

بررسی جدایش فاز قطبش‌های گوناگون داده‌های زمین مگنتوتلوریک در محیط‌های ناهمسانگرد الکتریکی

منصوره منتهائی^{۱*} و بهروز اسکوئی^۲

^۱ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

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

(دریافت: ۸۷/۱۲/۲۴، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

چکیده

ناهمسانگردی الکتریکی بدین معنی که چگالی جریان در یک محیط تابعی از جهت‌گیری میدان الکتریکی در آن محیط باشد، اخیراً در تفسیر اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک (MT) بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در بیشتر این بررسی‌ها، استنتاج ناهمسانگردی براساس جدایش‌های فازی قطبش‌های گوناگون داده‌های MT بوده است. تأکید بر پاسخ‌های فاز از این حقیقت ناشی می‌شود که توده‌های رسانای سطحی دامنه مؤلفه‌های تانسور امپدانس مربوط به ساختارهای عمیق‌تر را معشوش و استنتاج از پاسخ‌های دامنه (مقاومت‌ویژه) را مشکل می‌سازند. این در شرایطی است که پاسخ‌های فازی، تانسور فاز، تحت تأثیر حضور این توده‌ها قرار نمی‌گیرند. اما پاسخ فازی MT مربوط به نیم‌فضایی با رسانایی ویژه همگن ولی ناهمسانگرد مستقل از جهت قطبش است و هیچ‌گونه جدایش فازی رخ نمی‌دهد. با استفاده از مدل‌های ساده ناهمسانگردی یک‌بعدی و دو‌بعدی نشان می‌دهیم که جدایش فازی داده‌های MT در نتیجه تغییرات مکانی یا گرادینان رسانایی ویژه ایجاد شده‌اند و به خواص عمده ذاتی تانسور رسانایی ویژه بستگی ندارند و از این جهت اساساً با جدایش امواج برشی که در تحقیقات ناهمسانگردی کشسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، متفاوت هستند.

واژه‌های کلیدی: ناهمسانگردی الکتریکی، مگنتوتلوریک، جدایش فازی، واپیچش گالوانیکی

Phase split investigation of different magnetotelluric data polarizations in electrically anisotropic media

Montahaie, M.¹ and Oskooi, B.²

¹ Ph. D. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

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

(Received: 14 March 2009, Accepted: 13 Oct 2009)

Abstract

Electrical anisotropy in the earth, the effect of current density dependency on the electric field orientation in a medium, has been considered significantly in recent Magnetotelluric (MT) observations. Several suggestions for electrical anisotropy are based upon MT observations of "phase splits", analogous to shear wave splits in seismology. The MT phase data is accentuated more than its amplitude responses since shallow small scale conductivity heterogeneities cause a significant distortion in MT amplitude responses (known as Galvanic Distortion), while MT phase responses remain immune.

To investigate the MT phase response we will use the tensor representation of the MT phase introduced by Caldwell et al. (2004). This representation has the advantage of considerably simplifying the analysis of the Galvanic distortion effect. Moreover no assumption about the dimensionality of the underlying regional conductivity structure is essential.

The properties of a generally asymmetric "phase tensor" are best understood in terms of the tensor's graphical representation as an ellipse (figure 1). The tensor principal axes and principal values correspond to the major and minor axes and the lengths of the corresponding ellipse radii, respectively.

For a uniform conductivity half-space, a circle of unit radius represents the phase tensor at all periods. More generally, if the conductivity is both isotropic and 1-D, the radius of the circle will vary with the period according to the variation of the conductivity with depth. For example, the radius will increase if the conductivity increases with depth. In the 2-D case the strike of the regional conductivity distribution defines a natural orientation for the coordinate system with the x-axis parallel to the structural strike direction. The phase tensor principal axis is parallel and perpendicular to the strike direction of the regional conductivity structure.

The results of anisotropic models discussed in this paper were computed with the 2D anisotropic resistivity modeling code of Pek and Verner (1997) that uses a finite difference algorithm and makes it possible to consider 2D structures with an arbitrarily oriented anisotropy.

The numerical examples investigated in this paper show that MT phase response of an electrically uniform but anisotropic half-space is independent of the polarization direction and no phase split occurs. Using several 1D and 2D anisotropic models, it is demonstrated that MT phase splitting results from spatial differences or gradients in conductivity, not the inherent bulk properties of the anisotropic conductivity tensor. Hence in this respect MT phase splitting is fundamentally different from shear wave splitting in elastic anisotropy investigations.

Key Words: Electrical anisotropy, Magnetotellurics, Phase splits, Galvanic distortion

۱ مقدمه

گاتزامیر و مورکامپ، ۲۰۰۵، براسه و همکاران، ۲۰۰۸) می‌توان نام برد. حتی در برخی از تحقیقات MT صورت گرفته، نتایج حاصل با داده‌های موج سطحی و جدایش موج برشی همان منطقه مقایسه شده است: (سیمپسون، ۲۰۰۱، بار و سیمپسون، ۲۰۰۲، ایتون و همکاران، ۲۰۰۴، ایوانز و همکاران، ۲۰۰۵).

یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک به منظور بررسی ناهمسانگردی در اعماق پوسته پایینی یا گوشته، واپیچش ناشی از بی‌هنجاری‌های سطحی، کوچک مقیاس است که دامنه مؤلفه‌های تانسور امپدانس را به شدت مغشوش می‌سازد و باعث به وجود آمدن جابه‌جایی ایستا در منحنی مقاومت ویژه محاسبه شده از روی آنها می‌شود (جیراسک، ۱۹۹۰). از سوی دیگر اطلاعات فاز موجود در تانسور فاز در دوره‌های بلند

مفهوم ناهمسانگردی رسانایی ویژه الکتریکی، روش سونداژزنی عمقی الکترومغناطیسی را به یافته‌های مربوط به نیروهای زمین‌ساختی ارتباط می‌دهد. بدین علت که با استفاده از مدل‌های مشتمل بر سامانه‌های ریزشکاف که در نتیجه اعمال این نیروها به وجود آمده‌اند و از یک فاز رسانا مثلاً سیال یا گرافیت پر شده‌اند، رسانایی ویژه کلی را که در هر امتداد مقدار متفاوتی نشان می‌دهد، می‌توان توجیه کرد. از این رو در برخی از تحقیقات صورت گرفته، ناهمسانگردی الکتریکی در پوسته پایینی و گوشته با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک (MT) (در حکم یکی از مهم‌ترین روش‌های سونداژزنی عمقی الکترومغناطیسی) بررسی شده است که در حکم مثال از کارهای صورت گرفته (کلت و همکاران، ۱۹۹۲، ایسل و بار، ۱۹۹۳، مارشال و همکاران، ۱۹۹۵، لایبکر و همکاران، ۲۰۰۲،

مغناطیسی (\mathbf{H}) را به مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی (\mathbf{E}) تبدیل می‌کند:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} \mathbf{H}, \quad \mathbf{Z} = \mathbf{X} + i \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

و بردار القا درحکم تابع تبدیلی که این نوسانات را به مؤلفه قائم میدان مغناطیسی (\mathbf{H}_z) القا شده با آنها مربوط می‌کند:

$$\mathbf{H}_z = \mathbf{T} \mathbf{H} \quad (2)$$

تعریف می‌شوند.

\mathbf{Z} و \mathbf{T} هر دو تابعی از تناوب و مختلط‌اند. در این روابط میدان مغناطیسی (\mathbf{B}) با شدت میدان مغناطیسی (\mathbf{H}) نمایش داده شده است، بدین‌علت که این انتخاب نهایتاً باعث می‌شود امپدانس برحسب (Ω) باشد.

