

مدل سازی داده‌های مگنتوتلوریک با قطبش H به روش تفاضل متناهی

سلمان کامیابی آبکوه^۱ و بهروز اسکویی*

^۱موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۳/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۲)

چکیده

در تحقیقات ژئوفیزیکی مسئله اساسی به دست آوردن مدلی است که بتواند به بهترین وجه ممکن ساختارهای زیرسطحی زمین را نشان دهد. گام اساسی برای این کار به دست آوردن کمیت‌های قابل مشاهده در سطح زمین به کمک قوانین فیزیکی است. این مسئله با مدل سازی پیشرو عملی می‌شود. در این تحقیق مدل سازی پیشرو برای روش مگنتوتلوریک (زمین مغناطیسی) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور یک کُد در محیط نرم افزار متلب نوشته شده است. روش عددی استفاده شده برای حل مسئله مدل سازی، روش تفاضل متناهی است. در این تحقیق مدل سازی پیشرو مگنتوتلوریک با مُد TM مورد بررسی قرار گرفته است. این کُد قادر به مدل سازی پیشرو داده‌های مگنتوتلوریک برای انواع مدل‌های مصنوعی دوبعدی است. هر سه مدل و پاسخ آنها آورده شده است. دیده می‌شود که کد به خوبی مدل سازی مدل‌های مختلف را انجام می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی، مگنتوتلوریک، تفاضل متناهی، مُد TM، نرم افزار متلب

Modeling of H-polarization magnetotelluric responses using the finite difference method

Salman Kamyabi Abkooch^{1*} and Behrooz Oskooi¹

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 20 June 2011, accepted: 12 March 2013)

Summary

The basic point in geophysical studies is to obtain a model that can show structures below the ground surface. The basic step for this project is to obtain measurable parameters at the surface of the earth by physical laws. This object can be done by forward modeling. In geophysical investigations, the simplest model representing the earth is a one dimensional model which in the conductivity varies just with the variation of depth. In more realistic models of the earth, resistivity varies not only with depth, but also with one horizontal direction. Two dimensional forward modeling can be solved by analytical methods for some special cases. In two or three dimensional general cases, modeling performs by numerical methods. The numerical method in this case is the finite difference. When the results are extensive, this method is more useful, in comparison with the other calculative computer methods. Finite difference method does need much volume of CPU; also this method is suitable for running on some computers simultaneously because only the

*Corresponding author:

boskooi@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

nearest adjacent points involve calculations. The main point in this method is the space size of the model blocks and the number of required frequencies. This will determine the duration of running time of the code.

Solving the problem of electromagnetic induction in the earth by numerical methods has been considered by many earth scientists for years. Various methods and techniques have been used in this field such as transmission line analogy, integral equation, finite element and finite difference. (Brewitt-Taylor and weaver, 1976.) Jones and Pascoe are one of the first persons who have worked in this field. Jones and Pascoe's articles in 1971 and 1972 further more than theoretical solution of electromagnetic induction, also included FORTRAN codes of electromagnetic induction solution by finite difference method for two dimensional structures in a layered earth. Nowadays researches in this field are focused on solution of electromagnetic induction in three dimensions. An economical and good formulation of this point in Integral vector equation method is presented by Raiche in 1974 and also the same method in more details is presented by Weidelt in 1975 separately.

Maxwell equations are needed for forward modeling of magnetotelluric data. The main equations which have been used in this research are curly differential Maxwell equations of electric and magnetic fields and the finite difference method is used for these equations. After setting the preconditions for having softer variations in electrical resistivity, a model for electrical resistivity has been gained in node points. By determination of final formulas of finite difference for all of the blocks of the net, the code for forward modeling in MATLAB is written. MATLAB code after obtaining the values of electric and magnetic fields for all points of the net, determines the electrical resistivity and phase of the points.

Eight matrices are the initial data for MATLAB code. These matrices introduce the model parameters. After making the model, MATLAB code makes the matrices of the system equations coefficients for obtaining the electric and magnetic fields values of the net. In conclusion, by calculating the electromagnetic field values, the values of the electrical resistivity and phase are gained for all points.

In this study, a forward modeling of TM mode magnetotelluric data is used. The MATLAB code is able to forward model the magnetotelluric data for various artificial two-dimensional models. Three models and their responses are presented. The code performs the forward modeling of various models perfectly.

Keywords: Modeling, Magnetotelluric, Finite difference, TM mode, MATLAB

روش است. برای بررسی روش مگنتوتلوریک از دو مُد TM و TE استفاده می‌شود. در مُد TM از داده‌های میدان مغناطیسی استفاده می‌شود که در راستای ساختار زمین‌شناسی برداشت شده‌اند و مولفه میدان الکتریکی القایی عمود بر راستای ساختار زمین‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ و به همین ترتیب در مُد TE راستای میدان الکتریکی موازی امتداد ساختار زمین‌شناسی در نظر گرفته می‌شود.

۱ مقدمه

روش مگنتوتلوریک یکی از روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی با چشمه طبیعی است که توزیع مقاومت ویژه زمین را مشخص می‌کند. از این روش در اکتشافات نفت، تعیین ساختارهای زمین‌شناسی، شناسایی لایه‌های آب شور، اکتشاف منابع معدنی و منابع زمین گرمایی استفاده می‌شود. کم‌هزینه بودن، آسیب نرساندن به محیط زیست و قابلیت پی‌جویی تا اعماق زیاد از ویژگی‌های این

۲ نظریه

با در نظر گرفتن معادلات ماکسول (روابط ۱ تا ۴) و روابط کمکی $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ و $\vec{B} = \mu \vec{H}$ می توان رابطه (۳) را به صورت رابطه (۵) بازنویسی کرد.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (5)$$

