

مروری بر پردازش داده‌های مگنتوتلوریک

بهروز اسکوئی^{۱*} و احمدعلی بهروزمند^۲

^۱استادیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۵، ۱۲، ۹، پذیرش نهایی: ۸۶، ۱۰، ۲۵)

چکیده

روش مگنتوتلوریک (MT) یکی از روش‌های ژئوفیزیکی در حوزه بسامد است که در بررسی‌های زیرسطحی از اعماق ده‌ها متر تا چند صد کیلومتر به کار می‌رود. داده‌های صحرائی برداشت شده طی تحقیق MT می‌بایستی پردازش شده و برای وارون‌سازی و تفسیر آماده شوند. در این تحقیق، مروری بر مراحل پردازش داده‌های مگنتوتلوریک شامل تحلیل سری‌های زمانی (چگونگی انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه بسامد) و نیز مراحل موسوم به پردازش دستی داده‌ها، همراه با چند مثال کاربردی عنوان شده است.

واژه‌های کلیدی: مگنتوتلوریک، وارون‌سازی، پردازش

A review of MT data processing

Oskooi, B¹. and Behroozmand, A. A².

¹Assistant professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M.Sc. student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 28 Feb 2007, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Magnetotelluric (MT) method is an important passive surface geophysical method which uses the Earth's natural electromagnetic fields to investigate the electrical resistivity structure of the subsurface. The depth of investigation of MT is much higher than that of other electromagnetic (EM) methods (Vozoff, 1991). For a general conductivity distribution in the Earth, the horizontal electric field components are related to horizontal magnetic field components by the Impedance Tensor (Z):

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Which shows vertical and horizontal variations of subsurface conductivity. Apparent resistivity (ρ_a) and phase (φ) are the desired quantities which are calculated from Impedance matrix by the following expressions:

$$\rho_{ai} = \frac{1}{\mu_o \omega} |Z_i|^2 \quad i = xx, xy, yx, yy, DET \quad (2)$$

$$\phi_i = \text{phase}(Z_i)$$

μ_o and ω are free space permeability and angular frequency. DET is determinant data. Time series are measured in frequency interval of 0.001-1000 Hz and frequency spectra are used to estimate the Impedance Tensor as a function of frequency. The Impedance Tensor determinant (or effective impedance), Z_{DET} , is as below (Berdichevsky and Dmitriev, 1976):

$$Z_{DET} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (3)$$

The advantage of using the determinant data is that it provides a useful average of the impedance for all current directions. Furthermore, no mode identifications (transverse electric, TE mode: current in parallel with the strike; or transverse magnetic, TM-mode: current perpendicular to the strike) are required, static shift corrections are not made, and the dimensionality of the data is not considered, since the effective impedance is believed to represent an average that provides robust 1D and 2D models.

MT data are as time series and information of the subsurface structure cannot be given. Then, MT data must be processed to be prepared for the inversion and interpretation. In the following sections, a review of MT processing steps consisting of time series analysis and also steps called manual processing is presented.

The analysis of the time series: The main problem in the processing of the MT data is that the field observations (raw data) are as time series (figure 1) but the basic theories are in the frequency domain. In this section, an explanation is given to how a single spectral matrix is computed from a specific time series section for all target frequency lines.

Transformation into frequency domain: The time series of each channel (2 electric field components and 3 magnetic field components) are transformed to the Fourier series by FFT (Fast Fourier Transform). Depending on the sampling rate in the specific band and the adjusted section length, different resolution and frequency ranges are achieved.

The trend elimination: Before applying the Fourier transform, the raw data is processed with trend elimination. The trend elimination removes a possible systematic deviation from the x-axes. The mean value is set to zero and a straight line in the data (trend) which differs from the x-axis is removed. Figure 2 illustrates the trend elimination procedure.

The window function (windowing): After the trend elimination, the multiplication of the time series with a window function (windowing) follows. This is necessary in order to suppress side effects (discontinuities are generated at the edges) at the FFT and to obtain an optimum sharp mapping of the frequency spectra.

The fast Fourier transform (FFT): After the time series has been treated with the trend elimination and the windowing the fast Fourier transform (FFT) is applied to the data. The given time series has now been transformed into the frequency domain. All the further steps of computation are done with spectral data.

The calibration of spectra: When registering the time series, the data is affected by the transfer function of the measurement instruments. In order to eliminate this influence, the data must be calibrated. The spectra are multiplied by the reciprocal of the transfer function of the measurement system and by this means almost "cleaned" from the influence of the instruments.

The computation of the Cross and Auto Spectra: For each target frequency the cross and auto spectra are computed from the calibrated spectra. Each of these values results from the sum of spectra over all frequency lines within a window where its middle the target frequency is located. This procedure is repeated for all other target frequency lines. Figure 3 shows an overview about the first part of data analysis.

Data display and using other processing techniques: After the first steps of data analysis, the MT data are shown as apparent resistivity and phase. To exemplify, one of these data (MT survey in Inche-Boron area) is shown in figure 4.

In addition to than these steps, some manual processing (like: Outliers elimination, Topographic effects correction and static shift correction) must be done on the data.

Outliers are the data values which do not obey the data curve direction. These data are distinct and must be removed. Figure 5 shows an example of Outliers elimination procedure.

Topographic characteristics force the currents to flow in patterns other than those of flat areas and affect both magnetic and (especially) electric fields. Thus, impedances are affected too. Nowadays, topographic effect correction is done using several computer programs.