وقتی توزیع مقاومت ویژه زیرسطحی یک‌بُعدی است، بردارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی متعامد، $Z_{xy} = -Z_{yx}$ و مستقل از جهت قطبش میدان‌ها است ($Z_{yx} = -Z_{xy}$). در چنین حالتی هیچ مؤلفه قائم میدان مغناطیسی القا نمی‌شود و \mathbf{T} صفر است. در یک موقعیت دو‌بُعدی که مقاومت ویژه‌ها همسانگرد هستند اگرچه \mathbf{T} بر جهت استرایک عمود است ولی بخش‌های حقیقی و موهومی تانسور پادقطری \mathbf{Z} به دو قطبش yx , xy به موازات محورهای اصلی آن که موازی و قائم بر جهت استرایک ساختار دو‌بُعدی‌اند، تفکیک می‌شوند ($|Z_{xy}| \neq |Z_{yx}|$).

اطلاعات فاز و دامنه که در تانسور امپدانس موجود است معمولاً با مقاومت ویژه و فاز مؤلفه‌های آن بیان می‌شود:

$$\phi_{kl} = \arg(z_{kl}) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{y_{kl}}{x_{kl}} \right) \quad \text{و} \quad \rho_{kl} = \frac{|z_{kl}|^2}{\mu_0 \omega}$$

در این فرمول‌ها Z_{kl} مؤلفه kl از تانسور امپدانس است. به این نکته باید توجه داشت که ρ_{kl} و ϕ_{kl} مؤلفه‌های تانسوری نیستند و صرفاً از مؤلفه Z_{kl} تانسور امپدانس محاسبه شده‌اند. این نحوه نمایش پاسخ‌های \mathbf{MT} با

تحت تأثیر چنین واپیچشی قرار نمی‌گیرد. اما همان‌گونه که در ادامه اثبات خواهیم کرد، مشکلی که در استفاده از داده‌های فاز به‌منظور تعیین ناهمسانگردی وجود دارد آن است که تغییرات پاسخ فاز \mathbf{MT} با جهت قطبش میدان‌ها، معرف ناهمسانگردی نیست و تنها گرادیان‌های مکانی رسانایی ویژه را نشان می‌دهد. این موضوع به‌ساده‌ترین شکل در مورد یک نیم‌فضا که رسانایی ویژه همگن ولی ناهمسانگرد دارد، مشهود است. در این مورد پاسخ فاز \mathbf{MT} از جهت قطبش میدان الکترومغناطیسی (\mathbf{EM}) مستقل و معادل با پاسخ یک نیم‌فضای همسانگرد است. این بدان معنی است که هیچ اطلاعاتی در پاسخ فازی \mathbf{MT} که نشان دهد تانسور رسانایی ویژه ذاتاً ناهمسانگرد است، وجود ندارد. در این مقاله نتایج این نکته ساده نظری و شرایطی که در آن ناهمسانگردی را می‌توان از اطلاعات فاز \mathbf{MT} با استفاده از مدل‌های یک‌بُعدی و دو‌بُعدی استنتاج کرد، بررسی می‌کنیم. در بحثی که در مورد پاسخ‌های فازی \mathbf{MT} خواهیم داشت از نمایش تانسوری این‌گونه اطلاعات که نخستین‌بار از سوی کالدول و همکاران (۲۰۰۴) معرفی شده استفاده خواهیم کرد. این نحوه نمایش اطلاعات فاز، تحلیل اثر واپیچش ناشی از ساختارهای رسانایی ویژه کوچک مقیاس سطحی را به‌طور چشمگیری آسان می‌کند و به‌علاوه به هیچ فرض اولیه‌ای درباره ابعاد ساختار رسانایی ویژه منطقه‌ای نیاز ندارد.

۲ نمایش ریاضی توابع تبدیل مگنتوتلوریک

معمولاً در اندازه‌گیری‌های \mathbf{MT} الکترودها، مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی و سیم‌پیچ‌های القا و یا مغناطیس‌سنج‌های فلاکس‌گیت، سه مؤلفه میدان مغناطیسی را ثبت می‌کنند. پس از آنکه سری‌های زمانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ثبت شده، با تبدیل فوریه به حوزه بسامد منتقل شدند، تانسور امپدانس \mathbf{Z} به‌منزله تابع تبدیل \mathbf{MT} که نوسانات مؤلفه‌های افقی میدان

مشکلاتی همراه است. به ویژه آنکه فازها نیز با ناهمگنی‌های رسانایی ویژه سطحی مغشوش می‌شوند.

۳ ناهمسانگردی الکتریکی

در یک محیط ناهمسانگرد الکتریکی چگالی جریان در محیط لزوماً به موازات میدان الکتریکی در آن محیط نیست و تابعی از جهت گیری میدان الکتریکی خواهد بود. تحت چنین شرایطی، مقاومت ویژه ρ که طبق قانون اهم ($E=PJ$) میدان الکتریکی اندازه گیری شده در هر نقطه را به چگالی جریان الکتریکی در آن نقطه مربوط می‌کند، شکل یک تانسور مرتبه دو متقارن ($\rho_{ij} = \rho_{ji}$) مثبت و معین را دارد (وایدلت، ۱۹۹۹) و بنابراین می‌توان آن را با یک تانسور قطری از مقادیر ویژه آن و سه تانسور چرخش شبیه به چرخش‌های بنیادی اوپلر در مکانیک کلاسیک بسط داد:

$$\underline{\underline{\rho}} = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} & \rho_{xz} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} & \rho_{yz} \\ \rho_{zx} & \rho_{zy} & \rho_{zz} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_z^t(\alpha_S) \mathbf{R}_x^t(\alpha_D) \mathbf{R}_z^t(\alpha_L) \begin{pmatrix} \rho_1 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_3 \end{pmatrix} \mathbf{R}_z(\alpha_L) \mathbf{R}_x(\alpha_D) \mathbf{R}_z(\alpha_S) \quad (3)$$

در این فرمول α_S و α_D و α_L زوایای استرایک، شیب و سوگیری (slant) ناهمسانگردی و R ماتریس چرخش بنیادی حول محوری است که با اندیس مربوطه معین شده است و نمای $\mathbf{1}$ به معنی ترانهاده بودن ماتریس چرخش است. بدین ترتیب یک مقاومت ویژه ناهمسانگرد دلخواه را می‌توان با سه ناوردای دستگاه مختصات (ρ_1, ρ_2, ρ_3) مربوط به محورهای بیضی وار نمایش دهنده تانسور و سه زاویه معرف جهت گیری بیضی وار، که مرتبط با نحوه نمایش و دستگاه مختصات انتخاب شده است، تعیین کرد.

۴ تانسور فاز

اطلاعات فاز موجود در تانسور امیدانس را می‌توان با یک تانسور مرتبه دو "تانسور فاز" نمایش داد. اگر بخش‌های حقیقی و موهومی تانسور امیدانس را مطابق با $Z = X + iY$ در نظر بگیریم، تانسور فاز به صورت:

$$\Phi = X^{-1}Y \quad (4)$$

تعریف می‌شود (کالدول و همکاران ۲۰۰۴). در حالت کلی این تانسور نامتقارن است و مؤلفه‌های آن مطابق با فاز مؤلفه‌های مربوطه در تانسور امیدانس نیستند: $\Phi_{ij} \neq f(\arg(Z_{ij}))$. اگر Φ را بصورت مجموع یک تانسور متقارن و یک تانسور پسماند (residual) در نظر بگیریم و آن را بر حسب مقادیر و بردارهای ویژه برای هر قسمت (متقارن و پسماند) بازنویسی کنیم، خواهیم داشت:

$$\Phi = R^T(\alpha - \beta) \begin{pmatrix} \Phi_{\max} & 0 \\ 0 & \Phi_{\min} \end{pmatrix} R(\alpha + \beta) \quad (5)$$

که در آن α جهت محور اصلی بخش متقارن تانسور و β معیار انحراف تانسور از تقارن هستند و بر حسب مؤلفه‌های تانسور فاز به صورت:

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\Phi_{xy} + \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} - \Phi_{yy}} \right) \\ \beta = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\Phi_{xy} - \Phi_{yx}}{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}} \right) \quad (6)$$

تعریف می‌شوند. رابطه (۵) شکل تجزیه مقدار تکین تانسور فاز را دارد، (پرس و همکاران، ۱۹۸۶) و بنابراین مقادیر بیشینه و کمینه Φ_{\max} و Φ_{\min} مقادیر اصلی یا تکین تانسور فاز هستند. نمایش گرافیکی یک تانسور مرتبه دو نامتقارن، یک بیضی است که اگر α را در حکم زاویه‌ای در نظر بگیریم که موقعیت یک محور مرجع را نسبت به محورهای مختصاتی نشان می‌دهد، β موقعیت محور اصلی بیضی نسبت به این محور مرجع خواهد بود. طول

مورد نیز با دایره‌ای به شعاع واحد ($\Phi = I$) نمایش داده می‌شود.

