

مدل‌سازی وارون و تفسیر دوبعدی داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی (EMAP)

رضا قائدرحمتی^۱، علی مرادزاده^{۱*}، نادر فتحیان‌پور^۲ و سهیل پرخیال^۳

^۱دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۲دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

^۳سازمان انرژی‌های نو، وزارت نیرو، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۸)

چکیده

روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی (Electromagnetic Array Profiling) یا EMAP یک حالت خاص از اندازه‌گیری‌های میدان مگنتوتلوریک (Magnetotelluric: MT) محسوب می‌شود. در این تحقیق داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی منطقه اکلاهومی آمریکا شامل ۹۳ دوقطبی الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا پردازش داده‌ها و حذف داده‌های نامناسب از نظر میزان نوفه و جداسازی محدوده مناسب بسامد برای مدل‌سازی داده‌ها صورت گرفته است. سپس با اجرای طرح‌واره‌های وارون‌سازی دوبعدی گرادیان مزدوج غیرخطی (NLG) و اکام (Occam) روی این داده‌ها مدل‌های وارون برای تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه عرضه شده است. همچنین داده‌های چهار سونداژ مگنتوتلوریک (زمین مغناطیسی) با پنج مؤلفه مرسوم روی یک نیم‌رخ عمود بر امتداد برداشت داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج وارون‌سازی این داده‌ها نیز در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پردازش داده‌های اولیه و کنترل پارامترهای وارون‌سازی از جمله طراحی شبکه مناسب برای مدل‌سازی، مدل شروع، ضریب لاگرانژ و مقدار نبود برازش هدف برای تولید یک مدل مناسب بسیار مؤثر هستند و لذا با کنترل این پارامترها توانایی طرح‌واره‌های گرادیان مزدوج غیرخطی و اکام در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی وارون مشخص شده است. همچنین توانایی داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی در به‌دست آوردن توزیع مقاومت ویژه رسوبات زیرسطحی مشخص شده است.

واژه‌های کلیدی: وارون‌سازی دوبعدی، داده‌های مگنتوتلوریک، جابه‌جایی‌های ایستا، روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی، مقاومت ویژه

2D Inversion and interpretation of electromagnetic array profiling (EMAP) data

Reza Ghaedrahmati¹, Ali Moradzadeh¹, Nader Fathianpour^{2*} and Soheil Porkhial³

¹Shahrood University of Technology, Iran

²Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

³SANA, Ministry of Energy, Tehran, Iran

(Received: 10 April 2012, accepted: 18 December 2012)

*Corresponding author:

amoradzadeh@shahroodut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

The magnetotelluric (MT) method is one of the several electrical techniques used in geophysical explorations. This natural-source electromagnetic technique is used to obtain electrical resistivity information from the subsurface structure. The data used in this method consists of a simultaneous measurement of naturally-occurring, time-dependent magnetic field fluctuations and of the electric fields induced in the earth by the magnetic fields. At a single site on the earth's surface, a number of recording time segments of the horizontal (H_x , H_y) and vertical (H_z) magnetic and horizontal (E_x , E_y) electric fields are recorded to obtain the spatial resistivity variation within the earth. One of the major problems in the interpretation of MT data is the effects caused by topographical features or near-surface inhomogeneities. Such small local features may have a galvanic response (due to boundary charges) that is essentially independent of the frequency within the range of an MT sounding. These small 2D or 3D inhomogeneities cause the measured electric fields to be perturbed from their regional values and a shift of the apparent resistivity curves take place vertically in a log-log scale of the apparent resistivity sounding curves. This is called the MT static shift and needs to be minimized somehow to allow an accurate interpretation of data. Due to the importance of this phenomenon, a number of studies have been devoted to understanding and correcting this problem. The electromagnetic array profiling (EMAP) is a special form of MT data acquisition to resolve the spatial aliasing effects as well as the static shifts generated in MT measurements.

In the EMAP method, surface electric fields are sampled tangentially to a continuous survey traverse. Tensor impedance components along the EMAP traverse are either computed from the primary surface magnetic fields sampled at a fixed reference station or estimated from an array of magnetic stations (Figure 1). The Earth's resistivity distribution beneath the EMAP traverse is determined from these in-line tensor impedance components.

For both qualitative and quantitative interpretations, the importance of MT data inversion has increased in the past few decades. Among the developed two-dimensional (2D) inversion algorithms, the Occam's inversion and the non-linear conjugate gradient (NLCG) methods are useful algorithms for MT data modeling. The original Occam method was provided for a 1D inversion of MT data and it was then developed for the 2D case by deGroot-Hedlin and Constable in 1990. This algorithm seeks the minimum possible structure model subject to an appropriate fit to the data. The NLCG algorithm employs the non-linear conjugate gradient method directly to minimize the objective functional of the MT inverse problem. In this algorithm, the computation of the full sensitivity matrix and the complete solution for the normal equation system in the model space are avoided.

The main objective of this study was to investigate the ability of Occam and NLCG inversion algorithms in an interpretation as well as 2D inverse modeling of Oklahoma EMAP data. It was also attempted to compare the results of these new inversions with those already acquired by the other different inversions. To achieve these goals, EMAP data were processed considering the noise amount and the bad data were removed and suitable data sets were defined for the inversion. For the inverse modeling, first an appropriate mesh grid for both resistivity blocks and forward computations was defined for each inversion algorithm. Then, the inversion parameters such as regularization parameter, the starting model and the target misfit were set to achieve acceptable results. Finally, the 2D NLCG and Occam inversion algorithms were applied to EMAP data to

obtain geoelectrical models for the subsurface geological structures in the studied area. In addition, a set of MT data from four stations with five components of electric and magnetic field data along a line perpendicular to the EMAP profile were investigated to integrate with the results of the EMAP data inversions.

The results of this study indicate that data processing and controlling of the inversion parameters such as: an appropriate grid, regularization parameters, the starting model and the target misfit are very important for obtaining a suitable model. Therefore, by properly setting these parameters, the capabilities of the NLCG and the Occam algorithms for inverting a large volume of data have been tested and compared to those of other inversion algorithms. Furthermore, the capabilities of EMAP and MT data to map the subsurface resistivity distribution of the geological structures have been shown.

Key words: 2D Inversion, MT data, static shifts, EMAP, resistivity

۱ مقدمه

models) پایه‌گذاری کرد. نتایج تقریب بورن نشان می‌دهد که جابه‌جایی‌های ایستای مرتبط با اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در ساختارهای دو بُعدی (2-D structures)، در حالت میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار، و یا در ساختارهای سه بُعدی را می‌توان از راه اندازه‌گیری میدان الکتریکی در یک آرایش با دو قطبی‌های پیوسته تا اندازه زیادی کاهش داد.

