

بنام خداوند منعال

وزارت علوم تحقیقات و فناوری  
دانشگاه صنعتی شاهرود  
حوزه معاونت پژوهشی و فناوری

گزارش پایانی طرح پژوهشی

عنوان طرح:

مزیت استفاده از روش مقاومت مخصوص تجمعی  
بر روش بکارگیری منحنی‌های استاندارد در تفسیر  
سونداژهای الکتریکی

مجری طرح:

دکتر ایرج پیروز

کد طرح: ۱۱۰۶

سال: ۱۳۸۲

## ”مزیت استفاده از روش مقاومت مخصوص تجمعی بر روش بکارگیری منحنی‌های

### استاندارد در تفسیر سونداژهای الکتریکی“

#### چکیده

این گزارش نتیجه طرح پژوهشی با عنوان ”مزیت استفاده از روش مقاومت مخصوص تجمعی بر روش بکارگیری منحنی‌های استاندارد در تفسیر سونداژهای الکتریکی“ است که در تاریخ ۸۲/۷/۱۳ به تصویب شورای پژوهشی دانشگاه رسیده است.

متداولترین روش تفسیر منحنی‌های سونداژ الکتریکی در مملکت ما، روش استفاده از منحنی‌های استاندارد می‌باشد. ولی بکارگیری این روش دارای یک محدودیت جدی می‌باشد که متاسفانه در هنگام بکارگیری روش مذکور کمتر به آن توجه می‌شود و همین امر منجر به تفسیر غلط نتایج می‌گردد. در این پژوهش علل وجود محدودیت فوق‌الذکر مورد مطالعه قرار می‌گیرد و بعنوان راه حل، روش مقاومت مخصوص تجمعی پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق بطور تئوری و عملی (اندازه‌گیریهای صحرائی) نشان داده می‌شود که روش مقاومت مخصوص تجمعی علاوه بر اینکه دارای محدودیت فوق‌الذکر نمی‌باشد، از نظر تفسیر، روشی ساده، دقیق و مطمئن می‌باشد.

از مزیت‌های دیگر این روش این است که این روش نیاز به نرم‌افزارهایی که دارای قفل می‌باشند و همراه با دستگاههای

اندازه‌گیری گران‌قیمت باید از خارج از کشور خریداری شوند، را ندارد.

## فهرست مطالب

|                       |      |
|-----------------------|------|
| عنوان ۱               | صفحه |
| چکیده                 | الف  |
| تشکر و قدردانی        | ب    |
| فهرست مطالب           | پ    |
| لیست علائم و اختصارات | ت    |
| مقدمه                 | ۱    |

### فصل اول

|   |    |
|---|----|
| ۱- محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد در تفسیر سونداژهای الکتریکی                          | ۲  |
| ۱-۱- محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد برای وضعیت دو لایه افقی                            | ۲  |
| ۱-۲- محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد برای وضعیت سه لایه افقی و یا بیشتر از سه لایه افقی | ۱۰ |

### فصل دوم

|   |    |
|---|----|
| ۲- برقراری رابطه بین موثرترین فاصله الکترودی و عمق اکتشاف | ۱۱ |
| ۲-۱- تعریف موثرترین فاصله الکترودی                        | ۱۱ |
| ۲-۲- تعریف عمق اکتشاف                                     | ۱۳ |
| ۲-۳- رابطه بین موثرترین فاصله الکترودی AB و عمق اکتشاف Z  | ۱۴ |

### فصل سوم

|  |    |
|--|----|
| ۳- معرفی روش مقاومت مخصوص الکتریکی تجمعی | ۱۸ |
|--|----|

### فصل چهارم

|                          |    |
|--------------------------|----|
| ۴- اندازه‌گیریهای صحرائی | ۲۲ |
|--------------------------|----|

### فصل پنجم

|   |    |
|---|----|
| ۵- تفسیر نمودارهای حاصله                | ۲۶ |
| ۵-۱- تفسیر منحنی‌های مقاومت مخصوص ظاهری | ۲۶ |
| ۵-۲- تفسیر منحنی‌های مقاومت مخصوص تجمعی | ۲۶ |

### فصل ششم

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| ۶- بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات | ۲۹ |
| مراجع                          | ۳۰ |
| پیوست شماره ۱                  | ۳۱ |
| پیوست شماره ۲                  | ۴۰ |

## فهرست علائم و اختصارات

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| $a =$                          | فاصله الکترودی در آرایش ونر                                    |
| $A =$                          | الکتروود جریان قطب مثبت  |
| $A_1 =$                        | تصویر $A$ نسبت به فصل مشترك لایه اول و دوم                     |
| $A_2 =$                        | تصویر $A_1$ نسبت به فصل مشترك سطح زمین و هوا                   |
| $A_3 =$                        | تصویر $A_2$ نسبت به فصل مشترك لایه اول و دوم                   |
| $A_4 =$                        | تصویر $A_3$ نسبت به فصل مشترك سطح زمین و هوا                   |
| $B =$                          | الکتروود جریان قطب منفی  |
| $h_1 =$                        | ضخامت لایه اول   |
| $h_2 =$                        | ضخامت لایه دوم   |
| $h_m =$                        | ضخامت لایه $m$ ام  |
| $I =$                          | شدت جریان الکتریکی   |
| $j_0 =$                        | مؤلفه افقی چگالی جریان (در امتداد محور $x$ ها) در عمق $Z=0$    |
| $j_x =$                        | مؤلفه افقی چگالی جریان (در امتداد محور $x$ ها) در عمق معین $Z$ |
| $k =$                          | ضریب بازتاب مربوط به لایه اول و لایه دوم                       |
| $k_a =$                        | ضریب بازتاب مربوط به لایه اول و هوا                            |
| $L =$                          | فاصله بین الکتروود جریان $A$ و الکتروود جریان $B$              |
| $m =$                          | نصف تعداد کل تصویرهای چشمه الکتریکی                            |
| $M =$                          | الکتروود اندازه گیری پتانسیل                                   |
| $n =$                          | تعداد لایه ها  |
| $N =$                          | الکتروود اندازه گیری پتانسیل                                   |
| $r =$                          | فاصله الکتروود جریان تا الکتروود اندازه گیری پتانسیل           |
| $r_1 =$                        | فاصله $A_1$ و یا $A_2$ تا $M$                                  |
| $r_2 =$                        | فاصله $A_3$ و یا $A_4$ تا $M$                                  |
| $S_A = \frac{I\rho_1}{2\pi} =$ | قدرت چشمه الکتریکی مربوط به $A$                                |
| $V =$                          | پتانسیل الکتریکی   |
| $V_1 =$                        | پتانسیل حاصل از $A_1$ در $M$                                   |
| $V_2 =$                        | پتانسیل حاصل از $A_2$ در $M$                                   |
| $V_3 =$                        | پتانسیل حاصل از $A_3$ در $M$                                   |
| $V_4 =$                        | پتانسیل حاصل از $A_4$ در $M$                                   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $x =$           | محور افقی در دستگاه مختصات قائم                  |
| $y =$           | محور عمودی در دستگاه مختصات قائم                 |
| $z =$           | محور عمق (عمود بر سطح زمین، جهت مثبت بطرف پایین) |
| $Z =$           | فاصله از سطح زمین                                |
| $\rho =$        | مقاومت مخصوص الکتریکی                            |
| $\rho_1 =$      | مقاومت مخصوص الکتریکی لایه اول                   |
| $\rho_2 =$      | مقاومت مخصوص الکتریکی لایه دوم                   |
| $\rho_3 =$      | مقاومت مخصوص الکتریکی لایه سوم                   |
| $\rho_m =$      | مقاومت مخصوص الکتریکی لایه $m$ ام                |
| $\rho_\infty =$ | مقاومت مخصوص الکتریکی هوا                        |
| $\pi =$         | عدد پی برابر 3.14                                |
| $\Delta V =$    | اختلاف پتانسیل الکتریکی بین $N$ و $M$            |
| $\Delta V_i =$  | اختلاف پتانسیل ایجاد شده در لایه $i$ ام          |

## مقدمه

با توجه به اینکه کشور ما در مجموع یک سرزمین خشک و کم آب می‌باشد و با عنایت به اینکه ارزانترین روش جهت اکتشاف منابع آبهای زیرزمینی، روش سونداژ الکتریکی می‌باشد و این روش همچنین در مهندسی عمران نیز کاربرد وسیعی دارد که از آن جمله می‌توان محاسبه عمق سنگ کف و ضخامت رو لایه را نام برد که در محل احداث سدهای آب، پلهای بزرگ و شهرسازی و غیره مورد نیاز می‌باشد، لذا دسترسی به یک روش تفسیر سونداژهای الکتریکی که اطلاعات صحیح را در اختیار مفسر قرار دهد، کاملاً ضروری می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش، دسترسی به یک روش تفسیر می‌باشد که شامل کلیه موارد زیر باشد:

۱- بکارگیری آن دارای محدودیت نباشد.

۲- استفاده از آن ساده، دقیق و مطمئن باشد.

۳- پردازش داده‌ها در آن روش نیازی به نرم‌افزارهای گران‌قیمت و قفل‌دار که از خارج از کشور خریداری می‌شوند، نداشته باشد.

مجری این طرح پژوهشی، اولین کسی است در ایران که مزیت استفاده از روش مقاومت مخصوص تجمعی بر روش بکارگیری منحنی‌های استاندارد در تفسیر سونداژهای الکتریکی را معرفی نموده است.

در این پژوهش، نخست، توسط روابط ریاضی، محدودیت استفاده از منحنی‌های استاندارد نشان داده شده است، سپس رابطه بین مؤثرترین فاصله الکترودهای جریان و عمق اکتشاف، مورد بررسی قرار گرفته است. این رابطه، میانگینی است از نتایج حاصله از مدل‌های مختلف تئوری و فیزیکی. صحت این رابطه با کمک اندازه‌گیریهای صحرایی که در نزدیک یک چاه آب انجام شده است به اثبات رسیده است. اندازه‌گیریهای اخیرالذکر شامل دو سونداژ الکتریکی با آرایش ونر می‌باشند که در دو امتداد عمود بر هم انجام شده‌اند. بررسیهای انجام شده نشان می‌دهند که تفسیر صحیح نتایج بدست آمده از طریق بکارگیری منحنی‌های استاندارد، بعلت عدم تطابق ضخامت لایه‌های زمین اندازه‌گیری شده با پیش‌فرض‌های مورد نیاز مربوط به منحنی‌های استاندارد، امکان‌پذیر نمی‌باشد. ولی تفسیر نتایج بدست آمده از طریق بکارگیری روش مقاومت مخصوص تجمعی، ضخامت هر لایه و تغییرات نسبی مقاومت مخصوص این لایه‌ها را نشان می‌دهد.

## فصل اول

### ۱- محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد در تفسیر سونداژهای الکتریکی

#### ۱-۱- محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد برای وضعیت دو لایه افقی

برای تفسیر منحنی‌های سونداژ حاصل از زمینی که از دو لایه افقی تشکیل شده است، از مجموعه‌ای از منحنی‌های استاندارد که برای وضعیت دو لایه افقی محاسبه شده‌اند، استفاده می‌گردد.

به منظور نشان دادن محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد در تفسیر سونداژهای الکتریکی، نخست می‌بایستی معادلاتی که توسط آنها این منحنی‌ها ترسیم می‌گردند را مورد مطالعه قرار دهیم و بررسی نماییم که اصولاً با چه پیش‌فرض‌هایی این معادلات توسعه داده شده‌اند؟

بنابراین، با وجود اینکه نحوه توسعه این معادلات و طرز استفاده از منحنی‌های فوق‌الذکر در بعضی از مراجع آورده شده است، ولی به منظور نشان دادن محدودیت فوق‌الذکر، لازم است که نحوه توسعه معادلات مذکور و طرز استفاده از منحنی‌های یاد شده، در زیر مورد مطالعه قرار داده می‌شوند:

مطابق شکل (۱-۱) چشمه نقطه‌ای جریان الکتریکی  $A$  و نقطه پتانسیل  $M$  را در فاصله  $r$  از آن در روی سطح زمین در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که این زمین از دو لایه افقی تشکیل شده است. لایه رویی، همگن و ایزوتروپ و دارای مقاومت مخصوص الکتریکی  $\rho_1$  و ضخامت  $h_1$  می‌باشد.

لایه زیری، همگن و ایزوتروپ و دارای مقاومت مخصوص الکتریکی  $\rho_2$  و ضخامت بینهایت می‌باشد. در حقیقت بخاطر وجود هوا در روی سطح زمین، سه محیط وجود دارد که توسط دو فصل مشترک از یکدیگر جدا می‌شوند. طبق نظریه تصویر می‌توانیم موارد زیر را بیان نماییم:

تصویر  $A$  نسبت به فصل مشترک دو لایه فوق‌الذکر  $A_1$  می‌باشد.

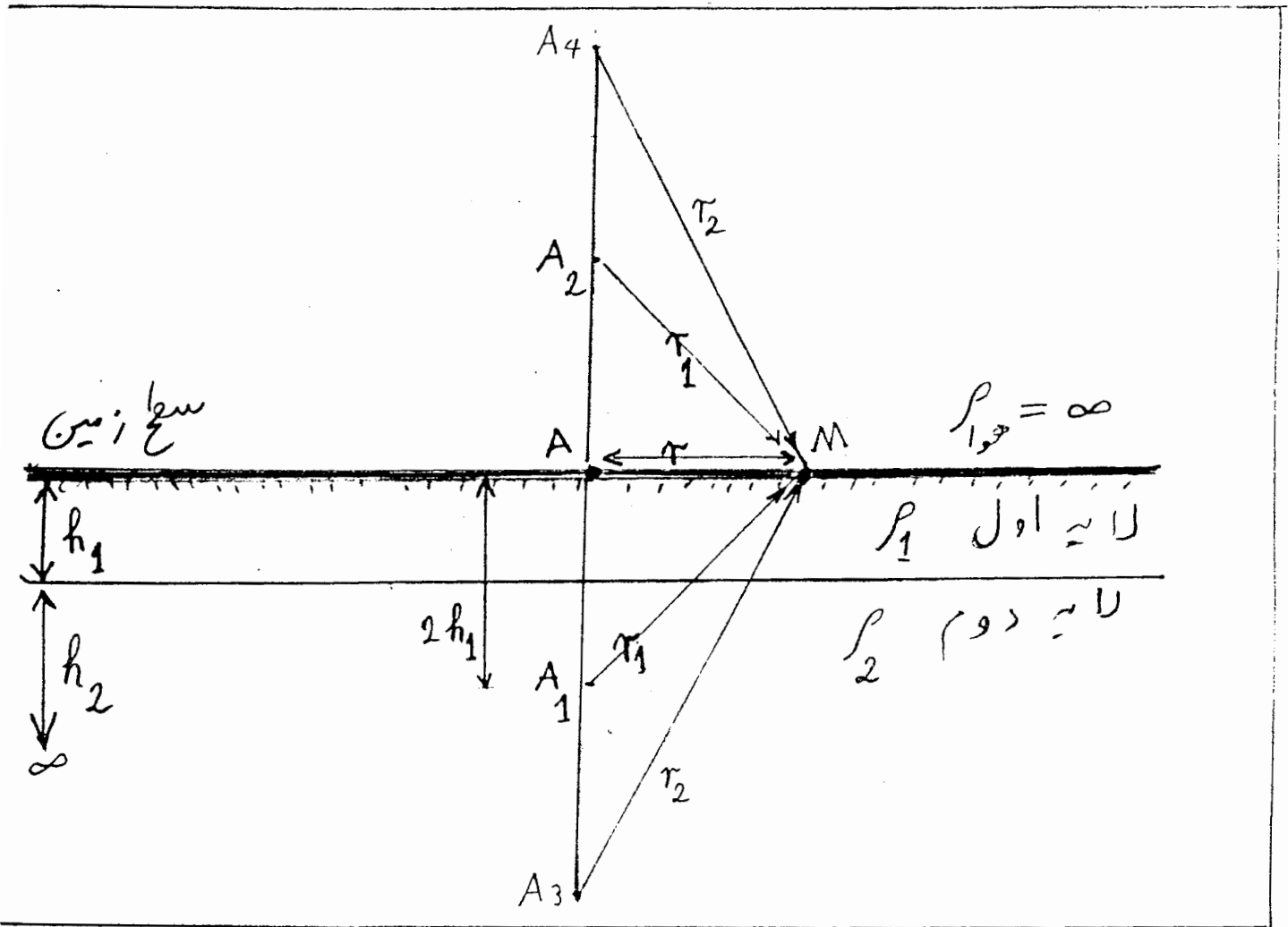
تصویر  $A_1$  نسبت به فصل مشترک دو لایه فوق‌الذکر در روی خود  $A$  واقع می‌شود.