درحالتی که ساختار رسانایی ویژه منطقه همسانگرد و دو بُعدی باشد، توزیع رسانایی ویژه منطقه‌ای یک جهت‌گیری طبیعی را برای دستگاه مختصاتی (x, y) نشان می‌دهد که در آن x به موازات جهت استرایک ساختار است. در چنین دستگاه مختصاتی تانسور امیدانس منطقه‌ای Z_R و بخش‌های حقیقی و موهومی آن (X_R و Y_R) شکل پادقطری دارد و در نهایت تانسور فاز قطری است و محورهای اصلی بیضی مربوط به آن، موازی و قائم بر جهت استرایک ساختار رسانایی ویژه منطقه‌ای خواهند بود. اغتشاش ایجاد شده در تانسور امیدانس منطقه‌ای با ناهمگنی‌های رسانایی ویژه محلی (و اپیچش گالوانیکی) را می‌توان به صورت: $Z = DZ_R = DX_R + i DY_R$ در نظر گرفت، جیراسک (۱۹۹۰). در این رابطه D تانسور واپیچش حقیقی و مستقل از تناوب است (گروم و باهر ۱۹۹۲؛ چاو و اسمیت ۱۹۹۲)، X_R و Y_R به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی Z_R هستند. بنابراین در نتیجه حضور واپیچش گالوانیکی، مقادیر مقاومت ویژه (ρ_k) و فاز (ϕ_k) محاسبه شده از Z با مقادیر منطقه‌ای مربوطه که از Z_R تعیین می‌شوند، متفاوت هستند.

از آنجا که هر دو قسمت حقیقی و موهومی تانسور امیدانس دستخوش تبدیل خطی یکسانی می‌شوند تانسور فاز به صورت:

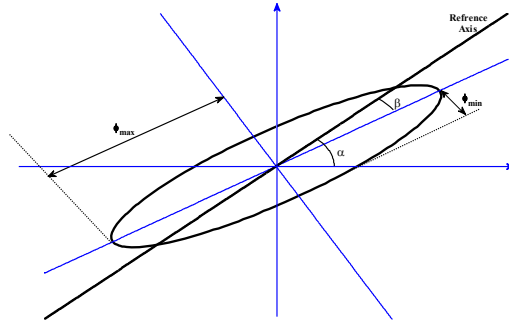
$$\Phi = X^{-1}Y = (DX_R)^{-1} (DY_R) = X_R^{-1}D^{-1}DY_R = X_R^{-1}Y_R = \Phi_R$$

در می‌آید. بدین ترتیب مؤلفه‌های تانسور فاز اندازه‌گیری شده برخلاف فاز مؤلفه‌های تانسور امیدانس که در اثر اعمال D بر Z_R مغشوش شده‌اند، تحت تأثیر واپیچش گالوانیکی واقع نمی‌شوند.

۵ تغییرات تانسور فاز در محیط‌های ناهمسانگرد

الکتریکی

محورهای اصلی و فرعی این بیضی Φ_{\min} و Φ_{\max} و جهت محور اصلی آن $\alpha - \beta$ است (شکل ۱). چرخش محورهای مختصات، زاویه بین محور مرجع و محورهای مختصاتی (α) را تغییر می‌دهد اما شکل و موقعیت جغرافیایی این بیضی (Φ_{\min} , Φ_{\max} , β) بدون تغییر باقی خواهد ماند.



شکل ۱. نمایش گرافیکی یک تانسور بصورت یک بیضی. محورهای اصلی و فرعی این بیضی بترتیب توسط ناوردهای سیستم مختصاتی (Φ_{\min} , Φ_{\max} , β) تعیین می‌شوند. این ناوردها مشخصه‌های فیزیکی ذاتی تانسور را که به سیستم مختصات مرجع وابسته نمی‌باشند، نشان می‌دهند.

در ساده‌ترین حالت در مورد یک نیم‌فضای همگن و همسانگرد، تانسور فاز در همه تناوب‌ها، دایره‌ای به شعاع واحد خواهد بود. در حالت کلی‌تر اگر ساختار رسانایی ویژه منطقه‌ای همسانگرد و یک بُعدی باشد، شعاع این دایره با تناوب، مطابق با تغییر رسانایی ویژه با عمق تغییر خواهد کرد. در مورد یک نیم‌فضای ناهمسانگرد و در دستگاه مختصات دکارتی که محورهای آن به موازات محورهای اصلی تانسور رسانایی ویژه باشند، تانسور امیدانس شکل پادقطری دارد. اما برخلاف یک نیم‌فضای همسانگرد، بزرگی مؤلفه‌های قطر فرعی آن یکسان نیستند. در نتیجه دامنه میدان الکتریکی با تغییر جهت قطبش میدان مغناطیسی، تغییر خواهد کرد ولی اختلاف فاز بین این میدان‌ها ثابت باقی خواهد ماند. بنابراین تانسور فاز در این

در چنین محیطی همانگونه که قبلاً اشاره شد، تانسور فاز به شکل یک ماتریس همانی است ($\Phi = I$) و با یک دایره نمایش داده می شود (شکل ۲c).

ب- ناهمسانگردی کلی

در این مورد محورهای اصلی ناهمسانگردی در امتداد محورهای مختصات نیستند (شیب و سوگیری مخالف با صفر). میدان مغناطیسی قطبیده خطی که موازی با سطح باشد، چگالی جریانی موازی با سطح و قائم بر میدان مغناطیسی القا می کند، اما از آنجا که برخلاف مورد قبل، این جریان به موازات محور اصلی ناهمسانگردی نیست، میدان الکتریکی حاصل، به موازات چگالی جریان نیست و یک مؤلفه قائم بر جریان خواهد داشت. ولی چون p یک مقدار حقیقی است، قطبش

خطی میدان الکتریکی کل و تصویر افقی آن حفظ خواهد شد، ارتباط فازی بین H ، E نسبت به مورد ناهمسانگردی آزیموتی تغییر نخواهد کرد و تانسور فاز در این مورد نیز با دایره نمایش داده می شود. در این مورد نیز مقدار مقاومت ویژه با تغییر جهت متفاوت خواهد بود ولی برخلاف مورد قبل مقادیر مقاومت ویژه در امتداد محورهای اصلی افقی (ρ_{xy} ، ρ_{yx}) را نخواهد گرفت (شکل ۲e).

