

# زمین کردن مراکز تلفنی

## قسمت اول :

اندازه گیری مقاومت مخصوص زمین

نگارش

یدالله ارضی

مهندس برق - معادن بخش اوت ساید پلنت مرکز تحقیقات مخابرات ایران

چکیده :

بررسی زمین کردن مراکز تلفنی از مال گذشته باین مرکز واگذار شده که اسید سیروود در آینده نزدیکی بتوان به تکمیل وارانه روشهای مناسبی با درنظر گرفتن خواص گوناگون زمینهای ایران که بعلت دگرگونیهای درآب و هوای مناطق مختلف، بطور ناشناخته‌ای باقی مالده است، دست یافت.  
امروزه بمنظور کاهش کرس تاک، قطب مشتبث باطری مرکزی را زمین کرده که مقدار مقاومت آن بشار گامی و تماسی ارتباط دارد.

گرچه هنوز پیشنهادی از طرف کمیته مشاوره بین‌المللی تلگراف و تلفن C. C. I. T. T. در مورد اندازه دقیق این مقاومت داده نشده ولی برطبق اندازه گیری‌های انجام شده و بخصوص با درنظر گرفتن استاندارد کشورهای مختلفه برای مراکز تلفنی بزرگ با تعداد مشترکین بیشتر از ۱۰۰۰۰، مقدار آن باستی در حدود ۵ ر. اهم باشد.

برای رسیدن به مقاومت اخیر بنظر سیرسد که اگر الکترودی به تنها ای دارای مقاومت زمین ۵ اهم باشد با نصب حدود ۱۰۰ الکترود به اندازه مورد نظر دست خواهیم یافت.

متاسفانه بخاطر اثر متقابل الکترود های برم به تعداد بمراتب بیشتر از آنچه که ذکر گردید نیاز داریم.\*

در ایران بعلت طرحهای گستردۀ مخابراتی، مراکز تلفنی گوناگونی در دست ساختمن است که مساوی با کارهای ساختمانی، پر و زمین آنها هم باستی آساده گردد.

مشکلات کار بخصوص در آینده با تصمیم کارخانجات مازنده کابل که غلاف سربی را به پلاستیکی

بدل خواهند ساخت بیشتر شده بطوريکه عملاء" کابلهاي مخابراتي در کاهش مقاومت زمين سهمي نداشت و نتيجتاً طرح يك سистем الکترود گروهي اهميت فراوانی خواهد يافت.

مقاومت زمين الکترودهای کارگذاري شده در خاک عبارت از مقاومتی است که زمين در مقابل عبور جريان الکتریکی از خود نشان میدهد. بین این مقاومت، مشخصه توزيع پتانسیل هادیها در مجاورت رویه پیروپیشان میباشد و بر روی این مشخصه عوامل گوناگونی تأثیر گذاشته که عبارتند از:

جنس و شکل الکترود، نحوه کارگذاري، عمق کارگذاري، فرکانس مدار و بالاخره مقاومت مخصوص خاک.

از مهمترین این عوامل مقاومت مخصوص خاک است که در این قسمت به محاسبه توزيع آن در زمینها میپردازیم.

از آنجا که شرائط زمین را نمیتوان بسهولت تحت کنترل قرارداد، خواص باز آن هر لحظه دست خوش تغییر است. این دگرگونیها باعث بالا رفت اندازه های مقاومت شده که نهایت باشكالات انتقال منتج خواهد گردید.

بدینگونه طرح يك سیستم زمین به بررسی های دامنه داری درجهت شناخت عوامل مختلف و بالا بر دزیریب اطمینان دار نیاز دارد.

در مقاله اخیر روش های اندازه گیری مقاومت مخصوص زمین و شناخت طبقات مختلف آن آورده شده است.

## فصل اول

### روش اندازه گیری مقاومت مخصوص زمین

بمنظور اندازه گیری مقاومت مخصوص زمین با يستی از روش های الکتریکی استفاده گردد. این روشها، کلاً مبتنی بر ارتباط چند قطب از وسائل اندازه گیری و خاک بوده که در نتیجه با ارسال جریان و اندازه گیری ولتاژ ایجاد شده به مقادیر مقاومت مخصوص زمین دست خواهیم یافت.

\* - با در نظر گرفتن فرمول مقاومت برای  $n$  الکترود قائم که در خط مستقیم داخل زمین نصب شده اند:

$$R_n = \frac{1}{n} \times \frac{\rho}{2\pi l} \left[ l_n \frac{4l}{a} - 1 + \frac{21}{S} l_n \frac{\gamma}{e} n \right]$$

چنانچه ۱۰۰۰ الکترود بطول يك متر و شعاع يك سانتیمتر بفاصله يك متری از هم بطور قائم در زمینی با مقاومت مخصوص ۲۰۰ اهم متر قرار گیریلد، مقاومتی معادل هر اهم خواهند داشت (با در نظر گرفتن اینکه طول زمین مورد لزوم يك کیلومتر رسیده و مثباً باينکه همیشه دست یابی باين مقدار متوسط مقاومت مخصوص اسکان پذیر نیست).

در فرمول اخیر  $n$  تعداد الکترودهای قائم،  $S$  فاصله دو انکترود مجاور هم،  $l$  طول هر الکترود،  $a$  شعاع و بالاخره  $\rho$  مقاومت مخصوص خاک است. پارامترهای  $\gamma$  و  $e$  ثابت و بترتیب دارای مقادیر ۲۷۸۱ و ۲۷۱۸ میباشند.

بديهی است که در چنین حالاتی مقاومت زمین وسائل ارتباطی نيز اثر خود را ظاهر کرده و از آنجا که قسمت اعظم توزيع پتانسیل در حوالی سطح الکترود میباشد برای اجتناب از هرگونه خطای آزمایشي لازم است که تأثیر آنرا ختنی کرد.

اولین مدار عملی برای اين منظور توسط کنراد شولمبرژه \* استاد فيزيک مدرسه عالي معدن پاريس در سال ۱۹۱۲ پيشنهاد گردید.

لازم به تذکر است که بسال ۱۹۱۵ فرانک ونر عضو اداره استاندارهای امریکا نیز نوع دیگری از این روش را بررسی و نتيجه تحقیقات خود را در گزارش علمی اداره استاندارد هاتحت عنوان \*\* «روش اندازه گیری مقاومت مخصوص زمین» چاپ و آنرا بنام خود ثبت کرد.

امروزه عملاً کلیه روشهای چهار الکترودهای که بدین منظور بکار میروند اقتباس از آرایش مربوط به شولمبرژه میباشد.

گرچه قبل از وی افراد زیادی در این سوردها کار کرده اند ولی بعلت کاربرد غلط وسائل به نتایج مطلوبی دست نیافتدند.

بعنوان مثال آزمایش عده کثیری بوسیله جریانهای بافر کانس زیاد صورت میگرفت که بخطار کمی عمق نفوذ، مطالعه ببروی اعمق زمین میسر نمی گردد.

ویا میتوان از روشهای دوالکترود نام برد که تنها خصوصیات اطراف الکترودها را اندازه گیری کرده و کوچکترین اطلاعی از محیط بین دو الکترود بدست نمی دادند. کاربرد اصلی روشهای الکتریکی بشرح زیر است:

- ۱ - شناخت مفروههای آبهای زیرزمینی، رگههای معدنی و منابع نفتی
- ۲ - یافتن محل تونلها، غارها و ساختمانهای مدفون شده در دل خاک
- ۳ - اندازه گیری مقاومت مخصوص خاک و یافتن لایههای مختلف زمین

امروزه در اکثر دانشگاهی مهندسی از روشهای الکتریکی بطور عملی استفاده میکنند و نتایج جالب بدست آمده از این بررسی ها توجه مهندسین را روز بروز بیشتر بخود معطوف میدارد. از آنجا که هدف ما کار گذاری سیستم های الکترودی در زمین است، شناخت لایه بندی زمین و نحوه توزیع این لایه ها اولین قدم در راه مطالعه و طرح یک مدار زمین بشمار میرود.

\* — Conrad Schlumberger

\*\* — A Method of measuring earth resistivity by Frank Wenner U. S. Bureau of standard 1915

بدیهی است که ساختمان زمین یکنواخت نبوده و مقاومت مخصوص الکتریکی آن از یک نقطه به نقطه دیگر فرق میکند.

چون نمونه برداری از خاک همیشه امکان نداشته و بعلاوه در صورت اندازه گیری تنها به خصوصیات خاک مجاور این نمونه ها دست می یابیم از هم اکنون میتوان با همیت استفاده از مدارهای الکتریکی پی برد. همانگونه که در نمودار مراحل کار آورده ایم پس از انتخاب منطقه زمین بایستی به اندازه گیری a - m و یا مقاومت مخصوص خاک پرداخت. نتایج مقدماتی بدست آمده از این آزمایش را میتوان بصورت زیر خلاصه کرد.

- الف - یافتن محل مناسب زمین یک مرکز تلفنی
- ب - مشخص شدن بهترین سیستم الکترود زمین برای نصب در محل انتخابی
- پ - یافتن مناسب ترین عمق کارگذاری الکترودها و شناخت بهترین مسیر قرار دادن سیم و تسهیه های افقی
- ت - اندازه گیری مقاومت مخصوص معادل زمین بنطوط محاسبه میزان جریانهای القائی بروی کابلهای مخابراتی.

۱-۱ - محاسبه توزیع پتانسیل در زمینهای همگن در زمینهای یکنواخت با مقاومت مخصوص  $(\Omega - m)$  چنانچه دانسته جریان در هر نقطه  $\vec{E}$  باشد طبق قانون اهم :

$$\vec{E} = \rho \vec{i} \quad (1)$$

از آنجاکه منابع جریانی در نقاط اندازه گیری شده وجود ندارد قانون دیوژانس صادر است :

$$\nabla \cdot \vec{i} = 0 \quad (2)$$

با قراردادن مقدار  $\vec{i}$  از رابطه ۱ :

$$V \cdot \vec{i} = V \cdot \frac{\vec{E}}{\rho} = -\frac{1}{\rho} V^2 V = 0 \quad (3)$$

معادله لاپلاس در دستگاه محورهای قطبی بصورت زیر نوشته میگردد :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (4)$$

برای منابع نقطه ای در امتداد  $\theta$  و  $\phi$  تقارن وجود داشته و از آنوفرم ساده شده معادله لاپلاس میشود :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (5)$$

از حل معادله ۵ با درنظر گرفتن آنکه پتانسیل نقاط درینها یت صفر میباشد ولتاژ برابر است با :

$$V = -\frac{A}{r} \quad (6)$$

در معادله ۶ پتانسیل اسکالر در نقطه دلخواه  $r$ ،  $A$  فاصله منبع تا نقطه مورد نظر و  $A$  پارامتر ثابت است که بایستی آنرا محاسبه کرد.

درصورتیکه دانسته جریان درجه سطح  $ds$  برابر  $i$  باشد کل جریان خواهد شد:

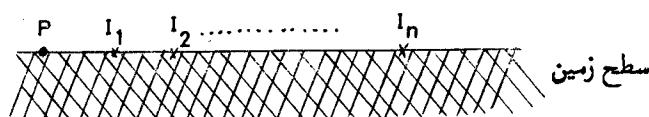
$$I = \int_S i ds = \int_S \frac{E}{\rho} ds = \int_S \frac{A}{\rho r^2} ds = -\frac{2\pi A}{\rho} \quad (7)$$

با حذف پارامتر  $A$  بین معادلات ۶ و ۷ تابع ولتاژ منبع نقطه‌ای واقع بر سطح زمین خواهد شد :

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi l} \quad (8)$$

توابع پتانسیل اسکالر بوده و بصورت عددی باهم جمع میگردند. درصورتیکه  $n$  منبع با جریانهای وابسته  $I_1, I_2, \dots, I_n$  مطابق شکل در فواصل  $r_1, r_2, \dots, r_n$  از نقطه  $P$  قرار گیرند تابع ولتاژ در این نقطه برابر میشود با :

$$V_p = \frac{\rho}{2\pi} \left[ \frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{r_2} + \dots + \frac{I_n}{r_n} \right] \quad (9)$$



شکل ۱

چنانچه منابع نقطه‌ای در داخل زمین گستردگی قرار گیرند، سطوح توزیع جریان کروی بوده و جواب پتانسیل بصورت معادله ۹ بدست خواهد آمد :

$$V_p = \frac{\rho}{4\pi} \left[ \frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{r_2} + \dots + \frac{I_n}{r_n} \right] \quad (10)$$

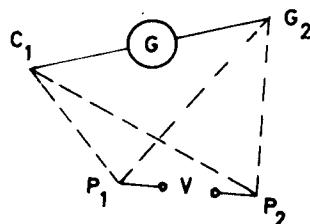
## ۱ - ۲ آرایش‌های چهار الکترود

در روش چهار الکترودی توسط دو الکترود  $C_1$  و  $C_2$  جریان الکتریکی پداخیل زمین ارسال شده

و ولتاژ القائی در فاصله الکترودهای  $P_1$  و  $P_2$  اندازه‌گیری می‌شود. در فصل اخیر زمین را یکنواخت با مقاومت مخصوص الکتریکی  $(\Omega - m)$  فرض می‌کنیم در صورتی که جریان ارسالی برابر  $I$  و ولتاژ القائی در فاصله دو الکترود  $P_1$  و  $P_2$  برابر  $V$  باشد، بطور کلی مقاومت مخصوص زمین از رابطه  $\rho = K \frac{V}{I}$  محاسبه می‌گردد.

$$\rho = K \frac{V}{I} \quad (11)$$

در این رابطه  $K$  ضریب آرایش است و مقدار آن بصورت زیر تعیین می‌شود؛



شکل ۲

در شکل ۲ ژنراتور  $G$  جریان  $I$  را توسط مدار  $C_1C_2$  به داخل زمین ارسال داشته و ولتاژ در مدار  $P_1P_2$  اندازه‌گیری می‌گردد.

با در نظر گرفتن معادله کلی ۹ برای منابع نقطه‌ای، توابع ولتاژ در نقاط  $P_1$  و  $P_2$  خواهد شد:

$$V_{P1} = \left[ \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{I_1}{P_1 C_1} + \frac{I_2}{P_1 C_2} \right) \right] \quad (12)$$

$$V_{P2} = \left[ \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{I_1}{P_2 C_1} + \frac{I_2}{P_2 C_2} \right) \right]$$

چون :

$$V = V_{P1} - V_{P2} \quad \text{و} \quad I_2 = -I_1$$

بوده، ضریب آرایش  $K$  برای این حالت عمومی از معادله ۱۳ بدست می‌آید.

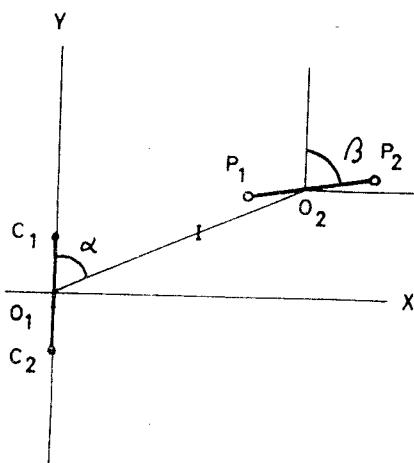
$$K = \frac{\frac{2\pi}{P_1 C_2 - P_1 C_1}}{\frac{P_1 C_2 \times P_1 C_1}{P_2 C_2 \times P_2 C_1}} - \frac{\frac{2\pi}{P_2 C_2 - P_2 C_1}}{\frac{P_2 C_2 \times P_2 C_1}{P_1 C_2 \times P_1 C_1}} \quad (13)$$

برحسب انتخاب محل نقاط از دونوع آرایش گفتگو می‌کنیم:

الف - آرایشی که در آن الکترودهای جریان و پتانسیل دریک امتداد قرار نگیرند.

ب - آرایشی که چهار الکترود آن در یک امتداد باشند.

- حالت ب شامل دو گروه آرایش بصورت زیر است.
- ۱ - ب - آربشهای با فواصل محدود الکترودها.
  - ۲ - ب - آربشهای با فواصل نامحدود الکترودها.
- کلیه آرایش‌های ذکر شده در بالا دارای محسن مخصوص بخود بوده و کاربرد هر یک بستگی بهدف آزمایش دارد.
- ۳ - آربشهای چهار الکترودهای که در آنها امتداد الکترودهای جریان و پتانسیل یکی نیست.
- شکل عمومی این آرایش‌ها بصورت زیر است.



شکل ۳

در شکل ۳ فواصل  $P_1P_2$  و  $C_1C_2$  بترتیب برابر  $a$  و  $b$  میباشد، مراکز خطوط  $C_1C_2$  و  $P_1P_2$  بفاصله  $l$  از یکدیگر قرار داشته بطوریکه  $l \gg a, b$  چنانچه زاویه امتدادهای  $P_1P_2$  و  $C_1C_2$  را با محور  $y$  ها بترتیب  $\alpha$  و  $\beta$  بنامیم با توجه به رابطه کلی ۱۳ و در نظر گرفتن ابعاد کوچک  $a$  و  $b$  در مقایسه با  $l$ ، ضریب آرایش  $K$  برابر میشود با :

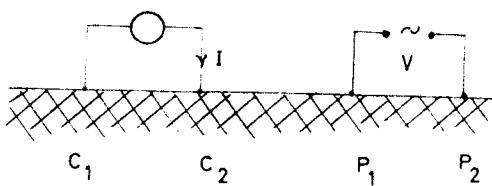
$$K = \frac{\pi l^3}{ab[\cos \alpha \cos(\beta - \alpha) + \frac{1}{2} \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)]} \quad (14)$$

دو حالت بخصوص از شکل ۳ بصورتهای زیر ارائه میگردند.  
در شکل ۴ با در نظر گرفتن  $\alpha = \beta = 0$  ضریب آرایش خواهد شد:

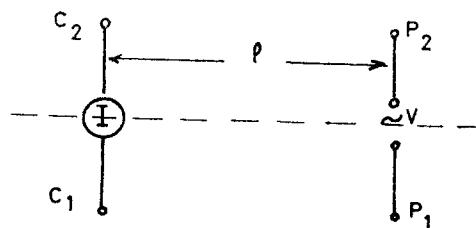
$$K = \frac{\pi l^3}{ab} \quad (15)$$

در شکل ۵ نیز  $\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$  و  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  وازنرو:

$$K = \frac{2\pi l^3}{ab} \quad (16)$$



شکل ۴ - امتداد الکتروودها یکی است



شکل ۵ - امتداد الکتروودهای جریان و پتانسیل موازی یکدیگرند

مدارهای ۴ و ۵ که بنام آرایش دوقطبی خوانده میشوند اغلب برای مطالعه بروی ولتاژهای القائی مورد استفاده قرار میگیرند (درچنین وضعیتی فواصل a و b تا حدودی، زیاد انتخاب میشوند).

مدار بکار رفته برای این منظور از نوع شکل ۵ بوده با این تفاوت که در آن  $C_1C_2 = P_1P_2 = a$

قابل مقایسه با فاصله  $l$  میباشد. ضریب آرایش K برای این نوع دوقطبی برابر است با :

$$K = \frac{\pi}{\sqrt{l^2 + a^2}} \quad (17)$$

۶ - ۱ آرایشهایی که در آنها چهار الکتروود در یک امتدادند.

همانگونه که ذکر گردید و گروه از این نوع آرایش ها موجود است، دسته اول با فاصله محدود الکتروودها و دسته دوم با فاصله زیادی برای یک با چند الکتروود.

۱ - ۴ - ۱ : آرایشهای گروه اول

الف - آرایش شولمبرژ

مطابق شکل ۶ جریان توسط  $C_1$  و  $C_2$  بداخل زمین ارسال شده و با اندازه گیری پتانسیل V

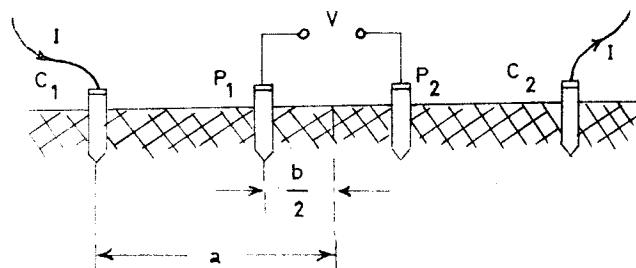
در فاصله  $P_2$  و  $P_1$  مقاومت مخصوص  $\rho$  محاسبه میگردد.

لازم به تذکر است که زمین یکنواخت فرض شده و منابع جریان  $C_1$  و  $C_2$  نقطه ای در نظر گرفته

میشوند.

در این آرایش  $P_1P_2 = b$  و  $C_1C_2 = 2a$  بوده و بعلاوه موقعیت قرار گرفتن الکترود ها طوریست که همواره  $a \ll b$  میباشد.

