

تعیین عمق و نیم پهنای صفحه شیب دار از پتانسیل خودزا با استفاده از روش میانگین متحرک ثانویه با کاربرد منحنی های پنجره ای

محمد رسول نیک بخش^۱ و میرستار مشین چی اصل^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات گروه ژئوفیزیک، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۳/۲۵)

چکیده

در تحقیق حاضر، روش جدیدی برای برآورد عمق و نیم پهنای صفحه شیب دار درحکم یک بی هنجاری دوبعدی پتانسیل خودزا پیشنهاد می شود. در این روش که به روش میانگین متحرک ثانویه (second moving average method) معروف است، برای طول پنجره های متوالی با استفاده از منحنی های پنجره ای (window curves) عمق و نیم پهنای صفحه شیب دار دوبعدی محاسبه می شود. برای هر طول پنجره ثابت به ازای هر نیم پهنای فرض شده معادله غیر خطی به دست آمده، به روش تکرار نیوتن به منظور محاسبه عمق حل می شود. با رسم عمق های محاسبه شده برحسب بازه نیم پهنای فرض شده که به منحنی های پنجره ای معروف هستند، می توان عمق و نیم پهنای صفحه شیب دار از محل تقاطع این منحنی ها را به دست آورد. در تحقیق حاضر این روش برای یک مدل با عمق های متفاوت و نیم پهنای یکسان برای داده های مصنوعی بدون نوفه و نوفه ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده روشن ساخت که این روش برای داده های بدون نوفه بسیار دقیق است و برای داده های نوفه ای خطای کمتر از ۳ درصد دارد.

واژه های کلیدی: پتانسیل خودزا، میانگین متحرک ثانویه، منحنی پنجره ای، عمق و نیم پهنای صفحه شیب دار

Determination of depth and the half-width of an inclined plate self-potential anomaly using a second moving average window curves method

Mohammad Rasool Nikbakhsh¹, and Mirsattar Meshinchi Asl^{1*}

¹Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 12 June 2010, accepted: 15 March 2011, available online: 15 June 2011)

Summary

Self-potential (SP) prospecting is one of the oldest geoelectrical methods, and it is still used in many fields of applied geophysics. The SP measurements refer to that part of the natural electric field which is stationary in time, or nearly so, and whose current source system is generated and sustained by phenomena occurring underground within geological structures. From the physical point of view, the common aspect of the many source models is an electrical charge polarization is setup, which is responsible for electrical current circulation in conductive rocks. Hence, the detected SP anomalies are simply the surface evidence of a more or less steady state of electrical polarization

*Corresponding author:

m_meshin@yahoo.com

*نگارنده رابط:

(Abdelrahman et al., 1999). The two-dimensional inclined sheet model can be useful in quantitative interpretation of SP data measured in a small area over a buried structure.

Estimating the depth upper edges and the dip of a two-dimensional inclined sheet from self-potential anomalies measured perpendicular to the strike of the structures has drawn considerable attention. The advantages of the fixed geometrical methods over the 2-D and 3-D continuous modeling are that they require no current density, and the resistivity and rough estimation on depth and the interpretation of isolated SP anomalies is fast and accurate. Many of the geological structures in mineral exploration can be classified into four categories: spheres, vertical cylinders, horizontal cylinders and inclined sheets. These four simple geometric forms are convenient approximations of common geological structures often encountered in the interpretation of SP data. The models may not be entirely geologically realistic, but the approximate equivalence is usually sufficient to determine whether the form and magnitude of calculated SP effects are close enough to those observed to make the geologic interpretation reasonable. Evaluation of the depth and the width of a 2D plate from self-potential (SP) anomalies measured perpendicular to the strike of the structure has attracted considerable attention. Several methods have been proposed and discussed by many researchers to interpret the self-potential anomalies caused by 2D inclined plates, including, for example, logarithmic curve matching (Murthy and Haricharan, 1985) and the analysis in the frequency domain using the Fourier transform (Rao et al., 1982). In this paper, a new method has been developed to estimate the depth and the half-width of a 2D inclined plate with a self-potential anomaly. This method is the second- moving average for successive window lengths to determine the depth and half-width of two-dimensional inclined plate. For a fixed window length, the depth is determined iteratively using the solution of a nonlinear equation with the iterative Newton Raphson method for each half-width value (Stanley, 1977). The computed depths are plotted against the half-width values representing a continuous window curve. This method can be used for two model and synthetic data with and without random noise. After adding 10% random error in the synthetic data, the maximum error in model parameters is less than 3%. The problem of determining the plate parameters from self-potential data of short profile length can be solved using the second-moving average method. The method of window curves has been extended using the second-moving average self-potential anomaly to determine the depth and half-width of an inclined plate.

