



تفسیر خام منحنی‌های سونداژ الکتریکی با استفاده از روش منحنی گرادیان

ایرج پیروز^۱

چکیده

امروزه اغلب، تفسیر منحنی‌های سونداژ الکتریکی توسط نرم‌افزارهایی از قبیل RESIX و یا VES و غیره انجام می‌شود. انجام اینگونه تفسیرها مستلزم این است که، مفسر در ابتدای کار یک مدل اولیه را به نرم‌افزار بدهد. این مدل باید دقیق و حتی‌المقدور برابر مدل واقعی زمین‌شناسی تحت‌الارض منطقه مورد اندازه‌گیری باشد. بنابراین، تعیین این مدل معمولاً کار ساده‌ای نمی‌باشد. مفسر برای تعیین این مدل می‌تواند از دو روش مختلف استفاده نماید. روش اول این است که مفسر تنها با نگاه‌کردن به روند تغییرات منحنی صحرائی، مدل مذکور را حدس بزند. مسلم است که توسط این روش، مدل مذکور با خطای زیادی حدس زده می‌شود. روش دوم، روش تطبیق منحنی صحرائی با منحنی‌های استاندارد (سر منحنی‌ها) می‌باشد. روش اخیرالذکر نسبت به روش اول دارای خطای کمتری می‌باشد ولی روشی وقتگیر و خسته‌کننده می‌باشد. نویسنده این مقاله سعی نموده است که در این تحقیق یک روش سومی را ارائه دهد که ضمن اینکه ضخامت هر لایه در زیر سطح زمین بطور نسبتاً دقیق محاسبه می‌گردد، کاربرد آن سریع و آسان نیز می‌باشد.

اساس کار این روش بر دو اصل مشروحه زیر استوار می‌باشد:

اصل اول این است که در سونداژهای الکتریکی که با آرایش ونر برداشت می‌شوند، عمق اکتشاف، برابر فاصله الکترودی آرایش مربوطه می‌باشد. اصل دوم این است که، طول هر نقطه عطف در روی منحنی صحرائی (اندازه‌گیری شده توسط آرایش ونر)، برابر است با عمق فصل مشترک دو لایه متوالی در زیر سطح زمین مورد اندازه‌گیری. یا بعبارت دیگر، توسط مشتق گرفتن از منحنی صحرائی مذکور، یک منحنی جدید بدست می‌آید که فواصل بین نقاط ماکزیمم و مینیمم متوالی در روی آن، به ترتیب ضخامت لایه‌های متوالی را در زیر سطح زمین مورد اندازه‌گیری، به ما می‌دهد.^۱

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک- دانشگاه صنعتی شاهرود.



واژه‌های کلیدی: تفسیر خام، منحنی گرادیان، سر منحنی، عمق اکتشاف

مقدمه

نظر باینکه روش سونداژ الکتریکی در چند دهه اخیر در کشور ما کاربرد وسیعی پیدا نموده است که از آن جمله می‌توان اکتشاف آبهای زیرزمینی، اکتشاف معادن فلزی زیرزمینی، اکتشاف گسل‌های پنهان و مطالعات ژئوتکنیکی و غیره را نام برد، لذا تفسیر صحیح منحنی‌های حاصله از سونداژهای الکتریکی، فوق‌العاده حائز اهمیت می‌باشد. معمولاً برای تفسیر منحنی‌های فوق‌الذکر از نرم‌افزارهایی از قبیل RESIX و یا VES و امثال آنها استفاده می‌کنند. استفاده از این نرم‌افزارها مستلزم دادن یک سری اطلاعات اولیه به نرم‌افزار می‌باشد. این اطلاعات عبارتند از تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها و مقاومت ویژه لایه‌های مربوط به زمین مواد اندازه‌گیری.

مسلم است که هر چه این اطلاعات با وضعیت زمین‌شناسی تحت‌الارضی زمینی مورد اندازه‌گیری بیشتر مطابقت نماید، خطای محاسبه توسط نرم افزار بکار گرفته شده کمتر خواهد بود.

