

مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان الکترومغناطیس حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه ای

مجید جمیع^{۱*} و سعید میرزایی^۲

۱- دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشیار، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۲۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۲۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: majidjamie@gmail.com

واژگان کلیدی

الکترومغناطیس

پاسخ فرکانسی

چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی

زمین لایه ای

مدل سازی مستقیم

چکیده

مدل سازی مستقیم الکترومغناطیس (EM) با استفاده از چشمه های اولیه متفاوت یکی از راه های درک پیچیدگی توزیع امواج EM در زمین و نیز صحت سنجی تفسیرهای زمین شناسی مرتبط با مدل های به دست آمده از معکوس سازی داده های صحرایی EM است. در این مقاله، از یک برنامه کامپیوتری از پیش نوشته شده در محیط برنامه نویسی فرترن ۷۷ به منظور مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی استفاده شده است؛ به این صورت که با در نظر گرفتن مدل های متفاوتی از زمین لایه ای غیر مغناطیسی همسانگرد دو و سه لایه و تغییر مقادیر مقاومت ویژه و ضخامت لایه ها، مؤلفه های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM، تغییرات فاز و نیز نسبت شدت میدان مغناطیس قائم ثانویه به اولیه (H_z/H_z0) در فرکانس های مختلف، با در نظر گرفتن جریان های جابجایی و نیز نادیده گرفتن جریان های جابجایی برای هر کدام از این مدل ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.

۱- مقدمه

اساس روش‌های الکترومغناطیس (EM) پاسخ ساختارهای زیر سطح زمین نسبت به انتشار میدان‌های EM است. در روابط فیزیک آمده است که نوسانات میدان EM فرستاده شده به داخل زمین باعث به وجود آمدن جریان‌های الکتریکی در زمین شده و این جریان‌ها نیز سبب تولید میدان EM ثانویه می‌شوند؛ اگر زمین همگن و از نظر الکتریکی غیرهادی باشد، اختلاف چگدانی بین میدان EM ارسال شده به زمین و میدان EM ثانویه وجود نخواهد داشت؛ اما اگر زمین غیر همگن باشد، انرژی موج EM در حین گذار به عمق زمین دچار کاهش خواهد شد. با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های میدان EM ثانویه دریافت شده توسط گیرنده اطلاعاتی در ارتباط با مدل زیرسطحی زمین مورد مطالعه به دست خواهد آمد (جمع و همکاران، ۱۳۹۳).

روش‌های اکتشافی EM مختلف از چشمه‌های اولیه متفاوت با منشأ طبیعی و یا ساخته دست بشر به عنوان منبع تولید میدان EM اولیه استفاده می‌کنند. چشمه‌های EM بسته به این که جریان گذرا^۱ یا موج پیوسته تولید کنند در دو حوزه زمان و فرکانس طبقه‌بندی می‌شوند. چشمه‌های متفاوت EM شامل لوپ^۲ یا چشمه‌های خطی در ابعاد متفاوت می‌باشند. عمده‌ترین چشمه‌های مورد استفاده در داده برداری EM بر اساس شکل و هندسه: ۱- دوقطبی مغناطیسی قائم^۳، ۲- دوقطبی مغناطیسی افقی^۴، ۳- دوقطبی الکتریکی افقی^۵ و ۴- دوقطبی الکتریکی قائم^۶ می‌باشند. چشمه‌های دوقطبی خطی و غیرخطی متفاوت در کارهای "جمع و همکاران (۱۳۹۳)"، "Frischknecht, 1967"، "Sinha, 1968 and 1969"، "Fuller and Mallick, 1971"، "Morrison et al., 1969"، "Patra & Mallick, 1972"، "Koefoed et al., 1972"، "Wait, 1972"، "Kaufman & Keller, 1983" و "Kaufman & Keller, 1980"، "Eaton, 2001" معرفی شده‌اند.

محاسبه تئوریک پاسخ امواج EM حاصل از چشمه‌های اولیه متفاوت از زمین، یکی از راه‌های درک پیچیدگی توزیع امواج EM در زمین و نیز صحت‌سنجی تفسیرهای زمین‌شناسی مرتبط با مدل‌های به دست آمده از معکوس‌سازی داده‌های صحرایی EM است. هم‌اکنون الگوریتم‌های متفاوتی برای مدل‌سازی پاسخ فرکانسی میدان EM حاصل از چشمه‌های دوقطبی الکتریکی و مغناطیسی متفاوت با هندسه و موقعیت‌های مکانی گوناگون چشمه و گیرنده در دسترس می‌باشند (Singh & Mogi, Gupta et al., 2006).

الگوریتم ارائه شده توسط "Singh & Mogi (2010)" یک برنامه کامپیوتری نوشته شده در محیط برنامه‌نویسی فرترن ۷۷ است که قادر به محاسبه پاسخ فرکانسی میدان EM برای مرسوم‌ترین چشمه‌های دوقطبی و موقعیت‌های مکانی متفاوت چشمه و گیرنده (در هوا و یا بر روی زمین) با در نظر گرفتن و یا بدون در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی^۷ است. در این مقاله، از برنامه کامپیوتری ارائه شده توسط "Singh & Mogi (2010)" به منظور مدل‌سازی مستقیم پاسخ فرکانسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه‌ای استفاده شده است؛ به این صورت که با در نظر گرفتن مدل‌های متفاوتی از زمین لایه‌ای غیر مغناطیسی همسانگرد دو و سه لایه و تغییر مقادیر مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها، مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM، تغییرات فاز و نیز نسبت شدت میدان مغناطیس قائم ثانویه به اولیه (Hz/Hz0) در فرکانس‌های مختلف، با در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی و نیز نادیده گرفتن جریان‌های جابجایی برای هر کدام از این مدل‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- دوقطبی مغناطیسی افقی

برای فرمول‌بندی پاسخ میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه‌ای در نقطه سنجش، سیستم کارترین (x, y, z) با جهت‌گیری محور z در راستای عمود به سمت پایین به عنوان سیستم مختصات در نظر گرفته شده است. فاکتور زمانی هارمونیک $e^{i\omega t}$ در نظر گرفته شده و از سیستم SI برای واحد کلیه کمیت‌ها استفاده شده است. تراوایی مغناطیسی برای ساختارهای زمین‌شناسی برابر با مقدار آن در فضای آزاد در نظر گرفته می‌شود $(\mu_i (i = 1, 2, \dots, n) = \mu_0)$. هندسه زمین لایه‌ای، موقعیت چشمه و سیستم مختصات مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.

