

## عمق اکتشاف برای بررسی‌های الکترومغناطیسی هوابرد حوزه فرکانس

زینب باتمانی<sup>۱</sup>، فرزاد شیرزادی تبار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران [zeinab.batmani@yahoo.com](mailto:zeinab.batmani@yahoo.com)

<sup>۲</sup>آستادیار ژئوفیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران [f.shirzadi@razi.ac.ir](mailto:f.shirzadi@razi.ac.ir)

چکیده:

در سوندازنی الکترومغناطیس، عمق اکتشاف بیشینه عمقی است که یک هدف معلوم در یک میزبان معلوم توسط حسگر می‌تواند مشاهده شود. عوامل اصلی مؤثر بر روی عمق اکتشاف عبارتند از: حساسیت حسگر، دقت، فرکانس‌های مورد استفاده، روش‌های پردازش داده‌ها و تفسیر آنها، سطح نوفه و خواص هدف و سنگ میزبان. با استفاده از حسگرهای الکترومغناطیس هوابرد، روابط ساده‌ای برای تخمین عمق اکتشاف از تجزیه پاسخ‌های الکترومغناطیس بر مبنای مدل‌های نیم فضای لایه‌ای به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهند که عمق اکتشاف افزایش می‌یابد اگر: عمق پوست افزایش یابد، مقدار آستانه کاهش یابد، فاصله جدایش فرستنده و گیرنده افزایش یابد، و تباین مقاومت ویژه بین سنگ میزبان و هدف افزایش یابد. **واژه‌های کلیدی:** الکترومغناطیس هوابرد، عمق اکتشاف، عمق پوست، مقاومت ویژه، مقدار آستانه

### Depth of investigation for frequency domain airborne electromagnetic surveys

Zeinab Batmani<sup>1</sup> and Farzad Shirzaditabar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. student of Geophysics, Razi University, Kermanshah, Iran, [zeinab.batmani@yahoo.com](mailto:zeinab.batmani@yahoo.com)

<sup>2</sup>Assistant professor of Geophysics, Razi University, Kermanshah, Iran, [f.shirzadi@razi.ac.ir](mailto:f.shirzadi@razi.ac.ir)

#### Abstract

The depth of investigation (DI) in electromagnetic (EM) soundings is a maximum depth at which a given target in a given host can be detected by a given sensor. The factors affected the DI are: the sensor sensitivity, precision, operating frequencies, the techniques used in data processing and interpretation, noise level and target and host properties. In this paper, the depth of investigation for frequency domain airborne electromagnetic surveys is calculated. Simple relations are derived for the DI over layered half-space models. Results show that the depth of investigation increases if the skin depth increases, the threshold value decreases, the separation distance increases, and the resistivity contrast between host rock and target increases.

**Keywords:** airborne electromagnetic, depth of investigation, skin depth, resistivity, threshold

#### ۱ مقدمه

عمق اکتشاف (Depth of Investigation - DI) برای روش‌های الکترومغناطیس هوابرد به عنوان بیشینه عمقی که یک جسم با رسانایی معلوم، یک بی‌هنجاری قابل تشخیص ارائه می‌دهد تعریف شده است (پلتونیمی، ۱۹۹۸). در بسیاری از موارد، عمق پوست تخمینی از عمق اکتشاف سیستم‌های الکترومغناطیس است. عمق پوست عمقی در یک محیط همگن است که دامنه موج تخت در آن به  $1/e$  یا ۳۷٪ دامنه اصلی برسد. عمق پوست  $\delta$  برابر است با:

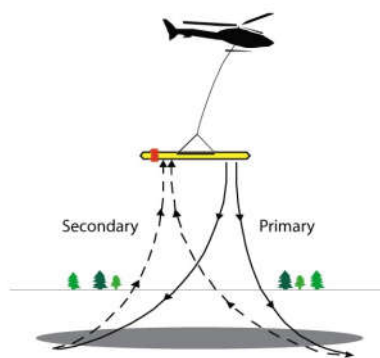
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma$  رسانندگی زمین ( $\sigma=1/\rho$ )،  $\mu$  تراوایی مغناطیسی و  $\omega=2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای موج تخت است. عمق اکتشاف به صورت کاملاً تجربی تعیین می‌شود و عواملی مانند ابعاد و ویژگی‌های مشخص سیستم الکترومغناطیسی (شکل پیچه، فاصله بین پیچه‌ها و فرکانس)، ارتفاع پیچه‌های فرستنده و گیرنده از سطح زمین، سطح نوفه (N) و سیگنال (S) سیستم و نیز خواصی از رسانای زیر سطحی مقدار رسانایی سنگ میزبان و رسانایی خود هدف، آن را متأثر می‌کنند. اگرچه در موقعیت‌های ایده آل عمق اکتشاف ممکن است بزرگتر از عمق پوست باشد، اما در موقعیت‌های زمین‌شناسی پیچیده و یا نواحی با نوفه بالا،

عمق اکتشاف کمتر از عمق پوست خواهد شد (هوانگ، ۲۰۰۵). شلومبرژه در سال ۱۹۳۲ اولین کسی بود که عمق اکتشاف را برای روش مقاومت ویژه معرفی کرد. پُل و رُی (۱۹۷۰) و اسپایز (۱۹۸۹) عمق اکتشاف را برای سیستم‌های الکترومغناطیسی زمینی مورد مطالعه قرار دادند. این موضوع توسط لکشمنا و بیچارا (۱۹۸۱) برای سیستم‌های الکترومغناطیسی هوابرد برای کار بر روی پاسخ‌های زمین لایه‌ای مورد پژوهش قرار گرفته است.

## ۲ روش تحقیق

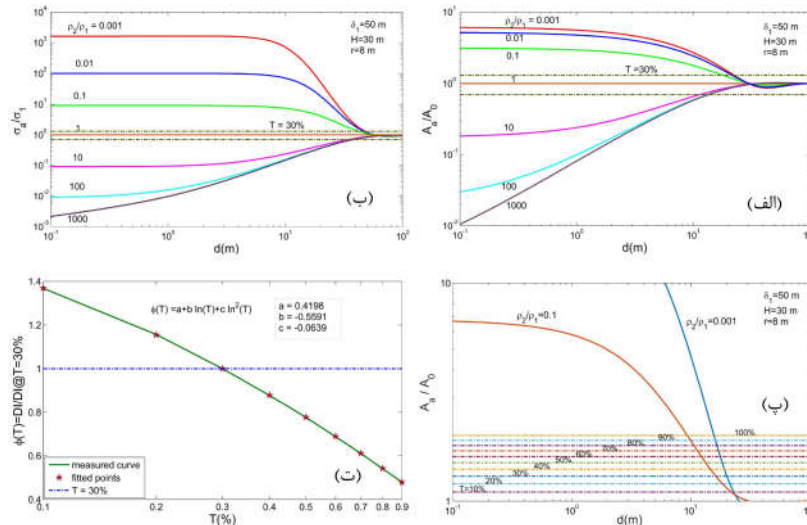
در الکترومغناطیسی هوابرد حوزه فرکانس، پیچیده‌های فرستنده و گیرنده به صورت افقی درون محفظه‌ای به نام پرند قرار می‌گیرند و با کابلی از زیر بالگرد آویزان می‌شوند (شکل ۱). روابط بین دامنه میدان مغناطیسی ثانویه و اولیه بر روی زمین لایه‌ای توسط ویت (۱۹۸۲) داده شده است. برای تعیین عمق اکتشاف، اثر تک تک عوامل مؤثر بر عمق اکتشاف را با استفاده از مدل‌های نیم فضای لایه‌ای ارائه کرده و سپس آنها را با هم در نظر می‌گیریم.



شکل ۱. سیستم الکترومغناطیسی هوابرد.