تصویر  $A_1$  نسبت به فصل مشترک زمین و هوا  $A_2$  می‌باشد.

تصویر  $A_2$  نسبت به فصل مشترک دو لایه فوق‌الذکر  $A_3$  می‌باشد.



در نتیجه مطابق شکل (۱-۱) تعداد بینهایت تصویر چشمه، در بالا و پایین الکتروود جریان A به وجود می آید.



شکل ۱-۱- چشمه الکتریکی A و تصویرهای آن که از دو لایه افقی حاصل می شوند.

در صورتیکه زمین فقط از لایه اول تشکیل شده باشد، پتانسیل در M از رابطه زیر بدست می آید:

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1-1)$$

I مقدار جریان الکتریکی می باشد که توسط چشمه A به داخل زمین تزریق می شود. در رابطه (۱-۱) مقدار  $\frac{I\rho_1}{2\pi}$  را قدرت

چشمه A می نامیم و آنرا با  $S_A$  نمایش می دهیم. بنابراین رابطه (۱-۱) بصورت زیر در می آید:

$$V = S_A \cdot \frac{1}{r}$$

حال اگر اولین تصویر چشمه A را نسبت به فصل مشترک دو لایه،  $A_1$  بنامیم و فاصله این تصویر تا نقطه M برابر  $r_1$  باشد،

پتانسیل حاصل از  $A_1$  در نقطه M از رابطه (۱-۲) بدست می آید:

$$V_1 = S_A \cdot k \cdot \frac{1}{r_1} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot \frac{k}{r_1} \quad (1-2)$$

k ضریب بازتاب مربوط به فصل مشترک دو لایه مذکور می باشد. (یعنی باید قدرت چشمه A را در ضریب بازتاب، ضرب

و بر فاصله  $A_1$  تا M تقسیم نمود). بنابراین جمع پتانسیل های حاصل از چشمه A و اولین تصویر آن از رابطه (۱-۳) بدست می آید.

$$V + V_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{k}{r_1} \right) \quad (1-3)$$

$A_1$  نسبت به فصل مشترک سطح زمین و هوا دارای تصویر  $A_2$  می باشد که پتانسیل حاصل از آن در نقطه M طبق رابطه

$$(1-4) \text{ عبارت است از قدرت چشمه } A_1 \text{ یعنی } \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot k \text{، ضربدر ضریب بازتاب، تقسیم بر فاصله } r_1 \text{.}$$

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot k \cdot \frac{k_a}{r_1} \quad (1-4)$$

در رابطه (۱-۴)،  $k_a$  ضریب بازتاب مربوط به لایه اول و هوا می باشد که از رابطه (۱-۵) بدست می آید:

$$k_a = \frac{\rho_\infty - \rho_1}{\rho_\infty + \rho_1} \quad (1.5)$$

( $\rho_\infty$  = مقاومت مخصوص هوا)

و چون مقاومت مخصوص هوا بینهایت می باشد، از رابطه (1.5) رابطه (1.6) حاصل می شود.

$$k_a = \frac{\rho_\infty \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_\infty}\right)}{\rho_\infty \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_\infty}\right)} \quad (1.6)$$

بنابراین از رابطه (1.4) رابطه (1.7) حاصل می شود:

$$V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot \frac{k}{r_1} \quad (1.7)$$

پتانسیل موثر بر نقطه M در اینصورت از رابطه (1.8) بدست می آید:

$$V + V_1 + V_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{2k^1}{r_1} \right) \quad (1.8)$$

A<sub>2</sub> نسبت به فصل مشترک دو لایه مذکور دارای تصویر A<sub>3</sub> می باشد که پتانسیل حاصل از آن در نقطه M برابر V<sub>3</sub>

می باشد و بالاخره A<sub>3</sub> نسبت به فصل مشترک سطح زمین و هوا دارای تصویر A<sub>4</sub> می باشد که پتانسیل حاصل از آن در نقطه M

برابر V<sub>4</sub> می باشد. مجموع این دو پتانسیل اخیرالذکر از رابطه (1.9) بدست می آید.

$$\begin{aligned}
 V_3 + V_4 &= \frac{I\rho_1 k}{2\pi} \cdot \frac{k}{r_2} + \frac{I\rho_1 k k}{2\pi} \cdot \frac{k_a}{r_2} = \\
 &= \frac{I\rho_1}{2\pi} \left( \frac{k^2}{r_2} + \frac{k^2}{r_2} \right) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot \frac{2k^2}{r_2}
 \end{aligned} \tag{۱-۹}$$

بنابراین از الکتروود جریان A و از بینهایت تصویر چشمه که در بالا و پایین این الکتروود به وجود می‌آیند، در نقطه M یک پتانسیل کل حاصل می‌گردد که توسط رابطه (۱-۱۰) محاسبه می‌شود.

$$V_M = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{2k^1}{r_1} + \frac{2k^2}{r_2} + \dots + \frac{2k^m}{r_m} + \dots \right) \tag{۱-۱۰}$$

عدد m برابر نصف تعداد تصویرهای چشمه می‌باشد که کلاً در بالا و پایین الکتروود جریان A به وجود می‌آیند. نکته مهمی که می‌بایستی در اینجا به آن توجه نمود این است که رابطه (۱-۱۰) با این پیش فرض بدست آمده است که ضخامت لایه زیری بینهایت باشد. این پیش فرض با آنچه که حقیقتاً در طبیعت وجود دارد به ندرت مطابقت می‌نماید. این موضوعی است که متأسفانه در مراجعی که روابط فوق‌الذکر را توسعه داده‌اند، بر روی آن تأکید نگردیده است. چون اگر ضخامت لایه زیری بینهایت فرض نشود، بلکه برای آن ضخامتی در حدود لایه رویی آن در نظر گرفته شود، در این صورت فصل مشترک بین لایه دوم و لایه سوم نیز وارد عمل می‌شود که این خود باعث می‌شود که تعداد تصاویر چشمه الکتریکی بوجود آمده و تعداد ضرایب بازتاب نیز افزایش یابند.

بنابراین، دیگر نمی‌توان برای محاسبه دقیق پتانسیل کل حاصله، از رابطه (۱-۱۰) استفاده نمود. این نقیصه، محدودیت استفاده از این معادله را نشان می‌دهد. ولی علیرغم این نقیصه، در مراجع، برای ترسیم منحنی‌های استاندارد (برای وضعیت دو لایه افقی) از معادله (۱-۱۰) استفاده شده است که در زیر بطور مختصر شرح داده می‌شود:

در رابطه (۱-۱۰) برای  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_m$  می‌توان مقادیر زیر را در نظر گرفت:

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (2h_1)^2} \tag{۱-۱۱}$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (4h_1)^2} \quad (1-12)$$

$$r_m = \sqrt{r^2 + (2mh_1)^2} = r \cdot \sqrt{1 + \left(2m \frac{h_1}{r}\right)^2} \quad (1-13)$$

با استفاده از روابط (1-13)، (1-12) و (1-11) می‌توان رابطه (1-10) را بصورت زیر نوشت:

$$V_M = \frac{I\rho_1}{2\pi r} \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{k^m}{\sqrt{1 + \left(2m \frac{h_1}{r}\right)^2}} \right] \quad (1-14)$$

حال اگر در شکل (1-1) در سطح زمین، علاوه بر الکتروود جریان A (قطب مثبت)، الکتروود جریان B (قطب منفی) و همچنین علاوه بر نقطه M، نقطه N را جهت اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  بین نقاط M و N در نظر بگیریم، پتانسیل در هر یک از نقاط M و N، از جمع پتانسیل‌های حاصل از الکتروودهای جریان A و B و همچنین از تصویرهای چشمه مربوط به آنها حاصل می‌شود. این اختلاف پتانسیل برای آرایش ونر از رابطه زیر بدست می‌آید [1]:

$$\Delta V = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \left[ 1 + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{k^m}{\sqrt{1 + \left(2m \frac{h_1}{a}\right)^2}} - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{k^m}{\sqrt{1 + \left(m \frac{h_1}{a}\right)^2}} \right] \quad (1-15)$$

در این رابطه a برابر با فاصله الکتروودی در آرایش ونر می‌باشد. لازم به تذکر است که محدودیت ذکر شده برای رابطه

(1-10) برای  $\Delta V$  بدست آمده از رابطه (1-15) نیز وجود دارد.

در رابطه (1-15) اگر مقدار داخل کروشه را برابر I+D قرار دهیم، می‌توانیم این رابطه را بصورت ساده شده زیر بنویسیم:

$$\Delta V = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + D] \quad (1-16)$$

با توجه به اینکه مقدار مقاومت مخصوص ظاهری برای آرایش ونر از رابطه زیر بدست می آید [۱]:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi a \quad (1-17)$$

با قرار دادن مقدار  $\Delta V$  از رابطه (۱-۱۶) در رابطه (۱-۱۷) حاصل می گردد:

$$\rho_a = \frac{\frac{\rho_1 I}{2\pi a} [1 + D]}{I} \cdot 2\pi a$$

$$\rho_a = \rho_1 [1 + D] \quad (1-18)$$

از رابطه (۱-۱۸) حاصل می شود:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + D \quad (1-19)$$

بعد از لگاریتم گرفتن از طرفین این رابطه خواهیم داشت:

$$\log \frac{\rho_a}{\rho_1} = \log(1 + D) \quad (1-20)$$

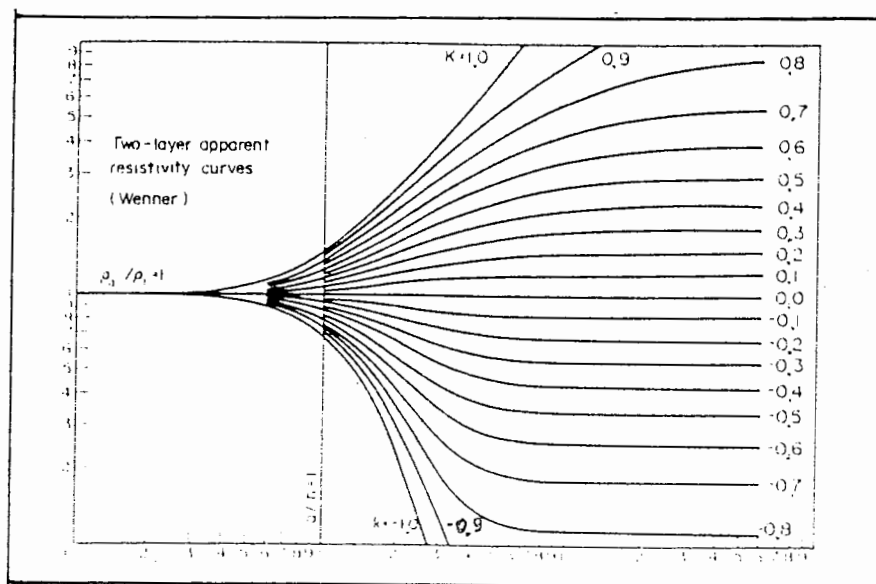
D در رابطه (۱-۲۰) شامل  $h_1$ ،  $k$  و  $a$  می باشد.

برای ترسیم نمودن منحنی‌های استاندارد (و یا منحنی‌های سر)، برای  $k$  در رابطه (۱-۲۰) یک مقدار ثابت در نظر می‌گیرند

و برای مقادیر مختلف  $\frac{a}{h_1}$ ، مقادیر  $\frac{\rho_a}{\rho_1}$  را محاسبه می‌نمایند و نتیجه را در روی دستگاه مختصات قائم با

محورهای لگاریتمی مضاعف رسم می‌نمایند. مجموعه‌ای از منحنی‌های استاندارد که با آرایش و نر برای وضعیت دو لایه افقی

توسط رابطه (۱-۲۰) محاسبه شده‌اند در شکل (۱-۲) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱-۲) مجموعه‌ای از منحنی‌های استاندارد که با آرایش و نر برای وضعیت دو لایه افقی محاسبه شده‌اند.

چون برای محاسبه و رسم منحنی‌های استاندارد نشان داده شده در شکل (۱-۲) از مقاومت مخصوص ظاهری  $\rho_a$  مذکور

در رابطه (۱-۱۷) استفاده شده است و از طرفی این مقاومت مخصوص رابطه مستقیم با مقدار اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  دارد که از رابطه

(۱-۱۵) حاصل می‌گردد و همانگونه که در ذیل رابطه (۱-۱۵) توضیح داده شده است، محدودیت مورد بحث، برای رابطه (۱-۱۵)

نیز وجود دارد، بنابراین برای منحنی‌های استاندارد شکل (۱-۲) نیز این محدودیت صادق می‌باشد. همچنین این محدودیت نیز برای

مجموعه‌ای از منحنی‌های استاندارد که با آرایش شلومبرگر برای وضعیت دو لایه افقی محاسبه می‌شوند وجود دارد.

## ۲-۱- محدودیت استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد برای وضعیت سه لایه افقی و یا بیشتر از سه

### لایه افقی

برای تفسیر منحنی‌های سونداژ حاصل از زمینی که از سه لایه افقی و یا بیشتر از سه لایه افقی تشکیل شده است، معمولاً از روش "تطابق جزئی منحنی" استفاده می‌گردد. برای این منظور از مجموعه منحنی‌های استاندارد که برای وضعیت دو لایه افقی محاسبه شده‌اند، استفاده می‌شود. من باب مثال، اگر این منحنی سونداژ حاصل از زمینی باشد که از سه لایه افقی تشکیل شده است، نخست، قسمت منتهی‌الیه سمت چپ این منحنی را یک منحنی سونداژ حاصل از زمین دو لایه افقی فرض می‌کنیم و آنرا با استفاده از بکارگیری منحنی‌های استاندارد فوق‌الذکر تفسیر می‌نماییم که از این طریق لایه اول و دوم تفسیر می‌شوند. محدودیت بکارگیری منحنی‌های استاندارد که در قسمت ۱-۱ از این فصل نشان داده شده است، در اینجا نیز صادق می‌باشد.

به منظور تفسیر مابقی منحنی سونداژ که در سمت راست قسمت فوق‌الذکر قرار دارد، می‌توان آن قسمت را نیز مانند یک وضعیت دو لایه افقی در نظر گرفت که متشکل از یک لایه معادل که در رو قرار دارد و لایه سوم که در زیر لایه معادل قرار دارد، می‌باشد. در اینجا لایه معادل جایگزین لایه اول و دوم شده است. وضعیت دو لایه افقی اخیرالذکر نیز با بکارگیری منحنی‌های استاندارد تفسیر می‌گردند [۲].