بدیهی است که در جریانهای مستقیم عمق نفوذ بینهایت است ولی با تقریب دلخواه درخصوص آرایش های اخیر عمق نفوذ موثر را میتوان  $\frac{1}{3}$  فاصله  $C_1C_2$  در نظر گرفت.



شکل ۶ - آرایش شولبرژه

بدین ترتیب دوره فاصله دلخواه  $C_1C_2$  مقاومت مخصوص اندازه گیری شده، مربوط به ستونی از

خاک بفاصله  $C_1C_2$  و عمق تقریبی  $\frac{1}{3} C_1C_2$  میباشد.

محاسبه مقاومت مخصوص و ضریب آرایش:

برطبق رابطه ۳، ضریب  $K$  برابر میشود با:

$$K = \frac{\pi}{b} \left( \frac{4a^2 - b^2}{4} \right) \quad (18)$$

همانطور که ذکر شد فاصله  $b$  بمراتب کوچکتر از  $a$  است بدین ترتیب فرم ساده شده  $K$  را میتوان طبق رابطه ۹ نشان داد.

$$K = \frac{\pi}{b} (a)^2 \quad (19)$$

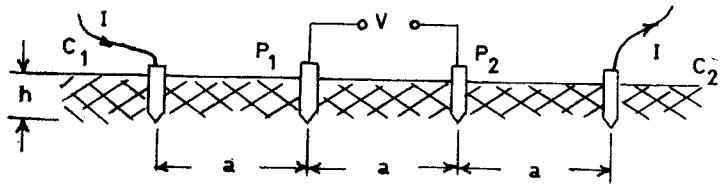
مقاومت مخصوص  $\rho$  نیز از رابطه ۲ بدست میآید:

$$\rho = \frac{\pi a^2}{b} \cdot \frac{V}{I} \quad (20)$$

ب - آرایش ونر

در روش ونر فواصل هر دو الکترود مجاور هم مساوی و برابر  $a$  است.

$$C_1P_1 = P_1P_2 = P_2C_2 = a$$



شکل ۷ - آرایش ونر

با استفاده از روابط کلی، ضریب  $K$  و مقاومت مخصوص برای آرایش اخیر مطابق معادلات ۱ و ۲ بدست می‌آید.

$$K = 2\pi a$$

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (21)$$

در رابطه ۱ فرض برآنست که عمق قرارگرفتن الکترودها در زمین بمراتب کمتر از فاصله  $a$  باشد، معمولاً برای  $a \ll h$  دوالکترود  $C_1$  و  $C_2$  را میتوان منابع نقطه‌ای بهساب آورد، در غیراینصورت رابطه مقاومت مخصوص را بشکل زیر بایستی بکار برد.

$$\rho = \frac{\frac{4\pi a}{1 + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{d}{a}\right)^2}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{a}\right)^2}} \cdot \frac{V}{I} \quad (22)$$

برای دقت بیشتر در آزمایش فواصل کم، توصیه می‌گردد که از الکترودهای کوچک با عمق کارگذاری کم استفاده گردد.

پ - آرایش لی (Lee)

در روش لی از یک الکترود دیگر در مرکز آرایش استفاده شده و اندازه گیری ولتاژ دوبار انجام می‌گیرد.

کاربرد این روش بیشتر برای شناخت عدم یکنواختی زمین است. بطوریکه در دو مرحله آزمایش گرچه از نظر فرمولی انتظار جوابهای یکسانی نیروند ولی واقعاً اینطور نبوده و بعلت توزیم مقاومت مخصوص خاک، ولتاژهای اندازه گیری شده فرق میکند.

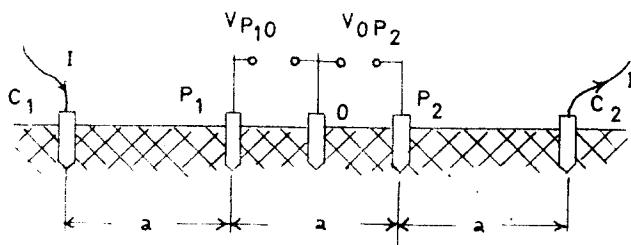
فرمولهای این آرایش بقرار زیر است :

$$\rho_1 = 4\pi a \frac{V_{PL}}{I}$$

$$\rho_2 = 4\pi a \frac{V_{OP2}}{I}$$

$$\rho_m = \frac{1}{2} (\rho_1 + \rho_2) \quad (22)$$

بدیهی است که با استفاده از روش لی تنها لایه های نامتقارنی که بطور مایل قرار گرفته اند، مشخص میگردد و اطلاعی اضافی برروی لایه های افقی بدست نخواهد آمد.



شکل ۸ - آرایش لی

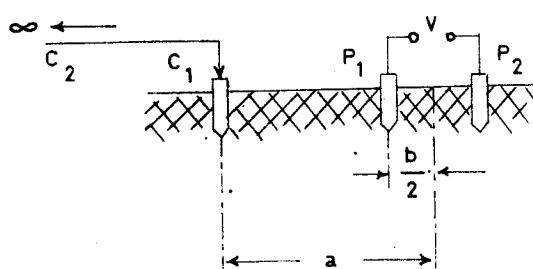
#### ۲ - ۴ - ۱ آرایشهای گروه دوم

اکثراً این روشها برای شناخت خصوصیات رشتة های باریک نا متقاضی زمین مورد استفاده قرار میگیرند.

بدیهی است که با قراردادن یک یا چند الکترود در فواصل دور، از وضعیت های مختلف الکترودها نسبت به متقاضی کاسته میگردد.

##### الف - نیم آرایش شولمبرژ

در این روش فاصله الکترود  $C_2$  پاندازه کافی زیاد انتخاب شده بطوریکه علاوه تاثیر آن در ولتاژ القائی  $V$  صرفنظر کردنی است.



شکل ۹ - نیم آرایش شولمبرژ

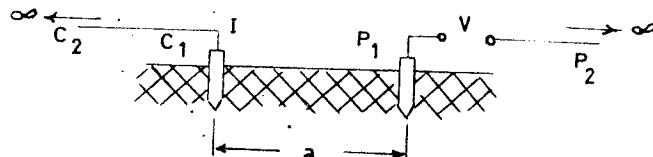
از اینرو:

$$K = \frac{8\pi a^2}{b}$$

$$\rho = \frac{8\pi a^2}{b} \cdot \frac{V}{I} \quad (24)$$

ب - نیم آرایش و نر

در این مدار دوالکترود  $C_2$  و  $C_1$  بفوایل زیادی از مرکز آرایش انتقال یافته که درنتیجه آن تنها، تأثیر منبع جریان  $C_1$  بر روی الکترود  $P_1$  درنظر گرفته می شود.



شکل ۱۰ - نیم آرایش و نر

برای این آرایش خواهیم داشت :

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}, \quad K = 2\pi a \quad (25)$$

نکته قابل توجه آنکه در حالت اول، ولتاژ به نسبت عکس مجدد فاصله و در حالت دوم به نسبت معکوس فاصله تغییر مینماید.

در اینصورت در نیم آرایش و نر برای کاهش تأثیر الکترود  $C_2$  بمیزان کمتر از  $\frac{1}{2}$  درصد لازم است فاصله آنرا  $\frac{1}{2}$  برابر بیشتر از  $a$  اختیار کرد و حال آنکه این مقدار در مورد نیم آرایش شولمبرژ به  $\frac{1}{2}$  رعایت تقلیل میباشد (در زمینهای همگن).

۵ - ۱ : مقایسه آرایش و نر و شولمبرژ :

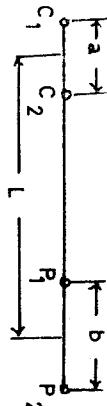
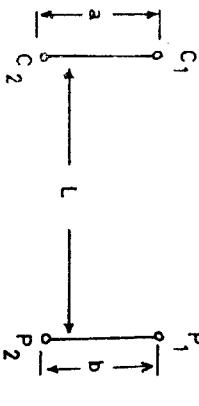
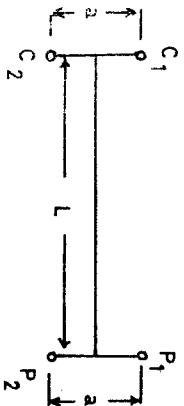
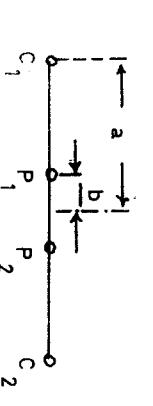
در میان روش‌های ذکر شده، دو روش و نر و شولمبرژ کاربرد فراوانی در اندازه‌گیری مقاومت مخصوص زمین یافته‌اند. از آنجاکه زمین یکنواخت نیست بآن مقاومت ظاهری  $p_a$  را نسبت داده و مرتباً در هر یک از دو آرایش بالا با تغییر فاصله اندازه  $p_a$  را محاسبه می‌نمایند.

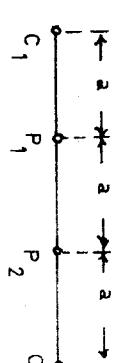
باترسیم منحنی  $p_a - a$  و مقایسه آن با منحنی‌های استاندارد زمینهای چند لایه‌ای، مشخصات لایه‌ها معلوم می‌گردد.

هر کدام از این دو آرایش دارای محسن و معایبی بوده و بطور دقیق نمیتوان یکی را بر دیگری ترجیح داد. ولی از آنجاکه دقت اندازه‌گیری ولتاژ در آرایش و نر بیشتر و محاسبات مقاومت مخصوص بسهولت انجام میگیرد از این پس روش و نر را برای اندازه‌گیری‌ها برمیگذسیم.

در روش و نر هرچهار الکترود مرتباً تغییر کرده ولی از آنجاکه تغییرات پتانسیل متناسب با فاصله است، آزمایش با دقت بیشتری انجام میگیرد.

مقایسه آریش سای مختلط

نوع	فرمول مقاومت مخصوص	ضریب آریش شارط	شکل
دروطبی	$\rho_a = \frac{\pi L^3}{ab} \cdot \frac{V}{I}$ K = $\frac{\pi L^3}{ab}$	معتمد $L \gg a, L \gg b$	
دروطبی	$\rho_a = \frac{2\pi L^3}{ab} \cdot \frac{V}{I}$ K = $\frac{2\pi L^3}{ab}$	محدودی $L \gg a, L \gg b$	
دروطبی	$K = \frac{\pi}{L^2 + a^2}$	محدودی $a \gg b$	
مشتملبرده	$\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \cdot \frac{V}{I}$ K = $\frac{\pi a^2}{b}$	مشتمل $a \gg b$	

نوع آرایش	شکل	ضریب آرایشی	فهرمول	مقادیر مخصوص	شماره
ونس		$\beta_a = 2\lambda_a \times \frac{V}{l}$	$K = 2\pi a$		متس
ونس		$\beta_{a,1} = K \frac{V_{P_1,0}}{l}$	$K = 4\pi a$	$\beta_{a,2} = K \frac{V_{0,P_2}}{l}$	معتدل
نم آرایش		$\beta_a = \frac{8\pi a^2}{b} \frac{V}{l}$	$K = \frac{8\pi a^2}{b}$	$C_2 \leftarrow C_1 \rightarrow C_1 \leftarrow C_2 \rightarrow$ $P_1 \quad P_2 \quad P_1 \quad P_2$	الکترود های بینهایت
نم آرایش		$\beta_a = 2\pi a \times \frac{V}{l}$	$K = 2\pi a$	$C_2 \leftarrow C_1 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2$	الکترود های در بینهایت

محاسبات مقاومت مخصوص نیز در این روش ساده‌تر از روش شونمبئر است. تنها عیب‌عمله این روش تأثیر جریان‌های داخل زمین بر روی ولتاژ اندازه‌گیری شده، بخاطر فاصله زیاد الکترود‌های پتانسیل است.

در آرایش شولمنبرئه فاصله دو الکترود  $P_1$  و  $P_2$  بمراتب کمتر از  $C_1$  و  $C_2$  اختیار شده و حتی امکان در طول چند آزمایش ثابت نگهداشته می‌شود (مگر در حالاتی که دقت اندازه‌گیری کم و ولتاژ ایجاد شده قابل خواندن نباشد).

چون کاهش ولتاژ با جذور فاصله متناسب است، برای بالا برد دقت باستی دستگاهی با حساسیت عالی مورد استفاده قرار گیرد.

در این آرایش تأثیر جریان‌های زمین (تغیریک، سرگردان....) بر روی مدار اندازه‌گیری ولتاژ کمتر از آرایش ونر است. در جدول ۱ - ۱ و ۲ - ۱ انواع مختلف آرایش‌ها نشان داده شده است.

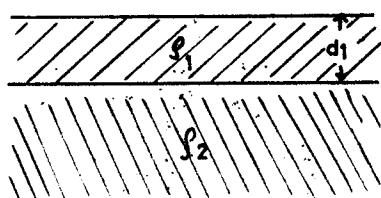
## فصل دوم

### محاسبه توزیع پتانسیل در زمینهای چندلایه‌ای

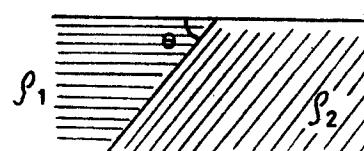
عمولاً زمین نامتجانس بوده و این عدم یکنواختی بصورت‌های گوناگون توزیع می‌یابد. عوامل مختلفی در تغییر مقاومت مخصوص دخالت داشته که در آن میان نوع خاک اثر قابل توجهی در این مورد دارد. کیفیت لایه بندي زمین پیچیده است ولی در اکثر حالات با تقریب قابل قبولی می‌توان آنرا موازی فرض کرده و مطالعات بر روی لایه‌های افقی صورت پذیرد.

هدیه‌ی است که در صورت وجود لایه‌های شیب دار، تغییرات شدید مقاومت مخصوص در امتداد قائم به شناخت موقعیت آنها کمک مینماید.

شکلهای ۱ - ۱ و ۲ - ۱ نمونه از زمین‌های مرکب از لایه‌های افقی و شیب دار را نشان میدهد.



شكل ۱ - ۱



شكل ۱ - ۲

اشکال ۱ - ۱ : لایه بندي زمین

شکل ۱ - ۱ : زمین دولایه‌ای با لایه بندی افقی

شکل ۲ - ۱ : زمین بالایه بندی مایل

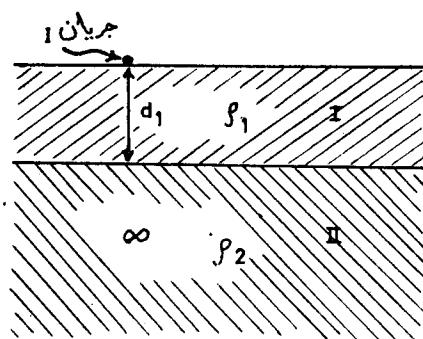
در مورد زمینهای شیب دار بدینه است که با انتقال الکترودهای اندازه‌گیری از ناحیه  $p_1$  به  $p_2$  تغییر پله‌ای در منحنی مقاومت مخصوص ظاهر می‌گردد. اجسام هادی واقع در زیر زمین شکل منحنی ظاهری را تغییر داده و اکثر آن بررسی‌ها را مشکل تر می‌سازد. برای شناخت طبقات باقیتی شکل توزیع پتانسیل را در زمین‌های مشخصی یافته و منحنی‌های  $a - p_a$  ترسیم شده از آزمایش‌های چهار الکترودی را با آنها مقایسه نمود. برای محاسبه توزیع پتانسیل از ساده‌ترین حالت ممکنه (زمین دولایه‌ای با طبقات افقی) شروع می‌کنیم.

## ۱ - ۲ زمین‌های دولایه‌ای

مطابق شکل ۱۲ این نوع زمین‌ها مرکب از دولایه افقی می‌باشند.

الف - لایه سطحی با ضخامت  $d_1$  و مقاومت مخصوص  $p_1$ .

ب - لایه عمقی با ضخامت بینهایت و مقاومت مخصوص  $p_2$ .



شکل ۱۲ - مدارهای دولایه‌ای

با ارسال جریان  $I$  بداخل زمین، چنانچه شکل کلی ولتاژ را در نواحی I و II با  $V_1$  و  $V_2$

نشان دهیم روابط زیر قابل قبولند:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + V'_1 \\ V_2 &= V_0 + V'_2 \end{aligned} \quad (26)$$

در این معادلات  $V$  شکل کلی ولتاژ در هر دو ناحیه است (چنانچه زمین از یک طبقه با مقاومت مخصوص ثابت  $p_1$  تشکیل شده باشد). تأثیر وجود طبقه نا متجانس عمقی را بر ولتاژ  $V$  با  $V'_1$  و  $V'_2$  نشان میدهیم.

در مختصات استوانه‌ای  $r$  و  $\theta$  و  $z$  شرائط حدی برابر است با:

۱ - با فرض سطح زمین بعنوان رویه هم پتانسیل :

$$E_z = - \left( \frac{dv_1}{dz} \right)_{z=0} = 0 \quad (27)$$

۲ - ولتاژ  $V_1$  درینهایت صفر است در نتیجه :

$$(V_2)_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (28)$$

۳ - در مرز مشترک دولایه ولتاژها یکسانند :

$$(V_2)_{z=d_1} = (V_2)_{z=-d_1} \quad (29)$$

۴ - بعلت خاصیت پیوستگی ، چگالی جریان در امتداد محور  $z$  ها و در مرز مشترک دولایه

مساویست :

$$J_1 = - \frac{1}{\rho_1} \left( \frac{dV_1}{dz} \right) \quad , \quad J_2 = - \frac{1}{\rho_2} \left( \frac{dV_2}{dz} \right) \quad (30)$$

$$\frac{1}{\rho_1} \left( \frac{dv_1}{dz} \right)_{z=d_1} = \frac{1}{\rho_2} \left( \frac{dv_2}{dz} \right)_{z=d_1}$$

۱ - ۱ - ۲ - فرم معادله کلی

برای طبقات افقی تغییرات در امتداد  $\theta$  صفر بوده و تنها دو امتداد  $r$  و  $z$  در فرمولها ظاهر میگردند.

برای زمینهای یکنواخت با مقاومت مخصوص  $\rho_1$  ، چنانچه فاصله را  $S$  فرض کنیم :

$$V_0 = \frac{I\rho_1}{2\pi S} \quad (31)$$

$$S = (r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$$

برطبق تبدیل فوريه :

$$\frac{1}{S} = (r^2 + z^2)^{-\frac{1}{2}} = \int_0^\infty e^{-\lambda z} f(\lambda r) d\lambda \quad (32)$$

و بر ثابت کرده که تابع  $f(\lambda r)$  در فرمول ۳۲ مطابق زیر برابر با  $J(\lambda r)$  میباشد .

$$f(\lambda r) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{+i\infty} e^{\lambda z} (z^2 + r^2)^{-\frac{1}{2}} dz = J_0(\lambda r) \quad (32)$$

$\lambda$  پارامتر اختیاری و  $J_0(\lambda r)$  تابع بسل نوع اول از درجه صفر است.  
با توجه به رابطه اخیر:

$$V_0 = \frac{I_{\rho_1}}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} f(\lambda r) d\lambda \quad (34)$$

برای یافتن معادلات  $V'_1$  و  $V'_2$  ابتدا فرم کلی پتانسیل را بدست می‌آوریم.  
برطبق معادله ہواسون  $\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}$ ، تابع پتانسیل برای حالت  $\rho=0$  در محیط گسترده زمین همان معادله لاپلاس خواهد بود.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (35)$$

با درنظر گرفتن تغییرات درجهات  $r$  و  $z$  معادله ۳۵ در مختصات استوانه‌ای بفرم زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (36)$$

یک جواب معادله دیفرانسیل ۳۶ بازای جدا کردن متغیرها بدست می‌آید بطوریکه:

$$V(r, z) = R(r) \cdot Z(z)$$

اختیار شده که با قراردادن در رابطه ۳ و انجام یک سری عملیات نتیجه می‌گردد:

$$\frac{1}{R} \left( \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{Z} \left( \frac{d^2 Z}{dz^2} \right) = 0 \quad (37)$$

از رابطه ۳۷ میتوان معادلات ۳۸ را نتیجه گرفت:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} &= \lambda^2 \\ \frac{1}{R} \left( \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} \right) &= -\lambda^2 \end{aligned} \quad (38)$$

اولین معادله دیفرانسیل یک سری جواب بفرم معادلات ۹ خواهد داشت:

$$Z = f(\lambda) e^{\lambda Z} + g(\lambda) e^{-\lambda Z} \quad (39)$$

معادله دیفرانسیل دوم فرم کلی توابع بدل بارجه صفر است که دارای دو جواب بصورتهای  $J(\lambda r)$  و  $V(\lambda r)$  یا ترکیبی از آنها می‌باشد.

