1 و h_1 در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. به این ترتیب که منحنی صحرایی روی یک کاغذ شفاف لگاریتمی با مقیاس $62.5mm$ (همان مقیاسی که برای منحنی های کمکی داشتیم) پلات می شود. و سپس کاغذ شفاف لگاریتمی را روی منحنی کمکی دو لایه ای (شکل۳-۱الف) قرار می دهیم. کاغذ شفاف شامل منحنی صحرایی روی منحنی کمکی به شرطی که محورها با هم موازی باشند حرکت داده می شود(شکل۳-۴). شکل ۳-۵ حالت و نقطهٔانطباق را روی کاغذ شفاف لگاریتمی را نشان می دهد که محل بعلاوه، مبدأ منحنی کمکی روی کاغذ شفاف است که بیانگر مقاومت ویژه ρ_1 و ضخامت h_1 لایه اول می باشد. که در حالت نشان داده شده در شکل(۳-۵) h_1 مساوی۸ m و ρ_1 مساوی ۴ $ohm-m$ است.

۳-۷-۲ میانیابی[1] در مقیاس لگاریتمی:

تفسیر منحنی های صحرایی بوسیله منحنی های کمکی نیاز به اطلاعات کافی از میانیابی روی مقیاس لگاریتمی دارد. بدین ترتیب که برخی از منحنی های صحرایی که شبیه به منحنی های کمکی هستند مابین منحنی های کمکی قرار می گیرند. این موضوع برای دو حالت در شکل شرح داده شده است. حالت اول: وقتی که منحنی صحرایی موقعیتش بین دو منحنی کمکی قرار گیرد شکل (۳-۱۲a). حالت دوم: وقتی که خارج از دو منحنی کمکی قرار گیرد شکل(۳-۱۲b). خطوط توپر نمایش دهندهٔ منحنی های صحرایی و خطوط نقطه چین نمایندهٔ منحنی کمکی می باشند.

[1] Interpolation



شکل۳-۱۲ روش قرائت بوسیله میانیابی روی مقیاس لگاریتمی

(a) منحنی صحرایی بین دو منحنی کمکی(درون یابی)

(b) منحنی صحرایی خارج از دو منحنی کمکی(برونیابی[1])

شروع جرخه انطباق از طرف چپ منحنی کمکی

خط توپر= منحنی صحرایی؛خط متقاطع(نقطه چین)منحنی کمکی سه لایه ای.

در این رویه منحنی صحرایی را که روی یک کاغذ لگاریتمی با مقیاس $62.5mm$ قرار دارد را روی یکی از منحنی های اصلی یا موازی با یکی از آنها در نظر می گیریم. برای بدست آوردن مقدار ۷ منحنی، چون تقسیمات بکار گرفته شده در منحنی های کمکی یکسان است از روش درون یابی، اگر منحنی صحرایی بین دو منحنی کمکی قرار داشته باشد یا از روش برون یابی، اگر منحنی صحرایی خارج دو منحنی کمکی قرار گرفته باشد استفاده می کنیم. توجه داشته باشید آنچنانچه در شکل (۳-۱۲) دیده می شود برای انطباق منحنی صحرایی با منحنی کمکی قسمت اول منحنی صحرایی باید با قسمت اول منحنی کمکی که قرار است انطباق با آن از طریق درون یابی یا برون یابی صورت بگیرد، منطبق باشد. در شکل ۳-a۱۲ منحنی صحرایی بین دو منحنی کمکی قرار گرفته و مقدار درج شده برای آن (با استفاده از خاصیت درون بابی) ۲/۴است. و در شکل ۳-b۱۲ منحنی صحرایی خارج از دو منحنی کمکی قرار گرفته و مقدار درج شده برای آن (طبق خاصیت برون یابی) ۳۵ است.

۳-۷-۳ تفسیر منحنی صحرایی چهارلایه از نوع HK.

[1] Extrapolation

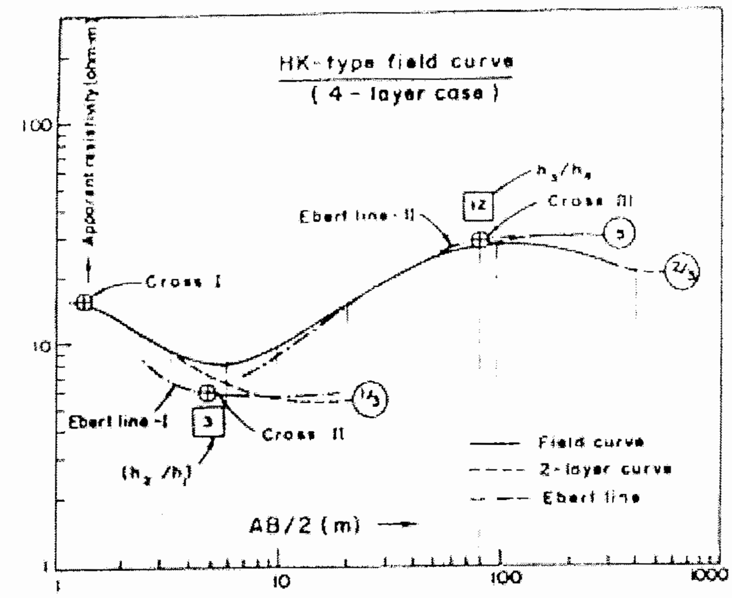
رویه تفسیر منحنی چهار لایه ای نوع HK با کمک منحنی های کمکی دو لایه ای و انطباقشان با نقشه های اِبرت به شکل زیر شرح داده شده است.* [قبل از توضیح روش تفسیر با استفاده از منحنی های کمکی و نقشه های اِبرت یک بار دیگر خاطر نشان می کنیم که هر دو لایه غیر همگن و مجزا را می توان با پارامترهای مقاومت ویژه مؤثر و ضخامت مؤثر جانشین کرد. این پارامترها هم می توانند از طریق فرمولهای ریاضی مربوطه و هم از طریق نقشه های اِبرت به دست بیایند. برای رسیدن سریع به پارامترهای هر لایه معمولاً به جای استفاده از فرمول، از نقشه های اِبرت استفاده می شود و همانطور که قبلا گفته شد از بین چهار نقشه اِبرت نقشه نوع H تصحیح ضخامت ندارد یعنی ضخامت مؤثر لایه جانشین شده برابر است با ضخامت دو لایه مجزا، به عبارت دیگر: $h_{II} = h_1 + h_2$. الباقی نقشه ها احتیاج به تصحیح ضخامت دارند که این کار توسط مجانبهای h_2/h_1 هر نقشه برای محلهایی که بیانگر مقاومت ویژه مؤثر و ضخامت مؤثر است صورت می گیرد].روش تفسیر شامل مراحل زیر است:

(۱): منحنی صحرایی چهار لایه ای دارای سه شاخه می باشد.[که هر شاخه رابايد با کمک منحنی های دو لایه ای و نقشه های اِبرت تفسیر کرد.]

(۲): منحنی صحرایی را روی یک خانواده از منحنی کمکی دو لایه ای شکل ۳-۱ب قرار داده و با این کار نزدیکترین منحنی کمکی برای تقریب اولین شاخه منحنی صحرایی به دست می آید. مبدأ منحنی کمکی روی منحنی صحرایی به عنوان اولین بعلاوه ⊕ مقادیر ρ_1 و h_1 را می دهد. با قرائت نسبت ρ_2/ρ_1 از منحنی کمکی در اینجا علاوه برمقادیر $\rho_1 = 16\Omega m$ و $h_1 = 1.3m$ و نسبت $\rho_2/\rho_1 = 1/3$، مقدار ρ_2 نیز حاصل می شود.[طریقه دیگر حصول ρ_2 این است که منحنی کمکی که نسبت ρ_2/ρ_1 مورد نظرمان را دارد ادامه می دهیم، جایی که منحنی ρ_2/ρ_1 محور عرضها یعنی مقاومت ویژه را قطع کند، محل تقاطع مقدار ρ_2 می باشد. این روش بر پایه این استدلال است که، اگر لایه دوم تا بی نهایت ادامه داشت دقیقاً شکل صحرایی آن با شکل منحنی کمکی آن یکی می شد و مقدار ρ_2 برابر با مجانب منحنی کمکی آن می شد.]

---

*[ ] توضیحات مترجم



شکل۳-۱۳ تفسیر منحنی چهار لایه HK با استفاده از منحنی کمکی و نقشه های اِبرت.

(۳) در مرحله بعد با توجه به نمودار صحرایی به سراغ نمودار H رفته و بعلاوه اول را روی مبدأ نمودارH گذاشته و مقدار ρ_2/ρ_1 را (در اینجا مقدار 1/3) روی کاغذ شفاف لگاربتمی یا همان کاغذ نمودار صحرایی رسم می کنیم.

(۴) در این مرحله کاغذ لگاریتمی را روی منحنی دو لایه کمکی قرار داده خط ρ_2/ρ_1 (کشیده شده در مرحله قبل) را روی مبدأ مختصات منحنی دو لایه کمکی(با توجه به موازی بودن محورها) جابه جا می کنیم. تا بهترین انطباق برای شاخه دوم منحنی صورت بگیرد. وقتی که این شرط حاصل شد محل مورد نظر را با علامت بعلاوه $\oplus$ مشخص کرده با قرائت دومین بعلاوه ρ_H و h_H و نسبت ρ_3/ρ_H حاصل می شود. در اینجا $\rho_H = 6\Omega m$ و $h_H = 5m$ و $\rho_3/\rho_H = 5$ است. [مقدار h_H که بیانگر ضخامت مؤثر دو لایه اول می باشد همانطور که گفته شده احتیاج به تصحیح ضخامت ندارد و مقدار آن معرف ضخامت دو لایه اول است.]

(۵) مرحله سوم را دوباره تکرار کرده، در این مرحله بعد از پیدا کردن نسبت مقاومت ویژه این بار با توجه به منحنی صحرایی به سراغ منحنی کمکی سه لایه از نوع K رفته و خط چین منحنی مربوط به این نسبت را روی کاغذ شفاف لگاریتمی حاوی منحنی صحرایی رسم می کنیم (خط چین دوم).[اگر خط چین دوم یا نسبت ρ_2/ρ_1 از شاخه دوم منحنی را ادامه دهیم محل تقاطع این منحنی با محور عرضها بیانگر مقاومت ویژه لایه سوم است.]

(۶) سرانجام به تقریب آخرین شاخه از منحنی چهار لایه می رسیم. دراین مرحله خط چین دوم را را روی مبدأ مختصات منحنی دو لایه کمکی حرکت داده تا بهترین انطباق برای آخرین شاخه حاصل شود. نسبت ρ_4/ρ_K را یادداشت می کنیم.[اگر منحنی این نسبت را ادامه دهیم تا محور عرضها را قطع کند مقاومت ویژه لایه چهارم بدست می آید.] مبدأ منحنی کمکی روی خط چین دوم محل بعلاوه سوم است. که این نقطه مقادیر ρ_K و h_K را به ما می دهد.[برای به دست آوردن ضخامت لایه سوم باید h_K محل بعلاوه سوم تصحیح شود. برای این کار از مجانب h_2/h_1 منحنی K استفاده می کنیم. بدین ترتیب که مبدأ نمودارK روی بعلاوه دوم قرار داده (با رعایت موازی بودن محورها) و برای تصحیح h_K از طریق درون یابی نسبت h_2/h_1 را از نمودار K پیدا کرده، محل تقاطع h_2/h_1 با محور طولها بیانگر ضخامت سه لایه اول است.] در اینجا نسبت ρ_4/ρ_K مساوی 2/3 و $\rho_K = 29\Omega m$ و $h_K = 80m$ و همچنین نسبت ضخامت h_2/h_1 و h_3/h_H به ترتیب برابر ۳و۱۲ است.

(۷) با توجه به مطالب گفته شده پارامترهای لایه های تفسیر شده به قرار زیر است:

$$h_1 = 1.3m, h_2 = 3.9m, h_3 = 60m, h_4 = \infty$$
$$\rho_1 = 16ohm-m, \rho_2 = 5.3ohm-m, \rho_3 = 30ohm-m, \rho_4 = 20ohm-m$$

۳-۷-۴ تفسیر منحنی های صحرایی چند لایه ای نوع HKQ (بیشتر از چهار لایه)

روش تفسیر به طور خلاصه در زیر شرح داده شده است.

(الف)تقریب اولین شاخه از منحنی صحرایی بوسیله منحنی دو لایه کمکی(قسمت پایین رونده آن) صورت می گیرد و اولین بعلاوه حاصل می شود. اولین بعلاوه بیانگر مقاومت ویژه ρ_1، ضخامت h_1 و نسبت ρ_2/ρ_1 است.

(ب) به سراغ نقشه نوع H رفته، اولین بعلاوه روی منحنی صحرایی را روی مبدأ نقشه H انداخته و نسبت ρ_2/ρ_1 را رسم می کنیم(منحنی I).

(ج) قدم بعدی تقریب دومین شاخه از منحنی (حالت بالا روندهٔ منحنی H). در این حالت منحنی صحرایی را روی منحنی دو لایه ای انداخته تا بهترین انطباق صورت گیرد توجه داشته باشید که در حرکت برای انطباق، مبدأ منحنی کمکی باید روی منحنی I قرار داشته باشد. در این صورت محل بعلاوه دوم $\oplus$ حاصل می شود. با قرائت دومین بعلاوه ρ_H، h_H و نسبت ρ_3/ρ_H حاصل می شود.

(د) در این مرحله به سراغ منحنی نوع K رفته و محل بعلاوه دوم ⊕ را روی مبدأ نقشه K انداخته و نسبت مقاومت ویژه به دست آمده از مرحله قبل را رسم می کنیم(منحنی II).

(و) منحنی صحرایی را روی منحنی دو لایه کمکی قرار داده تا بهترین انطباق برای قسمت اول شاخه سوم حاصل شود. توجه داشته باشید در حرکت منحنی صحرایی برای انطباق، مبدأ منحنی کمکی دو لایه، باید روی منحنی II قرار گیرد. در این حالت بعلاوه سوم حاصل می شود.

(ی) در این مرحله به سراغ نقشه Q رفته و بعلاوه سوم را روی مبدأ نقشه Q انداخته و نسبت مقاومت ویژه بدست آمده از مرحله قبل را رسم می کنیم(منحنی III).

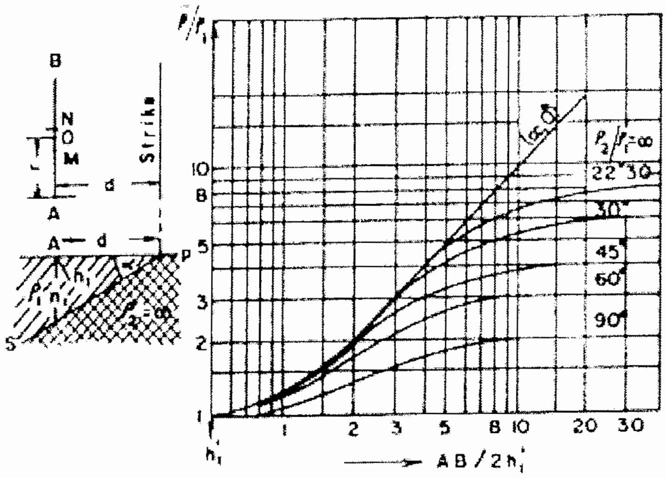
(هـ)در مرحله آخر به سراغ منحنی کمکی رفته و منحنی صحرایی را روی منحنی کمکی انداخته، حالت انطباق مثل حالتهای قبل باید در صورتی حاصل شود که مبدأ مختصات منحنی کمکی دو لایه روی منحنی III قرار گیرد در این صورت بعلاوه چهارم ⊕ حاصل می شود.