Key words: Self-potential, second -moving average, window curves, inclined plate, depth and the half-width

۱ مقدمه

روش پتانسیل خودزا (SP) همان‌طور که از نام آن پیدا است، براساس اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل طبیعی ایجاد شده از فعل انفعال‌های شیمیایی داخل زمین پایه‌ریزی شده است. بخشی از این اختلاف پتانسیل ثابت، و بخشی متغیر (قطبش القایی) است. در عمل اختلاف پتانسیل ثبت شده مربوط به بخش ثابت است که به علت واکنش‌های الکتروشیمیایی با سازوکارهای متفاوت شکل می‌گیرد

(عبدالرحمن و العربی، ۱۹۹۷). مقدار پتانسیل خودزای ایجاد شده معمولاً کمتر از یک میلی‌ولت تا صدها میلی‌ولت متغیر است. پتانسیل خودزا روی توده‌های سولفیدی، گرافیتی، مگنتیت و چند کانی هادی دیگر مثل زغال‌سنگ و منگنز که مقدار قابل توجهی است، قابل اندازه‌گیری است (مورتی و هاریچاران، ۱۹۸۵). یکی از مهم‌ترین مسائل در اکتشاف به روش SP، برآورد عمق و شیب ساختارهای مدفون شده است. در

۲ نظریه روش میانگین متحرک

پایه و اساس روش میانگین متحرک را گریفین (۱۹۴۹) بیان کرده است. گریفین رابطه میانگین متحرک را به صورت زیر بیان کرد:

$$R(x_i, s) = V(0) - \bar{V}(s), \quad (1)$$

که در این رابطه $V(0)$ پتانسیل در مبدا و $\bar{V}(s)$ پتانسیل میانگین در فاصله‌ای به شعاع s از $V(0)$ است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\bar{V}(s) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V(s, \beta) d\beta, \quad (2)$$

برای محاسبه انتگرال $\bar{V}(s)$ از روش میانگین حسابی پتانسیل محاسبه شده برای n نقطه روی محیط دایره‌ای به شعاع s استفاده می‌شود:

$$\bar{V}(s) = \frac{|V_1(s) + V_2(s) + V_3(s) + \dots + V_n(s)|}{n}, \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۱) میانگین متحرک پتانسیل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R(x_i, s) = \frac{2V(x_i) - V(x_i + s) - V(x_i - s)}{2} \quad (4)$$

$$= V(x_i) - \frac{1}{2}[V(x_i + s) + V(x_i - s)]$$

با توجه به رابطه (۴) میانگین متحرک اولیه پتانسیل برای بی‌هنجاری پتانسیل خودزای ناحیه‌ای به شکل زیر بیان می‌شود:

$$Z(x_i, s) = \frac{1}{2}[V(x_i + s) + V(x_i - s)], \quad (5)$$

رابطه کلی میانگین متحرک اولیه پتانسیل برای بی‌هنجاری پتانسیل خودزای باقی مانده را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$R_1(x_i, s) = V(x_i) - Z_1(x_i, s), \quad (6)$$

همین راستا روش‌های گوناگونی که از سوی افراد بسیاری پیشنهاد شده به دو دسته تقسیم می‌شوند. روش‌های مدل‌سازی دو و سه‌بعدی و روش اینورژن. این روش‌ها نیازمند دانستن چگالی جریان و مقاومت ویژه و همچنین دانستن اطلاعات زمین‌شناسی عمق مورد بررسی‌اند. با استفاده از روش‌های هندسی می‌توان ساختارهای زمین‌شناسی در اکتشافات معدنی را به چهار رده کره، استوانه افقی و قائم و صفحه شیب‌دار تقسیم کرد که برای تفسیر داده‌های پتانسیل خودزا مناسب‌اند. برتری این روش‌های هندسی به روش‌های مدل‌سازی این است که تفسیر داده‌های SP آسان و سریع‌تر صورت می‌گیرد (عبدالرحمن، ۲۰۰۹). روش‌های هندسی را افراد بسیاری گسترش داده‌اند که بعضی از این روش‌ها عبارت‌اند از روش آنالیز در حوزه بسامد با استفاده از تبدیل فوریه (رائو و همکاران، ۱۹۸۲)، روش منحنی‌های لگاریتمی هم‌شکل (مورتی و هاریجاران، ۱۹۸۵)، روش کمترین مربعات (عبدالرحمن و همکاران، ۱۹۹۷)، روش آنالیز ریشه (عبدالرحمن و همکاران، ۱۹۹۸)، روش گرادیان (عبدالرحمن و همکاران، ۱۹۹۸) و روش میانگین متحرک اولیه (عبدالرحمن، ۲۰۰۶). عبدالرحمن و همکاران (۱۹۹۸) عمق و پهنای صفحه شیب‌دار را با استفاده از روش گرادیان افقی محاسبه کردند. این روش مستلزم محاسبات سخت و کسل‌کننده برای تفسیر ساختارهای هندسی است.