از آنجا که  $V(\lambda r) = 0$  نامعین است، نمی‌تواند یکی از جوابهای هتانسیل باشد، باین

دلیل معادله کلی خواهد شد:

$$V' = \left[ f(\lambda) e^{-\lambda Z} + g(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) \quad (40)$$

بدینهی است که در حالت کلی  $V$  تابع  $r$  و  $Z$  بوده و ارتباطی به  $\lambda$  ندارد از اینرو برای حذف پارامتر  $\lambda$  انتگرال تابع  $V'$  را در فاصله  $0$  و  $\infty$  حساب کرده و فرم جوابها را بصورت زیر می‌نویسم:

$$V'_1 = \int_0^\infty \left[ f_1(\lambda) e^{-\lambda Z} + g_1(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) d\lambda \quad (41)$$

$$V'_2 = \int_0^\infty \left[ f_2(\lambda) e^{-\lambda Z} + g_2(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) d\lambda$$

انتگرالهای فوق که بفرم توابع Hankel می‌باشند، مشخص کننده جواب عمومی معادله ولتاژند. با درنظر گرفتن تابع  $V$  معادلات کلی خواهند شد؟

$$V_1 = \frac{I_{\rho_1}}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda Z} J \cdot (\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty \left[ f_1(\lambda) e^{-\lambda Z} + g_1(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) d\lambda \quad (42)$$

$$V_2 = \frac{I_{\rho_1}}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda Z} J \cdot (\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty \left[ f_2(\lambda) e^{-\lambda Z} + g_2(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) d\lambda$$

تابع  $V_1$  را بروش دیگری نیز می‌توان محاسبه کرد:

بدون توجه به ولتاژ ثابت  $V$  و با درنظر گرفتن جوابهای کلی معادلات ۳۸ برای توابع دیفرانسیل، فرم کلی معادلات  $V_1$  و  $V_2$  بصورت زیر درخواهند آمد:

$$V_1 = \int_0^\infty \left[ F_1(\lambda) e^{-\lambda Z} + G_1(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) d\lambda \quad (43)$$

$$V_2 = \int_0^\infty \left[ F_2(\lambda) e^{-\lambda Z} + G_2(\lambda) e^{+\lambda Z} \right] J \cdot (\lambda r) d\lambda$$

توابع  $F_1(\lambda)$  ،  $F_2(\lambda)$  ،  $G_1(\lambda)$  و  $G_2(\lambda)$  دارای خاصیت زیر میباشند :  
چنانچه  $\rho_2 = \rho_1$  و زمین از حالت دو لایه‌ای به یک لایه‌ای بدل گردد بدیهی است :

$$\begin{aligned} F_1(\lambda) &= F_2(\lambda) \\ G_1(\lambda) &= G_2(\lambda) \end{aligned} \quad (44)$$

و :

$$V = \int_0^\infty \left[ F_1(\lambda) e^{-\lambda z} + G_1(\lambda) e^{+\lambda z} \right] J_o(\lambda r) d\lambda$$

پتانسیل  $V$  در بینهایت صفر است و در نتیجه بازی  $\rho_2 = \rho_1$  لازم است  $G_1(\lambda) = 0$  باشد . از طرفی برای زمین‌های یکنواخت معادله ولتاژ خواهد شد :

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi(z^2+r^2)^{\frac{1}{2}}}$$

با در نظر گرفتن تبدیل فوریه تابع  $(z^2+r^2)^{-\frac{1}{2}}$   
فرم ولتاژ بصورت رابطه ۵۴ در می‌آید :

$$V = -\frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_o(\lambda r) d\lambda \quad (45)$$

از مقایسه فرمهای دوگانه ولتاژ با توجه برابری  $G_1(\lambda) = 0$  نتیجه می‌شود :

$$F_1(\lambda) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \quad (46)$$

برای  $\rho_2 = \rho_1$  :

بدین ترتیب توابع  $F$  ها حاصل جمع یک مقدار ثابت  $\frac{I\rho_1}{2\pi}$  و توابعی بصورت  $f$  بوده که مقادیر آنها برای  $\rho_2 = \rho_1$  صفر است .

$$\begin{aligned} F_1(\lambda) &= \frac{I\rho_1}{2\pi} + f_1(\lambda) \\ F_2(\lambda) &= \frac{I\rho_1}{2\pi} + f_2(\lambda) \end{aligned} \quad (47)$$

از قراردادن مقادیر  $F$  ها در رابطه کلی معادله ولتاژ، توابع  $v$  بدست آمده که با توجه به شرایط حدی ۲۷ تا ۳ توابع  $f$  ها و  $g$  ها قابل محاسبه میگردند.

#### ۱ - ۲ : اعمال شرایط حدی

$$E_z = - \left( \frac{dZ_1}{dZ} \right)_{Z=0} = 0 \quad \text{الف -}$$

این شرط در قسمت اول تابع  $V_1$  صادق است و برای قسمت دوم آن طبق فرمول زیر لازم است  $f_1(\lambda) = g_1(\lambda)$  باشد.

$$\left( \frac{dV'_1}{dZ} \right)_{Z=0} \simeq \int_0^\infty \left[ -f_1(\lambda) e^{-\lambda z} + g_2(\lambda) e^{\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda = 0 \quad (48)$$

ب -  $[V_2]_{z \rightarrow \infty} = 0$  ، از آنجاکه  $V_2$  درینهاست صفر است قبول جواب صفر برای  $V_2$  در صورتی است که ضریب  $e^{\lambda z}$  وجود نداشته باشد ، درنتیجه :

$$g_2(\lambda) = 0$$

پ - برای شرط حدی  $(V_1)_{z=d_1} = (V_2)_{z=d_1}$  زیر برقرار است :

$$\left[ \int_0^\infty f_1(\lambda) e^{-\lambda z} + g_1(\lambda) e^{\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \right]_{z=d_1} = \\ (49)$$

$$\left[ \int_0^\infty f_2(\lambda) e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \right]_{z=d_1}$$

از تساوی ۹ رابطه ای بین  $f$  ها بدست میآید :

$$f_2(\lambda) = f_1(\lambda) [1 + e^{2\lambda d_1}] \quad (50)$$

ت - آخرین شرط حدی ، معادله پیوستگی جریان است :

$$\frac{1}{\rho_1} \left( \frac{dV_1}{dz} \right)_{z=d_1} = \frac{1}{\rho_2} \left( \frac{dV_2}{dz} \right)_{z=d_1} \quad \text{از اینرو :}$$

$$\frac{\lambda}{\rho_1} \left[ -\frac{I_{\rho_1}}{2\pi} e^{-\lambda d_1} + f_1(\lambda) (-e^{-\lambda d_1} + e^{\lambda d_1}) \right] = \frac{\lambda}{\rho_2} \left[ \frac{I_{\rho_1}}{2\pi} e^{-\lambda - d_1} + f_2(\lambda) e^{-\lambda d_1} \right] \quad (51)$$

با توجه بر واپطه چهارگانه بدست آمده ، توابع  $f$  ها بدست میایند .

$$f_1(\lambda) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot \frac{Ke^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}} \quad (02)$$

$$f_2(\lambda) = \frac{I\rho_1 K}{2\pi} \cdot \frac{1 + e^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}}$$

در روابط ۰۲ ،  $K$  ضریب انعکاس و مقدار آن برابر است با :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (03)$$

از قراردادن مقادیر  $f_1(\lambda)$  و  $f_2(\lambda)$  در توابع ولتاژ دوسری معادلات زیر نتیجه میگردد:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty \left[ \frac{Ke^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}} (e^{-\lambda z} + e^{+\lambda z}) + e^{-\lambda z} \right] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (04)$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty K \frac{1 + e^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}} e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \right]$$

از آنجاکه در عمل پتانسیل سطح زمین اندازه گیری میشود تنها معادله  $V_1$  مورد نظر بوده که در آن باستی پارامتر  $z$  مساوی صفر قرار داده شود .

در اینصورت توزیع پتانسیل  $V_1$  در سطح زمین خواهد شد :

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \int_0^\infty J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty \frac{2Ke^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}} J_0(\lambda r) d\lambda \right] \quad (05)$$

بسط تابع  $K \frac{e^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}}$  بصورت زیر نوشته میشود :

$$K \frac{e^{-2\lambda d_1}}{1 - Ke^{-2\lambda d_1}} = Ke^{-2\lambda d_1} + K^2 e^{-4\lambda d_1} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} K^n e^{-2n\lambda d_1} \quad (06)$$

با توجه بر ابطه ۰۶ ، انتگرال دوم تابع  $V_1$  مجموعه ای از انتگرالهای بصورت زیر میگردد :

$$\int_0^\infty K^n e^{-2n\lambda d_1} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (07)$$

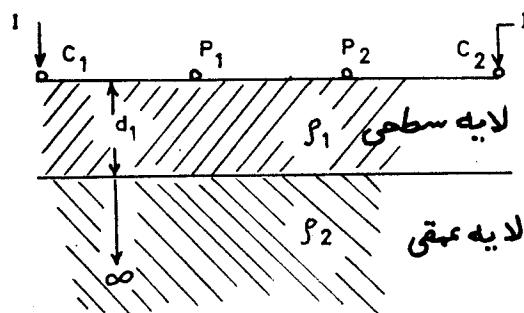
برطبق تبدیل فوریه جواب این انتگرالها برابر است با :

$$\frac{K^n}{[r^2 + (2nd_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (08)$$

از قراردادن جوابهای بصورت ۰۸ در تابع  $V_1$  توزیع ولتاژ سطحی ناشی از منبع جریان نقطه‌ای بدست می‌آید.

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{[r^2 + (2nd_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (09)$$

۳ - ۱ - ۲ : محاسبه معادله ولتاژ بین دوالکترود پتانسیل در آرایش ونر



شکل ۱۳ - شکل آرایش ونر در زمان دولایه‌ای

اختلاف پتانسیل  $V_{P1P2}$  طبق شکل باشد با :

$$V_{P1P2} = 2[V(C_1P_1) - V(C_2P_1)] \quad (10)$$

با درنظر گرفتن فواصل  $C_2P_1$  و  $C_1P_1$  بترتیب برابر  $a$  و  $2a$  و استفاده از معادله ۰۹

$$V_{P1P2} = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left[ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[ 1 + \left( \frac{2nd_1}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{K^n}{\left[ 4 + \left( \frac{2nd_1}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (11)$$

چون مقاومت مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده بصورت :

$$\rho_a = 2\pi a V_{P1P2}$$

میباشد از آنرو:

$$\frac{\rho_{a,w}}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[1 + \left(\frac{2nd_1}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{K^n}{\left[4 + \left(\frac{2nd_1}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (62)$$

فرمول ۶۲ نسبت مقاومت مخصوص ظاهري به مقاومت مخصوص لایه سطحي را نشان ميدهد.

مقاومت مخصوص ظاهري  $\rho_a$  بازي مقادير زياد  $\frac{d_1}{a}$  بطرف  $\rho_1$  و برای اندازه هاي کم  $\frac{d_1}{a}$  بسمت  $\rho_2$  ميل ميکند.

عامل مهم در فرمول ۶۲ ضريرب انعکاس  $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$  بوده که مقدار آن در فاصله ۱ - ۱ و + +

در تغيير ميباشد.

لازم به تذکر است که بحسب محاسبات انجام شده دقيقاً نميتوان فاصله اي از الکترودها را تعين کرد که بازاء آن طول  $P_1 P_2 = a$  معادل ضخامت قشر باشد، چون اين فاصله تابعی از  $K$  است، تنها ميتوان منحنی تغييرات  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  را بازي مقادير مختلف  $K$  در حالتی که  $a = d_1$  است ترسیم نموده و از روی آن ارتباط مقاومت مخصوص ظاهري را با مقاومت لایه ها پیدا نمود.

۴ - ۱ - ۲ : معادله ولتاژ در آرایش شولمبوجه  
طبق شکل ۶ و معادلات مربوط باين آرایش، تغييرات پتانسیل در امتداد مسیر اندازه گيري برابر

است با:

$$E = - \frac{\delta V}{\delta r} = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (63)$$

برای دو منبع نقطه اي I و I - شدت میدان E در وسط آرایش دو برابر مقدار فوق شده بطور يك:

$$E = \frac{\rho I}{\pi a^2}$$

از طرفی معادله ولتاژ يك منبع نقطه اي در زمين دولایه اي برای فاصله a برابر است با:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[1 + \left(\frac{2nd_1}{a}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (64)$$

بنابراین :

$$\frac{\delta V}{\delta a} = -\frac{I\rho_1}{2na^2} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[ 1 + \left( \frac{2nd_1}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (60)$$

بادرنظر گرفتن  $\rho_a, s = -\frac{2\pi a^2}{I} \cdot \frac{\delta V}{\delta a}$  نسبت مقاومت مخصوص ظاهری به لایه سطحی در آرایش شولمنبرژه خواهد شد :

$$\frac{\rho_a, s}{\rho_1} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[ 1 + \left( \frac{2nd_1}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (61)$$

۰ - ۱ - ۲ : معادله ولتاژ در آرایش دوقطبی

در آرایش دوقطبی شکل ۶ از آنجا که فواصل  $p_1P_2$  و  $C_1C_2$  براتب کوچکتر از فاصله ۱ میباشد

بایستی از تابع پتانسیل مشتق ثانی گرفت :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} = \frac{I\rho}{4\pi r^3} \quad (62)$$

$$\rho_a, d = \frac{\pi r^3}{I} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2}$$

با توجه بروابط ۶ و اخذ مشتق ثانی از تابع کلی پتانسیل منبع نقطه‌ای، معادله مقاومت مخصوص ظاهری بصورت زیر محاسبه میشود.

$$\frac{\rho_a, d}{\rho_1} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[ 1 + \left( \frac{2nd_1}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left[ 1 + \left( \frac{2nd_1}{a} \right)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \quad (63)$$

۲ - ۲ : زمین‌های سه‌لایه‌ای و بیشتر.

برای زمین‌های بیشتر از دولایه نیز میتوان بروش قبل عمل کرده و توابعی بصورت زیر برای لایه ام در نظر گرفت.

$$V_i = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty [f_i(\lambda) e^{-\lambda z} + g_i(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (64)$$

شرایط حدی برای حل معادلات بصورت زیرندا:

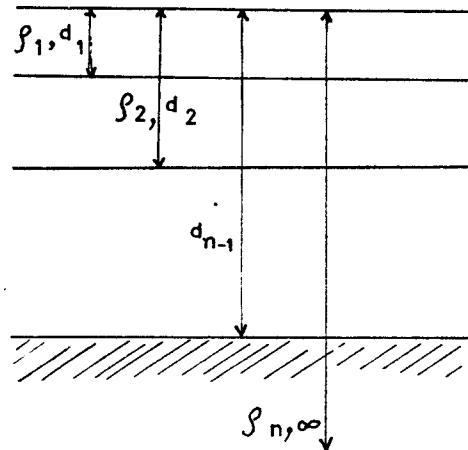
$$\frac{dV_1}{dZ} \Big|_{Z=0} = 0 \quad \text{لایه اول:}$$

$$V_i = V_{i+1} \quad \text{در مرز مشترک دولایه } i \text{ ام} \quad (v0)$$

$$\frac{1}{\rho_i} \frac{dV_i}{dZ} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{dV_{i+1}}{dZ} \quad \text{و } (i+1) \text{ ام}$$

$$V_n \Big|_{Z \rightarrow \infty} = 0 \quad \text{در لایه } n \text{ ام}$$

بدینگونه برای یک زمین  $n$  لایه‌ای مطابق شکل ۴ ۱ با داشتن  $2n$  پارامتر تعداد  $2n$  معادله نیز موجود بوده که نتیجتاً توابع  $f$  ها و  $g$  ها قابل محاسبه می‌گردند.  
از کسانی که برروی زمین‌های چندلایه‌ای کار کرده‌اند می‌توان شولمنبرژه، هامل، استفانسکواهربنبرگ و واتسون را نام برد. بعلاوه عده‌ای چون مونی، وتنز و کانیار به ترسیم منحنی‌های زمین‌های ۲، ۳ و چهار لایه‌ای پرداخته‌اند.



شکل ۴ ۱ - زمین  $n$  لایه‌ای با مشخصات لایه‌ها بصورت « $e_i$  ،  $\rho_i$  ،  $d_i$ »

اما اساس روش‌های اخیر را در یک زمین سه لایه‌ای بیان میداریم.  
در این حالت بجمع دو معادله  $V_1$  و  $V_2$  معادله سوبی اضافه می‌شود، بطوریکه:

$$V_3 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda + \int_0^\infty f_3(\lambda) e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (v1)$$

از محسابه توابع با درنظر گرفتن شرایط حدی  $V_s$  و لتاژ سطحی  $V$  برای یک منبع نقطه‌ای، بفرم زیر

باست می‌آید:

$$V_s = \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1 + K(\lambda) e^{-2\lambda d_1}}{1 - K(\lambda) e^{-2\lambda d_1}} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (72)$$

$K(\lambda)$  را تابع کرنل دولایه‌ای می‌نامند و مقدار آن برابر است با:

$$K(\lambda) = \frac{-\rho_1 + \rho_2(1 + K_2 e^{-2\lambda e_2}) / (1 - K_2 e^{-2\lambda e_2})}{\rho_1 + \rho_2(1 + K_2 e^{-2\lambda e_2}) / (1 - K_2 e^{-2\lambda e_2})} \quad (73)$$

در رابطه ۷۳ پارامتر  $e_2$  ضخامت لایه دوم و  $K_2$  ضریب انعکاس لایه دوم و سوم است.

$$e_2 = d_2 - d_1$$

$$K_2 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (74)$$

در حالت کلی فرمول لتاژ سطحی برای  $n$  لایه بضم خامت‌های  $e_1$  و  $e_2$  و ... با مقاومت مخصوصهای  $\rho_1$  و  $\rho_2$  و ... و عمق قرار گرفتن  $d_1$  و  $d_2$  و ... بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$V_s = \frac{\rho_1 I_1}{2\pi} \int_0^\infty K_{12} \dots n J_n(\lambda r) d\lambda \quad (75)$$

تابع  $n$  و بقیه توابع بفرم کلی روابط ۷۷ نوشته می‌گردند.

$$K_{12} \dots n = \frac{1 + H_{12} \dots n e^{-\lambda e_1}}{1 - H_{12} \dots n e^{-\lambda e_1}}$$


---


$$H_{12} \dots n = \frac{\rho_2 K_{23} \dots n - \rho_1}{\rho_2 K_{23} \dots n + \rho_1}$$


---


$$K_{(n-1)n} = \frac{1 + H_{(n-1)n} e^{-2\lambda e_{n-1}}}{1 - H_{(n-1)n} e^{-2\lambda e_{n-1}}} \quad (76)$$

$$H_{(n-1)n} = \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{\rho_n + \rho_{n-1}}$$

در روابط ۷۶ ،  $K_{(n-1)n}$  را تابع کرنل دولایه‌ای ، برای لایه فوقانی با مقاومت مخصوص  $\rho_{n-1}$  و ضخامت  $e_{n-1}$  و لایه تحتانی با مقاومت مخصوص  $\rho_n$  و ضخامت بینهایت می‌نامند.

شناخت منحنی یک زمین  $n$  لایه‌ای منجر به حل انتگرال ۷۶ و ترسیم معادله  $V$  می‌گردد. در بررسی زمین‌های سه لایه‌ای به زمین‌های بخورد می‌کنیم که گرچه شرایط کاملاً متفاوتی دارند ولی در شکل منحنی توزیع پتانسیل ( $a - \rho_a$ ) آنها تنها تفاوت جزئی بچشم می‌خورد. در چنین مواردی تفسیر منحنی‌ها با اشکال مواجه شده که درنتیجه آن مشخصات لایه‌های عاملان غیرممکن می‌گردد. اشکالاتی از این نوع اکثرآ در ضخامت‌های کم لایه میانی بوجود می‌آید.

در تابع کرنل زمین سه‌لایه‌ای، در صورتی که ضخامت لایه دوم کم باشد تابع  $e_2 - 2\lambda e_2$  را بطور تقریب می‌توان بفرم  $e_2 - 2\lambda e_2 - 1$  نوشت با این تبدیل ( $\lambda$ )  $K$  بمعادله ساده شده زیر مبدل می‌گردد:

$$K(\lambda) = \frac{(\rho_3 - \rho_1) - \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_2} \cdot \lambda \rho_2 e_2}{(\rho_3 + \rho_1) - \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_2} \cdot \lambda \rho_2 e_2} \quad (77)$$

### ۱ - ۲ - ۲ : اصل برابری

اصل برابری مربوط به لایه‌های ضخامت کمی بوده و بعلاوه مقاومت مخصوصشان بزرگتر یا کوچکتر از دولایه‌های مجاور خود باشند. تأثیر لایه مقاومی که بین دولایه هادی تراز خود قرار گرفته با مقاومت عرضی ظاهر می‌گردد.