Static shift is one of the disorders that arise from shallow conductors; therefore static shift must be corrected as one of the MT data processing steps. In the absence of sufficient information about the near surface distortions, which is usually provided by extra work like TEM and VES, one has to consider the determinant data for the inversion to avoid any misinterpretation. Thus, we can use the determinant data as an effective replacement for the static shift correction.

Conclusions: The MT data must be processed to be prepared for the inversion and interpretation. These data are acquired in the time domain and therefore the process of the time series (consisting of trend elimination, windowing, transformation to the frequency domain by FFT, calibration of spectra and also computation of the cross and auto spectra) is carried out as the first steps of MT data analysis. After displaying the data as apparent resistivity and phase, some manual processing (like: Outliers elimination, Topographic effects correction and static shift correction) are done on the data. Correct process of the MT data as mentioned before helps us to find the actual subsurface models and therefore doing them is recommended before inversion and interpretation of the data.

Key words: Magnetotelluric, Inversion, Processing

۱ مقدمه

(۱۹۹۱) آن را بسط دادند. اندازه‌گیری‌های مؤلفه‌های افقی میدان الکترومغناطیسی طبیعی برای ایجاد تانسور پاگیری (امپدانس) مختلط Z ، درحکم تابعی از بسامد به کار می‌رود:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

که نشان‌دهنده تغییرات عمودی و جانبی هدایت ویژه الکتریکی زیرسطحی در محل مورد بررسی است. تانسور

روش مگنتوتلوریک (Magnetotelluric, MT) فن ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال (passive) است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین برای بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند. این روش را می‌توان در کاوش‌های زیرسطحی از ده‌ها متر تا اعماق ده‌ها کیلومتر به کار برد (وزوف، ۱۹۹۱). روش MT را اولین بار تیکونو (۱۹۵۰) و کاننارد (۱۹۵۳) ارائه کردند و بعد کانتول (۱۹۶۰) و وزوف (۱۹۷۲) و

اطلاعات ساختار زیرسطحی را مستقیماً از آنها استخراج کرد. لذا قبل از وارون‌سازی و تفسیر داده‌ها، باید مجموعه عملیاتی تحت عنوان پردازش (processing) روی داده‌ها صورت گیرد. در این بررسی، مروری کلی بر مراحل پردازش داده‌های مگنتوتلوریک ارائه خواهد شد.

۲ تحلیل سری‌های زمانی

در اولین مرحله از پردازش داده‌های MT، سری‌های زمانی برداشت شده، به بخش‌های مجزا تقسیم می‌شوند. برای هر کدام از این بخش‌ها تحلیل سری‌های زمانی (شامل حذف داده‌های نوفه‌ای و غیره) صورت می‌گیرد. این فرآیند در مورد همه باندهای بسامدی تکرار می‌شود. مسئله اصلی در پردازش داده‌ها این است که مشاهدات صحرائی به صورت تابعی از زمان (سری‌های زمانی) به دست می‌آیند (شکل ۱)، ولی پایه‌های نظری که برای این روش بسط داده شده‌اند و در بخش مقدمه مختصری به آنها اشاره شد، همگی در حوزه بسامد (frequency domain) هستند. بدین ترتیب لازم است قبل از اینکه نظریه با مشاهدات صحرائی منطبق شود، داده‌های صحرائی به حوزه بسامد برده شوند.

۱-۲ تبدیل به حوزه بسامد

سری‌های زمانی هر یک از کانال‌ها (دو کانال شامل مؤلفه‌های الکتریکی و سه کانال شامل مؤلفه‌های مغناطیسی) با استفاده از روش Fast Fourier Transform (FFT) به سری فوریه تبدیل می‌شوند. بسته به نرخ نمونه‌برداری در گستره‌های بسامدی باند مورد نظر و طول سری زمانی انتخابی برای تبدیل فوریه، قدرت تفکیک‌های متفاوت و گستره‌های بسامدی متفاوتی به دست خواهند آمد.

پاگیری اطلاعات خوبی در مورد بعدپذیری (dimensionality) و امتداد ساختارهای رسانا فراهم می‌کند (اسکویی، ۲۰۰۶). مقاومت ویژه ظاهری، ρ_a و فاز، φ ، کمیت‌های مورد نظری هستند که از ماتریس پاگیری با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه‌اند (اسکویی، ۲۰۰۶):

$$\rho_{ai} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_i|^2 \quad (2)$$

$$\varphi_i = \text{phase}(Z_i), \quad i = xx, xy, yx, yy, \text{DET} \quad (3)$$

μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد و ω بسامد زاویه‌ای و DET معرف داده‌های دترمینان (determinant data) است. سری‌های زمانی در بازه بسامد ۱۰۰۰ - ۰/۰۰۱ Hz اندازه‌گیری شده و از طیف بسامد این داده‌ها به منظور برآورد تانسور پاگیری به عنوان تابعی از بسامد استفاده می‌شود. دترمینان تانسور پاگیری که پاگیری مؤثر (effective impedance) نیز خوانده می‌شود، Z_{DET} (بردیچوسکی و دمیتریو، ۱۹۷۶) به صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$Z_{\text{DET}} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (4)$$

مزیت استفاده از داده دترمینان آن است که مقدار میانگینی از پاگیری برای همه جهت‌های جریان فراهم می‌کند. علاوه به تشخیص مد (مد TE: جریان به موازات امتداد یا مد TM: جریان عمود بر امتداد) نیاز نیست، همچنین نیازی به تصحیحات جابه‌جایی ایستا (static shift) نیست و آنالیز بعد (dimensionality analysis) برای مدل‌های طبیعی یک‌بعدی 1D و دوبعدی 2D با استفاده از این داده‌ها به سادگی امکان‌پذیر است (اسکویی، ۲۰۰۶).

