

مطالعه عمق تجسس در آرایه مقاومت ویژه ترکیبی (CRP)

محمدعلی ریاحی* و فرهاد عبدالهی*

*موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۱۴۱۵۵-۲۴۶۶

دریافت مقاله: ۷۷/۴/۱۳ بدیرش مقاله: ۸۲/۱۰/۲۳

چکیده

در این مقاله برای محاسبه مقادیر واقعی عمق تجسس آرایه مقاومت ویژه ترکیبی، ابتدا تابع توزیع اختلاف پتانسیل برای یک مدل نیم‌فضا، همگن، ناهمسان‌گرد و شیب‌دار محاسبه شد. برای حل تابع محاسبه شده روش عددی انتگرال‌گیری گوس لژاندر به کار رفت. سپس حل عددی تابع مذکور منجر به محاسبه مقادیر عمق تجسس نسبت به طول آرایه شد که با رسم نمودارهای مربوط به تابع توزیع پتانسیل نسبت به مقادیر مذکور، میزان این نسبت به حداکثر تابع توزیع پتانسیل به دست آمد. برای یک ضریب ناهمسان‌گردی و شیب مشخص به ازای مقادیر مختلف طول آرایه عمق تجسس بیشینه بر طول آرایه محاسبه شد. با میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده مقادیر نسبتاً ثابت از نسبت عمق تجسس بیشینه به طول آرایه حاصل شد. با استفاده از نتایج به دست آمده برای عمق تجسس، شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده برای داده‌های واقعی حاصل از آرایه مقاومت ویژه ترکیبی اصلاح شدند.

کلیدواژه‌ها: عمق تجسس، تابع توزیع اختلاف پتانسیل، نسبت عمق تجسس به طول آرایه

۱ مقدمه

مختلف الکترودی (ونر، شلومبرژه، دوقطبی - دوقطبی) محاسبه کرد و پاسخ یک لایه نازک افقی را با تغییرات عمق نشان داد. از نظر او، در نقطه‌ای که منحنی شاخص عمق تجسس نرمال شده به حداکثر برسد در این حالت، مقدار آن به مثابه عمق تجسس آرایه الکترودی تعریف می‌شود. اساس نظریه روی و آپاراوو (۱۹۷۱) در این مورد که کوفود (۱۹۷۲) آن را تأیید کرده بود، به طور جدی از سوی گویتاسارما (۱۹۸۱) و بارکر (۱۹۸۹) مورد انتقاد قرار گرفت و به خاطر اهمیت علمی موضوع، افراد دیگری نیز به طور وسیع به تحقیقات برای پی بردن به صحت نتایج روی و الیوت (۱۹۸۱) اقدام کردند.

یکی از راه‌های بررسی چگونگی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در لایه‌های مختلف زمین، تهیه نقشه‌ها و شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی است. معمولاً در ارائه این گونه نقشه‌ها و شبه مقاطع، عمق تجسس به صورت یک رابطه تجربی که ضریبی از طول آرایه (I_1O) است در نظر گرفته می‌شود ولی محاسبه نمی‌شود.

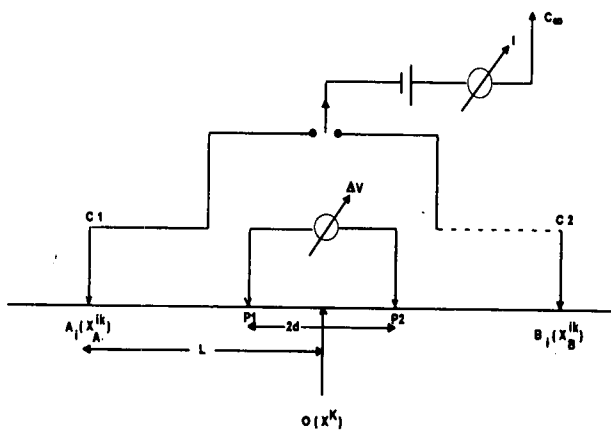
نظر به تعاریف متفاوت ارائه شده از سوی محققین مختلف، عمق تجسس در یک آرایه الکترودی عبارت از عمقی از یک لایه نازک افقی بینهایت کوچک است که بیشترین سهم یا مقدار علائم را در کل علائم اندازه‌گیری شده روی سطح زمین داراست. این پارامتر برای آرایه‌های مختلف الکترودی را با توجه به تابع توزیع اختلاف پتانسیل هر آرایه محققین مختلف (روی و آپاراوو، ۱۹۷۱؛ باتاکاریا و سن، ۱۹۸۱؛ آپاراوو و سارما، ۱۹۸۳؛ بارکر، ۱۹۸۹؛ دوگلاس و لی، ۱۹۹۹) مورد بررسی قرار داده‌اند. روی (۱۹۷۲) نمودارهایی را برای تغییرات قراردادی آرایه‌های

بانرجی و پال (۱۹۸۶) با استفاده از روش المان‌های محدود، نشان دادند که روابط ارائه شده از طرف روی و آپاراوو (۱۹۷۱) برای یک مدل همگن و همسان‌گرد صحیح‌اند. بارکر (۱۹۸۹) نشان داد که نتایج روی (۱۹۷۲) دارای کاربرد مهمی هستند که منجر به توسعه روش سونداژ هامشی شد.

تجسس ابتدا به طور مختصر روش مقاومت ویژه ترکیبی (CRP) توضیح داده شده است.

