

تخمین میزان جابه‌جایی ایستا در داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از تانسور مغناطیسی افقی

احسان لیمپوررجهرمی^۱، بنفشه حبیبیان دهکردی^{۲*} و بهروز اسکوئی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۷/۸/۱۹، پذیرش نهایی: ۹۸/۲/۲۴)

چکیده

تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک در حضور اعوجاج‌های گالوانی ناشی از ساختارهای کوچک مقیاس نزدیک سطحی می‌تواند به نتایج نادرست منجر شود. ساده‌ترین شکل ظهور این اعوجاج‌ها درحالی‌که فقط به تغییر دامنه میدان‌های الکتریکی محدود می‌شوند، جابه‌جایی قائم منحنی‌های مقاومت‌ویژه ظاهری یا همان پدیده جابه‌جایی ایستا (static shift) است؛ که مقدار آن تنها با استفاده از داده‌های تانسور امپدانس قابل محاسبه نیست و در واقع جزء بخش‌های غیرقابل تعیین ماتریس اعوجاج است. در این تحقیق از توابع تبدیل ژئومغناطیسی (تیبیر و داده‌های مغناطیسی افقی) برای برآورد نسبی میزان این جابه‌جایی و بازیافت مقاومت‌ویژه ظاهری معوج نشده یا منطقه‌ای مود TE بر اساس قانون القاء فاراده استفاده شده است. با لحاظ کردن تغییرات افقی مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی، روش مورد نظر بر روی دو مدل مصنوعی اعمال شده است. به دو روش محاسباتی مختلف، اغتشاشات ناشی از ساختارهای کوچک مقیاس سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و به مدل‌های مورد استفاده اضافه شدند. نتایج به‌دست آمده، مؤید دقیق‌تر بودن میزان جابه‌جایی برآورد شده نسبت به حالتی است که از توابع تبدیل مغناطیسی افقی صرف‌نظر و تنها توابع تبدیل مغناطیسی قائم مد نظر قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: مگنتوتلوریک، توابع تبدیل، جابه‌جایی ایستا.

۱. مقدمه

دارد، استفاده می‌شوند. مجموعه کامل توابع تبدیل شامل تانسور امپدانس محلی $[Z]$ ، بردار تیپر محلی $[W]$ و پاسخ مغناطیسی بین ایستگاهی $[M^a]$ هستند:

$$\begin{cases} E = ZH \\ \rho = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z|^2 \\ \varphi = \tan^{-1} \left| \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} \right| \end{cases} \quad (1)$$

$$H_z = [T]H_\tau = T_x H_x + T_y H_y \quad (2)$$

$$H(r) - H(r_B) = M^a(r, r_B)H(r_B) \quad (3)$$

در این روابط E و H میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، r و r_B مختصات ایستگاه‌های مشاهده و مرجع و I ماتریس همانی است. با توجه به روابط بالا، تانسور امپدانس به‌صورت رابطه خطی بین مؤلفه‌های افقی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بیان می‌شود، بردار تیپر معرف نسبت مؤلفه‌های عمودی و افقی میدان مغناطیسی است و

روش مگنتوتلوریک یک روش ژئوفیزیکی-الکترومغناطیسی با چشمه طبیعی است، که در آن با اندازه‌گیری افت و خیزهای طبیعی میدان‌های الکترومغناطیسی روی سطح زمین، توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح به‌دست می‌آید. روش مگنتوتلوریک کاربرد وسیعی در اکتشاف منابع زیرزمینی شامل میدان‌های زمین‌گرمایی، مخازن نفت و گاز، آب‌های زیرزمینی، کانسارهای معدنی و نیز شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی دارد. به‌دلیل پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه‌های مختلف (برداشت و پردازش داده‌ها، تحلیل، مدل‌سازی و تفسیر) این کاربرد به‌سرعت در حال افزایش است (وزوف، ۱۹۷۲).

روابط بین مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی توابع تبدیل نامیده می‌شوند و برای استنباط رسانایی زمین در بازه عمقی که بستگی به محدوده فرکانسی به کار رفته

عمیق نمی‌باشد، درحالی‌که مود TE دقت بیشتری در تقریب دوبعدی ساختارهای مقاوم و حساسیت بالاتری به ساختارهای عمیق دارد، اما با در نظر گرفتن آن بروز خطاهای قابل توجه در تقریب دوبعدی ساختارهای رسانای سه‌بعدی کاملاً محتمل است.

اساس مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک، بر پاسخ‌های القایی استوار است. اما اثرات غیر القایی (گالوانی) که ناشی از تجمع بار در ناپیوستگی‌ها هستند، توابع پاسخ مگنتوتلوریک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جابه‌جایی ایستا، زیرمجموعه‌ای از پدیده‌های اعوجاج گالوانی محلی و یک عامل عددی مستقل از فرکانس است (بردیچوسکی و دیمتریف، ۲۰۰۸). جابه‌جایی ایستا بخش غیر قابل تعیین مدل‌های تجزیه را تشکیل می‌دهد و با روش‌های ریاضی محض قابل جداسازی نیست. جابه‌جایی ایستا به علت حضور ناهمگنی‌های کوچک مقیاس نزدیک سطحی و به‌صورت یک جابه‌جایی قائم با ضریب ثابتی در منحنی‌های مقاومت‌ویژه ظاهری ایجاد می‌شود، در حالی‌که تقریباً هیچ تغییری در منحنی‌های فاز به وجود نمی‌آید، و مقدار جابه‌جایی در هر سایت دارای مقدار متفاوتی است. به دلیل شرایط مرزی حاکم بر مؤلفه‌های مختلف میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، پدیده تجمع بار روی مرز ناپیوستگی‌ها و بنابراین جابه‌جایی ایستای منحنی‌های مقاومت‌ویژه ظاهری در حالت دوبعدی تنها مود TM را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط، می‌توان از اطلاعات موجود در مود TE (داده‌های فاز امپدانس، تیپر و تانسور مغناطیسی افقی) که مستقل از این پدیده هستند استفاده کرد. ضمناً داده‌های تانسور مغناطیسی افقی، تفکیک عمقی توده‌های رسانا را بهبود می‌دهند و اطلاعات قابل‌اعتمادتری از سازنده‌های عمیق را نسبت به داده‌های تیپر فراهم می‌آورند و به‌نظر می‌رسد دقت بیشتری در تصویر کردن رسانایی‌ها دارند. ولی تفکیک بالاتر مرزهای جانبی از طریق وارون‌سازی داده‌های تیپر به‌دست می‌آید (حیبیان و اسکوئی، ۲۰۱۴). توابع پاسخ مغناطیسی دارای این مزیت مهم هستند که

تانسور مغناطیسی افقی M نیز، بیانگر رابطه خطی بین مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی در دو ایستگاه مینا و مشاهده در حوزه فرکانس است. توابع تبدیل مغناطیسی افقی دارای سه ویژگی مهم هستند: تحت تأثیر اعوجاج‌های گالوانی قرار نمی‌گیرند؛ در بازه پریودی وسیع‌تری نسبت به تیپر می‌توان آنها را با دقت قابل قبول تخمین زد؛ بر روی مرکز توده‌های رسانا دارای مقدار بیشینه هستند (در حالی‌که مقدار تیپر کوچک و بنابراین ناپایدار است) (وارنتسوف و همکاران، ۲۰۰۵).