در اولین کارهای عملی، روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی از سوی ورد و همکاران (۱۹۸۶) در کوه‌های شمال کلرودا در طول یک نیم‌رخ ۸ مایلی برای ثبت تراست پرکامبرین موجود در منطقه و مقایسه آن با نیم‌رخ زمین‌شناسی منطقه به کار گرفته شد. شوماخر و همکارانش (۱۹۸۶) روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی را با آزمایش مدل‌های مصنوعی و در برداشت‌های صحرایی در فلات کلمبیا به کار گرفتند و با استفاده از وارون‌سازی مستقیم و ساده بوستیک (بوستیک، ۱۹۷۷) نتایج را تفسیر کردند. تورس وردین و بوستیک (۱۹۹۰) با بررسی خواص روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی در محیط دو بُعدی مقادیر پاگیری الکتریکی (امپدانس) مد قطبش الکتریکی عرضی (Transverse electric) یا TE (حالتی که میدان الکتریکی موازی با امتداد ساختار و میدان مغناطیسی عمود بر آن است) و مد قطبش مغناطیس عرضی (Transverse

روش‌های الکترومغناطیسی با چشمه میدان مصنوعی یا طبیعی در یک محدوده بسامدی وسیع به منزله ابزاری قدرتمند در شناسایی ساختارها و ذخایر طبیعی به کار می‌روند. در بین روش‌های الکترومغناطیسی روش مگنتوتلوریک (کاگنیارد، ۱۹۵۳؛ وزوف، ۱۹۹۱) به دلیل استفاده از میدان طبیعی الکترومغناطیسی در بازه وسیع بسامدی برخلاف دیگر روش‌ها دارای توانایی زیادی در اکتشاف ساختارهای عمیق زیرسطحی، منابع زمین‌گرمایی، نفت و گاز و ذخایر معدنی است (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۶).

در صورتی که در برداشت‌های مگنتوتلوریک با ناهمگنی‌های سطحی برخورد کنیم، این ناهمگنی‌ها مانع از ثبت پاسخ‌های بسامد کم که حاکی از مشخصات زیرسطحی و عمق‌های بیشتر است، می‌شوند. در واقع ناهمگنی‌های سطحی مانند یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کنند (بوستیک، ۱۹۸۶؛ تورس-وردین و بوستیک، ۱۹۹۲). اثرات فوق در داده‌های مگنتوتلوریک به اثرات ایستا (Static effects) موسوم است (دوبرین و سویت، ۱۹۸۸).

روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی را بوستیک (۱۹۸۶) براساس تقریب مرتبه اول بورن (Born) در تحقیقات مگنتوتلوریک در مدل‌های سه بُعدی (3-D

وارون‌سازی دو بُعدی و همچنین داده‌های زمین‌شناسی است. برای این منظور در بخش دوم این مقاله مبانی نظری روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی که براساس روش مگنتوتلوریک است بیان می‌شود. در بخش‌های بعدی اصول وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک به روش‌های گرادیان مزدوج غیرخطی و اکام شرح داده می‌شود. سپس داده‌های مورد تحقیق بررسی می‌شود و در آخر تحلیل‌های عددی روی این داده‌ها صورت می‌گیرد و نتایج این تحلیل‌ها برای تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه مورد تحقیق به کار گرفته می‌شود. همچنین بررسی داده‌های چهار ایستگاه مگنتوتلوریک روی یک نیم‌رخ تقریباً عمود بر امتداد اندازه‌گیری‌های آرایه الکترومغناطیسی و مدل‌سازی این داده‌ها با دو طرح‌واره ذکر شده صورت می‌گیرد و نتایج آن با نتایج مدل‌سازی داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی مقایسه و در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی منطقه استفاده می‌شود.

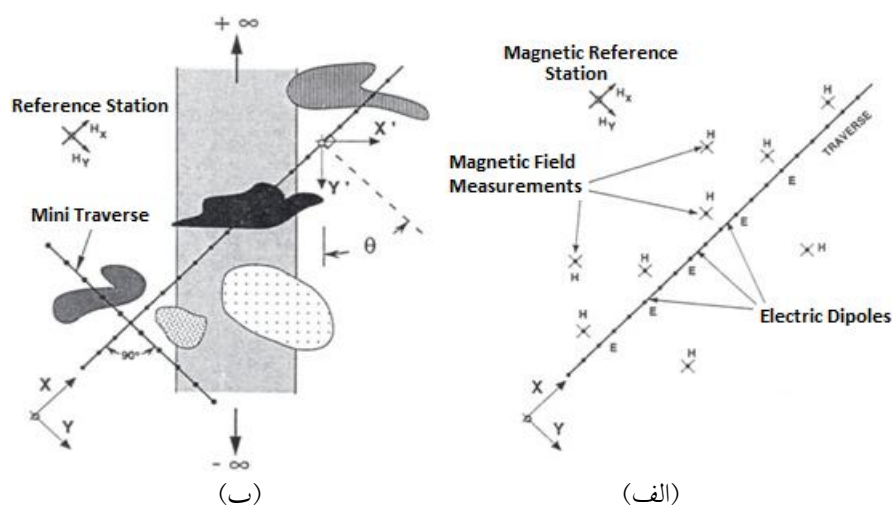
۲ مبانی نظری روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی
در روش مگنتوتلوریک از میدان الکترومغناطیس طبیعی زمین در حکم منبع میدان استفاده می‌شود. در این روش تغییرات زمانی مؤلفه‌های افقی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به طور عمود بر هم در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود (کاگنیارد، ۱۹۵۳؛ وزوف، ۱۹۹۱). با فرض رفتار موج تخت میدان مگنتوتلوریک، رابطه بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین برای یک بسامد معین f به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E(f) = Z(f)H(f), \quad Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

که E و H به ترتیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی افقی و Z تانسور پاگیری الکتریکی مختلط است. مقادیر

(magnetic یا TM) حالتی که میدان الکتریکی عمود بر ساختار و میدان مغناطیسی موازی آن است) را برای یک حالت عمومی که امتداد نیم‌رخ برداشت داده در آن منطبق و یا عمود بر امتداد ساختار نیست، برآورد کردند و همچنین با ایجاد اصلاحاتی در روش برداشت نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی، روشی برای برآورد امتداد ساختارها مطرح ساختند. در یک تحقیق دیگر تورس وردین و بوستیک (۱۹۹۲) به‌طور مفصل به بررسی خواص نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی و فیلتر کردن داده‌ها با استفاده از این روش پرداخته و با به‌کارگیری آن در مدل‌های مصنوعی و ساختارهای صحرایی، توانایی آن را در حذف اثرات ایستا و برطرف ساختن مشکل فقدان تراکم نمونه‌برداری (Aliasing) در داده‌های MT نمایش دادند. ریانگ و شان (۲۰۰۳) نیز این روش را برای بسامدهای زیاد (۱۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز) در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی در ساحل جنوب‌غربی کره به‌کار گرفتند. همچنین ون بورستل و اینگام (۲۰۰۴) از این روش برای به‌تصویر کشیدن گسل و ایراراپا در نیوزیلند استفاده کردند. امروزه روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی به تنهایی و یا به‌صورت مکمل با برداشت‌های مگنتوتلوریک مرسوم، برای اکتشاف ساختارهای زمین‌شناسی، اکتشاف نفت و گاز، اکتشاف منابع زمین‌گرمایی به‌کار می‌رود (اسکمولدز و همکاران، ۲۰۰۸؛ هی و همکاران، ۲۰۱۰).

برای تفسیر کمی و کیفی داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی مدل‌سازی وارون این داده‌ها همانند دیگر داده‌های ژئوفیزیکی ضروری است. هدف اصلی این تحقیق بررسی توانایی الگوریتم‌های مدل‌سازی وارون گرادیان مزدوج غیرخطی (Nonlinear conjugate gradient: NLCG) و اکام (Occam) برای تفسیر ساختارهای زیرسطحی با استفاده از داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی در مقایسه با سایر روش‌های



شکل ۱. توصیف هندسی اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی: (الف) هندسه برداشت در حالت عمومی، (ب) هندسه برداشت در حالت تشخیص امتداد ساختار اصلی به همراه اثرات ایستای قابل ملاحظه (ورد و همکاران، ۱۹۸۶).