۲ روش مقاومت ویژه ترکیبی (CRP)

این روش را که ابتدا کاروس و پرنو (۱۹۸۵) مطرح کردند، ترکیبی از حالت کاوش‌های عمقی و جانبی است. به این صورت که وقتی فاصله الکترودهای جریان تغییر می‌کند، فاصله الکترودهای پتانسیل نیز به نسبت فاصله الکترودهای جریان تغییر می‌کند. این روش تا حدودی شبیه روش‌های نیم شلومبرژه است، از این روش برای پی‌جویی لایه‌های رسانا و عایق، دایک‌ها و حفره‌ها استفاده می‌شود. در این آرایه، ترکیب الکترودها به این صورت است که دو الکتروود جریان I_1 و I_2 در دو امتداد عمود بر هم از نقطه‌ای به نام مرکز (O) قرار می‌گیرند و الکترودهای پتانسیل در امتداد یکی از الکترودهای جریان در طرفین مرکز و به فاصله d از یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل ۱).



شکل ۱. طرح‌واره آرایه مقاومت ویژه ترکیبی (CRP).

همان‌طور که در شکل پیداست، الکتروود I_2 یا I_∞ در بی‌نهایت فیزیکی و عمود بر امتداد الکترودهای دیگر قرار می‌گیرد و در حالت متقارن الکتروود I_1 به محل I_2 منتقل می‌شود (بی‌نهایت فیزیکی) و I_2 به طور قرینه در راستای P_1P_2 قرار می‌گیرد و این

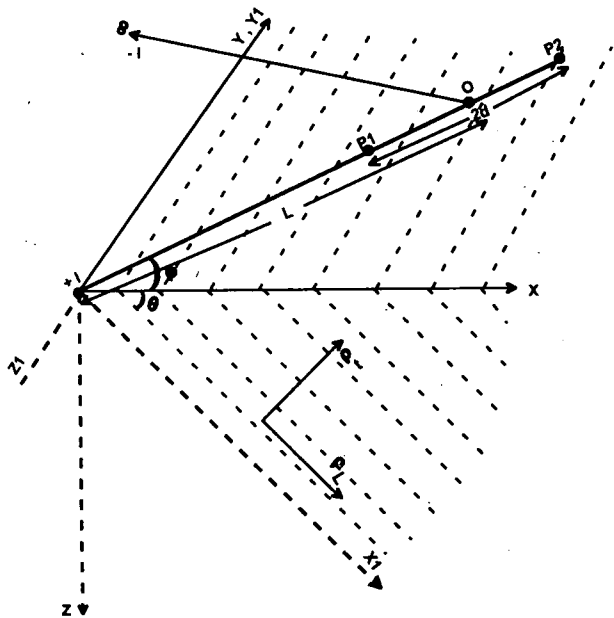
با توجه به تعریف روی و آپاراوو (۱۹۷۱) و روی (۱۹۷۲)، باتاکاریا و سن (۱۹۸۱) عمق تجسس برای آرایه‌های مختلف الکتروودی به جز برای روش مقاومت ویژه ترکیبی روی مدل زمین همگن و ناهمسان‌گرد با لایه‌های شیب‌دار را محاسبه کردند. منظور از روش مقاومت ویژه ترکیبی، حالت خاصی از روش سه الکتروودی است که دو الکتروود جریان I_1 و I_2 در دو امتداد عمود بر هم از نقطه‌ای به نام مرکز (O) قرار می‌گیرند. آنها در محاسباتشان چنین فرض کردند که منحنی شاخص عمق تجسس نرمال شده تابعی از پارامترهای طول آرایه (L)، شیب لایه (θ)، ضریب ناهمسان‌گردی (λ)، عمق (Z) و آزیموت (φ)، زاویه امتداد آرایه با محورها است. به عبارت دیگر نمودار شاخص توزیع پتانسیل را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$NDIC = \varphi(L, \theta, \lambda, Z)$$

در این حالت عمق تجسس به صورت تابعی از طول آرایه L، شیب سطح لایه‌بندی θ ، ضریب ناهمسان‌گردی λ و عمق Z در نظر گرفته شده است.

آپاراوو و همکاران (۱۹۹۵) با بررسی نتایج ارائه شده باتاکاریا و سن (۱۹۸۱) بیان کردند که نمی‌توان با تغییر دادن بعضی از پارامترها، مدل همگن و ناهمسان‌گرد را مدل همگن و همسان‌گرد فرض کرد و در طی بحثی روابط نظری به دست آمده آنها را اصلاح کردند. آپاراوو (۱۹۹۷) و آپاراوو و همکاران (۱۹۹۵) تابع NDIC را برای آرایه‌های مختلف الکتروودی (ونر، شلومبرژه، دو الکتروودی، سه الکتروودی متقارن، قطبی - دو قطبی و دو قطبی - دو قطبی) در حالتی که لایه‌بندی افقی و قائم باشد تعریف و معین کردند. اگر چه آنها تابع NDIC را برای حالت لایه شیب‌دار که مورد بحث این مقاله است محاسبه نکردند ولی آپاراوو (۱۹۹۷) تنها راه ممکن برای حل توابع NDIC در حالت لایه شیب‌دار را استفاده از روش‌های عددی پیشنهاد نمود. در ادامه، قبل از بررسی روابط بین جریان و پتانسیل و محاسبه عمق

یک الکتروود جریان $(I_1) + I$ واقع در $(0, 0, 0)$ ، یک الکتروود پتانسیل P_1 در $[(L-d)\cos\varphi, (L-d)\sin\varphi, 0]$ الکتروود دیگر پتانسیل P_2 در $[(L+d)\cos\varphi, (L+d)\sin\varphi, 0]$ و الکتروود دیگر جریان $(I_2) - I$ در $(\infty, \infty, 0)$ واقع شده‌اند.