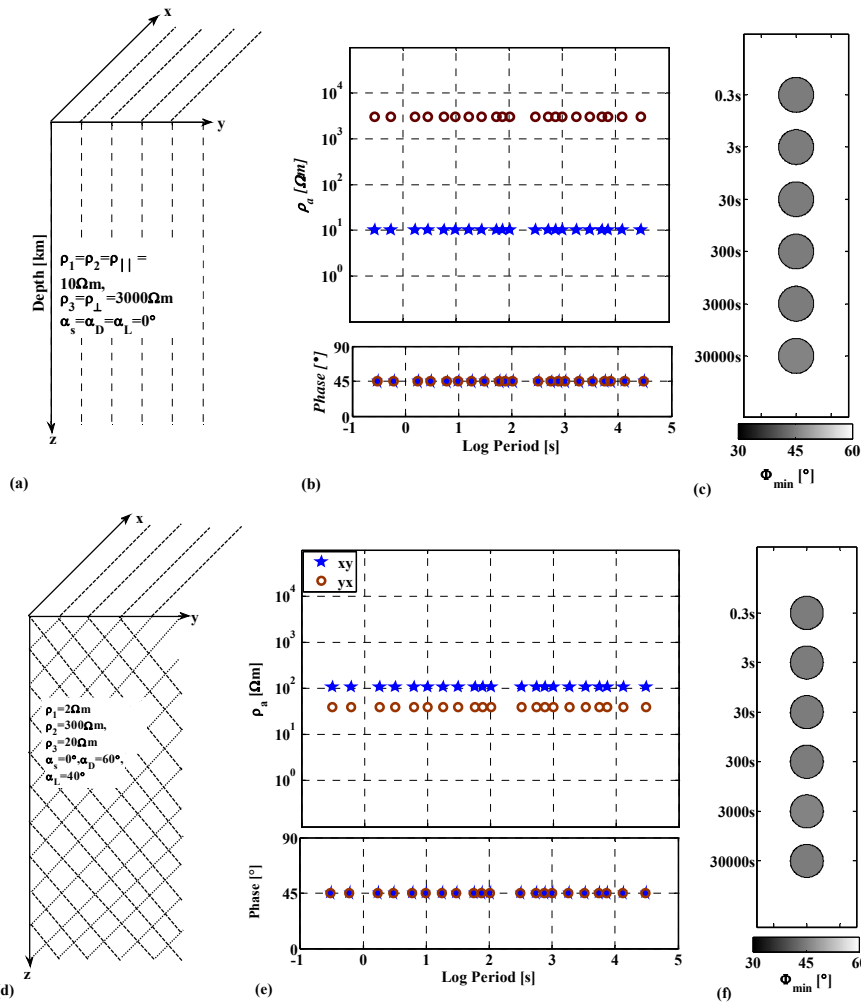
در یک نیم فضای ناهمسانگرد، هیچ تغییر مقاومت ویژه جانبی به طور ماکروسکوپی وجود ندارد. در نتیجه چگالی جریان القایی در همه نقاط درون نیم فضا موازی با سطح است و مؤلفه های قائم میدان مغناطیسی ثانویه ناشی از آنها همدیگر را خنثی می کنند ($H_z = 0$). بنابراین بردار القا همه جا و در همه تناوب ها صفر خواهد بود. لذا نیم فضای همسانگرد و ناهمسانگرد را نمی توان بر اساس پاسخ های فاز و یا بردارهای القای آنها از هم تفکیک کرد و اطلاعات راجع به ناهمسانگردی، منحصرأ در داده های مقاومت ویژه وجود دارد.

در این مقاله نحوه اثر ناهمسانگردی در توابع تبدیل MT با در نظر گرفتن مدل های متعدد از ساختارهای ناهمسانگرد و محاسبه پاسخ های ناشی از آنها با استفاده از کد مدل سازی پیشرو پیک و ورنر (۱۹۹۷)، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور نشان دادن واضح تر اثرات ناهمسانگردی در مدل های بررسی شده، در انتخاب نسبت های ناهمسانگردی و ابعاد هندسی ساختارهای مربوط به آنها اغراق شده است.

۱-۵ نیم فضای ناهمسانگرد

الف- ناهمسانگردی آزیموتی

با در نظر گرفتن دستگاه مختصات دکارتی که محورهای آن در امتداد محورهای اصلی تانسور رسانایی ویژه هستند (شکل ۲a)، تانسور امپدانس شکل پادقتری دارد. اما بر خلاف مورد یک مدل همسانگرد، بزرگی مؤلفه های قطر فرعی این تانسور یکسان نیستند. در این صورت نوسانات میدان مغناطیسی که در امتداد موازی با یکی از محورهای اصلی افقی (x یا y) هستند، چگالی جریانی قائم بر جهت میدان مغناطیسی، القا خواهند کرد. از آنجا که این جریان القایی هم به موازات سطح و هم به موازات یکی از محورهای اصلی است، میدان الکتریکی حاصل، موازی و هم فاز با چگالی جریان القا شده است و بنابراین پاسخ میدان الکتریکی نیز قطبیده خطی خواهد بود و مشابه با میدان الکتریکی القا شده در یک نیم فضای همسانگرد، با میدان مغناطیسی القاگر ۴۵ درجه اختلاف فاز دارد. ولی دامنه میدان الکتریکی القا شده در چنین محیطی با تغییر جهت میدان القاگر مغناطیسی تغییر خواهد کرد. بنابراین مقدار مقاومت ویژه ظاهری با تغییر جهت قطبش میدان مغناطیسی تغییر خواهد کرد و همان مقادیر مقاومت ویژه در امتداد محورهای اصلی را دارد. چنانکه در شکل ۲b، $\rho_{xy} \neq \rho_{yx}$ اما $\phi_{xy} = \phi_{yx}$ است.



شکل ۲. پاسخ مقاومت ویژه، فاز و تانسور فاز مربوط به یک نیم‌فضای ناهمسانگرد. نتایج نشان داده شده در ردیف بالا (شکلهای a-c)، مربوط به نیم‌فضای ناهمسانگردی است که در آن محورهای اصلی مقاومت ویژه ناهمسانگرد بموازات محورهای مختصات (X,Y,Z) هستند. در این مثال مقاومت ویژه‌های اصلی در جهتهای X, Z برابر بوده و صفحه XZ که توسط خط‌چین‌ها در (a) نمایش داده شده را می‌توان بعنوان صفحه لوحه (foliation plane) در نظر گرفت که مقاومت ویژه‌های $\rho_{\perp} = \rho_{\parallel} = 10 \Omega m$ و بموازات $\rho_{\perp} = 3000 \Omega m$ قائم بر لوحه دارد. (b) مؤلفه‌های XY, YX مقاومت ویژه‌های ظاهری (ρ_{XY} , ρ_{YX}) و فازها (Φ_{XY} , Φ_{YX}). (c) نمایش بیضی‌های تانسور فاز در پریودهای مختلف. نمایشهای متناظر برای مدل ناهمسانگرد کلی، درجائیکه شیب و سوگیری غیرصفر هستند و همه مقاومت ویژه‌های اصلی متفاوت هستند، در شکلهای (d) تا (f) نمایش داده شده است. در هر دو مورد پاسخهای فاز با نتیجه حاصل از یک نیم‌فضای همسانگرد یکسان بوده و بیضی تانسور دایره‌ای به شعاع واحد است ($\Phi_{min} = \Phi_{max} = 1$).

مشترک دو محیط هیچ تغییری ندارد اما در جهت X

کوچک‌تر شده است ($\rho_x = \rho_{\parallel} = 10 \Omega m$).