گرچه برای تفسیر داده های VES خیلی به کامپیوتر نیازمندیم با وجود این، منحنی های کمکی یک ابزار اولیه برای رسیدن آسان به پارامترلایه ها، بویژه به عنوان حدس اولیه برای تفسیر کامپیوتری محسوب می شوند.

۳-۸ اثر شیب روی تفسیر:

در بخش گذشته خیلی روی منحنی های مقاومت ویژه و تفسیر آنها برای یک زمین با لایه بندی افقی بحث کردیم. و همچنین بخش پیشبن کاربردش دقیقاً وقتی است که مرز بین لایه ها افقی باشد. ولی اغلب، سونداژزنی الکتریکی در ناحیه ای که مرز جدایش بین لایه های مختلف شیب دار است انجام می شود. بنابراین بررسی اثرات شیب لایه ها روی منحنی هایVES لازم است.

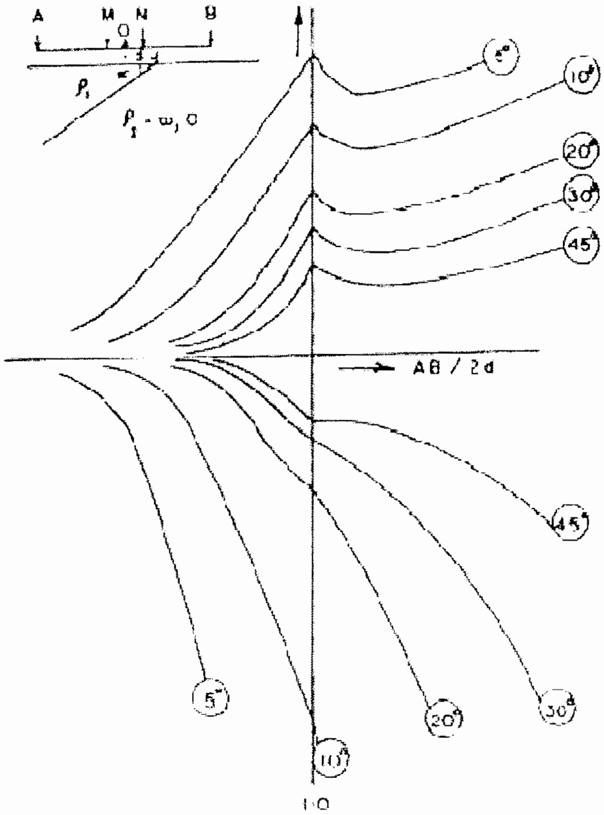
برای این منظور دو نوع منحنی (منحنی ۳-۱۴الف و ب) در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱۴الف . اثرات شیب روی منحنی های شلومبرژه

الف) در این حالت گسترش الکترودها موازی رخنمون و لایه زیری مقاومتش بیشتر است.

بتچریا و پترا در سال ۱۹۶۸ اثرات شیب را روی منحنی های VES ، برای سونداژهای موازی با رخنمون (شکل۳-۱۴ الف) و همچنین برای عمود بر رخنمون (شکل ۳-۱۴ ب) نشان دادند. در شکل ۳-۱۴ الف نسبت مقاومت ویژه ظاهری بر روی مقاومت ویژه اولین لایه یعنی $\overline{\rho}/\rho_1$ برحسب $AB/2h_1'$ رسم شده، که h_1' عمق عمود بر مرز دو لایه است (نه عمق عمودی h_1). منحنی ها در شکل مذکور برای مقادیر مختلف زاویه شیب : $\alpha = 0^\circ, 22^\circ 30', 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ و برای $\rho_2/\rho_1 = \infty$ رسم شده است. نمودارهای مشابه ای از این دسته برای مقادیر مختلف ρ_2/ρ_1 نیز موجود می باشد.



شکل۳-۱۴ب : گسترش الکترودی عمود بر رخنمون ؛ d: فاصله مرکز سونداژ با رخنمون.

همچنین مانند حالت قبل نمودارهای کمکی برای زمانی که سونداژزنی عمود بر رخنمون لایه است نیز موجود می باشد شکل (۳-۱۴ب). در این حالت با افزایش زاویه شیب، منحنیها از یکدیگر به سرعت متفاوت شده و افزایش در زاویه شیب باعث به جلو رفتن سمت چپ و پایین آمدن(افت) سمت راست منحنیها می شود. اگر منحنی کمکی دو لایه ای شکل ۳-۱، برای تفسیر منحنی های سونداژ در زمین های دو لایه ای شیب دار استفاده شود به طور قابل توجهی در تفسیر، بویژه وقتی α بزرگ باشد خطا وارد می شود.

لیکن اگر زاویه شیب α بیشتر از $15-20^{\circ}$ نباشد، عموماً برای تفسیر می توان از منحنی های کمکی دو لایه ای (شکل۳-۱) بدون خطای محسوسی استفاده کرد(خطا معمولاً کمتر از 10% است). اگر قرار است سنگ کف مورد کاوش قرار گیرد زمانی که α کوچک است آشکارا است که آرایش شلومبرژه نامناسب است. در این حالت سونداژزنی دو قطبی را می توان انجام داد.

در عمل، اگر از طریقی خارج از سونداژزنی مسلم شود که لایه شیب دار است، سپس تفسیر کمی وقتی یکی از پارامترها (α یا ρ_2/ρ_1) معلوم باشد امکان پذیر است. سپس با استفاده

از منحنی های کمکی برای حالت شیبدار، دیگر پارامترها و عمق انتهای لایه را می توان تخمین زد. اگر منطقه ناشناخته باشد شیب لایه را می توان بوسیله انجام دو سونداژ در یک نقطه در دو جهت عمود بر هم تخمین زد. اگر جهت رخنمون شناخته شده باشد سونداژ باید در چندین نقطه با گسترشی موازی با جهت رخنمون انجام شود و عمقها از منحنی کمکی دو لایه ای برای لایه های افقی محاسبه شوند . بنابراین اثر لایه پایین تر و زاویه شیب را می توان پیدا کرد. تفسیر برای شیبهای کوچک نسبتاً دقیقتر است. برای شیبهای بزرگ، باید از منحنی های کمکی مربوط به لایه های شیب دار استفاده کرد.

فصل چهارم:

تفسیر کامپیوتری

۱-۴ توجهات عمومی:

اسلیچتر و لانگر[1] در سال ۱۹۳۳ حلی را برای تفسیر مقاومت ویژه یک مدل زمینی با لایه بندی افقی از روی سطوح پتانسیل معلوم، مورد استفاده قرار دادند. وزُف[2] در سال ۱۹۵۸ اولین بار روش بیشترین شیب نزولی[3] را برای تفسیر داده های مقاومت ویژه بکار برد. زهدی[4] در سال ۱۹۶۵و۱۹۷۴ یک روش تفسیر اتوماتیک مستقیم را البته با اصلاح پارامترهایDar Zarrouk توسعه داد. مینرداس[5] در سال ۱۹۷۰، از مجموع اختلاف مربعات بین مقادیر نمونه تابع اسلیچتر کرنل به دست آمده از داده های صحرایی و جواب مدل برای تفسیر استفاده کرد. جوهانسون[6] در سال ۱۹۷۷ روی حداقل مجموع مربعات مقادیر لگاریتمی مقاومت ویژه و ضخامت لایه ها و جوابهای تئوری توجه کرد.

بَکاس وگیلبرت[7] در سالیان ۱۹۶۷، ۱۹۶۸ و ۱۹۷۰ نشان دادند که عموماً کارهای معکوس سازی روی مسائل ژئوفیزیکی خیلی بهتر است. لکن حل به این طریق به نحوی به حدس نخستین نیاز دارد. مُرگیردت[8] در سال ۱۹۷۰ تکنیک رگرسیون ریج را طرح کرد و نشان داد چطور اطلاعات مجزای نزدیک به هم می تواند بوسیلهٔ استفاده ازتخمین گرها (برآوردکننده ها) مطلوب تر شود. او نشان داد که رگرسیون ریج برای مسائل با مقادیر ویژه[9] کوچک مناسب است. در صورتیکه معکوس سازی عموماً برای برخی مقادیر ویژه صفر مناسب است.

اینمن و همکارانش[10] در سال ۱۹۷۳ اولین کسانی بودند که روش معکوس سازی را روی مسائل مقاومت ویژه بکار گرفتند. اینمن در سال ۱۹۷۵ متوجه این نکته شد که مسائل مقاومت ویژه ندرتاً

---

[1] Slichter and Langer
[2] Vozoff
[3] Steepest descent method
[4] Zohdy
[5] Meinardus
[6] Johansen
[7] Backus and Gilbert
[8] Marquardt
[9] Eigenvalues
[10] Inman et al

شامل مقادیر ویژه صفر، و بیشتر شامل مقادیر ویژه کوچک است. از این رو روش رگرسیون ریج برای معکوس سازی داده های مقاومت ویژه مناسب است.

هاورستین[1] و همکارانش در سال ۱۹۸۲ با مطالعه تکنیکهای اختلاف حداقل مربعات معکوس سازی به این نتیجه رسیدند که روش رگرسیون ریج سریعتر است.

در تئوری معکوس سازی، ما با دو مسئله روبرو می شویم (۱): مدل بزرگ فضایی (۲): تابع خطای جند مدلی. ریاضی موجود بر پایه روشهای متعدد، در اصل محدود و محلی بوده و به آسانی در مینیمم های محلی تابع انرژی به دام می افتند. روشهای معکوس سازی غیر خطی حداقل مربعات، وقتی روشهای مستقیم نتیجه ندادند بکار گرفته شد. اساس این روشها مبنی بر فرمولهای Tarantola است. شرط ضروری این روش، شروع خوب مدل است. چون مدل در نظر گرفته شده حلی را در نزدیکی مدل شروع جستجو می کند.

اخیراً یک کلاس جدید از روشهای حل مسائل غیر خطی در زمینهٔ هوش مصنوعی ابداع شده است. این متدها در حل مسائل غیر خطی و مسائل بهینه سازی غیر مکانی، قویاً توانا هستند و به کلاس تکنیکهای بهینه سازی جهانی[2] تعلق دارند. که شامل شبیه سازی ذوب[3]، الگوریتم ژنتیک[4] و برنامه تکاملی همراه با سیستم شبکه عصبی[5] و سیستم شبکه عصبی فازی[6] پیشرفته است.

تفکیک پذیری پارامترهای مقاومت ویژه برای ارزیابی منظم خصوصیات سفرهای آبهای زیرزمینی با آمدن کامپیوترهای سریع و استفاده از متدهای بهینه سازی جهانی فوق العاده بهتر و دقیقتر شده است.

۴-۲ مسائل پیشرو:

مدلسازی عددی واژه ای برای مجسم کردن یک رویکرد (تقریب) است که به جای ساختار واقعی زمین از آن استفاده می شود. در دههٔ ۱۹۷۰ روشهایی برای مدلسازی تحلیلی وعددی از عملکرد متقابل میدانهای الکتریکی با ساختار زمینی سریعاً توسعه یافت. این توسعه بوسیله فراهم بودن کامپیوترهای توانایی که قادر بودن مدلها را بسازند ناشی شده بود. این قابلیت مدلسازی (استفاده از

---

[1] Hoverstein
[2] The class of global optimization techniques
[3] Simulated annealing
[4] Genetic algorithm
[5] Neural network
[6] Fuzzified neural network

کامپیوتر) استخراج اطلاعات بسیار بیشتری از داده های صحرایی نسبت به روشهای قبلی را ممکن ساخته است. قابلیتهای جدید روشهای ژئوفیزیکی بر پایه دو ابداع یا توسعه فنّی است : یکی توانایی برداشت حجم زیادی داده با دقت بالا و دیگری امکان استخراج مدلهای پیچیدۀ ساختار ژئوفیزیکی از این داده ها است. خلاصه ای از مسائل پیشرو در بخش ۳-۶-۱ تحت عنوان روش غیر مستقیم شرح داده شده است.

۴-۲-۱ اهمیت مدل پیشرو:

برای تفسیر به روش پیشرو به مدل نیاز داریم. بطوریکه اگر تفسیر را روی منحنی مدل پیاده کنیم باید به داده های موافق با داده های صحرایی برسیم. تعداد مدلهایی که می توان برای این منظور بکار گرفت خیلی زیاد است. آنچنانچه به برخی تدابیر خودکار از نتایج حلهای ممکن نیاز می شود. پیدا کردن مدلی که بطور رضایت بخش داده های مشاهده شده را پیش گویی کند، مسئله معکوس سازی نامیده می شود. مسئله معکوس سازی شامل پیش بینی مدلی است که این مدل داده های صحرایی را بدهد. مسئله معکوس سازی بطور خلاصه در بخش ۳-۶-۲ تحت عنوان تقریب مستقیم آمده است.

همه کلاسهای مسائل معکوس سازی وقت گیر است. در روش مدلسازی معکوس مسئله چند بار تکرار می شود.[بدین ترتیب که بر اساس مدلسازی معکوس از داده های صحرایی، به مدلی می رسیم که برای این مدل، مدلسازی پیشرو پیاده می شود و جوابش با داده های صحرایی مقایسه می شود این عمل چندین بار تکرار می شود تا بهترین انطباق و بهترین نتیجه حاصل شود] که البته این امر مستلزم زمان است. برای مسائل غیر خطی، رویه بهینه سازی به تکرار خیلی زیادی نیاز دارد و از این رو مدلهای پیشرو در زمانهای زیادی محاسبه می شونند.

این مسئله باعث شده که راههای کارآمد مختلف زیادی برای حل مسائل پیشرو در نظر گرفته شود. دو فاکتور دیگر نیز وجود دارد که باید وقتی به روشهای مدلسازی برای معکوس سازی مقاومت ویژه اقدام می شود مورد توجه قرار گیرد. اولین فاکتور اینکه باید مدلی در نظر بگیریم که این مدل ساختارش برای ما از قبل مشخص نیست. فاکتور دیگر نیاز به بررسی روی مسائل منطقه ای می باشد.

۴-۲-۲ : راههای مختلف برای حل مسائل پیشرو

سه روش باقی مانده خیلی با هم مرتبط هستند به جزء اینکه در جریان روش فوریه عملکرد به جای حوزه مکان در حوزه فرکانس است. سه روش فوق الذکر در مدلسازی در محیطهای کاملاً ناهمگن توانا هستند. سودمندی روش فوریه در این است که می تواند از یک فضا به فضایی دیگر تبدیل شود.[و مسائلی که قابل حل در حوزه مکان نیست را می شود در حوزه فرکانس حل کرد و دوباره آن را به حوزه مکان تبدیل کرد.] برای مسائل منطقه ای روشهایی که می توانند درجه بندی فواصل را یکی کنند، هم خوانی دارند. درجه بندی فواصل اجازه می دهد مناطق بسیار دور تأثیرگذار در حل مسئله باشند. در روشهای فوریه درجه بندی فواصل می تواند قبل از بکار بستن روش به یک شکل واحد تبدیل شود. بنابراین در انتخاب کردن روش، سادگی، دقت و رسیدن به موضوع سرعت از اهمیت بسزایی برخوردار است. روشهای اجزاء محدود و تفاضل محدود برای مسائلی که با معادلات خیلی بزرگ سروکار دارند حتی برای مدلهای ساده، پیش قدم هستند.اخیراً ترقی در ساده سازی تکنیکهای تکرار و همچنین پیشرفت در قدرت محاسبات، امکان مدلسازی سه بعدی به روشهای المان محدود و تفاضل محدود را مهیا ساخته است.