این حقیقت از رابطه ۷۷ با فرض  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$  مشخص شده ، بطوریکه در چنین شرایطی تابع کرنل بصورت زیر درخواهد آمد:

$$K(\lambda) = \frac{\rho_3 - \rho_1 + \lambda \rho_2 e_2}{\rho_3 + \rho_1 + \lambda \rho_2 e_2} \quad (78)$$

بنابراین دردو زمین سه‌لایه‌ای با یک لایه نازک مقاوم میانی ، در صورتیکه مقاومت مخصوص لایه‌های اول و میوم و مقاومت عرضی لایه میانی مساوی باشند ، به توزیع پتانسیل یکسانی دست خواهیم یافت . بدیهی است که مقدار  $\rho_2 e_2$  مقاومت واحد سطح نیز می‌باشد.

در چنین وضعیتی جریان ناچیزی بصورت شعاعی در اون لایه جریان یافته ، بطوریکه تأثیر اینگونه لایه‌ها ایجاد یک انفعال الکتریکی بین دولایه مجاور است. بعکس لایه هادی بین دولایه مقاوم تر با هدایت افقیش ظاهر می‌گردد. با استدلالی مشابه گذشته و در نظر گرفتن نا مساوی  $\rho_3 > \rho_2 > \rho_1$  تابع کرنل

بصورت زیر در می‌آید :

$$K(\lambda) = \frac{p_3 - p_1 + \lambda \sigma_2 e_2}{p_3 + p_1 + \lambda \sigma_2 e_2}$$

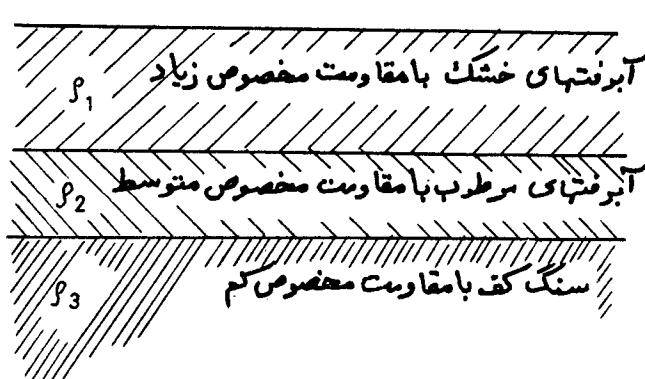
$\sigma_2 e_2$  هدایت افقی لایه است. لایه‌هایی این چنین سعی دارند که جریان‌های عبوری را بصورت افقی (شعاعی) هدایت نمایند.

بطورکلی در دو زمین سه لایه‌ای با یک طبقه میانی‌هادی‌تر، چنانچه مشخصات لایه‌های اول و سوم و هدایت افقی لایه دوم آندو یکسان باشد، به توزیع پتانسیل مشابه‌ای خواهیم رسید. در هر دو حالت بتدریج که ضخامت  $\sigma_2$  افزایش می‌یابد انحراف دو منحنی از یکدیگر بیشتر مشاهد خواهد گردید.

## ۲ - ۲ - ۲ : اصل ناپیدائی

لایه نازکی که مقاومت مخصوصش بین دولایه مجاور خود باشد، در منحنی توزیع پتانسیل بی‌تأثیر است. در حقیقت میتوان گفت که این لایه تأثیر خود را مخفی داشته است، بدینگونه اصل اخیر را اصل ناپیدائی می‌نامند.

در حالت اخیر نیز، بتدریج با افزایش ضخامت تأثیر آن ظاهر می‌گردد. درسه حالت ذکر شده در بروزی‌های زمین‌شناسی اکثراً باین نوع لایه‌ها برخورد می‌کنیم، در شکل ۳۸ نمونه‌ای از این زمینها آورده می‌شود.



شکل ۱۰ - یک نمونه از زمین‌های سه‌لایه‌ای با شرایط  $p_1 > p_2 > p_3$

## ۳ - ۲ - توابع پتانسیل نمائی

در عمل کراراً اتفاق می‌افتد که توزیع جریان ناشی از آذربخش یا نشدکابلی را در هادیهای زمین و یا کابل‌های زیر زمینی پیدا کرد. در چنین حالتی برای مهولت عمل زمین را دولایه‌ای و توزیع پتانسیل، بصورت ساده شده زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$V(s) = \frac{I}{2\pi a} [p_2 - (p_2 - p_1)e^{-\lambda a}] \quad (10)$$

$$p_a = p_2 - (p_2 - p_1)e^{-\lambda a}$$

در این فرمول  $a$  فاصله هردو الکترود مجاورهم و  $\lambda$  پارامتریست که بستگی به ضریب انعکاس دو لایه دارد. بطوریکه از فرمول پیداست، برای مقادیر کم  $a$  مقاومت مخصوص ظاهری برابر لایه سطحی و برای فواصل زیاد مساوی مقاومت مخصوص لایه عمقی است.

با انتخاب صحیح مقادیر  $p_1$ ،  $p_2$  و  $\lambda$  منحنی  $p_a$  ظاهری با تقریب کافی محاسبه خواهد شد.

بطور تقریب  $\lambda = \frac{\delta_1}{2d_1}$  بوده که در آن  $d_1$  عمق لایه سطحی و  $\delta$  پارامتر ثابتی است که مقدار آن بستگی به نسبت  $p_2/p_1$  دارد.

مقادیر تقریبی  $\delta$  در جدول ۲ درج شده است

$p_2/p_1$	۱/۰	۱/۵	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
$\delta$	۰	۰/۱	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۲

جدول ۲ - تغییرات  $\delta$  نسبت به  $p_2/p_1$

## ۴ - ۲ - لایه‌های شیب‌دار (اریبی)

در محاسبات گذشته، فرض برآن بود که لایه‌های زمین افقی و بموازات یکدیگر قرار گرفته‌اند و حال آنکه در بررسی‌های زمین‌شناسی اغلب به زمینهای برخورد می‌کنیم که لایه‌های عمقی آنها شیب دار بوده و با سطح افق زوایای مختلفی می‌سازند.

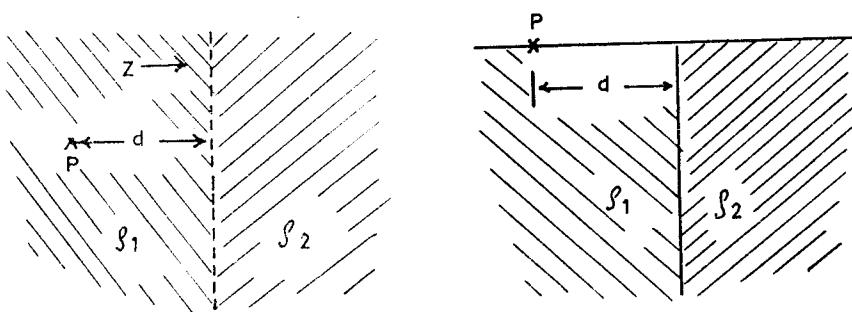
گرچه مطالعه برروی این طبقات بمراتب مشکل‌تر از حالات افقی است ولی بعلت اهمیت موضوع در این زمینه کارهای زیادی انجام شده است. Skalskaya، Maeda، UNZ از شمار اولین محققانی هستند که برروی لایه‌های شیب‌دار و معادلات فیزیکی آنها بررسی‌هایی انجام داده‌اند.

خاطرنشان میگردد که در این قبیل زمین‌ها چنانچه امتداد مسیر الکتریکی موازی با فصل مشترک دولایه باشد شکل منحنی‌های توزیع ولتاژ همانند لایه‌های افقی است. از این‌رو شناخت دقیق اینکه توزیع پدست آمده ارتباط بکدام زمین دارد، امکان پذیر نخواهد بود.

بعکس چنانچه امتداد مسیر الکترودها فصل مشترک دولایه را قطع نماید در شکل منحنی، تغییرات ناگهانی پدید آمده که این امر نشانه وجود یک لایه شیب دار زمین است.

#### ۱ - ۴ - ۲ : فصل مشترک قائم

یک حالت مربوط به لایه‌های شیب دار هنگامی است که بصورت قائم قرار گیرند، در شکل ۱۶ این حالت در نظر گرفته شده بطوریکه دولایه نامتجانس عمود بر سطح افق قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۶ - زمین با دو لایه قائم

برای یافتن معادلات توزیع ولتاژنایی از بار نقطه‌ای  $p$  با فاصله  $d$  از فصل مشترک قائم بروشهای گذشته عمل میکنیم.

ابتدا فرض برآنست که فضای سطح زمین (نقطه  $p$ ) نیز از دولایه  $\rho_1$  و  $\rho_2$  پرشده باشد در این صورت با در نظر گرفتن امتداد  $Z$  معادلات ولتاژ بفرم زیر نوشته میشوند:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty [f_1(\lambda) e^{-\lambda z} + g_1(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \int_0^\infty [f_2(\lambda) e^{-\lambda z} + g_2(\lambda) e^{+\lambda z}] J_0(\lambda r) d\lambda$$

شرایط حدی :

$$\begin{aligned} V_1 \Big|_{Z \rightarrow +\infty} &= 0 & V_1 &= V_2 \\ V_2 \Big|_{Z \rightarrow +\infty} &= 0 & -\frac{1}{\rho_1} \frac{dV_1}{dZ} &= -\frac{1}{\rho_2} \frac{dV_2}{dZ} \\ && Z=d & (12) \end{aligned}$$

با اعمال شرایط ۱۲ و خلاصه کردن روابط :

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{I\rho_1}{4\pi} K \int_0^\infty e^{-(2d-z)} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (13)$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda + \frac{I\rho_1}{4\pi} K \int_0^\infty e^{-\lambda z} J_0(\lambda r) d\lambda$$

انتگرالهای معادلات ۱۳ از نوع تبدیلهای فوریه میباشد، از اینرو:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[ \frac{1}{(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{K}{[r^2+(2d-z)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (14)$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[ \frac{1+K}{(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

از آنجاکه معادلات در امتداد  $r$  متقارنند، میتوان قسمت فوقانی را حذف و ولتاژهای  $V_1$  و  $V_2$  رادو برابر کرد، در نتیجه معادلات ولتاژ در هر نقطه ناشی از منبع جریان نقطه‌ای بفاصله  $d$  از فصل مشترک خواهد شد:

$$V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{K}{[r^2+(2d-z)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (15)$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1+K}{(r^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \right]$$

ولتاژ سطحی بازی  $r=0$  بحسب می‌آید پس:

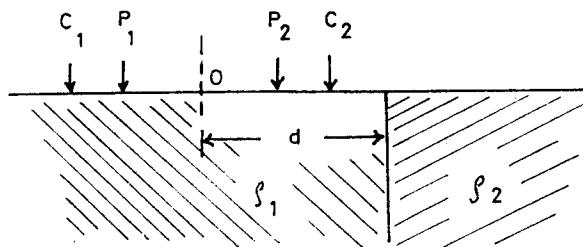
$$V_1(s) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{|z|} + \frac{K}{|2d-z|} \right] \quad (16)$$

$$V_2(s) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1+K}{|z|} \right]$$

بمنظور بررسی آرایش و نر دراین نوع لایه‌ها، چنانچه امتداد مسیر عمود برفصل مشترک قائم باشد، بسته به وضع قرارگرفتن الکترودهای  $C_1$ ,  $P_1$ ,  $C_2$ ,  $P_2$ ، ه حالت گوناگون را در نظر میگیریم.

حالت اول:

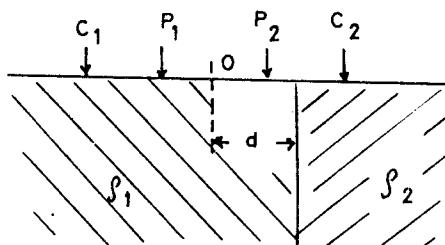
چهار الکترود  $C_1$ ,  $P_1$ ,  $C_2$ ,  $P_2$  در لایه  $\rho_1$  قرار دارند.



شکل ۱۷ - (حالت اول)

حالت دوم:

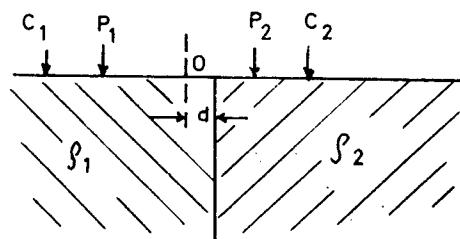
سه الکترود  $C_1$ ,  $P_1$ ,  $C_2$  در لایه  $\rho_1$  و الکترود جریان  $G_2$  در لایه  $\rho_2$  قرارگرفته است.



شکل ۱۸ - (حالت دوم)

حالت سوم:

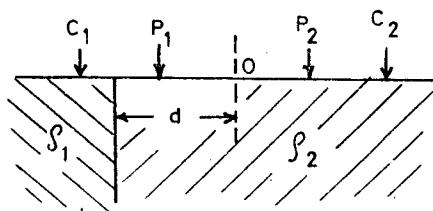
دو الکترود  $C_1$ ,  $P_1$  در لایه  $\rho_1$  و الکترودهای  $C_2$ ,  $P_2$  در لایه  $\rho_2$  واقعند.



شکل ۱۹ - (حالت سوم)

حالت چهارم :

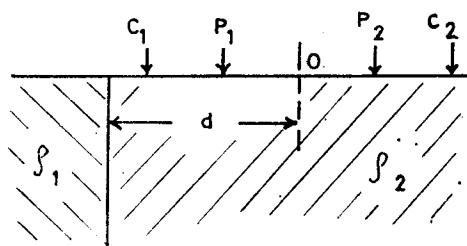
الکترودهای  $C_1$ ,  $P_1$ ,  $C_2$ ,  $P_2$  در لایه  $\rho_1$  واقع است.



شکل ۲۰ - (حالت چهارم)

حالت پنجم :

چهار الکترود  $C_2$ ,  $P_2$ ,  $P_1$ ,  $C_1$  در ناحیه  $\rho_2$  قرار دارند.



شکل ۲۱ - (حالت پنجم)

چنانچه حالت اول را در نظر گیریم بر طبق معادلات ۸۶ روابط زیر بدست می‌آیند :

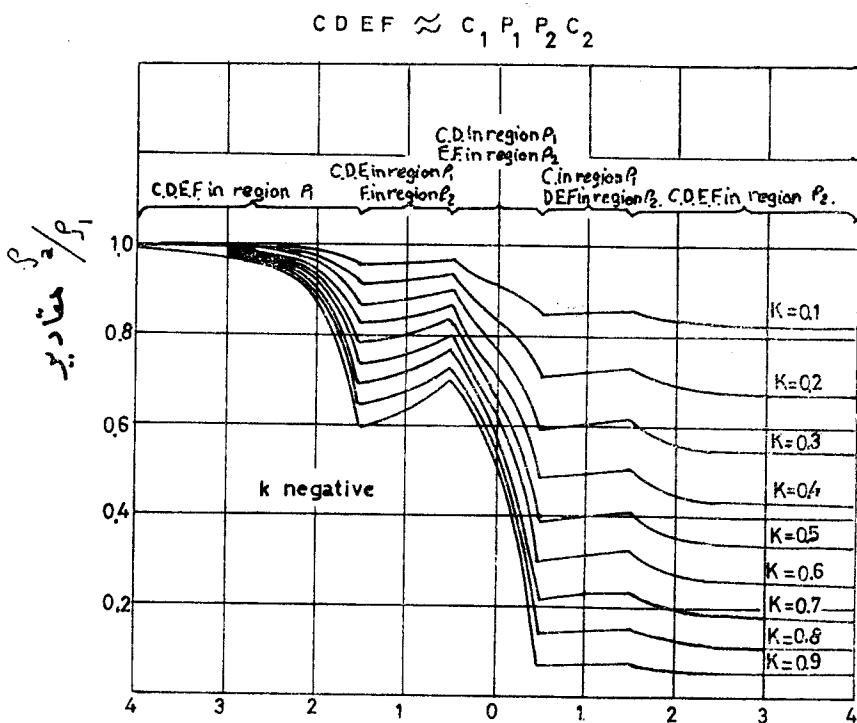
$$\begin{aligned} V_{C1P1} &= \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + \frac{K}{2d+2a} \right] \\ V_{C2P2} &= \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{2a} + \frac{K}{2d+a} \right] \\ V_{C2P1} &= -\frac{I\rho_1}{2} \left[ \frac{1}{2a} + \frac{K}{2d-a} \right] \\ V_{C1P2} &= -\frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + \frac{K}{2d-2a} \right] \end{aligned} \quad (۸۷)$$

پس از ساده کردن نسبت مقاومت مخصوص ظاهري به مقاومت مخصوص  $\rho_1$  خواهد شد:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + K \left( \frac{q}{q^2-1} - \frac{4q}{4q^2-1} \right) \quad (۸۸)$$

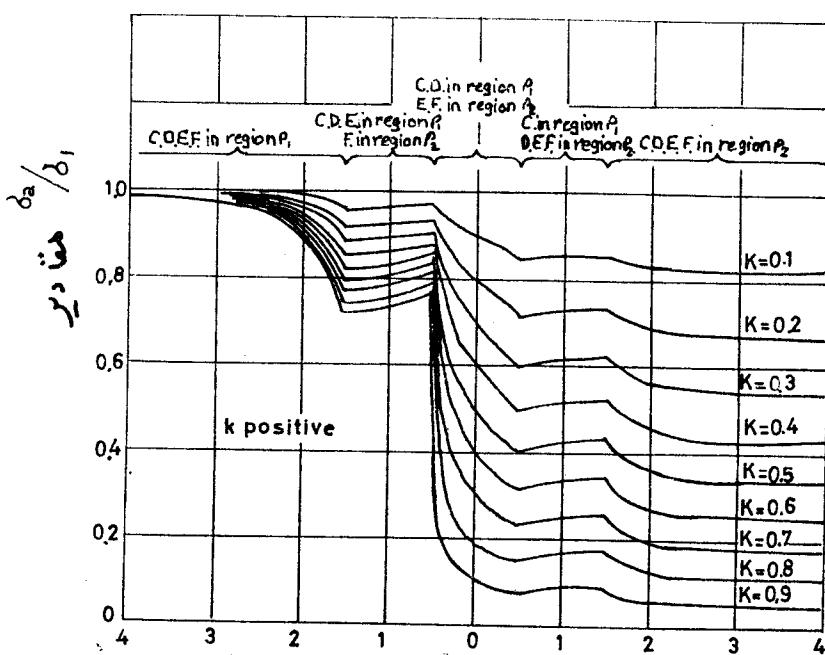
$1.5 \leq q \leq \infty$

### منحنی های فصل مشترک قائم



$$CDEF \approx C_1 P_1 P_2 C_2$$

شکل (۲۲-۱)



شکل (۲۲-۲)  $\frac{d}{a}$

«وضعیت پنجگانه الکترودها نسبت به نامتناوبی»

در رابطه اخیر  $K$  ضریب انعکاس و  $q$  برابر  $\frac{d}{a}$  است.

معادلات خلاصه شده مایر حالات را بصورت زیر نشان میدهیم :

حالت دوم

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + K \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2q+2} - \frac{1}{2q+1} \right)$$

$$0.5 \leq q \leq 1.5 \quad (89)$$

حالت سوم

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = \frac{1+K^2}{1-K} + \frac{K}{2q+2} - \frac{K(1+K)}{1-K} \left( \frac{1}{2-2q} \right)$$

$$0 \leq q \leq 0.5 \quad (90)$$

حالت چهارم

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = \left[ \frac{1+K}{1-K} \right] \left[ 1+K \left( \frac{1}{2q+1} - \frac{1}{2q+2} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (91)$$

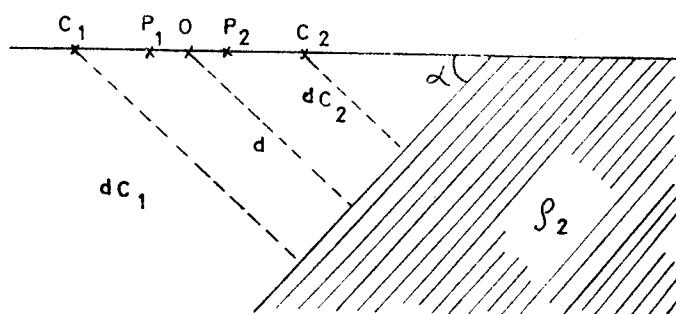
حالت پنجم

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = \left[ \frac{1+K}{1-K} \right] \left[ 1+K \left( \frac{4q}{4q^2-1} - \frac{q}{q^2-1} \right) \right] \quad (92)$$

متوجهی های ۲۲ توابع پنجگانه فوق را نشان میدهند.