الف- لایه همسانگرد روی نیم‌فضای ناهمسانگرد

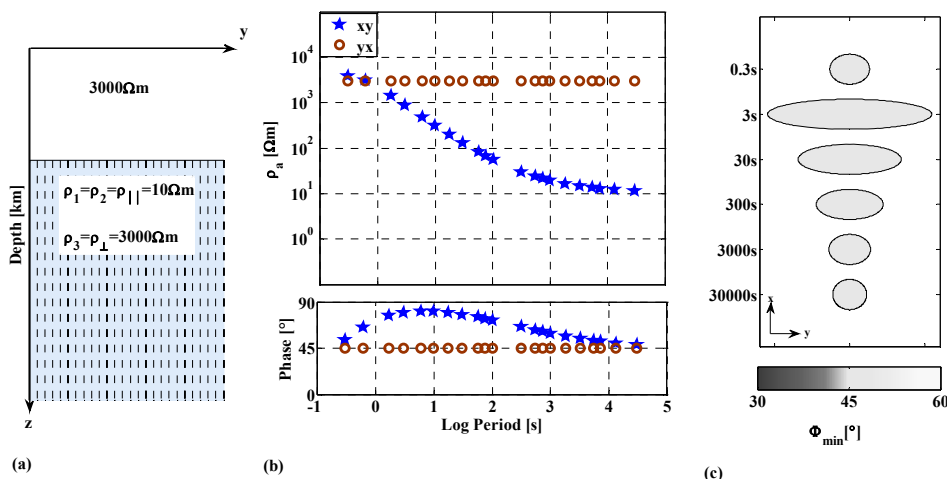
مقادیر مقاومت ویژه و فاز به دست آمده از این مدل در شکل ۳b و بیضی‌های تانسور فاز در یک محدوده از

۲-۵ ساختارهای ناهمسانگرد یک‌بعدی

در ابتدا مورد خاص ناهمسانگردی آزیموتی ($\alpha_D = \alpha_L = 0$) را در نظر می‌گیریم و به منظور ساده‌سازی بیشتر مقدار مقاومت ویژه عرضی (در جهت Y) را برابر با مقاومت ویژه لایه همسانگرد می‌گیریم ($\rho_y = \rho_{\perp} = 3000 \Omega m$), در این صورت اگرچه مقدار مقاومت ویژه عرضی در سطح

فاز به موازات جهت‌های قطبش میدان مغناطیسی هستند که بیشینه و کمینه اختلاف فاز را با میدان الکتریکی دارند. این نکته که جهت محورهای اصلی تانسور فاز به $H(=H_0)$ وابسته‌اند به جای آنکه به $E(=DE_0)$ وابسته باشند، اطلاعات مربوط به جهت، موجود در پاسخ فاز منطقه‌ای را در حضور واپیچش گالوانیکی، محفوظ نگه می‌دارد (کالدول و همکاران، ۲۰۰۴). در تناوب‌های بسیار بلند ($S > 3000$) اثر تقابل مقاومت ویژه که در سطح مشترک دو محیط وجود دارد، ناچیز و پاسخ‌های فاز مشابه با پاسخ یک نیم‌فضا است. این رفتار بیضی‌های تانسور فاز بیانگر آن است که جدایش‌های فازی MT در نتیجه تغییرات مکانی یا گرادیان رسانایی ویژه ایجاد شده‌اند و به خواص عمده ذاتی تانسور رسانایی ویژه بستگی ندارند. تنها نشان حضور ناهمسانگردی در این تناوب‌ها در پاسخ مقاومت ویژه ظاهری وجود دارد.

متناوب‌های متفاوت در شکل ۳C نمایش داده شده‌اند. در متناوب‌های کوتاه، پاسخ به دست آمده تنها به لایه همسانگرد بالایی مربوط می‌شود، به طوری که مقاومت ویژه‌ها و فازهای مربوط به دو مد YX ، XY برابر هستند و تانسور فاز نیز به شکل دایره‌ای با شعاع واحد است. در تناوب‌های بزرگ‌تر از ۱S، تقابل رسانایی ویژه‌ای که در مدل پیش گفته در جهت X وجود دارد باعث شده تا ρ_{xy} کاهش و Φ_{xy} افزایش یابد. اما از آنجا که مقاومت در جهت Y تغییری ندارد، مقادیر ρ_{yx} و Φ_{yx} ثابت باقی مانده‌اند (شکل ۳b). در این محدوده زمانی تانسور فاز به شکل بیضی درمی‌آید که محور اصلی آن به موازات جهت H_y است. از آنجا که هیچ تغییر رسانایی ویژه‌ای در جهت Y وجود ندارد، $\Phi_{min}=1$ است. نکته قابل توجه دیگر جهت محور اصلی بیضی تانسور فاز است که بر جهت مربوط به بزرگ‌ترین مؤلفه فازی (Φ_{xy})، به موازات E_x عمود است. به عبارت دیگر محورهای اصلی تانسور

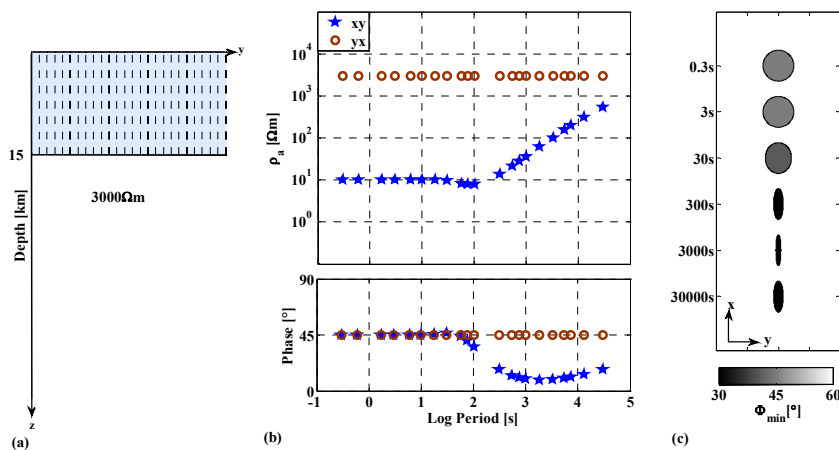


شکل ۳. (a) مدل دولایه متشکل از یک لایه ناهمسانگرد زیرین، محورهای اصلی تانسور مقاومت ویژه در امتداد محورهای مختصاتی (X, Y, Z) می‌باشند. یک لایه همسانگرد ۱۵ کیلومتری با مقاومت ویژه $3000 \Omega m$ بر روی آن واقع شده است. نیم‌فضای ناهمسانگرد زیرین همان مقاومت ویژه‌ها و محورهای اصلی شکل (a) را دارد یعنی $\rho_{||}=10 \Omega m$ در صفحه لوحه (XZ) ، که در شکل (a) توسط خط چین نشان داده شده و $\rho_{\perp}=3000 \Omega m$ در جهت Y قائم بر صفحه لوحه. (b) مؤلفه‌های مقاومت ویژه (ρ_{yx}, ρ_{xy}) و فاز تانسور امپدانس (Φ_{yx}, Φ_{xy}) . (c) بیضی‌های تانسور فاز در پریودهای متفاوت. سایه‌زنی بکارگرفته شده در مورد بیضی‌های تانسور، مقدار فاز مینیمم را نشان می‌دهد، که در این مورد مقدار ثابت 45° را دارند. نکته قابل توجه آن است که در محدوده پریودی که جدایش فازی رخ داده است، محور اصلی بیضی‌های تانسور فاز بموازات محور Y ، قائم بر جهت رسانائی ماکزیمم (مقاومت ویژه مینیمم)، می‌باشند.

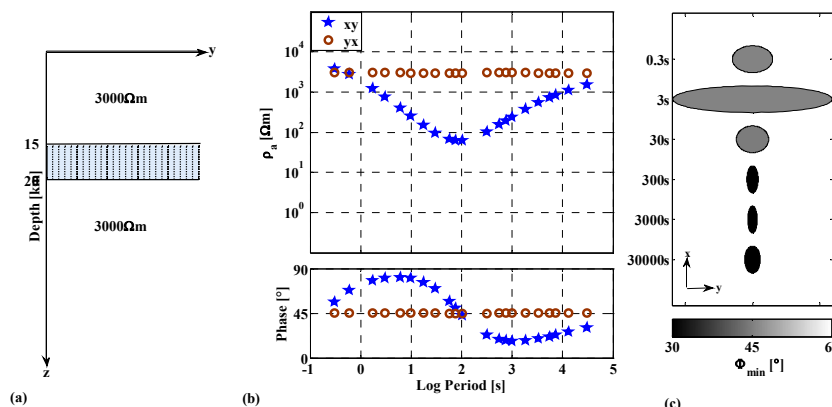
مورد قبل (شکل ۳d) قائم راست. همان‌گونه که انتظار می‌رود در تناوب‌های خیلی بلند، هم‌فاز و هم‌مقاومت ویژه ظاهری به پاسخ مربوط به یک نیم‌فضای همسانگرد، نزدیک می‌شوند (شکل ۴b, d).