برای یک ساختار دوبعدی در دستگاه مختصاتی که محور X آن منطبق بر راستای روند ساختار مورد نظر است، تانسور امپدانس به شکل ساده شده زیر در می‌آید:

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & Z_{TE} \\ Z_{TM} & 0 \end{pmatrix} \quad (۴)$$

که در مود TE جریان الکتریکی به موازات روند ساختار و مؤلفه مغناطیسی متناظر با آن در جهت عمود بر روند ساختار؛ و در مود TM جریان الکتریکی در صفحه عمود بر روند ساختار و مؤلفه مغناطیسی متناظر با آن به موازات روند ساختار در نظر گرفته می‌شود. بردیچوسکی و همکاران (۱۹۹۸) بررسی هر دو مود TE و TM را در مراحل گوناگون تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک ضروری دانستند و با استفاده از مدل‌های مصنوعی متعدد به بررسی پاسخ‌های حاصل از مدل‌ها و مقایسه فاز و مقاومت‌ویژه در مودهای TE و TM پرداخته و نشان دادند که مود TM حساسیت بیشتری به ساختارهای نزدیک سطح و همچنین سنگ کره مقاوم دارد؛ در حالی‌که حساسیت مود TE به زون‌های رسانای عمیق بیشتر است. مود TM همچنین مقاومت بیشتری در برابر اثرات سه‌بعدی تولید شده به‌وسیله ساختارهای رسانا دارد؛ درحالی‌که مود TE در برابر اثرات سه‌بعدی ناشی از ساختارهای با مقاومت‌ویژه بالا، مقاوم‌تر است. در مجموع مود TM دقت بیشتری در تقریب دوبعدی ساختارهای رسانا و حساسیت بیشتری به ساختارهای نزدیک سطح و همچنین سنگ کره مقاوم زمین و گسل‌های عمیق دارد و تحت تأثیر ساختارهای

که $\langle T_y \rangle$ و $\langle Z_{xy} \rangle$ معرف مقادیر میانگین پارامترهای مرتبط روی حوزه انتگرال‌گیری هستند.

مراحل فوق توسط لدو و همکاران (۲۰۰۲) انجام شد؛ ولی آن‌ها برای ادامه کار، از تغییرات افقی مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی در رابطه (۸) صرف‌نظر کردند.

از آنجایی که دامنه مطلق امیدانس را نمی‌توان از پارامترهای اعوجاج تفکیک کرد، میزان مطلق جابه‌جایی ایستا از طریق روش‌های ریاضی قابل تعیین نیست؛ بلکه تخمین آن صرفاً به صورت نسبی امکان‌پذیر و مستلزم انتخاب ایستگاه مرجعی است که کمترین میزان اعوجاج را دارا باشد. لازمه تصحیح جابه‌جایی ایستا با در نظر گرفتن تغییر افقی مؤلفه افقی میدان مغناطیسی، در اختیار داشتن داده‌های مگنتوتلوریک در قالب یک آرایه است، به طوری که مؤلفه‌های میدان در همه ایستگاه‌ها به صورت هم‌زمان برداشت شده باشند و امکان محاسبه تغییرات میدان در قالب توابع تبدیل مغناطیسی افقی فراهم باشد. در این صورت با در نظر گرفتن دو ایستگاه متوالی z و $z-1$ ، امیدانس در ایستگاه z به شکل تابعی از امیدانس در ایستگاه $z-1$ و نیز تیپر و تغییرات افقی میدان در دو ایستگاه بیان می‌شود:

$$Z_j = \frac{\frac{i\omega\mu\Delta y}{2}(T_j + T_{j-1}) + \left(1 - \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)^{1/2}\right) Z_{j-1}}{1 + \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)^{1/2}} \quad (9)$$

تا اینجا همه توابع از نوع منطقه‌ای تأثیر ناپذیر از اعوجاج گالوانی در نظر گرفته شده‌اند. در غیر این صورت رابطه بین امیدانس‌های معوج شده Z^m و منطقه‌ای Z ، یک پارامتر حقیقی مستقل از فرکانس (a) یا همان ضریب جابه‌جایی ایستاست. یادآوری این نکته ضروری است که در اینجا از سایر انواع اعوجاج (ناهمسانگردی، پیچش و برش) که به طور کلی می‌توانند وجود داشته باشند (گروم و بیلی، ۱۹۸۹)، صرف‌نظر شده است.

$$\frac{Z_j^m}{a_j} = \frac{\frac{i\omega\mu\Delta y}{2}(T_j + T_{j-1})}{1 + \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)^{1/2}} + \frac{\left(1 - \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)^{1/2}\right) Z_{j-1}^m}{1 + \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)^{1/2}} \quad (10)$$

تحت تأثیر اعوجاج گالوانی میدان‌های الکتریکی قرار نمی‌گیرند و استفاده از آنها در رویه مدلسازی داده‌های مگنتوتلوریک به بهبود نتایج کمک می‌کند (وارنتسوف و همکاران، ۲۰۰۵). لدو و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که از داده‌های تیپر (تابع تبدیل مغناطیسی قائم) می‌توان برای تخمین جابه‌جایی ایستای موجود در داده‌های مگنتوتلوریک، در صورتی که تغییرات افقی مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی قابل صرف‌نظر کردن باشند، استفاده کرد. فرض در نظر گرفته شده ممکن است در مدل‌های پیچیده نقض شود. در اینجا با لحاظ کردن این تغییرات یا به عبارت دیگر با در نظر گرفتن توابع تبدیل مغناطیسی افقی همراه با تیپر، روابط بسط داده شده‌ای برای تخمین میزان جابه‌جایی ایستا به دست می‌آیند. سپس با در نظر گرفتن دو مدل مصنوعی و شبیه‌سازی جابه‌جایی ایستا به دو روش مختلف تحلیلی و مدل‌سازی برای آنها، دقت تخمین‌های انجام شده در دو حالت (بدون در نظر گرفتن توابع مغناطیسی افقی و با در نظر گرفتن آن) مقایسه می‌شود.