در روشی که در این تحقیق توسط نویسندگان مقاله ارائه شده سعی شده است که بتوان تعدادی از این اطلاعات را از منحنی سونداژ اندازه‌گیری شده (منحنی صحرائی)، استخراج نمود. این روش که یک روش ابتکاری توسط ارائه دهنده این مقاله می‌باشد، بر دو اصل مشروحه زیر استوار می‌باشد:

اصل اول این است که در سونداژهای الکتریکی که با آرایش و نر برداشت می‌شوند، عمق اکتشاف، برابر فاصله الکترودی آرایش مربوطه می‌باشد.

اصل دوم این است که، طول هر نقطه عطف در روی منحنی صحرائی (اندازه‌گیری شده توسط آرایش و نر)، برابر است با عمق فصل مشترک دو لایه متوالی در زیر سطح زمین مورد اندازه‌گیری. یا بعبارت دیگر، توسط مشتق گرفتن از منحنی صحرائی مذکور، یک منحنی جدید بدست می‌آید که فواصل بین نقاط ماکزیمم و مینیمم متوالی در روی آن، به ترتیب ضخامت لایه‌های متوالی را در زیر سطح زمین مورد اندازه‌گیری مشخص می‌نماید. در این پژوهش صحت دو اصل فوق‌الذکر از طریق بکارگیری روش یاد شده با استفاده از داده‌های حاصله از یک سونداژ الکتریکی که در نزدیکی یک چاه آب انجام شده است، به اثبات رسیده است.



روش تحقیق:

برقراری رابطه بین موثرترین فاصله الکترودی و عمق اکتشاف:

الف- تعریف موثرترین فاصله الکترودی

فرض می‌کنیم مطابق شکل (۱) یک جریان الکتریکی مستقیم توسط دو الکتروود جریان A و B در یک زمین همگن و ایزوترپ 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. مؤلفه افقی چگالی جریان j_x در عمق معین Z از رابطه زیر بدست می‌آید. [۱]:

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

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

شکل (۲) تغییرات j_x را بر حسب تغییرات L و ثابت نگهداشتن Z نشان می‌دهد.

بطوریکه از این شکل دیده می‌شود، برای یک مقدار ثابت و معین Z در روی محور عمق، مقدار مؤلفه افقی چگالی جریان با افزایش فاصله بین الکتروودهای جریان، به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. در این مقاله فاصله بین الکتروودهای جریان A و B که در ازا آن، این مقدار ماکزیمم حاصل می‌گردد، « موثرترین فاصله الکترودی » نامیده می‌شود. تسمیه موثرترین فاصله الکترودی، به این علت است که در این فاصله الکترودی، بزرگترین مؤلفه افقی چگالی جریان در عمق معین Z حاصل می‌شود.

ب- تعریف عمق اکتشاف

برای تعریف عمق اکتشاف و یا عمق موثر، به طور ساده و شماتیک، در این مقاله اقدام به ارائه شکل (۳) شده است.

در این شکل، در زیر سطح زمین، یک زمین همگن و ایزوترپ در نظر گرفته شده است و فرض شده است که M و N الکتروودهای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل و A و B الکتروودهای جریان می‌باشند.



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 لایه‌ها از طرفین به دو سطح M و N محدود می‌باشند. همچنین فرض شده است که الکترودهای جریان به اندازه کافی از یکدیگر فاصله دارند، بطوریکه امتداد خطوط جریان را می‌توان موازی با سطح زمین در نظر گرفت. اگر اختلاف پتانسیل که در طرفین لایه i ام ایجاد می‌شود را با ΔV_i نشان دهیم بنابراین کل اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو سطح M و N از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i \quad (2)$$

$$\Delta V_i = J_{x_i} \cdot l_i \cdot \rho$$

در این رابطه داریم:

در این رابطه l_i فاصله بین دو سطح M و N در لایه i ام و J_{x_i} مولفه افقی چگالی جریان در لایه i ام و ρ مقاومت ویژه الکتریکی زمین می‌باشد.