ج- لایه ناهمسانگرد درون یک نیم‌فضای همسانگرد در این مثال یک لایه ناهمسانگرد به ضخامت ۵km با همان ویژگی‌هایی که در مثال قبل در نظر گرفته شده بود درون یک نیم‌فضای همسانگرد جا گرفته است. تغییرات فاز اثر هر کدام از سطح مشترک‌ها را نشان می‌دهد به طوری که در پاسخ به تقابل مقاومت ویژه‌ای که در امتداد X در سطح و کف لایه ناهمسانگرد وجود دارد Φ_{xy} ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این درحالی است که Φ_{yx} در اثر نبود تقابل رسانایی ویژه در جهت Y ثابت است. اثر این تقابل‌ها همچنین در جهت‌گیری محور اصلی بیضی تانسور فاز نیز بارز است، طوری که این جهت‌گیری‌ها براساس اینکه تقابل مقاومت ویژه در امتداد X با افزایش عمق، افزایش یا کاهش می‌یابد، ۹۰ درجه با هم تفاوت دارند (شکل ۵c).

ب- لایه ناهمسانگرد روی یک نیم‌فضای همسانگرد در این مورد نیز فرض بر آن است که در مرز بین لایه‌ها، تغییر مقاومت ویژه در جهت Y وجود نداشته باشد. در تناوب‌های کوتاه ($> 10s$) ρ_{yx} و ρ_{xy} مقادیر مربوط به مقاومت ویژه‌های اصلی ناهمسانگردی را دارند و هر دو مؤلفه‌های فاز Φ_{yx} و Φ_{xy} ۴۵ درجه هستند. پس در این محدوده بسامدی، بیضی تانسور فاز به شکل دایره‌ای به شعاع واحد است (شکل ۴c) و پاسخ فاز مشابه با پاسخ یک لایه همسانگرد است و فقط مقاومت ویژه ظاهری آشکارا ناهمسانگردی را نشان می‌دهد. جدایش فازی زمانی رخ می‌دهد که تناوب به مقادیر $< 30s$ برسد و عمق اکتشاف (که با عمق پوست برای مقاومت ویژه $10\Omega m$ تعیین می‌شود) از ضخامت لایه اول بیشتر شود. از آنجا که مقاومت ویژه در جهت X با افزایش عمق زیاد می‌شود Φ_{xy} و طول محور بیضی تانسور فاز در جهت Y کاهش می‌یابد، درحالی که Φ_{yx} و طول محور بیضی تانسور فاز در جهت X به علت نبود تغییر مقاومت ویژه در جهت Y، ثابت باقی‌مانده است. نکته قابل‌توجه راستای محور اصلی تانسور فاز است که بر راستای محور اصلی بیضی‌ها در



شکل ۴. (a) مدل یک‌بعدی دولا‌به‌متشکل از یک لایه همسانگرد زیرین ($3000\Omega m$) که بر روی آن یک لایه ۱۵ کیلومتری ناهمسانگرد با همان محورهای اصلی و مقاومت ویژه‌های شکل ۳ قرار گرفته است. (b) مؤلفه‌های مقاومت ویژه (ρ_{xy}, ρ_{yx}) و فاز تانسور امپدانس (Φ_{xy}, Φ_{yx}) . (c) بیضی‌های تانسور فاز در پریودهای متفاوت. فاز ماکزیمم (مربوط به Φ_{yx}) ثابت (45°) بوده و بموازات محور X می‌باشد در حالی که Φ_{min} (مربوط به Φ_{xy})، همانطور که سایه روشن نشان می‌دهد، با افزایش پریود کاهش می‌یابد.



شکل ۵. مدل یک بعدی سه لایه که در آن یک لایه ۵ کیلومتری ناهمسانگرد در عمق ۱۵ km از سطح و در یک نیم فضای همسانگرد ۳۰۰۰ Ohm-m قرار گرفته است. مقاومت ویژه‌ها و محورهای اصلی لایه ناهمسانگرد با شکل‌های ۳ و ۴ یکی می‌باشند. (b) مؤلفه‌های مقاومت ویژه (ρ_{xy}, ρ_{yx}) و فاز تانسور امپدانس (Φ_{xy}, Φ_{yx}) . (c) بیضی‌های تانسور فاز در پریودهای متفاوت. نکته قابل توجه آن است که جهتگیری Φ_{max} با افزایش پریود باندازه 90° تغییر کرده است.

مقاومت ویژه عرضی مقدار کوچک تری برابر با $(\rho_{\perp} \cos^2 \alpha_D + \rho_{\parallel} \sin^2 \alpha_D)$ دارند.

ه- لایه با ناهمسانگردی کلی

مورد کلی تری که در آن یک لایه همسانگرد روی یک نیم فضای ناهمسانگرد با مقاومت ویژه‌های متفاوت در امتداد هر محور اصلی، شیب و سوگیری مخالف صفر قرار گرفته در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این مثال تصاویر محورهای اصلی تانسور مقاومت ویژه ناهمسانگرد روی صفحه افق به گونه‌ای هستند که بیشینه و کمینه مقاومت ویژه‌های تصویر شده با دستگاه مختصات اندازه گیری (x, y) هم‌راستا نیستند و در نتیجه محورهای اصلی تانسور فاز به موازات محورهای مختصاتی نیستند (شکل ۷c).

در مدل‌های یک بعدی $(\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0)$ ، با توجه به معادلات ماکسول می‌توان نشان داد که میدان مغناطیسی ثانویه، هیچ مؤلفه قائمی ندارد، بنابراین بردار القا صفر خواهد بود. به طور کلی در مدل زمین لایه‌ای، نبود میدان مغناطیسی قائم در حالی که مؤلفه‌های xy, yx تانسور

د- لایه با ناهمسانگردی شیب‌دار

شکل ۶ پاسخ‌های MT را برای مدلی مشابه با شکل ۳ نشان می‌دهد اما در این مورد ناهمسانگردی در نیم فضای زیرین به صورت شیب‌دار و با شیب $\alpha_D = 60^\circ$ است. در این حالت یکی از محورهای اصلی ناهمسانگردی درون سطح افق قرار گرفته $(\alpha_L = 0)$ و بدون آنکه از کلیت مسئله کاسته شود فرض می‌شود که این محور به موازات محور X در صفحه افق است، در این صورت تصاویر افقی بیشینه و کمینه مقاومت ویژه به موازات محورهای (x, y) بوده و فاز مؤلفه‌های تانسور امپدانس Φ_{xy}, Φ_{yx} به ترتیب برابر با $tg^{-1} \Phi_{max}$ خواهند بود.

پاسخ MT نمایش داده شده در شکل ۶b لزوماً مشابه با شکل ۳b است غیر از آنکه تصویر مقاومت ویژه عرضی $(\rho_{\perp} = 3000 \Omega m)$ روی صفحه افق کمتر از مقاومت ویژه لایه همسانگرد بالایی است و در نتیجه Φ_{xy}, Φ_{yx} بزرگ تر از ۴۵ درجه هستند. بنابراین پاسخ به دست آمده از این مدل معادل با پاسخ لایه ناهمسانگردی است که محورهای اصلی آن موازی و قائم بر سطح افق بوده و مقدار مقاومت ویژه جانبی همان $\rho_{\parallel} = 10 \Omega m$ اما

نیم‌فضای همسانگرد ($500\Omega m$) است (شکل ۸b). یک رسانای سطحی در یک طرف هر دو مدل قرار گرفته است، حالتی که ممکن است در پیمایش‌های MT نزدیک اقیانوس رخ دهد، همچنین یک رسانای عمیق‌تر درون خشکی و در فاصله 220 km از اقیانوس قرار گرفته است. در نزدیکی رسانای سطحی محورهای اصلی تانسور فاز به موازات بردارهای القا و قائم بر جهت استرایک ساختار، قرار گرفته‌اند.