در توسعهٔ الگوریتمها برای مدلسازی مقاومت ویژه سه بعدی، مایلیم مدلمان مربوط به محیطهای پیچیدهٔ دلخواهمان باشد. مزیت روش اجزاء محدود و تفاضل محدود بر حل معادلات انتگرالی در مدلسازی روی محیطهای پیچیده است. بنابراین برای یک فضای داده شده روشهای المان محدود معمولاً خیلی دقیق است و روشهای تفاضل محدود خیلی سریعتر و آسانتر می باشد.

۴-۲-۳ مسائل مقاومت ویژه پیشرو

بیان عمومی برای پتانسیل روی یک زمین لایه ای را می توان با رابطه زیر نشان داد:

$$V=\frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r}+2\int_0^{\infty}A(m)J_0(mr)dm\right]=\frac{I\rho_1}{2\pi}\int_0^{\infty}[1+2A(m)J_0(mr)dm] \qquad (۱-۴)$$

که $A(m)$ = تابع استفنس کرنل (استفنس و شلومبرژه سال ۱۹۳۰) است که ارتباط آن با دیگر توابع در فصل ۳ بخش ۳-۶ آورده شده، داریم:

$$V=\frac{I}{2\pi}\int_0^{\infty}\rho_1[1+2A(m)]J_0(mr)dm=\frac{I}{2\pi}\int_0^{\infty}T(m)J_0(mr)dm \qquad (۲-۴)$$

$$E=\frac{I}{2\pi}\int_0^{\infty}T(m)J_1(mr)mdm \qquad (۳-۴)$$

$$\overline{\rho} = 2\pi r^2 (E/I) = r^2 \int_0^\infty T(mr) m dm \qquad (۴-۴)$$

برای زمین دو لایه مقادیر $A(m)$ با همان معرفهای معمول بوسیله رابطه $A(m) = \frac{K_{12} e^{-2mH_1}}{1 - K_{12} e^{-2mH_1}}$ بیان می شود.

برای زمین سه لایه مقدار $A(m)$ به صورت زیر است.

$$A_1(m) = q \frac{K_{12} e^{-2mH_1} + K_{23} e^{-2mH_2}}{1 - K_{12} e^{-2mH_1} - K_{23} e^{-mH_2} + K_{12} K_{23} e^{-2m(H_2 - H_1)}} \qquad (۵-۴)$$

بااستفاده از رابطه های $H_1 = p_1 H_0$ و $H_2 = p_2 H_0$ که p_1 و p_2 اعدادصحیح و H_0 عدد ثابت می باشد. و همچنین با نوشتن $g = e^{-2mH_0}$ برای زمین سه لایه ای می رسیم:

$$A_1(m) = q \frac{K_{12} g^{p_1} + k_{23} g^{p_2}}{1 - K_{12} g^{p_1} - K_{23} g^{p_2} + K_{12} K_{23} g^{(p_2 - p_1)}}$$

از آنجا که p_1 و p_2 اعدادصحیح و K_{23}, K_{12} ثابت هستند، $A_1(m)$ تابع گویا از g است می توانیم بنویسیم

$$A\ (m) = \left(b_1 g + b_2 g^2 + b_3 g^3 + \ldots\right) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n g^n \qquad (۶-۴)$$

از مقایسه معادلات (۴-۵)و(۴-۶) داریم:

$$K_{12} g^{p_1} + K_{23} g^{p_2} = \left[1 - K_{12} g^{p_1} - K_{23} g^{p_2} + K_{12} K_{23} g^{(p_2 - p_1)}\right] \sum_{n=1}^{\infty} b_n g^n$$

اصل برابری که ضریب هر g بآید عیناً در هر دو طرف معادله مساوی باشد را برقرار می سازیم. از آنجا که بیشترین توان g در سمت چپ p_2 است توانهای بیشتر از p_2 در سمت راست یعنی $p_2 + t$ باید مساوی صفر شود داریم:

$$b_{p_2 + t} - K_{12} b_{p_2 - p_1 + t} - K_{23} b_t + K_{12} K_{23} b_{p_1 + t} = 0$$

بازبینی رابطهٔ بالا می دهد:

$$b_{p_2 + t} = K_{12} b_{p_2 - p_1 + t} + K_{23} b_t - K_{12} K_{23} b_{p_1 + t} = 0 \qquad (۷-۴)$$

بنابراین با شناخت مقادیر b_t و $b_{p_2 - p_1 + t}$ و $b_{p_1 + t}$، مقدار $b_{p_1 + t}$ محاسبه می شود. ضرایب کمتر از مقدار حداکثر b_{p_2} را می توان از معادلهٔ (۴-۶) تعیین کرد. الباقی ضرایب را می توان با استفاده از معادلهٔ بازنگری شدهٔ تعیین نمود.

بنابراین پتانسیل در هر نقطه در اولین لایه بصورت زیر نوشته می شود.

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{\left(r^2+z^2\right)^{\frac{1}{2}}} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n}{\left[r^2+\left(2nH_0+z\right)^{\frac{1}{2}}\right]} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n}{\left[r^2+\left(2nH_0-z\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}\right]$$

در سطح $z=0$:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n}{\left[r^2+\left(2nH_0\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}\right]$$

و

$$E = \frac{I\rho_1}{2\pi}\left[\frac{1}{r^2} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n r}{\left[r^2+\left(2nH_0\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

بنابراین برای آرایش متقارن شلومبرژه:

$$\overline{\rho} = \rho_1\left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n r^3}{\left[r^2+\left(2nH_0\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\right]$$

از آنجا که برای اولین لایه می توانیم بنویسیم $h_1 = H_0$، داریم:

$$\overline{\rho} = \rho_0\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b_n \delta^3}{\left(\delta^2+4n^2\right)^{\frac{3}{2}}}\right] \qquad (۸-۴)$$

که $r/h_1 = \delta$ است (طبق معادله (۲-۶۹)).

از معادله ۴-۸ برای محاسبه منحنی های سونداژ استفاده می شود.

در یک روش متشابه مونی و همکارانش در سال ۱۹۶۶ مقادیر b_n را در یک برنامه از طریق فرمول بازنگری(فلتس در سال ۱۹۵۵) شده، در شکل یک چند جمله ای محاسبه کردند. روشهای موجود (CGG در سال ۱۹۵۵و۱۹۶۳ ؛ فلتس در سال ۱۹۵۵ ؛ و مونی در سال ۱۹۶۶) به ارزیابی معادله (۴-۱) وابسته است. ماهیت انتگرال نتیجه ای از تابع کرنل و تابع بسل است و نمی تواند در عبارت توابع اولیه بیان شود. شرطی که عموماً برای همگرایی سریع سری وضع شده این است که ضخامت لایه های مجزا باید مضربی از برخی ضخامتهای معمول (ترجیحاً ضخامتهای لایهٔ بالاتر) باشند.

در قسمت بعد بطور خلاصه پیرامون روشی که بوسیله گُوش در سالهای ۱۹۷۰و۱۹۷۱ ارائه شد و تحت عنوان روش فیلتر معکوس گُوش شناخته شده بحث خواهیم کرد. این روش روی یک حالت ویژه از تغییر شکل واتسون استوار است. در این روش روند پیچشی(همامیخت)[1]، جانشین انتگرال شده و هیچ قید مکانی نسبت به حضور تعداد لایه ها و یا ضخامت آنها ندارد.

۴-۳ روش فیلتر معکوس گُوش

روش فیلتر معکوس گُوش یک رویه سریع از محاسبه منحنی مقاومت ویژه ظاهری $(\bar{\rho})$ برای پارامترهای معلوم لایه، بر اساس بکارگیری فیلتر خطی از طریق مفهوم تابع $T(m)$ است. $T(m)$ تابع مرتبط با تابع استفنس کرنل می باشد.

معادله (۴-۱) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$V = \frac{I}{2\pi}\int_0^\infty T(m)J_0(mr)dm \qquad (۴\text{-}۹)$$

قدمهای بعدی بصورت زیر است:

(۱)- محاسبه $T(m)$ با استفاده از پارامترهای معلوم لایه ها و ترسیم منحنی $T(m)$ از طریق:

الف) فرمول دو لایه:

$$T(m) = \rho_1(1+2A(m))$$

و

$$T_{12}(m) = \rho_1 \frac{1+K_{12}e^{-2mh_1}}{1-K_{12}e^{-2mh_1}}$$

ب) [زمینهای جند لایه ای] پیکرز[2]، سال ۱۹۴۰ تناسبی را برای محاسبه $T(m)$ زمینهای چند لایه ای مورد استفاده قرار داد که بصورت زیر در نقاط مختلف بیان می شود:

$$T_i = \frac{T_{i+1} + \rho_i \tanh(mhi)}{1 + T_{i+1}\tanh(mh_i)/\rho_i} \qquad (۴\text{-}۱۰)$$

بنابراین محاسبه و رسم منحنی های $T(m)$، اولین قدم در تعیین $\bar{\rho}$ است. تابع تبدیل مقاومت ویژه همان رفتار مجانبی تابع مقاومت ویژه ظاهری را نشان می دهد و هر دو برای مقادیر عرضی(y های) کوچک و بزرگ بکار می روند. در حالت کلی اثر افزایش $(1/m)$(عکس طول) روی $T(m)$ شبیه به اثر افزایش فاصله الکترودی روی $\bar{\rho}$است، که این امردر آنها مطابق با افزایش عمق از اطلاعات بدست آمده می شود. فقط اختلاف در قرارگیری شیب منحنی های پایین رونده

---

[1] Convolution
[2] Pekeris

دارند. رسم $\left(T/\rho_1\right)$ برحسب $\left(1/mh_1\right)$ برای زمین دو لایه ای شبیه منحنی های مقاومت ویژه ظاهری می باشد(رسم $\left(\overline{\rho}/\rho_1\right)$ برحسب $\left(AB/2h_1\right)$).

(۲) دومین قدم تغییر شکل مقادیر نمونه گیری شده با ضرایب فیلتر معکوس گُوش.

الف) گرفتن مقادیر نمونه از $T(m)$.

ب) گرفتن ضرایب فیلتر معکوس گُوش(جدول۴-۱).

جدول ۴-۱: فیلتر نه نقطه معکوس شلومبرژه.

a_{-3}	0.0225	a_0	0.1854	a_3	0.4018
a_{-2}	-0.0499	a_1	1.9720	a_4	-0.0814
a_{-1}	0.1064	a_2	-1.5716	a_5	0.0148

ج)هامیخت کردن با استفاده از فرمول زیر برای رسیدن به $\overline{\rho}$.

$$\overline{\rho}_k = \sum_{j=-3}^{5} a_j T_{k-j}; k = 0,1,\ldots,6 \qquad (۱۱-۴)$$

k نقطه نمونه است.

د) محاسبهٔ $\overline{\rho}$ در هر نقطه نمونه(k) و رسم منحنی بر حسب r (مساوی با $1/m$).

معادلات (۴-۱۰)و(۴-۱۱) همراه با ضرایب جدول (۴-۱)را می توان برای نوشتن برنامه ای به منظور محاسبه $\overline{\rho}$ روی زمین چند لایه ای بکار گرفت.

۴-۴ تفسیر مستقیم

۴-۴-۱ مسئله معکوس سازی

کوفد در سال ۱۹۶۸ اولین گزارش مفصل از روشی به نام تفسیر مستقیم داده های مقاومت ویژه را ارائه کرد و به همین اسم آنرا نامگذاری کرد. او در این زمینه مفهوم تابع کرنل ترقی یافته را برای اقتباس پارامتر های لایه معرفی کرد. و با عبارت زیر شروع کرد.

$$\overline{\rho} = \rho_1\left[1 + 2r^2\int_0^{\infty} A(m)J_1(mr)m\,dm\right] \qquad (۱۲-۴)$$

تفسیر شامل دو مرحله است:

(۱) حصول تابع ارتقاء یافته کرنل $H(m)$، بدست آمده از منحنی مقاومت ویژه ظاهری که بصورت زیر بیان می شود:

$$H(m) = A(m) + 1/2$$

(۲) حصول پارامترهای لایه از $H(m)$.

کوفد در سال ۱۹۶۸ یک روش تجزیه ای را معرفی کرد که در آن تابع مقاومت ویژه ظاهری در توابع جزئی بیان می شود و برای این منظور توابع کرنل جزئی[1] محاسبه می شود. او رابطهٔ زیر را استنباط کرد:

$$A(m)+1/2=H(m)=\sum_i \Delta_i A(m) \qquad (۱۳-۴)$$

این مراحل که توسط کوفد در سال ۱۹۶۸ بیان شد تحت چندین شرط بود. او منحنی های استانداردی را روی کاغذ لگاریتمی برای تعیین ترسیمی توابع کرنل جزئی از توابع $\bar{\rho}$ معرفی کرد.
در قدم دوم، کوفد تابع اصلاح شدهٔ $G(m)$ از $H(m)$ را معرفی کرد. که بصورت زیر بود:

$$G(m)=\left[H(m)-\frac{1}{2}\right]\Big/\left[H(m)+\frac{1}{2}\right]$$

$G(m)$ برای مقادیر بزرگ m یک مقدار مجانب دارد به صورت:

$$G'(m)=K_{12}e^{-2mh_1}$$

برای رسیدن به مقادیر K_{12} و h_1 می توان قسمت اول از نمودار اصلاح شده کرنل را بر یک نمودار به شکل Ke^{-2mh} منطبق کرد. برای این منظور می توان از نمودارهای استانداردی که قبلاً تهیه شده استفاده کرد. که h_1 از تغییرات افقی و K_{12} از تغییرات عمودی حاصل می شود. بعداً، لایه بالایی جداگانه در نظر گرفته شده و اندازه گیری روی مرز مسطح بالایی دومین لایه انجام می شود، و پارامترهای دومین لایه از منحنی اصلی $G(m)$ بدست می آید. این رویه برای حالت چند لایه تکرار شده تا به منحنی کرنل اصلاح شدهٔ دو لایه برسیم.

نظر به اینکه در حال حاضر حلهای کامپیوتری ترجیح داده می شود، این گونه روشهای گرافیکی فقط جذابیت فلسفی دارند. اما مایه افتخار برای احیاء روش محاسبات مستقیم رابايد به کوفد نسبت داد. چون او کسی بود که به نظرات آقایانی همچون اسلیچتر در سال ۱۹۳۳ و پیکرز در سال ۱۹۴۰ توجه کرد و سرانجام موفق شد پارامترهای لایه را مستقیماً از سنجش منحنی های سونداژ در سال ۱۹۶۸ بدست آورد.

در این روش، پارامتر $H(m)$ به عنوان پارامتر وسط استفاده می شد. اولین مرحلهٔ این روش که اقتباس $H(m)$ از $\bar{\rho}$ بود خسته کننده بومرحله دوم که بعداً توسط کوفد در سال ۱۹۷۰ اصلاح شد، بدست آوردن پارامتر لایه ها از $T(m)$ بود.