یک لوپ افقی کوچک با جهت‌گیری محور دوقطبی در راستای x و حامل جریان متناوب I و دارای گشتاور دوقطبی m واقع در ارتفاع $z = -h$ بالای سطح زمین لایه‌ای را در صورتی که فاصله آن تا گیرنده بیش از پنج برابر اندازه شعاعش باشد، می‌توان به عنوان چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی در نظر گرفت؛ میدان EM حاصل از این چشمه مشتمل بر مؤلفه‌های دو مد TE و TM است. ترکیب میدان اولیه و ثانویه مابین چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی و زمین برای مدهای TM و TE را می‌توان به ترتیب با روابط (۱) و (۲) نشان داد (Ward & Hohmann, 1988).

$$\vec{A} = A_p e^{-u_0 h} (e^{-u_0 z} + r_{TM} e^{u_0 z}) \quad (1)$$

$$\vec{F} = F_p e^{-u_0 h} (e^{-u_0 z} + r_{TE} e^{u_0 z}) \quad (2)$$

در روابط بالا، $\vec{A}$ و $\vec{F}$ پتانسیل‌های برداری در فضای فوریه؛ A_p

¹ Transient Current

² Loop

³ Vertical Magnetic Dipole

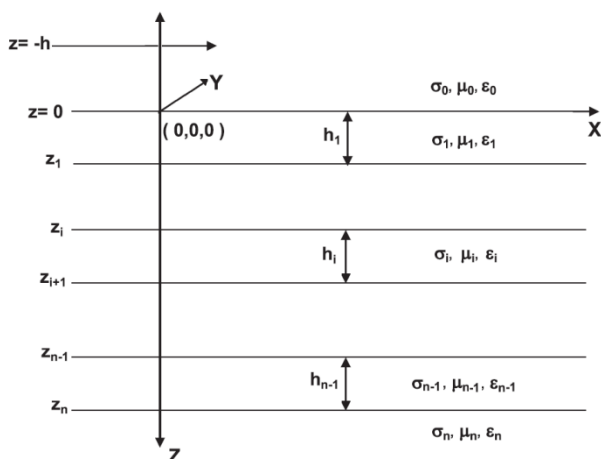
⁴ Horizontal Magnetic Dipole

⁵ Horizontal Electric Dipole

⁶ Vertical Electric Dipole

⁷ Displacement currents

در روابط بالا $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ و J_0 تابع بسل^{۱۰} نوع اول مرتبه صفر است. از آنجایی که در سنجش‌های ژئوفیزیکی با چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی مؤلفه‌های مغناطیسی موج الکترومغناطیس حائز اهمیت می‌باشند، در اینجا با استفاده از جدول ۱ صرفاً روابط مربوط به مؤلفه‌های H_x ، H_y و H_z پاسخ فرکانسی میدان EM از زمین لایه‌ای در فاصله r از چشمه آورده شده‌اند (Ward & Hohmann, 1988).



شکل ۱: هندسه زمین لایه‌ای، موقعیت چشمه و سیستم مختصات مورد استفاده (Ward & Hohmann, 1988).

جدول ۱: مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی موج الکترومغناطیس برای مدهای TE و TM.

مدهای TE	مدهای TM	کمیت
0	$\frac{1}{\hat{y}} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2}$	E_x
$-\frac{\partial F_x}{\partial z}$	$\frac{1}{\hat{y}} \frac{\partial^2 A_x}{\partial y \partial x}$	E_y
$\frac{\partial F_x}{\partial y}$	$\frac{1}{\hat{y}} \frac{\partial^2 A_x}{\partial z \partial x}$	E_z
$\frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 F_x}{\partial x^2}$	0	H_x
$\frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 F_x}{\partial y \partial x}$	$\frac{\partial A_x}{\partial z}$	H_y
$\frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 F_x}{\partial z \partial x}$	$-\frac{\partial A_x}{\partial y}$	H_z

ضریب مد TM و F_p ضریب مد TE است. بعد از گرفتن تبدیل فوریه معکوس از روابط (۱) و (۲) می‌توان آن‌ها را مطابق روابط (۳) و (۴) به صورت تابعی از x و y نشان داد.

در روابط (۳) و (۴)، r_{TE} و r_{TM} ضرایب انعکاس موج EM برای مدهای TE و TM، $u_n = (k_x^2 + k_y^2 - k_n^2)^{1/2}$ ، $k_n^2 = \omega^2 \mu_n \epsilon_n - i\omega \mu_n \sigma_n$ و $(\lambda^2 - k_n^2)^{1/2}$ روابط $r_{TE} \approx \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1}$ و $r_{TM} \approx 1$ تعریف می‌شوند. برای زمین لایه‌ای $\hat{u}_1$ از رابطه (۵) با استفاده از محاسبات عددی و در طی یک فرایند تکراری^۸ با شروع از عمیق‌ترین لایه محاسبه می‌شود.

تبدیل فوریه دوبعدی برای جواب پتانسیل برداری یک چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی خاص با جهت‌گیری محور در راستای x واقع در ارتفاع $z = -h$ بالای سطح زمین و با گشتاور m را می‌توان با رابطه (۶) نشان داد (Ward & Hohmann, 1988)؛ در رابطه (۶) u_x بردار یکه در راستای محور x است.

در صورت وجود چشمه دوقطبی مغناطیسی یا چشمه دوقطبی الکتریکی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند (Ward & Hohmann, 1988)؛ در این روابط اندیس‌های m و e به ترتیب بیانگر وجود چشمه دوقطبی مغناطیسی یا چشمه دوقطبی الکتریکی می‌باشند.