شکل ۲. مدل زمین لایه‌ای که یک محیط نیم‌فضا است، برای حالتی که لایه‌بندی با سطح افقی به اندازه θ شیب داشته باشد. در این شکل $I_1 P_1 P_2$ آرایه و φ ، زاویه امتداد آرایه با محور x است

پتانسیل در هر نقطه (x, y, z) در یک مدل نیم‌فضای همگن و ناهمسان‌گرد با مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی ρ_m از رابطه (۲) به دست می‌آید. آپاراوو (۱۹۹۷) ممان‌های دو قطبی یک حجم قطبیده را با روابط زیر نشان داد، که

$$\mu_x = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \cdot dx dy dz \quad \text{و} \quad \mu_y = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \cdot dx dy dz$$

و $\mu_z = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \cdot dx dy dz$ است. به طوری که اندیس‌های

x و y و z جهت ممان‌های دو قطبی را نشان می‌دهند. بنابراین جزء اختلاف پتانسیل بین P_1 و P_2 از رابطه زیر به دست می‌آید (آپاراوو، ۱۹۹۷):

عمل برای فواصل مختلف $I_1 O$ و همچنین $I_2 O$ تکرار می‌شود. برای اطلاعات بیشتر در مورد چگونگی محاسبه مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ρ ، گرادیان الکتریکی G و فاکتور هندسی K به کاروس و پرنو (۱۹۸۵) مراجعه شود.

۳ بررسی رابطه شدت جریان و اختلاف پتانسیل

فرض می‌کنیم که سطح اندازه‌گیری (سطح xy) موازی با سطح لایه‌بندی نباشد و محور z در جهت پایین (شکل ۲) باشد. صفحه $x_1 y_1$ سطح لایه‌بندی است که با افق زاویه θ می‌سازد. پتانسیل در نقطه $(x_1 y_1 z_1)$ از رابطه زیر به دست می‌آید (آپاراوو و سرینیواس، ۱۹۹۵):

$$V = \frac{\rho_m I}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{(x_1^2 + y_1^2 + \lambda^2 z_1^2)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ρ_m میانگین مقاومت ویژه محیط و برابر است با $\rho_m = \sqrt{\rho_t \rho_l}$ و $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_t}}$ هم‌چنین ρ_t مقاومت ویژه عرضی و ρ_l مقاومت ویژه طولی محیط‌اند. با چرخش سطح $x_1 y_1$ حول محور y_1 به اندازه θ تبدیلی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$x_1 = x \cos \theta + z \sin \theta$$

$$y_1 = y$$

$$z_1 = -x \cos \theta + z \sin \theta$$

با جایگزینی این روابط در رابطه (۱)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V = \frac{\rho_m I}{2\pi} \left[\frac{1}{(Ax^2 + y^2 + Bz^2 + 2Cxz)^{1/2}} \right] \quad (2)$$

که در آن:

$$A = \cos^2 \theta + \lambda^2 \sin^2 \theta$$

$$B = \sin^2 \theta + \lambda^2 \cos^2 \theta$$

$$C = \sin \theta \cdot \cos^2 \theta (1 - \lambda^2)$$

از انتگرال گیری تابع اختلاف پتانسیل (۴) روی سطح xy در محدوده پیک تابع، شاخص عمق تجسس (DIC) را می توان به دست آورد. اما چون حل تحلیلی چنین انتگرالی غیر ممکن است (آپاراوو، ۱۹۹۷)، برای محاسبه DIC روش عددی گوس-لژاندر برای انتگرال های دوگانه و سه گانه استفاده شد. برای محاسبه شاخص عمق تجسس نرمال شده (NDIC)، ابتدا باید از تابع DIC نسبت به Z از صفر تا مثبت بی نهایت انتگرال گیری کرد که حاصل آن تابع پتانسیل Vp_1P_2 است. سپس از تقسیم شاخص عمق تجسس DIC بر تابع پتانسیل Vp_1P_2 ، شاخص عمق تجسس نرمال شده (NDIC) به دست می آید. که در این مطالعه، مراحل مذکور با روش عددی انجام شد.

۴ بررسی تأثیر زاویه سمتی (آزیموت) بر روی مقدار عمق تجسس

در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر آزیموت (φ)، زاویه امتداد آرایه با محور x ها) روی مقدار عمق تجسس در آرایه مقاومت ویژه ترکیبی، بررسی مدلی انجام شد. به این منظور، ابتدا حداکثر عمق نسبی (Z_{max}/L)، برای هشت فاصله الکتروودی مختلف ($I_1O=L=50, 100, 150, 300, 450, 650, 750, 1000m$) با آزیموت های مختلف ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)، شیب لایه بندی و ضریب ناهمسان گردی خاص ($\lambda=1/5$ و $\theta=30^\circ$) محاسبه و سپس میانگین گیری شد. شکل ۳، تأثیر آزیموت های مختلف φ را برای حالت ذکر شده نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که به ازای آزیموت 0° ، حداکثر عمق تجسس و در آزیموت 90° حداقل عمق تجسس با توجه به شیب و ناهمسان گردی ذکر شده ($\lambda=1/5$ و $\theta=30^\circ$) به دست آمده است. این امر نشان دهنده کاهش عمق تجسس از آزیموت 0° به سمت 90° است.

(۳)

$$dVp_1P_2 = \left\{ \mu_x \frac{\partial}{\partial x} + \varphi_y \frac{\partial}{\partial y} + \varphi_z \frac{\partial}{\partial z} \right\} \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right\}$$

که در آن

$$R_1 = \{ [x - (L - d) \cos \varphi]^2 + [y - (L - d) \sin \varphi]^2 + z^2 \}^{1/2}$$

و

$$R_2 = \{ [x - (L + d) \cos \varphi]^2 + [y - (L + d) \sin \varphi]^2 + z^2 \}^{1/2}$$