همه داده‌های خام برداشت‌شده با روش MT به صورت سری‌های زمانی است، به طوری که نمی‌توان

$$Z_t[t] = Z[t] - \underbrace{\frac{1}{t_n} \sum_{t=1}^{t_n} Z[t]}_{\text{Bias}} - \underbrace{\frac{t}{t_n/2} \left(\sum_{t=1+t_n/2}^{t_n} Z[t] - \sum_{t=1}^{t_n/2} Z[t] \right)}_{\text{Trend}} \quad (5)$$

$$t \in [1 \dots t_n] ; t_n \in [512, 1024, 2048, 4096]$$

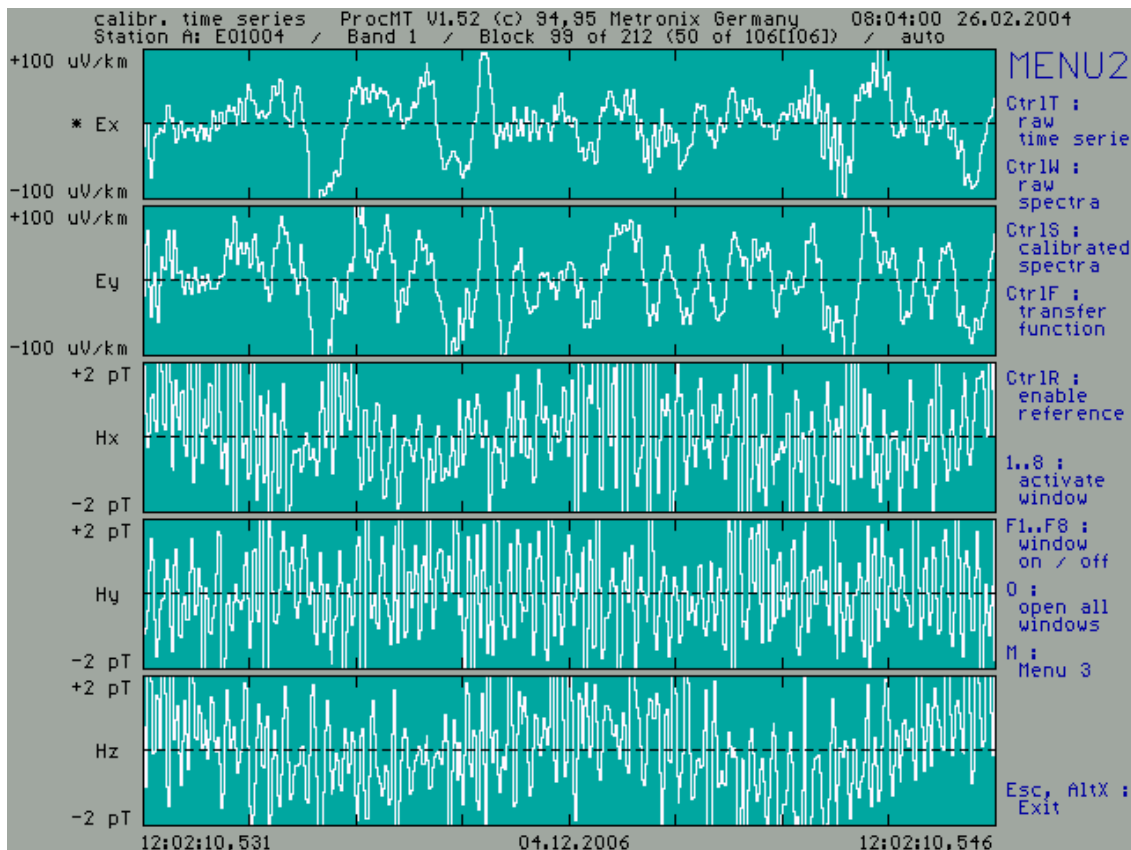
سری‌های زمانی (داده‌های خام): Z :

سری‌های زمانی بدون میل: Z_t

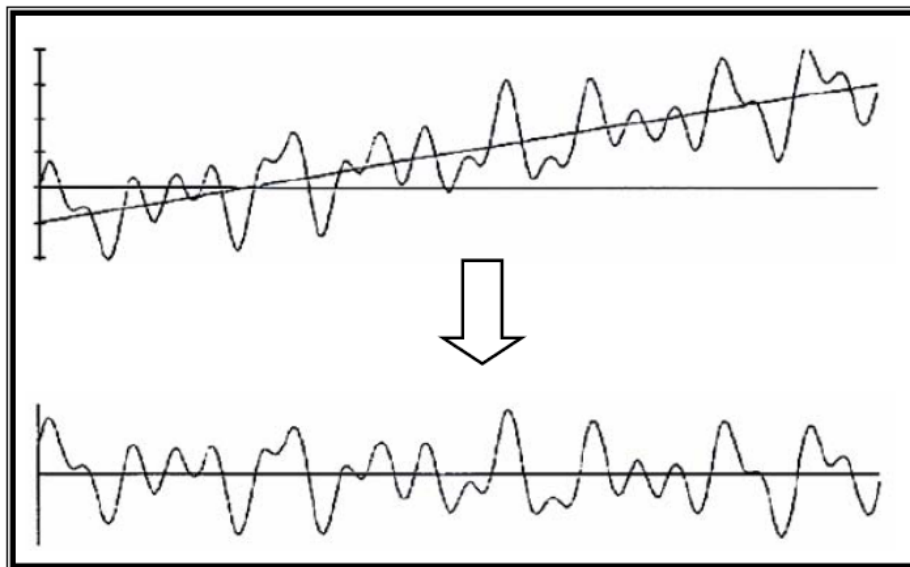
شکل ۲ مثالی از حذف میل داده‌ها را نشان می‌دهد.