در صورتی که بردارهای A و F صرفاً دارای یک مؤلفه در راستای x باشند، می‌توان آن‌ها را به صورت رابطه (۹) نوشت. در رابطه (۹)، u_x بردار یکه در راستای محور x است و A_x و F_x تابعی برداری^۹ می‌باشند. با جایگذاری رابطه (۹) در روابط (۷) و (۸)، مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی موج EM برای مدهای TE و TM مطابق روابط جدول ۱ به دست خواهند آمد.

چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی دارای یک میدان الکتریکی قائم و نیز یک میدان مغناطیسی قائم است؛ که با جایگذاری رابطه (۶) در فرمول محاسبه مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی قائم موج EM برای مد TE از جدول ۱، به ترتیب مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) بیان می‌شوند (Hohmann & Ward, 1988).

از روابط (۱۰) و (۱۱) ضرایب A_p و F_p موجود در روابط (۱) و (۲) به ترتیب مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شوند. با جایگذاری روابط (۱۲) و (۱۳) به ترتیب در روابط (۳) و (۴)، پتانسیل مابین چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی و زمین برای مدهای TE و TM به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) نوشته خواهند شد. با استفاده از رابطه "Banoes (1966)" ارائه شده در رابطه (۱۶)، می‌توان تبدیل‌های فوریه مضاعف در روابط (۱۴) و (۱۵) را به صورت تبدیلات هنکل روابط (۱۷) و (۱۸) نوشت.

⁸ Iterative process

⁹ Scalar function

¹⁰ Bessel function

جميع و ميرزایی، مدل سازی مستقيم پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان الکترومغناطیسی حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه ای، صفحات ۲۱-۳۱.

$$A = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_p e^{-u_0 h} (e^{-u_0 z} + r_{TM} e^{u_0 z}) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (۳)$$

$$F = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_p e^{-u_0 h} (e^{-u_0 z} + r_{TE} e^{u_0 z}) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (۴)$$

$$\hat{u}_n = u_n \frac{u_{n+1} + u_n \tanh(u_n h_n)}{u_n + u_{n+1} \tanh(u_n h_n)} \quad \text{and} \quad \hat{u}_N = u_N \quad (۵)$$

$$\tilde{F} = \frac{\hat{z}_0 m}{2u_0} e^{-u_0(z+h)} u_x \quad (۶)$$

$$\begin{cases} E_m = -\nabla \times F \\ H_m = -\hat{y}F + \frac{1}{\hat{z}} \nabla(\nabla \cdot F) \end{cases} \quad (۷)$$

$$\begin{cases} E_e = -\hat{z}A + \frac{1}{\hat{y}} \nabla(\nabla \cdot A) \\ H_e = \nabla \times A \end{cases} \quad (۸)$$

$$A = A_x u_x \text{ and } F = F_x u_x \quad (۹)$$

$$\tilde{E}_z^p = \frac{\partial \tilde{F}_x}{\partial y} = ik_y \frac{\hat{z}_0 m}{2u_0} e^{-u_0(z+h)} \quad (۱۰)$$

$$\tilde{H}_z^p = \frac{1}{\hat{z}_0} \frac{\partial^2 \tilde{F}_x}{\partial z \partial x} = -ik_x \frac{m}{2} e^{-u_0(z+h)} \quad (۱۱)$$

$$A_p = -\frac{k_0^2 m}{2u_0} \frac{ik_y}{k_x^2 + k_y^2} \quad (۱۲)$$

$$F_p = -\frac{\hat{z}_0 m}{2} \frac{ik_x}{k_x^2 + k_y^2} \quad (۱۳)$$

$$A(x, y, z) = -\frac{k_0^2 m}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [e^{-u_0(z+h)} + r_{TM} e^{u_0(z-h)}] \frac{ik_y}{u_0(k_x^2 + k_y^2)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (۱۴)$$

$$F(x, y, z) = -\frac{\hat{z}_0 m}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [e^{-u_0(z+h)} + r_{TE} e^{u_0(z-h)}] \frac{ik_x}{k_x^2 + k_y^2} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (۱۵)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x^2 + k_y^2) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y = 2\pi \int_0^{\infty} F(\lambda) \lambda J_0(\lambda r) d\lambda \quad (۱۶)$$

$$A(r, z) = -\frac{k_0^2 m}{4\pi} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^{\infty} [e^{-u_0(z+h)} + r_{TM} e^{u_0(z-h)}] \frac{1}{\lambda u_0} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (۱۷)$$

$$F(r, z) = -\frac{\hat{z}_0 m}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} [e^{-u_0(z+h)} + r_{TE} e^{u_0(z-h)}] \frac{1}{\lambda} J_0(\lambda r) d\lambda \quad (۱۸)$$

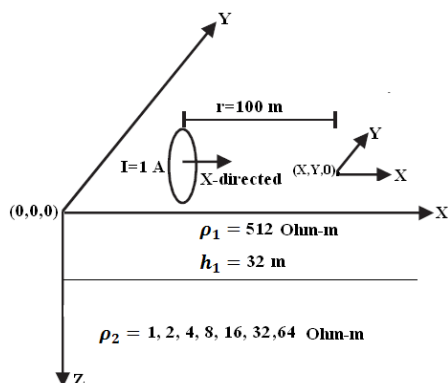
$$H_x = \frac{m}{4\pi} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda(z+h)} - r_{TE} e^{\lambda(z-h)}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (۱۹)$$

$$H_y = \frac{m}{4\pi} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda(z+h)} - r_{TE} e^{\lambda(z-h)}] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (۲۰)$$

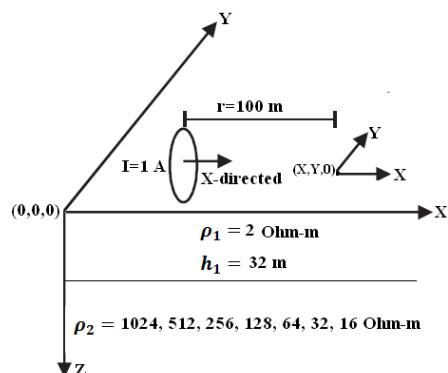
$$H_z = \frac{m}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{\infty} [e^{-\lambda(z+h)} + r_{TE} e^{\lambda(z-h)}] \lambda J_0(\lambda r) d\lambda \quad (۲۱)$$

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۱، ۱۳۹۴.