است. از بسط رابطه (۳)، می توان جزء اختلاف پتانسیل را بین P_1 و P_2 به صورت رابطه زیر به دست آورد:

$$dVp_1P_2 = \frac{\rho_m I}{4\pi^2} dx dy dz \times PQR \quad (4)$$

در رابطه (۴) هر یک از حروف P، Q و R به ترتیب برابرند با:

$$P = \frac{1}{(Ax^2 + y^2 + 2Cxz)^{3/2}}$$

$$Q = \left[\frac{1}{\{ [x - (1-d) \cos \varphi]^2 + [y - (1-d) \sin \varphi]^2 + z^2 \}^{3/2}} \times \right.$$

$$\left. \frac{1}{\{ [x - (1+d) \cos \varphi]^2 + [y - (1+d) \sin \varphi]^2 + z^2 \}^{3/2}} \right]$$

$$R = \{ (-Ax - Cz)[-X + (L-d) \cos \varphi] \times$$

$$\{ [x - (L+d) \cos \varphi]^2 + [y - (L+d) \sin \varphi]^2 +$$

$$z^2 \}^{3/2} + (-Ax - Cz)[X - (L+d) \cos \varphi] \times$$

$$\{ [x - (L-d) \cos \varphi]^2 + [y - (L-d) \sin \varphi]^2 +$$

$$z^2 \}^{3/2} + (-y)[y - (L+d) \sin \varphi] \times$$

$$\{ [x - (L-d) \cos \varphi]^2 + [y - (L-d) \sin \varphi]^2 +$$

$$z^2 \}^{3/2} + (-Bz - Cx)(-z) \times$$

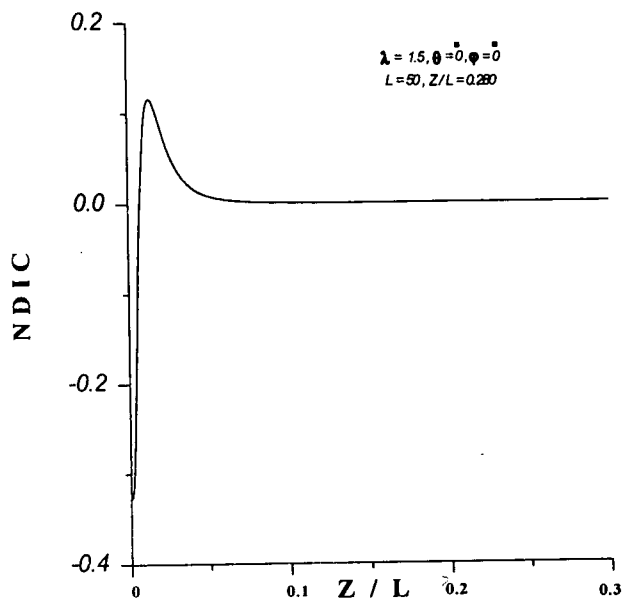
$$\{ [x - (L+d) \cos \varphi]^2 + [y - (L+d) \sin \varphi]^2 +$$

$$z^2 \}^{3/2} + dx dy (-Bz - Cc)(z) \times$$

$$\{ [x - (L-d) \cos \varphi]^2 + [y - (L-d) \sin \varphi]^2 +$$

$$z^2 \}^{3/2}$$

۱- حداقل یک میزان جریان از لایه سطحی که مترادف با $Z=0$ است می تواند عبور کند.

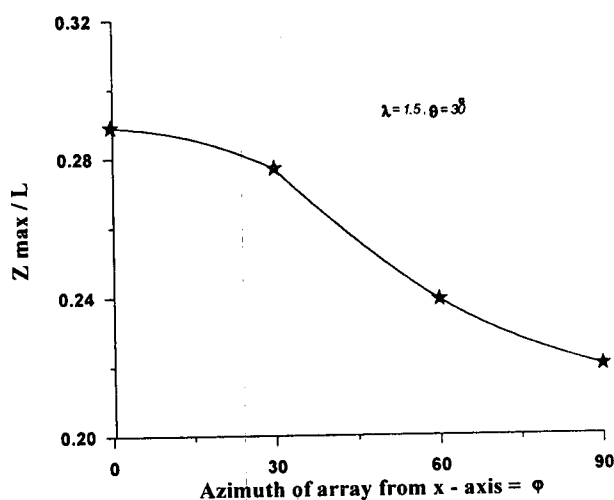


شکل ۴. نمودار تغییرات NDIC در مقابل نسبت حداکثر عمق به طول آرایه برای ضریب ناهمسان گردی $\lambda = 1/5$ و طول آرایه $L = 50$ متر.

۲- در نقطه $Z=0$ اگر تابع اختلاف پتانسیل دارای بیشینه باشد، بنابراین انتگرال گیری گوسی برای محاسبه NDIC نمی تواند تعریف بسیار دقیقی را بر روی این تابع به دست دهد.

نکته دیگر این که در کلیه نمودارها، مقدار NDIC با افزایش عمق نسبی صرفاً افزایش و یا کاهش نمی یابد بلکه مقدار بیشینه مشخصی دارد، که مقدار مذکور حداکثر عمق نسبی (Z_{max}/L) است. یعنی عمقی وجود دارد که لایه نازک واقع بر این عمق، بیشترین سهم را در اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده در سطح زمین داراست. وجود بیشینه NDIC به این علت است که از سطح زمین تا عمق نسبی که بیشترین مقدار NDIC را به دست می دهد، کم شدن پتانسیل های منفی باعث افزایش NDIC می شود. از این عمق نسبی به بعد، افزایش عمق است که نقش عمده ای در کم کردن مقدار NDIC دارد. نکته قابل توجه دیگر

با توجه به این که حداکثر عمق مؤثر در آزمون $\varphi=0^\circ$ (زاویه امتداد آرایه با محور x ها) قابل دستیابی است، بنابراین در مطالعات انجام شده به علت اهمیت و ارزش بررسی عمق تجسس بیشینه، در کلیه محاسبات، آزمون صفر درجه در نظر گرفته شده است. روند نزولی و کاهش عمق تجسس با افزایش آزمون φ برای آرایه CRP موافق با نتایج به دست آمده آپاروو و همکاران (۱۹۹۵) برای آرایه های دیگر (ونر، شلومبرژه، دوقطبی - دوقطبی، قطبی - دوقطبی) است.