۱-۱-۲ حذف میل داده‌ها (Trend Elimination)

قبل از اعمال تبدیل فوریه، سری‌های زمانی برداشت شده با حذف میل، مورد پردازش قرار می‌گیرند. این قسمت از پردازش انحراف قاعده‌مند احتمالی نسبت به محور X را برای داده‌های سری زمانی حذف می‌کند. در این مرحله مقدار میانگین (گرایست، bias) به سمت صفر میل می‌کند و انحراف خط مبنای مستقیم برداشت داده‌ها که متفاوت از محور X است، حذف می‌شود. این کار با رابطه زیر صورت می‌گیرد (مترونیکس، ۱۹۹۳):



شکل ۱. نمایشی از اندازه‌گیری داده‌های مگنتوتلوریک به صورت سری‌های زمانی در یکی از سایت‌های منطقه اینچه برون.



شکل ۲. مثالی از حذف میل از داده‌ها (از مترونیکس، ۱۹۹۳).

روی داده‌ها اعمال می‌شود. بدین ترتیب سری‌های زمانی خام جمع‌آوری شده به حوزه بسامد برده می‌شوند. همه مراحل پس از این مرحله در حوزه بسامد و روی داده‌های طیفی صورت می‌گیرد.

$$E_x(t), E_y(t), H_x(t), H_y(t), H_z(t) \xrightarrow{\text{FFT}} E_x(\omega), E_y(\omega), H_x(\omega), H_y(\omega), H_z(\omega)$$

۲-۱-۴ درجه‌بندی (کالیبره) کردن طیف

در هنگام ثبت سری‌های زمانی، داده‌ها از تابع تبدیل دستگاه‌های اندازه‌گیری تأثیر می‌پذیرند. به منظور حذف این اثر، داده‌ها را باید درجه‌بندی کرد. تابع درجه‌بندی (calibration function) مربوط به داده‌ها، تابعی که در هنگام برداشت با فرستادن تپ‌های (پالس) معلوم و دریافت پاسخ آنها ذخیره می‌شود، به دست می‌آید. در این مرحله، طیف موردنظر از داده‌ها را در معکوس تابع تبدیل دستگاه اندازه‌گیری ضرب می‌شود و بدین ترتیب اثرات دستگاهی، از طیف پاک می‌شود.

۲-۱-۲ اعمال تابع پنجره (پنجره‌گذاری، Windowing) پس از حذف میل، سری‌های زمانی در یک پنجره ضرب می‌شوند. این عمل به‌خاطر اجتناب از اثرات کناری در تبدیل FFT (ناپیوستگی‌هایی که در لبه‌ها ایجاد می‌شوند) و به منظور به دست آوردن تصویری بهینه از طیف بسامدی صورت گیرد. یکی از پنجره‌هایی که برای این منظور استفاده می‌شوند، پنجره هنینگ (Hanning) است (شکل ۳) که به صورت تابع زیر تعریف می‌شود (مترونیکس، ۱۹۹۳):

$$\text{Hanning}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_0}\right) & : |t| \leq T_0 \\ 0 & : |t| > T_0 \end{cases} \quad (6)$$

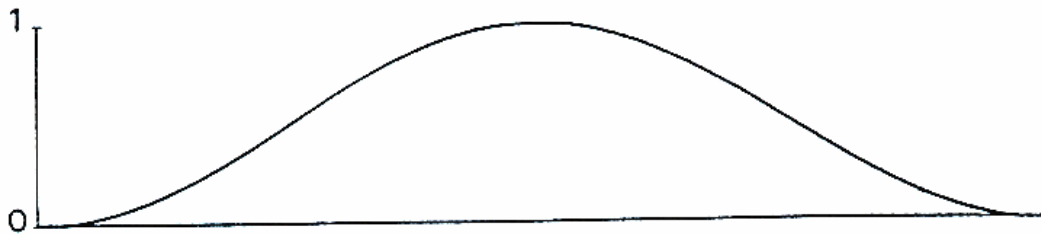
۲-۱-۳ تبدیل فوریه سریع (FFT)

پس از آنکه سری‌های زمانی با حذف مؤلفه میل و پنجره‌گذاری پردازش شدند، تبدیل فوریه سریع (FFT) بر