محدودیت بکارگیری منحنی‌های استاندارد مذکور در قسمت ۱-۱ از این فصل در اینجا کاملاً مشهود می‌باشد، چون در وضعیت سه لایه افقی، دیگر نمی‌توان ضخامت لایه دوم را برابر بینهایت فرض نمود. بنابراین در اینصورت فقط در حالتی می‌توان از منحنی‌های استاندارد استفاده نمود که ضخامت لایه دوم خیلی بیشتر از ضخامت لایه اول باشد و ضخامت لایه سوم بینهایت فرض شود. بدیهی است که این حالت همیشه در طبیعت وجود ندارد.

برای تفسیر منحنی‌های سونداژ حاصل از زمینی که کلاً از بیش از سه لایه افقی تشکیل شده است (من باب مثال زمینی که از چهار لایه افقی تشکیل شده است)، شیوه کار مانند وضعیت سه لایه افقی می‌باشد، با این تفاوت که قسمت منتهی‌الیه سمت راست منحنی را یک وضعیت دو لایه در نظر می‌گیرند که در اینصورت، لایه اول آن، لایه معادل می‌باشد که متشکل از لایه‌های اول، دوم و سوم می‌باشد. ضخامت لایه چهارم بینهایت در نظر گرفته می‌شود. محدودیت مورد بحث، برای این حالت نیز صادق است، چون فقط در حالتی می‌توان از منحنی‌های استاندارد استفاده نمود که بطور کلی هر لایه که در زیر واقع است باید ضخامتش خیلی بیشتر باشد از ضخامت کلیه لایه‌هایی که در روی آن واقع هستند. بدیهی است که این حالت همیشه در طبیعت وجود ندارد.



## فصل دوم

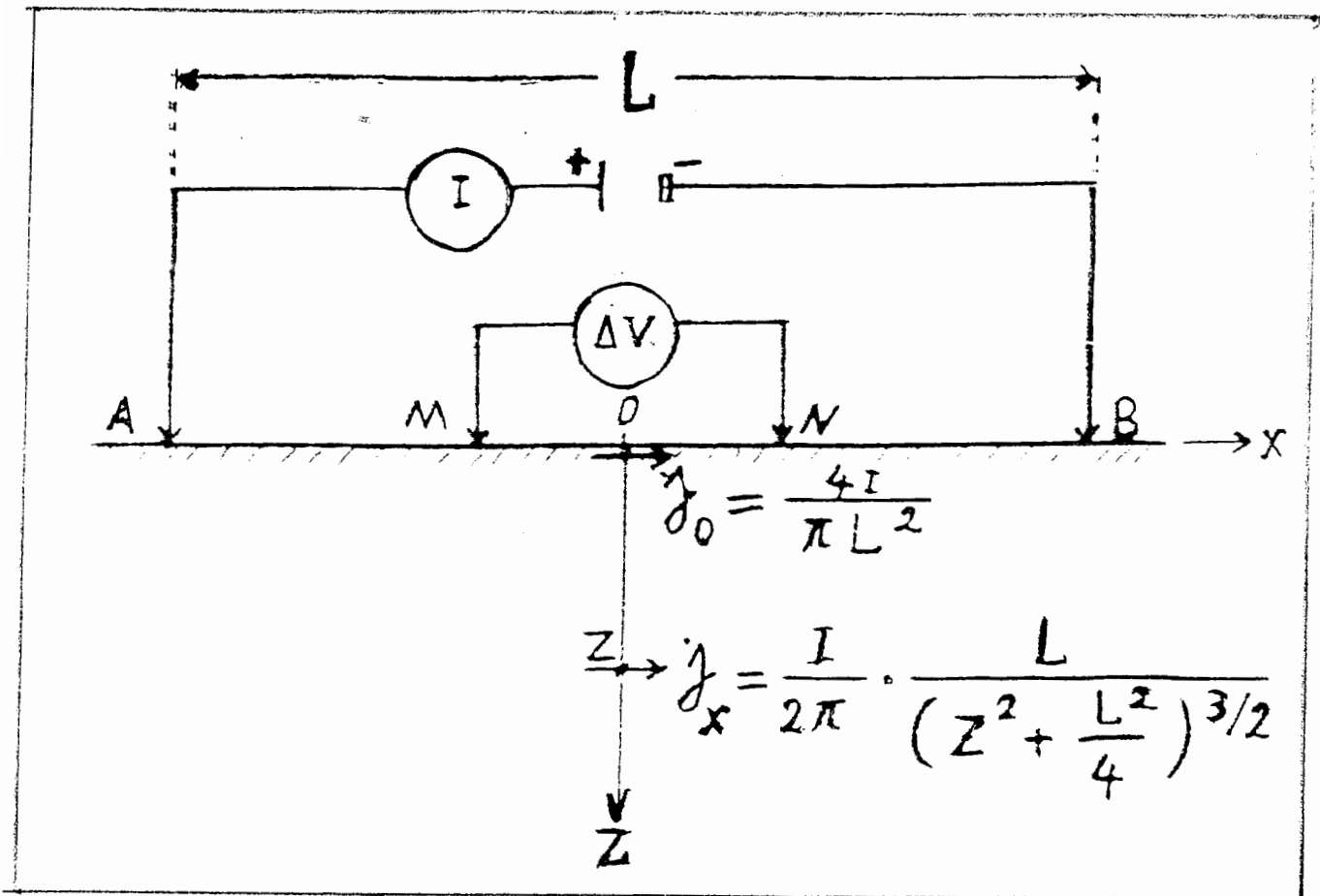
### ۲- برقراری رابطه بین مؤثرترین فاصله الکتروودی و عمق اکتشاف

#### ۲-۱- تعریف مؤثرترین فاصله الکتروودی

فرض می‌کنیم مطابق شکل (۲-۱) یک جریان الکتریکی مستقیم توسط دو الکتروود جریان A و B در یک زمین همگن و

ایزوتروپ برقرار شود. در این شکل قطعه خط AB بر محور افقی Xها منطبق می‌باشد و محور عمق (محور Zها)، بر سطح زمین

عمود و عمود منصف قطعه خط AB می‌باشد.



شکل (۲-۱) تغییرات مؤلفه افقی جگالی جریان ( $j_x$ )، با افزایش عمق و ثابت بودن فاصله الکتروودهای جریان A و B

مؤلفه افقی چگالی جریان  $j_x$  در عمق معین  $Z$  از رابطه زیر بدست می آید [۱]:

$$j_x = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{L}{\left(Z^2 + \frac{L^2}{4}\right)^{3/2}} \quad (2-1)$$

در این رابطه  $L=AB$  و  $Z$  برابر فاصله از سطح زمین می باشد.

در عمق  $Z=0$ ، این مؤلفه را توسط  $j_0$  نشان می دهند و مقدار آن از رابطه زیر حاصل می گردد:

$$j_0 = \frac{4I}{\pi L^2} \quad (2-2)$$

از تقسیم نمودن رابطه (۲-۱) بر رابطه (۲-۲)، مقدار نسبی مؤلفه افقی چگالی جریان از رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{j_x}{j_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{4Z^2}{L^2}\right)^{3/2}} \quad (2-3)$$

بطوریکه از رابطه (۲-۳) دیده می شود نسبت  $\frac{j_x}{j_0}$  هم تابعی از  $Z$  و هم تابعی از  $L$  می باشد. شکل (۲-۲) منحنی پر، تغییرات

این نسبت را بر حسب تغییرات  $Z$  و ثابت نگهداشتن  $L$  نشان می دهد. همچنین در این شکل منحنی خط چین، تغییرات  $j_x$  را بر

حسب تغییرات  $L$  و ثابت نگهداشتن  $Z$  نشان داده شده است.

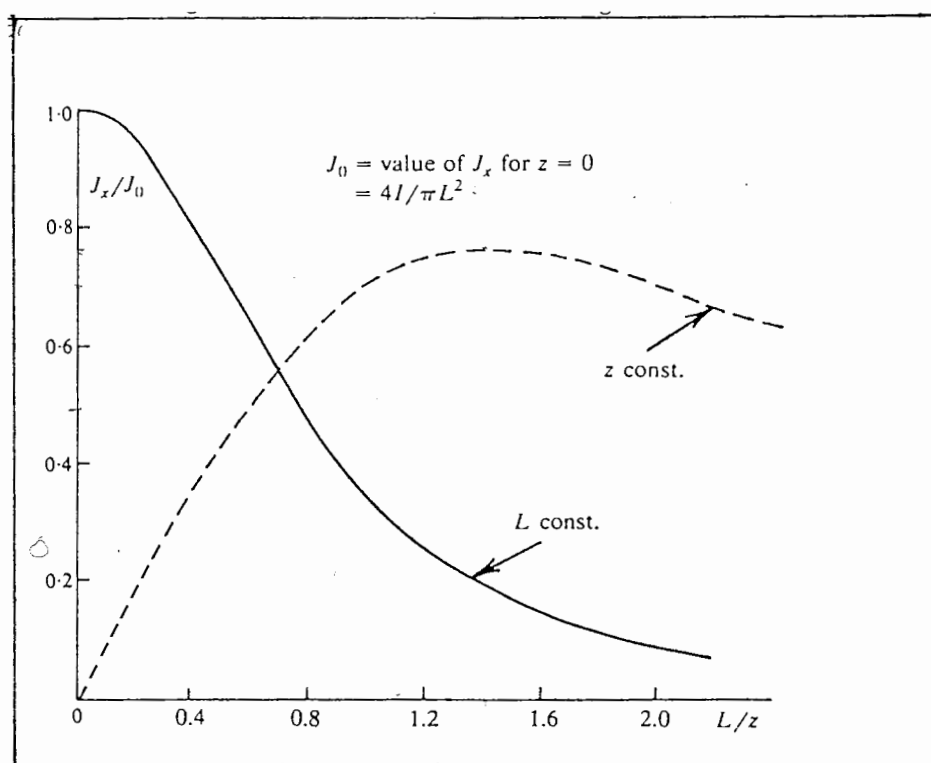
بطوریکه از منحنی خط چین دیده می شود، برای یک نقطه ثابت و معین  $Z$  در روی محور عمق، مقدار مؤلفه افقی چگالی

جریان با افزایش فاصله بین الکترودهای جریان، به یک مقدار ماکزیمم می رسد و سپس کاهش می یابد. در این طرح پژوهشی،

فاصله بین الکترودهای جریان  $A$  و  $B$  که در ازاء آن، این مقدار ماکزیمم حاصل می گردد، "مؤثرترین فاصله الکترودی" نامیده

می شود. تسمیه مؤثرترین فاصله الکترودی، به این علت است که در این فاصله الکترودی، بزرگترین مؤلفه افقی چگالی جریان در

عمق معین  $Z$  حاصل می شود.



شکل (۲-۲) تغییرات مؤلفه افقی چگالی جریان، بر حسب تغییرات عمق (منحنی پر) و بر حسب تغییرات فاصله الکترودهای جریان (منحنی خط چین) [۱].

## ۲-۲- تعریف عمق اکتشاف

برای تعریف عمق اکتشاف و یا عمق مؤثر، بطور ساده و شماتیک، مجری این طرح پژوهشی، اقدام به تهیه شکل (۲-۳) نموده است.

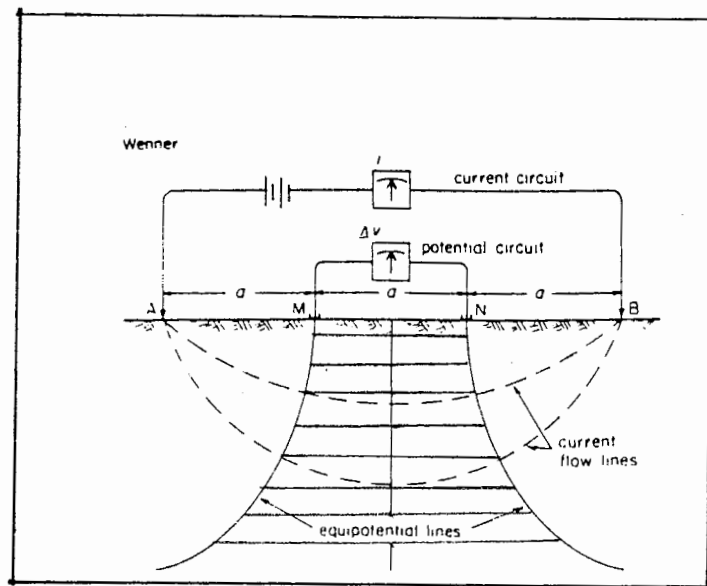
در این شکل، در زیر سطح زمین، یک زمین همگن و ایزوتروپ در نظر گرفته شده است و فرض شده است که  $M$  و  $N$  همان الکترودهای اندازه گیری اختلاف پتانسیل می باشند که در شکل (۲-۱) نشان داده شده اند.

در این شکل همچنین فرض شده است که زمین واقع در بین سطح هم پتانسیل  $M$  و سطح هم پتانسیل  $N$ ، از تعداد  $n$  لایه نازک افقی هم ضخامت تشکیل شده است. این لایه ها از طرفین به دو سطح  $M$  و  $N$  محدود می باشند. همچنین فرض شده است که الکترودهای جریان به اندازه کافی از یکدیگر فاصله دارند، بطوریکه امتداد خطوط جریان را می توان موازی با سطح زمین در نظر گرفت. اگر اختلاف پتانسیل که در طرفین لایه نام ایجاد می شود را با  $\Delta V_i$  نشان دهیم بنابراین کل اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو سطح  $M$  و  $N$  از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i$$

(۲-۴)

لازم به ذکر است که اندازه گیری یک  $\Delta V_i$  بصورت منفرد مقدور نمی باشد.



شکل (۲-۳) تقسیم زمین به لایه های نازک افقی هم ضخامت که از طرفین به سطح هم پتانسیل M و سطح هم پتانسیل N محدود شده اند.

با توجه به تعریف مؤثرترین فاصله الکترودی، که در ازاء آن فاصله، بزرگترین مؤلفه افقی چگالی جریان، در عمق معین Z حاصل می شود، می توانیم بگوییم که در ازاء این فاصله، بیشترین اختلاف پتانسیل نیز در دو سر لایه ای که در عمق معین Z واقع می باشد، ایجاد می گردد. بعبارت دیگر، در بین n لایه نازک فوق الذکر، لایه نازکی که در عمق معین Z واقع می باشد، بیشترین سهم از کل اختلاف پتانسیل  $\Delta V$  که در سطح زمین اندازه گیری می شود را دارا می باشد. عمق معین Z را عمق اکتشاف و یا عمق مؤثر می نامند.