(استرنبرگ و همکاران، ۱۹۸۸؛ مرادزاده، ۲۰۰۳). یکی از مشکلات اثرات ایستا، انتقال یا تغییر مکان منحنی سونداژ مقاومت ویژه در همه بسامدهای اندازه‌گیری است که در صورت اصلاح نشدن، تفسیر غلط و مبهم داده‌ها را سبب می‌شود. یک روش که به‌طور قابل ملاحظه اثرات ایستا را کاهش می‌دهد و تا حدودی زیادی حذف می‌کند، روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی است که بوسیله (بوستیک، ۱۹۸۶) پایه‌گذاری کرد. اصول این روش به این صورت است که اثرات ایستا که در حالت‌های دو بُعدی با مد TM و حالت سه بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، را می‌توان با اجرای یک فیلتر پایین‌گذر در برداشت داده‌ها در حوزه عدد موجی فاصله‌ای، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. در واقع اساس روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی را می‌توان به‌صورت یک تبدیل فوریه فاصله‌ای از عبارت انتگرالی مؤلفه افقی میدان الکتریکی سطحی نمایش داد. این روش در واقع بر پایه کاهش سهم میدان ایستا برای اندازه‌گیری‌های میدان الکتریکی با فیلتر پایین‌گذر فاصله‌ای در مقابل مشخصه‌های بالاگذر تابع گرین در محیط دو بُعدی با E عمود بر امتداد ساختار و محیط

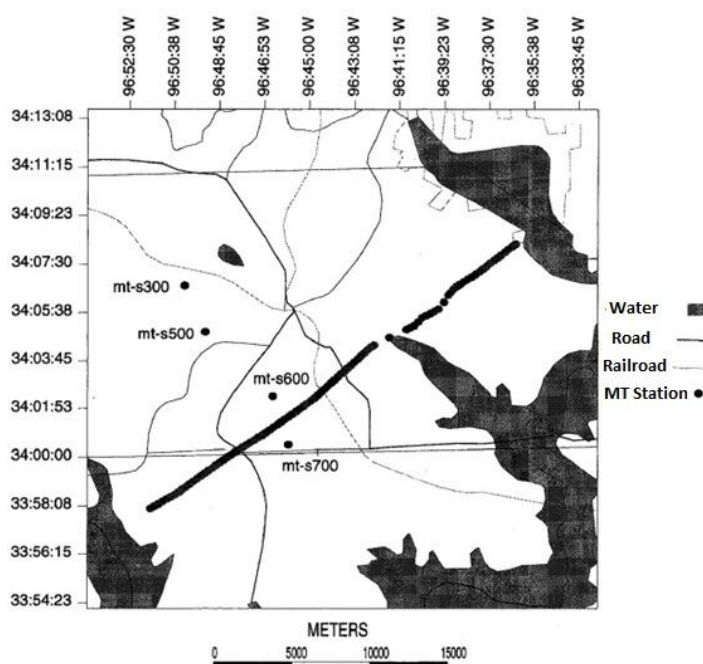
ظاهری مقاومت ویژه (ρ_a) و فاز (φ_a) برای هر مؤلفه از تانسور پاگیری الکتریکی با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\rho_a(f) = \frac{1}{\mu\omega} |Z_{ij}|^2, \quad (2)$$

$$\varphi_a(f) = \text{tg}^{-1}(\text{Im}Z_{ij} / \text{Re}Z_{ij}), \quad (3)$$

که ω بسامد زاویه‌ای، μ تراوایی مغناطیسی، $i, j = x, y$ و $Z_{ij} = E_i / H_j$ مؤلفه مختلط تانسور پاگیری الکتریکی، و $\text{Re}Z_{ij}$ و $\text{Im}Z_{ij}$ به ترتیب مولفه‌های حقیقی و موهومی پاگیری الکتریکی هستند.

اغلب، اثرات سطحی روی داده‌های مگنتوتلوریک قابل ملاحظه است. این اثرات ناشی از خصوصیات توپوگرافی یا توزیع مقاومت ویژه سطحی و یا هر دو حالت است (دوبرین و سویت، ۱۹۸۸). اثرات ناشی از ناهمگنی‌های سطحی مقاومت ویژه معمولاً به‌صورت ساختارهای سه بُعدی هستند و زمانی که آن‌ها را در ساختارهای دو بُعدی در تحقیقات مگنتوتلوریک بررسی می‌کنیم، مؤلفه پاگیری الکتریکی TM بیشتر تحت تأثیر این اثرات قرار می‌گیرد (مرادزاده، ۱۹۸۸). اثرات فوق در کل به ناهمگنی‌های سطحی یا اثرات ایستا معروف هستند



شکل ۲. نقشه موقعیت اندازه‌گیری‌های EMAP در منطقه اکلاهما (خط ضخیم و پُرنگ با جهت شمال‌شرقی-جنوب‌غربی نشان‌دهنده نیم‌رخ برداشت دوقطبی‌های الکتریکی است). همچنین نقاط توپو چهار ایستگاه برداشت داده‌های مگنتوتلوریک با پنج مؤلفه مرسوم را نشان می‌دهد (جونز و شولتز، ۱۹۹۷).

برای فاصله الکتروودی در حدود ۶۰ تا ۶۰۰ متر است (ورد و همکاران، ۱۹۸۶).

برای محاسبه پاگیری‌های الکتریکی TE و TM لازم است تا زاویه خط برداشت‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی با امتداد ساختار (امتدادی که در راستای آن خواص الکتریکی ثابت است) محاسبه شود. به‌این‌منظور در اندازه‌گیری‌های صحرائی کافی است که یک دوقطبی الکتریکی اضافی عمود بر خط برداشت در یکی از موقعیت‌های برداشت به کار رود. همچنین برای حالت‌هایی که اثرات ایستا در ساختارهای سه‌بعدی قابل‌ملاحظه باشد، بهتر است برای تعیین امتداد ساختارهای اصلی از یک پیمایش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی کوتاه‌تر به‌صورت عمود بر خط برداشت اصلی استفاده شود (شکل ۱-ب) (تورس-وردین و بوستیک، ۱۹۹۰).

اگر (مطابق شکل ۱) محور x اندازه‌گیری مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی در امتداد خط برداشت در

سه‌بعدی است. روش اندازه‌گیری میدان الکتریکی که از راه اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین الکتروودهای یک دوقطبی به دست می‌آید، در واقع یک فیلتر پایین‌گذر فاصله‌ای روی میدان الکتریکی است (تورس-وردین و بوستیک، ۱۹۹۲).

شکل ۱ توصیف صحرائی روش آرایه الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. در این شکل دوقطبی‌های گیرنده میدان الکتریکی به‌صورت پیوسته (end-to-end) قرار می‌گیرند و یک سری اندازه‌گیری از مؤلفه میدان الکتریکی در جهت خط برداشت تهیه می‌شود. همچنین گیرنده‌های میدان مغناطیسی برای اندازه‌گیری بردار افقی میدان مغناطیسی در یک یا چند موقعیت ثابت اطراف خط برداشت قرار می‌گیرند. میدان‌های E و H بایستی به‌صورت هم‌زمان اندازه‌گیری شوند. طول دوقطبی یا فاصله الکتروودی ثابت و وابسته به پارامترهای برداشت است. محدوده تغییرات استاندارد

خطای داده ها است، m_0 مدل اولیه، λ ضریب لاگرانژ و W_m ماتریس ناهموری است. همچنین T نشان دهنده ترانهاده ماتریس است.