در این تحقیق عمق و پهنای صفحه شیب‌دار نامتناهی با استفاده از روش میانگین متحرک ثانویه به کمک منحنی‌های پنجره‌ای برای طول‌های پنجره متوالی محاسبه شده است.

$$R_1(x_i, x_0, s, z_0) = \frac{1}{2} \left[-2I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + x_0}{z_0} \right) + 2I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s + x_0}{z_0} \right) - I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s - x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s + x_0}{z_0} \right) - I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s - x_0}{z_0} \right) \right] \quad (11)$$

در ادامه طبق روابط (۷) و (۸) و با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) میانگین متحرک ثانویه برای بی‌هنجاری ناحیه‌ای و باقی‌مانده به دست می‌آید.

$$Z_2(x_i, x_0, s, z_0) = \frac{1}{2} \left[-4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s + x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s - x_0}{z_0} \right) + \frac{I_1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{x_i + 2s + x_0}{z_0} \right) + \frac{I_1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{x_i - 2s + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s - x_0}{z_0} \right) - \frac{I_2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{x_i + 2s + x_0}{z_0} \right) - \frac{I_2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{x_i - 2s - x_0}{z_0} \right) \right] \quad (12)$$

$$R_2(x_i, x_0, s, z_0) = \frac{1}{4} \left[4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s + x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + x_0}{z_0} \right) + 6I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_0}{z_0} \right) - 4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s + x_0}{z_0} \right) + 4I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s - x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + 2s + x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s - x_0}{z_0} \right) - I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - 2s + x_0}{z_0} \right) - 4I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s - x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + 2s + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - 2s - x_0}{z_0} \right) \right] \quad (13)$$

در نهایت روابط میانگین متحرک ثانویه برای بی‌هنجاری پتانسیل خودزای ناحیه‌ای و باقی‌مانده به شکل زیر بیان می‌شود:

$$Z(x, s) = \frac{1}{2} [R_1(x_i + s) + R_1(x_i - s)], \quad (7)$$

$$R_2(x_i, s) = R_1(x_i, s) - Z_2(x_i, s), \quad (8)$$

۳ محاسبه روابط صفحه شیب‌دار نامتناهی

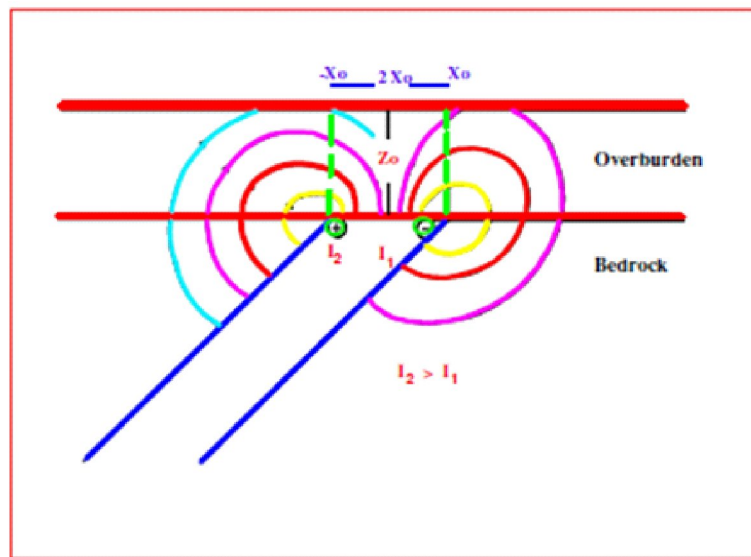
یک مدل پتانسیل خودزا در شکل (۱) نشان داده شده است که خطوط جریان به شکل حلقه‌هایی اطراف لبه بالایی هادی قرار دارند. همانند چگالی شار مغناطیسی جریان‌های واقع شده در اطراف لبه هادی پتانسیل خودزا (SP) محاسبه می‌شود (لیل، ۱۹۹۴). پتانسیل حاصل از یک صفحه شیب‌دار نامتناهی در عمق z_0 به صورت رابطه زیر است (لیل، ۱۹۹۴):

$$V(x_i) = \frac{\pi}{2} (I_1 - I_2) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - x_0}{z_0} \right), \quad (9)$$

که در این رابطه z_0 عمق صفحه، x_0 نیم‌پهنای صفحه، x_i فاصله افقی روی سطح تا صفحه، I_1 و I_2 شدت جریان (I_1) I_2 است.

سه نقطه $x_i + s$ ، x_i و $x_i - s$ را روی نیم‌رخ مورد بررسی قرار می‌دهیم. s طول پنجره است ($s = 1, 2, 3, \dots, M$) و میانگین متحرک اولیه پتانسیل بی‌هنجاری ناحیه‌ای و باقی‌مانده برای صفحه شیب‌دار محاسبه می‌شود.

$$Z_1(x_i, x_0, s, z_0) = \frac{1}{2} \left[\pi(I_1 - I_2) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i - s - x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s + x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{x_i + s - x_0}{z_0} \right) \right], \quad (10)$$



شکل ۱. مدل شارش جریان برای یک صفحه شیب‌دار (حافظ، ۲۰۰۵).

$$\begin{aligned}
 R_2(0) = & \frac{1}{4} \left[4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{s+x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_0}{z_0} \right) \right. \\
 & + 6I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-x_0}{z_0} \right) - 4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{-s+x_0}{z_0} \right) \\
 & + 4I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-s-x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{2s+x_0}{z_0} \right) \\
 & - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{-2s+x_0}{z_0} \right) - 4I_2 \tan^{-1} \left(\frac{s-x_0}{z_0} \right) \\
 & \left. + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{2s+x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-2s-x_0}{z_0} \right) \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