با توجه به تعریف موثرترین فاصله الکترودی، که در آزاء آن فاصله، بزرگترین مولفه افقی چگالی جریان، در عمق معین Z حاصل می‌شود، می‌توانیم بگوییم که در آزاء این فاصله، بیشترین اختلاف پتانسیل نیز در دو سر لایه‌ای که در عمق معین Z واقع می‌باشد، ایجاد می‌گردد. بعبارت دیگر، در بین n لایه نازک فوق‌الذکر، لایه نازکی که در عمق معین Z واقع می‌باشد، بیشترین سهم از کل اختلاف پتانسیل ΔV که در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود را دارا می‌باشد. عمق معین Z را عمق اکتشاف و یا عمق موثر می‌نامند.

ج- رابطه بین موثرترین فاصله الکترودی AB و عمق اکتشاف Z

رابطه بین موثرترین فاصله الکترودی AB و عمق اکتشاف Z، رابطه پیچیده‌ای می‌باشد، بخصوص در یک زمینی که همگن و ایزوتروپ نباشد، این رابطه فوق‌العاده پیچیده‌تر می‌شود.

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 شلومبرگر 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 ایزوترپ، این عمق اکتشاف برای آرایش شلومبر برابر $Z = AB \times 0.125$ و برای آرایش ونر برابر $Z = AB \times 0.11$ می‌باشد [۳].

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

بر روی یک چنین زمینی، آرایش نیم شلومبرگر 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 (خط‌چین‌ها) 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 (۴) را با افزودن الکتروود جریان B در سمت راست الکترودهای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل M و N (و متقارن نسبت به الکتروود جریان 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 مولف با توجه به مدلی که برای بررسی رابطه فوق‌الذکر بکار گرفته است، به نتیجه مقارنی نسبت به سایر مولفین دست یافته است، بعضی از مولفین، یک رابطه کلی و سرانگشتی را به منظور برقرار نمودن رابطه بین موثرترین فاصله الکتروودی AB و عمق اکتشاف Z پیشنهاد نموده‌اند. این رابطه پیشنهادی،



میانگینی از نتایج حاصل از مدل‌های مختلف می‌باشد که جهت برقراری رابطه فوق‌الذکر بکار گرفته شده‌اند که برای آرایش و نر عبارت است از:

$$Z = AB \times 0.3 \quad (۳)$$

مناسب بودن این رابطه، بطور تجربی به اثبات رسیده است و در عمل از آن استفاده می‌گردد [۵]. در شکل (۵) کاربرد رابطه فوق‌الذکر برای آرایش و نر نشان داده شده است. بطوریکه در این شکل دیده می‌شود، چون فاصله بین الکترودهای متوالی برابر a در نظر گرفته شده است، بنابراین رابطه $AB = 3.a$ برقرار می‌باشد. حال اگر این مقدار را بجای AB در رابطه (۳) قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$Z = 3.a \times 0.3 = 0.9.a \quad (۴)$$

و یا اینکه بطور تقریب خواهیم داشت:

$$Z \approx a \quad (۵)$$

از این رابطه نتیجه می‌شود که در آرایش و نر، عمق اکتشاف Z تقریباً برابر فاصله الکترودی a می‌باشد. معرفی روش منحنی گرادیان

توسط روش منحنی گرادیان که در زیر شرح داده می‌شود، می‌توان از طریق مشتق گرفتن از منحنی سونداژ اندازه‌گیری شده (توسط آرایش و نر)، ضخامت لایه‌های متوالی را در زیر سطح زمین مورد اندازه‌گیری تعیین و تغییر نسبی مقاومت ویژه هر لایه را نسبت به لایه‌های مجاورش مشخص نمود.