روش معمول برای حل مسئله وارون غیرخطی در ژئوفیزیک، خطی سازی مسئله وارون و حل تکراری آن است. این خطی سازی معمولاً با استفاده از روش گاوس-نیوتون (Gauss-newton) صورت می گیرد. این قبیل روش ها را روش های گاوس-نیوتون و یا روش های مستقیم وارون سازی می نامند (سیریون و اراپورن و اگبرت، ۲۰۰۰؛ رودی و مکی، ۲۰۰۱). در روش اکام (Occam's inversion) نیز ابتدا تابع هدف رابطه (۵) به همین طریق خطی می شود و سپس با انتخاب ضرایب لاگرانژ متفاوت در هر تکرار وارون سازی مدلی با کمترین ساختار به شرط یک برازش مناسب به داده ها مورد جست و جو قرار می گیرد (کانستیل و همکاران، ۱۹۸۷).

در روش گرادیان مزدوج غیرخطی تابع هدف مسئله وارون به طور مستقیم کمینه می شود (رودی و مکی، ۲۰۰۱). از جمله مزایای این روش اجتناب از ساخت صریح ماتریس حساسیت و از معایب آن همگرایی در تکرارهای بیشتر نسبت به روش های گاوس-نیوتون و روش اکام است.

روش آرایه الکترومغناطیسی منظور شود، ارتباط بین میدان های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین در یک بسامد مورد نظر به صورت زیر نوشته می شود

$$E_x(f) = Z_{xx}(f)H_x(f) + Z_{xy}(f)H_y(f). \quad (4)$$

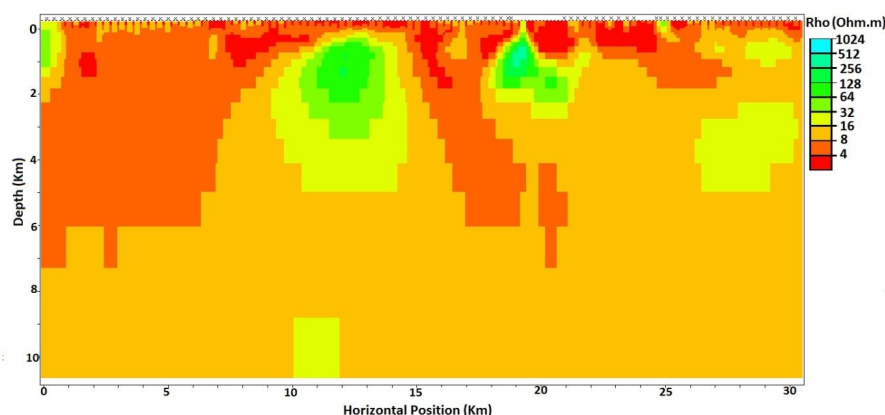
لذا در این روش در صورتی که فقط از یک خط برداشت مؤلفه میدان الکتریکی داده استفاده شود (یعنی نیم رخ عمود بر خط برداشت اصلی به کار گرفته نشود) فقط دو مؤلفه پایداری الکتریکی (یعنی Z_{xy} و Z_{xx}) برای هر بسامد به دست می آید.

۳ روش های وارون سازی اکام و گرادیان مزدوج غیرخطی

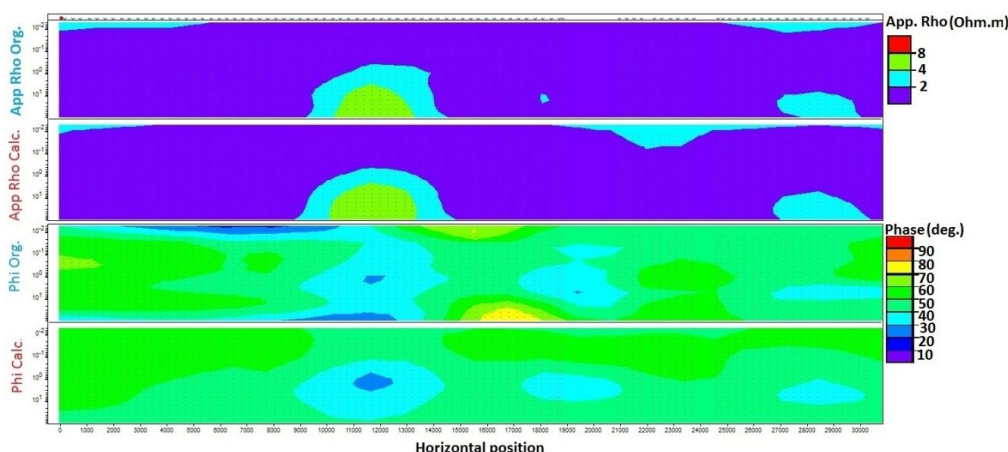
مسئله وارون غیرخطی برای داده های مگنتوتلوریک معمولاً به صورت یک مسئله بهینه سازی و با تابع هدف زیر بیان می شود (سیریون و اراپورن و اگبرت؛ ۲۰۰۰):

$$\Psi(m) = (d - F[m])^T W_d (d - F(m)) + \lambda(m - m_0)^T W_m (m - m_0), \quad (5)$$

که Ψ تابع هدف، m بردار پارامترهای مدل (در اینجا مقاومت ویژه)، d بردار داده ها شامل داده های پایداری الکتریکی و یا مقاومت ویژه و فاز ظاهری به دست آمده از آنها، $F[m]$ تابع پیشرو غیرخطی، W_d ماتریس وزنی داده ها که یک ماتریس قطری است و حاوی عکس



شکل ۳. مدل دوبعدی حاصل از وارون سازی داده های EMAP با طرحواره گرادیان مزدوج غیرخطی (در تکرار ۲۵).



شکل ۴. شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسبه شده (پاسخ مدل آورده شده در شکل ۳) با طرح‌واره گرادبان مزدوج غیرخطی برای داده‌های EMAP. شکل‌ها از بالا به پایین به ترتیب شامل: شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهده‌ای، شبه‌مقطع مقاومت ویژه محاسبه‌ای، شبه‌مقطع فاز ظاهری مشاهده‌ای و شبه‌مقطع فاز محاسبه شده است.