\vec{J} چگالی جریان برحسب A/m^2 و μ نفوذپذیری مغناطیسی برحسب H/m است. با توجه به اینکه میدان جریان جابه جایی در بسامدهای مورد استفاده در روش MT یک میدان شبه ایستا به حساب می آید، بنابراین جریان های جابه جایی تابع زمان (که از اثرات قطبش اند) در مقایسه با جریان های رسانشی تابع زمان، قابل چشم پوشی هستند. بنابراین رابطه (۵) را می توان به صورت زیر ساده کرد.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \sigma \vec{E}, \quad (6)$$

با فرض جدایی بخش های زمانی و فضایی میدان های الکترومغناطیسی و اینکه تابع زمانی میدان های الکترومغناطیسی به صورت ساده، یک تابع تک بسامد سینوسی باشد، می توان معادله (۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\nabla \times \vec{E} = -i \omega \vec{B}, \quad (7)$$

با گرفتن تاو از روابط (۶) و (۷) به دست می آید:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -i \kappa \vec{E}, \quad (8)$$

$$\rho \nabla^2 \vec{B} - \nabla \rho \times \nabla \times \vec{B} = i \vec{B}, \quad (9)$$

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \omega \mu_0 \sigma \quad \text{که:}$$

در روابط بالا گذردهی مغناطیسی مواد با تقریب خوبی برابر گذردهی خلا در نظر گرفته شده است.

ساده ترین مدل برای زمین، مدلی یک بُعدی است که در آن رسانایی فقط با عمق تغییر می کند. در مدل های واقعی زمین، مقاومت الکتریکی علاوه بر راستای قائم در راستای افقی نیز تغییر می کند. مدل سازی پیشرو دو بُعدی را فقط برای حالت های خاص می توان به صورت تحلیلی عملی ساخت. در حالت های عمومی دو بُعدی و یا سه بُعدی، مدل سازی فقط به روش های عددی صورت می گیرد. از جمله این روش ها می توان به روش های انتگرالی (IEM)، روش های دیفرانسیلی (DEM) و روش های هیبرید (HEM) اشاره کرد.

روش تفاضل متناهی یکی از روش های دیفرانسیلی است که کاربرد گسترده ای دارد. در مقایسه با سایر روش های محاسبات رایانه ای هنگامی که محدوده نتایج گسترده هستند، کارایی روش تفاضل متناهی بیشتر است. مسئله بسیار مهم در این روش اندازه مکانی بلوک های مدل و تعداد بسامدهای مورد نیاز است. این مسئله مدت زمان اجرای برنامه را تعیین می کند. دقت روش تفاضل متناهی با افزایش تعداد بلوک های شبکه تا میزان دلخواه زیاد می شود.

اساس معادلاتی که در این پژوهش روش تفاضل متناهی روی آنها اجرا شده است، شکل دیفرانسیلی دو معادله تاو میدان های الکتریکی و مغناطیسی است. پس از به دست آوردن معادلات تفاضل متناهی برای همه نقاط شبکه، گد مدل سازی پیشرو در محیط نرم افزار مت لَب نوشته شده است. برای حل عددی معادله هلمهولتز از روش تکرار ژاکوبی استفاده شده است. گد مت لَب پس از یافتن مقادیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی در کل شبکه مقاومت ویژه ظاهری و فاز را برای کل شبکه به دست می آورد.

۳ الگوریتم

برای قطبش B می‌توان معادله (۱۱) را برای یک شبکه با ابعاد M, N, N سلول در راستای قائم (z) و M سلول در راستای افقی) با فرض اینکه محیط پایین‌تر از مرز پایینی شبکه آبرسانا است (یعنی در مرز پایینی $E_y = 0$ برقرار است)، حل کرد. طول قائم هر سلول شبکه با k_n و طول افقی هر سلول با h_m نمایش داده می‌شود. مرز بالایی شبکه سطح زمین را تشکیل می‌دهد. در مرزهای کناری از شرط مرزی نویمان و در میان شبکه از شرط مرزی دیریکله استفاده شده است.

در مرز بالایی شبکه که برای قطبش B سطح زمین را تشکیل می‌دهد، از معادله (۱۶) به دست می‌آید:

$$B_{m,1} = H_0, \quad (17)$$

مرز پایینی شبکه سطح آبرسانا است که در این سطح رابطه $E_y = 0$ برقرار است. با بسط تیلور B از مرز پایینی شبکه (m, N) به سمت بالا و صرف نظر کردن از جملات مرتبه سوم $O(k_N^3)$ به بالا به دست می‌آید:

$$B_{m,N-1} = B_{m,N} + \frac{1}{2} k_N^2 \left\{ \frac{iB_{m,N}}{\rho_{m,N}} - \left(\frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right)_{m,N} - \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} \right)_{m,N} \right\}, \quad (18)$$

در معادله بالا به جای $\frac{\partial^2 B}{\partial z^2}$ از معادله (۱۳) استفاده شده است. همچنین $\rho_{m,N}$ هموارسازی شده و شرط نویمان در مرز شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین در دو نقطه گوشه‌ای $(1, N)$ و (M, N) همه مشتقات y باید حذف شود و در نقطه (M, N) بنا به رابطه (۱۸) به دست می‌آید:

$$(\rho_{M,N} + \frac{1}{2} i k_N^2) B_{M,N} = B_{M,N-1} \rho_{M,N}, \quad (19)$$

در نقاط مرز سمت راست شبکه $2 \leq n \leq N-1, m = M$ خواهیم داشت:

$$k_{n-1} \zeta_{M,n} B_{M,n+1} + k_n \eta_{M,n} B_{M,n-1} = (k_n + k_{n-1}) (\zeta_{M,n} \eta_{M,n} + i k_n k_{n-1}) B_{M,n} \quad (20)$$

که:

بردارهای $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ دستگاه مختصات دکارتی را تشکیل می‌دهند که در آن برای یک مسئله دو بُعدی B, E, σ مستقل از متغیر x هستند. معمولاً یک مسئله دو بُعدی عمومی در دو قطبش B, E تعریف می‌شود؛ طوری که در قطبش E داریم:

$$E = E\hat{x}, \quad B = \left(\frac{i}{\omega} \right) (\hat{y} \frac{\partial E}{\partial z} - \hat{z} \frac{\partial E}{\partial y}), \quad (10)$$

و در قطبش B داریم:

$$B = B\hat{x}, \quad E = (\omega \rho) (\hat{y} \frac{\partial B}{\partial z} - \hat{z} \frac{\partial B}{\partial y}), \quad (11)$$

معمولاً این دو قطبش به طور مستقل تحلیل می‌شوند. برای قطبش E معادله (۸) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = i \kappa E, \quad (12)$$

و برای قطبش B معادله (۹) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \rho \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial B}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial B}{\partial z} = iB. \quad (13)$$

در یک منطقه کاملاً نارسانا ($\sigma = 0$) معادله (۶) را می‌توان با یک معادله مشابه جایگزین کرد:

$$B = -\nabla^2 \Omega, \quad (14)$$

که به کمک معادله (۷) داریم:

$$\nabla^2 \Omega = 0, \quad (15)$$

برای قطبش B طبق معادلات (۱۱) و (۱۴) به دست می‌آید:

$$B = H_0, \quad (16)$$

که $B = H_0$ مقدار ثابتی است.

با حل معادلات (۱۰) و (۱۱) در نیم فضای $z > 0$ که دارای تابع توزیع رسانش الکتریکی κ است می‌توان مسئله القارا به ترتیب برای دو قطبش B, E حل کرد. ناحیه $z < 0$ در بالای سطح زمین در حکم نارسانا فرض می‌شود و فرض بر این است که میدان مغناطیسی القایی در سرتاسر این ناحیه، افقی و یکنواخت است (ویور و برویت تیلور، ۱۹۷۶).

با این رابطه حل معادله میدان مغناطیسی کامل می شود. محاسبه مولفه های میدان الکتریکی همان گونه که رابطه (۱۱) نشان می دهد، ساده است. در یک گره داخل زمین بین رسانایی های گوناگون، روابط تفاضل متناهی برای میدان B تقریباً همان قدر معتبر هستند که اگر این گره در نقطه ای با تغییرات رسانایی کم قرار داشت؛ و یا روی مرز صفحه بین دو منطقه با رسانایی متفاوت قرار داشت. این مسئله در مورد میدان الکتریکی در همان گره صادق نیست. مولفه قائم میدان الکتریکی در عبور از مرز دو محیط متفاوت به سرعت اما به صورت پیوسته تغییر می کند؛ اما در اینجا که اصولاً مسئله به صورت گسسته حل می شود، دیگر مولفه میدان الکتریکی در عبور از مرز دو محیط، پیوسته نیست و بنابراین به شکل یکتا به دست نمی آید. برای برطرف کردن این مشکل می توان به روش ساده زیر به جای استفاده از روابط تفاضل در هر گره، از روابط تفاضل مرکزی استفاده کرد. یعنی اگر در رابطه (۱۱) به جای استفاده از مشتق های میدان مغناطیسی از روابط تفاضل مرکزی استفاده شود، می توان به نوعی از میانگین میدان الکتریکی دست یافت که با آنچه گفته شد در تضاد نباشد. باین حال باید در نظر داشت که مقدار میدان الکتریکی که این گونه به دست می آید، نسبت به تغییرات مکانی بسیار حساس است. بنابراین به جای اینکه مقدار میدان الکتریکی در نقطه (m,n) محاسبه شود، این مقدار در نقطه $(m+1/2, n+1/2)$ به دست می آید. با به کارگیری رابطه چهار نقطه برای مشتق مرتبه اول، رابطه (۱۱) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$(E_y)_{m+\frac{1}{2}, n+\frac{1}{2}} = \frac{B_{m+1, n+1} + B_{m, n+1} - B_{m+1, n} - B_{m, n}}{2\mu_0 k_n \sigma_{m+1/2, n+1/2}}, \quad (27)$$

$$(E_z)_{m+\frac{1}{2}, n+\frac{1}{2}} = \frac{B_{m, n+1} + B_{m, n} - B_{m+1, n+1} - B_{m+1, n}}{2\mu_0 h_m \sigma_{m+1/2, n+1/2}}, \quad (28)$$

$$\zeta_{m,n} = \rho_{m,n} + k_{n-1} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)_{m,n}, \quad (29)$$

$$\eta_{m,n} = \rho_{m,n} - k_n \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)_{m,n}.$$

روابط (۱۹) و (۲۰) شامل N-1 معادله و N-1 مجهول هستند که می توان آنها را حل کرد. با حل معادلات بالا، اندازه میدان مغناطیسی در نقاط مرز سمت راست شبکه برحسب اندازه میدان مغناطیسی در سطح زمین $(B_{M,1} = H_0)$ به دست می آید. به همین ترتیب معادلات مرز سمت چپ شبکه با جایگزینی $M = 1$ در روابط (۱۹) و (۲۰) به صورت زیر نوشته می شوند:

$$(\rho_{1,N} + 1/2 ik_N^2) B_{1,N} = B_{1,N-1} \rho_{1,N}, \quad (22)$$

$$k_{n-1} \zeta_{1,n} B_{1,n+1} + k_n \eta_{1,n} B_{1,n-1} = (k_n + k_{n-1}) (\zeta_{1,n} + \eta_{1,n} + ik_n k_{n-1}) B_{1,n}. \quad (23)$$