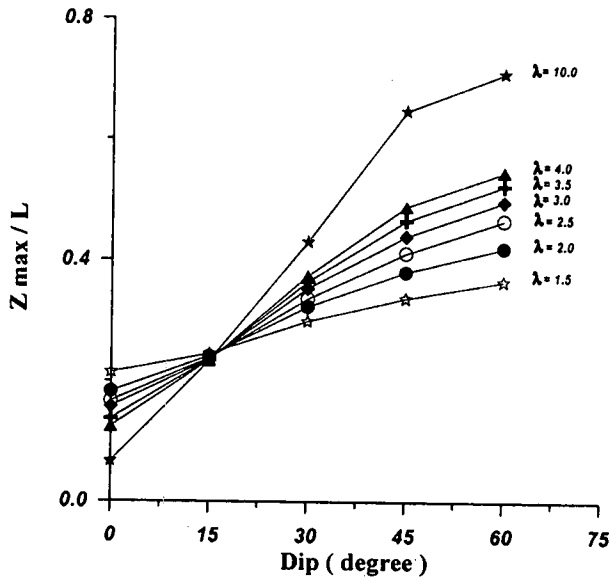
شکل ۳. تغییرات نسبت عمق بیشینه به طول آرایه برای یک ضریب ناهمسان گردی و شیب خاص ($\lambda = 1/5$ و $\theta = 30^\circ$) در مقابل زوایای آزمون (φ) مختلف بین امتداد آرایه با محور x ها.

۵. نمودار تغییرات شاخص عمق تجسس نرمال شده (NDIC) با عمق نسبی (Z/L)

به منظور بررسی ارتباط بین تولید پتانسیل حاصل از هر لایه نازک با عمق، نمودارهای تغییرات شاخص عمق تجسس نرمال شده (NDIC) با عمق نسبی برای طول های آرایه $(L=50, 100m)$ محاسبه شد و در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شدند. همان طور که در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود، نمودار NDIC از نقطه صفر شروع نشده است که دلایل آن را می توان به شرح زیر بیان کرد:

شدند. در همه نمودارها، مقدار NDIC با افزایش عمق نسبی، صرفاً افزایش و یا کاهش نیافتند، بلکه هر یک از نمودارها یک مقدار بیشینه NDIC را در مقابل عمق نسبی (Z/L) نشان دادند، که عمق نسبی متعلق به مقدار بیشینه NDIC به عنوان حداکثر عمق نسبی (Z_{max}/L) به دست آمد.

با توجه به محاسبات انجام شده برای ضرایب ناهمسان گردی مختلف (۱۰، ۴، ۳/۵، ۲، ۱/۵) و شیب‌های مختلف لایه‌بندی برابر ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)، نمودارهای تغییرات عمق بیشینه نسبی به طول آرایه با شیب‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود Z_{max}/L به ازای ضرایب ناهمسان گردی (λ) یکسان، با افزایش شیب



شکل ۶. نمودارهای تغییرات نسبت حداکثر عمق به طول آرایه برای شیب‌های مختلف ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) لایه‌بندی.

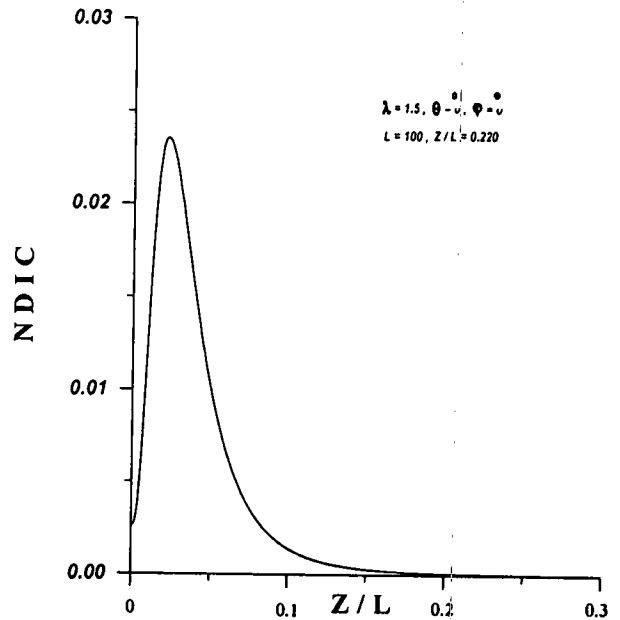
افزایش می‌یابد. در ضمن لازم است اشاره شود که روند نمودارها از رابطه‌ی نمایی پیروی می‌کند، مثلاً برای هنگامی که $\lambda = 4$ است این رابطه به شکل زیر خواهد بود:

$$y = -4 \times 10^{-0.02x} + 0.0098x + 0.1149$$

این است که نمودارها در دو طرف عمق نسبی بیشینه، حالت تقارن ندارند بلکه به طرف اعماق بیشتر انحراف پیدا می‌کنند. هم‌چنین به این نکته باید توجه شود که اعماق بیشتر از طول آرایه (L)، نقش چندانی در علائم الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح زمین نخواهند داشت.

