مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۴، ۱۳۹۱، صفحهٔ ۱۱۷- ۱۳۰

ارتقاء تفکیک‌پذیری نتایج حاصل از برگردان دوبُعدی داده‌های مگنتوتلوریک

مجید جمیع[۱*] و بهروز اسکویی[۲]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
[۲] استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۷/۲۱، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

چکیده

هدف از این تحقیق ارتقاء تفکیک‌پذیری نتایج حاصل از برگردان به‌روش کمترین مربعات داده‌های دوبُعدی مگنتوتلوریک با استفاده از یک روش هموارسازی جدید است. این روش که متعادل‌سازی فعال نامیده می‌شود تلاش می‌کند تا با متعادل ساختن قیود در برگردادن به روش کمترین مربعات با توجه به حساسیت یک مسئله خاص به ارتقا توان تفکیک و پایداری نتایج حاصل از برگردان بپردازد. برای این کار از یک برنامهٔ از پیش نوشته شده در دو محیط برنامه‌نویسی فرترن و مَت‌لَب استفاده شده است و با ایجاد تغییرات تکمیلی در آن امکان مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک و ارزیابی الگوریتم متعادل‌سازی فعال فراهم شده است. با اِعمال الگوریتم برگردان داده‌های مصنوعی مگنتوتلوریک برای مدل‌های ساده‌ای از زمین و نیز داده‌های صحرایی و مقایسه نتایج حاصل با نتایج برنامه‌های برگردان موجود، ارزیابی‌های لازم صورت گرفته است. خطای rms و نبود تجانس ناچیز بین داده و مدل به‌دست آمده از این روش، در مقایسه با نتایج حاصل از روش برگردان مرسوم که از ضریب لاگرانژ ثابت در کل فرایند برگردان استفاده می‌کند، معلوم می‌شود که این روش رهیافتی مفید برای دستیابی به نتایجی با پایداری و تفکیک‌پذیری بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: کمترین مربعات، ضریب لاگرانژ، تفکیک‌پذیری، پایداری، مگنتوتلوریک

Enhancing the resolving power of 2D least-squares inversion of magnetotelluric data

Jamie, M.[1] and Oskooi, B.[2]

[1]M.Sc. in Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics of University of Tehran, Iran
[2]Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics of University of Tehran, Iran

(Received: 13 Oct 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

Abstract

This paper presents results of applying a new approach on 2D inversion of Magnetotelluric (MT) data in order to enhance resolution and stability of the inversion results. Due to non-linearity and limited coverage of data acquisition in an MT field campaign, minimizing the error by linearization of the problem in least squares inversion usually leads to an ill-posed problem. In general, an inverse problem is unstable, ill-posed and is characterized by non-uniqueness (Tikhonov et al., 1998). The concept of ill-posed problems goes back to Hadamard (1923). He defined a problem to be ill-posed if the solution is not unique or if it is not a continuous function of the data i.e., arbitrarily small perturbations in the input data can cause great changes in the solution. Hence, in order to stabilize the problem and come to a stable solution, further information should be incorporated. In order to acquire reasonable geoelectrical models, regularization of the problem by imposing definite constraints is necessary. Determination of a suitable Lagrangian multiplier in order to balance minimization of error and model roughness

*نگارنده رابط: تلفن: ۰۹۱۵۱۶۰۰۳۹۰ دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۵۴۸ E-mail: mjamie@ut.ac.ir

could be a useful approach to achieve both the resolution and the stability in inversion.

In order to achieve both the resolution and the stability in least-squares inverse modelling in our study, an intermediate value of the Lagrangian multiplier must be chosen. Too large or small Lagrangian multipliers yield to undesirable effects on resolution and stability. In this paper, the regularization parameter is set by a value from log-linear interpolation (Yi et al., 2003).

$$\log(\lambda_i) = \log(\lambda_{\min}) + \frac{\log(\lambda_{\max}) - \log(\lambda_{\min})}{\log(SP_{\max}) - \log(SP_{\min})} \times \{\log(SP_i) - \log(SP_{\min})\}$$

Where, $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ and $SP_{\min}, SP_{\max}$ are minimum and maximum for Lagrangian multipliers and spread function respectively. The regularization parameter can be set optimally by the spread function SP_i of the ith model parameter which is defined by the parameter resolution matrix R. The spread function shows how much the ith model parameter is not resolvable and is written as bellow:

$$SP_i = \sum_{j=1}^{M} \{w_{ij}(1 - S_{ij}) R_{ij}\}^2$$

Where, M is the total number of inversion parameters, w_{ij} is a weighting factor defined by the spatial distance between the ith and jth model parameters, and S_{ij} is a factor which indicates whether the constraint or regularization is imposed on the ith parameter and its neighboring parameters. An alternative to varying the Lagrangian multiplier as the iterations proceed is to use the spatially varying Lagrangian multiplier (Sasaki, 1989). Hence, varying the Lagrangian multiplier by trial and error is preferred to get resolution and stability. Small regularization parameters mean higher resolvable inversion blocks in parameter resolution analysis sense (Menke, 1989).