نمایش رابطه تفاضل متناهی برای معادله (۱۸) در نقاط (m,N) و $2 \leq m \leq M-1$ که مرز پایینی شبکه را تشکیل می دهند، به صورت زیر است:

$$\frac{\rho_{m,N} + \gamma_{m,N}}{h_m (h_m + h_{m-1})} B_{m+1,N} + \frac{\rho_{m,N} + \delta_{m,N}}{h_{m-1} (h_m + h_{m-1})} B_{m-1,N} + \frac{2\rho_{m,N}}{k_N^2} B_{m,N-1} = \left(\frac{2\rho_{m,N}}{k_N^2} + \frac{\gamma_{m,N} + \delta_{m,N}}{h_m h_{m-1}} + i \right) B_{m,N}$$

که:

$$\gamma_{m,n} = \rho_{m,n} + h_{m-1} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)_{m,n}, \quad (25)$$

$$\delta_{m,n} = \rho_{m,n} - h_m \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)_{m,n}.$$

و در نهایت با در نظر گرفتن معادله (۱۳) برای نقاط داخل شبکه $(2 \leq m \leq M-1, 2 \leq n \leq N-1)$ رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\rho_{m,n} + \gamma_{m,n}}{h_m (h_m + h_{m-1})} B_{m+1,n} + \frac{\rho_{m,n} + \delta_{m,n}}{h_{m-1} (h_m + h_{m-1})} B_{m-1,n} + \frac{\rho_{m,n} + \zeta_{m,n}}{k_n (k_n + k_{n-1})} B_{m,n+1} + \frac{\rho_{m,n} + \eta_{m,n}}{k_{n-1} (k_n + k_{n-1})} B_{m,n-1} = \left(\frac{\zeta_{m,n} + \eta_{m,n}}{k_n k_{n-1}} + \frac{\gamma_{m,n} + \delta_{m,n}}{h_m h_{m-1}} + i \right) B_{m,n}, \quad (26)$$

در این گد شرایط اولیه برای حل مسئله شامل چهار ماتریس و چهار عدد حقیقی می‌شود که این مقادیر پارامترهای مدل را تعریف می‌کنند. این چهار ماتریس ماتریس‌های مقاومت ویژه مدل، فواصل عمودی و افقی بلوک‌ها و بسته بسامد زاویه‌ای مورد نظر است و چهار عدد ورودی شامل تعداد بلوک‌های افقی و عمودی شبکه، تعداد بسامدهای ورودی و اندازه میدان مغناطیسی در یکی از بلوک‌های سطحی است. با توجه به اینکه بردارهای فواصل قائم و افقی شبکه‌بندی را تعیین می‌کنند، باید با دقت انتخاب شوند تا علاوه بر انطباق با ماتریس مقاومت ویژه، با قوانین شبکه‌بندی نیز در تضاد نباشند. بازه مناسب برای بسامد، بسته به عمق ناهنجاری از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ هرتز است.

۴ مدل‌های مصنوعی

سه مدل مصنوعی و پاسخ آنها را که با گد محاسبه شده است بررسی می‌کنیم. هر سه مدل ابعاد ۱۰۰۰۰ در ۱۰۰۰۰ متر دارند. دو دسته منحنی برای هر مدل تولید می‌شود: منحنی‌های فاز و مقاومت ویژه ظاهری برحسب بسامد و منحنی‌های فاز و مقاومت ویژه ظاهری در امتداد طول نیم‌رخ.

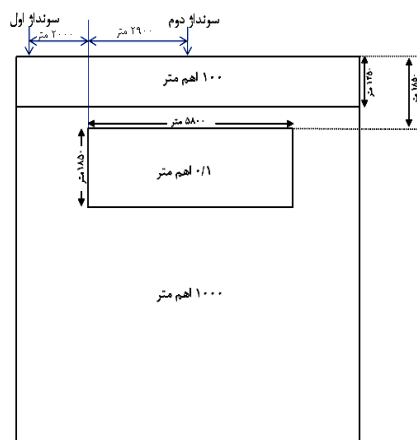
روابط بالا برای نقاط $1 \leq m \leq M-1$ و $1 \leq n \leq N-1$ صادق هستند. رابطه (۲۷) میدان الکتریکی را روی سطح زمین یعنی نقاط $z=0$ نمی‌دهد و می‌دانیم که دانستن مقدار میدان در این نقاط بیش از سایر نقاط، مورد نیاز است. با استفاده از بسط تیلور B که از نقاط $(m,1)$ به سمت پایین صورت گیرد و در نظر گرفتن $\partial B / \partial z$ برحسب E_y در رابطه (۱۱) می‌توان مقدار میدان الکتریکی را در سطح زمین به دست آورد. با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۷) و استفاده از شرط نویمان و همچنین در نظر گرفتن iH_0/ρ به جای $\partial^2 B / \partial z^2$ روی سطح زمین و صرف نظر کردن از جملات با درجه بالاتر از ۳ می‌توان نوشت (ویور و برویت تیلور، ۱۹۷۶):

$$(E_y)_{m,1} = \left(\frac{\omega \rho_{m,1}}{k_1} \right) (B_{m,2} - H_0) - \frac{1}{2} i \omega k_1 H_0, \quad (29)$$

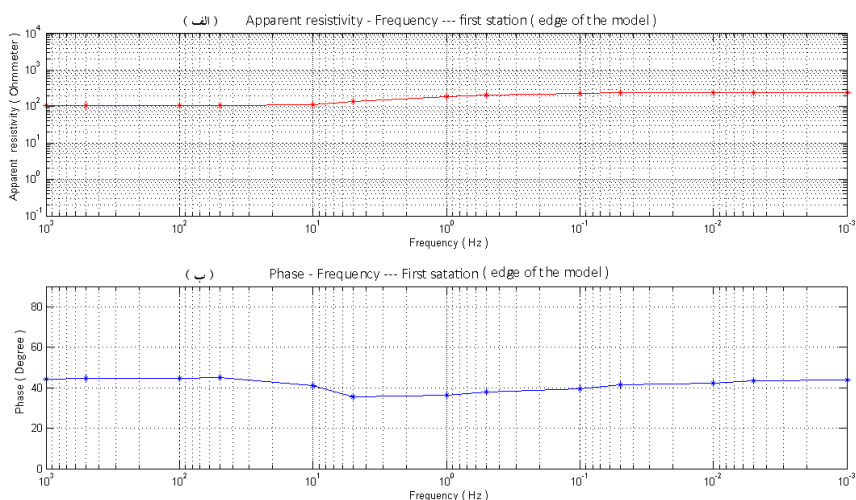
با به دست آوردن اندازه مولفه‌های میدان مغناطیسی و الکتریکی، مقادیر فاز و مقاومت ویژه الکتریکی بر طبق روابط به دست می‌آیند.