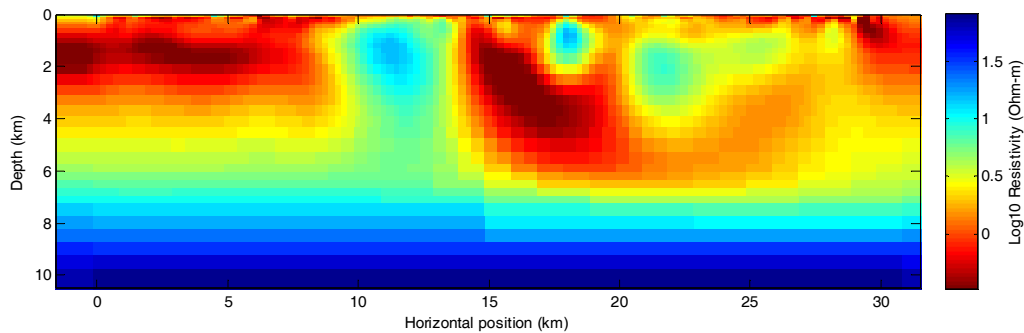
بررسی به این صورت است که لایه سطحی مربوط به دوره کرتاسه و از جنس شن، رُس و سنگ آهک است، لایه دوم تا عمق حدود ۳ کیلومتر ادامه دارد و سن آن مربوط به دوره پنسلوانین است که از سنگ آهک، ذغال و شیل با لایه‌بندی‌هایی از ماسه‌سنگ تشکیل شده است. لایه سوم مربوط به دوره دونین-سیلورین، تا عمق تقریبی ۶ کیلومتر ادامه دارد و شامل سنگ آهک حاوی چرت، شیل، دولومیت و ماسه‌سنگ است. لایه چهارم از دوره کامبرین-اردوسین است، تا عمق ۹ کیلومتر و شامل سنگ آهک و دولومیت است و لایه انتهایی از دوره کامبرین تا عمق تقریبی ۱۱ کیلومتر و از گرانیت، ریولیت و گابرو تشکیل شده است.

هدف از برداشت داده‌های EMAP در منطقه اکلاهوما، به نقشه در آوردن توزیع خواص الکتریکی لایه‌های رسوبی زیرسطحی است که در زیر ناهمگنی‌های سطحی قرار دارد (اگاوا، ۱۹۹۷). اندازه‌گیری‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی در یک امتداد (شکل ۲) شامل ۹۳ دوقطبی الکتریکی است (جونز و شولتز، ۱۹۹۷). با توجه به این که جهت نیم‌رخ برداشت عمود بر ساختارهای اصلی زمین‌شناسی در منطقه است، و از

در این تحقیق برای وارون‌سازی داده‌ها از برنامه وارون‌سازی دو بُعدی اکام که بر پایه کار کانستیل و همکاران (۱۹۸۷) و کار دی گروت هدلین و کانستیل (۱۹۹۰) استوار است، استفاده شده است. همچنین از ویرایش دوم نرم‌افزار WinGlink (ژئوسیستم، ۲۰۰۳) که وارون‌سازی دو بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک در آن براساس طرح‌واره گرادبان مزدوج غیرخطی استوار است، استفاده شده است.

۱-۳ منطقه مورد بررسی، داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی و داده‌های مگنتوتلوریک

شکل ۲ موقعیت جغرافیایی نیم‌رخ برداشت داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی به طول حدود ۳۰ کیلومتر و همچنین چهار ایستگاه مگنتوتلوریک با پنج مؤلفه مرسوم را در منطقه اکلاهوما ای آمریکا نشان می‌دهد. یک نقشه کامل زمین‌شناسی محلی منطقه به همراه مقاطع متفاوت زمین‌شناسی از سوی هارت (۱۹۷۴) تهیه شده است. با بررسی این نقشه و گزارش مربوط، ترتیب لایه‌بندی قائم منطقه در زیر سطح محل برداشت‌های مورد



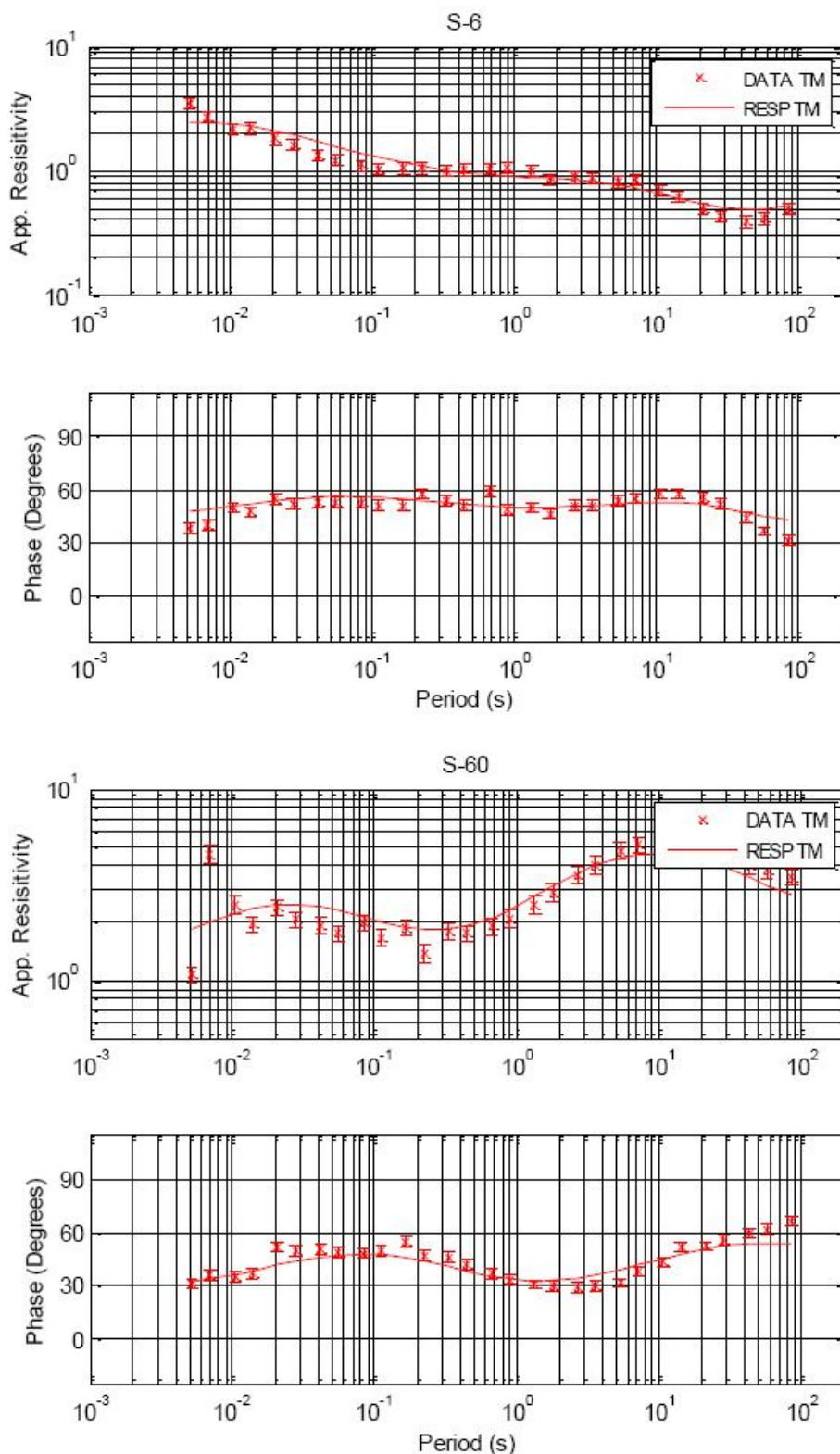
شکل ۵. مدل دوبعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌های EMAP با طرح‌واره اکام (در تکرار ۱۰).