۶ محاسبه نسبت عمق بیشینه به طول آرایه (Z_{max}/L)

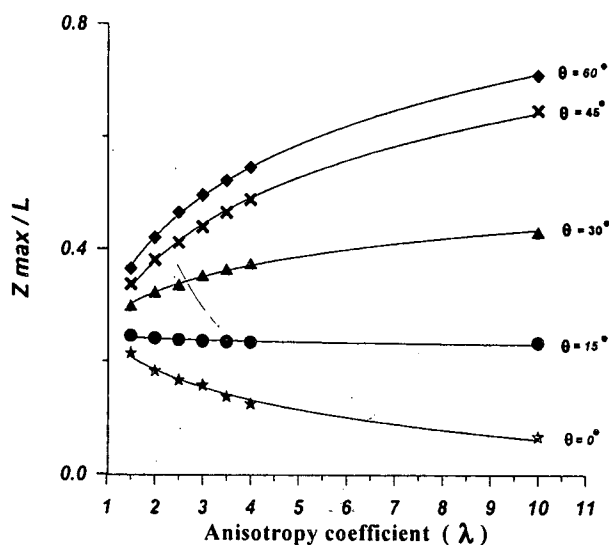
برای محاسبه و به دست آوردن مقدار عمق بیشینه به طول آرایه (Z_{max}/L) و هم‌چنین بالا بردن دقت اندازه‌گیری، از تعداد هشت فاصله الکترودی مختلف برای یک شیب (θ) و ضریب ناهمسان گردی (λ) مشخص، استفاده شد. سپس از محاسبه



شکل ۵. نمودار تغییرات NDIC در مقابل نسبت حداکثر عمق به طول آرایه برای ضریب ناهمسان گردی $\lambda = 1/5$ و طول آرایه $L = 100$ متر.

مقادیر Z_{max}/L مربوط به طول‌های مختلف آرایه ($L, 0=L=50, 100, 150, 300, 450, 600, 750, 1000$ m) میانگین‌گیری با دقت بیشتری فراهم آمد. در این محاسبات، نمودارهای مقادیر عمق تجسس نرمال شده (NDIC) در مقابل عمق‌های نسبی (Z/L) برای فواصل الکترودی مختلف رسم

الکترودهای جریان I_1 و I_2 به ترتیب در بی نهایت فیزیکی قرار داشتند، تهیه شد. سپس با در نظر گرفتن شیب لایه بندی به دست آمده از برونزد سازند و هم چنین شیب های موجود روی مغزه های حاصل از حفاری، بر اساس گزارش زمین شناسی (۱۳۷۴)، برابر $\theta = 15^\circ$ انتخاب شد. برای تعیین ضریب ناهمسان گردی روش های متفاوتی وجود دارد. برای این کار می توان از آرایه مربعی استفاده کرد و برای عمق های مشخص با استفاده از اطلاعات حاصل از سونداژهای جانبی یک ضریب ناهمسان گردی متوسط (λ_{ave}) را به دست آورد (لوئیز و افودا، ۱۹۸۹).



شکل ۷. نمودارهای تغییرات نسبت حداکثر عمق به طول آرایه در مقابل ضریب ناهمسان گردی برای شیب های مختلف ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ و 60°) لایه بندی.

نمودارهای تغییرات عمق بیشینه نسبت به طول (Z_{max}/L) با ضرایب ناهمسان گردی مختلف را برای شیب های لایه بندی ($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$) در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که تغییرات Z_{max}/L با ضریب ناهمسان گردی از شیب صفر تا ۱۷ درجه تقریباً یک روند نزولی داشته است و در شیب ۱۷ درجه می توان این روند را به صورت یک خط مستقیم در نظر گرفت و از شیب ۱۷ درجه به بالا این روند سیر صعودی پیدا می کند. برای توجیه این مطلب اگر لایه را افقی $\theta = 0^\circ$ در نظر بگیریم، با افزایش ضریب ناهمسان گردی، چگالی جریان J_x در جهت افقی افزایش و چگالی جریان در جهت عمق J_z کاهش می یابد. هم چنین مقدار P_1 افزایش پیدا می کند و در مقابل مقدار P_1 کاهش می یابد و یا ثابت می ماند. افزایش P_1 سبب می شود که جریان، بیشتر در جهت P_1 حرکت کند و در نتیجه با افزایش ضریب ناهمسان گردی در حالت لایه بندی افقی، عمق نفوذ جریان کم می شود. در حالت لایه بندی با شیب های بیشتر از 20° درجه با افزایش ضریب ناهمسان گردی، چگالی جریان J_x در جهت افقی کاهش پیدا می کند و چگالی جریان در جهت عمق J_z افزایش می یابد. هم چنین مقدار P_1 کاهش پیدا می کند و در مقابل مقدار P_1 افزایش می یابد و یا ثابت می ماند. کاهش P_1 سبب می شود که جریان کمتر در جهت P_1 حرکت کند و در نتیجه با افزایش ضریب ناهمسان گردی در حالت لایه بندی شیب دار، عمق نفوذ جریان زیاد می شود (آپاراوو، ۱۹۹۷).

۷ داده های واقعی

نظر به این که در محل مورد مطالعه، اندازه گیری ضریب ناهمسان گردی انجام نشده بود. بنابراین انتخاب ضریب ناهمسان گردی با استفاده از جدول ارائه شده از سوی کلر و فریشینشت (۱۹۷۶) برای سازند آسماری برابر با ($\lambda_{ave} = 3$) انتخاب و استفاده شد. سپس با توجه به پارامترهای شیب و ضریب ناهمسان گردی مورد اشاره، مقادیر حداکثر عمق نسبی روی

با استفاده از مقادیر حداکثر عمق نسبی به دست آمده برای فواصل الکترودی مختلف حاصل از این مطالعه، مقادیر حداکثر عمق نسبی روی داده های واقعی تأثیر داده شد. داده های یاد شده از اندازه گیری مقاومت ویژه ظاهری به روش مقاومت ویژه ترکیبی در محل منطقه سد بهشت آباد شهر کرد، به دست آمده اند. ابتدا شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری برای حالت هایی که هر یک از

پتانسیل (d)، مقادیر مختلف حداکثر عمق نسبی محاسبه شد و موارد زیر به عنوان نتایج حاصل از این مطالعه به دست آمد:

- در حالتی که لایه بندی افقی و مدل زمین همگن و ناهمسان گرد باشد، به تدریج که ضریب ناهمسان گردی افزایش می یابد، مقدار حداکثر عمق نسبی کاهش پیدا می کند. کاهش مقدار حداکثر عمق نسبی در مقابل افزایش ناهمسان گردی برای هنگامی که شیب لایه بندی (θ) بین صفر تا ۱۵ درجه باشد، نیز صادق است.