### ۲-۳- رابطه بین مؤثرترین فاصله الکترودی AB و عمق اکتشاف Z

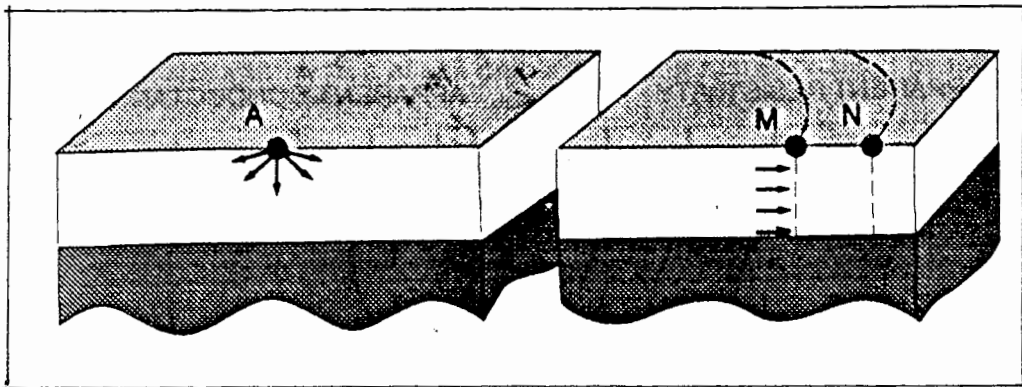
رابطه بین مؤثرترین فاصله الکترودی AB و عمق اکتشاف Z، رابطه ای پیچیده می باشد، بخصوص در یک زمینی که همگن

و ایزوتروپ نباشد، این رابطه فوق العاده پیچیده تر می شود.

عمق اکتشاف، تنها به فاصله بین الکترودهای جریان بستگی ندارد بلکه به فاصله بین الکترودهای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل نیز بستگی دارد. من باب مثال، اگر دو آرایش شلومیرگر و ونر را در نظر بگیریم، که دارای فاصله  $AB$  یکسان ولی فاصله  $MN$  متفاوت باشند، می‌بینیم که عمق اکتشاف آنها متفاوت می‌باشد.

طبق اندازه‌گیریهای انجام شده توسط مدل‌های فیزیکی، برای یک محیط همگن و ایزوتروپ، این عمق اکتشاف برای آرایش شلومیرگر برابر  $Z = AB \times 0.125$  و برای آرایش ونر برابر  $Z = AB \times 0.11$  می‌باشد [۳].

به منظور برقرار نمودن رابطه بین مؤثرترین فاصله الکترودی  $AB$  و عمق اکتشاف  $Z$  بر روی زمینی که از دو لایه افقی با مقاومت مخصوص‌های متفاوت تشکیل شده است، مؤلفین متعددی تحقیق نموده‌اند. بعضی از این مؤلفین، مانند مورد فوق‌الذکر، از مدل‌های فیزیکی استفاده نموده‌اند و برخی دیگر مدل‌های ریاضی را بکار گرفته‌اند. ولی در نهایت، هر مؤلف، به نتیجه متفاوتی دست یافته است. من باب مثال، در شکل (۲-۴) یک مدل ریاضی در نظر گرفته شده است که لایه زیری نسبت به لایه رویی دارای مقاومت مخصوص الکتریکی بینهایت می‌باشد.



شکل (۲-۴) این شکل یک آرایش نیم شلومیرگر را نشان می‌دهد که بر روی یک زمین متشکل از دو لایه افقی بکار گرفته شده است. مقاومت مخصوص الکتریکی لایه زیری نسبت به مقاومت مخصوص لایه رویی بینهایت فرض شده است. فلش‌ها خطوط جریان را و خط چین‌ها سطح هم پتانسیل را نشان می‌دهد.

بر روی یک چنین زمینی، آرایش نیم شلومیرگر بکار گرفته شده است.

چون بلوک سمت راست دور از الکتروود جریان  $A$  در نظر گرفته شده است، خطوط جریان (فلش‌ها) بر سطح هم پتانسیل  $M$  و سطح هم پتانسیل  $N$  (خط چین‌ها) عمود هستند. توسط این مدل می‌توان تصور نمود که در بلوک سمت راست خطوط جریان از محور یک استوانه خارج می‌شوند و سطح هم پتانسیل  $M$  و سطح هم پتانسیل  $N$ ، هر کدام سطح جانبی یک استوانه می‌باشند. بدین ترتیب میدان الکتریکی واقع در بین این دو سطح، یکنواخت می‌باشد. توسط این مدل معادلات ریاضی مورد نیاز برای محاسبه مقاومت مخصوص ظاهری بطور قابل توجه‌ای ساده می‌شوند [۴].

با رعایت این نکته که فاکتور هندسی آرایش شلومبرگر نصف فاکتور هندسی آرایش نیم شلومبرگر می‌باشد، بنابراین می‌توان مدل نشان داده شده در شکل (۲-۴) را با افزودن الکترودهای B در سمت راست الکترودهای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل M و N (و مقارن نسبت به الکترودهای A)، برای یک آرایش شلومبرگر بکار گرفت. با کمک این مدل، عمق اکتشاف Z (عمق فصل مشترک واقع در بین لایه اول و لایه دوم) برای آرایش شلومبرگر از رابطه  $Z = AB \times 0.5$  بدست می‌آید [۴]. همچنین با کمک این مدل، عمق اکتشاف برای آرایش ونر از رابطه  $Z = AB \times 0.44$  حاصل می‌گردد.

به علت اینکه هر مؤلف با توجه به مدلی که برای بررسی رابطه فوق‌الذکر بکار گرفته است، به نتیجه متفاوتی نسبت به سایر مؤلفین دست یافته است، بعضی از مؤلفین، یک رابطه کلی و سرانگشتی را به منظور برقرار نمودن رابطه بین مؤثرترین فاصله الکترودی AB و عمق اکتشاف Z پیشنهاد نموده‌اند. این رابطه پیشنهادی، میانگینی از نتایج حاصله از مدل‌های مختلف می‌باشد که جهت برقراری رابطه فوق‌الذکر بکار گرفته شده‌اند که عبارت است از:

$$Z = AB \times 0.3 \quad (2-5)$$

مناسب بودن این رابطه، بطور تجربی به اثبات رسیده است و در عمل از آن استفاده می‌گردد [۵].

رابطه (۲-۵) بخصوص در بکارگیری آرایش ونر دارای اهمیت زیادی می‌باشد. برای نشان دادن این موضوع، شکل (۲-۵) که یک آرایش ونر را نشان می‌دهد، در نظر می‌گیریم.

بطوریکه در شکل (۲-۵) دیده می‌شود، چون فاصله بین الکترودهای متوالی برابر  $a$  در نظر گرفته شده است، بنابراین رابطه

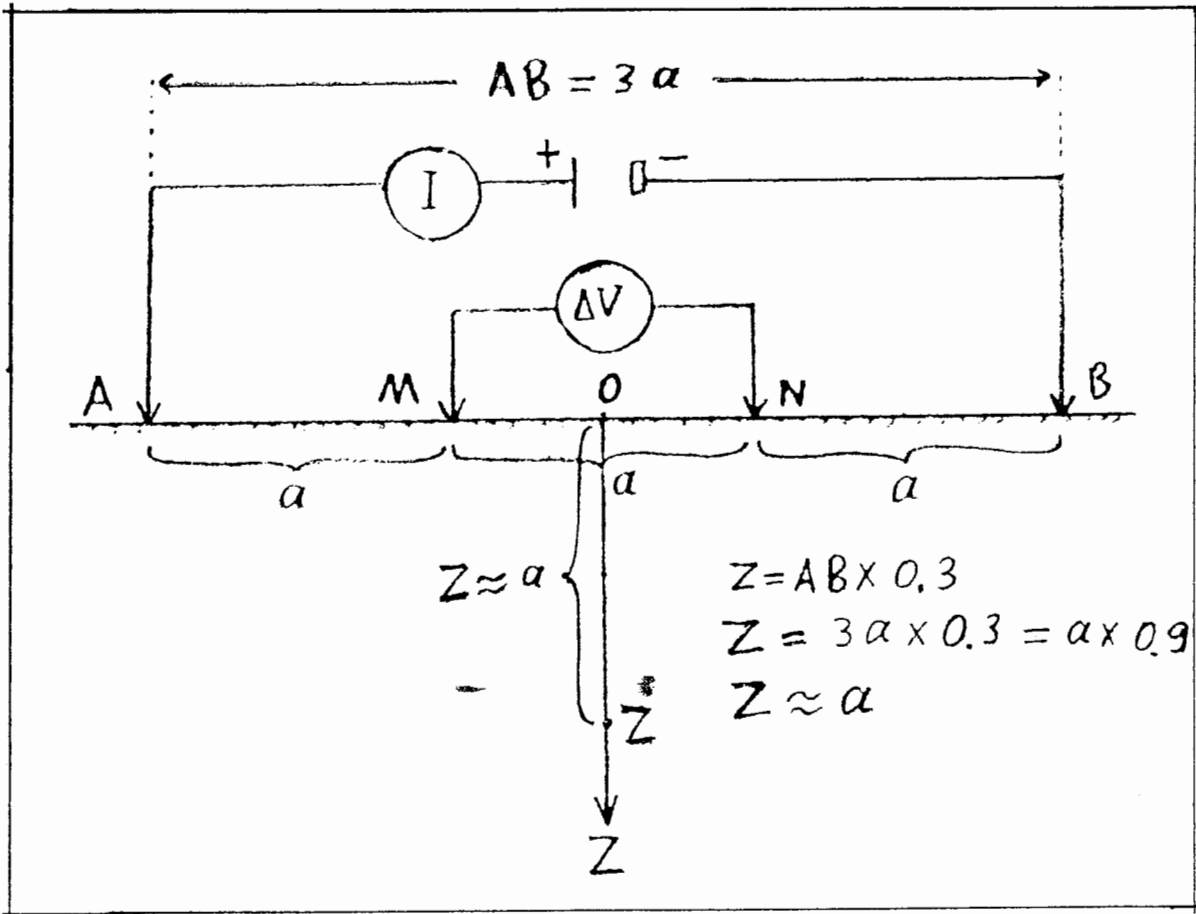
$$AB = 3 \cdot a \quad \text{برقرار می‌باشد. حال اگر این مقدار را بجای AB در رابطه (۲-۵) قرار دهیم، خواهیم داشت:}$$

$$Z = 3 \cdot a \times 0.3 = 0.9 \cdot a \quad (2-6)$$

و یا اینکه بطور تقریب خواهیم داشت:

$$Z \approx a \quad (2-7)$$

از این رابطه نتیجه می‌شود که در آرایش ونر، عمق اکتشاف Z تقریباً برابر فاصله الکترودی  $a$  می‌باشد.

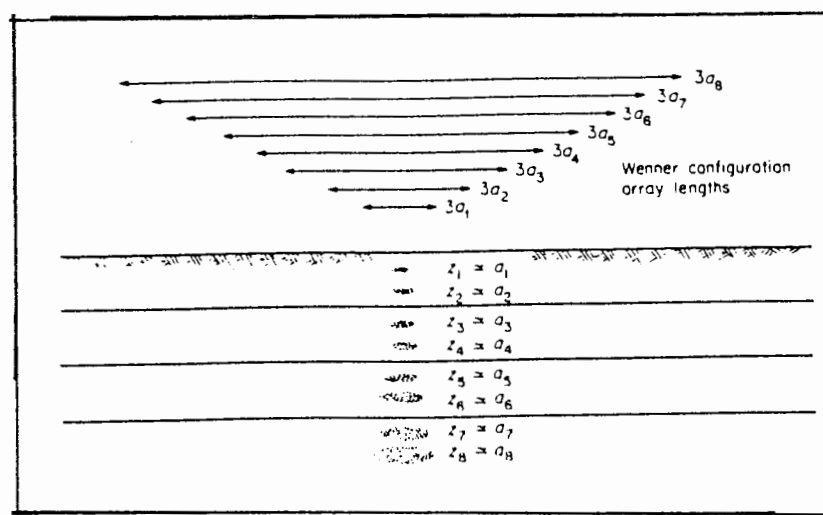


شکل (۲-۵) در آرایش ورنر، فاصله الکترودی  $a$  تقریباً برابر عمق اکتشاف  $Z$  می‌باشد.  $Z \approx a$

## فصل سوم

### ۳- معرفی روش مقاومت مخصوص الکتریکی تجمعی

هدف از بکارگیری روش مقاومت مخصوص تجمعی که به آن روش مقاومت مخصوص افزایش‌یابنده و یا روش منحنی انباشته نیز می‌گویند، بدست آوردن عمق فصل مشترک لایه‌ها و همچنین مشخص نمودن نحوه چگونگی تغییر مقاومت مخصوص ظاهری الکتریکی یک لایه نسبت به لایه مجاورش می‌باشد. برای دستیابی به این هدف رابطه (۲-۷) را در نظر می‌گیریم که از آن نتیجه می‌شود که در آرایش وئر، عمق اکتشاف  $Z_i$  تقریباً برابر فاصله الکترودی  $a$  می‌باشد. با این نگرش شکل زیر را در نظر می‌گیریم که یک مقطع قائم از چهار لایه را نشان می‌دهد. فرض می‌کنیم در سطح زمین با آرایش وئر گسترش‌یابنده هشت اندازه‌گیری انجام شده باشد که در آنها فاصله الکترودی (یعنی فاصله الکتروود جریان  $A$  تا الکتروود اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل  $M$ ) به ترتیب هر بار برابر باشد با  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_8$  و این اعداد به ترتیب تقریباً برابر باشند با عمق اکتشاف  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_8$ . همچنین فرض می‌شود که این اعماق در بین چهار لایه فوق‌الذکر توزیع شده باشند.



شکل (۳-۱) توسط گسترش فاصله الکترودی  $a$  در آرایش وئر، می‌توان عمق اکتشاف را در لایه‌های پایین‌تر بدست آورد [۶].



بدیهی است که مقاومت مخصوص ظاهری که در ازاء هر یک از این فاصله‌ها محاسبه می‌شوند (یعنی مقادیر

$Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_8$  در صورتی متفاوت می‌باشند که مقاومت مخصوص در بین لایه‌ها در اعماق  $\rho_{a1}, \rho_{a2}, \rho_{a3}, \dots, \rho_{a8}$

متفاوت باشند. در داخل یک لایه که مقاومت مخصوص در عمق‌های مختلف آن تغییر نمی‌کند، در بین مقادیر محاسبه شده  $\rho_n$

برای عمق‌های مختلف در این لایه، فقط تفاوت‌های کمی وجود دارد. بر عکس در صورتیکه مقاومت مخصوص این لایه‌ها

متفاوت باشد در بین مقادیر محاسبه شده برای  $\rho_n$  در لایه‌های مختلف اختلاف‌های نسبتاً زیادی وجود خواهد داشت. این تغییرات

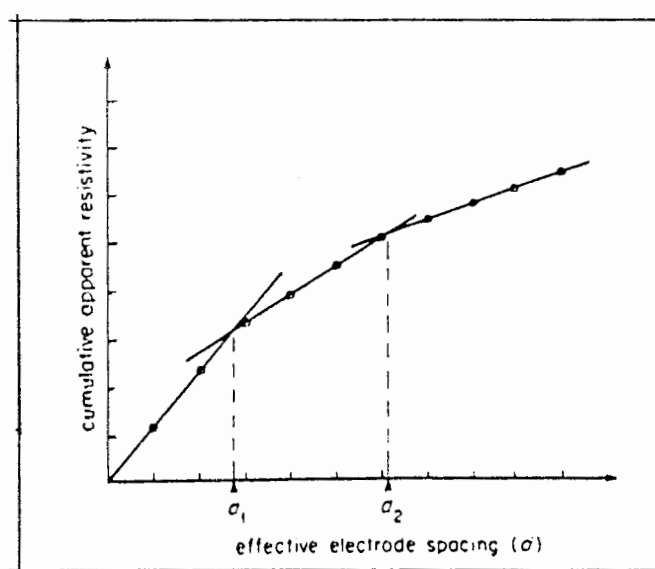
در مقاومت مخصوص را می‌توان توسط نمودار مقاومت مخصوص تجمعی بطریق زیر نمایان ساخت. برای هر بار گسترش

الکترودها، مقادیر مقاومت مخصوص حاصله، بطریقی که جدول زیر نشان می‌دهد با هم جمع می‌شوند:

| فاصله الکترودها | مقاومت مخصوص افزایش یافته                                     |
|-----------------|---|
| $a_1$           | $\sum \rho_1 = \rho_{a1}$                                     |
| $a_2$           | $\sum \rho_2 = \rho_{a1} + \rho_{a2}$                         |
| $a_3$           | $\sum \rho_3 = \rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3}$             |
| $a_4$           | $\sum \rho_4 = \rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \rho_{a4}$ |
| $\vdots$        | $\vdots$  |

جدول (۳-۱) نحوه محاسبه هر مقاومت مخصوص تجمعی  $\sum \rho_i$  در ازاء هر بار گسترش فاصله الکترودی  $a_i$  در آرایش ونر.