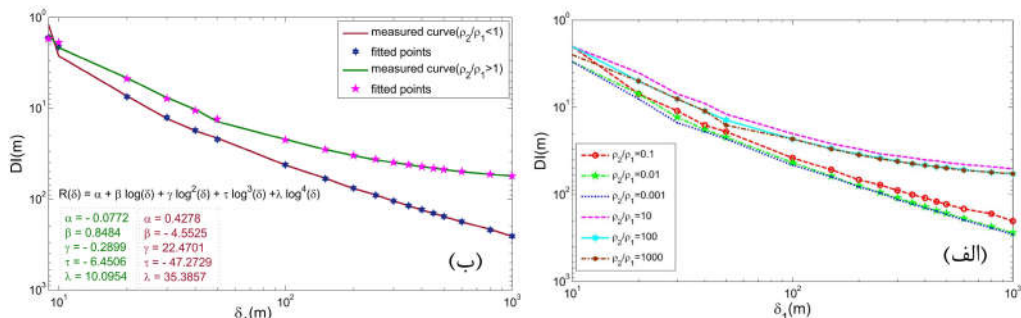
فرض کنید نیم فضای با مقاومت ویژه  $\rho_1$  داریم و دامنه میدان ثانویه و رسانایی ظاهری ایجاد شده توسط آن به ترتیب  $A_0$  و  $\sigma_1$  است. حالا لایه دیگری در زیر این لایه با مقاومت ویژه  $\rho_2$  در عمق مشخص  $d$  در نظر می‌گیریم. در این حالت یک محیط دو لایه داریم که دامنه میدان ثانویه و رسانایی ظاهری ایجاد شده در این حالت با حالت قبل یکسان نیست و به ترتیب آن را با  $A_a$  و  $\sigma_a$  نشان می‌دهیم. حالا به ازای تغییر در نسبت  $\rho_2/\rho_1$ ، برای ضخامت‌های  $d$  مختلف، می‌توانیم نسبت‌های  $A_a/A_0$  و  $\sigma_a/\sigma_1$  را رسم کنیم. در این حالت می‌توانیم یک مقدار آستانه برای تغییر در دامنه تعریف کنیم طوری که آن مقدار از ضخامت لایه اول که به ازای آن، نسبت  $A_a/A_0$  و  $\sigma_a/\sigma_1$  به مقدار آستانه برسد را به عنوان عمق اکتشاف در نظر بگیریم. مقادیر آستانه بالا مانند ۲۰٪ یا ۳۰٪ برای اهداف مقاوم و مقادیر پایین به اندازه ۵٪ یا ۱۰٪ برای اهداف رسانا پیشنهاد می‌شود. شکل (۲-۲) الف) منحنی تغییرات نسبت  $A_a/A_0$  و شکل (۲-ب) منحنی تغییرات نسبت  $\sigma_a/\sigma_1$  را برحسب  $d$  برای نسبت‌های مختلف  $\rho_2/\rho_1$  برای یک سیستم الکترومغناطیسی هوابرد با فاصله پیچ‌های ۸ متر، ارتفاع ۳۰ متر و عمق پوست  $\delta_1=50$  متر نشان می‌دهد. در حالت‌های  $\rho_2/\rho_1 < 1$  عمق اکتشاف بیشتری به دست آمده زیرا مقاومت ویژه کمتر لایه پایین، باعث القای جریان بیشتری می‌شود و دامنه بیشتری تولید می‌کند. عمق اکتشاف به دست آمده در هر دو شکل تقریباً یکسان است، با این تفاوت که مقدار رسانایی ظاهری، در حالت تباین رسانایی بالاتر بین دو لایه، هنگامی که لایه دوم رساناتر از لایه اول باشد، افزایش بیشتر و هنگامی که لایه دوم مقاوم‌تر از لایه اول باشد کاهش بیشتری یافته است. برای بهتر مشخص شدن تعیین عمق اکتشاف، قسمتی از شکل (۲-الف) با بزرگنمایی بیشتر و برای دو منحنی مشخص در شکل (۲-پ) نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که هرچه مقدار آستانه کمتر انتخاب شود، عمق اکتشاف بیشتر محاسبه خواهد شد. همچنین عمق اکتشاف در تباین رسانایی کمتر، بیشتر به مقدار آستانه حساس است. زمانی که تباین رسانایی زیاد باشد، مقدار عمق اکتشاف در آستانه‌های مختلف نزدیک به هم است در صورتی که برای تباین رسانندگی پایین، مقدار عمق اکتشاف تفاوت نسبتاً زیادی در آستانه‌های مختلف دارد.