۲. چگونگی تخمین پارامترهای اعوجاج

با در نظر گرفتن وابستگی زمانی نمایی برای میدان‌های الکترومغناطیسی، طبق قانون القاء فارادی در حوزه فرکانس داریم:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} \quad (5)$$

اگر راستای روند ساختار دوبعدی در امتداد محور x فرض شود، معادله (۵) برای مود TE به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu H_z \quad (6)$$

و با جایگذاری $E_x = Z_{xy}H_y$ و $H_z = T_yH_y$ به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{\partial Z_{xy}}{\partial y} + \frac{Z_{xy}}{H_y} \frac{\partial H_y}{\partial y} = i\omega\mu T_y \quad (7)$$

سپس با انتگرال‌گیری، رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$\Delta Z_{xy} = i\omega\mu \langle T_y \rangle \Delta y - \langle Z_{xy} \rangle \Delta (\ln(H_y)) \quad (8)$$

در شکل ۱ نمایش داده شده است. این مدل شامل ۱۳ ساختار رسانای ۵ و ۱۰ اهمتری در ابعاد و عمق‌های مختلف است. در مجموع ۳۰ ایستگاه اندازه‌گیری با فاصله ۳ کیلومتر از هم و ۲۶ پیروید در بازه ۰٫۰۱ تا ۱۰۰۰ ثانیه برای محاسبه پاسخ‌های مدل مورد استفاده قرار گرفتند. ایستگاه مبنا که برای محاسبه توابع تبدیل بین ایستگاهی مورد نیاز است، دور از ناهمگنی و در منتهی‌الیه سمت راست مدل واقع بر یک ساختار دقیقاً یک بعدی در فاصله ۲۸ کیلومتری از ایستگاه آخر در نظر گرفته شده است. مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از مدل‌سازی پیشرو دوبعدی به کمک الگوریتم ارائه شده توسط سیریپورن و اراپورن و اگبرت (۲۰۰۰) انجام شد؛ این کد توسط زویبر (۲۰۰۲) به شکلی بسط داده شده است که توابع پاسخ مغناطیسی افقی را نیز در بر بگیرد.

برای اضافه کردن اغتشاشات تلوریکی به صورت کلی‌تر (نه فقط به صورت جابه‌جایی ایستا) از روش ارائه شده توسط گروم و بیلی (۱۹۸۹) استفاده می‌کنیم. مبنای این روش، فرض وجود ساختار هدف منطقه‌ای دوبعدی است که تحت تأثیر اعوجاج‌های گالوانی ناشی از ناهمگنی‌های سطحی با ابعاد کوچک واقع شده است. تجزیه تانسور امیدانس مگنتوتلوریکی در قالب بخش‌های قابل تعیین و غیر قابل تعیین انجام می‌شود. رابطه بین امیدانس دوبعدی منطقه‌ای در سیستم روند ساختار Z_{2D} و امیدانس اندازه‌گیری شده $Z_{measured}$ با احتساب اثر اعوجاج به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z_{measured} = \beta_{\alpha} C Z_{2D} \beta_{\alpha}^T \quad (15)$$

در این رابطه β ماتریس چرخش و α زاویه استرایک ساختار دوبعدی است. ماتریس C با ابعاد 2×2 بیانگر اثر اعوجاج است. برای به دست آوردن پاسخ‌های آشفته، مؤلفه‌های ماتریس اعوجاج به صورت زیر انتخاب و در امیدانس دوبعدی منطقه‌ای حاصل از مدل مصنوعی ضرب شدند (مک نیس و جونز، ۲۰۰۱). بهره سایت (gain site: g) با یک فاکتور تصادفی در بازه

ضمناً رابطه‌ای که به صورت مشابه و با چشم پوشی از تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی حاصل می‌شود، به صورت زیر است:

$$\frac{Z_j^m}{a_j} \cong \frac{Z_{j-1}^m}{a_{j-1}} + i\omega\mu \frac{\Delta y}{2} (T_j + T_{j-1}) \quad (11)$$

با اعمال تغییر متغیرهای زیر:

$$\begin{cases} \zeta(\omega) = \frac{\left(2 + \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)\right) Z_j^m}{i\omega\mu\Delta y (T_j + T_{j-1})} \\ \psi(\omega) = \frac{\left(2 - \ln\left(\frac{M_{yyj-1}}{M_{yyj}}\right)\right) Z_{j-1}^m}{i\omega\mu\Delta y (T_j + T_{j-1})} \end{cases} \quad (12)$$

به رابطه (۱۳) می‌رسیم که معرف یک خط مستقیم در فضای $\psi - \zeta$ است:

$$\zeta(\omega) = \frac{a_j}{a_{j-1}} \psi(\omega) + a_j \quad (13)$$

به این ترتیب تعیین پارامترهای اعوجاج به یک مسئله برازش خطی تبدیل می‌شود.

رویه حل مسئله به این صورت است که ابتدا مجموعه‌ای از نقاط که محدوده فرکانسی مختلفی را می‌پوشانند انتخاب شده و از این لحاظ که در امتداد یک خط مستقیم در فضای $\psi - \zeta$ به چه میزان قابل توصیف هستند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. به این منظور، شاخص همبستگی و پارامتر باقی مانده ϵ که معیاری برای دقت تقریب به کار رفته است، مورد توجه قرار می‌گیرند.

$$\epsilon = \frac{\langle Z \rangle \Delta \ln Myy}{i\omega\mu\Delta y (T_j + T_{j-1})/2} \cong \frac{\Delta \ln Myy}{\Delta \ln Myy + \Delta Z / \langle Z \rangle} \approx \left(1 + \frac{\Delta \ln Z}{\Delta \ln Myy}\right)^{-1} \quad (14)$$

معیارهای انتخاب پارامترهای اعوجاج، شاخص همبستگی بالا، مقدار باقی مانده پایین و مثبت بودن پارامتر اعوجاج (a) در معادله (۱۴) است (لدو و همکاران، ۲۰۰۲).

۳. مدل‌های مصنوعی

۳-۱. طراحی مدل اول

اولین مدل مقاومت‌ویژه در نظر گرفته شده، برگرفته از مدل به کار رفته توسط لدو و همکاران (۲۰۰۲) است که

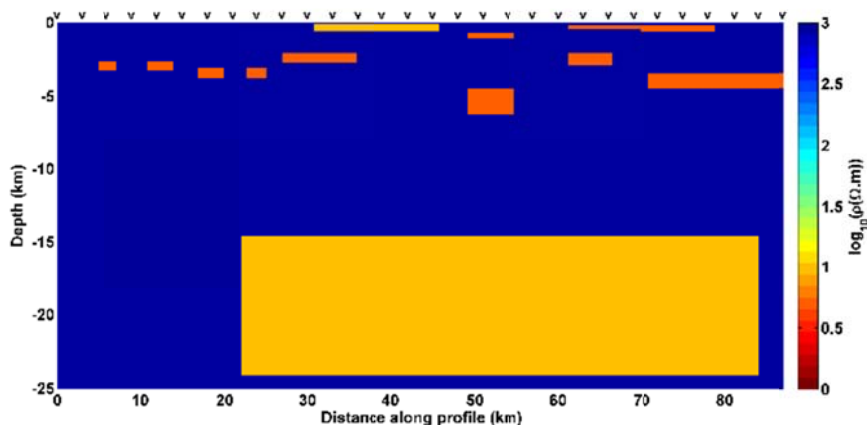
همکاران، ۲۰۰۹) استفاده می‌کنیم که اساس آن بر ناوردهای چرخشی WAL، به‌عنوان معیاری برای تحلیل بعدیت (Dimensionality Analysis) داده‌های MT، استوار است. نتایج به‌دست آمده که در شکل ۲ ارائه شده‌اند، نشان می‌دهند که داده‌ها به‌خوبی از اعوجاج‌های تلوریکی اضافه‌شده به کمک تانسور اعوجاج، متأثر شده‌اند. همچنین در شکل ۳، فاز و مقاومت ویژه مدهای TE و TM در ایستگاه‌های مختلف بعد از اضافه کردن اغتشاشات تلوریکی مقایسه شده‌اند.