سپس مقدار هر مقاومت مخصوص تجمعی مطابق نمودار شکل زیر بر حسب فاصله الکترودی مربوطه رسم می‌گردند.



شکل (۳-۲) یک نمونه از نمودار مقاومت مخصوص تجمعی [۶].

در روی این نمودار، مقاومت مخصوص‌های تجمعی که مربوط به اعماق اکتشاف در یک محیط همگن و ایزوتروپ می‌باشند تقریباً همه در امتداد یک خط راست واقع می‌گردند. محل تقاطع خطوطی که به طریق فوق‌الذکر در این نمودار رسم می‌شوند، تقریباً عمق فصل مشترک دو لایه را که دارای مقاومت مخصوص‌های متفاوت هستند را مشخص می‌نماید و از شیب هر خط از این نمودار می‌توان مقدار تغییر نسبی مقاومت مخصوص را در لایه مربوطه، نسبت به لایه‌های مجاور آن تخمین زد [۶].

در استفاده از این روش، بعد از هر بار اندازه‌گیری، مقدار افزایش طولی را که باید برای اندازه‌گیری بعدی، به فاصله الکترودی قبلی افزوده گردد، یک مقدار ثابتی برای تمام اندازه‌گیریها در نظر می‌گیرند.

در اینجا برای بهتر روشن شدن مطالب فوق‌الذکر مبادرت به ارائه داده‌های حاصله از اندازه‌گیریهای صحرائی که از روش سونداژ الکتریکی (آرایش ونر) بدست آمده‌اند و سپس روش مقاومت مخصوص تجمعی در روی آنها اعمال شده است، می‌نماییم. این داده‌ها در جدول (۳-۲) و نمودار مربوطه در شکل (۳-۳) آورده شده‌اند [۶].

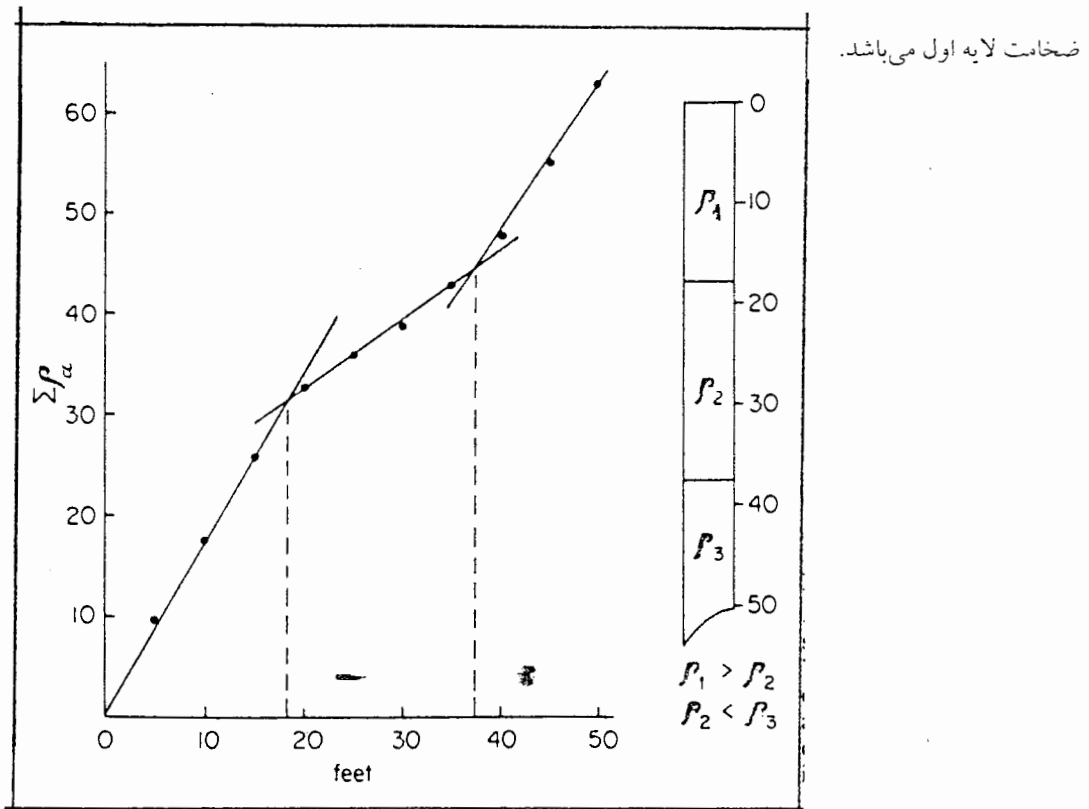
| $a$<br>(feet) | $i$<br>(ma) | $v$<br>(mV) | $\rho_a$<br>(ohm-feet) | $\Sigma \rho_a$ |
|---------------|-------------|-------------|------------------------|-----------------|
| 5             | 17          | 5.4         | 9.9                    | 9.9             |
| 10            | 20          | 2.5         | 7.8                    | 17.7            |
| 15            | 20          | 1.7         | 8.0                    | 25.7            |
| 20            | 23          | 1.3         | 7.1                    | 32.8            |
| 25            | 40          | 0.8         | 3.1                    | 35.9            |
| 30            | 52          | 0.8         | 2.9                    | 38.8            |
| 35            | 70          | 1.3         | 4.1                    | 42.9            |
| 40            | 108         | 2.1         | 4.9                    | 47.8            |
| 45            | 120         | 3.0         | 7.1                    | 54.9            |
| 50            | 125         | 3.2         | 8.0                    | 62.9            |

جدول (۳-۲) در این جدول،  $a$  فاصله الکترودی در آرایش ونر،  $I$  جریان تزریق شده به داخل زمین،  $V$  اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده،  $\rho_a$  مقاومت مخصوص ظاهری بدست آمده،  $\Sigma \rho_a$  مقاومت مخصوص تجمعی محاسبه شده می‌باشد.

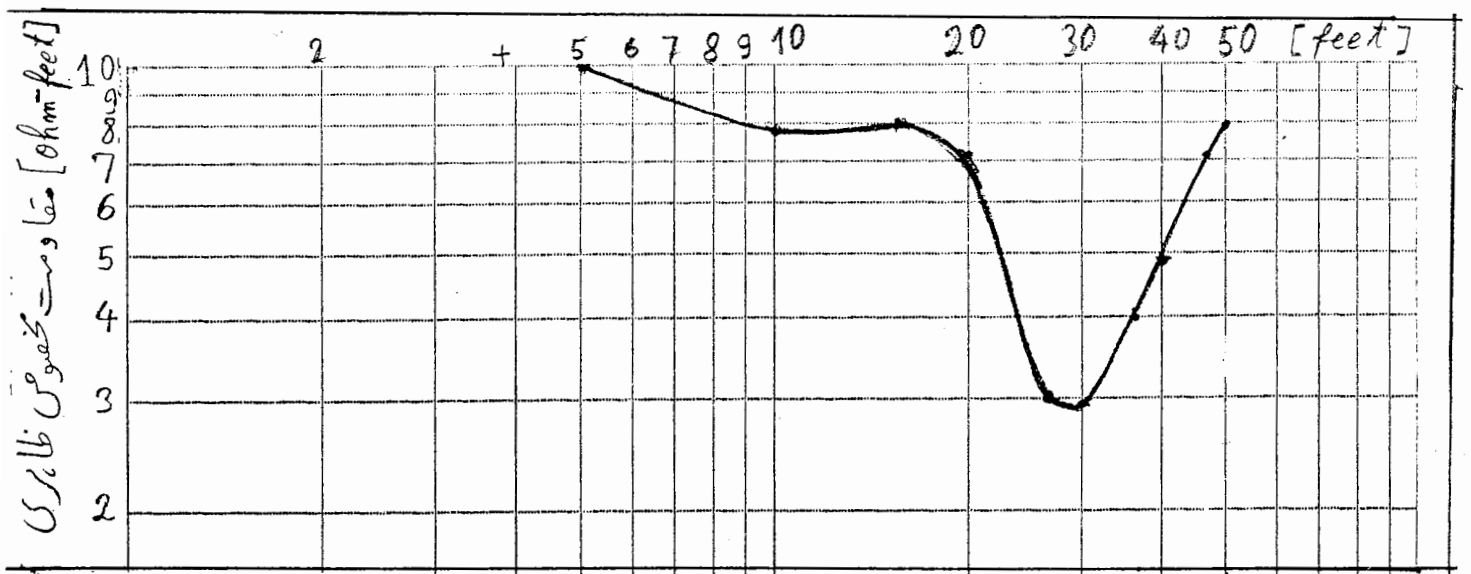
از شیب این خطوط دیده می‌شود که مقاومت مخصوص لایه وسطی نسبت به مقاومت مخصوص‌های لایه‌های بالایی و پایینی آن کمتر می‌باشد. توسط این اطلاعات می‌توان نتیجه کار را اینطور تفسیر نمود که سطح سفره آب زیرزمینی در عمق ۱۸ پایی و فصل مشترک بین لایه متخلخل و سنگ کف در عمق ۳۷ پایی قرار دارد.

شکل (۳-۴) منحنی مقاومت مخصوص الکتریکی این داده‌های صحرائی را نشان می‌دهد که در آن مقادیر  $\rho_a$  محاسبه شده بر حسب  $a$  مربوطه رسم شده‌اند. در صورتیکه بخواهیم این منحنی را با بکارگیری منحنی‌های استاندارد (روش تطابق جزئی منحنی) تفسیر نماییم، می‌بینیم که قسمتهای طرفین مینیمم این منحنی با هیچیک از منحنی‌های استاندارد مربوطه، قابل تطبیق نمی‌باشد. در اینجا است که می‌گوییم بکارگیری منحنی‌های استاندارد در این مورد امکان‌پذیر نیست. علت این امر این است که، زمینی که در

روی آن این اندازه گیری انجام شده است، شرط لازم را برای استفاده از منحنی های استاندارد ندارد و آن شرط این است که ضخامت لایه دوم باید خیلی بیشتر از لایه اول باشد. ولی بطوریکه در شکل (۳-۳) دیده می شود، ضخامت لایه دوم تقریباً برابر با



شکل (۳-۳) در این شکل دیده می شود مقادیر مقاومت مخصوص تجمعی در امتداد سه خط مختلف قرار گرفته اند. محل تقاطع این خطوط، عمق فصل مشترک لایه ها را در اعماق ۱۸ پا و ۳۷ پا نشان می دهند.



شکل (۳-۴) منحنی مقاومت مخصوص الکتریکی که از رسم داده های ارائه شده در جدول (۳-۲) حاصل شده است.

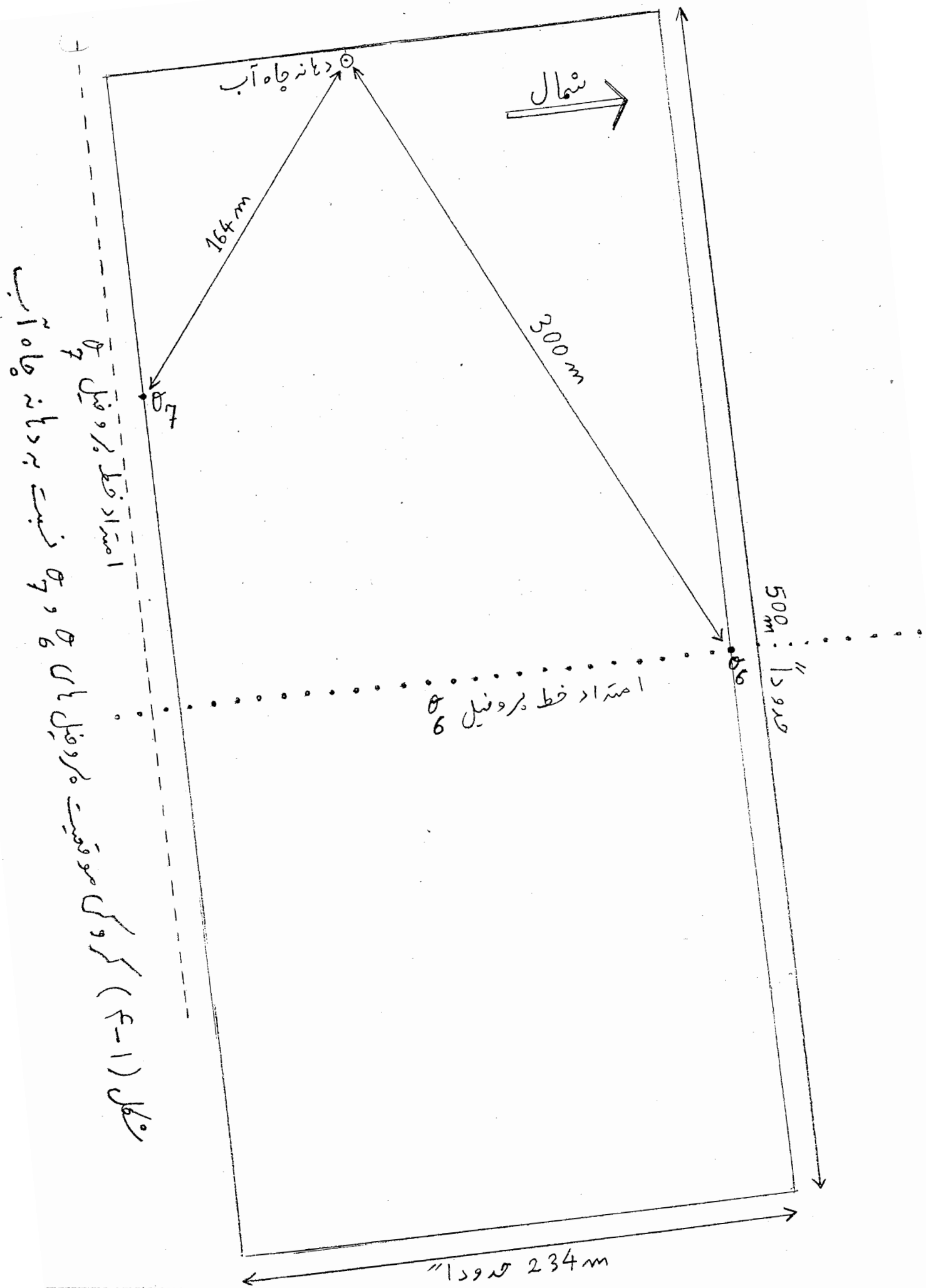
فاصله الکترودی α

## فصل چهارم

### ۴- اندازه‌گیری‌های صحرائی

با توجه به معلوم بودن عمق سفره آب زیرزمینی و عمق سنگ کف در چاه آب مزرعه دانشکده کشاورزی بسطام، اطراف این چاه، به منظور اندازه‌گیری‌های سونداژ الکتریکی انتخاب گردید. در این مزرعه، با توجه به محدود بودن راه‌های قابل عبور و مرور، دو خط پروفیل در نظر گرفته شد. یکی خط پروفیل  $O_6$  در امتداد شمالی - جنوبی و دیگری خط پروفیل  $O_7$  در امتداد شرقی - غربی. موقعیت این خطوط، نسبت به دهانه چاه مذکور در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. در این شکل نقاط  $O_6$  و  $O_7$  محل هر سونداژ را نشان می‌دهند. داده‌های حاصله از این اندازه‌گیری‌ها در جداول (۴-۱) و (۴-۲) درج شده‌اند.