۴ وارون‌سازی دوبعدی داده‌های EMAP

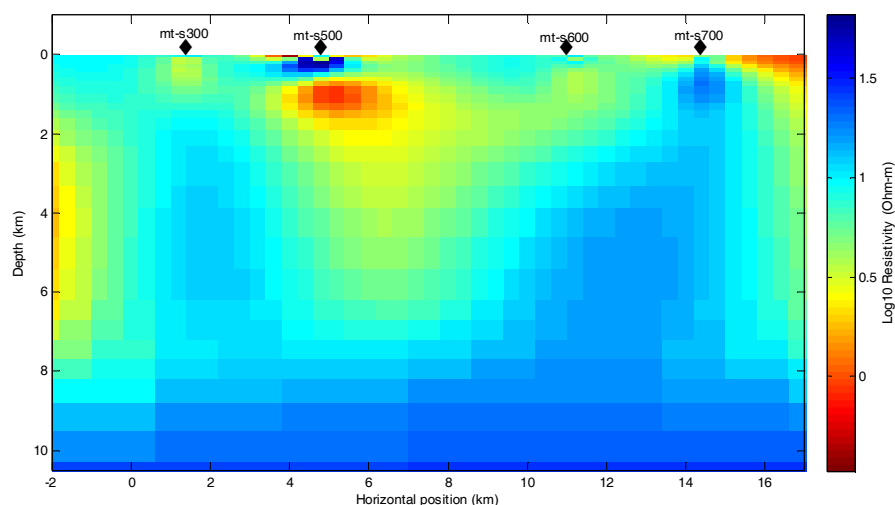
۴-۱ روش گرادیان مزدوج غیرخطی

در این روش مدل‌سازی شبکه (mesh) پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو تفاضل متناهی، یک شبکه نسبتاً ریز (۶۰۶۱ پارامتر) تعریف شده است. مدل اولیه برای شروع وارون‌سازی یک نیم‌فضا با مقاومت ویژه ۱۰ اهم‌متر انتخاب شده است. با وجود اینکه روش موردنظر تا حدود زیادی مشکل جابه‌جایی‌های ایستا را حل می‌کند ولی در اینجا برای رفع کامل‌تر این مشکل، جابه‌جایی‌های ایستا درحکم پارامترهای آزاد در مدل‌سازی منظور و حل می‌شوند. همچنین با وجود اینکه بیشترین اختلاف توپوگرافی در محل برداشت دوقطبی‌های الکتریکی روی نیم‌رخ برداشت داده در حدود ۲۰ متر است ولی باز هم توپوگرافی در وارون‌سازی منظور شده است. خطای منظور شده برای داده‌های ظاهری مقاومت ویژه و فاز ظاهری در وارون‌سازی این داده‌ها به ترتیب ۱۰ و ۵ درصد در نظر گرفته شده است. اجراهای متفاوت برای تنظیم پارامترهای وارون‌سازی با محدوده‌های گوناگون بسامد و مقادیر ضریب لاگرانژ متفاوت صورت گرفته است. از میان اجراهای متفاوت نتایج دو اجرا نسبتاً بهتر از دیگر اجراها بوده است. اولی با در نظر گرفتن کمترین بسامد ۰/۰۱ هرتز با ۴ دهه بسامد، در هر دهه ۵ بسامد و مقدار

دوقطبی‌های عمودی استفاده نشده است، فقط داده‌های مد TM در دسترس است. البته مؤلفه پاگیری الکتریکی Z_{xx} نیز موجود است ولی به دلیل بالا بودن میزان نوفه در این مؤلفه ترجیح داده شده است که برای تفسیر و مدل‌سازی از آن استفاده نشود. طول دوقطبی‌ها از ۲۲۰ تا ۲۵۰ متر و فاصله جدایش از ۱۴۹ متر تا ۱۰۸۹ متر در تغییر است. همچنین محدوده بسامد برداشت داده از ۰/۰۰۰۵۵ تا ۳۸۴ هرتز است. داده‌های مگنتوتلوریک شامل چهار سونداژ است که اندازه‌گیری‌ها در محدوده بسامد ۰/۰۰۰۵ تا ۳۸۴ هرتز با ۳۳ بسامد صورت گرفته است. در این تحقیق کلیه داده‌ها شامل داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی و داده‌های مگنتوتلوریک مورد بررسی قرار گرفته است. برای داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی بسامدهای بیشتر از ۱۹۲ هرتز و کمتر از ۰/۰۱۱۷ هرتز به دلیل زیاد بودن میزان نوفه حذف شده‌اند و بسامدهای بین این حدود برای مدل‌سازی و تفسیر انتخاب شده‌اند. همچنین برخی داده‌های مربوط به بسامدهای این محدوده نیز به دلیل نامناسب بودن (از نظر میزان نوفه یا پرت بودن نسبت به بسامدهای همسایه) در دوقطبی‌های متفاوت حذف شده است. برای داده‌های مگنتوتلوریک نیز برخی از داده‌های مربوط به بسامدهای محدوده ذکر شده برای این داده‌ها بنا بر همان دلایل ذکر شده حذف شده است.



شکل ۶. مقایسه داده‌های نظری مقاومت ویژه و فاز حاصل از مدل‌سازی داده‌های EMAP با طرح‌واره اکام (مدل آورده شده در شکل ۵) با داده‌های مشاهده‌ای در محل سونداژهای ۶ و ۶۰.



شکل ۷. مدل وارون به دست آمده با استفاده از طرحواره اکام روی داده های مقاومت ویژه و فاز دو مُد TM و TE از اندازه گیری های مگنتوتلوریک در منطقه اکلاهوما.

بسامد است. مقدار ضریب لاگرانژ در شروع وارون سازی ۵ انتخاب شده است. همچنین اندازه مرحله در پارامترهای ناهمواری برای جست و جوی بیشتر ضریب لاگرانژ در هر تکرار وارون سازی ۴ انتخاب شده است. برای تعیین حدود مقدار برازش نیافتن هدف (Target misfit) ابتدا یک فرایند وارون سازی اولیه روی داده ها با مقدار برازش نیافتن هدف (RMS) ۱ صورت گرفته و دیده شده است که مقدار (RMS) تا حدود ۳/۷ کاهش می یابد. لذا با این اطلاع، مقدار برازش نیافتن هدف ۳/۷ انتخاب شده و با یک فرایند جدید وارون سازی مدلی با کمترین ساختار به شرط برازش مناسب به داده ها در تکرار ۱۰ به دست آمده است (شکل ۵). در شکل ۶ دو مثال از مقایسه پاسخ های نظری حاصل از این مدل با داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز ظاهری نشان داده شده است.

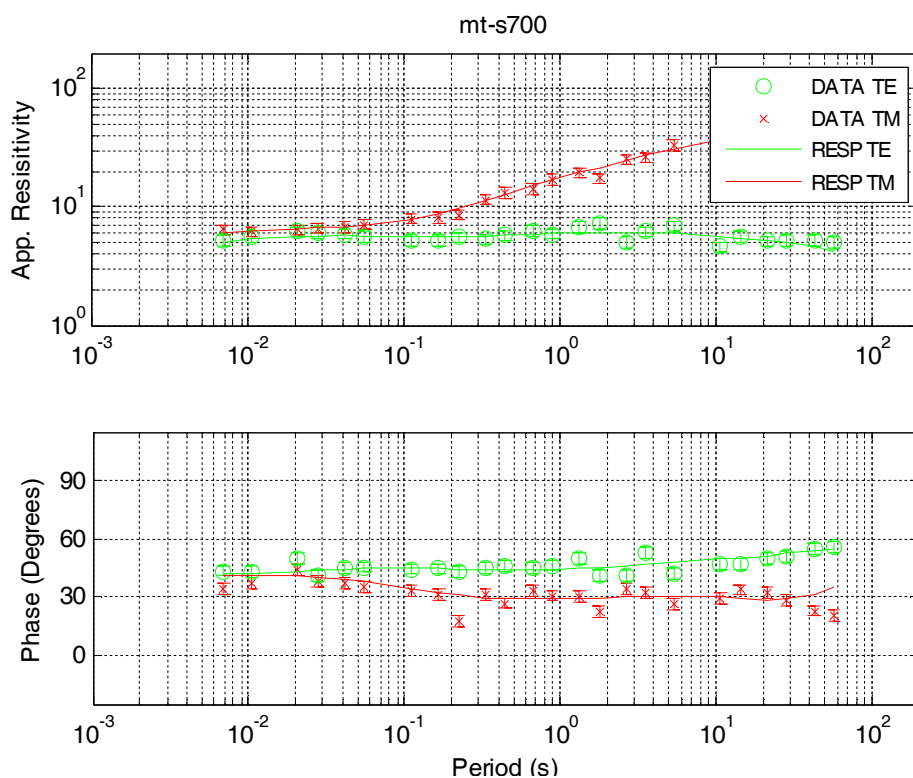
۵ وارون سازی دو بُعدی داده های مگنتوتلوریک