نظر گرفته شده است. برای مدل اول و دوم مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز برحسب درجه و نیز نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه (H_z/H_z0) نرمال شده با و بدون در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی، در فرکانس‌های متفاوت محاسبه و به ترتیب در اشکال ۴ و ۵ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲: مدل زمین دولایه شامل لایه‌ای مقاوم با مقاومت ویژه ۵۱۲ اهم‌متر و ضخامت ۳۲ متر، واقع بر یک نیم فضا با مقاومت ویژه‌های متفاوت با روند افزایشی ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ اهم‌متر.



شکل ۳: مدل زمین دولایه شامل لایه‌ای کم مقاوم با مقاومت ویژه ۲ اهم‌متر و ضخامت ۳۲ متر، واقع بر یک نیم فضا با مقاومت ویژه‌های متفاوت با روند کاهشی ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲ و ۱۶ اهم‌متر.

همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، با در نظر گرفتن رولایه با مقاومت الکتریکی بیشتر از نیم فضا در مدل شکل ۲، حساسیت مؤلفه‌های حقیقی و موهومی و تغییرات فاز پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی موج EM و نیز بیشینه نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه نرمال شده نسبت به افزایش مقاومت الکتریکی نیم فضا در حالتی که جریان‌های جابجایی در محاسبات لحاظ نشده است (۴.الف، ۴.ب، ۴.پ، ۴.ت) و نیز در حالتی که جریان‌های جابجایی در محاسبات لحاظ شده است (۴.ث، ۴.ج، ۴.چ، ۴.ح) در فرکانس‌های بزرگ‌تر مشاهده می‌شود و برای مقاومت ۶۴

در روابط بالا محاسبات با در نظر گرفتن شرایط شبه استاتیکی^{۱۱} ($k_0^2 \approx 0$) و صرف نظر کردن از مد TM انجام شده است؛ لذا در این روابط λ جایگزین u_0 شده است. در الگوریتم "Singh & Mogi (2010)" محاسبه پاسخ فرکانسی مؤلفه‌های مغناطیسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی با در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی ($50 \text{ KHz} \leq f \leq 1000 \text{ KHz}$) و یا بدون در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی ($f < 50 \text{ KHz}$) با استفاده از فیلترهای دیجیتال "Guptasarma & Singh, 1997" و تبدیلات هنکل انجام می‌شود.

۳- مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی میدان الکترومغناطیسی از زمین لایه‌ای

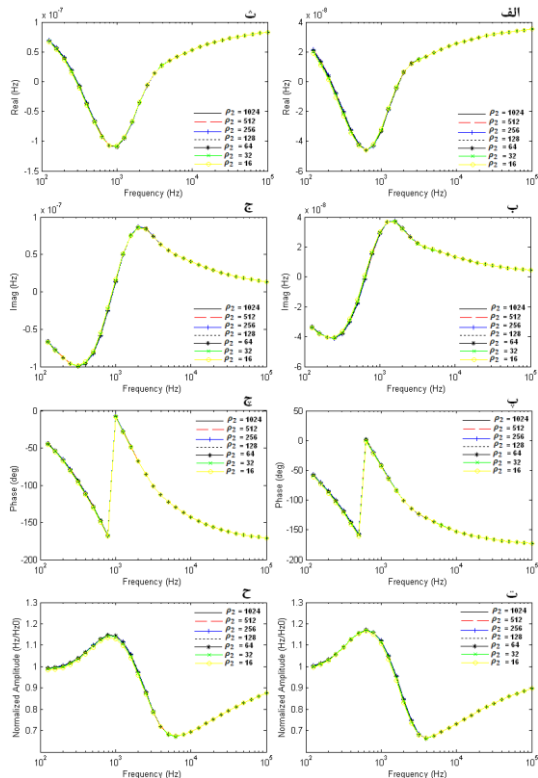
به منظور مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه‌ای، با در نظر گرفتن مدل زمین دو و سه لایه با مقادیر مقاومت ویژه و ضخامت‌های مختلف، مؤلفه‌های حقیقی و موهومی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان EM ثانویه، تغییرات فاز و نیز نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه (H_z/H_z0) در فرکانس‌های متفاوت برای هر کدام از مدل‌ها محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. چشمه یک لوپ حامل جریان متناوب ۱A و ممان دوقطبی $1A \cdot m^2$ واقع در امتداد محور Y با جهت گیری محور دوقطبی در راستای X با فاصله افقی ۱۰۰ متر از گیرنده واقع در صفحه X-Y فرض می‌شود. ارتفاع چشمه و گیرنده از سطح زمین $z=0$ است. بیشینه و کمینه فرکانس‌های مورد استفاده در محاسبات به ترتیب ۱۰۰KHz و ۱۰۰Hz می‌باشند. با فرض تأثیر جریان‌های جابجایی در فرکانس‌های بزرگ‌تر از ۵۰KHz در محاسبات "Fraser et al., 1992"، محاسبه مؤلفه قائم مغناطیسی میدان EM با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی انجام شده است.

۳-۱- مدل‌هایی از زمین دولایه

به منظور بررسی پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین دولایه، محاسبات با در نظر گرفتن دو مدل متفاوت از زمین دو لایه و مشابه مدل‌های استفاده شده توسط جمیع و همکاران (۱۳۹۳) انجام شده است. مدل اول (شکل ۲) شامل لایه‌ای مقاوم با مقاومت ویژه ۵۱۲ اهم‌متر و ضخامت ۳۲ متر، واقع بر یک نیم فضا با مقاومت ویژه‌های متفاوت با روند افزایشی ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ اهم‌متر است. مدل دوم (شکل ۳) شامل لایه‌ای کم مقاوم با مقاومت ویژه ۲ اهم‌متر و ضخامت ۳۲ متر، واقع بر یک نیم فضا با مقادیر مقاومت ویژه متفاوت با روند کاهشی ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲ و ۱۶ اهم‌متر در

^{۱۱} Quasi-Static

جمع و میرزایی، مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان الکترومغناطیس حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه ای، صفحات ۲۱-۳۱.