از تقسیم مجموع میانگین متحرک ثانویه در دو نقطه $x_i = -s$ و $x_i = s$ بر میانگین متحرک ثانویه در نقطه $x_i = 0$ معادله F به دست می‌آید:

$$F = \frac{R(s) + R(-s)}{R(0)}, \quad (17)$$

با جایگزینی روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) در رابطه (۱۷)

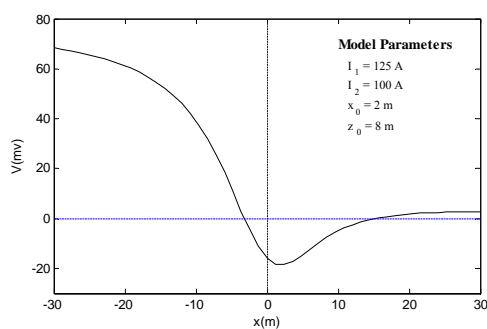
معادله F به صورت زیر در می‌آید:

میانگین متحرک ثانویه برای بی‌هنجاری باقی مانده برای سه نقطه $x_i = 0$ و $x_i = -s$ ، $x_i = s$ به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 R_2(s) = & \frac{1}{4} \left[4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{2s+x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{s+x_0}{z_0} \right) \right. \\
 & + 6I_2 \tan^{-1} \left(\frac{s-x_0}{z_0} \right) - 4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_0}{z_0} \right) + 4 \\
 & I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{3s+x_0}{z_0} \right) \\
 & - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{-s+x_0}{z_0} \right) - 4I_2 \tan^{-1} \left(\frac{2s-x_0}{z_0} \right) \\
 & \left. + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{3s+x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-s-x_0}{z_0} \right) \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_2(-s) = & \frac{1}{4} \left[4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{x_0}{z_0} \right) + I_1 \tan^{-1} \left(\frac{-s+x_0}{z_0} \right) \right. \\
 & + 6I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-s-x_0}{z_0} \right) - 4I_1 \tan^{-1} \left(\frac{-2s+x_0}{z_0} \right) + 4 \\
 & I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-2s-x_0}{z_0} \right) - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{s+x_0}{z_0} \right) \\
 & - I_1 \tan^{-1} \left(\frac{-3s+x_0}{z_0} \right) - 4I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-x_0}{z_0} \right) \\
 & \left. + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{s+x_0}{z_0} \right) + I_2 \tan^{-1} \left(\frac{-3s-x_0}{z_0} \right) \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

برداشت نسبت به مبدا متقارن‌اند (شکل ۲). با استفاده از فن فیلتر میانگین متحرک ثانویه (روابط (۱۲) و (۱۳))، بی‌هنجاری پتانسیل خودزا به دو پتانسیل ناحیه‌ای و باقی‌مانده تفکیک می‌شود (برای چهار طول پنجره متوالی $s = ۲, ۳, ۴, ۵$) شکل ۳. با حل معادله (۱۸) به روش تکرار نیوتن-رفسون برای مقادیر ممکن نیم‌پهنای صفحه، عمق‌ها محاسبه می‌شود. این معادله برای هر چهار نیم‌رخ باقی‌مانده حل و عمق‌های محاسبه شده برای مقادیر ممکن نیم‌پهنای در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۲. نیم‌رخ بی‌هنجاری پتانسیل خودزا برای مدل صفحه شیب‌دار نامتناهی.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر عمق محاسبه شده برای مقدار نیم‌پهنای واقعی مدل ($x_0 = ۲$) عمق واقعی مدل است. برای عملیات تفسیر اگر مقادیر عمق‌های به‌دست آمده برحسب مقادیر نیم‌پهنای رسم شود، از محل تلاقی منحنی‌های پنجره‌ای، عمق ونیم‌پهنای واقعی صفحه شیب‌دار به‌دست می‌آید (شکل ۴). همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، منحنی‌ها در $x_0 = ۲$ و $z_0 = ۸$ یکدیگر را قطع می‌کنند. شکل ۴ محل تقاطع منحنی‌های پنجره‌ای در $x_0 = ۲$ و $z_0 = ۸$ را نشان می‌دهد که همان عمق ونیم‌پهنای واقعی مدل است. در ادامه با اضافه کردن ده درصد نوبه به داده‌های مدل، روش میانگین متحرک ثانویه برای داده‌های نوبه‌ای بررسی می‌شود. برای