We tested the capability of the Active Constraint Balancing (ACB) approach (Yi et al., 2003) in enhancing the resolving power of least-squares inversion results by applying it on 2D synthetic MT data generated from forward modeling code of Geotools-MT for simple models of the earth and then on the field data. Using ACB approach, the rms error and data misfit is much less than the conventional approach with fixed Lagrangian multiplier, which leads to higher resolving power and the stability of the inversion results. The inversion code which was used in this paper (Lee et al., 2009) consists of finite element for computing 2D MT model responses, and smoothness-constrained least-squares inversion. By comparing the resistivity sections, the anomalous object can be seen much clearer and distinct in the case of ACB approach. This enhancement in the resolution could be well interpreted as the result of using varying Lagrangian multipliers in the smoothness-constrained least-squares inversion using ACB approach.

Key words: Least-squares inversion, Lagrangian multiplier, Magnetotelluric, Stability, Resolution, ACB

۱ مقدمه

اکثــر روش‌هــای برگــردان ژئــوفیزیکی بــا اســتفاده از خطی‌سازی مسئله معکوس و سپس کمینه کردن نبود تجانس داده در برگردان به روش کمترین مربعات حل می‌شوند. به‌دلیل غیرخطی بودن مدل و نیز شکاف موجود به‌سبب کافی نبودن داده‌های جمع‌آوری شده در طرح‌های ژئوفیزیکی، با یک مسئله بدرفتار مواجه می‌شویم. برای

دستیابی به پایداری و نیز تسریع در سرعت همگرایی، انواع قیدها و هموارسازی مثل قیدهای هموارکننده و یا میرایی (کانستبل و همکاران، ۱۹۸۷؛ ساساکی، ۱۹۸۹) مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌منظور به‌دست آوردن تفکیک‌پذیری زیاد و برگردان‌سازی هموار، دقت بسیار زیادی را می‌باید در کمینه کردن خطا در برازش داده و میزان هموارسازی به عمل آورد. در ارتباط با هموارسازی، جاپ و ووزوف (۱۹۷۵)، یک روش برگردان کمترین مربعات به روش قیدهای میرایی را توسعه دادند. نمت و همکاران (۱۹۹۷)، نیز روشی پویا با استفاده از قیدهای هموارکننده برای تحقیقات توموگرافی لرزه‌ای را توسعه دادند. در این دو روش ضریب لاگرانژ با هر تکرار تغییر می‌کند. برخی تحقیقات (دیگروت هیدلین و کانستبل، ۱۹۹۰؛ ساساکی، ۱۹۸۹) از یک مدل برگردان مناسب به‌منظور هموارسازی در تفکیک‌پذیری نتایج حاصل از برگردادن استفاده کردند. از پارامتری کردن بلوکی با بلوک‌های در اندازه‌های مختلف به منظور کنترل تفکیک‌پذیری نتایج حاصل از برگردان استفاده شده است. تفکیک‌پذیری و پایداری برگردان مهم‌ترین نتیجه این روش‌ها هستند. دراولین رهیافت با استفاده از تغییر مقدار ضریب لاگرانژ با تکرار، تفکیک‌پذیری با همگرا شدن تکرارها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی دوم یعنی پارامتری کردن بلوکی بااندازه متفاوت بلوک‌ها روش بسیار مفیدی است، زیرا اندازه بلوک‌ها را با استفاده از آنالیز حساسیت به‌دست می‌آورد و از طرفی آشفتگی‌های کوچک مقدار در زمین را می‌توان در این روش نادیده انگاشت.