در هر دو اندازه‌گیری فوق‌الذکر آرایش ونر بکار گرفته شده است. فاصله الکترودی  $a$  در این اندازه‌گیری‌ها با  $a=5m$  شروع شده است و بطور متوالی 5 متر به 5 متر افزایش یافته است.



شمال →

دانه چاه آب

164 m

300 m

107

500 m  
" ۱  
حدوداً

امتداد خط پروژیل ۵ و ۶

234 m حدوداً

محل (۴-۱) کروکی موقعیت هر فصل های ۵ و ۶ نسبت به دانه چاه آب

بطرف بظام ←

جاده شاهرود - آزاد شهر

→ بطرف چهل دفتر

| OA (m) | MN (m) | R (m)          | R (ohm) |
|--------|--------|----------------|---------|
| 36     |        | file-name : o6 |         |
| 5      |        |                | 2.025   |
| 10     |        |                | 1.515   |
| 15     |        |                | 1.135   |
| 20     |        |                | 0.885   |
| 25     |        |                | 0.685   |
| 30     |        |                | 0.525   |
| 35     |        |                | 0.405   |
| 40     |        |                | 0.325   |
| 45     |        |                | 0.255   |
| 50     |        |                | 0.205   |
| 55     |        |                | 0.17    |
| 60     |        |                | 0.155   |
| 65     |        |                | 0.135   |
| 70     |        |                | 0.1351  |
| 75     |        |                | 0.125   |
| 80     |        |                | 0.115   |
| 85     |        |                | 0.105   |
| 90     |        |                | 0.1051  |
| 95     |        |                | 0.105   |
| 100    |        |                | 0.1051  |
| 105    |        |                | 0.095   |
| 110    |        |                | 0.10    |
| 115    |        |                | 0.1001  |
| 120    |        |                | 0.10    |
| 125    |        |                | 0.105   |
| 130    |        |                | 0.1051  |
| 135    |        |                | 0.105   |
| 140    |        |                | 0.1051  |
| 145    |        |                | 0.11    |
| 150    |        |                | 0.1101  |
| 155    |        |                | 0.115   |
| 160    |        |                | 0.105   |
| 165    |        |                | 0.115   |
| 170    |        |                | 0.125   |
| 175    |        |                | 0.115   |
| 180    |        |                | 0.1151  |

جدول (۴-۱) داده های حاصله از سونداژ ۵/۶  
 در زیر ستون OA فاصله های الکترودی a بر حسب متر و  
 در زیر ستون R مقدار مقاومت مربوطه بر حسب اهم  
 درج شده اند.

35 file-name : o7

| OA (m) ; MN (m) ; R (m) ; R (ohm) |       |
|-----------------------------------|-------|
| 5                                 | 3.945 |
| 10                                | 2.615 |
| 15                                | 1.695 |
| 20                                | 1.165 |
| 25                                | 0.815 |
| 30                                | 0.585 |
| 35                                | 0.435 |
| 40                                | 0.325 |
| 45                                | 0.245 |
| 50                                | 0.195 |
| 55                                | 0.165 |
| 60                                | 0.145 |
| 65                                | 0.125 |
| 70                                | 0.115 |
| 75                                | 0.105 |
| 80                                | 0.10  |
| 85                                | 0.105 |
| 90                                | 0.095 |
| 95                                | 0.09  |
| 100                               | 0.09  |
| 105                               | 0.095 |
| 110                               | 0.095 |
| 115                               | 0.095 |
| 120                               | 0.095 |
| 125                               | 0.095 |
| 130                               | 0.095 |
| 135                               | 0.095 |
| 140                               | 0.105 |
| 145                               | 0.105 |
| 150                               | 0.105 |
| 155                               | 0.105 |
| 160                               | 0.105 |
| 165                               | 0.115 |
| 170                               | 0.115 |
| 175                               | 0.115 |

جدول (۲-۴) داده های حاصله از سونداژ  $\sigma_7$  ،  
 در زیر ستون OA مقادیر فاصله های الکترودی  $\alpha$  بر حسب متر و  
 در زیر ستون R مقادیر مقاومت مربوطه بر حسب اهم درج شده اند .

## فصل پنجم

### ۵- تفسیر نمودارهای حاصله

#### ۵-۱- تفسیر منحنی‌های مقاومت مخصوص ظاهری

با استفاده از جداول (۴-۱) و (۴-۲)، به ترتیب منحنی‌های مقاومت مخصوص ظاهری مربوط به پروفیل‌های  $O_7, O_6$  در شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) نمایش داده شده‌اند. (کلیه شکل‌های مربوط به این فصل در پیوست شماره ۱ آورده شده‌اند). بطوریکه در این دو شکل دیده می‌شود، اگر بخواهیم این منحنی‌ها را توسط روش تطابق جزئی تفسیر نماییم، می‌بینیم که انحنای قبل از مینیم آنها بقدری شدید است که با هیچ یک از منحنی‌های استاندارد قابل تطبیق نمی‌باشند. بنابراین همانگونه که برای شکل (۳-۴) توضیح داده شد، تفسیر این منحنی‌ها، توسط این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد و می‌بایستی از روش مقاومت مخصوص تجمعی استفاده نماییم.

#### ۵-۲- تفسیر منحنی‌های مقاومت مخصوص تجمعی

هدف از تفسیر این گونه منحنی‌ها بطور کلی بدست آوردن عمق فصل مشترک لایه‌ها و همچنین مشخص نمودن نحوه چگونگی تغییر مقاومت مخصوص الکتریکی یک لایه نسبت به لایه مجاورش می‌باشد. برای ناائل شدن به این هدف، در روی منحنی مذکور، نقاطی را که تقریباً همه در یک امتداد واقع هستند توسط یک خط راست بهم وصل می‌کنیم. محل تقاطع خطوطی که از این طریق بدست می‌آیند، تقریباً عمق فصل مشترک دو لایه که دارای مقاومت مخصوص‌های متفاوت هستند را مشخص می‌نماید و از شیب هر یک از خطوط مذکور می‌توان مقدار نسبی مقاومت مخصوص ظاهری را در لایه مربوطه، نسبت به لایه‌های مجاور آن حدس زد. شکل (۵-۳) منحنی مقاومت مخصوص تجمعی را برای پروفیل  $O_7$  نشان می‌دهد. بطوریکه از شکل این منحنی دیده می‌شود تغییرات شیب، در طول منحنی خیلی به کندی و با یک انحنای طولانی صورت گرفته است. علت این امر آن است که در منطقه‌ای که اندازه‌گیری در روی آن انجام شده است تغییرات مقاومت مخصوص از یک لایه به لایه مجاورش خیلی کم می‌باشد و یا به عبارت دیگر تغییرات مقاومت مخصوص بصورت ناگهانی صورت نگرفته است. همانطور که قبلاً ذکر شد، بطور کلی تفسیر نتایج ژئوالکتریکی حاصله از چنین مناطقی، فوق‌العاده مشکل و گاهی غیرممکن می‌باشد. برای اینکه این مشکل نا اندازه‌ای آسانتر گردد و تعیین محل تقاطع خطوط فوق‌الذکر با دقت بیشتری انجام شود، داده‌های مربوط به محور عمودی را



نخست در عدد ۱۰ ضرب و سپس منحنی را رسم می‌نماییم. منحنی حاصله در شکل (۴-۵) نشان داده شده است بطوریکه در این شکل دیده می‌شود در روی این منحنی پنج خط با شیبهای مختلف تشخیص داده می‌شوند که به ترتیب با اعداد (۱) تا (۵) شماره گذاری شده‌اند:

خطوط (۱) و (۲) یکدیگر را در نقطه A با طول 25 متر قطع کرده‌اند.

خطوط (۲) و (۳) یکدیگر را در نقطه B با طول 45 متر قطع کرده‌اند.

خطوط (۳) و (۴) یکدیگر را در نقطه C با طول 75 متر قطع کرده‌اند.

خطوط (۴) و (۵) یکدیگر را در نقطه D با طول 100 متر قطع کرده‌اند.

این بدین معنی است که فصل مشترک‌هایی در اعماق به ترتیب 25, 45, 75, 100 متر وجود دارند. همچنین از این شکل دیده می‌شود که لایه واقع در بین فصل مشترک‌های 45 متر و 75 متر نسبت به سایر لایه‌ها دارای کمترین مقاومت مخصوص می‌باشد زیرا پاره‌خط مربوط به این لایه (یعنی BC که با رنگ آبی مشخص شده است) نسبت به سایر خطوط دارای کمترین شیب می‌باشد. بنابراین، این احتمال وجود دارد که این لایه حاوی آب باشد. همزمان با رسیدن به این نتیجه، پمپ آب چاه مذکور جهت تعمیرات از چاه بیرون آورده شد و فرصت خوبی برای اندازه‌گیری مستقیم عمق سفره آب زیرزمینی مزرعه مذکور بدست آمد. عمق سفره آب از سطح زمین ۴۸ متر اندازه‌گیری گردید.

از مقایسه این عدد با عددی که از محل تقاطع خطوط شماره (۲) و (۳) که در منحنی فوق‌الذکر حاصل شده است یعنی عدد ۴۵ متر، مشاهده می‌شود که بین این دو نوع اندازه‌گیری، فقط اختلافی معادل ۳ متر موجود می‌باشد. که این اختلاف، در برداشت‌های ژئوالکتریکی نسبتاً ناچیز می‌باشد. لازم به ذکر است که افزایش فاصله الکترودی انتخاب شده در هر اندازه‌گیری برای بدست آوردن منحنی مذکور، ۵ متر بوده است. بدیهی است که با بزرگتر نمودن مقیاس محور افقی این منحنی و انتخاب فاصله الکترودی کوتاه‌تری (مثلاً ۲ متر)، می‌توان اختلاف یاد شده را کمتر نمود، ولی این امر مستلزم صرف وقت و هزینه بیشتری در اندازه‌گیری در صحرا می‌باشد.

جهت بررسی دنباله سمت راست این منحنی و کنترل مضاعف، داده‌های اصلی مقاومت مخصوص ظاهری تجمعی بر روی محورهای مختصات لگاریتمی، رسم گردیدند که منحنی حاصله، در شکل (۵-۵) نشان داده شده است در این شکل، ضمن تایید عمق فصل مشترک‌های فوق‌الذکر دیده می‌شود که خطوط شماره (۵) و (۶) یکدیگر را در نقطه E در فاصله الکترودی  $a=130$  متر قطع می‌نمایند. از این نقطه به بعد منحنی دارای بزرگترین شیب می‌شود. این بدین معنی است که سنگ کف مقاوم اصلی در عمق ۱۳۰ متری از سطح زمین واقع است.

هر سه نوع منحنی مقاومت مخصوص تجمعی مذکور برای پروفیل  $O_7$ ، برای پروفیل  $O_6$  نیز به ترتیب در شکل‌های (۵.۶)،

(۵.۷) و (۵.۸) نشان داده شده‌اند.

بطوریکه از این منحنی‌ها دیده می‌شود درست همان تفسیری را که برای هر کدام از منحنی‌های پروفیل  $O_7$  انجام شد

می‌توان به ترتیب برای منحنی‌های پروفیل  $O_6$  نیز انجام داد و بعبارت دیگر، در اینجا نیز به ترتیب در اعماق 25 متر، 45 متر، 75

متر، 100 متر و 130 متر همان فصل مشترک‌های فوق‌الذکر قابل تشخیص می‌باشند و قطعه خط BC که در اینجا نیز با رنگ آبی

مشخص شده است نمایانگر لایه آبدار می‌باشد. این تطابق، صحت عملیات فوق‌الذکر را تایید می‌نماید. بعلاوه توسط این برداشت‌ها

می‌توان گفت که تقریباً سطح ایستایی سفره آب زیرزمینی و وضعیت توپوگرافی سنگ کف در فاصله بین  $O_6$  و  $O_7$  تغییر نکرده

است.

## فصل ششم

### ۶- بحث، نتیجه‌گیری، پیشنهادات

منحنی‌های حاصله از برداشت‌های صحرائی که به روش سونداژ الکتریکی بدست می‌آیند، معمولاً با بکارگیری منحنی‌های استاندارد مربوطه تفسیر می‌گردند. برای انجام اینگونه تفسیرها، باید منحنی حاصله از برداشت صحرائی را به طریق جزء به جزء با منحنی‌های استاندارد مذکور تطبیق داد. چون اکثر اوقات شرایط برای استفاده از تطبیق جزء به جزء فراهم نیست لذا اغلب نتیجه کار رضایت‌بخش و دقیق نمی‌باشد. علاوه بر این، تفسیر جزء به جزء منحنی‌ها، وقت و دقت عمل زیادی را از مفسر طلب می‌نماید برای رفع این مشکل می‌توان از روش مقاومت مخصوص تجمعی استفاده نمود چون در این روش، سهم زیادی از کار تفسیر توسط رایانه انجام می‌شود، بنابراین، این تفسیر داده‌ها با دقت بیشتر و در عین حال با صرف وقت کمتری نسبت به روش بکارگیری منحنی‌های استاندارد صورت می‌گیرد. یکی از حسن‌های بزرگ بکارگیری این روش در این است که (بر عکس روش تطبیق جزء به جزء منحنی‌ها) یک لایه در داخل زمین، ملزم نیست که حتماً این شرط محدودکننده را داشته باشد که ضخامتش بیشتر از ضخامت کلیه لایه‌هایی باشد که در روی آن قرار گرفته‌اند.

از نقطه ضعفهای بکارگیری این روش این است که مقدار عددی مقاومت مخصوص هر لایه را نمی‌توان مشخص نمود و فقط می‌توان نسبت مقاومت مخصوص آن لایه را به مقاومت مخصوص لایه‌های مجاورش مشخص نمود. بعلاوه چون برای بکارگیری این روش مجبور به استفاده از آرایش ونر می‌باشیم و در این آرایش فاصله الکترودهای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل  $MN$  بزرگتر از روش شلومبرگر است، بنابراین مقدار نوفه (پارازیت) که اندازه‌گیری را مختل می‌نماید نیز بیشتر می‌باشد.