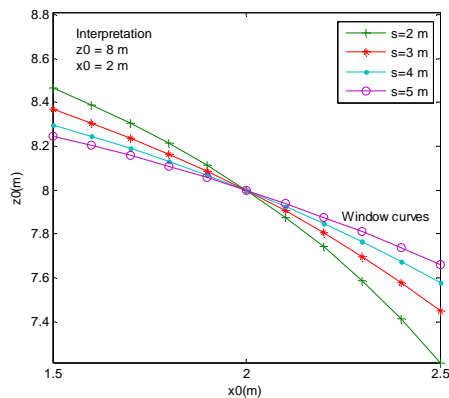
$$F = \frac{8 \tan^{-1}\left(\frac{x_0}{z_0}\right) - 7 \tan^{-1}\left(\frac{s+x_0}{z_0}\right) + 7 \tan^{-1}\left(\frac{s-x_0}{z_0}\right) + 4 \tan^{-1}\left(\frac{2s+x_0}{z_0}\right) - 4 \tan^{-1}\left(\frac{2s-x_0}{z_0}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{3s+x_0}{z_0}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{3s-x_0}{z_0}\right) - 6 \tan^{-1}\left(\frac{x_0}{z_0}\right) + 4 \tan^{-1}\left(\frac{s+x_0}{z_0}\right) - 4 \tan^{-1}\left(\frac{s-x_0}{z_0}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{2s+x_0}{z_0}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{2s-x_0}{z_0}\right)}{z_0} \quad (18)$$

معادله غیر خطی F با استفاده از روش تکرار نیوتن-رفسون (دیمودیویچ و مارون، ۱۹۷۳) و یا با روش تکرار نقطه ثابت (موستو و باری، ۱۹۹۸) حل می‌شود.

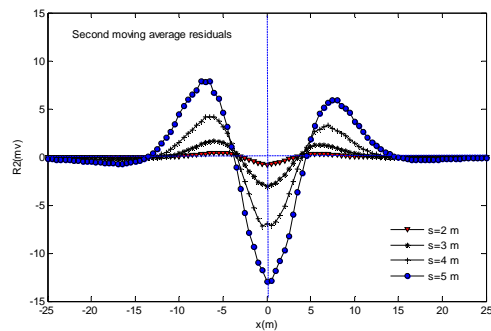
در نهایت برای محاسبه عمق ونیم‌پهنای صفحه شیب‌دار، سه مرحله زیر دنبال می‌شود:

- ۱- رقمی کردن نیم‌رخ بی‌هنجاری به مسافت‌های مساوی درحالی‌که نقطه $x_i = 0$ در مرکز نیم‌رخ قرار گیرد.
- ۲- رقمی کردن داده‌های پتانسیل با استفاده از روش میانگین متحرک ثانویه که از رابطه (۱۳) به‌دست می‌آید.
- ۳- محاسبه عمق برای بازه نیم‌پهنای فرض شده با طول پنجره‌های ثابت ($s = ۱, ۲, ۳, \dots, M$). در ادامه با ترسیم نمودار عمق‌های محاسبه شده برحسب نیم‌پهنای (روش منحنی پنجره‌ای) از محل تقاطع این منحنی‌ها عمق و نیم‌پهنای واقعی صفحه به‌دست می‌آید.

۵ مدل‌سازی داده‌های مصنوعی برای صفحه شیب‌دار مقادیر پارامترهای این مدل با توجه به رابطه (۹) در جدول ۱ آورده شده است. پتانسیل خودزای بی‌هنجاری صفحه شیب‌دار از رابطه (۹) و با استفاده از پارامترهای مدل برای x ‌های گوناگون محاسبه شده است. در این مدل نقاط



شکل ۴. تفسیر داده‌های بی‌هنجاری پتانسیل خودزا (صفحه شیب‌دار) با استفاده از منحنی‌های پنجره‌ای.

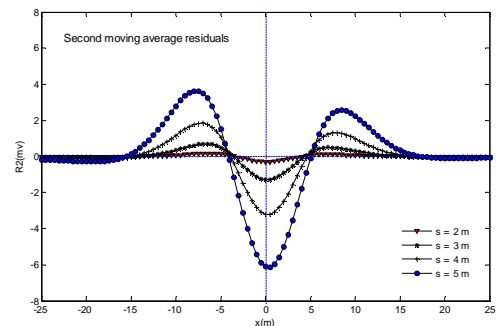


شکل ۵. آنالیز داده‌های پتانسیل خودزا (شکل ۲) با استفاده از فیلتر میانگین متحرک ثانویه بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه تصادفی.

۶ بررسی افزایش عمق صفحه شیب‌دار روی داده‌های نوفه‌ای

عمق مدل در نظر گرفته شده دو متر افزایش داده می‌شود و سایر پارامترها را ثابت فرض می‌کنیم. عمق‌ها با حل مجدد معادله ۱۸ به روش تکرار نیوتن-رفسون برای داده‌های نوفه‌ای برای مقادیر ممکن نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار، محاسبه می‌شود. این معادله برای هر چهار نیم‌رخ باقی‌مانده حل و عمق‌های محاسبه شده برای مقادیر ممکن نیم‌پهنای در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقادیر عمق محاسبه شده برای مقدار نیم‌پهنای واقعی مدل ($x_0 = 2$) عمق واقعی مدل نیست.