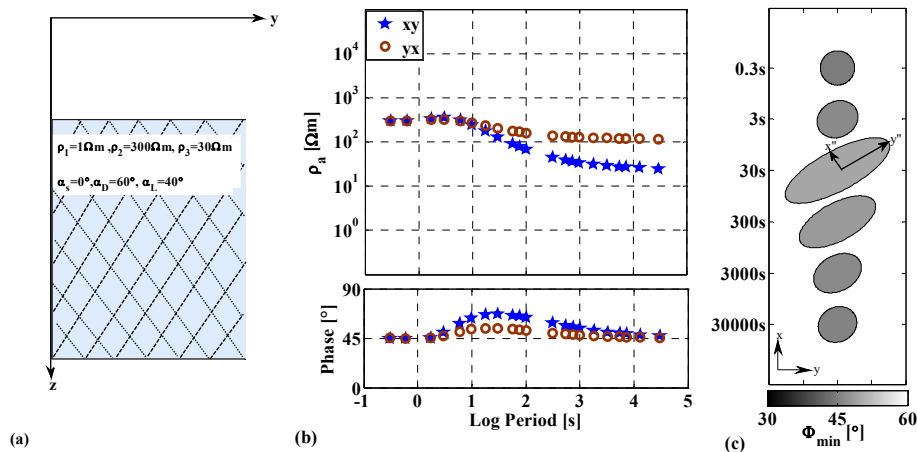
جدایش فازی بزرگی بین 30 s و 100 s در بخش مرکزی منطقه، جاییکه بردارهای القا نیز بسیار کوچک هستند، رخ داده است. اما در این منطقه تمایز بین پاسخ‌های فازی (تنها قسمتی از پاسخ‌ها که از واپیچش گالوانیکی مصون مانده است) هر یک از مدل‌های دو بُعدی ناچیز و عملاً تا وقتی تناوب فراتر از 1000 s شود، قابل توجه نیست. بردارهای القای بزرگی در نزدیکی لبه توده‌های رسانا تولید شده‌اند و تغییرات جانبی طول این بردارها نشان می‌دهد که در این مناطق تغییرات جانبی رسانایی ویژه مهم است.

امپدانس باهم متفاوت هستند، بیانگر وجود ناهمسانگردی است.

۳-۵ ساختارهای ناهمسانگرد دو بُعدی

اساساً نبود بردارهای القا و همگونی مکانی جدایش بین منحنی قطبش‌های گوناگون داده‌ها، تشخیص وجود ناهمسانگردی در ساختارهای زیرسطحی لایه‌ای را آسان می‌سازد، بار و همکاران (2000)، هایزه و همکاران (2006). اما در وضعیت‌های واقعی‌تر که ساختارهای پیچیده مقاومت‌ویژه دو بُعدی و سه بُعدی روی ماده ناهمسانگرد واقع شده‌اند، تمایز بین پاسخ ساختارهای ناهمسانگرد و همسانگرد دو بُعدی (یا سه بُعدی) مشکل است. طبیعت این دشواری را با مقایسه پاسخ‌های ناشی از مدل‌های دو بُعدی ساده که در شکل ۸ نشان داده شده می‌توان توضیح داد.

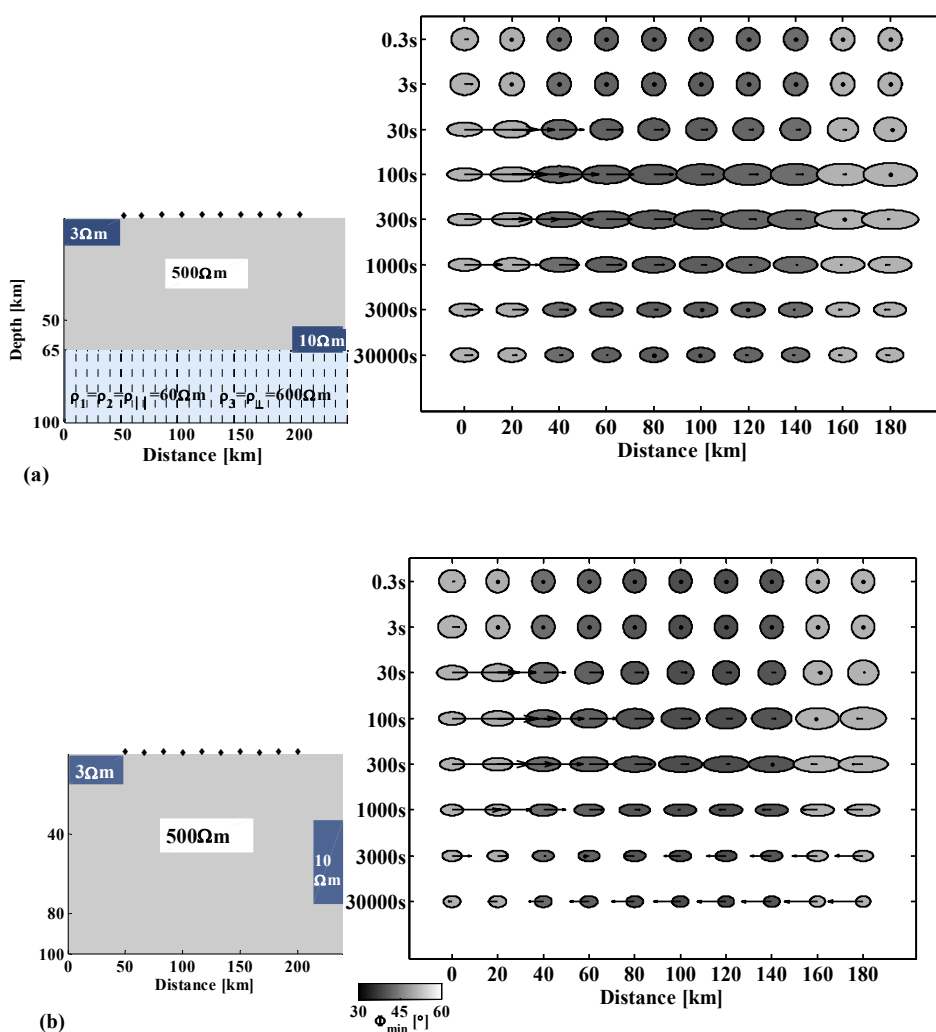
اولین مدل از یک رو لایه همسانگرد (با مقاومت ویژه $500\Omega m$) که در زیر آن یک نیم‌فضای ناهمسانگرد واقع شده (شکل ۸a) تشکیل شده است و دومین مدل یک



شکل ۷. مدل لایه‌ای یک بُعدی متشکل از یک لایه همسانگرد ($300\Omega m$) که بر روی یک نیم‌فضای ناهمسانگرد با مقاومت ویژه‌های اصلی و جهت‌گیری‌هایی که در شکل نشان داده شده، قرار گرفته است. (b) مؤلفه‌های مقاومت ویژه (ρ_{xy} , ρ_{yx}) و فاز تانسور امپدانس (ϕ_{xy}, ϕ_{yx}) . (c) بیضی‌های تانسور فاز در پروندهای متفاوت. توجه داشته باشید که محورهای اصلی و فرعی بیضی‌ها با محورهای مختصاتی (X, Y) موازی نیستند.

گوناگون، ایجاد شده باشد. بنابراین محتوی بردارهای القای کوچک که تحت تأثیر واپیچش گالوانیکی نیز هستند به آسانی قابل ارزیابی نیستند. در نتیجه شرایطی که برای استنتاج صریح ناهمسانگردی از داده‌های بردار القا و فاز لازم است، بسیار سخت و دقیق و مستلزم تحلیل مفصل داده‌های یک منطقه وسیع (به شعاع بزرگ‌تر از عمق اکتشاف) است.