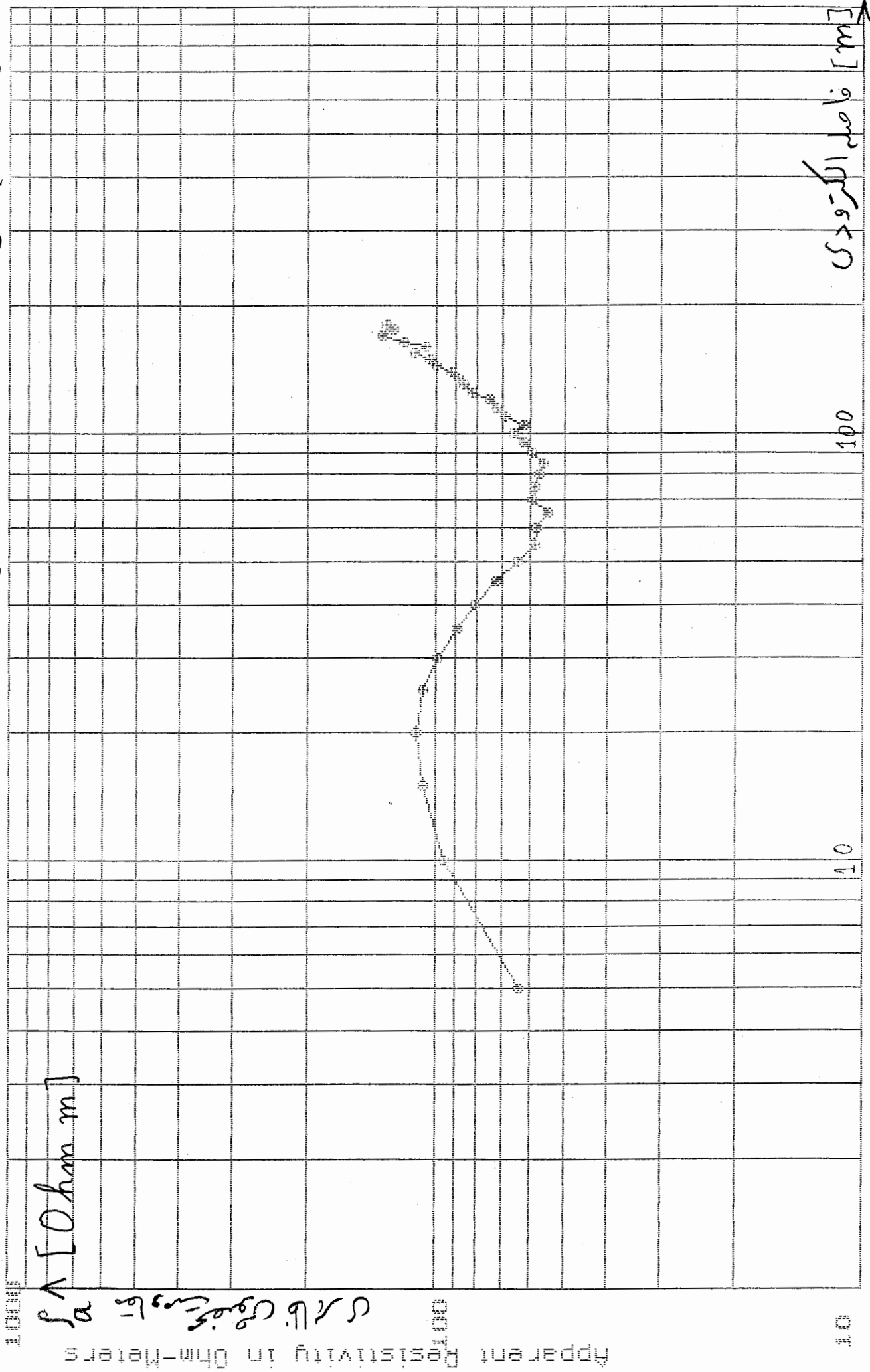
## مراجع

- [1] Telford , W.M. , Geldart , L.P. , Sheriff , R.E. , "Applied Geophysics". Second Editton, Cambridge University Press, PP. 540 , 1990
- [2] Griffiths , D.H. , King R.F. , "Applied Geophysics for Geologists And Engineers" , Pergamon Press, PP. 95 , Second Edition, 1981.
- [3] Apparao , A. , "Development in Geoelectrical Methods" , A.A. Balkeman , PP. 84 , 1997
- [4] Zhdanov , M.S. , Keller, G.V. , "The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration" , Elsevier , PP. 239 , 1994.
- [5] Electrical Methods in Geophysical Exploration of Deep Sedimentary Basins. S.H. yungul Chapman and Hall PP.46 , 1996.
- [6] Robinson , E.S. , Coruh , C. , "Basic Exploration Geophysics" , Wiley PP. 466 , 1988.

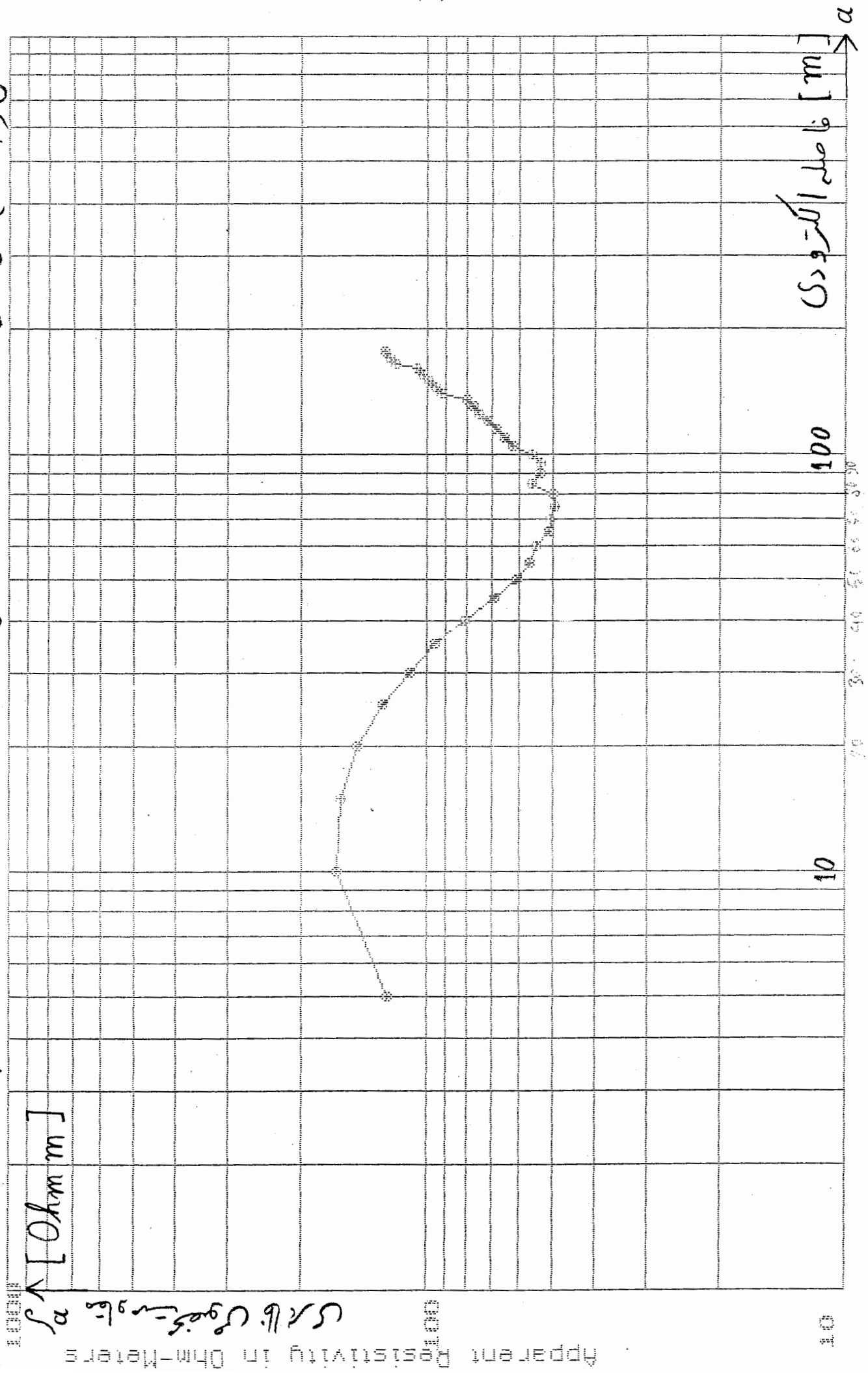
پیوست شماره (۱)

شکل‌های مربوط به فصل پنجم

شکل (۱-۵) منحنی مقاومت مخصوصی ظاهری حاصل از داده‌های بدست آمده از سوندا  $\sigma_6$



شکل (۲-۵) منحنی مقاومت مخصوصی ظاهری حاصل از داده‌های بدست آمده از سونداژ ۵۷



Apparent Resistivity in Ohm-Meters

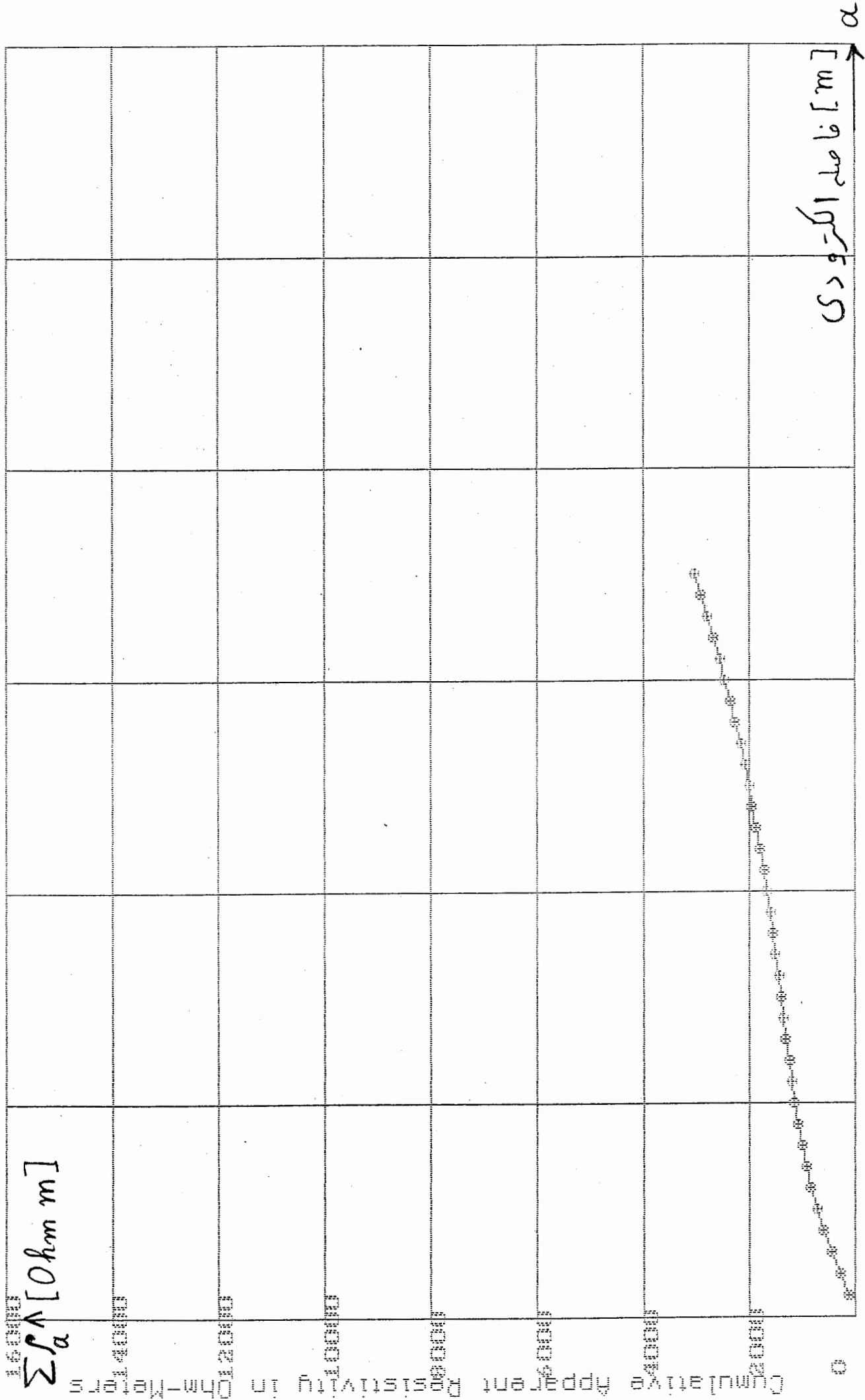
۱۰ ۱۰۰ ۱۰۰۰

۱۰ ۲۰ ۳۰ ۴۰ ۵۰ ۶۰ ۷۰ ۸۰ ۹۰ ۱۰۰

فاصله الکترودی [m]