بمنظور معرفی روش فوق‌الذکر، یک زمین دو لایه را در نظر می‌گیریم که فرضاً مقاومت ویژه الکتريکی لایه زیری کمتری از لایه روئی آن باشد ($\rho_2 < \rho_1$). اگر عمق فصل مشترک این دو لایه را از سطح زمین برابر Z فرض نمائیم، بدیهی است که برای کلیه اندازه‌گیریهای انجام شده با فاصله‌های الکترودی $a \ll Z$ ، مقاومت ویژه الکتريکی اندازه‌گیری شده، تقریباً ρ_2 می‌باشد. ولی اندازه‌گیری‌هایی که فاصله الکترودی a کمی کوچکتر از Z می‌باشند، بعلاوه اینکه خطوط جریان جذب لایه زیری می‌شوند، چگالی جریان کاهش می‌یابد، لذا مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده، از ρ_1 کمتر می‌باشند و برعکس، اندازه‌گیری‌هایی که فاصله الکترودی a کمی بزرگتر از Z می‌باشند، بعلاوه اخیرالذکر، مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده، از ρ_2 بیشتر می‌باشند. بنابراین در روی منحنی صحرایی بدست آمده برای فاصله الکترودی a یک نقطه عطف ایجاد می‌گردد که طول آن برابر Z عمق فصل مشترک دو لایه می‌باشد. نظر باینکه مشخص نمودن محل نقطه عطف در روی



منحنی صحرائی بطور دقیق میسر نمی‌باشد، می‌توان از طریق مشتق گرفتن از منحنی صحرائی یک منحنی جدید بدست آورد که طول نقاط ماکزیمم و مینیمم متوالی در روی آن، بترتیب عمق فصل مشترک‌های متوالی در زیر سطح زمین مورد اندازه‌گیری را بما می‌دهد. منحنی اخیرالذکر را در این مقاله منحنی گرادیان می‌نامیم. برای بدست آوردن این منحنی، بدینگونه عمل می‌کنیم که مقادیر مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده مربوط به منحنی صحرائی را به طور متوالی از یکدیگر تفریق می‌نماییم (بعنوان مثال $\Delta\rho_i = \rho_{i+1} - \rho_i$) و حاصل این تفریق را بر حسب فاصله الکترودی مربوطه (بعنوان مثال a_i) در روی دستگاه مختصات قائم وارد می‌کنیم. بدیهی است که برای بدست آوردن این منحنی می‌بایستی در آرایش ونر گسترش یابنده‌ای که بکار گرفته می‌شود، مقدار فاصله الکترودی a در تمام اندازه‌گیریهای متوالی، به یک اندازه افزایش یابد (بعنوان مثال، طول a هر بار نسبت به اندازه‌گیری قبلی، ۵ متر بیشتر شود).

مطالعه موردی

بمنظور اثبات صحت موارد فوق‌الذکر، نویسنده این مقاله اقدام به برداشت یک سونداژ الکتریکی با آرایش ونر در نزدیک چاه آب مزرعه دانشکده کشاورزی بسطام (متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود) نمود. علت انجام این سونداژ در نزدیک چاه مذکور این بود که چون اطلاعات مربوط به چاه پیمائی در چاه یاد شده در دسترس بود، امکان مقایسه نتایج حاصل از سونداژ مذکور با اطلاعات حاصل از چاه پیمائی مزبور فراهم بود. شکل (۶) منحنی حاصل از سونداژ فوق‌الذکر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار افزایش فاصله الکترودی در این اندازه‌گیریهای متوالی برابر ۵ متر بوده است. شکل (۷)، منحنی گرادیان سونداژ اخیر را نشان می‌دهد. بطوریکه از منحنی سونداژ دیده می‌شود، مشخص نمودن نقطه عطف در روی آن تقریباً غیر ممکن می‌باشد ولی توسط منحنی گرادیان (شکل (۷))، برای عمق حدود ۴۰ متر یک مینیمم که نمایانگر عمق فصل مشترک اول می‌باشد و برای عمق حدود ۶۵ متر یک ماکزیمم که نمایانگر عمق فصل مشترک دوم می‌باشد به وضوح دیده می‌شود.

سه عدد ماکزیمم موضعی که در انتها الیه سمت راست این شکل دیده می‌شوند به احتمال زیاد حاصل از ناهمگنی‌های سطح زمین می‌باشند.

این اعداد به خوبی با اطلاعات حاصل از چاه پیمائی فوق‌الذکر مطابقت می‌نمایند. در شکل (۸) از چپ به راست به ترتیب لوگ‌های SP، مقاومت الکتریکی و گاماری نشان داده شده‌اند. این لوگ‌ها نشان می‌دهند که



تا عمق حدود ۴۵ متری، مقدار درصد خاک رس، زیاد می‌باشد ولی در فاصله ۴۵ متری تا ۶۵ متری مقدار خاک رس کاهش یافته و در عوض آن، لایه آبدار شده است و از ۶۵ متر به پائین دوباره درصد خاک رسی افزایش یافته است.