[1] partial kernel functions

۴-۴-۲ روش فیلتر گُوش

اگرچه کوفد در سال ۱۹۷۰ دومین مرحله(تعیین پارامترهای لایه از $T(m)$) را بهبود بخشید اما همچنان مرحله اول روش کوفد خسته کننده بود. برای اجتناب از این وضع نامساعد گُوش در سال ۱۹۷۱ یک مثال و یک رویه برای رسیدن به $T(m)$ از منحنی های مشاهده شده اقتباس کرد. روش گُوش مبنی بر این فرض بود که $\bar{\rho}$ و $T(m)$ یک ارتباط خطی با هم دارند واینکه اصول تئوری فیلتر خطی را برای اقتباس یکی ار آنها می توان بکار بست.

پتانسیل در هر نقطه روی سطح بوسیله فرمول (۴-۱) داده شده، با بکارگیری این فرمول خواهیم داشت:

$$\bar{\rho} = r^2 \int_0^{\infty} T(m) J_1(mr) m dm \qquad (۱۴-۴)$$

با بکارگیری معکوس سازی هنکل[1] در تغییر شکل انتگرال بسل و فوریه در معادلات بالا، برای آرایش شلومبرژه داریم :

$$T(m) = \int_0^{\infty} [\bar{\rho}(r) J_1(mr)/r] dr$$

با معرفی متغییرهای جدید: $[x = \ln r; y = \ln(1/m)]$

$$T(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\rho}(x) J_1\left(1/e^{y-x}\right) dx \qquad (۱۵-۴)$$

معادله بالا بیانگر یک انتگرال همامیخت با ورودی $\bar{\rho}(x)$ و خروجی $T(y)$ است. عملکرد مشخصه فیلتر بوسیله رابطه (۴-۱۵) تعریف می شود. رابطهٔ (۴-۱۵) باتغییرشکل توابع فوریه و برگردانی آنها در حوزه زمان بدست می آید.. این موضوع از طریق نمونه گیری و تئوری فیلتر باعث تسریع محاسبات T از منحنی صحرایی $\bar{\rho}$ می شود. در اینجا تابع $\bar{\rho}$ بر طبق قاعده Niquist نمونه گیری شده و مقادیر نمونه گیری شده توسط تابع سینوسی درون یاب، با مقدار پیک و دوره تناوب مساوی(هم ارز) که توسط مقادیر نمونه تعیین می گردد، جایگزین می شود. در مرور خواص ویژه از تابع سینوسی، اینکه آن در نقطه مورد نظر برابر واحد و در نقاط دیگر برابر صفر است با اضافه کردن یک تعداد محدود، ما را قادر می سازد تا یگانگی واحدی را دوباره بسازیم. در عمل بجای استفاده از تابع سینوسی از روش فیلتر دیجیتال استفاده می شود. مسئله نمونه گیری و تعیین ضرایب فیلتر

[1] Hankel

بوسیله گُوش در سال ۱۹۷۰ شرح داده شده است. ضرایب فیلتر ۱۲ نقطهٔ بلند و ۹ نقطه کوتاه توسط گُوش در جدول ۴-۲و۴-۳ ارائه شده است. هامیختی که با $\bar{\rho}$ نمونه گیری شده، $T(m)$ را می دهد.

جدول ۴-۲

فیلتر نه نقطه

$a_{-3} \rightarrow 0.0060$	$a_3 \rightarrow 0.0358$
$a_{-2} \rightarrow -0.0783$	$a_4 \rightarrow 0.0198$
$a_{-1} \rightarrow 0.3999$	$a_5 \rightarrow 0.0067$
$a_0 \rightarrow 0.3492$	$a_6 \rightarrow 0.0051$
$a_1 \rightarrow 0.1675$	$a_7 \rightarrow 0.0007$
	$a_8 \rightarrow 0.0018$

جدول ۴-۳

فیلتر دوازده نقطه

$a_{-2} \rightarrow -0.0723$	$a_3 \rightarrow 0.0358$
$a_{-1} \rightarrow 0.3999$	$a_4 \rightarrow 0.0198$
$a_0 \rightarrow 0.3492$	$a_5 \rightarrow 0.0067$
$a_1 \rightarrow 0.1675$	$a_6 \rightarrow 0.0076$
$a_2 \rightarrow 0.0858$	

از آنجا که ما نگران نمونه داده ها در فواصل مجزا از متغییر مستقل هستیم، به جای انتگرال هامیخت در معادله ۴-۱۵ برای فیلترکوچک از یک جمع بندی(زیگما) بصورت زیر استفاده می کنیم.

$$T_k = \sum_{j=-2}^{6} a_j \bar{\rho}_{k-j}; k = 0,1,......,8 \qquad (۴\text{-}۱۶)$$

این موضوع دلالت بر این نکته دارد که میانگین وزنی مقاومت ویژه ورودی دادهٔ نمونه گیری شده، با ضرایب فیلتر a_j درجایی که $\bar{\rho}_k$ مقاومت ویژه دیجیتایز شده است باعث تغییر شکل مقادیر T_k در نقاط در نظر گرفته شده می شود.

حالا با وضع کردن این رویهٔ از طریق تئوری فیلتر برای اولین مرحلهٔ روش کوفد، می توانیم به آسانی $T(y)$ را از مقادیر $\bar{\rho}(x)$ محاسبه کنیم. روش فیلتر گُوش توأم با تقریب اصلاح شدهٔ کوفد برای مرحلهٔ دوم با یک دقت نسبتاً خوب، ترکیبی برای ارزیابی پارامترهای لایه را فراهم می کند. این روش یعنی، روش " گُوش- کوفد"[1] برای منحنی های VES مشاهده شده، استفاده می شود.

این رویه شامل مراحل زیر است:

۱- حصول مقاومت ویژه ظاهری $\bar{\rho}$ برحسب مقادیر معلوم r.

۲- محاسبه $T(m)$ از طریق مقادیر $\bar{\rho}$ دیجیتایز شده بوسیله هامیخت ضرایب فیلتر گُوش:

$$T_k = \sum_{j=-2}^{6} a_j \bar{\rho}_{k-j}; \qquad \text{رسم منحنی } T(m)$$

[1] Ghosh-Koefoed

۳- فرض کردن یک تقریب مجانب برای اولین قسمت، بوسیله منحنی دو لایه و اینکه آنها به عنوان پارامتر لایه رویی محسوب شوند. این موضوع مبنی بر ارتباط بین مقاومت ویژه تغییریافته و تابع اصلاح شدهٔ کرنل است:

$$G_i = \frac{T_i - \rho_1}{T_i + \rho_1}$$

۴- تبدیل $T(m)$ به سطح مرز پایین تر از طریق:

$$T_{i+1} = \frac{T_i - \rho_i \tanh(mh_i)}{1 - T_i \tanh(mh_i)/\rho_i}$$

۵- ادامه عملکرد ۳ و ۴ تا تمام منحنی تحلیل شود و پارامترهای لایه به دست بیاید. کوفد در سال ۱۹۷۹ یک برنامه کامل اتوماتیکوار را برای محاسبه پارامترهای لایه با مقادیر دیجیتایز شدهٔ $\bar{\rho}$ به عنوان ورودی، ارائه کرد

الگوریتم مدلسازی پیشرو مبنی بر هشت نقطهٔ نمونه گیری شده در دهگان، به روش کوفد در ضمیمه۴-۱ این کتاب به زبان فورتن ۷۷ ارائه شده است. از این برنامه می توان برای خلق منحنی VES چند لایه شلومبرژه بدون هیچ شرطی استفاده کرد و همچنین در تفسیر غیر مستقیم مورد استفاده قرار گیرد.

معکوس سازی داده های مقاومت ویژه برای رسیدن به پارامترهای لایه در روش مستقیم امری ضروری است. برای این منظور پیش زمینه تئوری برای برخی روشهای معکوس سازی مقاومت ویژه در بخشهای بعدی فراهم شده است.

۴-۵ معکوس سازی یک بعدی مقاومت ویژه بوسیله رگرسیون ریج:

خیلی از مدلهای ژئوفیزیکی را می توان بوسیله رابطهٔ عملی زیر بیان کرد:

$$C = G(X, P) \qquad (۱۸-۴)$$

که:

$G =$ تابعی از P پارامتر مدل و X پارامتر معلوم دستگاه است.

$C =$ مقادیر محاسبه شدهٔ G

برای معکوس سازی یک بعدی داده های مقاومت ویژه برای زمین لایه ای شکل، پارامترهای بالا بصورت زیر تعریف می شود:

$P =$ مقاومت ویژه و ضخامت لایه

$X =$ فواصل الکترودی

$C =$ مقاوت ویژه ظاهری

در خیلی از حالات رابطهٔ $C = G(X, P)$ خطی است. در نتیجه

$$C = AP \qquad (۱۹-۴)$$

که

$A =$ ماتریس کارا[1] (ماتریس ژاکوبین[2])

اگر C بتواند داده ها را نمایش بدهد و A از مسائل پیشرو محاسبه شود و همچنین اگر ماتریس وارون A یعنی A^{-1} موجود باشد سپس P یعنی پارامترهای مدل قابل محاسبه شدن است:

$$P = A^{-1}C \qquad (۲۰-۴)$$

برای مسائل مقاومت ویژه دستگاه نیمه خطی است. معادلات سونداژ غیر خطی برای مقاومت ویژه ظاهری، بوسیلهٔ بسط سری تیلورِ $G(X, P)$ در اطراف نقطهٔ (X, P^0) در هر فاصله الکترودی خطی می شود. بااعمال بسط سری تیلور به دستگاهی خطی از N معادله در M مجهول می رسیم. یعنی:

$$\Delta G = A\Delta P \qquad (۲۱-۴)$$

که

$$\Delta G_i = G(P, X_i) - G(P^0, X_i), \qquad i = 1,2,3,.....N$$

و

$$[A]_{ij} = \frac{\partial G}{\partial P_j}(P, X)$$

که،

$$P = P^0$$

و

$$X = X_i$$

و

$$\Delta P_j = P_j - P_j^0 \qquad j = 1,2,3,....., M$$

---

[1] Co-efficient matrix
[2] Jacobian matrix

حل معادله (۴-۲۱)را می توان بوسیله روش حداقل مربعات با ضرب معادله در A^T بدست آورد. در نتیجه:

$$\left(A^T A\right)\Delta P = A^T \Delta G$$

طبق رابطهٔ بالا داریم:

$$\Delta P = \left(A^T A\right)^{-1} A^T \Delta G \qquad (۲۲-۴)$$

اگر $A^T A$ واحد باشد معکوس سازی وجود ندارد. تکنیک حداقل مربعات کنترل شده[۱] برای غلبه بر این مشکل مورد استفاده قرار می گیرد.

بنابراین معادله (۴-۲۲) به صورت اصلاح شدهٔ زیر در می آید:

$$\Delta P = \left(A^T A + KI\right)^{-1} A^T \Delta G \qquad (۲۳-۴)$$

که،

K = فاکتور کنترلی[۲]

I = ماتریس واحد[۳]

در روش رگرسیون ریج مقادیر ویژهٔ ماتریس $\left(A^T A + KI\right)$ ، $\lambda + K$است. مقادیر ویژه کوچک بوسیله فاکتوری از K که سبب پایداری سیستم می شود افزایش می یابد. مقادیر ویژه بزرگ کمترین اثر را دارند چون K خیلی کوچک است.

اگر K بزرگ باشد رگرسیون ریج به روش گرادیانی تبدیل می شود. و اگر K کوچک باشد روش رگرسیون ریج به تخمین گر حداقل مربعاتِ معادل با تکنیک بهینه نیوتن- رِفسون[۴] تبدیل می شود.

۴-۶ استفاده از جبرSVD در حل الگوریتم معکوس سازی رگرسیون ریج:

ماتریس A را می توان به عنوان نتیجه از سه ماتریس U,V,Λ بصورت زیر نوشت:

$$A = U\Lambda V^T$$

که،

$U_{n\times p}$ = بردار ویژه دادهٔ فضا،

---

[1] Damped least square technique
[2] Damping factor
[3] Identity matrix
[4] Newton-Raphson

$V_{p\times p}$ = بردار ویژه پارامتر فضا،

$\Lambda = p\times p$ ماتریس قطری شامل r مقادیر ویژه غیر صفر A با شرط $r \le p$ می باشد.

مقادیر $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, ..., \lambda_p$ در ماتریس Λ به عنوان مقادیر واحد " A " خوانده می شود.

این گونه فاکتورگیری به اسم، "تجزیه مقدار واحد[1]" A (SVD) نامگذاری می شود.

در عبارت SVD داریم:

$$A^T A = U\Lambda V^T * V\Lambda U^T = V\Lambda^2 V^T \qquad (۴-۲۴)$$

و معادله (۴-۲۳) برای Marquardt Levenberg رگرسیون ریج می شود

$$\Delta P = V\Lambda_D^{-1} U^T \Delta G \qquad (۴-۲۵)$$

که،

$$\Lambda_D^{-1} = \frac{\Lambda}{(\Lambda + K)^2}$$

بنابراین عملکرد این ماتریس ملزم شده برای تکنیک رگرسیون ریج، بوسیله تکنیک SVD فراهم شده است. این عمل احتمال ماتریس واحد (Singular) را کاهش می دهد. چونکه ممکن است ماتریس معکوس سازی گوس- جوردن[2] به نتیجه نرسد. بنابراین این الگوریتم خیلی پایدار است. در موردپایداری دستگاه می توان این گفته را بیان کرد که" این الگوریتم کاملاً فنی است و از لحاظ تئوری همیشه به جواب می رسد".

۴-۷ وزن دهی و مقیاس دهی برای رگرسیون ریج

وقتی به داده ها وزن داده می شود بسته به درجه اهمیت، به هر داده وزنی تخصیص داده می شود. این قبیل وزن دهی ممکن است برای حذف کردن تمایلی ذاتی در داده، یا تمایل جفت شدگی حداقل مربعات استفاده شود.

اگر اختلاف عددی بزرگی بین منحنی داده ای از نواحی مختلف وجود دارد، در حل نهایی تمایل نامطلوبی را می توان معرفی کرد.این تمایل سبب می شود که تخمینگر رگرسیون ریج به سمت مقادیر بزرگ متمایل بشود. که ممکن است به عنوان یک آنومالی دقیق شامل برخی اطلاعات مهم شود. تخمین گر رگرسیون ریج و تخمین گر حداقل مربعات نسبت به اختلافهای بین منحنی صحرایی و منحنی تولید شده از مدلهای تخمین زده شده، واکنش نشان می دهند. این اختلافها در

[1] Singular Value Decomposition
[2] Gauss-Jordan

فواصل بزرگ آرایه ای فقط بدلیل مقادیر عددی بزرگ منحنی در این نواحی بیشتر خواهد شد.که در این صورت این تخمین گر ممکن است تخمین خوبی از مقاومت ویژه نیم فضای پایین تر را بدهد لکن برای مقاومت ویژه اولین لایه تخمین خوبی را ندهد. در حالت کلی پسندیده است که وزن هر محل داده مطابق با نویز در دادهٔ آن محل باشد و همچنین به آن داده بعلت بزرگی یا کوچکی اش درمقایسه با محلهای داده ای دیگر به غلط درجه اهمیتی نسبت ندهند.