اگرچه بردارهای القا در مدل همسانگرد (شکل ۸b) در تناوب‌های بالاتر از ۱۰۰۰S به نحو چشمگیری از مدل ناهمسانگرد (شکل ۸a) متفاوت هستند اما در عمل یک مؤلفه قائم میدان مغناطیسی کوچک می‌تواند با ساختارهای رسنای سه‌بعدی که مثلاً در فاصله ۲۰۰km از مرکز نیم‌رخ واقع شده‌اند و یا در نتیجه خنثی شدن مؤلفه‌های قائم مغناطیسی ناشی از توده‌های رسنای



شکل ۸. مدل‌های دوبعدی ناهمسانگرد (a) و همسانگرد (b) که حاوی یک رسنای همسانگرد ۱۰ Ωm درون زمینه ۵۰۰ Ωm و یک رسنای (۳ Ωm) سطحی به ضخامت ۵ km، نشان‌دهنده اقیانوسی در فاصله ۲۲۰ km از رسنای عمیق‌تر، می‌باشد. در (a) یک نیم‌فضای ناهمسانگرد با $\alpha_s = \alpha_D = \alpha_L = 0$ و مقاومت‌ویژه‌های اصلی $\rho_{\parallel} = 60 \Omega m$ و $\rho_{\perp} = 600 \Omega m$ در زیر یک رولایه همسانگرد واقع شده است. بیضی‌های تانسور فاز و بردارهای القا در موقعیت ایستگاهها نمایش داده شده‌اند.

۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله نحوه اثرگذاری حضور ساختارهای ناهمسانگرد الکتریکی زیرسطحی بر توابع تبدیل اندازه‌گیری شده MT بررسی شده است. با توجه به آنکه اثرات گالوانیکی ناشی از بی‌هنجاری‌های سطحی کوچک‌مقیاس، دامنه مؤلفه‌های تانسور امیدانس را به شدت معشوش می‌سازند، بر اطلاعات فاز که به صورت تانسور فاز داده می‌شود تأکید بیشتری شده و جدایش قطبش‌های متفاوت مؤلفه‌های این تانسور با بررسی نحوه تغییرات بیضی‌نمایش دهنده آن، مورد بررسی قرار گرفته است. مثال‌های عددی بررسی شده، این پیشبینی نظری را که جدایش‌های فاز MT به علت گرادیان‌های افقی یا قائم‌رسانایی ویژه ایجاد می‌شوند، کالدول و همکاران (۲۰۰۴) و هایزه و همکاران (۲۰۰۶)، مورد تأیید قرار می‌دهند. بنابراین جدایش‌های فاز که در نتیجه حضور لایه ناهمسانگرد تولید می‌شود، در سطح مشترک لایه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد، ایجاد شده و در یک مدل یک‌بُعدی تغییرات قائم‌مقاومت‌ویژه (یا تقابل مقاومت ویژه) عامل جدایش‌های فاز است. به این ترتیب جدایش‌های فاز MT اساساً با جدایش موج برشی که با ویژگی‌های کلی ناهمسانگردی تعیین می‌شوند، متفاوت است. خصوصاً بر سطح یک نیم‌فضای ناهمسانگرد، جدایش موج برشی مشاهده می‌شود اما هیچ‌گونه جدایش‌های فاز MT وجود ندارد.

در مدل‌های پیچیده‌تری که ساختارهای مقاومت‌ویژه دو بُعدی و سه بُعدی روی ماده ناهمسانگرد قرار گرفته‌اند، تمایز بین پاسخ ساختارهای ناهمسانگرد و همسانگرد دو بُعدی (یا سه بُعدی) مشکل است. علت این دشواری علاوه بر نکته نظری اشاره شده، شاخص‌هایی است که به طور معمول در اندازه‌گیری‌های MT استفاده می‌شوند تا میزان ناهمگنی جانبی را ارزیابی کنند، مثل بزرگی میدان مغناطیسی قائم (بردارهای القا) که حتی در

موقعیت‌های ساده دو بُعدی، ممکن است کوچک و گمراه‌کننده باشد و همچنین تنها در صورتی که سطح مشترک لایه ناهمسانگرد مولد جدایش‌های افقی نباشد، غیر صفر خواهد بود. بنابراین استنتاج ناهمسانگردی بر اساس جدایش‌های فاز و بردارهای القا اثبات مستدلی لازم دارد و مستلزم تحلیل مفصل داده‌های یک منطقه وسیع (به شعاع بزرگ‌تر از عمق اکتشاف) است.

منابع

- Bahr, K., Bantin, M., Jantos, Chr., Schneider, E. and Storz, W., 2000, Electrical nistropy from electromagnetic array data: implications for the conduction mechanism and for distortion at long periods. *Phys. Earth Planet. Int.* **119**, 237–257
- Bahr, K. and Simpson, F., 2002, Electrical anisotropy below slow and fast-moving plates: paleoflow in the upper mantle? *Science*, **295**, 1270–1272.
- Brasse, H., Kapinos, G., Li, Y., Mütschard, L., Soyer, W. and Eydram, D., 2008, Structural electrical anisotropy in the crust at the South-Central Chilean continental margin as inferred from geomagnetic transfer functions. *Phys. Earth Planet. In.* **173**, 7-16, doi:10.1016/j.pepi.2008.10.017.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C., 2004, The magnetotelluric phase tensor. *Geophys. J. Int.* **158**, 457–469.
- Eaton, D. W., Jones, A. G. and Ferguson, I. J., 2004, Lithospheric anisotropy structure from collocated teleseismic and magnetotelluric observations: Great Slave Lake shear zone, Northern Canada. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L19614, doi:10.1029/2004GL020939.
- Evans, R. L., Hirth, G., Baba, K., Forsyth, D., Chave, A. and Mackie, R., 2005, Geophysical evidence from the MELT area for compositional controls on oceanic plates. *Nature* **437**, 249–252.
- Eisel, M. and Bahr, K., 1993, Electrical anisotropy in the lower crust of British-Columbia—an interpretation of a magnetotelluric profile after tensor decomposition. *J. Geomag. Geoelectr.* **45**, 1115–1126.
- Gatzemeier, A. and Moorkamp, M., 2005, 3D modelling of electrical anisotropy from electromagnetic array data: hypothesis testing

- for different upper mantle conduction mechanisms. *Phys. Earth Planet. Int.* **749**, 225–242.
- Heise, W., Caldwell, T. G., Bibby, H. M. and Brown, C., 2006, Anisotropy and phase splits in magnetotellurics. *Phys. Earth Planet. Int.* **158**, 107–121.
- Jiracek, G. R., 1990, Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction. *Surveys Geophys.* 2–3, 163–204.
- Kellett, R. L., Mareschal, M. and Kurtz, R. D., 1992, A model of lower crustal electrical anisotropy for the Pontiac sub-province of the Canadian shield. *Geophys. J. Int.* **111**, 141–150.
- Leibecker, J., Gatzemeier, A., Honig, M., Kuras, O. and Soyer, W., 2002, Evidence of electrical anisotropic structures in the lower crust and upper mantle beneath the Rhenish Shield. *Earth Planet. Sci. Lett.* **202**, 289–302.
- Mareschal, M., Kellett, R. L., Kurtz, R. D., Ludden, J. N., Ji, S. and Bailey, R. C., 1995, Archaean cratonic roots, mantle shear zones and deep electrical anisotropy. *Nature* **375**, 134–137.
- Pek, J. and Verner, T., 1997, Finite difference modelling of magnetotelluric fields in 2D anisotropic media. *Geophys. J. Int.* **128**, 505–521.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1986, *Numerical Recipes—the Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Simpson, F., 2001, Resistance to mantle flow inferred from the electromagnetic strike of the Australian upper mantle. *Nature* **412**, 632–635.
- Weidelt, P., 1999, In: Oristaglio, M., Spies, B., Cooper, M.R. (Eds.), *3D Conductivity Models: Implications of Electrical Anisotropy, in Three-Dimensional Electromagnetics*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla, pp. 119–137.