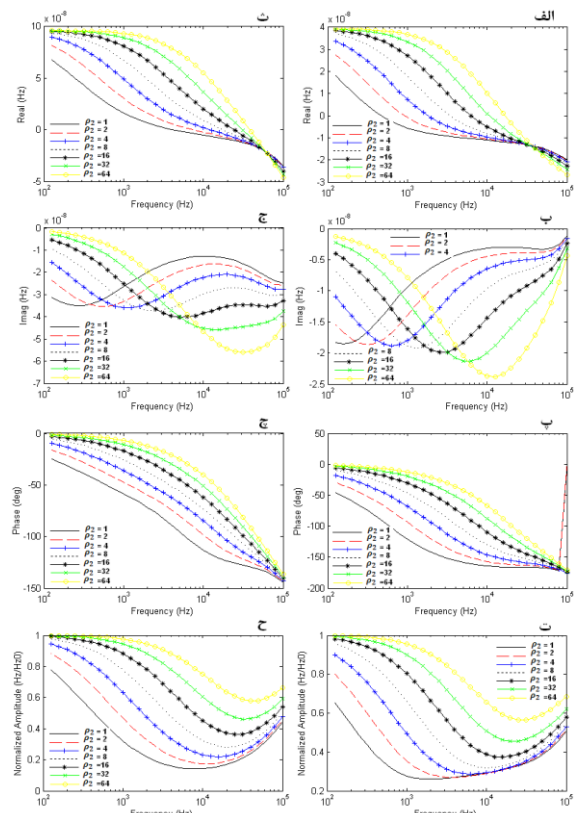


شکل ۵: مؤلفه حقیقی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، مؤلفه موهومی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز پاسخ H_z میدان EM برحسب درجه و نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه (H_z/H_{z0}) نرمال شده برای مدل شکل ۳ بدون در نظر گرفتن جریان های جابجایی (الف، ب، پ، ت) و با در نظر گرفتن جریان های جابجایی (ث، ج، چ، ح).

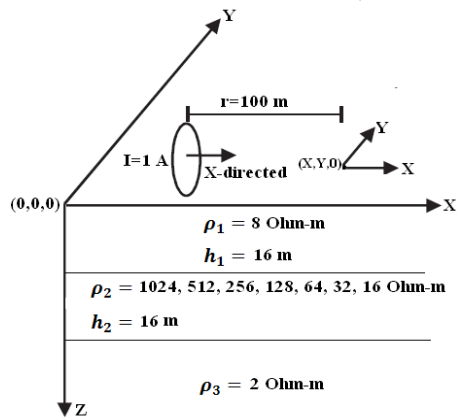
۳-۲- مدل هایی از زمین سه لایه

به منظور بررسی پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین سه لایه، محاسبات با در نظر گرفتن سه مدل متفاوت از زمین سه لایه و مشابه مدل های استفاده شده توسط جمیع و همکاران (۱۳۹۳) انجام شده است. مدل اول (شکل ۶) شامل لایه ای با مقاومت ویژه های متفاوت با روند افزایشی ۰.۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ اهم متر و ضخامت های متناظر با مقادیر مقاومت ویژه ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ متر می شود؛ که مابین رولایه با مقاومت ویژه ۱۲۸ اهم متر و ضخامت ۱۶ متر و یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۵۱۲ اهم متر واقع شده است. مدل دوم (شکل ۷) شامل لایه ای با مقاومت ویژه های متفاوت با روند کاهشی ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲ و ۱۶ اهم متر و ضخامت های متناظر با مقادیر مقاومت ویژه ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ متر می شود که مابین رولایه با مقاومت ویژه ۸ اهم متر و ضخامت ۱۶ متر و یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۲ اهم متر واقع شده است. مدل سوم (شکل ۸) شامل لایه ای با مقاومت ویژه های متفاوت با روند

اهم متر حساسیت این منحنی ها به لایه دوم تقریباً قابل تشخیص نمی باشد؛ از طرفی تفاوت عمده منحنی های شکل ۴ با یکدیگر در دو حالت لحاظ کردن و لحاظ نکردن جریان های جابجایی، سطح انرژی مؤلفه های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM ثانویه است. در شکل ۵ مشاهده می شود با در نظر گرفتن رولایه با مقاومت الکتریکی بسیار کمتر از مقاومت الکتریکی نیم فضا در مدل شکل ۲، حساسیت منحنی های مربوط به مؤلفه های حقیقی و موهومی، تغییرات فاز و نیز بیشینه نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه نرمال شده موج EM نسبت به کاهش مقاومت الکتریکی لایه دوم در حالتی که جریان های جابجایی در محاسبات لحاظ نشده است (الف، ب، ۵.۵، ۵.۵.۵) با منحنی های متناظرشان در حالتی که جریان های جابجایی در محاسبات لحاظ شده است (ث، ۵.۵، ج، ۴.۴ و چ، ۴.۴) تقریباً یکسان بوده و تفاوت عمده آن ها با یکدیگر در سطح انرژی مؤلفه های حقیقی و موهومی و نیز تغییرات فاز پاسخ H_z میدان EM ثانویه است.



شکل ۴: مؤلفه حقیقی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، مؤلفه موهومی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز پاسخ H_z میدان EM برحسب درجه و نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه (H_z/H_{z0}) نرمال شده برای مدل شکل ۲ بدون در نظر گرفتن جریان های جابجایی (الف، ب، پ، ت) و با در نظر گرفتن جریان های جابجایی (ث، ج، چ، ح).

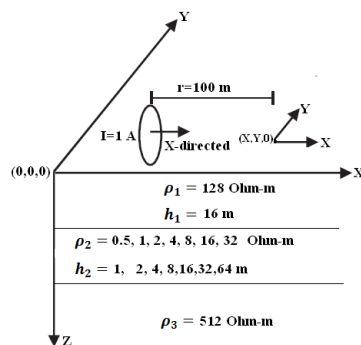


شکل ۸: مدل زمین سه لایه شامل لایه‌ای با مقاومت ویژه‌های متفاوت با روند کاهشی ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲ و ۱۶ اهم‌متر و ضخامت ثابت ۱۶ متر که مابین رولایه با مقاومت ویژه ۸ اهم‌متر و ضخامت ۱۶ متر و یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۲ اهم‌متر واقع شده است.