برای وزن دهی ماتریس M معمولاً از $M = \sigma^2 N$ استفاده می شود. این ماتریس، ماتریس کوارانس- واریانس[1] یک داده است. اولین فرض دستوری اینکه، خطا در یک فاصلهٔ آرایه ای، از خطا در دیگر فواصل مجزا است که در این صورت ماتریس کوارانس- واریانس تبدیل به یک ماتریس قطری با اجزاء σ_i^2 می شود. برای تعیین σ_i^2 لازم است که میزان خطا در داده مشخص شود. خطا در داده ها از منشأهای مختلفی ایجاد می شود از قبیل:

الف) محدودیت دقت آموزش.

ب)اثر غیر همگن بودن جانبی.

ج) خطا در اندازه گیری فواصل جدایش.

عبارت σ^2 مسئله واریانس نامیده می شود. رویه پذیرفته شده برای بسط این برنامه این است که محل هر داده، درصد انحراف معیار یکسانی دارد. فرض بیشتر اینکه، هر محل(هر نقطه) انحراف معیار 1% از مقادیر اندازه گیری اش را دارد. مسئله انحراف معیار σ، سطح نویز تخمین زده شدهٔ برداشت را تعدیل می بخشد. تقریباً همهٔ برداشتهای مقاومت ویژه داده هایی مطابق در 5%مقادیر اندازه گیری اش را می دهند.

برای تعیین وزن دهی در تخمین گر، هر دو طرف معادله (۴-۲۱) را در $N^{-\frac{1}{2}}$ ضرب می کنیم. با نادیده گرفتن خطا می توانیم بنویسیم.

$$N^{-\frac{1}{2}}\Delta G = N^{-\frac{1}{2}} A\Delta P \qquad (۲۶\text{-}۴)$$

حل بدست آمده از معادله (۴-۲۶) حل وزن دهی به حداقل مربعات است. تخمین گر وزن داده شدهٔ حداقل مربعات بصورت زیر بیان می شود.

$$\Delta P = \left(A^T N^{-1} A\right)^{-1} A^T N^{-1} \Delta G \qquad (۲۷\text{-}۴)$$

[1] Variance-Covariance

مطابقاً تخمین گر رگرسیون ریچ بصورت زیر در می آید:

$$\Delta P = \left(A^T N^{-1} A + KI\right)^{-1} A^T N^{-1} \Delta G \qquad (۲۸-۴)$$

بنابراین معادله (۴-۲۳) از تخمین گر رگرسیون ریچ بعد از وزن دهی به معادله (۴-۲۸) تبدیل می شود.

مقیاس دهی

قبل از افزودن فاکتور K، مقیاس دادن به ماتریس $\left(A^T N^{-1} A\right)$راحت است آنچنانکه اجزاء قطری آن مقدار ۱ را دارند. مقیاس دهی ماتریس $\left(A^T N^{-1} A\right)^S$و بردار $\left(A^T N^{-1} \Delta G\right)^S$ بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\left(A^T N^{-1} A\right)_{ij}^S = \frac{\left(A^T N^{-1} A\right)_{ij}}{\left[\left(A^T N^{-1} A\right)_{ij}\right]^{\frac{1}{2}}\left[\left(A^T N^{-1} A\right)_{jj}\right]^{\frac{1}{2}}} \qquad (۲۹-۴)$$

$$\left(A^T N^{-1} \Delta G\right)_j^S = \frac{\left(A^T N^{-1} \Delta G\right)_j}{\left(A^T N^{-1} A\right)_{jj}} \qquad (۳۰-۴)$$

با تعریف زیر برای ماتریس قطری مقیاس دهی آن بصورت زیر در می آید:

$$D_{ij} = 0, i \neq j$$

$$D_{ii} = \left[\left(A^T N^{-1} A\right)_{ii}\right]^{\frac{1}{2}}$$

و بنابراین با بازنویسی معادلهٔ (۴-۲۷) داریم:

$$\Delta P = D\left(DA^T N^{-1} AD\right)^{-1} DA^T N^{-1} \Delta G \qquad (۳۱-۴)$$

و تخمین گر رگرسیون ریج می شود:

$$\Delta P = D\left(DA^T N^{-1} AD + KI\right)^{-1} DA^T N^{-1} \Delta G \qquad (۳۲-۴)$$

معادله بالا، معادلهٔ تخمینگر رگرسیون ریج است که بهترین تمایل جفت شدگی را با داده های سونداژ شلومبرژه ارائه می کند. برنامه های نوشته شده برای وزن دهی رگرسیون ریج استفاده از معادلهٔ (۴-۳۲) برای ارزیابی ΔP است.

برنامه های کامپیوتریی با استفاده از تکنیک رگرسیون ریج برای معکوس سازی داده های SVD توسعه یافته است. برای این منظور، برنامه ای به زبان فورتن ۷۷ نوشته شده و اصل این برنامه در ضمیمه ۴-۲ آورده شده است.

۴-۸ معکوس سازی یک بعدی مقاومت ویژه بوسیله برنامهٔ تکاملی

الگوریتم ژنتیک(GA) به عنوان یک ابزار قدرتمند در تئوری بهینه سازی در بعد از سالهای ۱۹۸۰ مطرح شد. این متد در شاخه های مختلف علوم و مهندسی به عنوان بهینه سازی تابع شایستگی[1] استفاده می شود. این روش شامل پروسه یادگیری است و از این رو تحت بخش کاربردی هوش مصنوعی دسته بندی شده است. با ظهور همزمان کامپیوتر، این روش به طور وسیع در حل مسائل پیچیدهٔ غیر خطی و بهینه سازی غیرمکانی مورد استفاده قرار گرفته است.

الگوریتم ژنتیک (گلودبرگ و سگرست۱۹۸۷ ، گلودبرگ و ریچردسون۱۹۸۷ ، گلودبرگ۱۹۸۹ ، نگبرگ و روزن ۱۹۹۲ ، نِس و وز ۱۹۹۲ ، سِن و استُف ۱۹۹۵) به گروه روشهای جستجوی تصادفی از قبیل تکنیکهای مونت کارلو[2]، شبه تکاملی[3]، شبه ذوب(SA)[4] و شبه ذوب سریع(VFSA) [5]،(فوگل و همکارانش ۱۹۶۶، رابینسون۱۹۸۱، فوگل ۱۹۸۸، اسچیدر و ویتسمن۱۹۹۰، چانرا و همکارانش۱۹۹۵، چانرا و همکارانش۱۹۹۶) متعلق است. مزیت روش جستجوی تصادفی در توانایی اش نسبت به بررسی مدل بطور گسترده است.در الگوریتم ژنتیک جستجو تصادفی است، اما جستجو بوسیلهٔ پروسه Stochastic راهنمایی می شود. این پروسه به یادگیری مسیرهای مینیمم برای رسیدن به حل کمک می کند.

معهذا، یکی از مشکلات اساسی الگوریتم ژنتیک بوسیلهٔ فوگل در سال ۱۹۸۸ بیان شد. این مشکل در همگرایی زودرس بود. چنانچه بعد از زادوولد پی درپی، تمام جمعیت به یک کد معین متمرکز می شود. به نحوی که زادوولد هر کروموزم جدید قطع می شود. این امر حتی ممکن است قبل از پیدا شدن حل بهینه اتفاق بیافتد. اگر چه جهش برای تنوع منظور شده ولی رشد جهش معمولاً پایین است. آنچنانچه از نظر تجربی یا عملی به هیچ بهبودی در زادوولد نهایی جمعیت نمی توان رسید. این مسئله را می توان بوسیله برنامه تکاملی(EP) حل کرد. اصول مبنی بر این برنامه بوسیله زبان فورترن ۷۷ در ضمیمه ۴-۳ این کتاب آورده شده است.

۴-۸-۱ اساس تئوری برنامه تکاملی و کاربرد آن در معکوس سازی مقاومت ویژه

[1] Optimize Fitness Function
[2] Monte Carlo
[3] Simulated Evolution
[4] Simulated Annealing
[5] Very Simulated Annealing

در ســونداژزنی مقاومــت ویــژه بــا جریــان مــستقیم بــا پارامترهــایی از قبیــل $\rho_1, \rho_2, ..., \rho_n$ و $h_1, h_2, ..., h_{n-1}$ مرتبط هستیم. برای هر پارامتر یک جفت مرز که از بالا و پـایین محـدود است در نظر می گیریم. قصد داریم حل دقیق را در دامنه ای که مشخص کرده ایم، پیـدا کنـیم. بـرای ایـن منظور برنامه تکاملی از سه مرحله به اسمهای زاوولد جمعیت ، محاسبه شایستگی و جهش اسـتفاده می کند.

(الف) زاوولد جمعیت : در قدم نخست n کد واقعـی مجـزا در جمعیـت ، بـصورت تـصادفی در مـرز معین شده تولید می شود. دو ملاک مهم برای زادوولد جمعیت وجـود دارد یکـی انـدازه جمعیـت و دیگری تصادفی بودن تعداد نسلها است. انتخاب اندازه جمعیت و تعداد نـسل تـصادفی، بـستگی بـه کارایی محاسبات خواسته شده دارد. این تعداد کد واقعی خلق شـده در محـدودهٔ بـالا و پـایین هـر پارامتر را می توان بصورت ماتریس زیر نمایش داد.

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{21} & \cdots & I_{n1} \\ I_{12} & I_{22} & \cdots & I_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ I_{1p} & I_{2p} & \cdots & I_{np} \end{bmatrix} \qquad (۴-۳۳)$$

که پسوند p معرف پارامتر و پسوند n معرف تعداد مقادیر برای هر پارامتر است.

(ب) محاسبه شایستگی: تابع شایستگی هر شخصیت خلق شده از جمعیت بوسـیله مفهـوم خطـای chi-square محاسبه می شود.

خطای chi-square بصورت زیر تعریف می شود.

$$\text{chi-square خطای} = \frac{1}{N} = \sum_{N} \frac{(\bar{\rho}_0 - \bar{\rho}_c)^2}{\bar{\rho}_c} \qquad (۴-۳۴)$$

که:

$\bar{\rho}_0 =$ مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده.

$\bar{\rho}_c =$ مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده.

$N =$ تعداد مشاهدات.

در این جا $\bar{\rho}$ بصورت زیر بیان می شود.(استفانس و شلومبرژه)

$$\bar{\rho} = r^2 \int_0^{\infty} T(m) J_1(mr) m dm \qquad (۴-۳۵)$$

که:

r = نصف فاصلهٔ الکترودهای جریان.

$J_1(mr)$ = تابع بسل نوع اول.

m = متغیر انتگرالگیری.

$T(m)$ = امپدانس الکتریکی، تعریف شده بوسیله کوفد در سال ۱۹۷۰ به عنـوان تـابع تغییـر شـکل مقاومت و ضخامت لایه.

(ج) جهش: در این مرحله بوسیله مغشوش کردن هر عضو از جمعیت از طریق مرحلـه تـابع جهـش، عددی معادل شخصیتها تولید می شود. این مقدار جهش تعیین شده، بـه شایـستگی بـستگی دارد. بعد از چندین آزمایش اگر از مرحله ای همانند توزیع زیر استفاده شود این احتمال از جهش P_m بـه دست می آید.

اگر $\bar{\varepsilon} \le 0.5$	$P_m = 0.999$
اگر $0.5 < \bar{\varepsilon} \le 1.0$	$= 0.985$
اگر $1.0 < \bar{\varepsilon} \le 2.0$	$= 0.97$
اگر $2.0 < \bar{\varepsilon} \le 5.0$	$= 0.95$
اگر $5.0 < \bar{\varepsilon} \le 10.0$	$= 0.87$
اگر $10.0 < \bar{\varepsilon} \le 25.0$	$= 0.77$
اگر $25.5 < \varepsilon \le 50.0$	$= 0.65$
اگر $50.0 < \bar{\varepsilon} \le 100.0$	$= 0.5$
اگر $\bar{\varepsilon} > 100.0$	بوسیله همان مقدار نسل برای تولید جمعیت= عددی تصادفی تولید می شود

که $\bar{\varepsilon}$ خطای chi-square است.

در مرحله بعدی جهش، عددی تصادفی دوباره با استفاده از همان تعداد نسل ایجاد می شود. سپس بوسیله ضرب این شخصیتها در احتمال P_m شخصیتهای جهش یافته محاسبه می شوند. در غیر این صورت توسط با تقسیم این مقادیر بر P_m بدست می آید.

این n مدل تعدیل شده بعد از یک تکرار بخصوص با آنهایی که از تکرار قبلی بدست می آیند، ترکیب می گردد. مدلها به ترتیبِ مقدار کاهش شایستگی مرتّب می شوند. بهترین این مدلها

برای تکرار بعدی نگهداشته می شوند. این فرآیند تکرار شده تا جمعیت به یک مقدار شایستگی بالا همگرا شود

۴-۹ مقایسه آنالیز تکنیکهای رگرسیون ریج وزنی و برنامه تکاملی

برای استاندارد بودن هر تکنیک جدید لازم است آن تکنیک با یک حقیقت مسلم مقایسه شود. در روش معکوس سازی چندین تکنیک بازسازی وجود دارد. این تکنیکها عبارتند: تجزیه مقدار واحد(SVD)، رگرسیون ریج، رگرسیون ریج وزنی و غیره. همه این تکنیکها، تکنیکهای معکوس سازی خطی می باشند. با این وجود نتایج بدست آمده از تکنیک SVD را به منظور مقایسه انتخاب کرده ایم. برای اجتناب از شک در تفسیر، مطالعه یمان را به دو گروه دسته بندی می کنیم: یکی مطالعهٔ مدل ساختگی(مصنوعی)، دوم مطالعهٔ آنالیز واقعی دادهٔ صحرایی.