۴ - ۲ - ۲ : شیب های کلی

در حالات اخیر زاویه فصل مشترک دولایه با استداد آرایش  $a$  است.



شکل ۲۳ - زاویه آرایش با فصل مشترک  $a$  است

با درنظر گرفتن :

$$dc_1 = d + \frac{3}{2}a \sin a$$

$$dc_2 = d - \frac{3}{2} a \sin \alpha \quad (92)$$

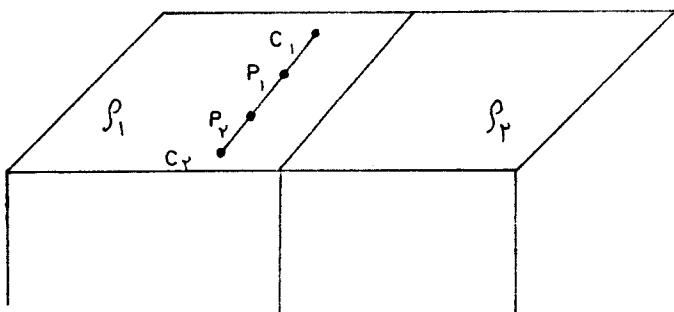
برای وضعیتی که در شکل نشان داده ایم :

$$\frac{\rho_a}{\rho_l} = 1 + K \left[ \frac{1}{[\cos^2 \alpha + (2q + 2\sin \alpha)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{[4\cos^2 \alpha + (2q + \sin \alpha)^2]^{\frac{1}{2}}} \right. \\ \left. - \frac{1}{[4\cos^2 \alpha + (2q - \sin \alpha)^2]^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{[\cos^2 \alpha + (2q - 2\sin \alpha)^2]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (94)$$

چنانچه در رابطه ۴ و زاویه  $\alpha$  را مساوی  $90^\circ$  درجه اختیار سازیم فرمول ۸۸ مربوط به فصل مشترک قائم بدست خواهد آمد.

حالت دیگر بازی  $\alpha = 0^\circ$  قابل بررسی است که در آن استداد آرایش با فصل مشترک موازیست.

در این وضعیت معادله مقاومت ظاهری خواهد شد :



شکل ۴ - زاویه فصل مشترک با استداد آرایش صفر است

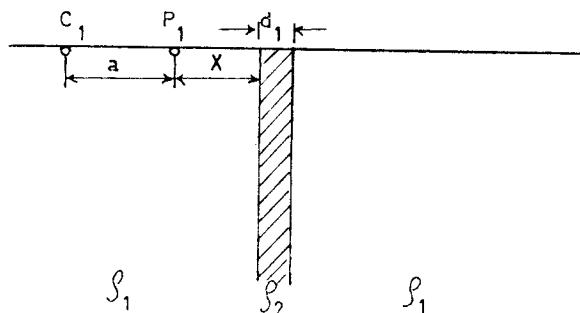
$$\frac{\rho_a}{\rho_l} = 1 + 2K \left[ \frac{1}{(4q^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(4p^2 + 4)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (95)$$

معادله اخیر همان فرمول طبقات افقی است با این تفاوت که در آن  $n=1$  میباشد. بدین ترتیب ملاحظه میگردد که شکل منحنی بصورت زمینهای افقی است و درنتیجه در بررسی های اولیه بطور قطع نمیتوان منحنی را به لایه های افقی یا شبیدار نسبت داد.

### ۳ - ۴ - ۲ تشکیلات قائم کم ضخامت (باریکه ها)

قرار گرفتن یک لایه باریک قائم در زمین یکنواختی بصورت زیر را دایک گویند :  
برای یافتن محل دایک ها در صورتی که نوع آرایش انتخابی ، الکترودهای با فواصل نامحدود

باشد، حصول نتیجه بهتر و محاسبات ساده‌تر می‌گردد. در نیم آرایش و نر نسبت به نوع قرار گرفتن دوالکترود  $P_1$  و  $C_1$  با پنج حالت مختلف مواجه خواهیم شد که ذیلاً هر حالت با معادله و تأثیر وابسته نشان داده می‌شود. حالت اول -  $C_1P_1$  در طرف چپ محیط  $\rho_2$ .



شکل ۲۵ - لایه قائم کم ضخامت

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + \frac{K_{12}}{2x+a} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1-K_{21}^2)K_{21}(2n-1)}{(2x+2nd_1+a)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}(1-K_{21})K_{21}(2n-1)}{(2nd_1-a)} \right] \quad (۱۶)$$

در این فرمول :

$$K_{12} = -K_{21} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

حالت دوم :

$\rho_2$  در طرف چپ و  $P_1$  در محیط  $\rho_1$

$$V = \frac{\rho_2 I (1 - K_{12})}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}(2n-1)}{(2nd_1 - 2x + a)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}^{2n}}{(2nd_1 + a)} \right] \quad (۱۷)$$

حالت سوم :

$\rho_1$  و  $P_1$  هردو در محیط  $\rho_2$  (داخل دایک)

$$V = \frac{\rho_2 I}{2\pi} \left[ \frac{1}{a} - \frac{K_{21}}{2x-a} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}^{(2n-1)}}{(2nd_1 - 2x+a)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}^{2n}}{(2nd_1 + a)} \right. \\ \left. - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}^{(2n+1)}}{(2nd_1 + 2x-a)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}^{2n}}{(2nd_1 - a)} \right] \quad (18)$$

حالات چهارم :

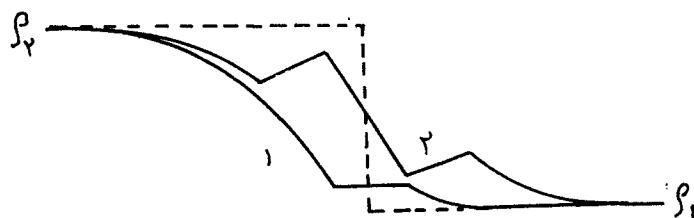
$\rho_1$  در محیط  $\rho_2$  و  $P_1$  در محیط  $C_1$

$$V = \frac{\rho_1 I (1 - K_{21})}{2} \left[ \frac{1}{a} - \frac{K_{21}}{2x-a} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{21}^{(2n+1)}}{(2x + 2nd_1 - a)} \right] \quad (19)$$

حالات پنجم :

$$V = \frac{\rho_1 I}{2} \left[ \frac{1}{a} - \frac{K_{12}}{(2x - 2d_1 - a)} - \frac{(1 - K_{21})^2 K_{21}}{(2x - a)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - K_{21})^2 K_{21}^{(2n+1)}}{(2x + 2nd_1 - a)} \right. \\ \left. - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}(1 - K_{21}) K_{21}^{(2n-1)}}{(4x - 2nd_1 - a)} \right] \quad (100)$$

در شکل ۲ منحنی تغییرات مقاومت مخصوص ظاهری در نیم آرایش و نزد آرایش و نزد ترسیم شده است ملاحظه میگردد که این روشها بخوبی با ایجاد نامتعادلی در توزیع، موقعیت دایک را معلوم میدارند.  
ناحیه دوم (دایک) با مقاومت مخصوص  $\rho_1$  ناحیه اول با مقاومت مخصوص  $\rho_2$



منحنی ۱ نیم آرایش و نزد

منحنی ۲ آرایش و نزد

شکل ۲۶ - منحنی تغییرات مقاومت مخصوص ظاهری برای وجود یک لایه نازک قائم در زمین

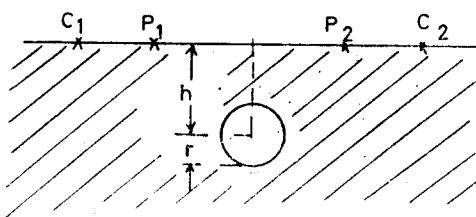
۵ - تعیین موقعیت اجسام مدفون در خاک

از موارد استعمال مهم روشهای الکتریکی شناخت معادن، تونل‌ها، غارها و ساختمانهای زیرزمینی

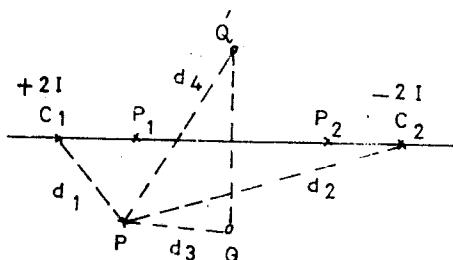
است. همزمان با ارائه روش چهار الکتروده به مطالعه بروی قطعات زیرزمینی پرداخته شد، بدون آنکه نتیجه عملی حاصل گردد. در.ال. ۱۹۳۰، هامل «Hummel» تأثیر وجود یک حفره کروی را در زمین یکنواختی مورد بررسی قرارداد Van Nostrand نیز بسال ۱۹۵۳، بروی کره‌های هادی مطالعاتی انجام داد و باین نتیجه رسید که شناخت آنها در صورتی که عمق کارگذاری بیشتر از قطرشان باشد غیر ممکن است. «پالمر بسال ۱۹۵۴ در مجله معدن تحت عنوان\* «تعیین محل حفره‌های زیرزمینی بر اساس الکتریکی» این بیانیه را نادرست خوانده و متذکر گردید که تنها این مورد درباره اشیاء با مقاومت مخصوص زیاد صادق است.

ذیلاً بذکر روش وی می‌پردازیم:

پالمر مطابق شکل ۱ - ۲۷ کره‌ای بشاعر  $r$  را که در عمق  $h$  قراردارد در زمینی با مقاومت مخصوص ثابت  $p_1$  در نظر گرفت، نوع آرایش انتخابی وی «روش شولمبرژه» بوده، بطوریکه مرکز آرایش در امتداد محور کره قراردارد.



شکل ۱ - ۲۷ - موقعیت کره در داخل زمین



شکل ۲ - ۲۷ - مدار الکتریکی شکل بالا

مدار معادل بصورت شکل ۲ - ۲۷ ترسیم شده است.

فضای بالای سطح زمین نیز از مقاومت  $p_2$  پرشده و قراردادن جریانها بمیزان  $2I$ ، بمنظور ثابت

نگهداشتن میدانهاست.

$C_1$  و  $C_2$  الکترودهای جریان بفاصله  $2a$  و  $P_1$  و  $P_2$  الکترودهای پتانسیل با فاصله  $b$  می‌باشند.

کره قرار داده شده در عمق  $h$  و  $Q'$  قرینه الکتریکی آنست.

\* - Location of Subterranean Cavities by Geoelectrical Methods 1954

با فرض اینکه فواصل نقطه‌ای مانند  $P$  از نقاط  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $Q$  و  $Q'$  بترتیب برابر  $d_1, d_2, d_3$  و  $d_4$  باشند، ولناآن با تقریب اول بصورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$V_P = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} + \frac{ab^{3/2}}{2(a^2+h^2)^{3/2}} \left( \frac{1}{d_3^{3/2}} + \frac{1}{d_4^{3/2}} \right) \right] \quad (101)$$

در روش ۴ الکتروده  $V_{P1P2}$  خواهد شد:

$$V_{P1P2} = \frac{2a\rho I}{\pi(1-a^2)a} \left\{ 1 + \frac{\beta^3(1-\alpha^2)(r/h)^3}{\alpha^3(1+\beta^2)^{3/2} \left[ 1 + \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (102)$$

در این فرمول:

$$\alpha = \frac{b}{2a}, \quad \beta = \frac{h}{a}$$

با درنظر گرفتن پارامتر  $\rho_a$  و مقدار آن در روش شولمبرو (برای  $r=0$  یا  $h=\infty$ )

$$\rho_a = \frac{V}{I} \cdot \frac{\pi(1-\alpha^2)}{2a} a \quad (103)$$

نسبت  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  محاسبه می‌گردد.

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + \frac{\beta^3(1-\alpha^2) \left( \frac{r}{h} \right)^3}{\alpha^3(1+\beta^2)^{3/2} \left[ 1 + \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (104)$$

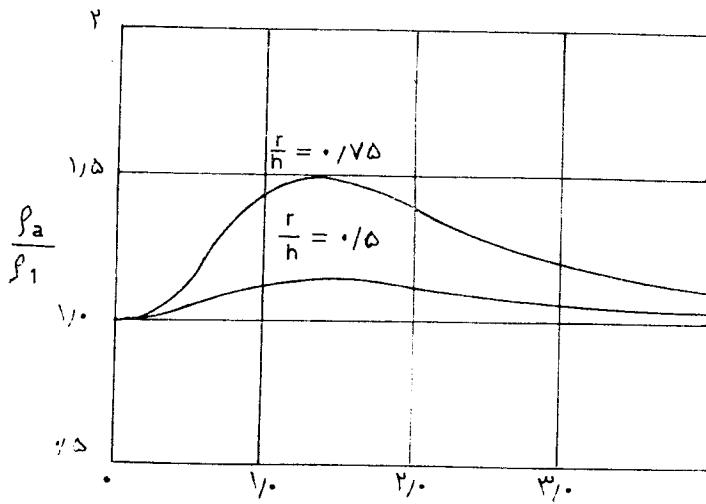
منحنی‌های  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  بازی تغییرات  $\frac{r}{h}$  در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

ماکزیمم منحنی از رابطه  $\frac{d\left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right)}{d.a} = 0$  بدست می‌آید و در این حالت:

$$\beta = \sqrt{a} \quad \text{یا} \quad h = a\sqrt{a} \quad (105)$$

برای  $a = \frac{1}{3}$  فاصله  $h$  برابر  $57^{\circ}a$  می‌شود.

با قراردادن مقادیر  $\beta$  و  $h$  متناظر با نقطه ماکزیمم نسبت مقاومت مخصوص ظاهری به مقاومت



شکل ۲۸ - تأثیر یک کره خاک شده

مخصوص زمین خواهد شد :

$$\frac{\rho_a \max}{\rho_1} = 1 + \frac{1-\alpha}{(1+\alpha)^2} \left( \frac{r}{h} \right)^3 \quad (106)$$

از رابطه ۱۰۶ و منحنی های شکل ۲۸ نتیجه میگردد که اولاً از دیاد تحدب با کاهش  $\alpha$  همراه بوده و نیز محقق میگردد که برای شناخت حفره های کروی عایق در داخل زمین عمق آنها بایستی در حوالی قطرشان باشد.

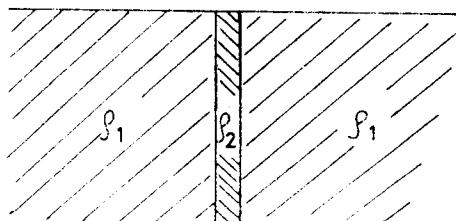
## فصل سوم

### تعییر و تفسیر منحنی های الکتریکی

تعییر و تفسیر منحنی های الکتریکی چنانچه مربوط به لایه های غیر افقی باشد، پیچیده گردیده و بدستی نمیتوان به شناخت ساختمان زمین دست یافت.

بدینه است که چنانچه ابعاد قسمتهای نامتقارن کوچک و یا شیب لایه ها نسبت بهم کم باشد تأثیری در شکل منحنی ها نمی گذارد (به فصل دوم مراجعه شود). برطبق آنچه که گذشت در صورتی که امتداد الکترود ها موازی فصل مشترک دولایه باشد شکل عمومی توزیع ولتاژ همسان لایه بندی افقی است. در آرایش های عمود بر فصل مشترک برای قرار گرفتن هرچهار الکترود در نواحی  $\rho_1$  یا  $\rho_2$  شکل منحنی ترا اندازه ای بی تغییر مانده و تنها لحظه ای که الکترود ها در حوالی فصل مشترک قرار گیرند قله های تیزی در آنها ایجاد شده که این امر نشان دهنده عبور الکترود ها از یک ناحیه به ناحیه دیگر است.

شناخت یک لایه قائم باریک چنانچه امتداد آرایشی با آن موازی باشد مشکل و تا حدی غیر ممکن میگردد ، بعکس چنانچه امتداد الکتروودها ، لایه را قطع نماید برآمدگیهای در شکل منحنی ظاهر شده که بخصوص نمود آن در حالتیکه لایه مقاوم باشد بیشتر است.



شکل ۲۹ قرار گرفتن یک لایه قائم نا متقابله با سخاوت کم در زمین همگن

بطور کلی برای بررسی دقیق منحنی های ترسیمی :

- الف - با استی هتی امکان نمودار گیری چاهه ای نیز در مجاورت بررسیهای مربوطه انجام گیرد.
- ب - در صورت امکان اندازه گیریهای زیادی با جهات مختلف آرایش در زمین مورد مطالعه صورت پذیرد . و برای آنکه بتوان یک منحنی توزیع را وابسته به طبقات افقی دانست لازم است که :

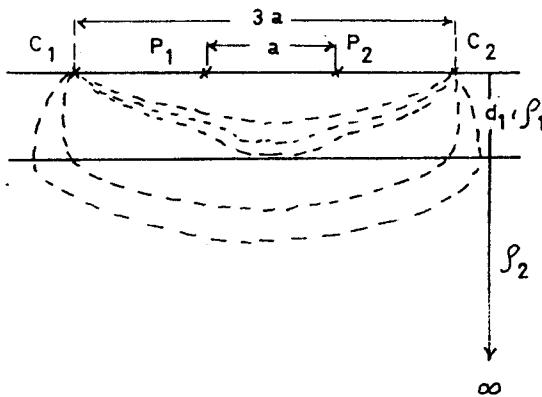
  - الف - شیب شاخه های بالا رونده از  $5^{\circ}$  درجه تجاوز ننماید.
  - ب - شعاع انحنای منحنی در حوالی ماگزیم در حدود نسبت ۲ برای مقیاس های لگاریتمی باشد.
  - پ - در خصوص شیب شاخه های پائین رونده و شعاع انحنای آنها در حوالی نقاط مینیموم نظیر دو شرط بالا موجود است.

### ۱ - ۳ - محاسبات لایه بندی زمین های چند لایه ای

چنانچه مطالعات مقدماتی بر روی منحنی های  $a-p_a$  حاکم از زمین چند لایه ای با طبقات افقی باشد لازم است که ضخامت و مقاومت مخصوص هر لایه مشخص گردد . همانگونه که در فصل اول بیان گردید در زمین های ناهمگن بدینه است که مقاومت مخصوص محاسبه شده اندازه معادل مربوط به مقدار لایه هاست و برای نشان دادن تغییرات آن بر حسب لایه های شرکت کننده در آزمایش ، مرتبآ با افزایش فاصله  $a$  ، اندازه  $p_a$  حساب شده و نهایت تغییرات  $p_a$  را بر حسب  $a$  در صفحات تمام لگاریتمی ترسیم و آنرا توزیع  $a-p_a$  مینامیم . در یک زمین دولایه ای مطابق شکل . ۳ آزمایش نشان میدهد که برای فواصل  $1-a < a$  قشر دوم تاثیر چندانی بر روی منحنی پتانسیل نداشته و عملاً قسمت اعظم جریان از لایه مطحی میگذرد (عمق مفید را تقریباً میتوان برابر  $a$  فرض کرد).

بعکس با افزایش فاصله  $a$  اثر لایه عمقی با مقاومت مخصوص  $p_2$  ظاهر شده و در فواصل زیاد آنچه که در توزیع پتانسیل تاثیر میگذرد همان لایه دوم است.

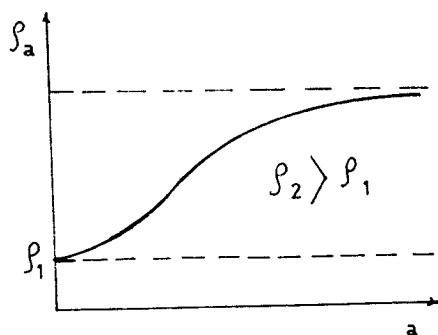
محاسبه  $\frac{P_2}{P_1}$  در روش ونر (فرمول ۶۲) تأیید کننده مطلب بالاست بطوریکه این تغییرات را برای دو حالت  $P_2 > P_1$  و  $P_2 < P_1$  نسبت به فاصله  $a$  در شکل‌های ۱-۳ میتوان نشان داد.



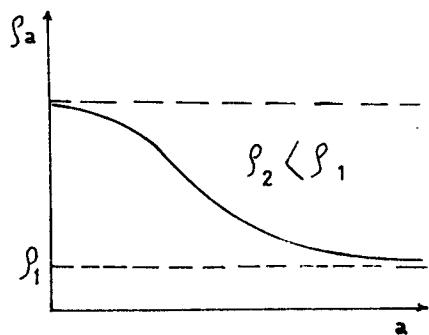
شکل ۳۰ - مسیر جریان در زمین دولایه‌ای

بدینگونه ملاحظه میگردد که در صورت موجود بودن منحنی‌های توزیعی برای زمینهای دولایه‌ای

با مقادیر مختلف نسبت‌های  $\frac{P_2}{P_1}$ ، توجیه خواص نمونه‌های ترسیمی امکان پذیر است.