- در زاویه ۱۷ درجه برای ضرایب ناهمسان گردی مختلف مقدار عمق تجسس ثابت است اما با افزایش زاویه شیب از ۱۷ درجه به بالا، با ازدیاد مقدار ضریب ناهمسان گردی، عمق تجسس نیز افزایش می یابد.

- حداکثر عمق نسبی به ازای ضرایب ناهمسان گردی مختلف (λ) در حالتی که شیب لایه ها صفر درجه باشد، به صورت نمایی کاهش می یابد. ولی در حالتی که شیب لایه ها ۱۷ درجه است حداکثر عمق نسبی تقریباً بدون تغییر و در وضعیت شیب های بالاتر از ۱۷ درجه به صورت نمایی افزایش پیدا می کند.

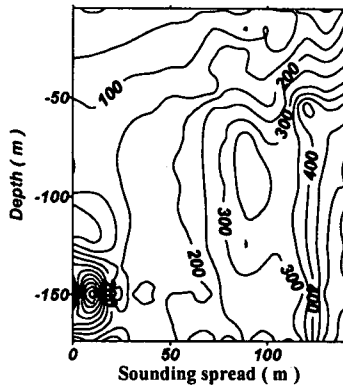
- هنگامی که زاویه جهت دار بودن امتداد آرایه (φ) نسبت به امتداد لایه ها در حالت صفر درجه قرار بگیرد، حداکثر عمق نسبی به دست می آید و با افزایش این زاویه، به تدریج از مقدار آن کاسته می شود. و به همین دلیل و به علت نیاز به عمق نفوذ بیشتر زاویه جهت دار بودن امتداد آرایه در این مقاله $\varphi = 0^\circ$ استفاده شد.

نتایج به دست آمده از اعمال مقادیر حداکثر عمق تجسس (شکل های ۸b، ۸c و ۸d) و تأیید این نتایج با حفاری انجام شده در محدوده ۱۰۰ تا ۱۲۰ متری امتداد پروفیل مورد مطالعه، نشان داد که به کارگیری تعریف مقدار حداکثر عمق تجسس ارائه شده از سوی بارکر (۱۹۸۹) مناسب است.

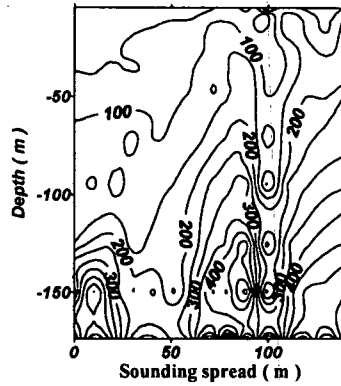
مقاطع مقاومت ظاهری الکتریکی اعمال شد (شکل های ۸a و ۸b). در این مرحله، اعمال مقادیر حداکثر عمق نسبی باعث شد که موقعیت یک زونار رسانا با مقاومت کمتر از ۳۰۰ اهم متر از زونارهای نارسانای اطراف آن بهتر روی مقاطع مذکور مشخص شود (شکل های ۸b و ۸c). برای آن که تغییرات مقاومت الکتریکی با عمق مورد بررسی قرار گیرد، مقطع گرادیان تغییر شکل (کاروس و پرنو، ۱۹۸۵) با استفاده از رابطه (۵) ارائه شده از سوی کاروس و پرنو، برای مقاومت الکتریکی به دست آمده هنگامی که هر یک از الکترودهای جریان I_1 و I_2 به ترتیب در بی نهایت فیزیکی قرار داشتند تهیه شد (شکل ۸d). روی این شکل، ماکزیموم محلی مشخصی در محل زونار رسانا مشاهده می شود. اگر چه پربندهای گرادیان، محدوده زونار هادی را به صورت عمودی به خوبی نشان می دهد، ولی شیب لایه بندی را مشخص نکرده است. به نظر می رسد که وجود زونار رسانای کارستی روند پربندها را در جهت خود تحت تأثیر قرار داده است. البته این موضوع در شکل های ۹ و ۱۰ کاروس و پرنو (۱۹۸۵) نیز مشهود است و روند پربندها در اطراف زونار رسانا متمرکز شده اند. شکل های ۸e و ۸f ارائه شده در این مقاله به ترتیب تغییرات جانبی مقاومت الکتریکی و گرادیان تغییر را برای عمق مشخص اندازه گیری نشان می دهند. چنان که در شکل های مذکور پیدا است، تغییر ناگهانی مقاومت الکتریکی و گرادیان تغییر شکل در محدوده ۱۰۰ تا ۱۲۰ متری در امتداد پروفیل دیده می شود.

۸ نتیجه گیری

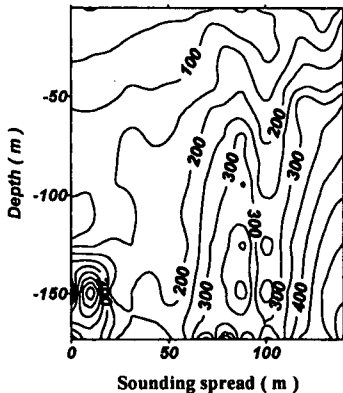
با توجه به مطالعات نظری انجام شده در این مقاله، روی آرایه مقاومت ویژه ترکیبی CRP برای مدل زمین نیم فضا، همگن، ناهمسان گرد و شیب دار و با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای مختلف مانند ضریب ناهمسان گردی (λ)، شیب لایه بندی (θ)، جهت دار بودن آرایه (φ)، طول آرایه (L) و فاصله الکترودهای



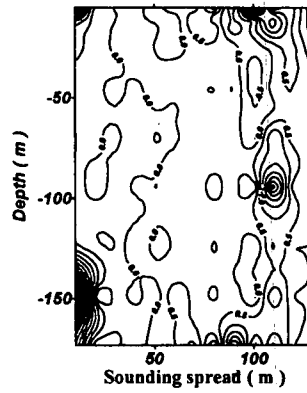
a : Apparant resistivity pseudo section for left side.