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega \mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 = \frac{T}{2\pi \mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2, \quad (30)$$

$$\phi_{yx} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_{yx}\}}{\text{Re}\{Z_{yx}\}} \right). \quad (31)$$



شکل ۱. ناهنجاری مستطیلی شکل در زمین دو لایه.



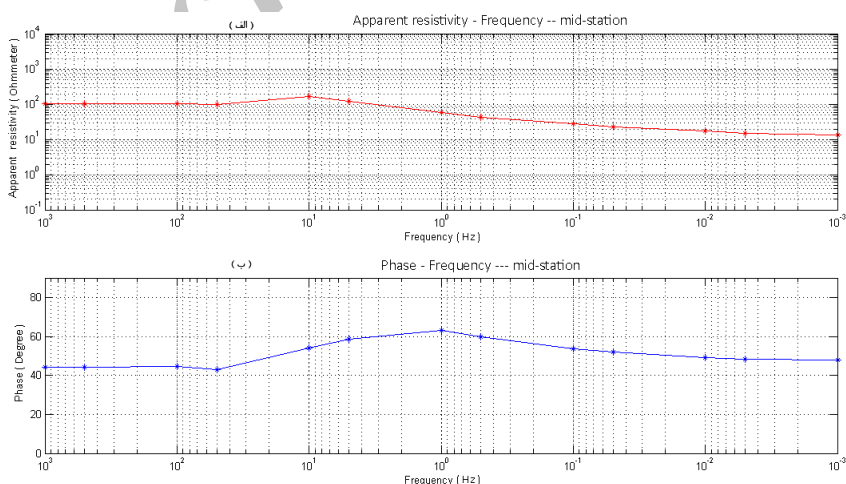
شکل ۲. منحنی های مقاومت ویژه (الف) و فاز (ب) بر حسب بسامد در ۴۰۰ متری ابتدای نیمرخ.

نابهنجاری و سونداژ دوم در وسط نابهنجاری زده شده است. پاسخ این مدل برای یک سونداژ که روی زمین در فاصله ۲۰۰۰ متری کناره نابهنجاری زده شده است، به صورت منحنی های شکل ۲ است و پاسخ مدل برای سونداژ روی نابهنجاری به صورت شکل ۳ است. همچنین پاسخ مدل در طول نیمرخ برای پنج بسامد ۰/۰۱، ۰/۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ هرتز به ترتیب با رنگ های سرخ، سبز، آبی، بنفش و زرد در شکل ۴ نمایش داده شده است.

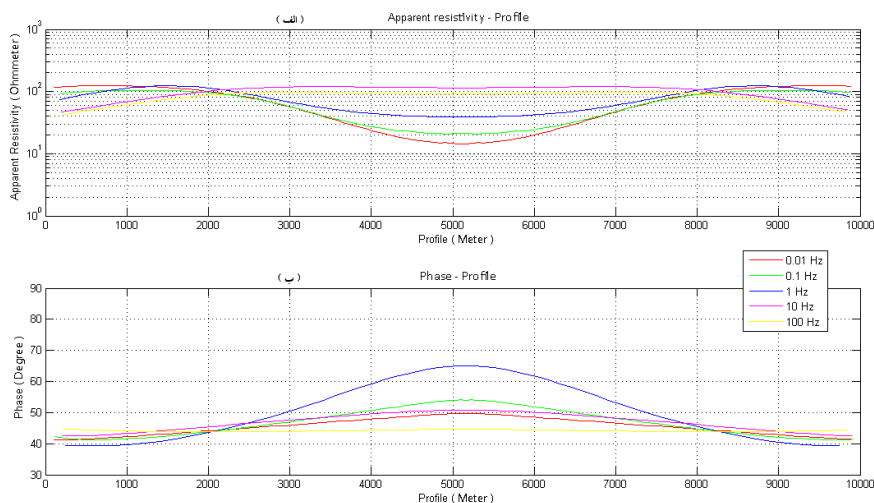
۱-۴ مدل ۱: زمین دو لایه

اولین مدل یک نابهنجاری مستطیلی شکل با ابعاد ۵۸۰۰ × ۱۸۵۰ متر مربع و مقاومت ویژه $0.1 \Omega m$ است و در یک زمین دو لایه قرار دارد.

لایه اول ۱۲۵۰ متر ضخامت و مقاومت ویژه $100 \Omega m$ و لایه دوم مقاومت ویژه $1000 \Omega m$ دارد. برای آنکه پاسخ لایه کم رسانای بالایی به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد، بهتر است پاسخ مدل در دو نقطه ابتدا و وسط مدل محاسبه شود. سونداژ اول در فاصله ۲۰۰۰ متری از



شکل ۳. منحنی های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) بر حسب بسامد روی نابهنجاری رسانا.

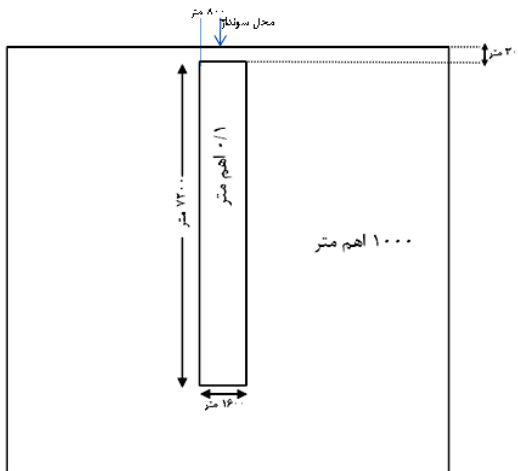


شکل ۴. منحنی‌های مقاومت ویژه (الف) و فاز (ب) در امتداد طول افقی نیم‌رخ برای زمین دو لایه.