شکل ۳۱-۱  $\frac{P_2}{P_1} > 1$



شکل ۳۱-۲  $\frac{P_2}{P_1} < 1$

شکل ۳۱ - منحنی تغییرات  $\rho_a$  بر حسب  $a$

حالت دولایه‌ای بندرت اتفاق می‌افتد و اکثر آنها در اندازه‌گیریها به زمینهای چند لایه‌ای برخورد کرده که با استنی خواص آنها معلوم گردد.

روشهای زیادی در این مورد پیشنهاد گردیده که ذیلاً بذکر اسامی چهار روش مختلف می‌پردازم:

الف - مقایسه کلی منحنی با منحنی‌های تئوریک بدست آورده شده از زمینهای سه، چهار و ... لایه‌ای.

ب - مقایسه جزء بجزء منحنی با منحنی‌های استاندارد برای حالت دولایه‌ای و منحنی کمکی زمینهای چندلایه‌ای.

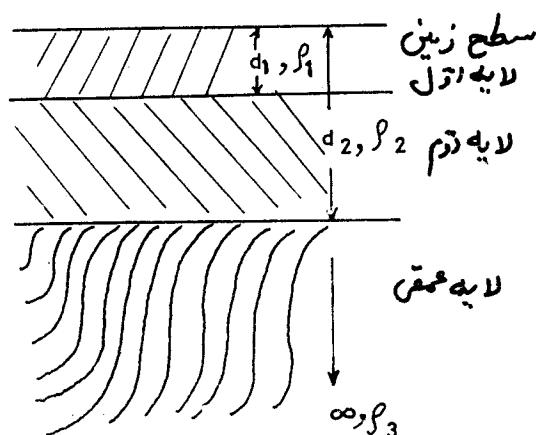
پ - مقایسه با منحنی معادل، بطوریکه تمام منحنی های هم شکل بصورت واحدی درآورده شده و با تغییرات  $p_a$  بدست آمده مقایسه گردد.

ت - بررسی نقاط مانعیم و نیوم منحنی های  $a - p_a$

۱ - ۱ - ۳ - مقایسه کلی منحنی  $a$

برای این منظور لازم است که جمیع منحنی های تئوریک زمینهای پیشتر از دو لایه ای ترسیم گردد. متساقانه ترسیم و محاسبات فرمولی چنانچه تعداد لایه ها افزایش یابد با اشکال مواجه شده و عملاً در زمینهای پیشتر از دو لایه غیر ممکن میگردد.

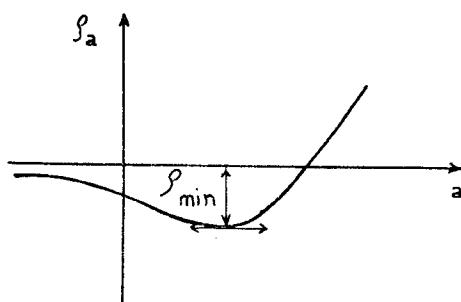
مثالاً برای زمینهای دو لایه ای پارامتر  $\frac{p_2}{p_1}$  و در مورد سه لایه ای  $\frac{p_3}{p_2}$  و  $\frac{p_2}{p_1}$  دخالت داشته که در نتیجه بتدریج با افزایش پارامترها رویرو هستیم (بازی هر لایه اضافی ۳ یا پیشتر به تعداد پارامترها افزوده میگردد). دریک زمین سه لایه ای مطابق شکل بسته به نسبت های هردو مقاویت مخصوص ۴ سری گوناگون از منحنی های  $p_a$  بدست میآید:



شکل ۳۲ - یک نمونه زمین سه لایه ای

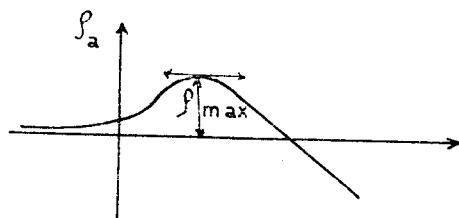
این منحنی ها بشکل زیرند:

دسته اول منحنی هائی با خواص  $\rho_3 < \rho_2 < \rho_1$  که دارای می نیوم بوده و به نوع H معروفند.



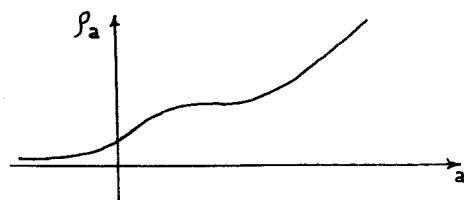
شکل ۳۲ - یک نمونه از منحنی های H

دسته دوم منحنی های مگزینم دار که در آنها  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$  بوده و به منحنی های نوع K معروفند.



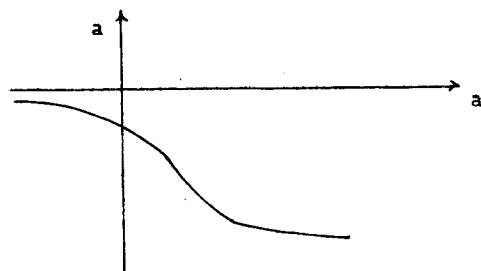
شکل ۳۴ - نمونه ای از منحنی های K

دسته سوم منحنی های بالا رونده با  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$  و معروف به نوع A



شکل ۳۵ - شکل عمومی منحنی های نوع A

و بالاخره دسته چهارم که بصورت منحنی های پائین رونده با  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$  بوده و به نوع Q معروفند.



شکل ۳۶ - نمونه منحنی های Q

برای زمین های بیشتر از سه لایه، ترکیبی از منحنی های چهار گانه بدست می آید که بعنوان مثال نوع HK در زمین های چهار لایه ای دارای مشخصات زیر است:

$$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$$

Wetzel و Mooney بسال (۱۹۵۷) مجموعی از منحنی های الکتریکی را در مورد آرایش و نر برای زمینهای سه و چهار لایه ای ارائه کردند که تعداد آنها به ۲۳۰۰ منحنی میرسید. کمپانی فرانسوی C.G.G. نیز در همین سال یک سری ۸۰۴ تأثی از منحنی های الکتریکی را برای آرایش شولمبرژه در زمینهای سه لایه ای ارائه داده است. به صورت چنانچه هدف شناخت خصوصیت لایه ها از روش اخیر باشد الزاماً باستی طبق

روش‌های محاسبه‌ای ذکر شده در فصل دوم جمیع منحنی‌های زمین‌های تا  $\rho_a - a$  لایه‌ای را برای آرایش و نرتسمون و به مقایسه توزیع  $\rho_a - a$  با آنها پرداخت، بدیهی است که با یافتن نزدیکترین توزیع ثوریک بآن، تعداد، ضخامت و مقاومت مخصوص لایه‌ها معلوم میگردد.

روش‌های پ و ت گرچه کار برد عملی یافته‌اند ولی در این گزارش از ذکر آنها خودداری کرده و تنها به بررسی روش «مقایسه جزء به جزء منحنی» می‌پردازیم. خاطرنشان میگردد که دو حالت پ و ت دارای تقریب بیشتری بوده ولی در عوض این حسن را دارند که میتوان سریعاً خواص لایه‌ها را دریافت. کاربرد زیاد روش «پ» در محاسبه توزیع ولتاژهای القائی ناشی از نشد کابلها یا آذرخش بروی قطعات انتقالی کارگذاری شده در زمین است، بدینگونه در مطالعات خطوط به ذکر این روش و بررسی‌های مدارهای واپسنه خواهیم پرداخت.

### ۲ - ۱ - ۳: مقایسه جزء به جزء منحنی

در روش اخیر منحنی را به قسمتهای صعودی و نزولی تقسیم کرده و هر جزء را جدا گانه تفسیر میکنیم، بدین طریق که ابتدا مشخصات لایه اول را بدست آورده، و سپس با مطالعه بروی قسمتهای دیگر منحنی خصوصیات بقیه لایه‌ها محاسبه میگردد.

تفسیر منحنی  $\rho_a - p_a$  توسط مقابله جزء به جزء شامل دو مرحله است.

الف - مطالعه بروی لایه اول با استفاده از منحنی‌های استاندارد دولایه‌ای.

ب - شناخت خصوصیات لایه‌های بعدی با کاربرد منحنی‌های کمکی.

در فرمول ۶۲ چنانچه مجموعه طرف ثانی را  $F$  بنامیم، فرمول  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  بصورت زیر نوشته میشود:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4F \quad (107)$$

با اخذ لگاریتم از طرفین معادله فوق میتوان نوشت:

$$\log \rho_a - \log \rho_1 = \log(1 + 4F) \quad (108)$$

طرف ثانی تابع  $\frac{a}{d_1}$  است.

منحنی‌های واپسنه به تابع لگاریتمی  $10.8$  که نمودار تغییرات  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  بر حسب  $\frac{a}{d_1}$  بازی مقادیر مختلفه  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  میباشد، بنام منحنی‌های استاندارد خوانده میگرددند. منحنی‌های اخیر که درضمیمه ترسیم شده‌اند، اساس محاسبات لایه‌ها را تشکیل میدهند.

بدینگونه که اگر مشخصه  $(\rho_a - a)$  را بروی منحنی‌های اخیر بطوری قرار دهیم که قسمت‌های

اولیه آن منطبق بریکی از منحنی های استاندارد گردد، بخاطر یکی بودن دو منحنی در فواصل کم الکتروودها

اولاً: ضریب انعکاس یا نسبت  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  معلوم میگردد، ثانیاً مبداء مختصات منحنی های استاندارد

$$o \left( \frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 \quad \text{و} \quad \frac{a}{d_1} = 1 \right)$$

برمشخصه حوزه اندازه گیری شده، خصوصیات لایه اول ( $d_1$  و  $\rho_1$ ) را بدست خواهد داد.

توضیح آنکه محور قائم در منحنی های استاندارد ( $\log \rho_a - \log \rho_1$ ) و در منحنی اندازه گیری شده

$\log \rho_a$  است.

همین مقادیر برای محور افق بترتیب عبارتند از ( $\log a - \log d_1$ ) و  $\log a$  بدینگونه دیده میشود

که دو منحنی یکسان بوده با این تفاوت که مشخصه اندازه گیری شده ( $\rho_a - a$ ) در امتداد دو محور برابر  $\log d_1$  ،  $\log \rho_1$  انتقال داده شده است.

راه دیگری برای یافتن مشخصات لایه سطحی بصورت زیر پیشنهاد میگردد:

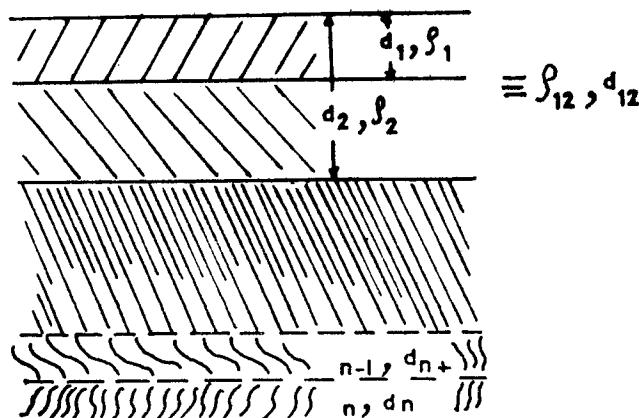
الف - پس از ترسیم منحنی  $a - \rho$  در دستگاه محورهای لگاریتمی با قراردادن آن بر روی منحنی

های استاندارد نزدیکترین مشخصه نسبت بآنرا (در فواصل کم  $a$ ) یافته و مقدار  $K$  مربوطه را یادداشت مینماییم.

ب - مجذوب منحنی در حوالی  $a = 0$ ، اندازه مقاومت مخصوص  $\rho_1$  لایه سطحی را بدست میدهد.

پ - با استفاده از جدول متدرج در ضمیمه بازی اندازه معلوم  $K$  مقدار  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  را در حالتیکه

است بدست آورده و از روی آن موقعیت لایه اول بر روی منحنی بدست میآید.



شکل ۳۷ - زمین  $n$  لایه‌ای

ت - مقدار  $a$  مربوط به این نقطه میان اندازه عمق لایه سطحی است.

بهر صورت با کاربرد یکی از دو روش فوق سه پارامتر  $d_1$ ،  $\rho_1$  و  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  معلوم میگردد، بدین طریق قدم بعدی شناخت ضیغامت یا عمق لایه دوم و سایر مشخصات لایه های بعدی است.

برای این منظور در زمین  $n$  لایه ای مطابق شکل ۳۷ بطور فرضی دولایه اول را به یک لایه با ضیغامت  $d_{12}$  و مقاومت مخصوص  $\rho_{12}$  بدل کرده و مسئله را به همان حالت دولایه ای تبدیل میکنیم.

منحنی های تغییرات  $\frac{\rho_{12}}{\rho_1}$  نسبت به  $\frac{d_2}{d_1}$  بر حسب مقادیر مختلف  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ . که مشخص کننده پارامتر های وابسته به معادل الکتریکی دولایه است، بنام منحنی های کمکی نامیده میگردند.

استفاده از منحنی های اخیر بصورت زیر است:

پس از معلوم داشتن نقطه مربوط به لایه اول (نقطه ۰۱) منحنی معادل الکتریکی دولایه را که بازای نسبت معلوم  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  مشخص شده، از نقطه مربوطه ترسیم میسازیم. مجدداً قسمت دوم منحنی  $a - p_a$

را بر روی منحنی استاندارد قرار داده تاهم روند آن معلوم گردد، در این حالت مبدأ منحنی های استاندارد که لزوماً بر روی منحنی کمکی ترسیمی قرار دارد، نماینده مشخصات لایه معادل است. در این صورت  $\rho_{12}$  و  $d_{12}$  معلوم و از آنجا که با مطابقت قسمت دوم منحنی توزیع  $a - p_a$  با منحنی های استاندارد نسبت  $\frac{\rho_3}{\rho_{12}}$  حاصل شده (لایه اول معادل الکتریکی فرضی است) بسادگی مقادیر  $d_2$  و  $\rho_3$  مشخص میگردند.

عمل اخیر را بهمین صورت تا حصول نتیجه نهائی ادامه داده و مرتبآً ضیغامت و مقاومت مخصوص لایه ها را معلوم میداریم.

### ۲ - ۳ - منحنی های کمکی

در گذشته برای زمین های سه لایه ای چهار نوع منحنی بصورت زیر مشخص گردید:

الف - نوع  $H$   $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

ب - نوع  $K$   $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

پ - نوع  $A$   $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

ت - نوع  $Q$   $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

روش یافتن مدار معادل الکتریکی در هر یک از انواع بالا فرق می نماید و در اینجا هدف محاسبه دوتابع بصورت زیر است:

$$\rho_{12} = f(\rho_1, \rho_2, d_1, d_2), \quad d_{12} = g(\rho_1, \rho_2, d_1, d_2) \quad (109)$$

در نوع H چون پائین ترین لایه مقاوم است از اینرو برای فواصل زیاد الکترودها عمل میتوان تصور کرد که تمام جریان در فاصله دو لایه فوقانی حرکت میکند.

بدین طریق لایه معادل هم ضخامت دولایه بوده و بعلاوه هدایت آن معادل هدایت دو لایه

است.

$$\frac{d_{12}}{\rho_{12}} = \frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_2} \quad (110)$$

$$d_{12} = d_1 + (d_2 - d_1)$$

از روابط بالا نتیجه میگردد:

$$\frac{\rho_{12}}{\rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{d_2}{d_1}}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{d_1} - 1} \quad (111)$$

در منحنی های نوع A ، هدایت افقی و مقاومت عرضی مجموع دولایه برابر با هدایت افقی و مقاومت عرضی لایه معادل است پس :

$$\frac{d_{12}}{\rho_{12}} = \frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_2} \quad (112)$$

$$d_{12}\rho_{12} = d_1\rho_1 + (d_2 - d_1)\rho_2$$

از حل معادلات اخیر نتیجه میشود:

$$d_{12} = \lambda(d_2)$$

$$\frac{\rho_{12}}{\rho_1} = \left[ \frac{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (112)$$

$$\lambda = \sqrt{1 + \frac{\frac{\rho_1}{\rho^2} + \frac{\rho_2}{\rho_1} - 2}{\frac{e_1}{e_2} + \frac{e_2}{e_1} + 2}}$$

در فرمولهای ۱۱۳ پارامتر  $\lambda$  ضریب ناهمگنی نامیده شده و  $e_1$  و  $e_2$  بترتیب ضخامت های دولایه اول و ثانی هستند.

برای نوع K تجربه ثابت کرده که لایه معادل ضخامتی بیشتر از مجموع دولایه دارد و از دیاد اخیر بیشتر از حالت A است.

تاثیر این افزایش را با ضریب بنام  $\delta$  نشان داده و از اینرو روابط بصورت زیر خلاصه می‌شوند:

$$\frac{\rho_{12}}{\rho_1} = \left[ \frac{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (114)$$

$$d_{12} = \lambda \cdot \delta d_2$$

بالاخره برای نوع  $Q$  پارامتر  $d_{12}$  مقداری کوچکتر از ضخامت دولایه است.

در این حالت تاثیر کاهش را با  $\eta$  نشان میدهیم:

$$d_{12} = \frac{1}{\eta} d_2$$

$$\frac{\rho_{12}}{\rho_1} = \frac{1}{\eta} \times \frac{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{(d_2 - d_1)}{\rho_2}}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2 - d_1}{\rho_2}} \quad (115)$$

در فرمولهای ذکر شده پارامتر  $\delta$  در فرمول ۱۱۴ تابع  $\lambda$  بوده و ضریب  $\eta$  نیز در روابطه ۱۱۵ بستگی به

$$\text{و } \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{ خواهد داشت.}$$

برای هرچهار حالت بالا منحنی‌های تجربی ارائه شده، که با کمک آنها مدارهای معادل هر دولایه مربوط به منحنی‌های فوق بدست خواهد آمد.

در ضمیمه منحنی‌های مربوطه آورده شده است.

بطوریکه از این منحنی‌ها پیداست، چنانچه نسبت  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  زیاد نباشد تقریباً لایه معادل هم ضخامت دو لایه دیگر بوده ولذا میتوان با تقریب کافی قبول کرد که فرمول مربوط به نوع  $H$  در مورد سایرین نیز صادق است.

در اینصورت منحنی‌های کمکی منحصر به ترسیم یک سری توابع  $\frac{\rho_{12}}{\rho_1}$  مطابق فرمول ۱۱۰ برای نسبتهای مختلفه  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  در فاصله صفر تا بینهایت خواهد گردید.

خاطرنشان میگردد که چنانچه انحراف در استفاده از این سری منحنی زیاد باشد بالاجبار بسته به نوع زمین، منحنی‌های کمکی مربوطه را بایستی بکار گرفت.

منحنی انتخابی اخیر را تحت عنوان « منحنی‌های کمکی زمین‌های چند لایه‌ای » برای مقادیر

مختلف  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$  در کاغذ تمام لگاریتمی ترسیم و در ضمیمه آورده‌ایم در اینصورت محاسبه ضخامت و مقاومت

مخصوص لایه های افقی زین منجر به استفاده از دوسری منحنی های استاندارد و کمکی میگردد.

### ۳ - ۳ - اندازه گیری عملی

برای شناخت لایه بنده زین مورد مطالعه ، با انتخاب آرایش و نر فواصل  $a$  را از یک متر تا حدود  $\dots$  متر تغییر داده و در هر وضعیت  $V$  و  $I$  را محاسبه میسازیم.

بدیهی است که نسبت  $\frac{V}{I}$  برابر  $R$  بوده که با در نظر گرفتن  $K$  ضریب آرایش ، مقاومت مخصوص  
ظاهری  $p_a$  محاسبه خواهد گردید.

برای مشخص شدن سیر و محل آزمایش و بعلاوه منظور کردن شرایط محیط جدولی را مطابق ۳  
برای کلیه اندازه گیری ها پکار میبریم.

آزمایش اخیر بر روی منطقه امیرآباد در حوزه ای واقع بین مرکز تحقیقات مخابرات ایران و موسسه  
ژئوفیزیک انجام پذیرفته است.

بعاطر محدودیت در فاصله ، حداقل طول الکترود های  $C_1C_2$  برابر  $4 \text{ متر}$  در نظر گرفته شده  
است. دستگاه اندازه گیری با جریان متناوب و فرکانس در حدود  $4 \text{ سیکل در ثانیه}$  کار کرده و مقدار مقاومت  
زین در فاصله دو الکترود پتانسیل مستقیماً از روی صفحه مدرج قرائت گردیده است.