برای مدل سازی وارون داده های مگنتوتلوریک هم در این تحقیق از دو طرحواره گرادیان مزدوج غیرخطی و اکام به طور جداگانه استفاده شده است. پس از تعریف شبکه مناسب برای پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو (با توجه

ضریب لاگرانژ ۱۰ و دومین اجرا با داده های کمترین بسامد ۰/۰۰۱ هرتز با ۶ دهه بسامد، در هر دهه ۴ بسامد و مقدار ضریب لاگرانژ ۱۰ بوده است که در تکرار ۲۵ به همگرایی مناسب رسیده اند. در شکل های ۳ و ۴ نتایج وارون سازی برای اجرای اول نشان داده شده است.

۴-۲ روش اکام

در این آزمایش مدل سازی داده های مورد بررسی به روش روش اکام به کار گرفته شده است. ابتدا یک شبکه دو بُعدی مناسب از بلوک های مقاومت ویژه در حکم پارامترهای مدل تعریف شده است. این بلوک ها برای محاسبات پیشرو که در این طرحواره به روش اجزای محدود (Finite element) صورت می گیرد به بلوک های کوچک تری تقسیم شده است. تعداد پارامترهای مدل یا همان بلوک های مقاومت ویژه در این شبکه ۲۵۰۹ بلوک است که برای محاسبه پاسخ مدل به روش اجزای محدود به بلوک های کوچک تری تقسیم شده اند. مدل آغازی برای فرایند وارون سازی یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۵ اهم متر در نظر گرفته شده است. محدوده بسامدی مورد استفاده در وارون سازی از ۰/۰۱۱۷ تا ۰/۰۱۹۲ با ۲۹ مقدار



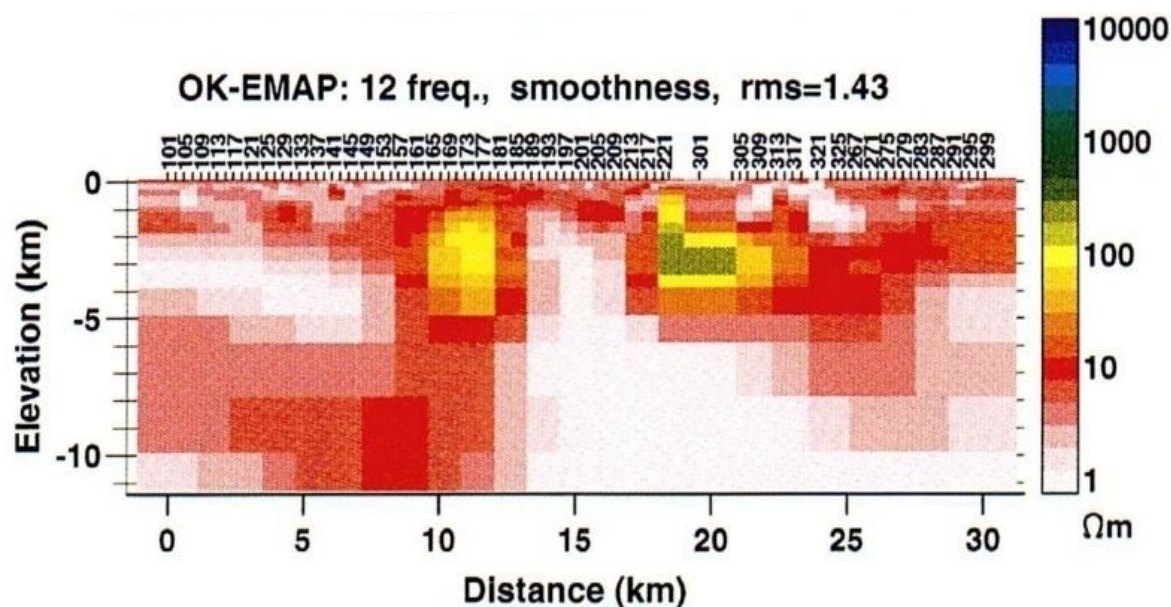
شکل ۸ مقایسه داده‌های نظری حاصل از مدل به‌دست آمده با طرح‌واره اکام روی داده‌های مگنتوتلوریک (مدل نشان داده شده در شکل ۷) با داده‌های مشاهده‌ای در محل سونداژ mt-s700

مدل وارون به‌دست آمده از داده‌های دو مد TE و TM با طرح‌واره اکام است. در شکل ۸ نیز مقایسه پاسخ این مدل با داده‌های مشاهده‌ای در ایستگاه mt-s700 برای نمونه نشان داده شده است.

۶ تفسیر نتایج

با توجه به مدل‌های وارون به‌دست آمده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی و روش اکام دیده می‌شود که این مدل‌ها به‌خوبی با هم تطابق دارند. همچنین با مقایسه این نتایج با مدل وارون به‌دست آمده از داده‌های مورد بررسی یوچیدا (۱۹۹۷) و همچنین آگاوا (۱۹۹۷) (در اینجا فقط نتایج کار یوچیدا در شکل ۹ نشان داده شده است) دیده می‌شود که نتایج این تحقیق ضمن تأیید نتایج کار یوچیدا (۱۹۹۷) توزیع مقاومت ویژه زیرسطحی را به‌نحو بهتری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج هموارتر مدل‌سازی وارون به

به فاصله ایستگاه‌ها و عمق مورد بررسی در حدود ۱۰ کیلومتر) دیگر پارامترهای مدل‌سازی به‌طور مناسب همانند آنچه در بند قبل ذکر شد تنظیم شده است. فرایند وارون‌سازی در دو طرح‌واره ذکر شده برای سه دسته داده‌های مقاومت ویژه و فاز ظاهری شامل وارون‌سازی داده‌های مُد TE، مُد TM و هر دو مُد با هم صورت گرفته است. در بین نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های گوناگون روی این داده‌ها مشاهده شده است که مدل به‌دست آمده از وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های دو مد TE و TM برای هر دو طرح‌واره نسبت به نتایج به‌دست آمده از دیگر آزمایش‌ها دارای کمترین مقدار برازش نیافتن و همچنین کمترین ساختار است. لذا این مدل به‌منزله نتیجه قابل قبول‌تر برای تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی به‌همراه نتایج به‌دست آمده از وارون‌سازی داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی داده شده است. شکل ۷ نشان‌دهنده



شکل ۹. مدل وارون دو بُعدی به دست آمده به روش وارون هموار (یوچیدا، ۱۹۹۷).