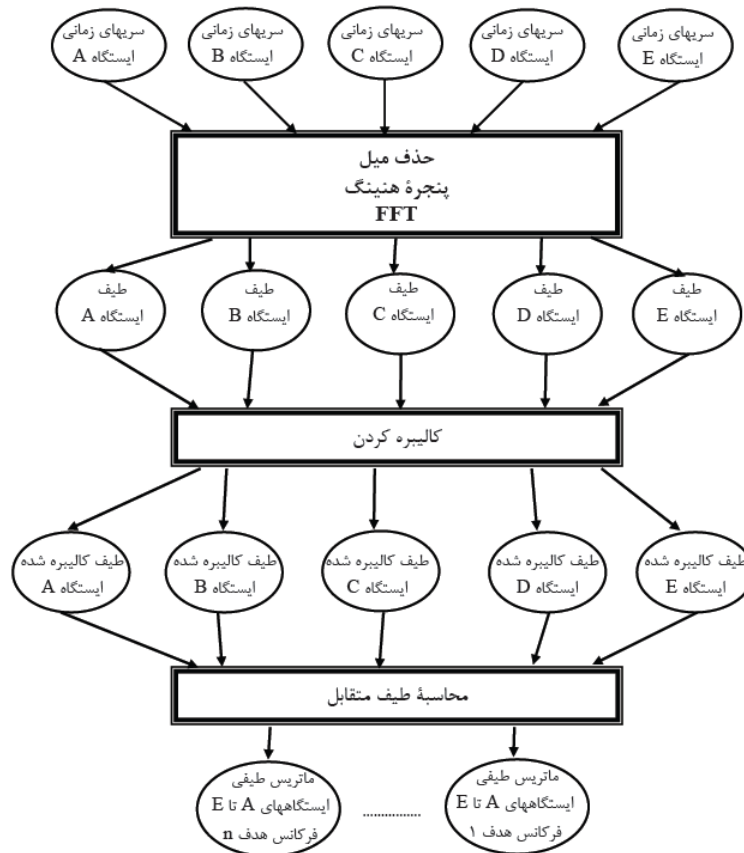
۲-۲ محاسبه طیف متقابل (Cross Spectra) و خود طیفی (Auto Spectra)

بسامدهای هدف صورت گیرد. منظور از بسامدهای هدف، تعداد معدودی بسامد است که در مرحله پردازش به منظور به دست آوردن منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز انتخاب می‌شوند. شکل ۴ نموداری از روند تحلیل داده‌ها، از سری‌های زمانی ثبت شده تا محاسبه ماتریس‌های طیفی را برای یک دستگاه پردازش پنج کاناله نشان می‌دهد.

برای هر بسامد هدف، طیف متقابل و خودطیفی از طیف درجه‌بندی شده محاسبه می‌شود. هر یک از این مقادیر با جمع طیف روی کل خطوط بسامدی در داخل یک پنجره که در وسط آن بسامد هدف واقع شده است، به دست می‌آیند. این عمل باید برای کل



شکل ۳. نمودار پنجره هنینگ که قبل از FFT در سری‌های زمانی ضرب می‌شود (از مترونیکس، ۱۹۹۳).



شکل ۴. نمایی از روند تحلیل داده‌ها، از سری‌های زمانی تا محاسبه ماتریس‌های طیفی.

رایانه‌ای مجزایی نیز برای حذف این اثرات از روی داده‌های MT طراحی شده است.

۳-۳ تصحیح جابجایی ایستا (Static Shift Correction)

جابه‌جایی ایستا به واسطه حضور بار روی ناهمگنی‌های سطحی، کوچک مقیاس و محلی ایجاد می‌شود. این اثر می‌تواند با هر تباین مقاومت ویژه چندبعدی با عمق و ابعاد خیلی کمتر از عمق نفوذ واقعی میدان‌های الکترومغناطیسی ایجاد شود. اثرات واپیچش ناشی از آن فقط روی میدان الکتریکی اثر می‌کند، چنان‌که به صورت جابه‌جایی عمودی در منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری (بین محل‌های مجاور یا بین دو منحنی در یک محل) بدون تفاوت دیگری در شکل منحنی‌ها ظاهر می‌شود. اثر دورافت منحنی‌ها که نتیجه‌ای از حالت رسانایی ویژه در سطح است روی منحنی فاز حتی در مورد بالاترین بسامدها هم ظاهر نمی‌شود. جابه‌جایی ایستا می‌تواند دو ناحیه منبع 2D یا 3D داشته باشد. در حالت 2D، تجمع بار در مد TM منحنی مقاومت ویژه ظاهری را با فاکتور ثابت (هنگامی که ضخامت جسم ناهمگن بسیار کمتر از عمق پوستی باشد) جابه‌جا خواهد کرد، که در این حالت مقاومت ویژه ظاهری به پهنای جسم و نیز موقعیت آن بستگی خواهد داشت. ولی در هر حال یک جابه‌جایی حتی برای اجسام خیلی باریک نیز پیش‌بینی می‌شود. برای مد TE جابه‌جایی‌های بسیار کوچک‌تری انتظار می‌رود و اگر جسم به اندازه کافی باریک باشد، آنگاه جابه‌جایی دیده نخواهد شد. به‌طور شهودی، بزرگی جابه‌جایی ایستا در مورد حالت‌های 3D کوچک‌تر از اثرات مربوط به 2D (با همان شبه مقطع) است. با وجود این، یک پاسخ مشابه TM در حالت 3D بدون توجه به قطبش میدان وجود خواهد داشت. شکل ۷-الف مدلی دوبعدی را با مقادیر مقاومت ویژه و عمق مربوطه نشان می‌دهد و دو

۳ نمایش داده‌ها و به‌کارگیری دیگر ترندهای پردازشی لازم

پس از اعمال مراحل پردازش فوق، داده‌های مگنتوتلوریک به صورت مقاومت ویژه ظاهری (apparent resistivity) و فاز (phase) برحسب بسامد (یا دوره تناوب) نمایش داده می‌شوند. نمونه‌ای از این داده‌ها (حاصل بررسی MT در یکی از نقاط منطقه اینچه برون، واقع در شمال استان گلستان) در شکل ۵ نشان داده شده است.