با یک فاکتور (a) ناهمسانگردی، زاویه پیچش (T) با تصادفی در بازه (۲/۱۷۲ و -۲/۱۷۲)، زاویه برش (S) نیز با یک فاکتور تصادفی در بازه (۳/۰۶ و -۳/۰۶) درجه و (۱۰ درجه در نظر گرفته شدند).

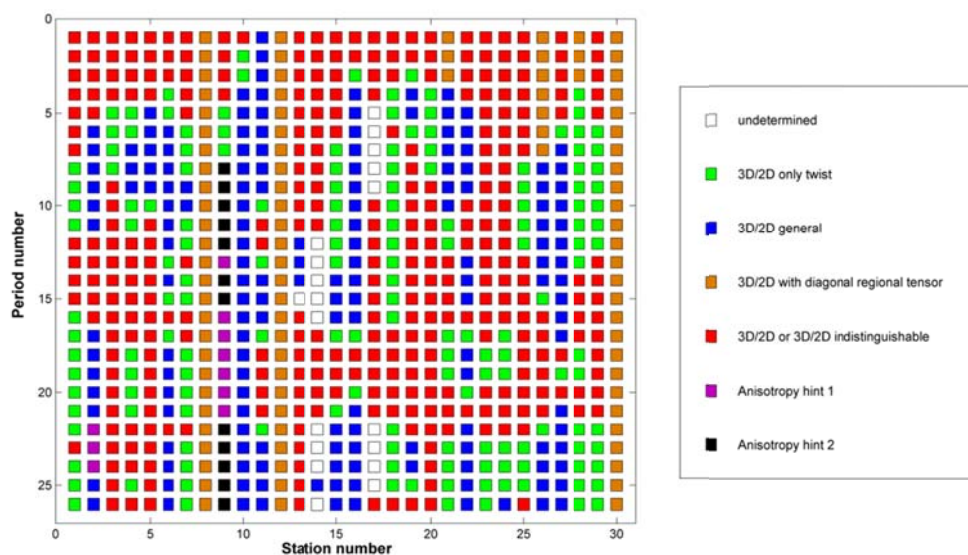
$$Z = CZ_{2D}$$

$$C = gTSA = g \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s \\ s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+a & 0 \\ 0 & 1-a \end{bmatrix} \quad (16)$$

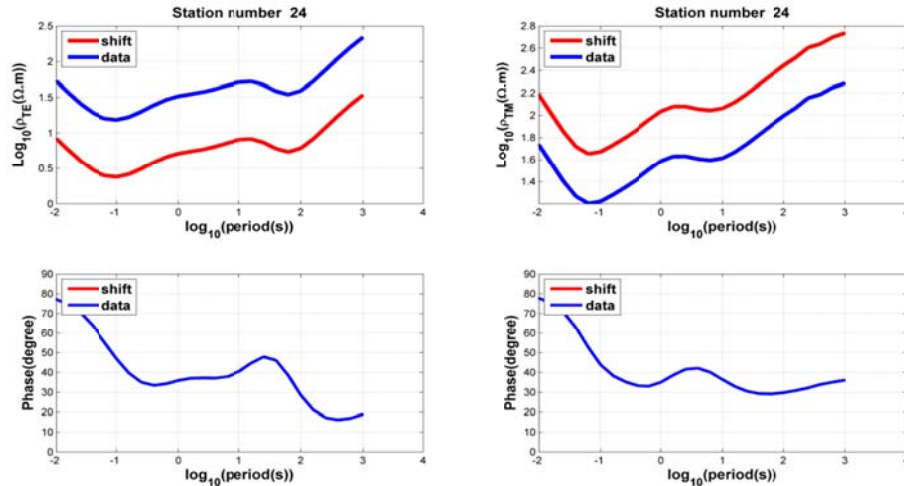
برای اطمینان از اینکه داده‌ها به‌طور کلی تحت‌تأثیر اغتشاشات تلوریکی هستند از برنامه WALDIM (مارتی و



شکل ۱. مدل مصنوعی اول؛ برگرفته از لدو و همکاران (۲۰۰۱).



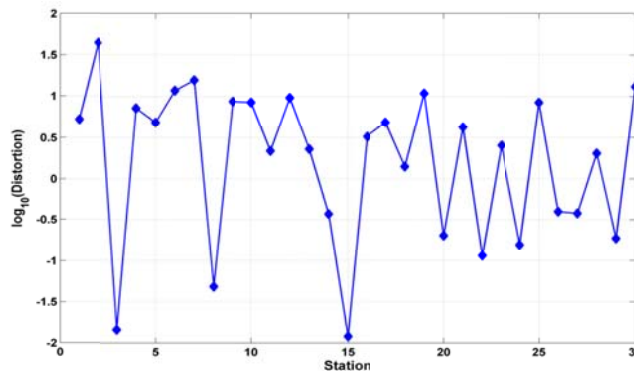
شکل ۲. نتیجه به‌دست آمده از تحلیل بعدیت داده‌ها با استفاده از برنامه WALDIM برای مدل اول.



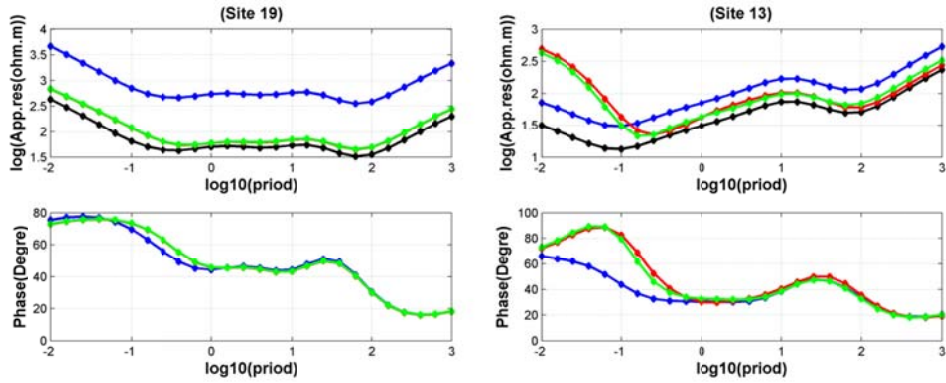
شکل ۳. مقایسه فاز و مقاومت ویژه در دو مد TE و TM بعد از اضافه کردن اغتشاشات تلوریک در ایستگاه ۲۴.