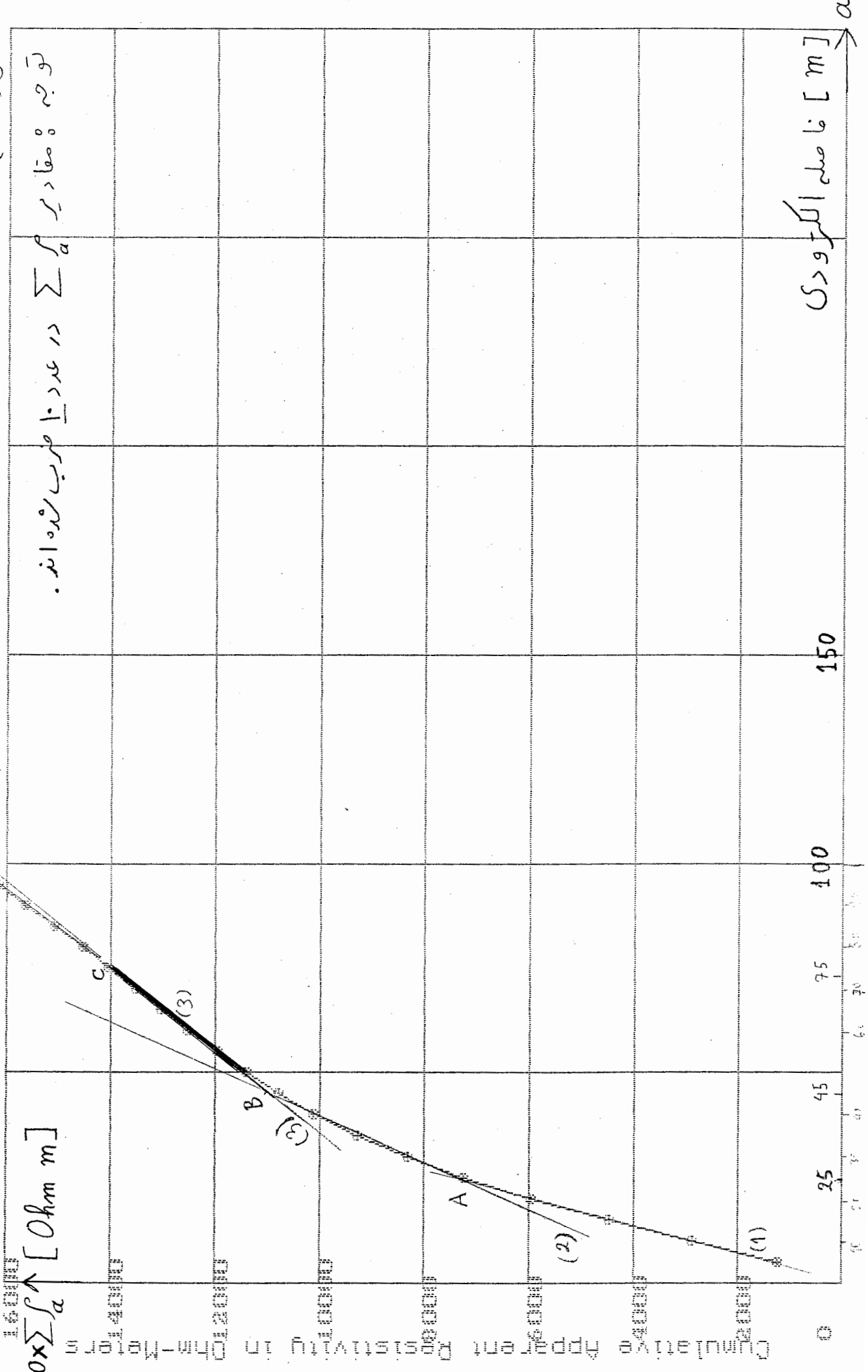
۱۰ ۱۰۰ ۱۰۰۰

شکل (۳-۵) منحنی مقاومت مخصوص تجزی حاصل از داده های بدست آمده از سونداژ ۵۷





شکل (۴-۵) منحنی مقاومت مخصوص بخش حاصل از داده های پست آمده از کوندان ۵۷



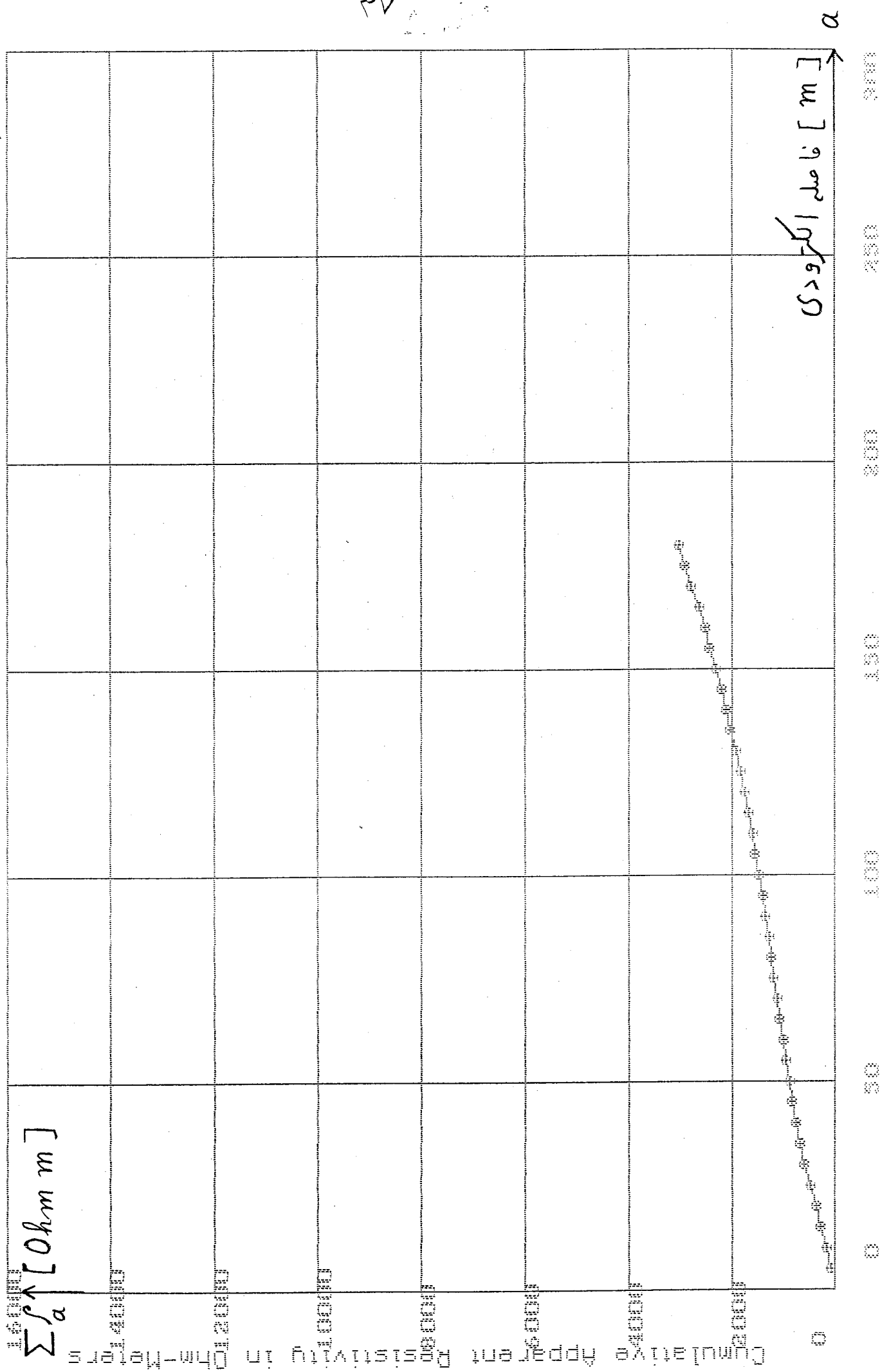
$\Sigma\alpha$  [Ohm m]

$a$  [m] فاصله الکترودی

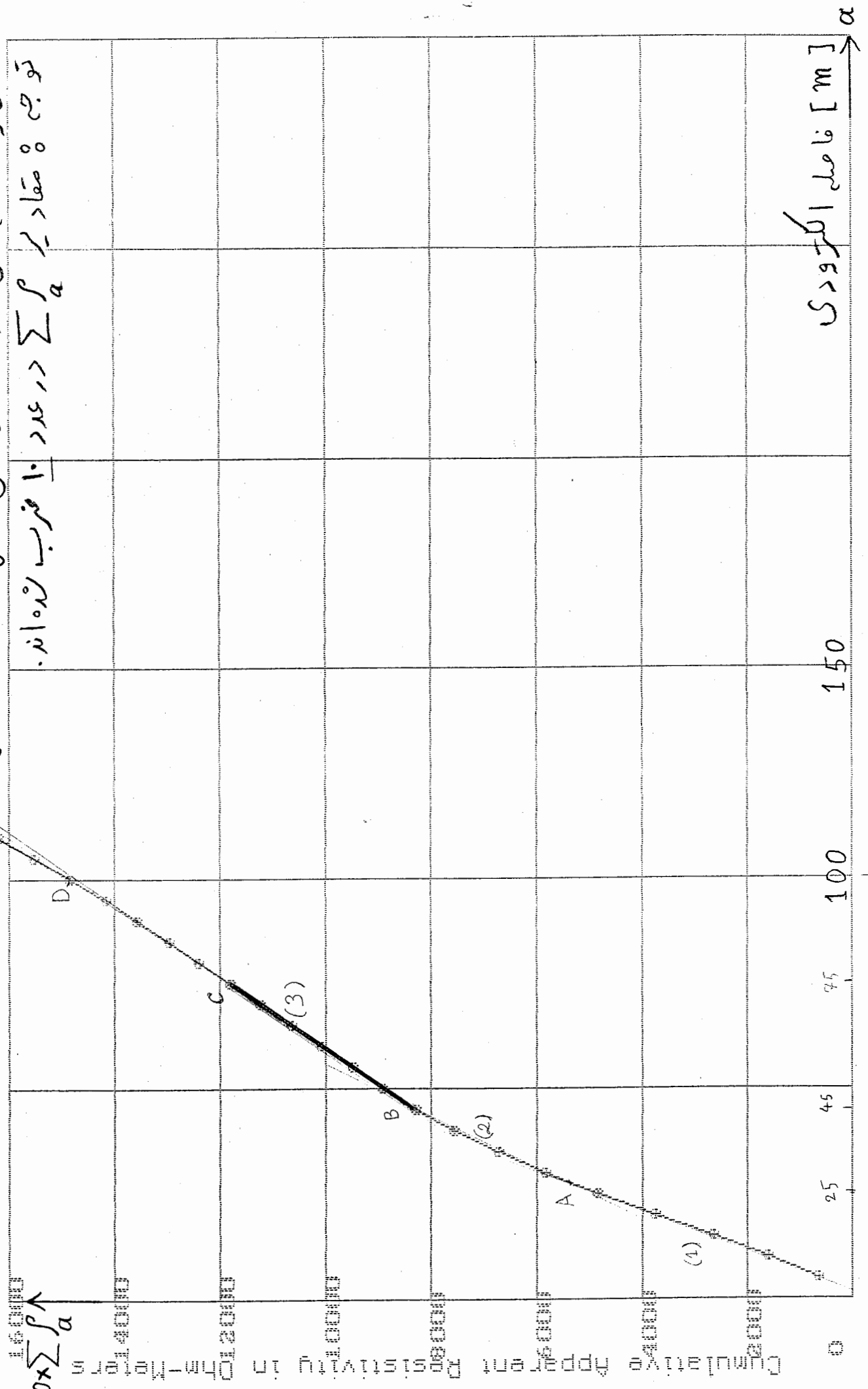
توجه: مقادیر  $\Sigma\alpha$  در عدد ۱۰ ضرب شده اند.



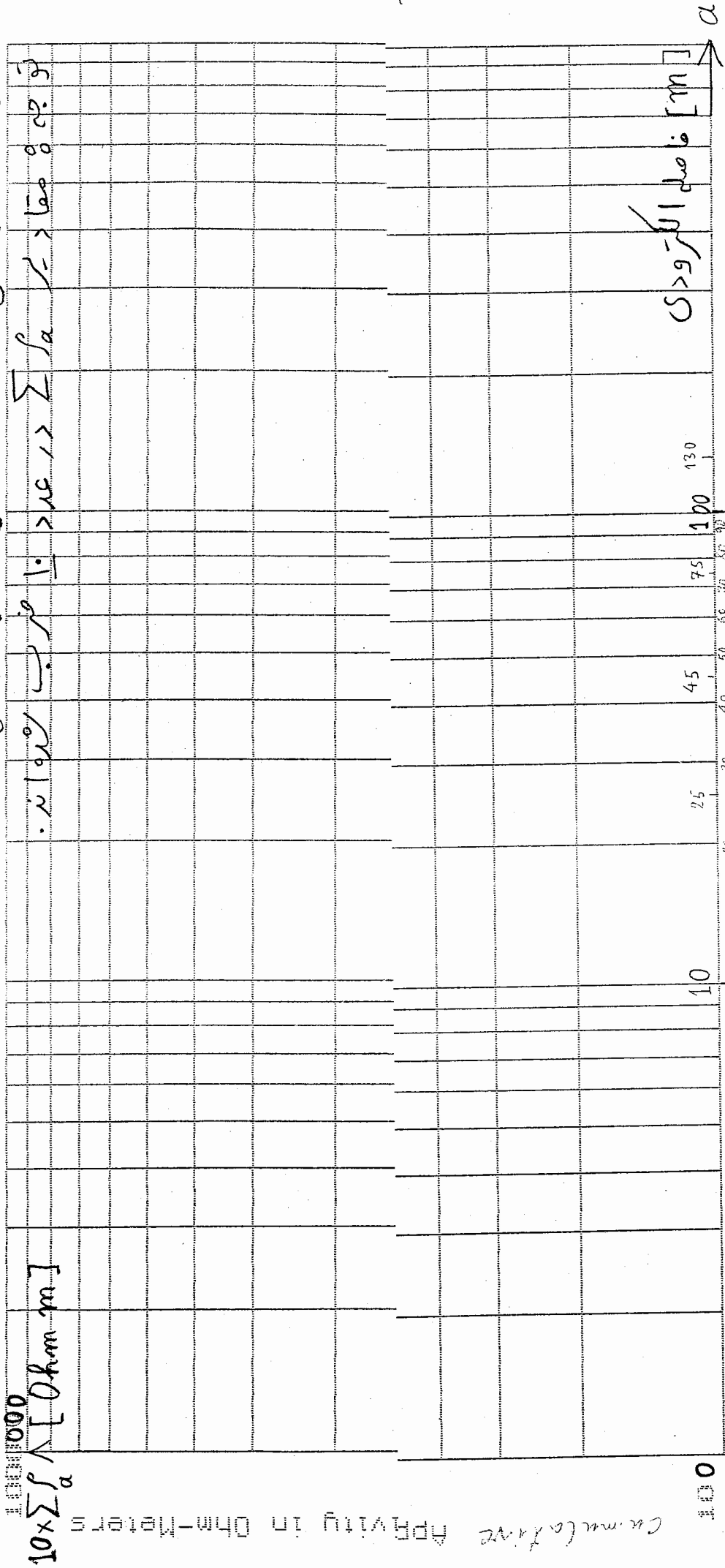
شکل (۶-۵) منحنی مقاومت مخصوص بخش حاصل از داده های بدست آمده از کوندراژ  $\sigma_6$



شکل (۷-۵) منحنی مقادیر مخصوصی که حاصل از داده های کوئنداز ۵%  
 توجه: % مقادیر  $\sum a$  در عدد ۱۰ ضرب شده اند.



شکل (۸-۵) منحنی مقاومت مخصوص محض حاصل از  $\alpha > 10$  به نامی بدست آمده از لونها  $\theta$



1000

100

10

مختار دانشگاه تهران

پیوست شماره (۲)

دستورالعمل استفاده از نرم افزار Sounding

## ۱- روش کار با برنامه Sounding Hassan:

ابتدا کامپیوتر را روشن نموده و دیسکت را داخل درایو قرار می‌دهیم و می‌نویسیم:

C:\> A:

کامپیوتر وارد درایو A می‌شود و بعد می‌نویسیم:

A:\> cd Sounding

کامپیوتر وارد برنامه Sounding می‌شود و بعد hassan را تایپ می‌کنیم:

A:\> Sounding \> Hassan

ابتدا آرمی می‌آید صبر می‌کنیم تا آرم حذف شود و پنجره زیر باز شود.

|      |
|------|
| New  |
| Open |
| Load |
| Run  |
| Drow |
| Exit |

۱- New: اگر بخواهیم داده به کامپیوتر بدهیم New را انتخاب کرده و بعد Enter می‌زنیم. کامپیوتر وارد محیط PE2 می‌شود.

کلید Esc را زده تا مکان‌نما به بالای صفحه برود در ابتدا تعداد داده‌ها را وارد می‌کنیم و بعد داده‌ها را در روش و نر، زیر OA و

مقادیر a (فاصله) زیر R(Ohm) (مقاومت قرائت شده) را می‌نویسیم بعد از نوشتن، کلید F2 را می‌زنیم، در پایین: کلمه Save

ظاهر می‌شود جلوی کلمه Save یک رسم با پسوند dat می‌نویسیم مانند Save A.dat و بعد Enter را می‌زنیم و سپس کلید

F4 را می‌زنیم کامپیوتر سوال می‌کند آیا می‌خواهید از Pe2 خارج شوید در جواب Y را فشار می‌دهیم. کار New تمام می‌شود.

۲- Open: در Open می‌توان فایل‌های ساخته شده در New را مشاهده کرد.

۳- Load: Load، داده‌های فایل‌های Save شده را نشان می‌دهد وقتی روی Load، Enter می‌زنیم اسم فایل را از ما

می‌خواهد بدون dat. و اسم فایل را وارد کرده و بعد داده‌ها در pe2 می‌آیند. برای خارج شدن از pe2 دکمه F4 را می‌زنیم.

۴- Run: Run برنامه را اجرا می‌کند در ستون اول روش کار را از ما می‌خواهد که ما در اینجا Wener را انتخاب می‌کنیم و

بعد با مکان‌نما به پایین رفته و Enter را می‌زنیم و اسم فایل ورودی را می‌نویسیم مانند A.dat و Enter را دوباره زده و با

مکان‌نما به قسمت پایین آمده و فایل خروجی را می‌نویسیم مانند JA.dat و بعد Enter را زده و بر روی Start آمده و Enter

می‌زنیم و بعد روی CANCEL آمده و Enter می‌زنیم و برنامه از Run خارج می‌شود.