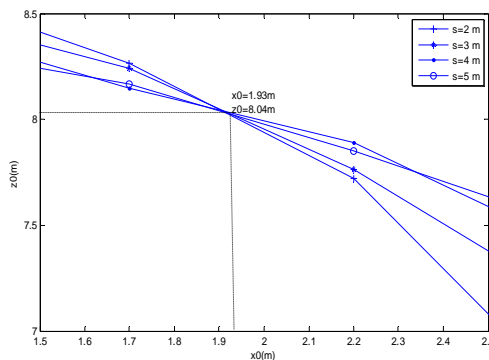
بی‌هنجاری نوفه‌ای صفحه شیب‌دار با استفاده از فن فیلترهای میانگین متحرک برای چهار طول پنجره متوالی $S = 3.2, 5.4$ نیم‌رخ‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده محاسبه می‌شود. با حل مجدد معادله (۱۸) به روش تکرار نیوتن-رفسون با داده‌های نوفه‌ای برای مقادیر ممکن نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار، عمق‌ها محاسبه می‌شود. عمق‌های محاسبه شده برای مقادیر ممکن نیم‌پهنای در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر عمق محاسبه شده برای مقدار نیم‌پهنای واقعی مدل ($x_0 = 2$) عمق واقعی مدل نیست. برای عملیات تفسیر اگر مقادیر عمق‌های به دست آمده برحسب مقادیر نیم‌پهنای رسم شود، عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار از محل تلاقی منحنی‌های پنجره‌ای خوانده می‌شود. این کار در شکل ۶ صورت گرفته است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، منحنی‌ها در $x_0 = 1/93$ و $z_0 = 8/04$ یکدیگر را قطع می‌کنند. با توجه به مقادیر واقعی مدل و مقادیر محاسبه شده بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه، میزان خطای روش میانگین متحرک ثانویه در محاسبه عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار برای داده‌های نوفه‌ای به ترتیب $\pm 3/5$ و $\pm 0/5$ درصد است.



شکل ۳. آنالیز داده‌های پتانسیل خودزای صفحه شیب‌دار با استفاده از فیلتر میانگین متحرک ثانویه برای چهار طول پنجره متوالی $S = 3.2, 5.4$.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مدل صفحه شیب‌دار نامتناهی.

پارامتر	مقدار	یکا
I_1	۱۲۵	آمپر
I_2	۱۰۰	آمپر
z_0	۸	متر
x_0	۲	متر



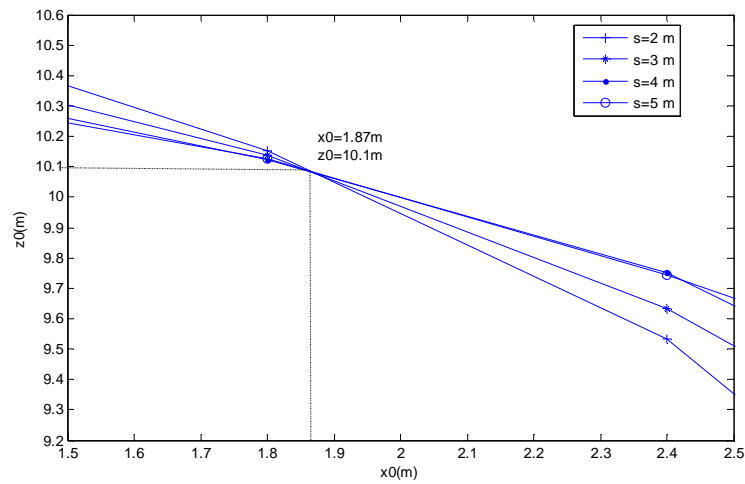
شکل ۶. تفسیر داده‌های پتانسیل خودزای صفحه شیب‌دار نامتناهی، بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه تصادفی.

جدول ۲. عمق‌های محاسبه شده برای نیم‌پهنای فرض شده برای مدل با حل معادله ۱۸.

مقادیر نیم‌پهنای فرض شده (متر)	عمق‌های محاسبه شده (متر)			
	s = ۲	s = ۳	s = ۴	s = ۵
۱/۵	۸/۴۶۴۰	۸/۳۶۸۶	۸/۲۹۸۵	۸/۲۴۷۶
۱/۶	۸/۳۸۷۸	۸/۳۰۶۴	۸/۲۴۷۲	۸/۲۰۴۷
۱/۷	۸/۳۰۴۲	۸/۲۳۸۸	۸/۱۹۱۹	۸/۱۵۸۵
۱/۸	۸/۲۱۲۴	۸/۱۶۵۵	۸/۱۳۲۴	۸/۱۰۹۱
۱/۹	۸/۱۱۱۴	۸/۰۸۶۰	۸/۰۶۸۵	۸/۰۵۶۳
۲	۸/۰۰۰۰	۸/۰۰۰۰	۸/۰۰۰	۸/۰۰۰۰
۲/۱	۷/۸۷۶۸	۷/۹۰۶۸	۷/۹۲۶۶	۷/۹۴۰۱
۲/۲	۷/۷۳۹۶	۷/۸۰۵۸	۷/۸۴۸۰	۷/۸۷۶۳
۲/۳	۷/۵۸۵۷	۷/۶۹۶۱	۷/۷۶۳۹	۷/۸۰۸۷
۲/۴	۷/۴۱۱۱	۷/۵۷۶۷	۷/۶۷۴۰	۷/۷۳۶۹
۲/۵	۷/۲۰۹۶	۷/۴۴۶۳	۷/۵۷۷۸	۷/۶۶۰۹

جدول ۳. عمق‌های محاسبه شده برای نیم‌پهنای فرض شده برای مدل، بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه تصادفی با حل معادله ۱۸.