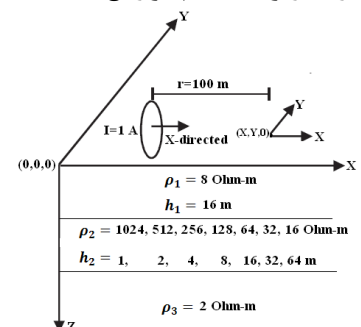
در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با کاهش مقاومت الکتریکی و افزایش همزمان ضخامت لایه دوم در مدل شکل ۷ حساسیت مؤلفه‌های حقیقی و موهومی و تغییرات فاز پاسخ فرکانسی مؤلفه H_z موج EM و نیز بیشینه نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه نرمال شده در تشخیص لایه دوم افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ نتایج حاصل از محاسبه مؤلفه‌های حقیقی و موهومی و تغییرات فاز پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی موج EM و نیز بیشینه نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه نرمال شده برای مدل شکل ۸ (که تنها تفاوت آن با مدل شکل ۷ ثابت بودن ضخامت لایه دوم است) نشان داده شده است؛ همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، با کاهش مقاومت الکتریکی لایه دوم و ثابت نگه‌داشتن ضخامت این لایه مؤلفه‌های مختلف پاسخ فرکانسی میدان مغناطیسی موج EM ثانویه در دو حالت لحاظ کردن و لحاظ نکردن جریان‌های جابجایی در محاسبات تقریباً بدون تغییر می‌مانند. در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ عمده تفاوت قابل‌مشاهده در منحنی‌های مؤلفه‌های مختلف مربوط به هر مدل در دو حالت لحاظ کردن و لحاظ نکردن جریان‌های جابجایی در محاسبات، سطح انرژی مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM ثانویه است.

کاهشی ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲ و ۱۶ اهم‌متر و ضخامت ثابت ۱۶ متر می‌شود که مابین رولایه با مقاومت ویژه ۸ اهم‌متر و ضخامت ۱۶ متر و یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۲ اهم‌متر واقع شده است. برای مدل اول، دوم و سوم مؤلفه‌های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM ثانویه برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز برحسب درجه و نیز نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه (H_z/H_z0) نرمال شده با و بدون در نظر گرفتن جریان‌های جابجایی، در فرکانس‌های متفاوت محاسبه و به ترتیب در اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که در مدل زمین سه لایه شکل ۶ با افزایش همزمان مقاومت الکتریکی و ضخامت لایه دوم از حساسیت مؤلفه‌های حقیقی و موهومی، تغییرات فاز و نیز بیشینه نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه نرمال شده در تشخیص لایه دوم کاسته می‌شود؛ از طرفی برای مقادیر مقاومت الکتریکی ۱۶ اهم‌متر و بزرگ‌تر حساسیت منحنی‌ها به لایه دوم قابل تشخیص نمی‌باشد.

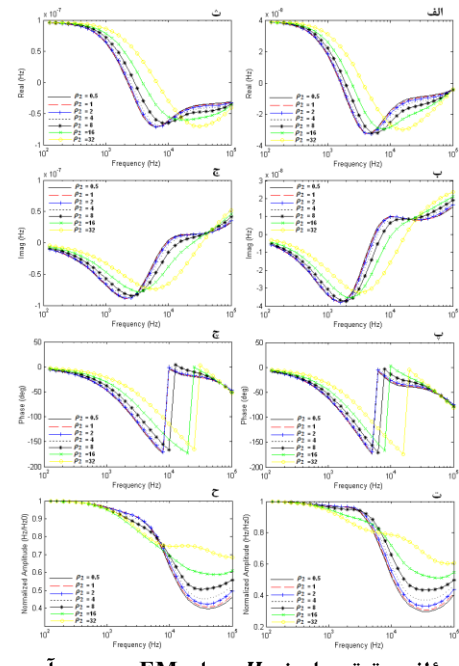
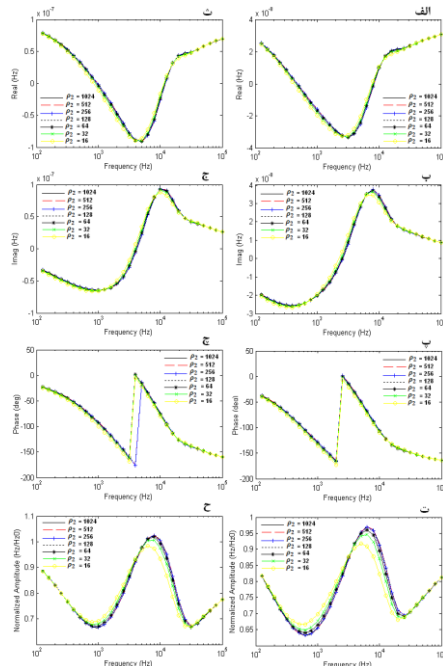


شکل ۶: مدل زمین سه لایه شامل لایه‌ای با مقاومت ویژه‌های متفاوت با روند افزایشی ۰.۵، ۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ اهم‌متر و ضخامت‌های متناظر با مقادیر مقاومت ویژه ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ متر که مابین رولایه با مقاومت ویژه ۱۲۸ اهم‌متر و ضخامت ۱۶ متر و یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۵۱۲ اهم‌متر واقع شده است.



شکل ۷: مدل زمین سه لایه شامل لایه‌ای با مقاومت ویژه‌های متفاوت با روند کاهشی ۱۰۲۴، ۵۱۲، ۲۵۶، ۱۲۸، ۶۴، ۳۲ و ۱۶ اهم‌متر و ضخامت‌های متناظر با مقادیر مقاومت ویژه ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲ و ۶۴ متر که مابین رولایه با مقاومت ویژه ۸ اهم‌متر و ضخامت ۱۶ متر و یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۲ اهم‌متر واقع شده است.

جمع و میرزایی، مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان الکترومغناطیس حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه ای، صفحات ۲۱-۳۱.