۴-۹-۱ مطالعهٔ مدل ساختگی

از آنجا که مطالعه کردن حالت عددی حل کاملی را می دهد. ابندا مفید بودن مدلسازی به روش رگرسیون ریج و برنامه تکاملی را بر روی مدل زمین سه لایه و پنج لایه اثبات می کنیم. پارامترهای مدل برای هر دو حالت در جدول ۴-۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۴

Synthetic Case	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
3-layer	10	1000	100	-		2	10	∞		
5-layer	10	1000	100	500	50	1.5	7	9	20	∞

الف) حالت سه لایه : منحنی مورد توجه در اینجا از نوع H است. مقادیر پارمتر های مدل سه لایه 10% مغشوش شده و سپس منحنی مربوطه با استفاده از تکنیکهایSVD وEP بازسازی می شود. حدس اولیه برای تکنیکSVD را حدسی نزدیک به مقایر واقعی انتخاب می کنیم. در حالتEP دامنه ای به هر پارامتر داده می شود که این دامنه ها بصورت زیر است.

$$5 \text{ ohm-m} \leq \rho_1 \leq 15 \text{ ohm-m}$$

$$995 \text{ ohm-m} \leq \rho_2 \leq 1005 \text{ ohm-m}$$

$$95 \text{ ohm-m} \leq \rho_3 \leq 105 \text{ ohm-m}$$

$$1\text{m} \leq h_1 \leq 3\text{m}$$

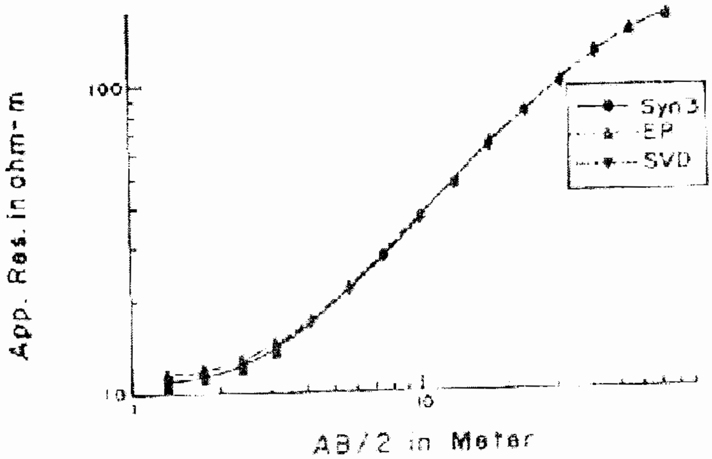
$$9\text{m} \leq h_2 \leq 11\text{m}$$

اندازه جمعیت را ۱۰۰ و تصادفی بودن نسل را ۲ در نظر گرفته ایم. پارامترهای بدست آمده بوسیلهSVD وEP در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول۴-۵

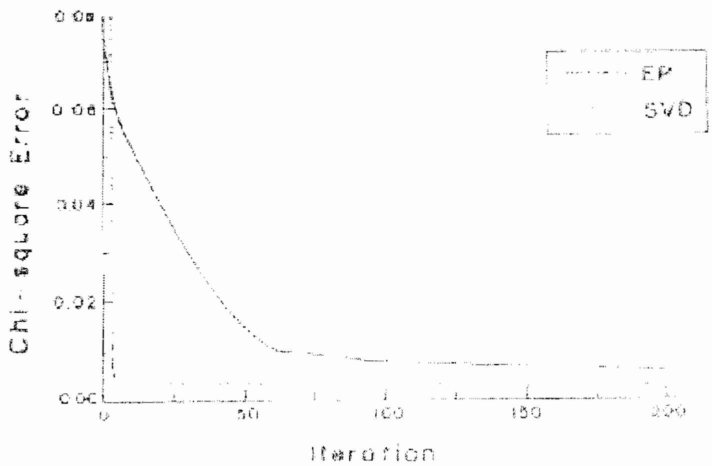
Algorithm	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2	h_3
SVD	10.49	942.07	129.37	2.07	9.6	∞
EP	10.63	977.99	105.71	2.11	9.87	∞

هر دو تکنیک نتایج کاملاً نزدیک به یک واقعیت را می دهند. در شکل ۴-۱الف منحنی مدل سه لایه مذکور به همراه منحنی های حاصل از تکنیکهایSVD وEP رسم شده است.



شکل ۴-۱الف حالت سه لایه ساختگی

در شکل ۴-۱ب خطای chi-square در مقابل تعداد دفعات تکرار برای هر دو تکنیک SVD وEP رسم شده است. خطای chi-square برای تکنیکEP در تکرار چهارم همگرا شده است که این همگرایی خیلی سریعتر از تکنیک SVD است.

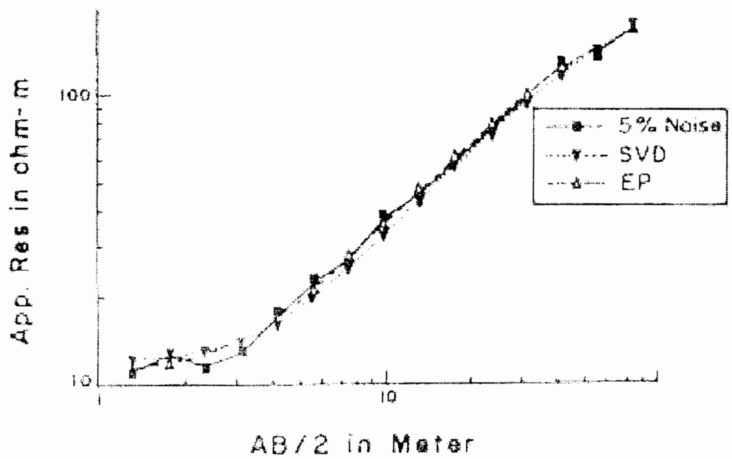


جدول ۴-۱ب: منحنی خطا برای حالت سه لایه ساختگی

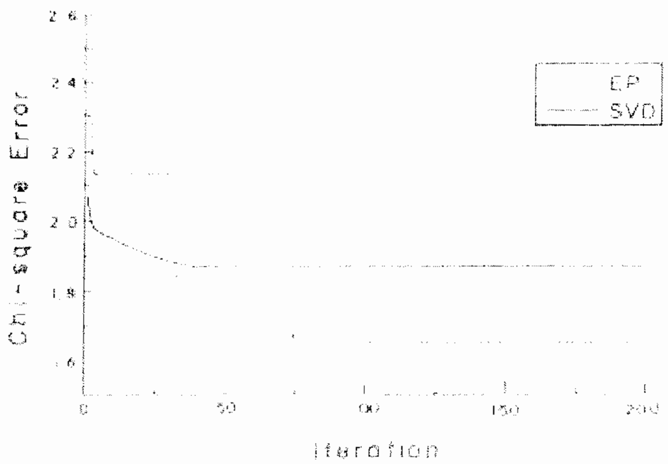
در مرحله بعد به میزان 5% و 10% خطای Gaussian به داده های مقاومت ویژه اعمال شده و سپس بوسیله تکنیکهای SVD وEP بازنگری می شوند. نتایج در جدول ۴-۶ ارائه و منحنی آنها در شکلهای ۴-۲الف و ۴-۳ الف و همچنین منحنی خطای آنها در شکلهای ۳-۴الف و۳-۴ب نشان داده شده است.

	3-layer Synthetic Case with ± 5% Noise						3-layer Synthetic Case with ± 10% Noise					
Algorithm	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2	h_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3	h_1	h_2	h_3
SVD	11.5	2947.1	314.7	2.6	2.2	∞	10.1	629.6	205.7	1.6	30.1	–
EP	10.7	1002.4	110.0	2.2	10.9	∞	10.9	900.0	90.0	2.2	9.0	–

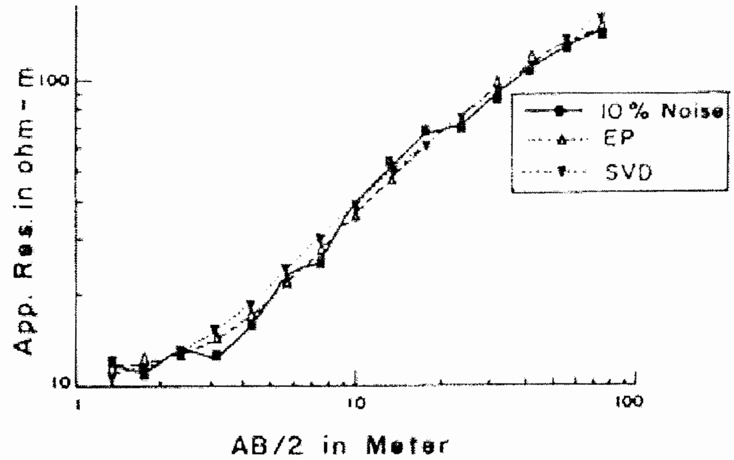
جدول ۴-۶



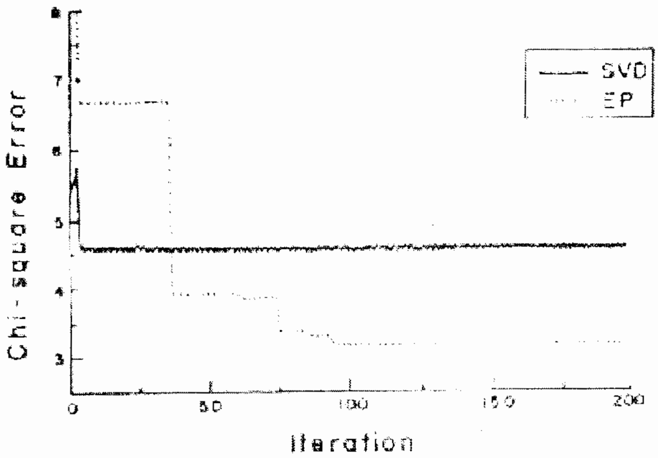
منحنی ۴-۲الف



منحنی ۴-۲ب



منحنی۴-۳الف



منحنی۴-۳ب

بدیهی است که برای هر دو حالت بهترین حل را تکنیکEP می دهد. اگرچه هر دو الگوریتم را می توان بکار برد. اما تکنیکEP ظرافت و دقت بیشتری دارد.

ب) حالت پنج لایه : حالت پنج لایه مورد توجه از نوع HKH است. اینجا نیز همان رویهٔ حالت قبل تکرار می شود. مقادیر مقاومت ویژه مدل پنج لایه ای به اندازه 10% مغشوش می شود. حدس اولیه برای معکوس سازیSVD به مقادیر واقعی پارامترهای لایه خیلی نزدیک است. دامنهٔ پارامتری برای تکنیکEP بصورت زیر در نظر گرفته می شود.

$1\text{m} \le h_1 \le 5$ ohm-m2m; $\le \rho_1 \le 15$ ohm-m;

. $6\text{m} \le h_2 \le 9\text{m}$; 995 ohm-m $\le \rho_2 \le 1005$ ohm-m;

$8\text{m} \le h_3 \le 10\text{m}$; 95 ohm-m $\le \rho_3 \le 105$ ohm-m;

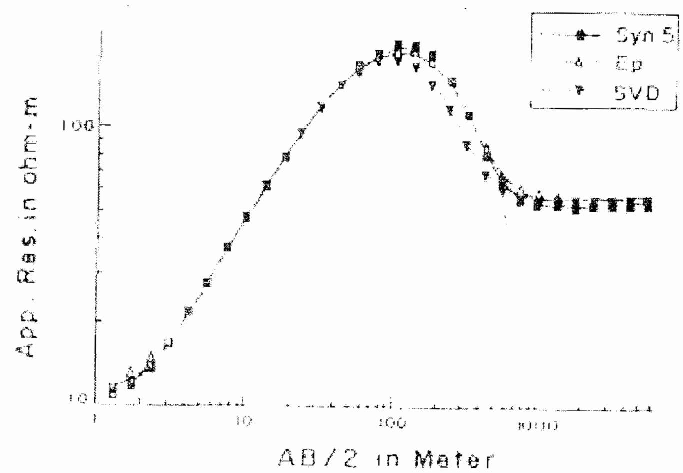
$$18\text{m} \le h_4 \le 22\text{m};\ 495\ \text{ohm-m} \le \rho_4 \le 505\ \text{ohm-m};$$
$$45\ \text{ohm-m} \le \rho_5 \le 55\ \text{ohm-m}$$

اندازه جمعیت و تصادفی بودن نسل مانند حالت قبل است. جدول ۴-۷ پارامترهای بدست آمده بوسیله تکنیک SVD وEP را می دهد.

جدول ۴-۷

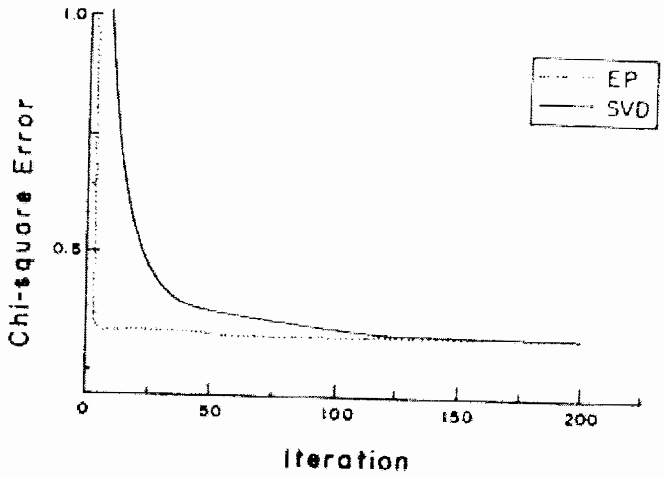
Algorithm	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
SVD	10.64	1176.9	70.53	540.6	52.78	1.59	6.12	8.02	19.03	--
EP	10.52	979.41	110.0	549.67	52.99	1.56	6.32	8.16	18.64	--

شکل ۴-۴الف منحنی های مقاومت ویژه ظاهری بر حسب $\frac{AB}{2}$ را برای مقادیر اصلی و مقادیر حاصل از دو تکنیک SVD وEP را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۴-۴الف دیده می شود منحنی مقاومت ویژه ظاهری به دست آمده از تکنیکهایSVD وEP با منحنی مقاومت ویژه اصلی(مقاومت ویژه مدل ساختگی) منطبق است.



شکل ۴-۴الف : حالت پنج لایه مصنوعی

اما از قیاس خطای chi-square بر حسب تعداد دفعات تکرار که در شکل ۴-۴ب نشان داده شده است یک بار دیگر مشاهده می شود کهEP در تکرار کمتری نسبت بهSVD همگرا می شود.



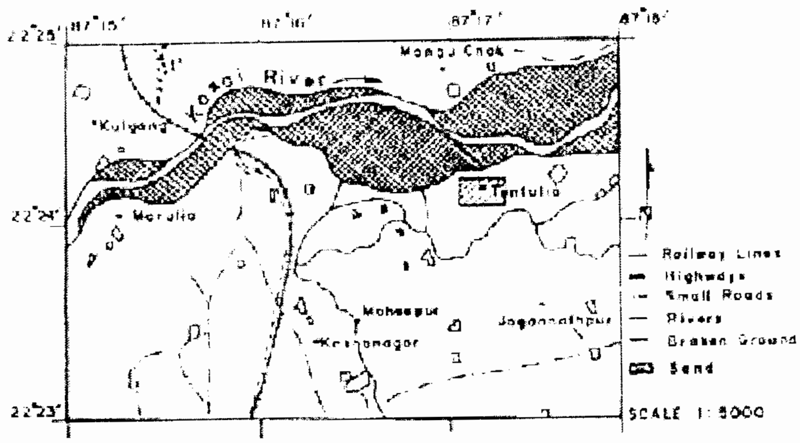
شکل ۴-۴ب منحنی خطا برای حالت پنج لایه مصنوعی

از دو حالت مشاهده شده در بالا می توان نتیجه گرفت که هر دو تکنیک SVD وEP خوب عمل می کنند. اگرچه از منحنی خطا پیداست که عملEP بهتر از SVD است. مطالعات انجام گرفته در بالا همچنین اثر و نیرومندی این الگوریتم ها را نشان می دهد. قسمت بعد گواه بیشتری بر این موضوع با کمک داده های صحرایی واقعی از ناحیهٔ"تن تولیا[1]" در غرب بنگال هندوستان دارد.

۴-۹-۲ آنالیز داده های صحرایی

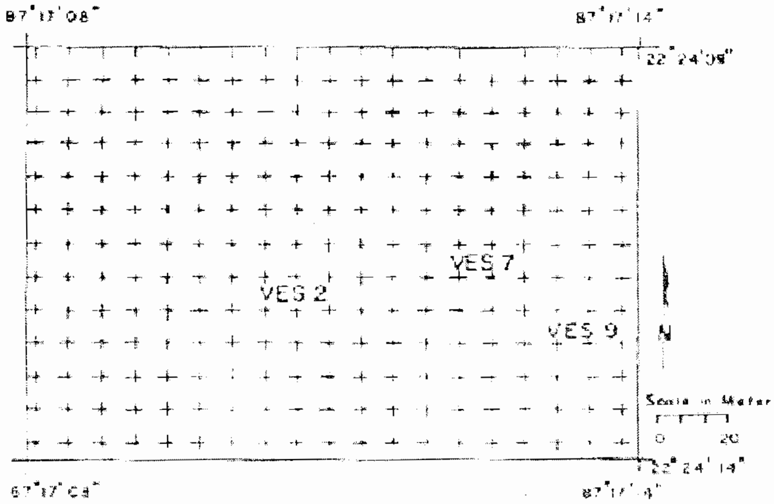
محل انتخاب شده برای داده های صحرایی در کنار رودخانه "کِیسَی[2]" در "میدنیپر[3]" ناحیه غرب هندوستان است. لیتولوژی غالب منطقه آبرفت جدید، آبرفت قدیمی و لاتریتی[4] است. ضخامت ماسه در منطقهٔ "تن تولیا" بین ۱۰ تا ۱۵ متر است که توسط لایه ای از رس پوشیده شده است. در منطقه ۱۱ پروفیل سونداژ VES انجام شده که برای بررسی ۳ پروفیل را در نظر می گیریم. نقشه موقعیت "تن تولیا" در شکال ۴-۵الف نشان داده شده است.