مقادیر نیم‌پهنای فرض شده (متر)	عمق‌های محاسبه شده (متر)			
	s = ۲	s = ۳	s = ۴	s = ۵
۱/۵	۸/۵۱۰۲	۸/۴۱۴۸	۸/۳۰۲۷	۸/۲۱۷۴
۱/۶	۸/۴۰۵۷	۸/۳۰۹۹	۸/۲۶۸۵	۸/۱۷۴۲
۱/۷	۸/۲۹۴۶	۸/۲۸۵۲	۸/۱۴۳۶	۸/۱۴۱۲
۱/۸	۸/۲۵۵۹	۸/۱۳۷۰	۸/۱۶۲۵	۸/۱۴۷۲
۱/۹	۸/۱۰۹۳	۸/۰۴۱۲	۸/۰۳۲۸	۸/۰۵۳۴
۲	۷/۹۷۳۲	۷/۹۸۰۴	۷/۹۹۷۸	۷/۹۹۰۴
۲/۱	۷/۸۶۶۴	۷/۹۱۴۸	۷/۹۰۲۳	۷/۹۰۸۰
۲/۲	۷/۷۶۰۱	۷/۸۰۸۹	۷/۸۳۴۹	۷/۹۲۳۲
۲/۳	۷/۵۹۱۶	۷/۷۳۶۲	۷/۷۸۰۱	۷/۷۹۹۴
۲/۴	۷/۴۳۶۸	۷/۵۸۰۷	۷/۶۴۱۰	۷/۷۷۱۴
۲/۵	۷/۲۵۹۱	۷/۴۳۹۵	۷/۵۵۵۷	۷/۶۷۲۴



شکل ۷. تفسیر داده‌های پتانسیل خودزا صفحه شیب‌دار نامتناهی با افزایش عمق، بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه تصادفی.

با توجه به مقادیر واقعی مدل و مقادیر محاسبه شده بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه، میزان خطای روش میانگین متحرک ثانویه در محاسبه عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار برای داده‌های نوفه‌ای به ترتیب $1 \pm$ و $6/5 \pm$ درصد است.

برای عملیات تفسیر اگر مقادیر عمق‌های به‌دست آمده برحسب مقادیر نیم‌پهنا رسم شود، عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار از محل تلاقی منحنی‌های پنجره‌ای، خوانده می‌شود. این کار در شکل ۷ صورت گرفته است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود. منحنی‌ها در $x_0 = 1/87$ و $z_0 = 10/01$ یکدیگر را قطع می‌کنند.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای مدل صفحه شیب‌دار.

پارامتر	مقدار	یکا
I_1	۱۲۵	آمپر
I_2	۱۰۰	آمپر
z_0	۱۰	متر
x_0	۲	متر

جدول ۵. عمق‌های محاسبه شده برای نیم‌پهناهای فرض شده برای مدل با عمق ده متر، بعد از اضافه کردن ده درصد نوفه تصادفی با حل معادله ۱۸.

مقادیر نیم‌پهنای فرض شده (متر)	عمق‌های محاسبه شده (متر)			
	s = ۲	s = ۳	s = ۴	s = ۵
۱/۵	۱۰/۳۴۱۶	۱۰/۳۱۰۷	۱۰/۲۲۴۳	۱۰/۲۳۴۲
۱/۶	۱۰/۳۰۰۴	۱۰/۲۱۴۸	۱۰/۲۴۶۴	۱۰/۲۱۰۱
۱/۷	۱۰/۲۷۵۹	۱۰/۲۵۳۱	۱۰/۱۴۹۶	۱۰/۱۶۴۰
۱/۸	۱۰/۱۹۸۷	۱۰/۱۰۸۱	۱۰/۱۱۱۳	۱۰/۰۶۹۱
۱/۹	۱۰/۰۴۳۷	۱۰/۰۳۳۹	۱۰/۰۶۶۳	۱۰/۰۱۵۱
۲	۹/۹۸۹۹	۹/۹۸۷۲	۱۰/۰۴۴۳	۱۰/۰۴۹۹
۲/۱	۹/۹۰۷۵	۹/۸۹۱۰	۹/۹۲۶۱	۹/۹۱۱۶
۲/۲	۹/۷۹۳۰	۹/۸۳۵۵	۹/۹۱۲۷	۹/۸۴۸۸
۲/۳	۹/۷۰۴۲	۹/۷۲۹۵	۹/۷۶۹۹	۹/۸۲۹۲
۲/۴	۹/۵۷۸۰	۹/۶۹۲۸	۹/۷۳۰۵	۹/۷۹۵۱
۲/۵	۹/۴۰۸۹	۹/۵۸۴۳	۹/۶۴۲۵	۹/۷۰۳۹