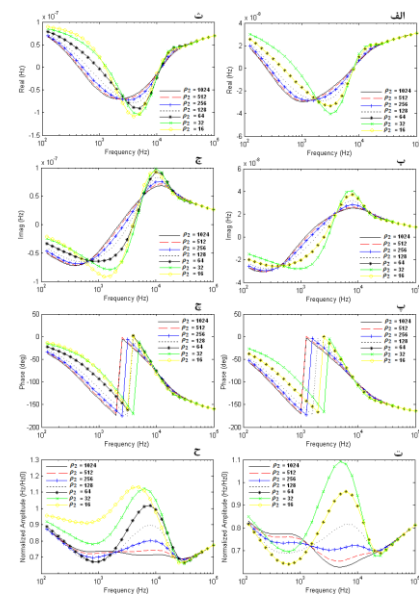


شکل ۹: مؤلفه حقیقی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، مؤلفه موهومی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز پاسخ H_z میدان EM برحسب درجه و نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه ($\frac{H_z}{H_{z0}}$) نرمال شده برای مدل شکل ۸ بدون در نظر گرفتن جریان های جابجایی (الف، ب، پ، ت) و با در نظر گرفتن جریان های جابجایی (ث، ج، چ، ح).

شکل ۱۰: مؤلفه حقیقی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، مؤلفه موهومی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز پاسخ H_z میدان EM برحسب درجه و نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه ($\frac{H_z}{H_{z0}}$) نرمال شده برای مدل شکل ۶ بدون در نظر گرفتن جریان های جابجایی (الف، ب، پ، ت) و با در نظر گرفتن جریان های جابجایی (ث، ج، چ، ح).

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور مدل سازی مستقیم پاسخ فرکانسی مؤلفه قائم مغناطیسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه ای با در نظر گرفتن مدل های متفاوتی از زمین دو و سه لایه با مقادیر مقاومت ویژه و ضخامت های مختلف، مؤلفه های حقیقی و موهومی پاسخ H_z میدان EM، تغییرات فاز و نیز نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه ($\frac{H_z}{H_{z0}}$) نرمال شده با و بدون در نظر گرفتن جریان های جابجایی در فرکانس های متفاوت محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده اند. از طرفی در این مقاله حساسیت پاسخ فرکانسی مؤلفه های مختلف میدان H_z ثانویه به تغییر در خصیصه های فیزیکی (ضخامت و مقاومت الکتریکی) زمین در قالب مدل های مختلف نشان داده شده و در مورد هر یک از آنها بحث شده است. در این مقاله همچنین سعی شده است پاسخ فرکانسی مؤلفه های الکتریکی و مغناطیسی میدان EM حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی افقی از زمین لایه ای به صورت مبسوط فرمول بندی شود تا خواننده جهت فهم روابط و فرمول ها نیازی به مطالعه مقالات و کتاب های مرجع متفاوت در این زمینه نداشته باشد. مدل های ارائه شده در این مقاله می توانند جهت درک پیچیدگی توزیع امواج EM در زمین به منظور حل مسئله مدل سازی معکوس داده های EM و نیز



شکل ۱۱: مؤلفه حقیقی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، مؤلفه موهومی پاسخ H_z میدان EM برحسب آمپر بر متر، تغییرات فاز پاسخ H_z میدان EM برحسب درجه و نسبت شدت میدان مغناطیسی قائم ثانویه به اولیه ($\frac{H_z}{H_{z0}}$) نرمال شده برای مدل شکل ۷ بدون در نظر گرفتن جریان های جابجایی (الف، ب، پ، ت) و با در نظر گرفتن جریان های جابجایی (ث، ج، چ، ح).

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۱، ۱۳۹۴.

filters for Hankel J0 and J1 transforms, Geophysical Prospecting, 45, 745-762.

Kaufman, A.A. and Eaton, P.A., 2001, The Theory of Inductive Prospecting, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Kaufman, A.A. and Keller, G.V., 1983, Frequency And Transient Soundings, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Koefoed, O., Ghosh, D.P. and Palman, G.J., 1972, Computation of type curves for electromagnetic depth sounding with a horizontal transmitting coil by means of a digital linear filter, Geophysical Prospecting, 20, 406-420.

Mallick, K., 1971, Electromagnetic response of a layered transitional earth infinite cable, Pure and Applied Geophysics, 83, 102-110.

Morrison, H.F., Phillips, R.J. and O'Brien, D.P., 1969, Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half-space, Geophysical Prospecting, 21, 1-20.

Patra, H.P. and Mallick, K., 1980, Geo-Sounding Principles-2, Elsevier Science Publication Company, Amsterdam.

Singh, N.P. and Mogi, T., 2010, EMDPLER: A F77 program for modeling the EM response of dipolar sources over the non-magnetic layer earth models, Computers and Geosciences, 36, 430-440.

Sinha, A.K., 1968, Electromagnetic field of an oscillating magnetic dipole over an anisotropic earth, Geophysics, 33, 346-353.

Sinha, A.K., 1969, Vertical electric dipole over an inhomogeneous and anisotropic earth, Pure and Applied Geophysics, 72, 123-147.

Sinha, A.K. and Bhattacharyya, P.K., 1967, Electric dipole over an anisotropic and inhomogeneous earth, Geophysics, 32, 652-667.

Ward, S.H. and Hohmann, G.W., 1988, Electromagnetic Theory for Geophysical Applications, In: Nabighian, M.N., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 131-311.

صحت‌سنجی تفسیرهای زمین‌شناسی مرتبط با مدل‌های به‌دست‌آمده از معکوس‌سازی داده‌های صحرایی EM توسط محققین علوم زمین به کار روند.

۵- منابع

جميع، م.، میرزایی، س. و یاسمی خیابانی، س.، ۱۳۹۳، مدل‌سازی مستقیم پاسخ فرکانسی میدان الکترومغناطیس حاصل از چشمه دوقطبی مغناطیسی قائم از زمین لایه‌ای، مجله زمین‌شناسی ایران، ۲۹، ۱۲۱-۱۳۱.