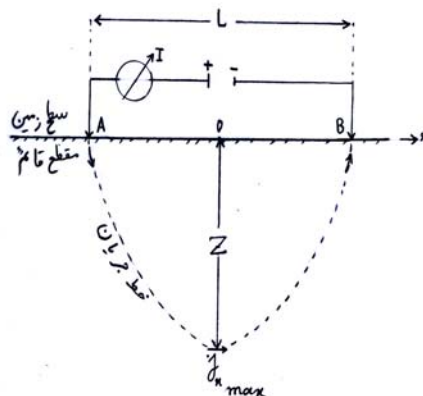
نتیجه‌گیری:

چون منحنی‌ها حاصله از سونداژهای الکتریکی برای تفسیر توسط نرم‌افزارهای موجود، احتیاج به یک سری اطلاعات اولیه از جمله تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها و مقاومت ویژه الکتریکی هر لایه را دارند که برای مفسر ناشناخته می‌باشند، لذا مفسر می‌تواند با استفاده از روش منحنی گرادیان بااستثنای مقاومت ویژه لایه‌ها، سایر اطلاعات فوق‌الذکر را تحصیل و به نرم‌افزارهای فوق‌الذکر بدهد.

از نقطه ضعف‌های این روش این است که مقدار عددی مقاومت ویژه هر لایه را نمی‌توان مشخص نمود و فقط می‌توان، نسبت مقاومت ویژه آن لایه را به مقاومت ویژه 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.

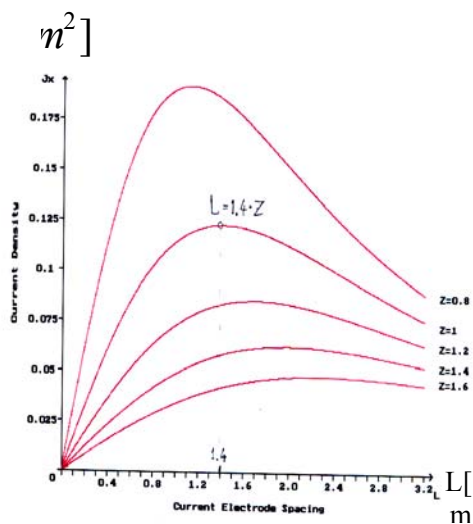
مراجع

- [1] Telford , W.M. , Geldart , L.P. , Sheriff , R.E. , "Applied Geophysics". Second Edition, 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.

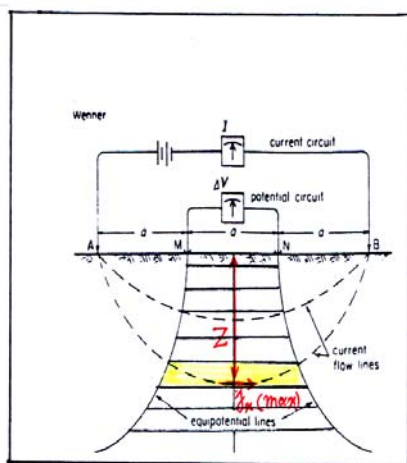


شکل (۱) نمایش مولفه افقی چگالی جریان (j_x) که توسط الکترودهای جریان

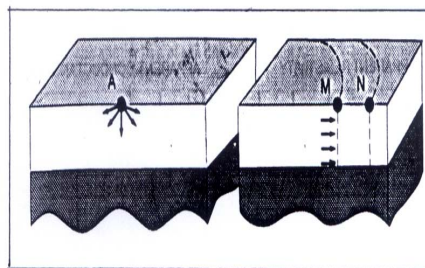
A و B در یک زمین همگن و ایزوتروپ برقرار شده است.