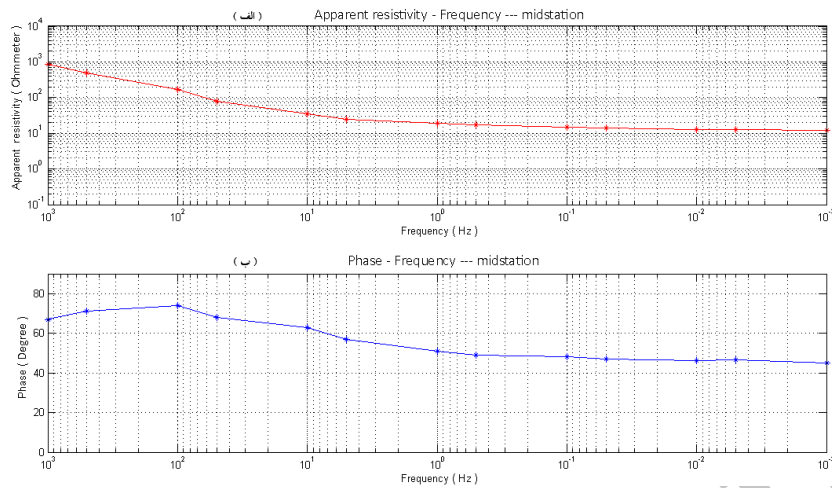
۲-۴ مدل ۲: مدل دایک (Dyke)

یکی از مدل‌های مصنوعی قابل مقایسه با مدل‌های واقعی، یک نابهنجاری مستطیلی است که کشیدگی قائم دارد. این مدل با یک دایک قائم قابل مقایسه است. مُد TM برای مدل‌های با کشیدگی به سمت پایین (برای نمونه دایک‌ها) پاسخ مناسب‌تری از مُد TE به دست می‌دهد (بردیچوفسکی، ۲۰۰۸). شکل ۴-۳۰ یک نابهنجاری دایکی شکل با ابعاد ۷۲۰۰×۱۰۰۰ متر مربع و مقاومت ویژه $۰/۱$ اهم‌متر در یک زمین همگن با مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم‌متر را نشان می‌دهد. پاسخ مدل برای سونداژی که در بالای مرکز نابهنجاری زده شود به صورت شکل ۶

است. همچنین پاسخ مدل در طول نیم‌رخ برای پنج بسامد $۰/۰۱$ ، $۰/۱$ ، ۱ ، ۱۰ و ۱۰۰ هرتز به صورت شکل ۷ است. مدل شکل ۵ تقریباً از سطح زمین شروع می‌شود، بنابراین در شکل ۶ (الف) منحنی مقاومت ویژه به سرعت نزول پیدا می‌کند و به مقاومت ظاهری حدود ۱۲ اهم‌متر همگرا می‌شود. در شکل ۶ (ب) به خاطر حضور دایک رسانا در نزدیکی سطح زمین، منحنی فاز از ۴۵ درجه آغاز نمی‌شود، بلکه از ۶۷ درجه آغاز می‌شود و با نزدیک شدن به دایک رسانا سیر صعودی دارد. پس از آن در محیط یکنواخت دایک (تا عمق ۷۵۰۰ متری) فاز کاهش می‌یابد و به ۴۵ درجه همگرا می‌شود.



شکل ۵. نابهنجاری دایکی شکل در زمین همگن.

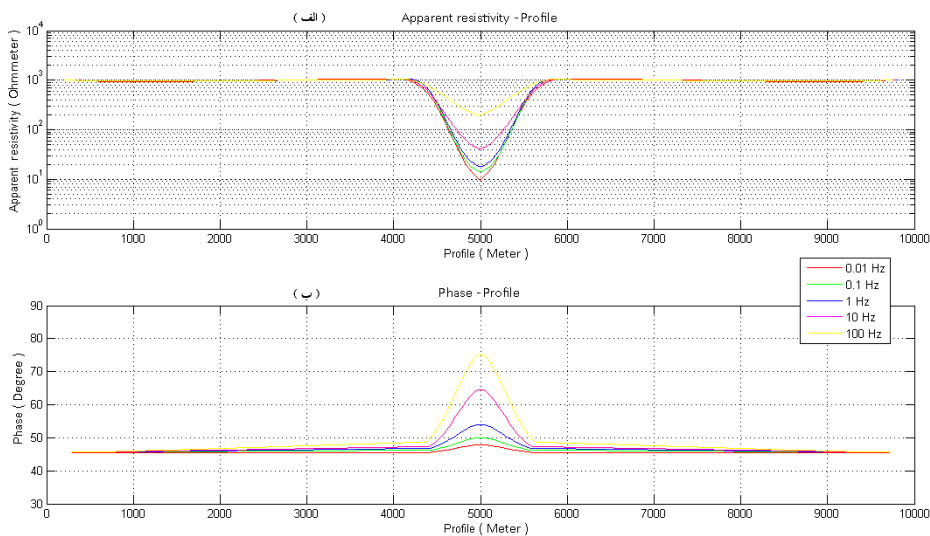


شکل ۶. منحنی های مقاومت ویژه (الف) و فاز (ب) برحسب بسامد، مدل دایک در وسط مدل (پاسخ کُذ).