۲-۳. تخمین جابه‌جایی ایستا برای مدل اول
 شکل ۴ میزان جابه‌جایی ایستای موثر بر مود TE را بعد از معوج کردن (distorting) داده‌های مدل اول در همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد و در شکل ۵ منحنی‌های فاز و مقاومت ویژه به دست آمده از معادله (۱۰) با داده‌های اولیه (پاسخ مدل قبل از اعمال اعوجاج) در دو ایستگاه ۵ و ۲۰ مقایسه شده‌اند. چنان‌که در شکل ۵ مشهود است، در ایستگاه ۱۹ تقریباً در همه تناوب‌ها مقادیر فاز، منطبق و منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری موازی هستند؛ بنابراین در ایستگاه ۱۹ از همه تناوب‌ها برای محاسبه جابه‌جایی ایستا می‌توان استفاده کرد. از طرفی در ایستگاه ۱۳ منحنی‌های فاز در همه تناوب‌ها بر هم منطبق نیستند و همچنین منحنی‌های مقاومت ویژه در همه تناوب‌ها موازی نیستند؛ در نتیجه برای این ایستگاه نمی‌توان از همه تناوب‌ها برای

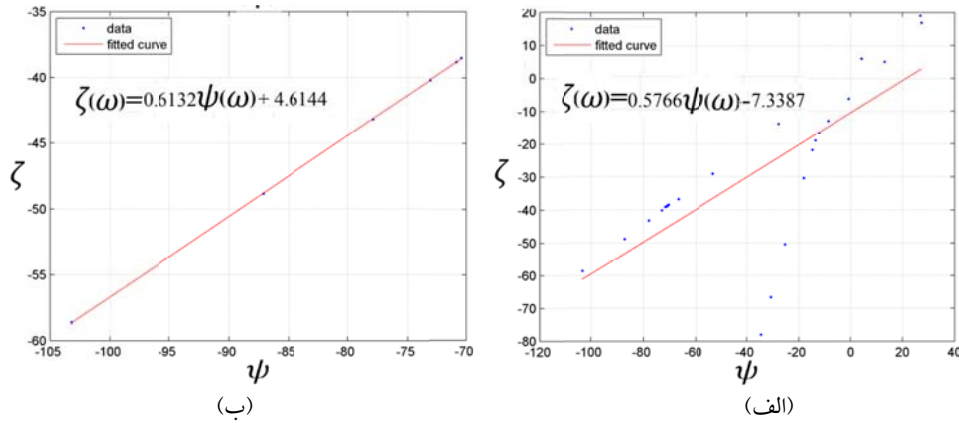
محاسبه جابه‌جایی ایستا استفاده کرد. برای به دست آوردن بازه تناوبی مناسب می‌توان از معادلات (۱۱) و (۱۲) استفاده کرد. شکل ۶ برازش خط بر داده‌های ω و $\psi(\omega)$ را برای ایستگاه ۱۳ نشان می‌دهد. در زمانی که همه تناوب‌ها را برای محاسباتمان در نظر می‌گیریم (شکل ۶-الف) پارامترهای اعوجاج منفی به دست می‌آیند؛ در صورتی که این پارامترها نمی‌توانند منفی باشند. حال اگر تناوب‌هایی که در آنها منحنی‌های فاز تقریباً منطبق و منحنی‌های مقاومت ویژه موازی هستند (شکل ۶-ب) وارد محاسبات شوند، پارامترهای اعوجاج مثبت به دست می‌آیند. بنابراین چنین تناوب‌هایی را برای تخمین میزان جابه‌جایی ایستا مورد استفاده قرار می‌دهیم. شکل ۷ مقادیر جابه‌جایی ایستای محاسبه شده در همه ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.



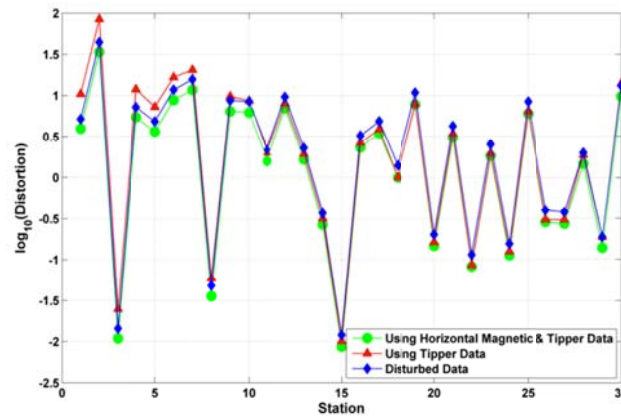
شکل ۴. میزان جابه‌جایی مقاومت ویژه مود TE بعد از معوج کردن داده‌ها در همه ایستگاه‌ها.



شکل ۵. مقایسه فاز و مقاومت ویژه مود TE داده خام (منحنی سیاه)، داده معوج شده (منحنی آبی)، داده‌های به‌دست آمده از محاسبه امپدانس جدید به کمک داده‌های تیپر معادله (۱۱) (منحنی قرمز) داده‌های به‌دست آمده از محاسبه امپدانس جدید به کمک داده‌های تیپر و مغناطیسی افقی معادله (۱۰) (منحنی سبز).



شکل ۶. مقادیر $\zeta(\omega)$ و $\psi(\omega)$ در دو محدوده تناوبی مختلف مربوط به فازهای غیرمنطبق (الف) و منطبق (ب) برای ایستگاه ۱۳ و نتایج برازش خط بر آنها.



شکل ۷. مقادیر محاسبه شده جابه‌جایی ایستا برای مدل اول.

۱۰۰ اهم‌تر است، و در زیر آن یک همبری مقاومت ویژه به شکلی وجود دارد که سمت چپ آن دارای مقاومت ویژه ۵ هزار اهم‌تر و سمت راست دارای مقاومت ویژه ۵۰ اهم‌تر و ضخامت آن ۱۷ کیلومتر است؛

۳-۳. مدل دوم

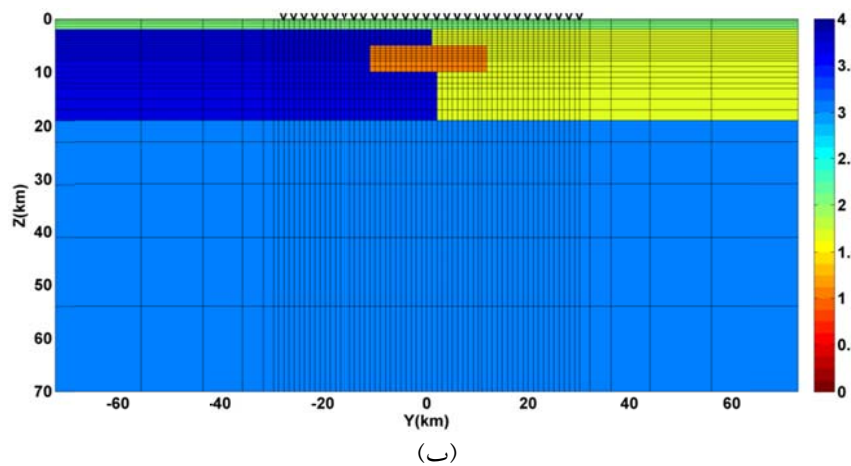
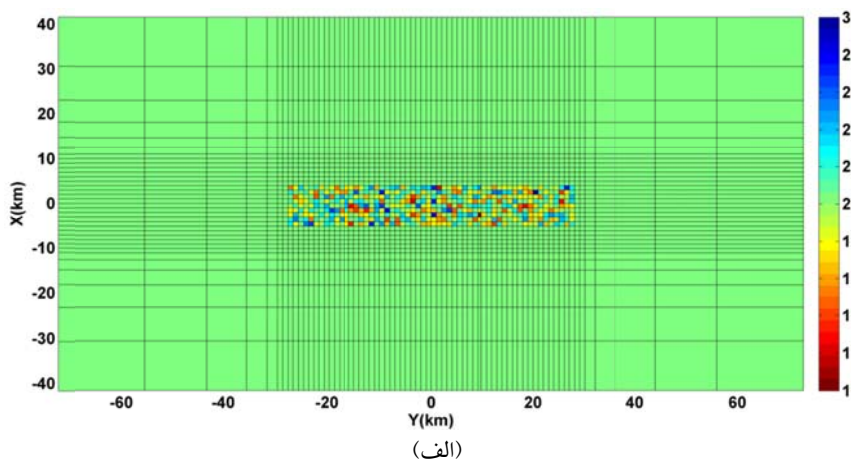
مدل انتخاب شده دوم از مقاله لدو (۲۰۰۶) اقتباس شده است که در شکل ۸ نشان داده شده است. رو لایه دارای ضخامت تقریبی دو کیلومتر و مقاومت ویژه