۷ خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به کارگیری روش نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی در تفسیر ساختارهای زیرسطحی در یک منطقه تقریباً هموار با رسوبات متنوع عرضه شده است. ابتدا داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی در منطقه اکلاهوما مورد بررسی قرار گرفته است. پس از پردازش‌های لازم روی این داده‌ها دو الگوریتم متفاوت وارون‌سازی دو بُعدی گرادیان مزدوج غیرخطی و اکام روی این داده‌ها برای تولید مدل مناسب برای رسوبات منطقه به کار رفته است. همچنین داده‌های مگنتوتلوریک روی یک نیم‌رخ عمود بر امتداد برداشت‌های EMAP نیز مورد بررسی قرار گرفته و مدل وارون دو بُعدی برای این داده‌ها نیز تهیه شده است.

نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج وارون‌سازی به دست آمده از کارهای آگوا (۱۹۹۷) و یوچیدا (۱۹۹۷) برای این داده‌های EMAP مقایسه شده است. با توجه به این که مدل مقاومت ویژه به دست آمده در این تحقیق به خوبی با مدل‌های مقاومت ویژه قبلی (آگوا، ۱۹۹۷ و

روش اکام می‌توان توزیع رسوبات و ساختارهای زیرسطحی را به نحو بهتری نسبت به سایر نتایج تفسیر کرد. همچنین تلفیق نتایج این مدل با نتایج مدل‌سازی وارون به دست آمده از داده‌های چهار ایستگاه مگنتوتلوریک (شکل ۷) برای تفسیر ترتیب قائم لایه‌های زیرسطحی و همچنین موقعیت قرارگیری ساختارها می‌تواند مؤثر باشد. با توجه به این نتایج مدل‌سازی و اطلاعات زمین‌شناسی از نقشه زمین‌شناسی منطقه (هارت، ۱۹۷۴)، می‌توان ترتیب لایه‌بندی زیرسطحی را به صورت زیر تفسیر کرد. کاهش مقاومت ویژه در در نزدیک سطح (عمق ۱۵۰-۴۰۰ متر) احتمالاً به خاطر ناحیه حاوی شن، رسوبات رُسی و ماسه مرطوب به آب شور است. سپس افزایش مقاومت ویژه پس از این عمق به احتمال زیاد ناشی از وجود ماسه‌سنگ و آهک درز و شکاف دار اشباع از آب شیرین است. پس از این رسوبات احتمالاً سنگ آهک خشک همراه با دولومیت قرار گرفته است و پس از آن افزایش قابل توجه مقاومت ویژه ناشی از سنگ بستر آذرین است.

- McGraw-Hill Book Co., fourth edition, Printed in Singapore.
- Hart, D. L., 1974, Reconnaissance of the water resources of the Ardmore and Sherman Quadrangles, Southern Oklahoma: Oklahoma Geol. Survey, Map HA-3, Scale 1:250000.
- He, W., Hu, W., and Dong, W., 2010, Petroleum electromagnetic prospecting advances and case studies in China: *Surv. Geophys.*, **31**, 207-224.
- Jones, A. G., and Schultz, A., 1997, Introduction to MT-DIW2 Special Issue: *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 727-737.
- Moradzadeh, A., 1998, Electrical Imaging of the Adelaide Geosynclines Using Magnetotellurics (MT): Ph.D thesis, Flinders University of south Australia.
- Moradzadeh, A., 2003, Static shift appraisal and its correction in magnetotelluric (MT) survey: 21st Symposium on Geosciences, Tehran, Iran.
- Ogawa, Y., 1997, Two Data Adaptive Inversion of the Oklahoma EMAP Dataset: *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 801-806.
- Rodi, W. L., and Mackie, R. L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion: *Geophysics*, **66**, 174-187.
- Schmoldt, J., Jones, A. G., and Rosell, O., 2008, PICASSO- Phase I: MT investigation of the Betic-Rif mountain system, Comparison of actual robust processing algorithms: 19th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Beijing, China, 23-29.
- Shomaker, C. L., Shoham, Y., and Hocky, L., 1986, Interpretation of Natural Source Electromagnetic Array Data: 56th SEG Meeting, Houston, Expanded Abstracts.
- Siripunvaraporn, W., and Egbert, G., 2000, An efficient data-sub space inversion method for 2-D magnetotelluric data: *Geophysics*, **65**, 791-803.
- Sternberg, B. K., Washburne, J. C., and Pellerin, L., 1988, Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings: *Geophysics*, **53**, 1459-1468.
- Swift, C. M. Jr., 1967, A Magnetotelluric Investigation of an Electrical Conductivity Anomaly in the Southwestern United States: Ph.D thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Torres-Verdin, C., and Bostick, F. X. Jr., 1990, Properties of EMAP in tow-dimensional environments: 60th SEG Meeting, San Francisco, Expanded Abstracts.
- یوچیدا، (۱۹۹۷) قابل مقایسه است، لذا توانایی طرح‌واره‌های گرادیان مزدوج غیرخطی و اکام برای وارون‌سازی حجم بزرگی از داده‌های نیم‌رخ‌زنی آرایه الکترومغناطیسی به‌خوبی نشان داده شده است. توزیع مقاومت ویژه برای ساختارهای زمین‌شناسی منطقه با توجه به مدل مقاومت ویژه به‌دست آمده از داده‌های مگنتوتلوریک نیز به‌خوبی با مدل‌های حاصل شده از داده‌های EMAP قابل مقایسه است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پردازش داده‌های مورد بررسی و کنترل پارامترهای وارون‌سازی از جمله طراحی شبکه پارامترهای مدل، مدل شروع وارون‌سازی، ضریب لاگرانژ برای روش گرادیان مزدوج غیرخطی، محدوده بسامد مورد استفاده و برازش نیافتن هدف در مدل‌سازی برای تولید مدل مناسب به‌منظور تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی بسیار مؤثر هستند.
- منابع
 مرادزاده، ع؛ طهماسبی، ف و فاتح، م، ۱۳۸۶، بررسی امکان به‌کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی وارون دوبعدی ترکیبی داده‌های دو مد قطبش روش مگنتوتلوریک، فصل‌نامه علوم زمین، ۶۴، ۸۸-۱۰۱.
- Bostick, F. X. Jr., 1977, A simple almost exact method of MT analysis: Workshop of Electrical Methods in Geothermal Exploration, U. S. G. S, contract no. 14080001-8-359.
- Bostick, F. X. Jr., 1986, Electromagnetic array profiling: 56th SEG Meeting, Houston, Expanded Abstracts.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting: *Geophysics*, **18**, 605-635.
- deGroot-Hedlin, C., and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data: *Geophysics*, **55**, 1613-1624.
- Dobrin, M. B., and Savite, C. H., 1988, Introduction to Geophysical Prospecting:

- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian, M. N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*: SEG, Tulsa, OK, **2**, 641–707.
- Word, D. R., Goss, R., and Chamber, D. M., 1986, An EMAP case study: 56th SEG Meeting, Houston, Expanded Abstracts.
- Torres-Verdin, C., and Bostick, F. X. Jr., 1992, Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: *Electromagnetic array profiling (EMAP)*: *Geophysics*, **57**(4), 603-627.
- Uchida, T., 1997, Two-Dimensional inversion of Oklahoma data with smoothness regularization: *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 791-800.