علاوه بر مراحل پردازش پیش‌گفته، مجموعه‌ای از تصحیحات (موسوم به پردازش دستی، manual processing) نیز در این مرحله باید بر روی داده‌ها صورت گیرد که در زیر به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

۳-۱ حذف خارج از رده‌ها (Outliers Elimination)

خارج از رده‌ها به داده‌هایی اطلاق می‌شود که مقدار آنها خارج از محدوده مقادیر اندازه‌گیری سایر داده‌ها در محل مورد نظر است و لذا از روند کلی منحنی داده‌ها پیروی نمی‌کنند. این داده‌ها روی منحنی‌ها کاملاً مشخص‌اند و بنابراین باید حذف شوند. نمونه‌ای از فرایند حذف خارج از رده‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

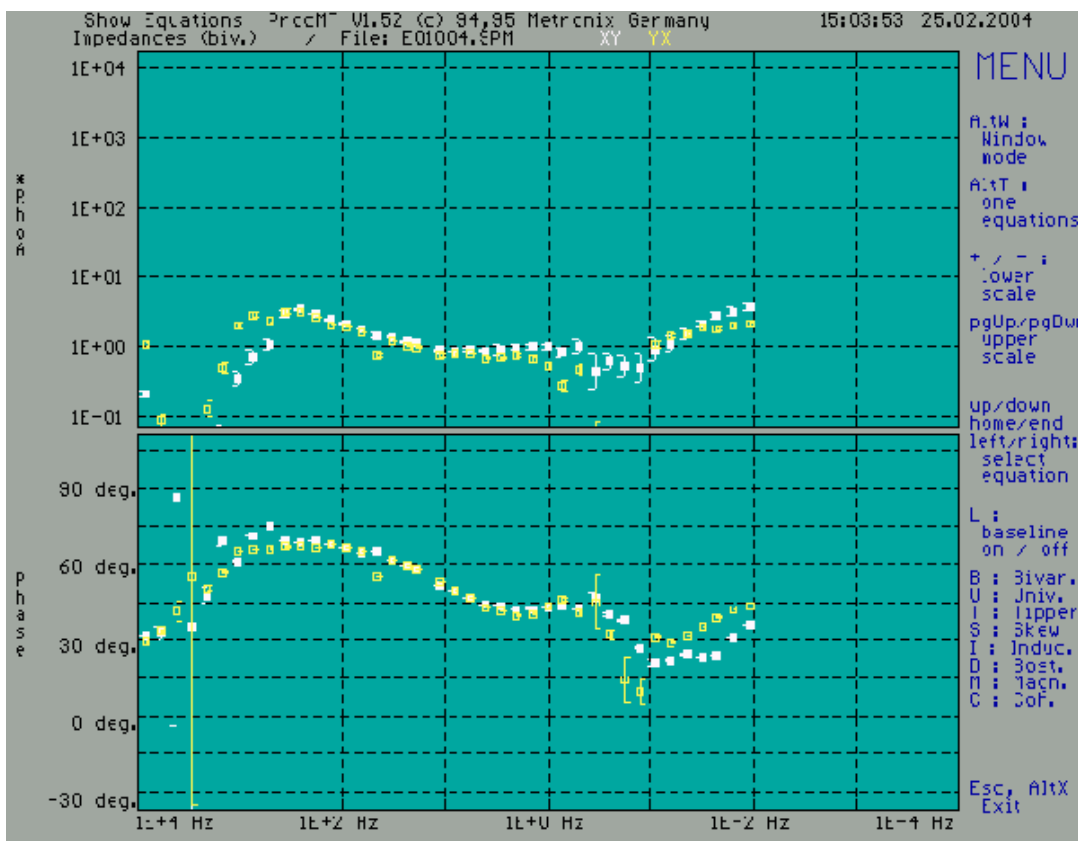
۳-۲ تصحیح اثرات توپوگرافی

ویژگی توپوگرافی جریان‌ها را مجبور می‌کند تا در الگوهای متفاوت از آنچه در حالت مسطح دارند، شارش کنند. بنابراین آنها روی هر دو میدان مغناطیسی و (مخصوصاً) الکتریکی در سطح اثر می‌گذارند. از این‌رو پاکگیری‌ها نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این تأثیر از دیدگاه نظری پیش‌بینی و اغلب در عمل نیز مشاهده می‌شود. اثرات توپوگرافی معمولاً در برنامه‌های رایانه‌ای مورد استفاده برای مدل‌های 2D و 3D مدفون در یک زمین صاف قرار می‌گیرند. البته در این راستا، برنامه‌های