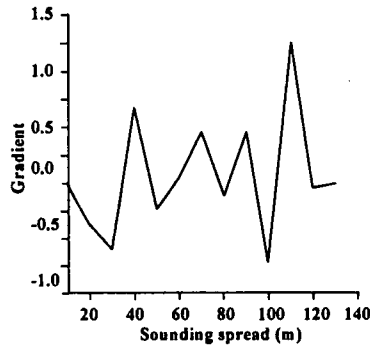
b : Apparant resistivity pseudo section for right side



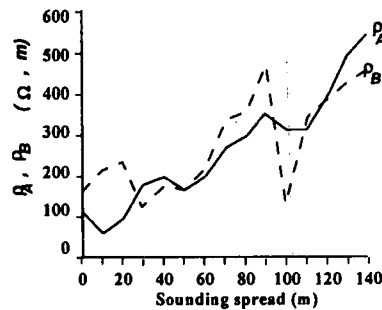
c : Apparant resistivity pseudo section for averaging of both sides (a & b).



d : Gradient section



e : Gradient profile at depth=120 (m)



f : Resistivity profile for both sides at depth=120 (m)

شکل ۸ اثر ضریب عمق تجسس روی داده‌های به دست آمده از آرایه CRP روی پروفیل شماره ۲ واقع در منطقه سد بهشت آباد شهرکرد، شکل‌های a و b به ترتیب، شبه‌مقاطع الکتریکی هنگامی که هر یک از الکترودهای جریان I_1 و I_2 در بی‌نهایت فیزیکی قرار داشتند. شکل c شبه‌مقطع الکتریکی به دست آمده از میانگین مقادیر مقاومت الکتریکی حاصل از شکل‌های a و b است. شکل d مقطع گرادیان تغییر در امتداد پروفیل ۲. شکل e نمودار گرادیان تغییر برای یک عمق کاذب مشخص (۱۰۰ متر) هنگامی که هر یک از الکترودهای جریان I_1 و I_2 به ترتیب در بی‌نهایت فیزیکی قرار داشتند. شکل f نمودارهای مقاومت الکتریکی ظاهری (ρ_A و ρ_B) برای یک عمق کاذب مشخص (۱۲۰ متر) هنگامی که هر یک از الکترودهای جریان I_1 و I_2 به ترتیب در بی‌نهایت فیزیکی قرار داشتند.

- profiling resistivity measurements with three electrode arrays: *Geophys. Prospect.*, **33**, 447-459.
- Keller, G.V., and Friskneht, F.C., 1976, Electrical methods in geophysical prospecting: Pergamon Press, Oxford, 517 pp.
- Koefode, O., 1972, Discussion on "Depth of investigation in direct current methods" by Roy, A., and Apparao, A.: *Geophysics*, **37**, 703-704.
- Louis, P. and Afouda, D.R., 1989, Contribution des mesures de l'anisotropie électrique a la recherche des aquiferes de fracture en milieu cristallin au benin: *Geophys. Prospect.*, **37**, 325-339.
- Roy, A., 1972, Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole DC resistivity methods: *Geophys. Prospect.*, **20**, 329-340.
- Roy, A., and Apparao, A., 1971, Depth of investigation in direct current methods: *Geophysics*, **36**, 943-959.
- Roy, K.K., and Elliot, H.M., 1981, Some observations regarding depth of exploration in DC electrical methods: *Geoexpl.*, **19**, 1-13.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حوزه معاونت محترم پژوهشی دانشگاه به خاطر مساعدت‌های مالی طرح، تحت شماره ۶۵۱/۱/۳۱۰ تشکر و قدردانی به عمل می‌آید. بر خود لازم می‌دانیم که از نظرات علمی و فنی مطرح شده از سوی داوران محترم برای اصلاح مطالب ارائه شده در این مقاله تشکر نماییم. هم‌چنین از مسئولین محترم مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر در اختیار قرار دادن امکانات رایانه‌ای برای مدل‌سازی و محاسبات لازم در این مقاله، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Apparao, A., 1997, Developments in geoelectrical methods: A. A. Balkema/Rotterdamki/Brookfield.
- Apparao, A., and Sarma, V. S., 1983, The modified pseudo-depth section as a tool in resistivity and IP prospecting; a case history: *PAGEOPH*, **121**, 91-108.
- Apparao, A., and Sirinivas, G. S., 1995, Discussion on "Depth of investigation of collinear electrode arrays over homogeneous anisotropic half space in direct current methods" by B. B. Battacharya and A. K. Sen (*Geophysics*, **46**, 768-780): *Geophysics*, **60**, 1936-1941.
- Apparao, A., Sivarama Sastary, R., and Subrahmanya Sarma, V., 1995, Depth of detection of buried in electrical prospecting: *Geophys. Prospect.*, **45**, 365-375.
- Banerjee, B., and Pal, B. P., 1986, A simple method for determination of depth of investigation characteristics in resistivity prospecting: *Explo. Geophys.*, **17**, 93-95.
- Barker, R.D., 1989, Depth of investigation collinear symmetrical four-electrode arrays: *Geophysics*, **54**, 1031-1037.
- Battacharya, B.B., and Sen, M.K., 1981, Depth of investigation of collinear electrode arrays over homogeneous anisotropic half-space in direct methods: *Geophysics*, **46**, 768-780.
- Douglas, W. Oldenburg and Yaoguo, Li, 1999, Estimating depth of investigation in de resistivity and IP surveys: *Geophysics*, **64**, 403-416.
- Guptasarma, D., 1981, Comments on "A theorem for direct current regimes and some of its consequences" and related papers: *Geophys. Prospect.*, **29**, 308-311.
- Karous, M., and Pernu, T.K., 1985, Combined sounding