ابعاد هر بلوک آن برابر با $50 \times 1000 \times 1000$ متر است، با یک توزیع گوسی مقاومت ویژه که میانگین آن برابر با مقاومت ویژه لایه اول (۱۰۰ اهم متر) و انحراف معیار آن برابر با $0/3$ در مقیاس لگاریتمی در نظر گرفته شده است، جایگزین می‌شود (شکل ۸-الف). ایستگاه ۳۰ که دور از ناهمگنی‌های اضافه شده به مدل است به عنوان ایستگاه مبنا برای محاسبه توابع تبدیل بین ایستگاهی در نظر گرفته شده است. محدوده تناوبی استفاده شده شامل ۶ بازه لگاریتمی از $0/001$ تا 1024 ثانیه است و در هر بازه لگاریتمی پنج تناوب و در مجموع ۳۰ تناوب در نظر گرفته شد. مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از الگوریتم مدل‌سازی پیشرو سه‌بعدی به روش تفاضل محدود سه‌بعدی در قالب کد MTD3FWD (مکی و همکاران، ۱۹۹۴) محاسبه شدند.

همچنین یک ناهمگنی با ابعاد 20×6 کیلومتر و مقاومت ویژه ۱۰ اهم متر در این ناحیه وجود دارد و در انتهای مدل نیم‌فضای همگن با مقاومت ویژه هزار اهم متر قرار گرفته است.

ساساکی و موجو (۲۰۰۶) در مورد دو فرآیند زمین‌شناسی بحث کردند که رولایه و ساختارهای مقاومت ویژه سطحی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بر این اساس فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی از جمله هوازدگی، فرسایش، تا حد زیادی ماهیت رسوبات ته‌نشین شده در رولایه، و فاکتورهای بحرانی دیگری در بررسی و تجزیه و تحلیل جابه‌جایی ایستا در نظر گرفته می‌شوند.

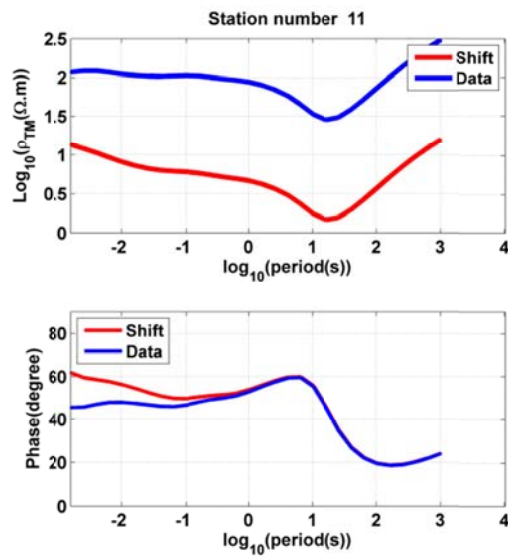
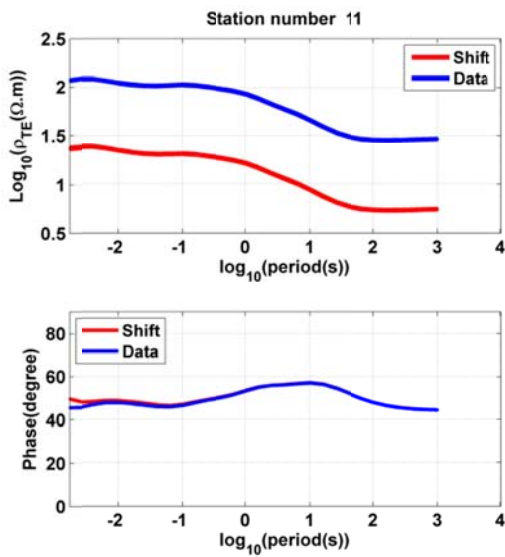
برای اضافه کردن جابه‌جایی ایستا و آشفته‌گی‌های ناشی از ساختارهای کوچک مقیاس سه‌بعدی به مدل دوم، قسمتی از رولایه به مساحت 460 کیلومتر مربع و عمق 50 متر که



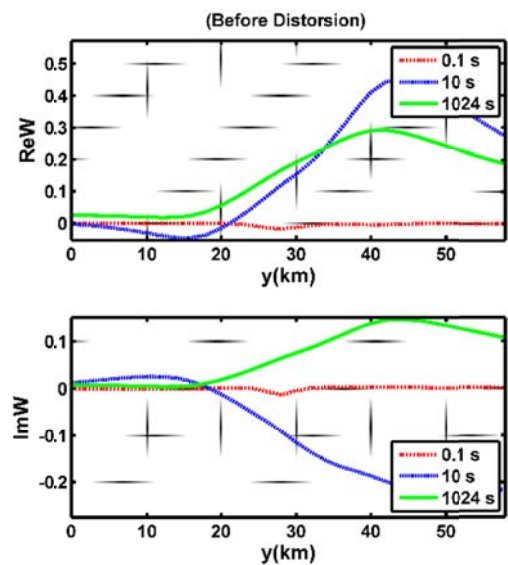
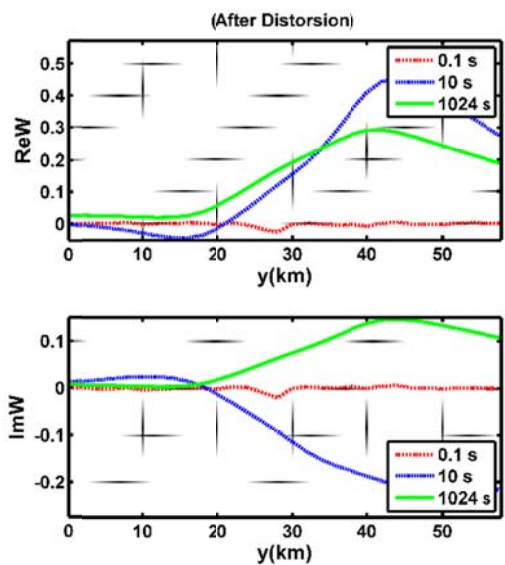
شکل ۸. مدل سه‌بعدی به‌کار رفته برای تولید داده‌های مصنوعی. الف) مقطع مقاومت ویژه مدل در صفحه XY ب) مقطع مقاومت ویژه مدل در صفحه YZ.