اگر در شکل (۲-ب) مقادیر عمق اکتشاف را برای آستانه‌های مختلف به دست آورده و آنها را با تقسیم بر عمق اکتشاف برای آستانه ۳۰٪ بهنجار کنیم، می‌توانیم تغییرات آن را برای یک عمق پوست مشخص ترسیم کنیم. در این صورت می‌توانیم رابطه‌ای بین عمق اکتشاف بهنجار شده با مقدار آستانه بیابیم (شکل ۲-ت).



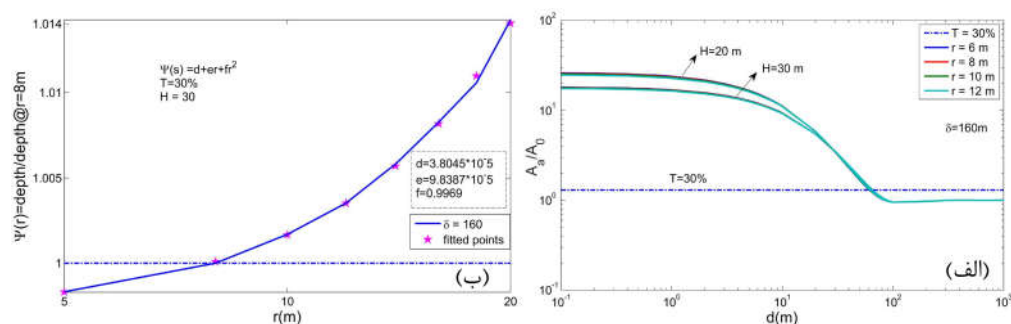
شکل ۲. (الف) منحنی دامنه بی‌هنجاری بر حسب  $d$  برای نسبت‌های مختلف  $p_2/p_1$ . (ب) منحنی رسانایی ظاهری بر حسب  $d$  برای نسبت‌های مختلف  $p_2/p_1$ . (ت) تعیین عمق اکتشاف به ازای مقادیر آستانه مختلف. (ث) عمق اکتشاف بهنجار شده بر حسب تغییرات مقدار آستانه. عمق اکتشاف از تقاطع منحنی‌ها با خط افقی آستانه به دست آمده است.

برای پیدا کردن رابطه‌ای میان عمق پوست و عمق اکتشاف، تغییرات عمق اکتشاف را برای تباین مقاومت ویژه‌های مختلف به ازای عمق پوست‌های متفاوت محاسبه و رسم می‌کنیم. شکل (۳-الف) این نمودارها را نشان می‌دهد. عمق اکتشاف در عمق پوست پایین مستقل از تباین رسانایی است اما هنگام افزایش عمق پوست، مقادیر آن برای تباین رسانایی مختلف متفاوت است و سرعت افزایش عمق اکتشاف، بسته به اینکه لایه دوم مقاوم‌تر و یا رساناتر باشد، متفاوت است. برای حالتی که لایه دوم مقاوم‌تر باشد، شدت افزایش عمق اکتشاف کمتر خواهد شد و منحنی‌ها به یک خط افقی مجانب می‌شوند در حالی که اگر لایه دوم رساناتر از لایه اول باشد عمق اکتشاف با افزایش عمق پوست همچنان افزایش می‌یابد. از آنجا که این نمودارها با هم متفاوت هستند، از مقادیر منحنی‌هایی با تباین مقاومت ویژه بزرگ‌تر از یک و مقادیر منحنی‌هایی با تباین مقاومت ویژه کوچک‌تر از یک به طور جداگانه میانگین گرفته شده است. برای رسیدن به یک رابطه یکتا برای هر یک از این دو حالت، نمودار میانگین به همراه رابطه به دست آمده برای هر دو حالت از برازش آن با یک چند جمله‌ای درجه ۴ در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.