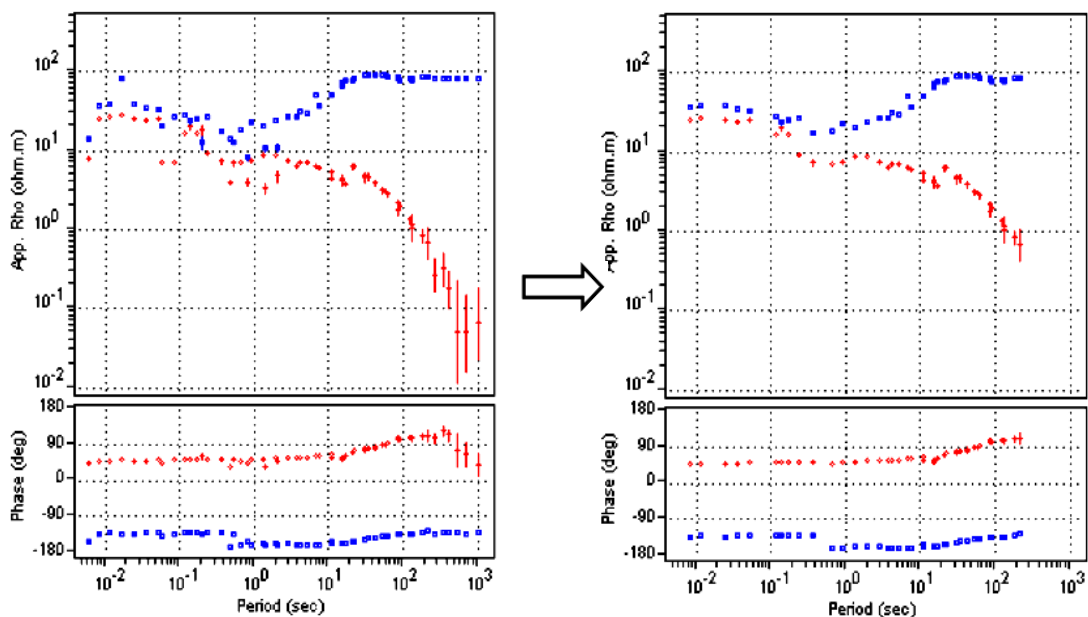
بلند یک دورافت موازی (parallel offset) با سه منحنی دیگر دارد که این مسئله بیانگر پدیده جابه‌جایی ایستا است. در مورد منحنی‌های فاز، همان‌طور که در شکل می‌بینیم، مقادیر یکسانی مشاهده می‌شود (سیمپسون و باهر، ۲۰۰۵).

جابه‌جایی ایستا، فرایندی وابسته به زمان نیست. در حقیقت، حضور جابه‌جایی ایستا در داده‌های اندازه‌گیری شده در حالتی که مقاومت ویژه‌های ظاهری نسبت به یکدیگر جابه‌جا می‌شوند، اما فازهای پاگیری تغییری ندارند، به ساده‌ترین حالت قابل تشخیص است. جابه‌جایی‌های ایستا عموماً در محیط‌هایی با مقاومت زیاد که ناهمگنی‌های رسانایی ویژه کوچک مقیاس اثر مهم‌تری روی میدان‌های الکتریکی دارند، شایع‌اند.

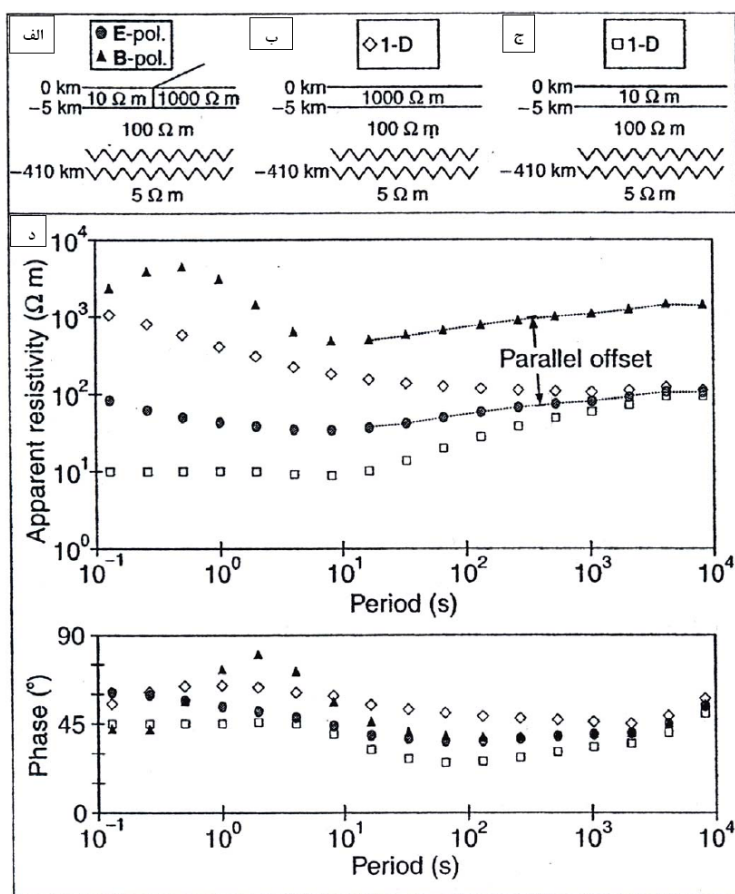
بخش (ب) و (ج) از شکل، دو مدل یک‌بعدی را نشان می‌دهند. شکل ۷- د مقایسه بین مقاومت ویژه‌های ظاهری و فازهای پاگیری را برای محلی قرار گرفته روی سطح مدل (الف) روی ناحیه مقاوم و در فاصله حدود ۳۰۰ متری از مرز و همچنین نمودارهای مربوط به مقاومت ویژه‌های ظاهری و فازهای پاگیری ناشی از مدل‌های (ب) و (ج) را نشان می‌دهد. مطابق شکل در دوره تناوب‌های بلند (که عمق نفوذ بسیار بیشتر از عمق بی‌هنجاری‌های رسانای سطحی است)، مقاومت ویژه‌های ظاهری یک‌بعدی و دوبعدی در مد TE به $100 \Omega m$ که مقاومت ویژه نیم‌فضای گسترش یافته از $410-5 km$ است، همگرا می‌شوند، در حالی که در مورد مد TM، منحنی مقاومت ویژه در دوره تناوب‌های