براساس مقادیر موجود در جدول ۳ منحنی توزیع مقاومت مخصوص در شکل ۳۸ بر روی کاغذ  
تمام لگاریتمی شفاف ترسیم گردیده است.

روش تفسیر این منحنی بصورت زیر بیان میگردد :

۱ - منحنی را به قسمتهای صعودی و نزولی تقسیم میسازیم.

۲ - با قراردادن اولین قسمت بر روی منحنی های استاندارد ، منحنی نظیر آن بصورت  $I$  برای

$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 20$  بدست میآید. نقطه  $O_1$  که بر روی منحنی  $a$  با علامت  $\times$  نشان داده شده ، مختصات لایه اول را بدست میدهد.

$$\rho_1 = \frac{\rho_2}{20} \quad \text{و} \quad d_1 = 1.3 \quad \text{و} \quad a = 50 \text{ متر}$$

۳ - اکنون مبدأ کار را  $O_1$  در نظر گرفته و منحنی کمکی متناظر مقدار  $20 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$  را ترسیم  
میسازیم (منحنی  $II$ ).

۴ - مجددآ منحنی ترسیمی را بر روی منحنی های استاندارد قرار داده تا قسمت دوم آن مطابق شکل  
منظبق با یکی از آنها گردد، در چنین صورتی منحنی نقطه III بدست آمده و بعلاوه مبدأ مختصات  $O_2$

اندازه‌گیری شماره ۲  
تاریخ اندازه‌گیری ۷۴۱۰

پروفه زمین کردن

طول جغرافیائی "۵۷° ۲۳' ۵۵"	درجه حرارت ۲۹ر۲°C
عرض جغرافیائی ۴۴° ۳۰'	رطوبت٪ ۴۸
شهر: تهران (امیرآباد)	هوای آفتابی
جهت اندازه‌گیری ۴۵°	زمان اندازه‌گیری ۰۹۰۰—۱۲۰۰

a(m)	I(mA)	R(Ω)	K=2πa	Ω-m ρ=K.R	ملاحظات
۱	۲۰	۱۲۵۲	۶۰۲۸	۷۶۵۶۲	
۱۵	۱۱	۷۵	۹۰۴۲	۷۰۰۶۰	
۲	۹	۷۸	۱۲۰۵۶	۹۷۵۹۶۸	
۳	۹	۸۰	۱۸۰۸۴	۱۵۰۰۷۲۰	
۵	۱۰	۵۰	۳۱۰۴	۱۵۷۰۰	
۸	۱۳	۳۲	۵۰۰۲۴	۱۶۰۰۷۶	
۱۰	۷۳	۲۵	۶۲۰۸	۱۵۷۰۰	
۱۵	۶۸	۱۷	۹۴۰۲	۱۶۰۰۱۴	
۲۰	۱۱۵	۱۰۱۸	۱۲۰۵۶	۱۴۸۰۲۰۸	
۳۰	۱۴۴	۰۰۶۳	۱۸۸۰۴	۱۱۸۰۶۹۲	
۵۰	۱۹۰	۰۰۲۱۰	۳۱۴	۶۷۰۰۱۰	
۸۰	۱۹۲	۰۰۰۵	۵۰۰۲۴	۲۵۰۱۲۰	
۱۰۰					
۱۵۰					
۲۰۰					

رس ماسه‌ای ساختمان «خاله ساخت»

بخش اوت ساید پلنت

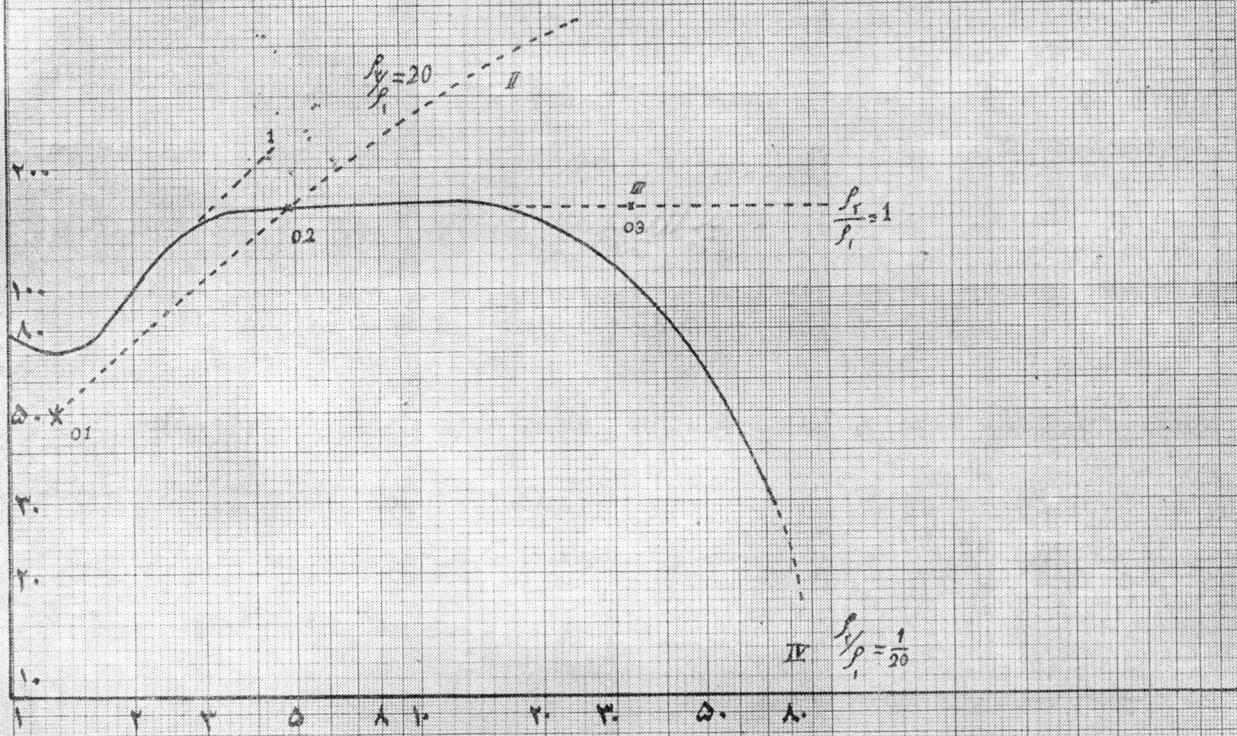
I. T. R. C.

جشن:

«ادت ساید پلٹس»

مشکل ۲۳۸

فاصلہ تکمیل فریہ کی مارک بحسب مکمل



فاصلہ a بحسب متر

محضی تغیرات a مارک بحسب فاصلہ

«منظص امیر آباد»

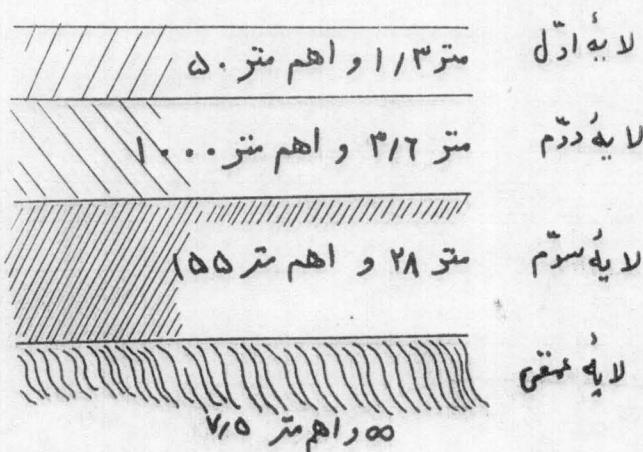
بر روی نقطه چون III نماینده مختصات لایه معادل بصورت زیر است :

$$\rho_{12} = 155 \text{ و متر } 9 \quad d_{12} = 4.9 \quad \text{و اهم متر } 55 \quad \frac{\rho_3}{\rho_{12}} = 1$$

بنابراین :

$$d_2 = 4.9 \quad \rho_3 = 155 \quad \text{و متر } 9$$

برای قسمت آخر، منحنی نقطه چون IV بدست آمده که درنتیجه توسط آن مبداء  $O_3$  معلوم میشود. از این رو زمین بصورت زیر مشخص میگردد.



شکل ۲۹ - منطقه امیرآباد (تهران) هوا آفتابی، درجه حرارت  $29^{\circ}\text{C}$

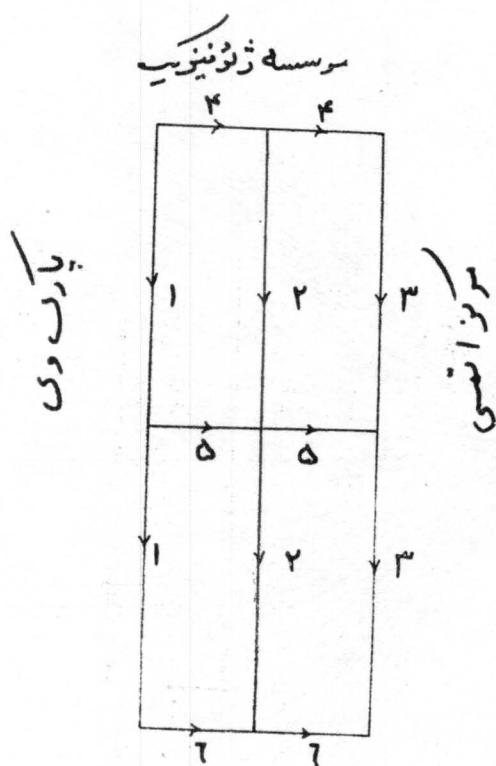
بطوریکه از شکل پیداست آبرفت‌های سطحی دارای مقاومت کم . ۵ اهم متر میباشد که این بخاطر تاثیر آفتاب و بالا رفت درجه حرارت لایه سطحی است.

بعکس تا عمق تقریبی ۳۳ متری با مقاومت‌های مخصوص زیاد رویرو بوده و تنها از این فاصله به پائین به منطقه اندازه‌های کم میرسیم.

برای شناخت بیشترخواص لایه‌ها لازم است که اندازه گیریهای بیشتری در این زمینه انجام گیرد.

در تابستان سال ۱۰ این بخش می‌جوابد . اندازه گیری الکتریکی در این منطقه انجام داده که جهت هر یک در شکل ۴ آورده شده است. حداکثر فاصله  $C_1 C_2$  در شماره‌های ۱ و ۲ و ۳ برابر . ۴ متر و در مورد . ۶ درحدود . ۹ متر میباشد.

اندازه گیریها در روزهای آفتابی با درجه حرارت متوسط  $27^{\circ}\text{C}$  و رطوبت نسبی ۴۹٪ در فاصله بین ساعات . ۹۰۰ . الی ۱۳۰۰ انجام پذیرفته است.



مرکز تحقیقات مخابرات ایران

شکل ۴۰ - مسیرهایی از اندازه‌گیریهای الکتریکی

با تفسیر کلی منحنی‌ها نتایج زیر حاصل شده است:

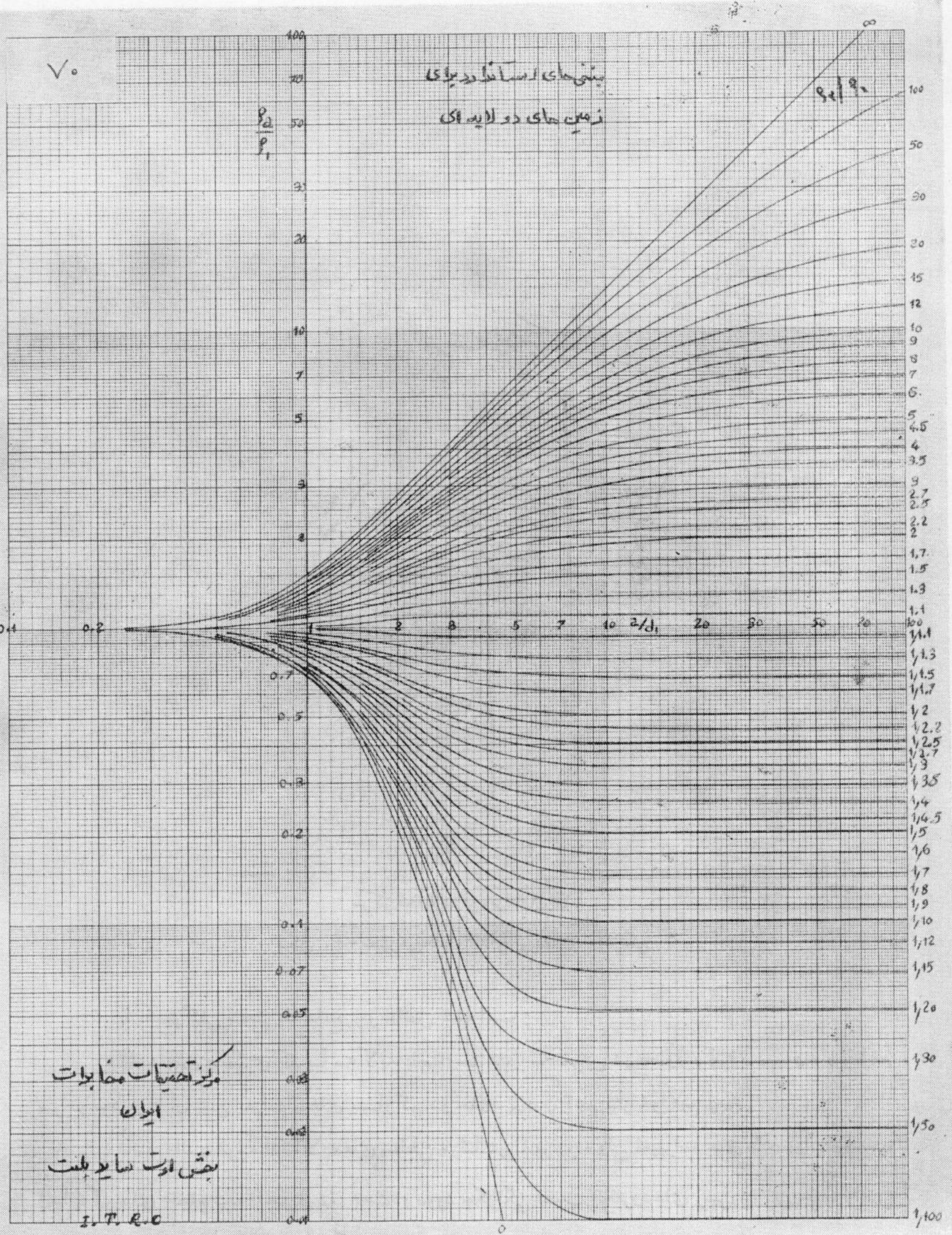
تسا عمق ۳۰ متری تقریباً سه لایه با مقاومت‌های مخصوص در حدود ۹۰۰، ۶۰۰ و ۱۵۰ اهم

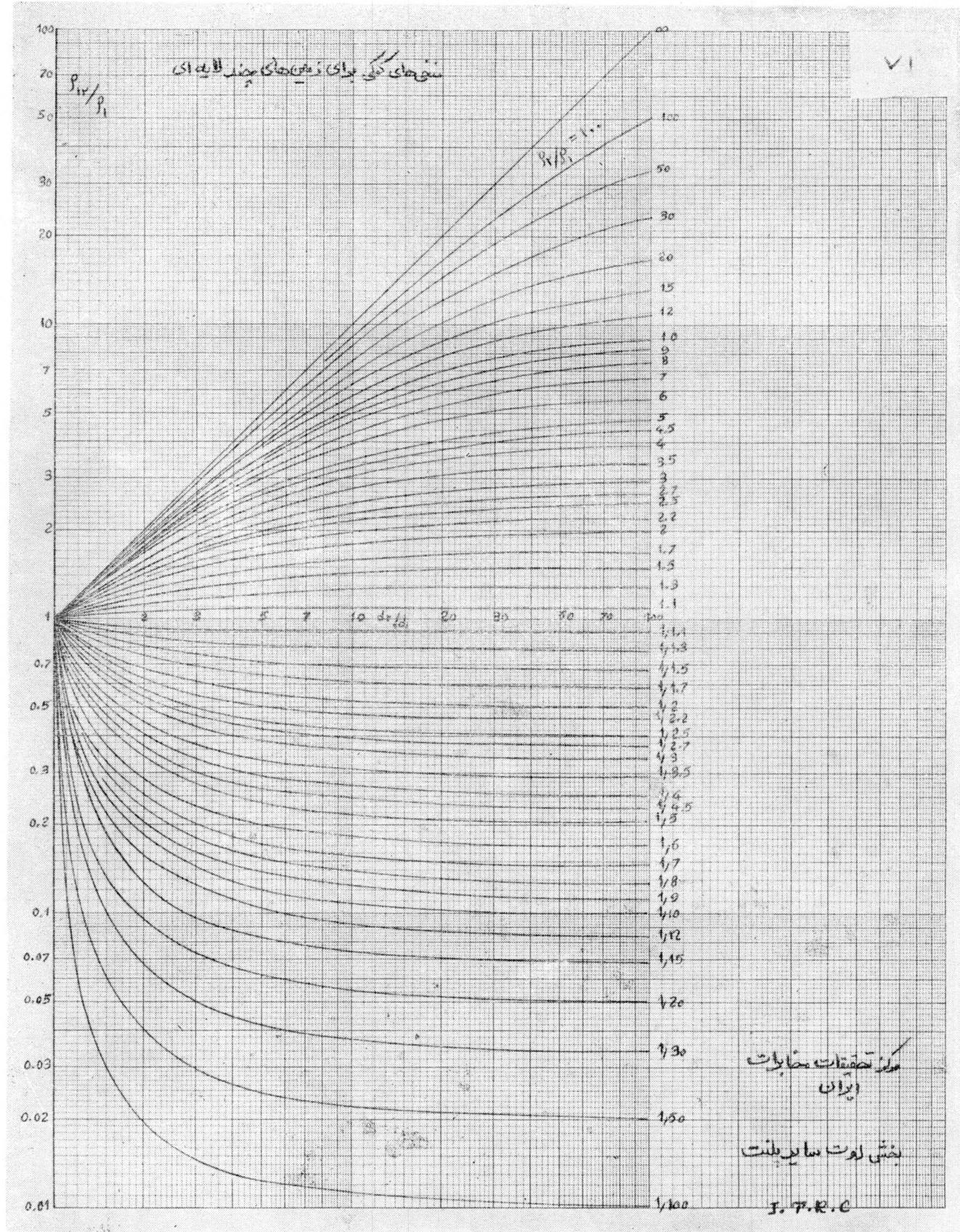
متر موجود و از آن پس به اندازه‌های بسیار کم در حدود ۸-۷ اهم متر خواهیم رسید.