شکل ۳. (الف) تغییرات عمق اکتشاف با تغییر عمق پوست برای تباین‌های مختلف مقاومت ویژه. (ب) میانگین منحنی‌هایی با تباین مقاومت ویژه بزرگ‌تر از یک (منحنی بالا) و کوچک‌تر از یک (منحنی پایین) به همراه روابط برازش شده برای آنها (به ترتیب چپ و راست).

تغییر عمق اکتشاف با تغییر ارتفاع حسگر از سطح زمین و با تغییر فاصله جدایش بین پیچه‌های فرستنده و گیرنده هم قابل بررسی است. شکل (۴-الف) این تغییرات را نمایش داده است. با کمی دقت بر این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ارتفاع حسگر و نیز افزایش فاصله جدایش، عمق اکتشاف هم افزایش می‌یابد اما این افزایش خیلی ناچیز است و تأثیر زیادی بر روی عمق اکتشاف نمی‌گذارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که شدت سیگنال با افزایش ارتفاع حسگر کاهش یافته است. با توجه به شکل (۴-الف)، می‌توانیم رابطه‌ای میان عمق اکتشاف با فاصله جدایش بین فرستنده و گیرنده پیدا کنیم. برای این کار عمق اکتشاف محاسبه شده در هر فاصله جدایش را با تقسیم بر عمق اکتشاف برای فاصله جدایش ۸ متر به‌نجا کرده و نتیجه به دست آمده را بر حسب فاصله جدایش رسم می‌کنیم. این رسم در شکل (۴-ب) آمده و رابطه برازش شده هم در درون شکل پیداست. این شکل نشان می‌دهد که اگر فاصله جدایش در یک ارتفاع مشخص بیشتر شود، عمق اکتشاف با سرعت بیشتری افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴. (الف) تغییرات عمق اکتشاف با تغییر فاصله جدایش بین پیچه‌ها و تغییر ارتفاع حسگر از سطح زمین. با افزایش ارتفاع و افزایش فاصله جدایش، عمق اکتشاف زیاد تغییر نمی‌کند. (ب) تغییر عمق اکتشاف به‌نجا شده با فاصله جدایش.

حال که تغییرات عمق اکتشاف را با هر یک از عوامل مؤثر بر آن تعیین کردیم، می‌توانیم تأثیر همه این عوامل را با هم در نظر بگیریم. در این صورت عمق اکتشاف را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$DI = \varphi(T) \times R(\delta) \times \psi(r) \quad (۲)$$

### ۳ نتیجه‌گیری

عمق اکتشاف با عوامل زیادی تغییر می‌کند: با افزایش تباین مقاومت ویژه بین سنگ میزبان و هدف، افزایش می‌یابد؛ با افزایش ارتفاع حسگر از سطح زمین و افزایش جدایش بین پیچه‌های فرستنده و گیرنده، به کندی افزایش می‌یابد؛ با افزایش عمق پوست (یا کاهش فرکانس) افزایش می‌یابد؛ با کاهش مقدار آستانه افزایش می‌یابد. در آخر، عمق اکتشاف در یک مطالعه بخصوص با اعمال همزمان همه این اثرات قابل محاسبه خواهد بود.

### منابع :

- Huang, H., 2005, Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors: *Geophysics*, **70**, G135-G142.
- Lakshmanan, J., Bichara, M. 1981, Depth of penetration of airborne electromagnetics over stratified earth: 51st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Paul, P.A., Roy, A., 1970, Approximate depth of penetration in EM dipole prospecting: *PAGEOPH*, **81**, 26-36.
- Peltoniemi, M., 1998, Depth of penetration of frequency-domain airborne electromagnetic in resistive terrains: *Exploration Geophysics*, **29**, 12-15
- Spies, B.R., 1989, Depth of exploration in electromagnetic sounding methods: *Geophysics*, **54**, 872-888.
- Wait, J.R., 1982, *Geo-electromagnetism*: Academic Press.