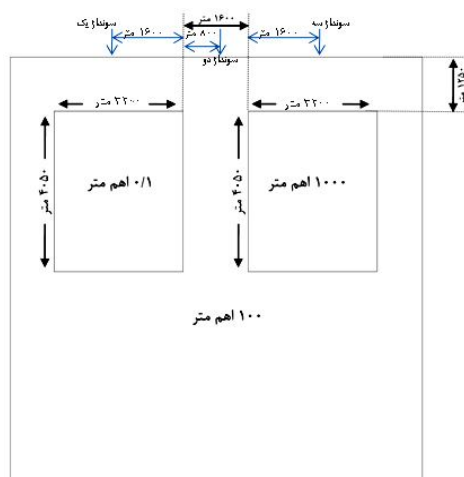
ظاهری ۱۰۰۰ اهم متر را نشان می دهند و با نزدیک شدن به نابهنجاری تغییرات شدید آشکار نمی سازند.

۳-۴ مدل ۳: نابهنجاری های مقاوم و رسانا دو نابهنجاری مستطیلی شکل هر دو با ابعاد 2400×4050 متر مربع، یکی رسانا با مقاومت ویژه $0.1 \Omega m$ و دیگری مقاوم با مقاومت ویژه $1000 \Omega m$ در یک زمین همگن با مقاومت ویژه $100 \Omega m$ در شکل ۸ نشان داده شده است.

منحنی های شکل ۷ نمونه بسیار خوبی از محاسبه کشیدگی افقی نابهنجاری در امتداد نیم رخ هستند. در شکل ۷ منحنی های (الف) و (ب) از فاصله ۴۰۰۰ تا ۶۴۰۰ متری از ابتدای نیم رخ در همه بسامدها به خوبی محدوده افقی نابهنجاری را نشان می دهند؛ در این شکل منحنی ها در سایر فواصل افقی یک زمین همگن با مقاومت ویژه ظاهری ۱۰۰۰ اهم متر را نشان می دهند. همچنین در شکل ۷ مشاهده می شود که هر دو منحنی (الف) و (ب) از ابتدای نیم رخ تا فاصله ۴۰۰۰ متری و سپس از فاصله ۶۴۰۰ متری تا انتهای نیم رخ یک زمین همگن با مقاومت ویژه



شکل ۷. منحنی های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) در امتداد نیم رخ برای مدل دایک.



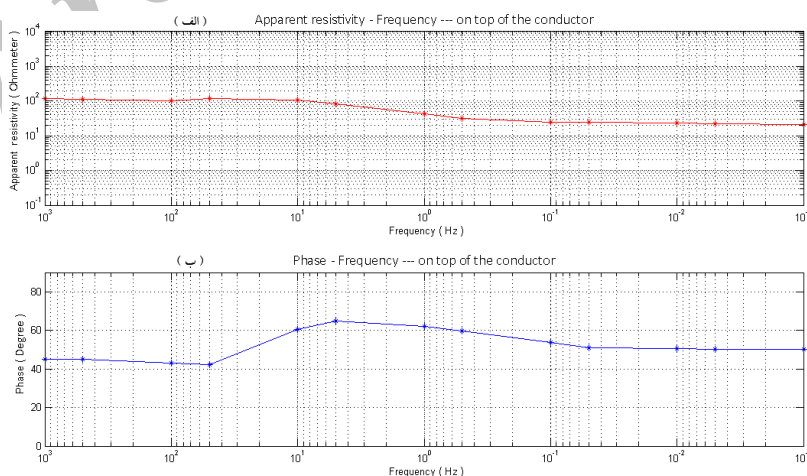
شکل ۸. دو نابهنجاری مستطیلی، یکی رسانا و دیگری مقاوم در یک زمین همگن.

مدل در طول نیم‌رخ برای پنج بسامد $۰/۱$ ، ۱ ، ۱۰ و ۱۰۰ هرتز به صورت شکل ۱۲ است.

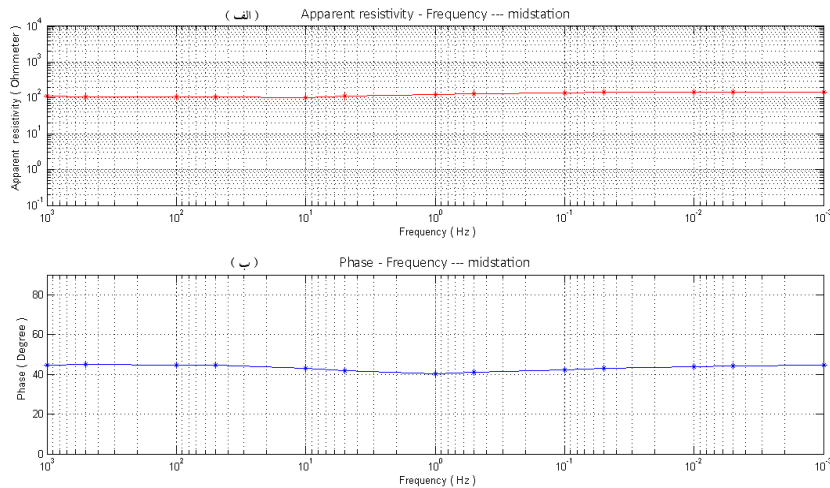
۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل‌سازی پیشرو داده‌های مگنتوتلوریک با قطبیت H مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل‌سازی، یک کُند در محیط نرم‌افزار مت‌لب نوشته شد. این کُند براساس شکل دیفرانسیلی معادلات ماکسول نوشته شده است. بنابراین توانایی مدل‌سازی برای مدل‌های گوناگون را دارد. برای به‌دست آوردن معادلات نهایی گسسته، از روش تفاضل متناهی استفاده شده است. این کُند قادر به

برای بررسی پاسخ این مدل مناسب است که پاسخ را در سه نقطه از نیم‌رخ یعنی روی نابهنجاری رسانا، روی نابهنجاری مقاوم و وسط نیم‌رخ یعنی بالای بخش میانی دو نابهنجاری بررسی کرد. نابهنجاری‌های مدل شکل ۸ تقریباً مربعی‌شکل هستند و با وجود آنکه فاصله کمی از هم دارند، تباین آنها بسیار زیاد است. این مدل شبیه یک مدل زمین‌شناسی است که دو توده گچی و رُسی نزدیک به هم باشند. در شکل ۹ پاسخ سونداژزنی را برای این مدل روی مرکز جسم رسانا، می‌توان مشاهده کرد. همچنین پاسخ