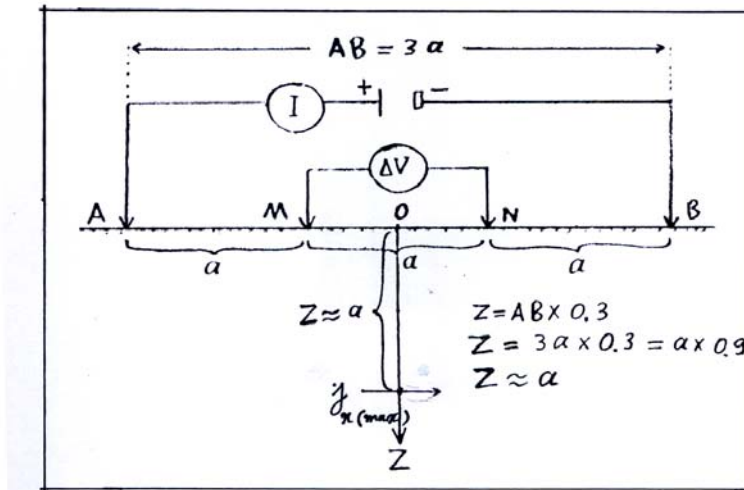
شکل (۲) تغییرات مولفه افقی جریان (J_x) با افزایش فاصله الکترودی $AB=L$ و ثابت نگهداشتن عمق Z ، در یک زمین همگن و ایزوتروپ. برنامه‌نویسی کامپیوتری برای تهیه این شکل توسط آقای علی‌اصغر یعقوبی انجام شده است.



شکل (۳) تقسیم زمین به لایه‌های نازک افقی هم ضخامت و نمایش عمق اکتشاف

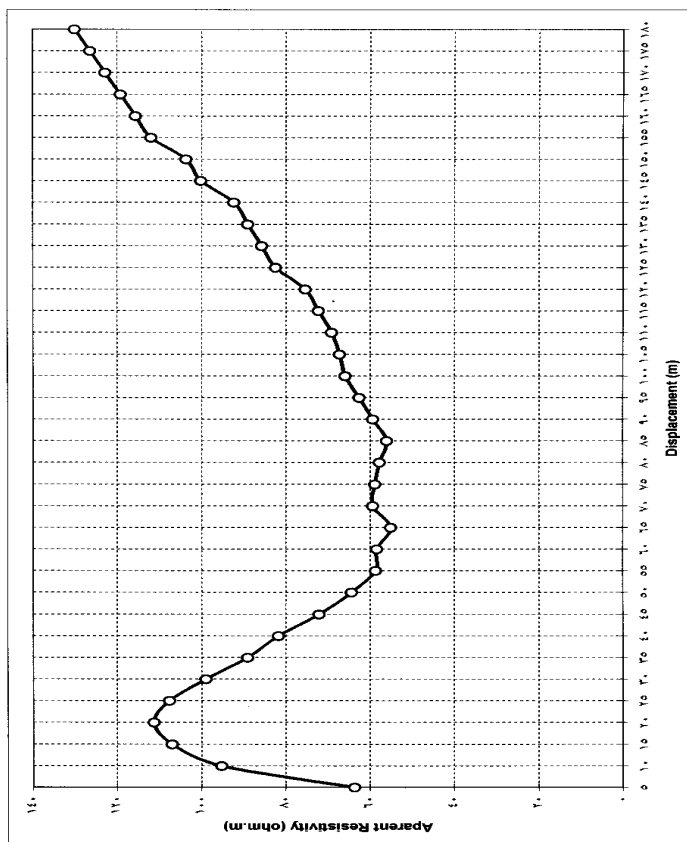


شکل (۴): این شکل یک آرایش نیم شلومبرگر را نشان می‌دهد که بر روی یک زمین متشکل از دو لایه افقی بکار گرفته شده است. مقاومت مخصوص الکتریکی لایه‌زبری نسبت به مقاومت مخصوص لایه رویی بینهایت فرض شده است. فلش‌ها خطوط جریان را و خط چین‌ها سطح هم پتانسیل را نشان می‌دهد.