[1] Tentulia
[2] Kasai
[3] Midnapur
[4] Laterites



شکل ۴-۵الف

شکل ۴-۵ب محل سونداژ انتخاب شده را نشان می دهد.



شکل ۴-۵ب

سونداژ شماره ۲ (VES-2) اولین منحنی تفسیر شده با منحنی های کمکی است که پارامترهای به دست آمدهٔ آن به شکل زیر بیان می شود:

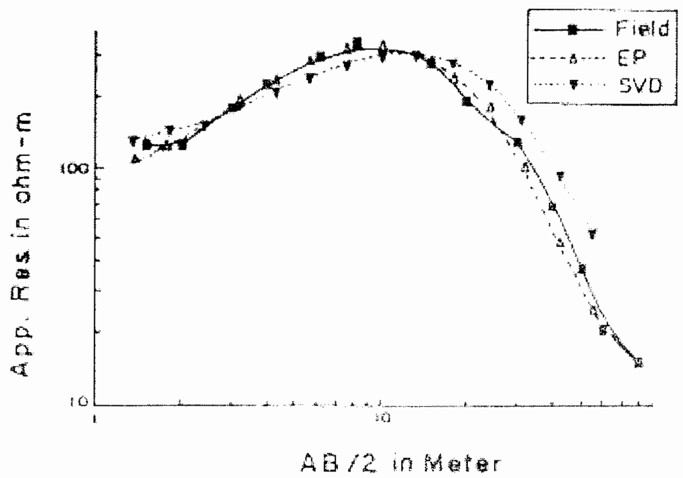
$$\rho_1 = 110 ohm-m; \rho_2 = 520 ohm-m; \rho_3 = 20 ohm-m$$
$$h_1 = 1m; h_2 = 6m; h_3 = \infty$$

از رسم مقاومت ویژه بر حسب $\frac{AB}{2}$ دیده می شود که منحنی از نوع K است. مقادیر پارامترهای بدست آمده از انطباق منحنی های کمکی به عنوان حدس نخستین برای برنامهSVD مورد استفاده قرار می گیرد .برای برنامهEP مانند حالتهای قبل دامنه ای به همه پارامترها می دهیم. پارامترهای بدست آمده بوسیله هر الگوریتم در جدول ۴-۸ نشان داده شده است.

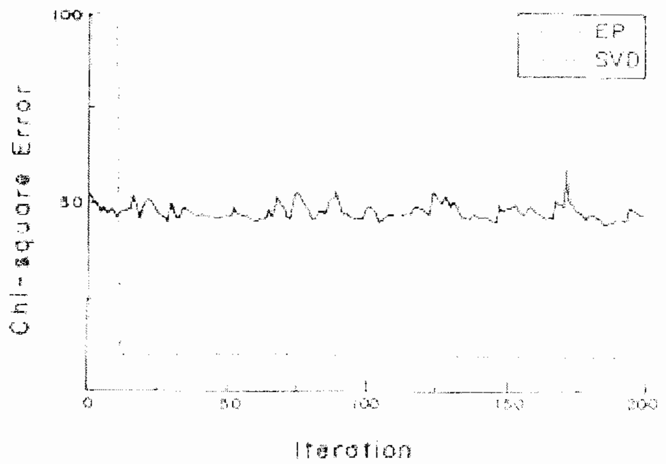
VES	Algorithm	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	h_1	h_2	h_3	h_4
2	SVD	119.63	523.16	21.16	-	1.31	6.04	∞	-
	EP	77.78	2953.66	13.33	-	0.84	0.90	∞	-
7	SVD	66.83	135.34	75.12	6.96	0.88	2.02	4.12	∞
	EP	69.59	141.08	46.55	4.88	0.52	3.61	7.98	∞
9	SVD	105.88	16.15	80.0	29.4	1.2	0.94	5.0	∞
	EP	106.26	28.77	617.92	32.49	0.99	2.85	0.76	∞

جدول ۴-۸

در همه حالتهای صحرایی اندازه جمعیت و تصادفی بودن نسل به ترتیب۱۰۰و ۲ در نظر گرفته می شود. منحنی های بدست آمده بوسیلهٔSVD وEP در شکل ۴-۶الف و همچنین خطایchi-square در شکل ۴-۶ب نشان داده شده است.

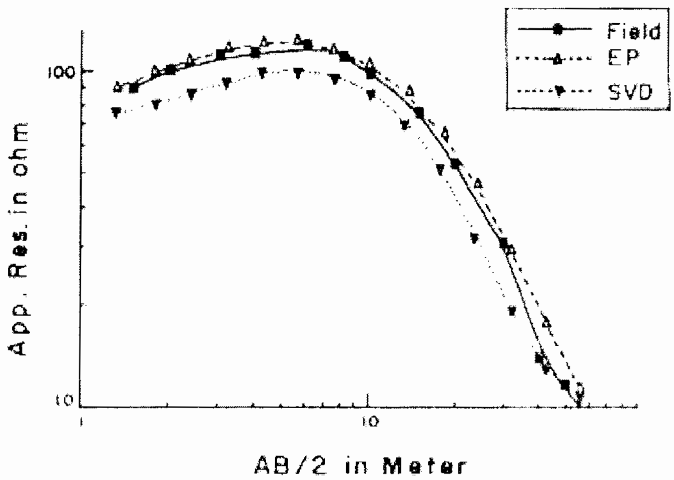


شکل ۴-۶ الف سونداژ شماره ۲

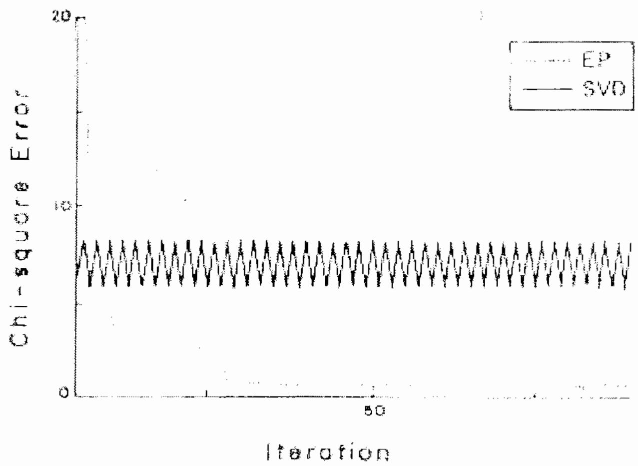


شکل ۴-۶ب منحنی خطا برای سونداژ شماره ۲

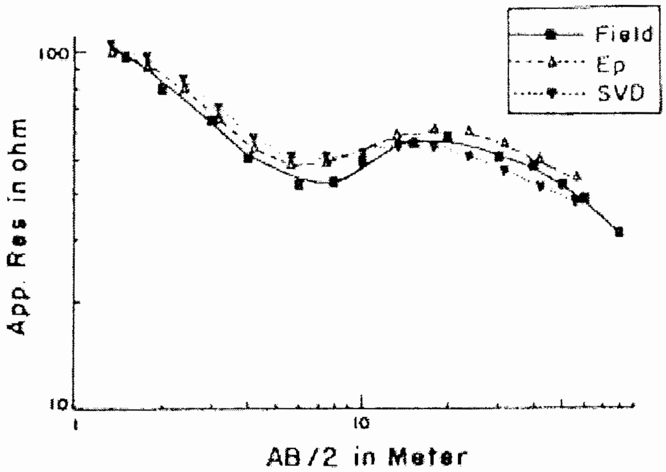
سونداژ ۷ از نوع K است. پارامترهای بدست آمده بوسیله هر دو الگوریتم در جدول ۴-۸ نشان داده شده است. مقاومت ویژه های رسم شده برحسب $\frac{AB}{2}$ برای داده های صحرایی، داده هایSVD وEP در شکل ۴-۷ب و همچنین خطایchi-square برحسب تعداد دفعات تکرار در شکل ۴-۷ب نشان داده شده است. همین رویه برای سونداژ شماره ۹ که از نوع HK است اعمال می شود. مقادیر بدست آمده توسط هر دو تکنیک در جدول ۴-۸ بیان شده، همچنین رسم مقاومت ویژه برحسب $\frac{AB}{2}$ برای داده های صحرایی، داده هایSVD وEP و نیز خطایchi-square برحسب تعداد دفعات تکرار بترتیب در منحنی های ۴-۸ الف و۴-۸ب بیان شده است.



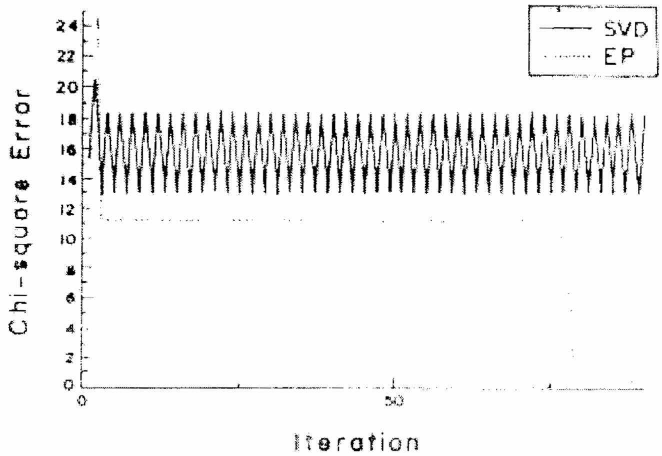
شکل ۴-۷الف



شکل ۴-۷ب



شکل۴-۸الف



شکل۴-۸ب

مطالعه آنالیز مدل ساختگی و صحرایی حاکی بر این موضوع است که هر دو تکنیکSVD وEP در تفسیر مقاومت ویژه ظاهری برحسب $\frac{AB}{2}$ موثر است. لکن از نمودارهای رسم شدهٔ مقاومت ویژه برحسب $\frac{AB}{2}$ و خطایchi-square برحسب تعداد دفعات تکرار برای همه حالتها بی شک ثابت می شود که نتایج به دست آمده از تکنیکEP بهتر از تکنیکSVD است.

این الگوریتمها عموماًبرای تفسیر داده های VES شلومبرژه در اکتشاف آبهای زیرزمینی مورد استفاده قرار می گیرد. به عنوان یک امر مسلم تکنیک منحنی انطباق که بطور مبسوط در بخش ۳-۷ شرح داده شد، به عنوان یک حدس نخستین برای رسیدن به پارامترهای نهایی لایه بکار می رود. فصل ۵ روی چندین مثال صحرایی در ارزیابی پارامترهای سفرهٔ زیرزمینی از طریق تفسیرغیر

مستقیم (منحنی انطباق واستفاده از تکنیک الگوریتم پیشرو) و تفسیر مستقیم (معکوس سازی مقاومت ویژه از طریق الگوریتمهای داده شده در ضمیمه ۴-۲و۴-۳) بحث می کند. از انتخاب بین تکنیکSVD وEP، تکنیکEP برای ارزیابی نهایی مقاومت ویژه و ضخامت لایه ارجحیت دارد.

فصل ۵

کاربرد در آبهای زیرزمینی

۵-۱ مقدمه

کاربرد متعدد سونداژ شلومبرژه(VES) در جستجوی آبهای زیرزمینی منجر به ارزیابی منابع آبهای زیرسطحی در یک منطقه می شود. جستجو، توسعه و مدیریت این منابع نیاز به مطالعه دقیق روی نقطه نظرهای زیر دارد.

(۱) استفاده از داده های مرتبط و اطلاعات زمین شناسی برای تهیه یک نقشه زمین شناسی در مورد سطح آب زیرزمینی منطقه مورد نظر.

(۲) جمع آوری داده های سونداژ الکتریکی شلومبرژه(VES)، تفسیر(منحنی کمکی و معکوس سازی مقاومت ویژه)، آماده سازی مقطعهای ژئوالکتریک، ارتباط آن با سنگ شناسی منطقه و پیشنهاد نقطه حفاری بر اساس استنباط مقطع زمین شناسی.

(۳) دادن یک ایده از نفوذپذیری و خلل وفرج سفرهٔ آب زیرزمینی براساس نمودارهای الکتریکی چاه پیمایی که فوراً پس از حفر چاه تهیه می شود. این موضوع سبب قضاوت درست از مشکوک بودن یا نبودن لایهٔ در بردارندهٔ آب می شود.

(۴) آزمایش تلمبه زنی، آنالیز سنگ و تعیین پارامترهای سفره آب زیرزمینی (انتقال پذیر بودن و ذخیره سازی) برای محاسباتی که منجر به برنامه ریزی در مقدار ذخیره منبع آب زیرزمینی می شود.

(۵) مطالعه کیفیت آب برای اهداف نوشیدن، صنعتی یا کشاورزی.

سونداژ الکتریکی شلومبرژه(VES) بحث شده در این کتاب صرف انجام دومین قدم ذکر شده در بالا می شود. این رویه شامل حصول داده های مقاومت ویژه($\bar{\rho}$ در واحد Ωm) بر حسب نصف فاصله الکترودی($AB/2$ در واحد متر) است. نمونه ای از قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل در جدول ۲-۱ آورده شده است. این اطلاعات بدست آمده را روی کاغذ شفاف لگاریتمی با مقیاس ۶۲/۵ میلیمتر پلات کرده و بدین ترتیب منحنی صحرایی بدست می آید. پارامترهای لایه (از قبیل ضخامت و مقاومت ویژه) از طریق تکنیک منحنی های انطباق (بخش ۳-۷) با استفاده ار

منحنی دو لایه کمکی و منحنی های سه لایه (نقشه های اِبرت) محاسبه می شوند. از این پارامترهای تقریبی در ایجاد منحنی تئوری برای مقایسه با منحنی صحرایی استفاده می شود(الگوریتم پیشرو ضمیمه۴-۱). این پارامترها بعد از انطباق نهایی، به عنوان نتایج تفسیر ابتدایی محسوب می شوند. پالایش بیشتر از طریق بررسی داده های بالا به عنوان حدس نخستین، برای الگوریتم معکوس سازی مقاومت ویژه صورت می گیرد.

کاربرد منحنی های شلومبرژهVES در اکتشاف آبهای زیرزمینی تحت وضعیتهای مختلف زمین شناسی به طور خلاصه پیرامون بخشهای زیر ذکر شده است.

۵-۲ مسئله یک منطقه ساحلی

شکلهای ۵-۱و ۵-۲ کاربرد منحنی شلومبرژه را در حوالی خط ساحلی جیلده و دیگه[1]، مطالعه شده در کنار خلیج بنگال[2](شکل ۵-۶) در فاصله ۱۵۰ کیلومتری غرب کلکته[3] را نشان می دهد. ناحیه مورد نظر در طولهای غربی $87^{\circ}30'$ و $87^{\circ}25'$ و عرضهای شمالی $21^{\circ}40'$ و $21^{\circ}55'$ واقع شده است.