ناشی از ساختارهای کوچک مقیاس سه‌بعدی به مدل، دلالت بر این موضوع دارد که بردار تیپر بر خلاف مودهای TE و TM به مقدار خیلی کم و فقط در تناوب‌های کوتاه تحت‌تأثیر آشفتگی‌های ناشی از ساختارهای کوچک مقیاس سه‌بعدی سطحی است که با مطالعات انجام شده توسط لدو و همکاران (۲۰۰۲) همخوانی دارد.

مقدار جابه‌جایی ایستای اضافه‌شده به مدل در ایستگاه اندازه‌گیری ۱۱ و در مودهای TE و TM با روش ساساکی و موجو (۲۰۰۶) در شکل (۹-الف) نشان داده شده است. شکل (۹-ب) قسمت‌های حقیقی و موهومی بردار تیپر را در طول پروفیل و برای چهار تناوب نشان می‌دهد. مقایسه قسمت‌های حقیقی و موهومی بردار تیپر قبل و بعد از اضافه کردن اعوجاج‌های تلوریکی



(الف)

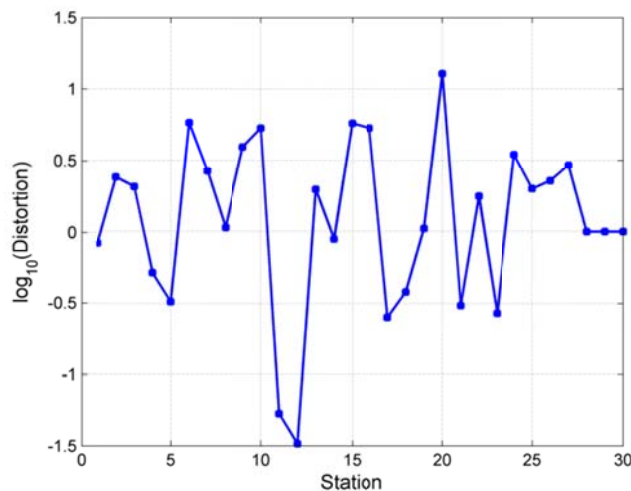


(ب)

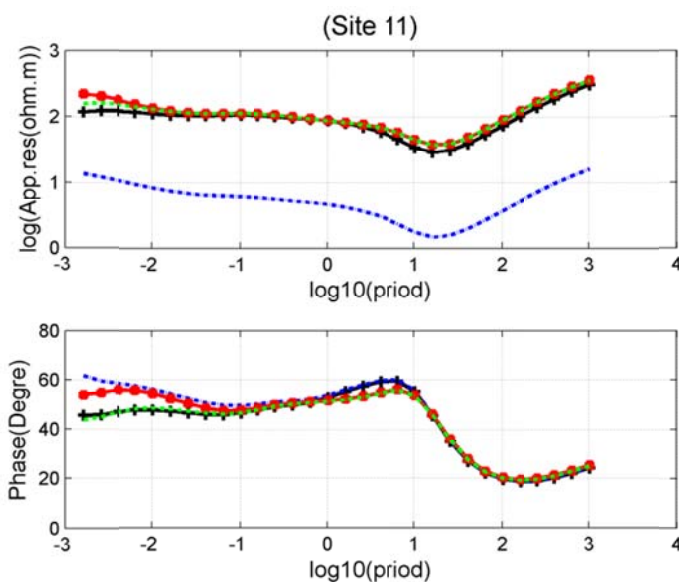
شکل ۹. مقایسه (الف) فاز و مقاومت ویژه در دو مود TE و TM و (ب) قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع تبدیل تیپر بعد از اضافه کردن اغتشاشات تلوریکی در تناوب‌های ۰/۱، ۱۰ و ۱۰۲۴ ثانیه در ایستگاه ۱۱.

شکل ۱۰ میزان جابه‌جایی مود TE را بعد از معوج کردن داده‌های مدل در همه ایستگاه‌ها، و شکل ۱۱ منحنی‌های فاز و مقاومت ویژه در ایستگاه ۱۱ که با در نظر گرفتن بردار تیپر محاسبه شده است (منحنی قرمز) را با منحنی‌های فاز و مقاومت ویژه حاصل از داده معوج شده مقایسه می‌کند. جابه‌جایی ایستا را با استفاده از ده تناوبی که برای آنها پارامترهای اعوجاج در همه ایستگاه‌ها مثبت، منحنی‌های

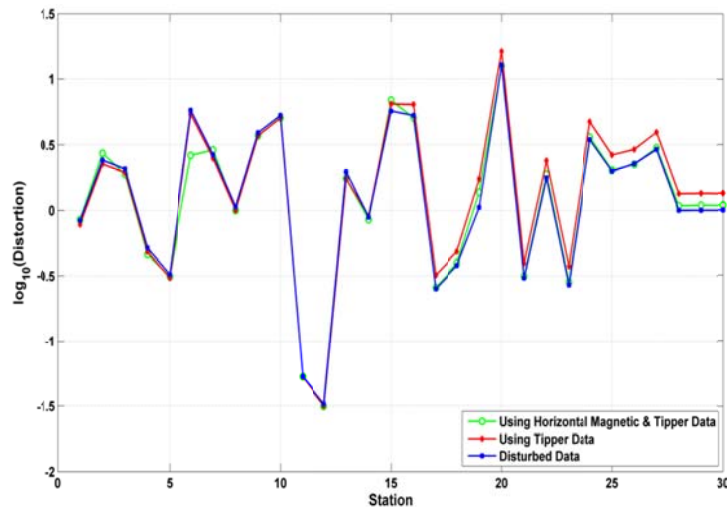
فاز تقریباً همزمان و منحنی‌های مقاومت ویژه موازی هستند، به دست می‌آوریم. شکل ۱۲ میزان جابه‌جایی تخمین زده شده در همه ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های انجام شده می‌توان گفت که استفاده از قانون القاء فارادی در زمانی که از مؤلفه افقی میدان مغناطیسی در تخمین میزان جابه‌جایی ایستای موثر بر مود TE استفاده می‌شود، به نتایج بهتر و دقیق‌تری منجر می‌شود.



شکل ۱۰. میزان جابه‌جایی مقاومت ویژه مود TE بعد از معوج کردن داده‌ها در همه ایستگاه‌ها با استفاده از مدل سه‌بعدی.



شکل ۱۱. مقایسه فاز و مقاومت ویژه مود TE داده خام (منحنی سیاه)، داده معوج شده (منحنی آبی)، داده‌های به دست آمده از محاسبه امپدانس جدید به کمک داده‌های تیپر - معادله (۷) - (منحنی قرمز)، داده‌های به دست آمده از محاسبه امپدانس جدید به کمک داده‌های تیپر و مغناطیسی افقی - معادله (۶) - (منحنی سبز).



شکل ۱۲. مقادیر جابه‌جایی ایستای محاسبه شده برای مدل دوم.