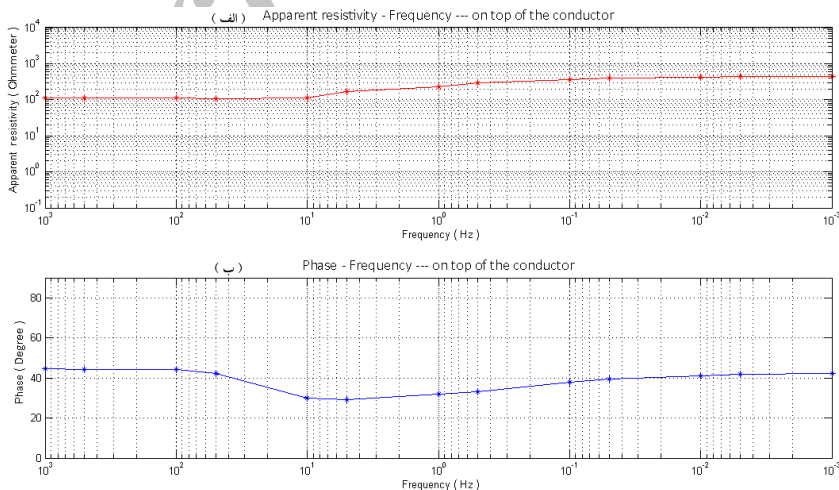
شکل ۹. منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) برحسب بسامد برای مدل ۳ روی رسان.



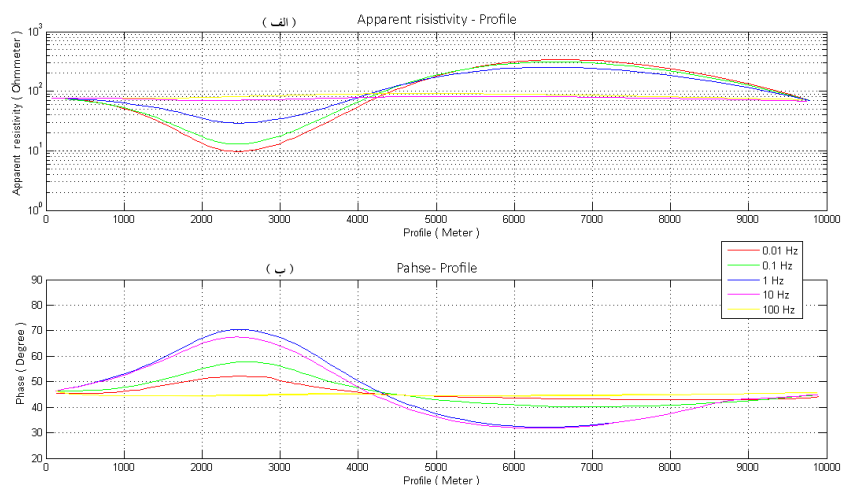
شکل ۱۰. منحنی های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) برحسب بسامد بین دو نابهنجاری.

هم زمان اجرای برنامه نیز کوتاه باشد. پاسخ دو مدل یکسان اما با شبکه بندی متفاوت دقیقاً یکسان نیست و شبکه بندی ظریف تر منجر به پاسخ دقیق تری می شود. با توجه به اینکه شبکه بندی ظریف تر، زمان اجرای برنامه را بیشتر خواهد کرد، در نظر گرفتن شبکه بندی که ضمن به دست آوردن پاسخ مناسب زمان اجرای کوتاهی نیز داشته باشد، بهترین حالت است.

مدل سازی هر نوع مدل دو بُعدی است. در این مورد محدودیتی وجود ندارد و می توان هر نوع نابهنجاری را با شکل های متفاوت مدل سازی کرد. با بزرگ تر در نظر گرفتن مدل (به گونه ای که نابهنجاری از کناره ها دورتر باشد)، پاسخ گد نیز دقیق تر خواهد بود. این کار از طرفی دیگر زمان اجرای برنامه را طولانی تر خواهد کرد. بنابراین لازم است برای هر مدل، مقدار بهینه برای پارامترهای مدل انتخاب شود تا هم پاسخ مدل دقت لازم را داشته باشد، و



شکل ۱۱. منحنی های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) برحسب بسامد روی جسم مقاوم.



شکل ۱۲. منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) در امتداد نیم‌رخ.

منابع

- Brewitt-Taylor, C. R., and Weaver, J. T., 1976, On the finite difference solution of two-dimensional induction problem: *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **47**(2), 375-396
- Jones, F. W., and Pascoe, L. J., 1971. A general computer program to determine the perturbation of alternating electric currents in a two-dimensional model of a region of uniform conductivity with an embedded inhomogeneity: *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **20**, 317- 334.
- Berdichevsky, M. N., and Dmitriev, V. I., 2008, *Models and Methods of Magnetotellurics*, Springer- Verlag Berlin Heidelberg.
- Nabighian, M. N., (Ed), 1991, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics Applications/ Parts A and B*, Society of Exploration Geophysicists.
- Simpson, F., Bahr, K., 2005, *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press.

توانایی مُد TM در شناسایی توده‌های دو بُعدی رسانا نسبت به توده‌های مقاوم و نارسانا بیشتر است. بنابراین مدل‌هایی که در آنها یک نابهنجاری رسانا در یک پیش‌زمینه رسانا قرار دارد، نسبت به مدل‌هایی که در آن یک نابهنجاری نارسانا در یک پیش‌زمینه رسانا قرار دارد، پاسخ بهتری به دست می‌دهند.