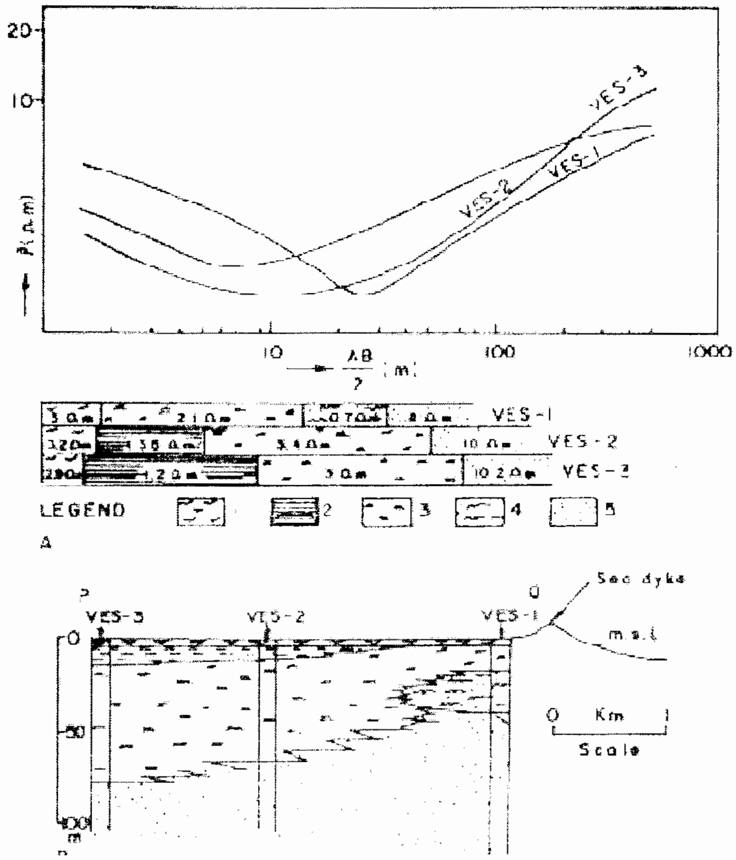
ناحیه تحت بررسی، ساحل حاصل از عقب نشینی دریا است. سطح زمین کم و بیش مسطح (به جزء برای اندک تلماسه های سنگی) با یک شیب ملایم به سمت دریا می باشد. در اینجا خط ساحلی از نوع ماسه زار است. این منطقه در چند سال اخیر بوسیله امواج دریا از رسهای غیریکپارچه، گل ولای و ماسه پوشیده شده است. سازندهای زیر سطحی این منطقه یک در میان شامل لایه های ماسه ای و رسی است. اگرچه تهاجم آب شور در منطقه گزارش نشده، اما وجود توده های[4] آب شور از نمودارهای چاه پیمایی تأئید می شود.

۵-۲-۲ نتایج سونداژهای شلومبرژه

چندین سونداژ شلومبرژه در حوالی ساحل جیلده صورت گرفته و داده های آن بوسیله منحنی های انطباق (منحنی های کمکی) تفسیر شده است. نتایج به دست آمده برای تأئید بیشتر از طریق تقریب پیشرو مورد تأئید قرار می گیرد. در مرحله بعد این پارامترها با داده های چاه پیمایی موجود

[1] Jaldha-Digha Coastline
[2] Bangal
[3] calcutta
[4] Pockets

در منطقه یکی شده و مقطع زمین شناسی محتملی برای آن تهیه می شود (پترا[1] سال ۱۹۶۷). پایین ترین مقاومت ویژه ۰/۷ اهم متر(مطابق با لایهٔ ماسه ای حامل آب شور، آنچنانچه در راهنمای نقشه نشان داده شده) با ضخامت ۱۹ متر در عمق ۱۴ متری سطح زمین، در محل سونداژ شماره ۱ قرار گرفته است(شکل ۵-۱). لیکن این امر به سمت خشکی حتی به سمت سونداژ شماره ۲ نیز گسترش جانبی نیافته و بصورت یک تودهٔ ماسه ای، منزوی شده است. گسترش جانبی این تودهٔ ماسه ای در نمودار ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱: الف) منحنی های شلومبرژه، معرف مقطعPQ

ب) مقطع زمین شناسی در امتدادPQ تهیه شده از اطلاعات شکل الف

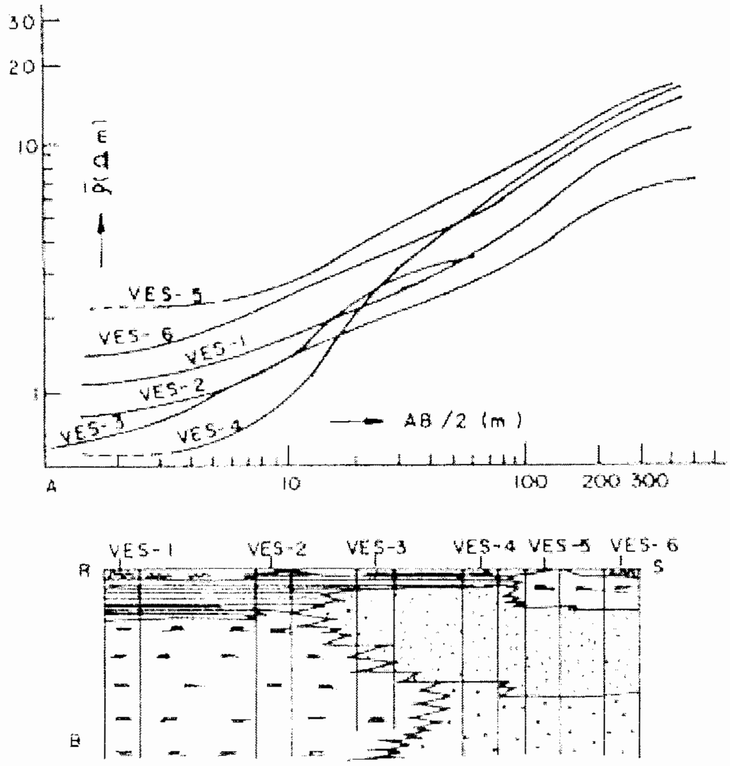
کلیدها ۱: آبرفت(Ωm ۵-۳)   ۲: رس نرم(آبدار)(Ωm ۲-۱)   ۳:گل و لای وماسه(Ωm ۴=۳)

۴)شن زار حامل آب شور   ۵) محیط ماسه ای

شکل ۵-۲ب داده های VES ساحل دیگه را که روی کاغذ لگاریتمی مضاعف با مقیاس ۶۲/۵ میلیمتر پلات شده، همراه با مقطع RS از سونداژ ۱تا ۶ را نشان می دهد. مقادیر پارامتری لایه های

[1] Patra

تفسیر شده مرتبط با نمودارهای چاه پیمایی برای استنباط سنگ شناسی منطقه مورد استفاده قرار می گیرد. مقطع زمین شناسی از نمودارهایVES و داده های چاه پیمایی توسط پترا و بتچریا[1] در سال ۱۹۶۶ در شکل ۵-۲ب رسم شده است.



شکل ۵-۲: الف) منحنی شلومبرژه، معرف مقطعRS

کلیدها همانند شکل ۵-۱ است. مقاومت ویژه بیشتر از ۱۵ اهم متر مربوط به قلوه سنگها است.

ب) مقطع زمین شناسی در امتداد RS تهیه شده از اطلاعات شکل الف

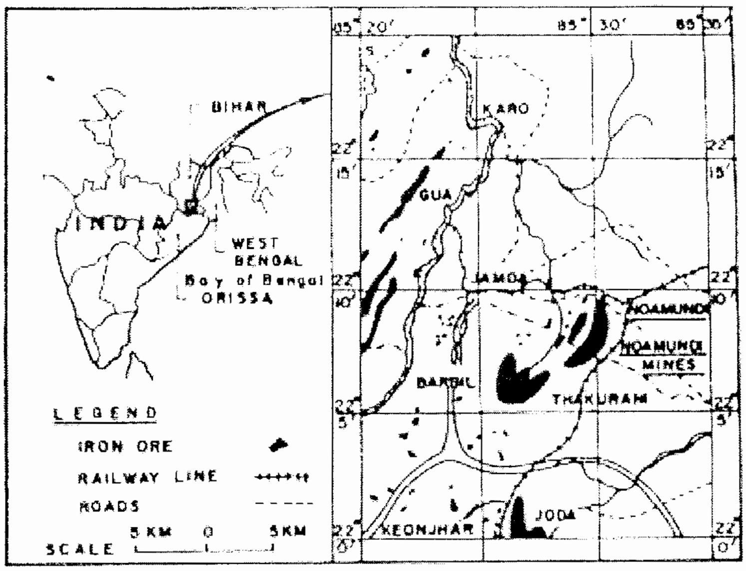
۵-۳ مسئله منطقه سنگ رسوبی(سنگ نرم)

۵-۳-۱ زمین شناسی منطقه

منطقه مورد نظر در حوالی کارخانجات آهن اسفنجی[2] (حبابدار[3]) که آن در شکل ۵-۳ آمده است قرار دارد. این منطقه در قسمت پایینی قرار دارد. در واقع این منطقه قسمتی از درهٔ رودخانه "کیسی" است که بوسیله آبرفت جدیدتر پلیستوسن[4] در چند سال اخیر مسطح شده است .

---

[1] Patra and Bhattacharya
[2] Sponge
[3] Shaded
[4] Pleistocene

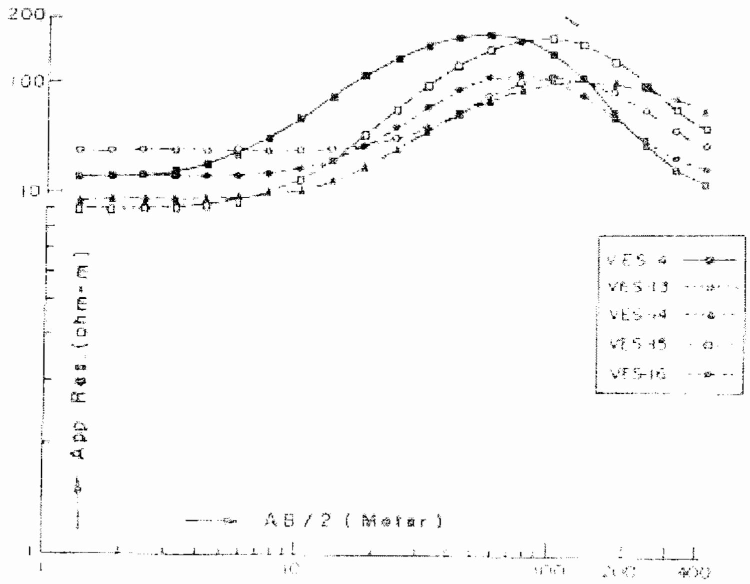


شکل ۵-۳ نقشه موقعیت با زمین شناسی منطقه بر اساس داده های زمین شناسی

این سازند با ضخامت ۱۲۵ متر حاصل از یک سری رسوبات دشتی در شکاف دره ها در درون آبرفت قدیمی تر می باشد. آبرفت جدید محیطی رسوبی با دانه بندی ریز اساساً سیلتی و رسهای سیلتی می باشد. اما گهگاه در مناطق کانالهای قدیمی ماسه های تمیز نیز وجود دارد. در آبرفت جدید با کاهش تدریجی نمونه برداری با زمان مواجه می شویم.

۵-۳-۲ نتایج منحنی های شلومبرژه

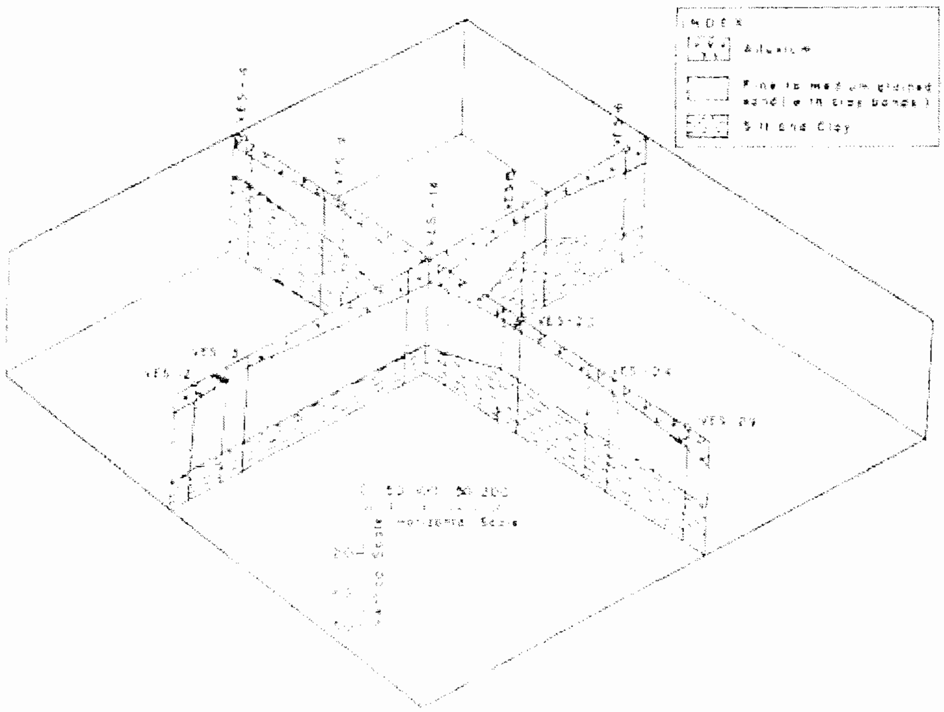
در کل ۳۰ منحنی سونداژ با عناوین $VES-1$, $VES-2$,......, $VES-30$ در منطقه بدست آمده که



شکل ۵-۴

از این ۳۰ سونداژ ، سونداژهای $VES-1$, $VES-2$, $VES-3$, $VES-5$ معرف منحنی چهار لایه از نوع AK و الباقی، معرف منحنی سه لایه ای از نوع K می باشد. برخی این منحنی ها از قبیل $VES-4$, $VES-13$, $VES-14$, $VES-15$ و $VES-16$ در شکل ۵-۴ به تصویر کشیده شده است.

داده های مقاومت ویژه ظاهری بوسیله منحنی های انطباق تفسیر شده و برای دستیابی به پارامتر نهایی نیز از تقریب معکوس سازی مقاومت ویژه استفاده شده است. برای نتیجه گیری در مورد لیتولوژی زیرسطحی منطقه از مقادیر مقاومت ویژه لایه های مختلف در تمام این ۳۰ سونداژ بعد از همخوانی شان با داده های چاپیمایی موجود در منطقه استفاده می شود. و سر انجام مقطع ژئوالکتریک تفسیر شده برای فراهم ساختن مقطع زمین شناسی زیر سطحی آنچنانچه در شکل ۵-۵ نشان داده شده مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل ۵-۵

بنابراین با شروع از دادهٔ VES، مقطع زمین شناسی زیر سطحی منطقه تهیه می شود. که نشان می دهد محیطی ماسه ای با ضخامت زیاد زیر آبرفتی با ضخامت کم قرار دارد و همچنین این دو لایه روی یک لایه ناتراوای رسی با ضخامت زیاد قرار گرفته است.