Anderson, W.L., 1979, Numerical integration of related Hankel transforms of order 0 and 1 by adaptive digital filtering, Geophysics, 44, 1287-1305.

Anderson, W.L., 1982, Fast HTs using related and lagged convolution, ACM Transactions on Mathematical Software, 8, 344-368.

Bannoos, A., 1966, Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half-Space, Pergamon Press.

Frischknecht, F.C., 1967, Fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth and application to ground and airborne electromagnetic surveys, Quarterly of the Colorado School of Mines, 62, 1-326.

Fuller, J.A. and Wait, J.R., 1972, High frequency electromagnetic coupling between small coplanar loops over an inhomogeneous ground, Geophysics, 37, 997-1004.

Fraser, D.C., Stodt, J.A. and Ward, S.H., 1992, The effect of displacement current on the response of a high frequency electromagnetic system, In: Ward, S.H., Geo-Technical and Environmental Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 89-95.

Gupta, P.K., Niwas, S. and Chaudhary, N., 2006, Fast computation of Hankel transform using orthonormal exponential approximation of complex kernel functions, Journal of Earth System Sciences, 115, 267-276.

Guptasarma, D. and Singh, B., 1997, New digital linear



Forward Modeling of Frequency-Domain Response of the Vertical Magnetic Component of Electromagnetic Field from Horizontal Magnetic Dipole Source over Layered Earth Models

Majid Jamie^{1*} and Saeid Mirzaei²

1- Ph.D. Student, ACECR-Research Institute of Applied Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, ACECR-Research Institute of Applied Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 20 November 2015; Accepted: 14 January 2016

Corresponding author: majidjamie@gmail.com

Keywords

Electromagnetic (EM) field
Forward modeling
Dipole source
Horizontal magnetic dipole
Vertical magnetic component
Displacement currents
Layered earth

Extended Abstract

Summary

Geo-electromagnetic (EM) forward modeling is a scientific accepted tool for understanding complex behavior of EM wave in the earth, and can be used for the purpose of inverse modeling, and also, for evaluation of geological interpretations based on EM field measurements. There are different EM forward modeling programs, which are capable of computing responses of electric and magnetic components of the EM field, generated from different dipole sources with variable source-receiver configurations. In this paper, an

available forward modeling algorithm, coded in Fortran 77 and called "EMDPLER", is used for computing frequency domain response of the vertical magnetic component of the EM field, generated from a horizontal magnetic dipole source over different one-dimensional (1-D) layered Earth models. Thus, by conducting the forward modeling code on different 2- and 3-layer earth models with different resistivity and thickness values, real and imaginary parts of vertical component of the secondary magnetic field (H_z), its phase variations, and normalized amplitude of the ratio of secondary to primary component of the vertical magnetic field (H_z/H_{z0}) in case of considering/ignoring the displacement currents, are calculated and plotted as a function of frequency.

Introduction

Considering EM primary source, EM methods are divided into two groups: 1. EM methods with natural sources that incorporate natural electric and magnetic fields of the earth, and 2. EM methods that incorporate man-made sources. The man-made EM sources, which transmit either transient currents or continuous sinusoidal waves, have variable physical, electronic and geometric specifications. In EM-geophysics, continuous sinusoidal wave transmitters are known as frequency domain EM (FDEM) sources. Based on geometry and shape, FDEM sources are categorized into four common types: 1. vertical magnetic dipole (VMD), 2. horizontal magnetic dipole (HMD), 3. vertical electric dipole (VED) and 4. horizontal electric dipole (HED). A horizontal transmitting loop or a small vertical transmitting loop of wire that carries alternating current, if distance to observation point is five times greater than length of the loop radius, can be treated as HMD or VMD source, respectively. A source, consisting of a short wire and carrying an alternating current, can be treated as an electric dipole, if the distance to the observation point is at least five times greater than the cable length. For a FDEM source that generates EM field only in transverse magnetic (TM) mode, e.g. a vertical electric dipole, the tangential magnetic field at the earth surface is double the primary field, while the tangential electric field is zero and the earth appears to be a perfect conductor; hence, in practical geophysics only dipole sources that generate primary EM field in transverse electric (TE) and/or TE and TM modes simultaneously, are used as transmitter. In recent years, electronic and software developments in designing EM instruments have resulted in gathering more reliable field datasets, but despite to many successful progresses in the area of forward modeling and inversion of the EM geophysics, it is still a challenging and interesting area of work for the geophysicists. At present, there are different EM forward modeling programs, e.g. EMDPLER which is capable of computing response of electric and magnetic components of the EM field, generated from the most common dipole sources with variable source-receiver configurations.

Methodology and Approaches

In this paper, by considering a Cartesian system (x,y,z) with vertically downward directed z-axis and an x-directed HMD carrying an alternating current (I) and the dipole moment $\mathbf{m}$, frequency response of magnetic components of EM field from an isotropic non-magnetic layered earth in observation point is thoroughly formulated in SI units. Moreover,

an FDEM forward modeling algorithm, coded in Fortran 77 and called “EMDPLER”, is used for computing frequency domain response of the H_z components of the EM field from different 1-D layered earth models. Computations of this program are performed by assuming variable transmitter-receiver configurations and considering displacement currents in the frequency range ($50 \text{ KHz} \leq f \leq 1000 \text{ KHz}$) or ignoring the displacement currents for frequencies less than 50 KHz, using digital linear filters based on the Hankel transforms.

Results and Conclusions

In this paper, by referring to scientific references, frequency response of the magnetic components of EM field, generated from an HMD source, from an isotropic non-magnetic layered earth in observation point is concisely formulated. Moreover, by conducting the EMDPLER forward modeling code on different 2- and 3-layer earth models with different resistivity and thickness values, real and imaginary parts of vertical component of the secondary magnetic field (H_z), its phase variations, and normalized amplitude of the ratio of secondary to primary component of the vertical magnetic field (H_z/H_{z0}) in case of considering/ignoring the displacement currents, are calculated and plotted as a function of frequency. This paper can provide geophysicists with the idea of computing other magnetic components of the secondary EM field in the case of layered earth models, and also, 1-D inversion of these components. Moreover, the results of the present paper would guide geoscientists for better geological interpretation of the models based on the EM field measurements.