۴. نتیجه‌گیری

شده از طریق تانسور مغناطیسی افقی همراه با تیپر به مراتب بیشتر از زمانی است که از تغییرات مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی صرف‌نظر می‌شود و تنها داده‌های تیپر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از آنجایی که تخمین توابع مغناطیسی افقی به اندازه‌گیری‌های همزمان و انتخاب ایستگاه مرجع مناسب (دور از ناهمگنی‌ها) نیاز دارد، بدیهی است که عدم دقت در تخمین این توابع در حضور نوفه‌های الکترومغناطیسی قوی و به‌ویژه وجود ناهمگنی در ایستگاه مرجع، دقت روش مطرح شده در این تحقیق را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. با این حال نظر به توسعه روش‌های پردازشی که افزایش دقت همزمانی در اندازه‌گیری‌ها و محاسبه توابع تبدیل را محقق می‌سازند، می‌توان به امکان استفاده از پتانسیل بالای این توابع در موارد مختلف و از جمله کاربرد مطرح شده در این تحقیق خوشبین بود.

مراجع

- Berdichevsky, M. N. and Dmitriev, I. V., 2008, Models and Methods of Magnetotellurics. Springer, Berlin.
- Groom, R. W. and Bailey, R. C., 1989, Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion: J. Geophys. Res., 94, 1913–1925.
- Habibian, D., B. and Oskooi, B., 2014, A resolution comparison of horizontal and

قانون القاء فاراده امکان مرتبط کردن مشتق افقی تانسور امیدانس معوج شده با توابع تبدیل ژئومغناطیسی معوج نشده را فراهم می‌کند. با استفاده از آن تغییرات نسبی بین پارامترهای اعوجاج در امتداد پروفیل مشخص می‌شود و در نهایت به بازیافت پاسخ منطقه‌ای مود TE در یک مدل منطقه‌ای دوبعدی (متأثر از اثرات اعوجاجی ساختارهای دو و سه‌بعدی محلی) کمک می‌کند.

در این تحقیق قابلیت توابع پاسخ مغناطیسی افقی برای برآورد میزان جابه‌جایی ایستا و نیز دقت آن در مقایسه با تخمین جابه‌جایی ایستا به‌وسیله داده‌های تیپر در دو مدل پیچیده دوبعدی مورد مطالعه قرار گرفت. اثر جابه‌جایی ایستا به دو روش متفاوت تحلیلی و مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بر مدل‌های در نظر گرفته شده اعمال شد. سپس روابط به‌دست آمده برای تخمین میزان اعوجاج به‌کار گرفته شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که دقت برآورد انجام

vertical magnetic transfer functions. Journal of the Earth and Space Physics, 40, 47-53.

- Ledo, J., Gaba's, A. and Marcuello, A., 2002, Static shift levelling using geomagnetic transfer functions. Earth Planets Space 54, 493–498.

Ledo, J., 2006, 2D versus 3D magnetotelluric data interpretation. Surveys in Geophysics., 27, 111-148.

- Marti, A., Queralt, P. and Ledo, J., 2009,

- WALDIM: a code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor. *Comp. Geosci.*, 35, 2295–2303.
- Mackie, R. L., Smith, J. T. and Madden, T. R., 1994, Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example, *Radio Sci.*, 29, 923–935.
- McNeice, G. W. and Jones, A. G., 2001, Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data: *Geophysics.*, 66, 158–173.
- Sasaki, Y. and Meju, M. A., 2006, Three-dimensional joint inversion for magnetotelluric resistivity and static shift distributions in complex media, *J. Geophys. Res.-solid earth.*, 111, B0511.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics.*, 65, 791-803.
- Soyer, W., 2002, Analysis of geomagnetic variation in the central and southern Andes, Ph.D thesis, Free University of Berlin.
- Varentsov, I. V. M. and EMTESZ-Pomerania Working Group., 2005, Method of horizontal magnetovariational sounding: techniques and application in the EMTESZ-POMERANIA project, Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Haus Wohldenber, Holle, 3.-7.10.2005, Hrsg.
- Vozoff, k., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics.*, 37, 98-141.

Static shift estimation in magnetotelluric data using horizontal magnetic tensor

Limooparvar Jahromi, E.¹, Habibian Dehkordi, B.^{2*} and Oskooi, B.³

1. M.Sc. Graduated, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 10 Nov 2018, Accepted: 14 May 2019)

Summary

Interpretation of magnetotelluric data in the presence of galvanic distortions, caused by small-scale near-surface structures, can lead to unreliable results. The simplest manifest of these distortions, while limited only to the changes in the amplitude of electric fields, is vertical displacement of the apparent resistivity curves or static shift phenomenon that constitutes non-determinable part of the distortion matrix. Due to the boundary conditions governing components of the electric and magnetic fields, the occurrence of charge accumulation and therefore the static shift of apparent resistivity curves, affects only TM-mode data in the case of two-dimensional models. Thus, we can use the information available in the TE-mode-impedance phase (tipper and horizontal magnetic data) which are independent of this phenomenon.

In this study, geomagnetic transfer functions have been used to estimate this displacement and recover the undistorted TE-mode apparent resistivity based on the Faraday induction law. Ledo et al. (2002) show that tipper data can be used to estimate static shift of magnetotelluric data, if the horizontal variations of the horizontal components of the magnetic field can be ignored. This assumption may be violated in complex situations. We estimate static shift while incorporating such variations and taking into account the horizontal magnetic transfer functions. Estimation of static shift through mathematical methods is only relatively possible and requires the selection of a reference station that has the minimal effect of galvanic distortion. The relations between different components of electric and magnetic fields are integrated and characterized by their mean values. To incorporate the horizontal magnetic tensor, array magnetotelluric data are required, so that components of the magnetic field at the reference and measurement sites are simultaneously provided.

Considering two consecutive sites, impedance tensor at one site is written in terms of tipper and horizontal magnetic tensor at that site and the impedance at the adjacent site. By ignoring other types of distortions that can generally exist and using some algebra, the problem of determining the frequency-independent static shift factor becomes a linear fit problem. A set of data points covering different frequency ranges is selected and the quality of their linear fitting is examined through solving procedure.

Considering the horizontal variations of the horizontal components of the magnetic field, the method has been applied to two synthetic models. Using two different approaches, the distortions caused by small-scale three-dimensional structures are simulated and added to the model responses. In the first approach, the distortion matrix is considered as the product of four parameters of gain factor, anisotropy, and twist and shear angles in the decomposition model then the distortion simulation is performed by selecting some numerical values of these four parameters and multiplying the resulted distortion matrix by the impedance tensor. In the second approach, some part of the top-layer of the model is replaced by a Gaussian distribution of resistivity with known selected mean and standard deviation. In this way, the effects of various geological processes, such as weathering, erosion- and to some extent- the nature of the deposited sediments are involved. The obtained results confirm that the estimated static shift parameter is more accurate than that of the case in which horizontal magnetic transfer functions are ignored and only the vertical magnetic transfer functions are considered.

Keywords: magnetotelluric, transfer functions, static shift.

*Corresponding author:

bhabibian@ut.ac.ir