شکل ۵. نمونه‌ای از داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده در منطقه اینچه برون. شامل مقاومت ویژه ظاهری و فاز (حاصل از برنامه PROCMT).



شکل ۶. نمونه‌ای از فرایند حذف خارج از رده‌ها.



شکل ۷. بررسی جابه‌جایی ایستاروی نمونه‌ای از حالت‌های 1D و 2D (سیمپسون و باهر، ۲۰۰۵).

زیرسطحی یاری دهد، و لذا قبل از وارون‌سازی، اجرای صحیح هریک از مراحل پردازش توصیه می‌شود.

منابع

- Berdichevsky, M. N., and Dmitriev, V. I., 1976, Basic principles of interpretation of MT sounding curves, in *Geoelectric and geothermal studies*, ed Adam, A., KAPG Geophysical Monograph, Akademiai Kiado, 165-221.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the manetotelluric method in geophysical prospecting, *Geophysics*, **8**, 605-635.
- Cantwell, T., 1960, Detection and analysis of low frequency manetotelluric signal. Ph.D. thesis. *Geology and Geophysics*, Massachusetts Institute of technology.
- Metronix, 1993, PROCMT user guide, offline processing software for Magnetotelluric time series. Metronix GmbH, Neue Knochenhaurstr. 5, D-38100, Braunschweig, Germany.
- Oskooi, B., 2006, 1D interpretation of the Magnetotelluric data from Travale Geothermal Field in Italy. *J. Earth Space Phys.*, **32**(2), 1-16.
- Simpson, F., and Bahr, K., 2005, *Practical Magnetotellurics*: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Sternberg, B. K., Washburne, J. C., and Pellerin, L., 1988, Currection for the static shift in magnetotellorics using transient electromagnetic sounding. *Geophysics*, **53**, 1459-1468.
- Tikonov, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. *Doklady*, **73**, 281-285.
- Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins: *Geophysics*, **37**, 98-141.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian, M. N., ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*: Tulsa, Oklahoma, Soc. Exp. Geophysicists, **2**, 641-711.

روش‌های متعددی برای حذف جابه‌جایی ایستا وجود دارد. یکی از این روش‌ها محاسبات نظری جابه‌جایی ایستا از ناهمگنی‌های مدفون نزدیک سطح یا اثرات توپوگرافی سطحی است (استرنبرگ و همکاران، ۱۹۸۸). روش دیگر استفاده از داده‌های کمکی با توجه به زمین‌شناسی مشخص منطقه و یا از طریق اندازه‌گیری‌های مستقل نظیر سونداژزنی TEM است، بدین‌صورت که با به‌دست‌آوردن مقادیر دقیق مقاومت ویژه در محل مورد نظر، منحنی را به سطح مربوطه منتقل می‌کنند. از دیگر روش‌ها می‌توان به محاسبه کردن با داده‌های دترمینان اشاره کرد. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، این داده‌ها نیاز به تصحیح جابه‌جایی ایستا ندارند.

حال، پس از اعمال مراحل پردازش فوق، داده‌ها آماده ارائه به برنامه‌های وارون‌سازی‌اند. چنانچه مراحل پردازش داده‌ها با دقت کافی اعمال شود، نتایج حاصل از تفسیر داده‌ها به خوبی با ساختار واقعی زمین منطبق خواهد شد.

۴ نتیجه‌گیری

همان‌طور که عنوان شد، داده‌های برداشت شده در روش مگنتوتلوریک قبل از وارون‌سازی و تفسیر باید مورد پردازش قرار گیرند. این داده‌ها در حوزه‌ی زمان برداشت می‌شوند و لذا تحلیل سری‌های زمانی (شامل حذف میل داده‌ها، پنجره‌گذاری، انتقال به حوزه‌ی بسامد با اعمال تبدیل فوریه‌ی سریع، درجه‌بندی کردن طیف و محاسبه‌ی طیف متقابل و خودطیفی) درحکم اولین مرحله‌ی پردازش داده‌ها صورت می‌گیرد. بعد از نمایش دادن داده‌ها به‌صورت مقاومت ویژه‌ی ظاهری و فاز مراحل موسوم به پردازش دستی (شامل حذف خارج از رده‌ها، تصحیح اثرات توپوگرافی و تصحیح جابه‌جایی ایستا) روی داده‌ها اعمال می‌شود. پردازش صحیح داده‌های MT طی مراحل ذکر شده، به‌خوبی می‌تواند ما را در رسیدن به مدل‌های صحیح