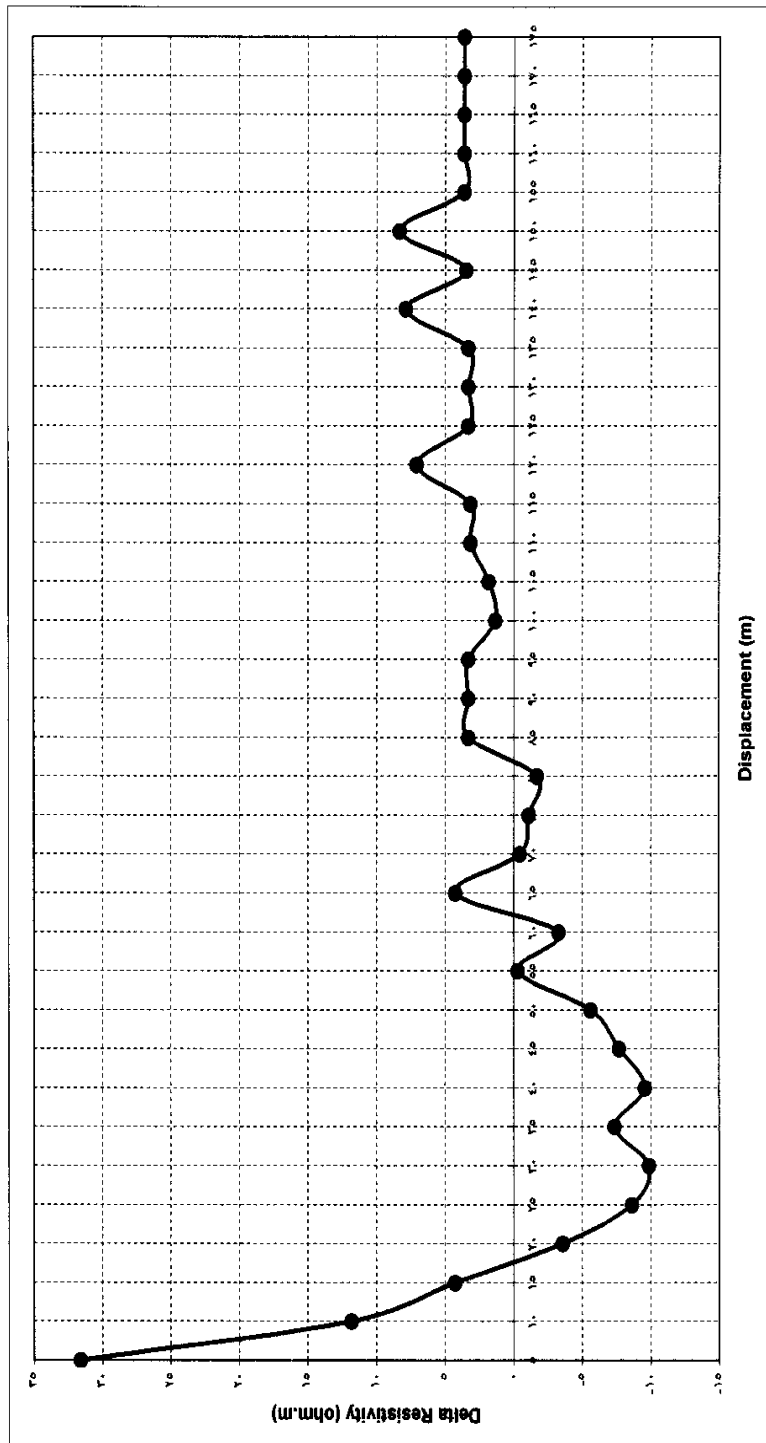
شکل (۵) در آرایش وئر، فاصله الکترودی a تقریباً برابر عمق اکتشاف Z می‌باشد. $Z \approx a$