- from second moving average residual self-potential anomalies: *Geophysics*, **6**, 43-52.
- Abdelrahman, E. M., Ammar A. A., Hassanein H. I., and Hafez, M. A., 1998, Derivative analysis of SP anomalies: *Geophysics*, **63**, 890-7.
- Abdelrahman, E. M., Ammar, A. A., Sharafeldin, S. M., and Hassanein, H. I., 1997, Shape and depth solutions from numerical horizontal self-potential gradients: *Appl. Geophys.*, **36**, 31-43.
- Abdelrahman, E. M., and El-Araby, T. M., 1997, An iterative approach to depth determination from moving average residual self-potential anomalies: *J. King Abdulaziz Univ. Earth Sci.*, **9**, 7-26.
- Abdelrahman, E. M., El-Araby, H. M., El-Araby, T. M., Ammar, A. A., and Hassanein H. I., 1999, Shape and depth solutions from moving average residual self-potential anomalies: *Kuwait J. Sci. Eng.*, **26**, 321-36.
- Abdelrahman, E. M., Essa, K. S., Abo-Ezz, E. R., and Soliman, K. S., 2006, Self-potential data interpretation using standard deviation of depths computed from moving average residual anomaly: *Geophys. Prospect.*, **54**, 1-16.
- Demidovich, B. P., and Maron, I. A., 1973, *Computational Mathematics*: Mir Publishers.
- Griffin, W. R., 1949, Residual gravity in theory and practice: *Geophysics*, **14**, 39-58.
- Hafez, M. A., 2005, Interpretation of the self-potential anomaly over a 2D inclined plate using a moving average window curves method: *Geophysics. Eng.*, **2**, 97-102.
- Lile, O. B., 1994, Modeling self-potential anomalies from electric conductors: EAGE 56th Meeting and Technical Exhibition (Vienna, Austria).
- Murthy, S. B. V., and Haricharan, P., 1985, Nomogram for the spontaneous potential profile over sheet-like and cylindrical two-dimensional sources: *Geophysics*, **50**, 1127-35.
- Mustoe, L. R., and Barry, M. D J., 1998, *Mathematics in Engineering and Science* (New York: Wiley).
- Rao, A. D., Babu, R. H. V., and Sivakumar, S. G. D., 1982, A Fourier transform method for the interpretation of self-potential anomalies due to two-dimensional inclined sheet of finite depth extent: *Pure Appl. Geophys.*, **120**, 365-374.
- Stanley, J. M., 1977, Simplified magnetic interpretation of the geologic contact and thin dike: *Geophysics*, **42**, 1236-40.

۷ نتیجه‌گیری

مسئله تعیین پارامترهای صفحه از داده‌های SP با طول نیم‌رخ کوتاه با استفاده از روش میانگین متحرک ثانویه حل می‌شود. این روش با کاربرد روش منحنی‌های پنجره‌ای برای بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده، پتانسیل خودزای عمق و نیم‌پهنای واقعی صفحه شیب‌دار نامتناهی را تعیین می‌کند. در واقع تعیین عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار با روش میانگین متحرک ثانویه، حل یک معادله غیر خطی به روش تکرار نیوتن است. همچنین این روش برای تعیین عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار با داده‌های نوفه‌دار، بسیار قوی عمل می‌کند که در این تحقیق با اضافه کردن ده درصد نوفه به داده‌ها عمق و نیم‌پهنای صفحه محاسبه شده است که خطای آن بین $0/5 \pm$ تا $3/5 \pm$ درصد در محاسبه عمق و نیم‌پهنای است. در ادامه با افزایش عمق مدل برای داده‌های نوفه‌ای، این روش آزمایش شد که خطای محاسبه عمق و نیم‌پهنای صفحه بین $1 \pm$ تا $6/5 \pm$ درصد افزایش یافت. می‌توان نتیجه گرفت که روش میانگین متحرک ثانویه برای تعیین پارامترهای بی‌هنجاری‌های سطحی پتانسیل خودزا ابزاری قوی است ولی با افزایش عمق، بی‌هنجاری خطای این روش افزایش می‌یابد. مزیت این روش تعیین هم‌زمان عمق و نیم‌پهنای صفحه شیب‌دار نامتناهی برای طول نیم‌رخ‌های کوتاه و بلند است، که تعیین هم‌زمان این پارامترها اطلاعات باارزشی از زمین‌شناسی ساختارهای زیرسطحی را مشخص می‌کند. روش میانگین متحرک ثانویه مهم‌ترین و ساده‌ترین فن برای جداسازی پتانسیل بی‌هنجاری‌های SP به دو مولفه باقی‌مانده و ناحیه ای است. در نهایت این روش برای اجرا بسیار ساده است و محاسبات ریاضی سخت و کسل‌کننده‌ای ندارد.

منابع

- Abdelrahman, E. M., El-Araby T. M., and Essa, K. S., 2009, Shape and depth determinations