نکته جالب توجه آنکه لایه‌های سطحی مرتب‌آ در تغییر بوده ولی تغییرات عمق‌های زیاد برحسب

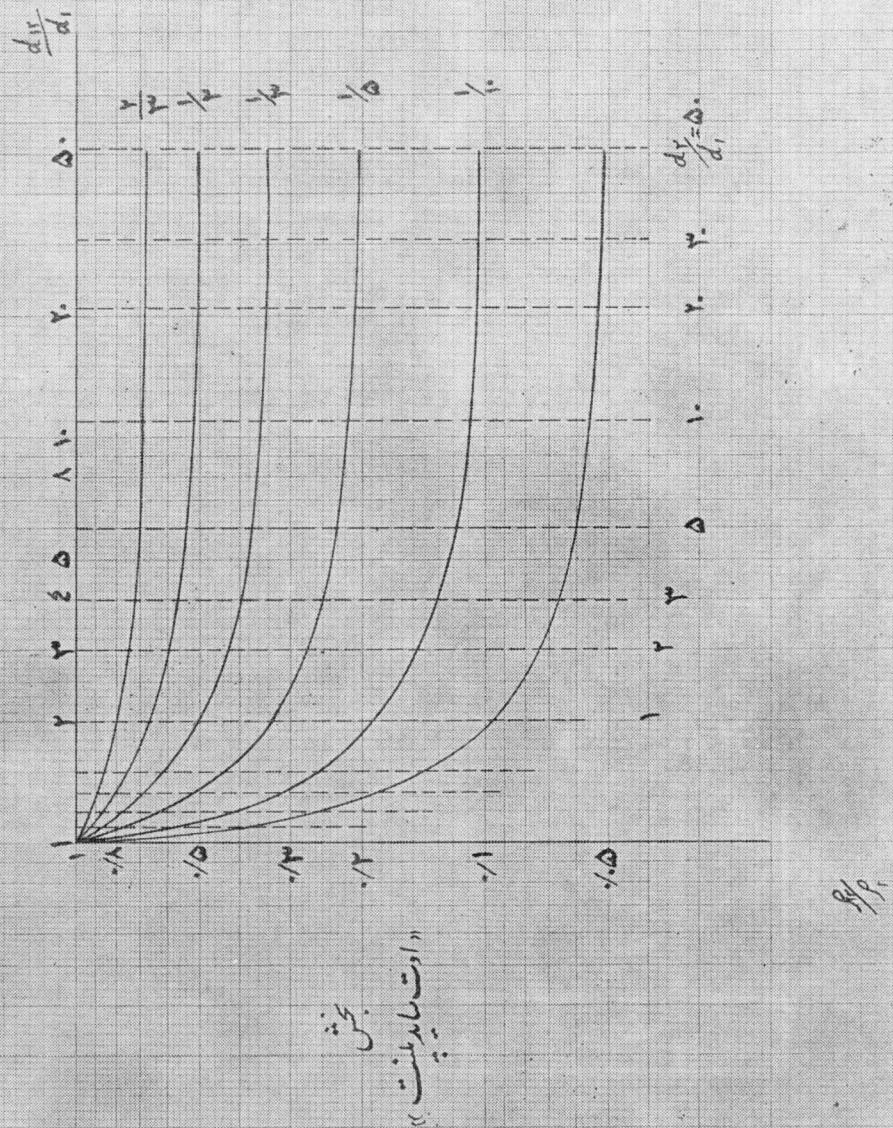
اندازه‌گیریهای انجام شده ناچیز است. بحث در مورد چگونگی نصب الکترود‌های زمین در این حوزه را پس

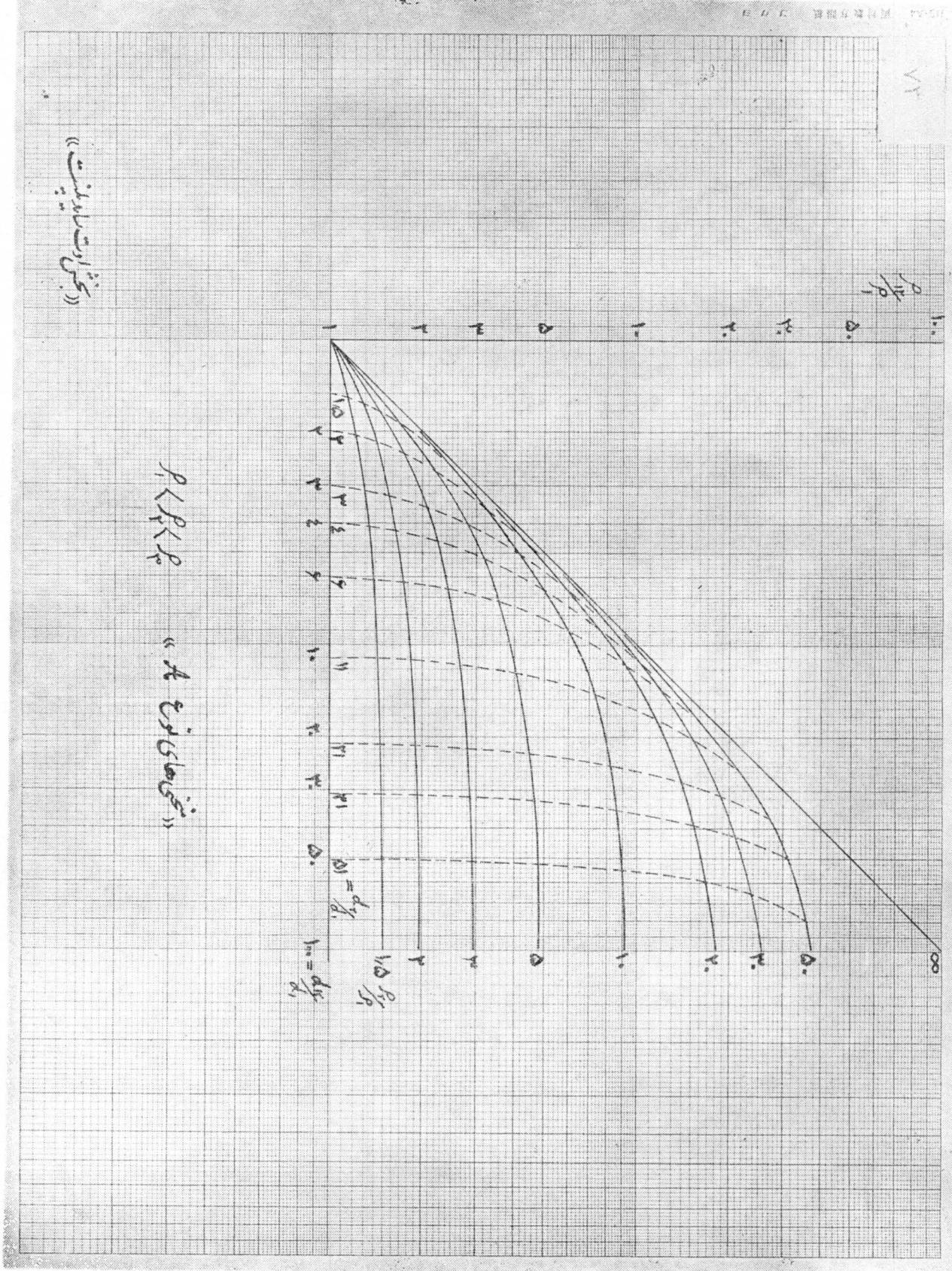
از شناخت فرمولها به مقالات آتی واگذار می‌سازیم.





محنی های مکانی نوع H سه بعدی

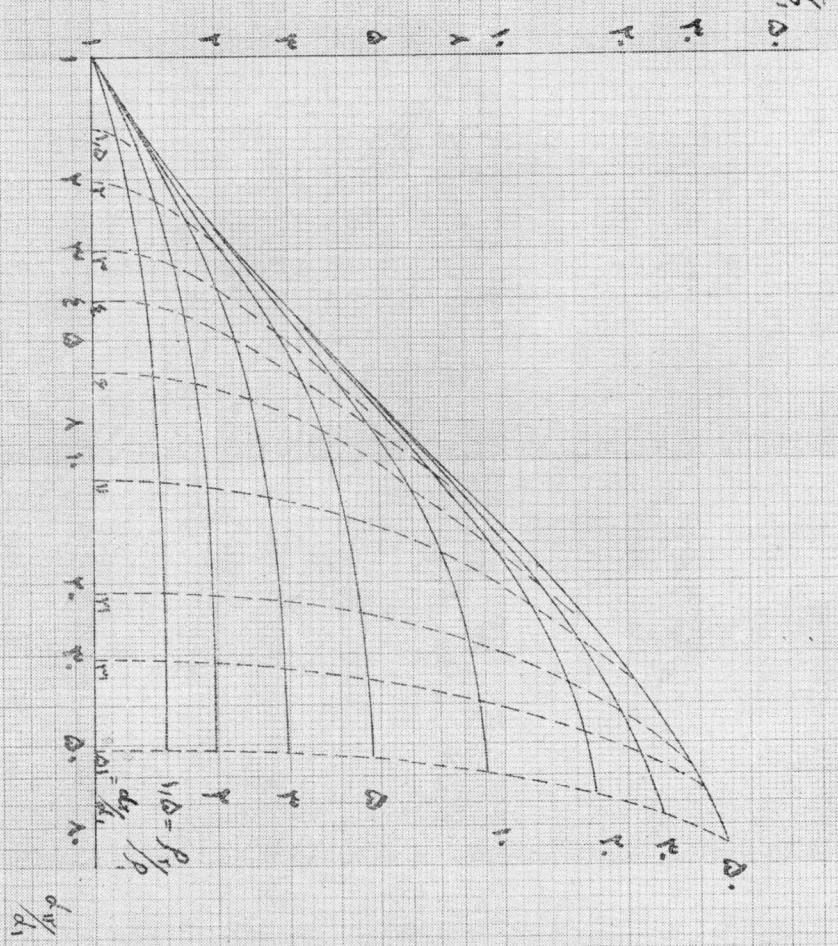


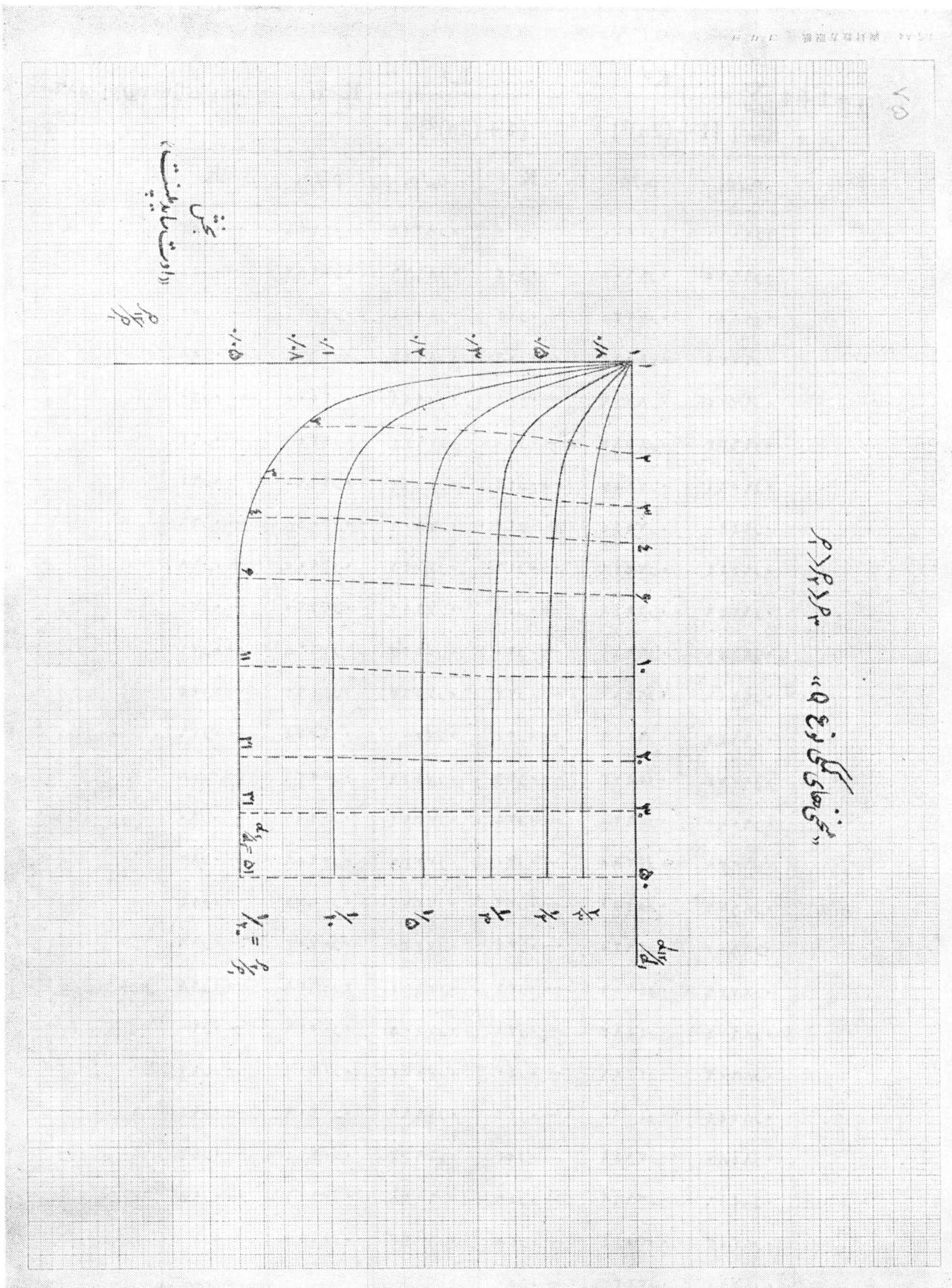


۷۳

«کشتار است سایه پست»

رک رک رک «کشتار است سایه پست»





$$\rho_a/\rho_1 = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{[1+(2n)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{K^n}{[4+(2n)^2]^{\frac{1}{2}}} K < 0 \text{ و } \frac{d}{a} = 1 \text{ بازای } \rho_a/\rho_1 \text{ محدود است}$$

$\rho_a/\rho_1$	$\rho_2/\rho_1$	K	$\rho_a/\rho_1$	$\rho_2/\rho_1$	K
۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰	۰۸۲۲۸	۰۳۱۰۸	-۰۵۲
۰۹۹۲۰	۰۹۶۰۸	-۰۰۲	۰۸۱۶۶	۰۲۹۸۷	-۰۵۴
۰۹۸۰۱	۰۹۲۳۱	-۰۰۴	۰۸۱۰۴	۰۲۸۲۱	-۰۵۶
۰۹۷۷۸	۰۸۸۶۸	-۰۰۶	۰۸۰۴۲	۰۲۶۵۸	-۰۵۸
۰۹۷۰۰	۰۸۰۱۹	-۰۰۸	۰۷۹۸۱	۰۲۵۰۰	-۰۶۰
۰۹۶۳۳	۰۸۱۸۲	-۰۱۰	۰۷۹۲۱	۰۲۳۴۶	-۰۶۲
۰۹۵۶۱	۰۷۸۰۷	-۰۱۲	۰۷۸۶۱	۰۲۱۹۰	-۰۶۴
۰۹۴۹۰	۰۷۵۴۴	-۰۱۴	۰۷۸۰۱	۰۲۰۴۸	-۰۶۶
۰۹۴۱۹	۰۷۲۴۱	-۰۱۶	۰۷۷۴۱	۰۱۹۰۰	-۰۶۸
۰۹۳۴۹	۰۶۹۴۹	-۰۱۸	۰۷۶۸۲	۰۱۷۶۰	-۰۷۰
۰۹۲۷۹	۰۶۶۶۷	-۰۲۰	۰۷۶۲۳	۰۱۶۲۸	-۰۷۲
۰۹۲۱۰	۰۶۲۹۳	-۰۲۲	۰۷۵۶۰	۰۱۴۹۴	-۰۷۴
۰۹۱۴۱	۰۶۱۲۹	-۰۲۴	۰۷۵۰۷	۰۱۳۶۴	-۰۷۶
۰۹۰۷۳	۰۵۸۷۳	-۰۲۶	۰۷۴۴۹	۰۱۲۳۶	-۰۷۸
۰۹۰۰۰	۰۵۶۲۰	-۰۲۸	۰۷۳۹۱	۰۱۱۱۱	-۰۸۰
۰۸۹۳۸	۰۵۳۸۵	-۰۳۰	۰۷۲۲۴	۰۰۹۸۹	-۰۸۲
۰۸۸۷۱	۰۵۱۰۲	-۰۳۲	۰۷۲۷۷	۰۰۸۷۰	-۰۸۴
۰۸۸۰۰	۰۴۹۲۰	-۰۳۴	۰۷۲۲۰	۰۰۷۰۳	-۰۸۶
۰۸۷۳۹	۰۴۷۰۶	-۰۳۶	۰۷۱۶۴	۰۰۶۳۸	-۰۸۸
۰۸۶۷۴	۰۴۴۹۳	-۰۳۸	۰۷۱۰۸	۰۰۵۲۶	-۰۹۰
۰۸۶۰۹	۰۴۲۸۶	-۰۴۰	۰۷۰۵۳	۰۰۴۱۷	-۰۹۲
۰۸۵۴۴	۰۴۰۸۵	-۰۴۲	۰۶۹۹۸	۰۰۳۰۹	-۰۹۴
۰۸۴۸۰	۰۳۸۸۹	-۰۴۴	۰۶۹۴۳	۰۰۲۰۴	-۰۹۶
۰۸۴۱۶	۰۳۶۹۹	-۰۴۶	۰۶۸۸۸	۰۰۱۰۱	-۰۹۸
۰۸۳۵۳	۰۳۵۱۴	-۰۴۸	۰۶۸۲۳	۰۰۰۰۰	-۱۰۰
۰۸۲۹۰	۰۳۲۳۳	-۰۵۰			

بخش اوت ساید پلنت

I.T.R.C.

$$\rho_a/\rho_1 = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{[1+(2n)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{K^n}{[4+(2n)^2]^{\frac{1}{2}}} K < 0 \text{ و } \frac{d}{a} = 1$$

مقادیر  $\rho_a/\rho_1$  بازای  $K$

$\rho_a/\rho_1$	$\rho_r/\rho_1$	$K$	$\rho_a/\rho_1$	$\rho_r/\rho_1$	$K$
۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰۰۰	۱۲۱۹۹	۳۱۶۶۷	۰۵۲
۱۰۰۷۵	۱۰۴۰۸	۰۰۲	۱۲۲۹۷	۳۱۴۷۸	۰۵۴
۱۰۱۰۱	۱۰۸۳۳	۰۰۴	۱۲۳۹۰	۳۱۶۰۰	۰۵۶
۱۰۲۲۸	۱۱۱۲۷۷	۰۰۶	۱۲۴۹۰	۳۱۷۶۱۹	۰۵۸
۱۰۳۰۰	۱۱۱۷۳۹	۰۰۸	۱۲۵۹۶	۴۰۰۰۰	۰۶۰
۱۰۳۸۲	۱۱۲۲۲۲	۰۱۰	۱۲۶۹۹	۴۱۲۶۲۲	۰۶۲
۱۰۴۶۱	۱۱۲۷۷۲۷	۰۱۲	۱۲۸۰۲	۴۱۵۰۵۶	۰۶۴
۱۰۵۲۰	۱۱۳۲۰۶	۰۱۴	۱۲۹۰۸	۴۱۸۸۲۴	۰۶۶
۱۰۶۲۰	۱۱۳۸۱۰	۰۱۶	۱۳۰۱۰	۵۰۲۵۰۰	۰۶۸
۱۰۷۰۰	۱۱۴۳۹۰	۰۱۸	۱۳۱۲۳	۵۱۶۶۷	۰۷۰
۱۰۷۸۲	۱۱۵۰۰۰	۰۲۰	۱۳۲۳۴	۶۱۴۲۹	۰۷۲
۱۰۸۶۴	۱۱۵۶۴۱	۰۲۲	۱۳۳۴۶	۶۱۶۹۲۳	۰۷۴
۱۰۹۴۷	۱۱۶۳۱۶	۰۲۴	۱۳۴۶۰	۷۱۳۳۳۲	۰۷۶
۱۱۰۳۰	۱۱۷۰۲۷	۰۲۶	۱۳۵۷۶	۸۰۹۰۹	۰۷۸
۱۱۱۱۰	۱۱۷۷۷۸	۰۲۸	۱۳۶۹۴	۹۰۰۰۰	۰۸۰
۱۱۱۲۰	۱۱۸۵۷۱	۰۳۰	۱۳۸۱۴	۱۰۰۱۱۱	۰۸۲
۱۱۱۲۸۶	۱۱۹۴۱۲	۰۳۲	۱۳۹۳۷	۱۱۰۰۰۰	۰۸۴
۱۱۱۳۷۳	۱۲۰۳۰۳	۰۳۴	۱۴۰۶۳	۱۲۰۲۸۰۷	۰۸۶
۱۱۱۴۶۱	۱۲۱۲۵۰	۰۳۶	۱۴۱۹۱	۱۳۰۶۶۷	۰۸۸
۱۱۱۵۰۰	۱۲۱۲۵۸	۰۳۸	۱۴۲۲۲	۱۴۰۰۰۰	۰۹۰
۱۱۱۶۲۹	۱۲۲۲۲	۰۴۰	۱۴۴۰۷	۲۴۰۰۰۰	۰۹۲
۱۱۱۷۳۰	۱۲۴۴۸۳	۰۴۲	۱۴۵۹۶	۲۲۰۳۲۳۲	۰۹۴
۱۱۱۸۲۲	۱۲۵۷۱۴	۰۴۴	۱۴۷۳۹	۴۹	۰۹۶
۱۱۱۹۱۰	۱۲۷۰۳۷	۰۴۶	۱۴۸۸۸	۹۹	۰۹۸
۱۱۲۰۰۸	۱۲۸۴۶۲	۰۴۸	۱۵۰۴۴	$\infty$	۱۰۰
۱۱۲۱۰۳	۳۰۰۰۰	۰۵۰			

بخش اوت ساید پلنت

I T R.C.

## مراجع

- ✓ – Electrical Methods in Geophysical Prospecting by : George V. Keller,  
Frank C. Frischknecht 1960
- ✓ – Earth Resistances G. F. TAGG 1964
- ✓ – 2nd Draft of Hanbook on Earthing C. C. I. T. T. 1971
- ✓ – Directive (C.C.I.T.T.) 1963
- ✓ – Earthing (B.S.I.) 1965
- ✓ – Earth Conduction Effects in Transmission Systems by : Erling  
D. Sunde 1968
- ✓ – The Physics of Rocks V. Rzhev Sky, G. Novik 1971