Resistivity-Displacement Chart 1



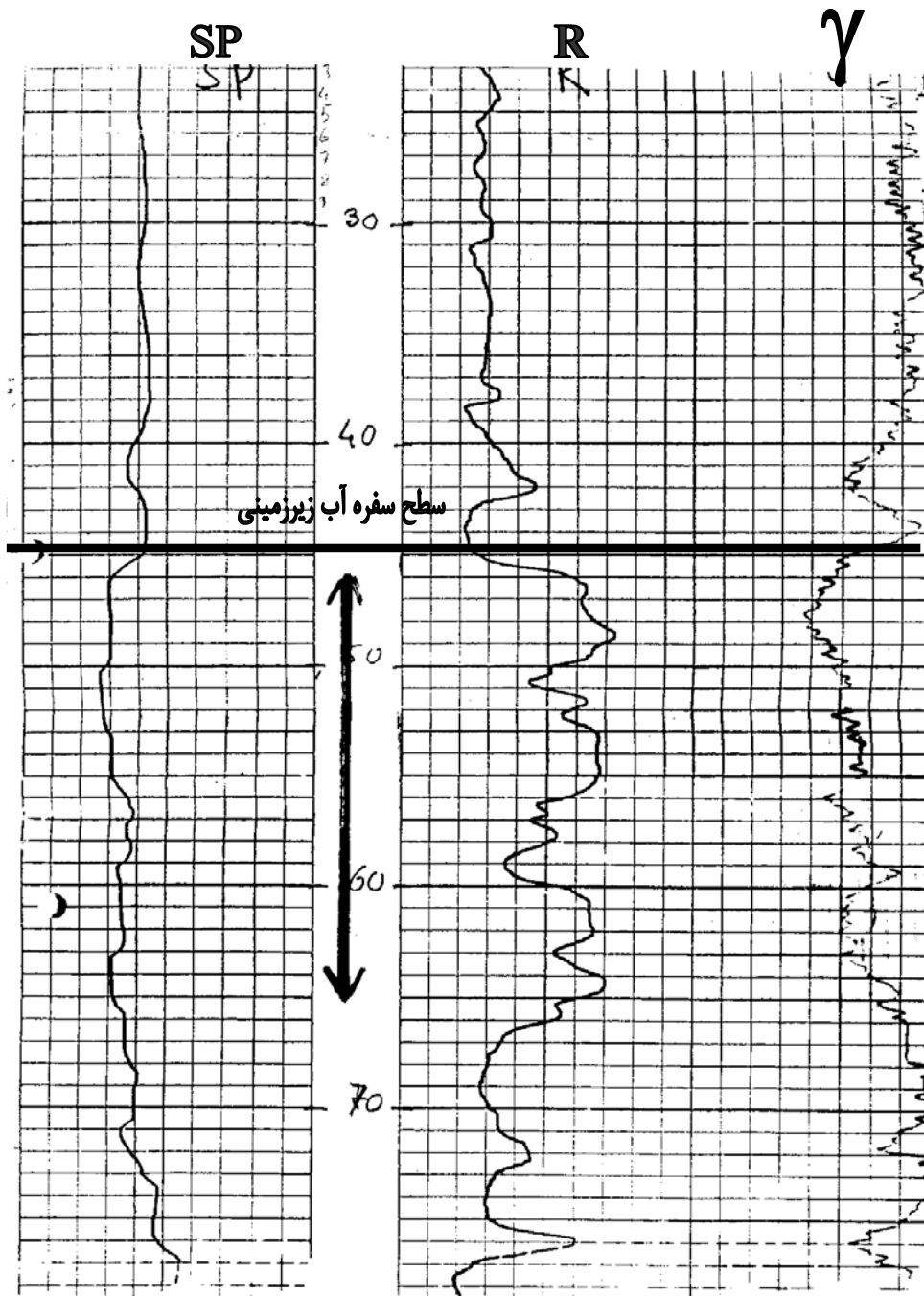
شکل (۶) منحنی سولنایز الکتریکی که در نزدیکی چاه آب مزرعه دانشکده کشاورزی بسطام برداشت شده است

Delta Resistivity-Displacement Chart^۱



شکل (۷) منحنی گرادیان مربوط به معنی سونداژ نشان داده در شکل (۶)

برنامهنویسی کامپیوتری برای تهیه این شکل توسط آقای بابک تمدن انجام شده است.



شکل (۸) لوگ‌های حاصله از چاه پیمائی در چاه آب دانشکده کشاورزی بسطام که از چپ به راست عبارتند از لوگ SP، لوگ مقاومت الکتریکی و لوگ گاماری