در تحقیق پیش‌رو یک روش جدید در برگردان دوبُعدی به روش کمترین مربعات معرفی می‌شود که به تحلیل تفکیک‌پذیری با استفاده از پارامترهای مدل و متعادل‌سازی قیدها می‌پردازد. با معرفی ضریب لاگرانژ درحکم یک متغیر وابسته به مکان در فرایند هموارسازی، می‌توانیم به متعادل‌سازی هموارسازی در فرایند برگردان بپردازیم. ضرایب متغیر لاگرانژ با استفاده از ماتریس تفکیک‌پذیری و تحلیل از راه تابع پراکندگی باکوس-گیلبرت به‌دست می‌آیند. این فرایند، متعادل‌سازی فعال (Active Constraint Balancing) نامیده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان یک تصویر ارتقایافته از زمین با استفاده از متعادل‌سازی قیدها به‌کار رفته در برگردان‌سازی به‌دست آورد.

۲ نظریه روش

۲-۱ ماتریس قدرت تفکیک و تابع توزیع

اکثر مسائل معکوس ژئوفیزیکی با استفاده از روش کمترین مربعات تکراری حاصل می‌شوند. مسئله با خطی‌سازی شروع می‌شود و سعی دارد تا به یک مدل بهینه از زمین دست یابد تا بتواند خطا و یا نبود تجانس داده و مدل را کمینه کرد. می‌دانیم بردار خطا بین داده مشاهده شده و محاسبه شده به‌صورت زیر تعریف می‌شود (منکه، ۱۹۸۹):

$$e = d \times F(P_0) \qquad (۱)$$

که در آن، d داده محاسبه شده و $F(P_0)$ بیانگر پاسخ مدل برای مدل اولیه P_0 است.

با استفاده از بسط سری‌های تیلور فرمول بالا، می‌توان معادله ماتریسی زیر را به‌دست آورد (جاپ و ووزوف، ۱۹۷۵) که در آن ΔP بردار انحراف از مدل است.

$$e = J\Delta P \qquad (۲)$$

که در آن، J مشتق جزئی یا ماتریس ژاکوبی است و به‌صورت زیرتعریف می‌شود (منکه، ۱۹۸۹):

$$J = \frac{\partial F}{\partial P} \qquad (۳)$$

معادله (۲) معمولاً بدرفتار است و نوعی از منظم‌سازی مانند قیدهای هموارکننده و یا میرایی به منظور رسیدن به جوابی پایدارموردنیاز است. یی و همکاران (۲۰۰۳)، برای

به‌دست آوردن بردار انحراف از مدل بهینه ΔP، به کمینه کردن تابع توزیع زیر پرداختند:

$$S = e^T e + \lambda\{(\partial^n \Delta P)^T (\partial^n \Delta P)\} \qquad (۴)$$

که در آن، λ ضریب لاگرانژ است. اولین عبارت سمت راست معادله (۴) بیان‌کننده کمینه‌سازی خطا در روش کمترین مربعات است. عبارت دوم وظیفه تلفیق قیدها و هموارسازی را برعهده دارد (لاین و ترتیل، ۱۹۸۴). اگر n، برابر با صفر باشد، معادله (۴) متناظر با روش مارکوات- لونبرگ است و چنانچه n، برابر ۱ و یا ۲ باشد معادله متناظر با برگردان با قیدهای هموار است. یی و همکاران (۲۰۰۳)، با کمینه کردن معادله (۴) با توجه به بردار انحراف از مدل به معادله نرمال زیر رسیدند:

$$[J^T J + \lambda(\partial^n)^T \partial^n]\Delta P = J^T e \qquad (۵)$$

که در این معادله، C بیانگر عملگر ∂^n در معادله (۴) است. بنابراین بردار انحراف از مدل را می‌توان با برگردان ماتریس در براکت سمت چپ معادله (۵) به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\Delta P = J^{-g} e \qquad (۶)$$

که در آن، J^{-g} ماتریس برگردان کاذب است و با معادله زیر تعریف می‌شود (منکه، ۱۹۸۹):

$$J^{-g} = [J^{-g} J + \lambda C^T C]^{-1} J^T \qquad (۷)$$

ماتریس کیفیت R (جکسون، ۱۹۷۲ و منکه، ۱۹۸۹) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = J^{-g} J \qquad (۸)$$

توجه شود که ماتریس کیفیت ممکن است مرتبط با فیلتر میانگین وزنی باشد که روی بردار انحراف از مدل واقعی ΔP_g عمل می‌کند و به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\Delta P = R \Delta P_g \qquad (۹)$$

که در این رابطه، $e = J\Delta P_g$. از آنجا که ماتریس کیفیت R حاصل‌ضرب ژاکوبی و ماتریس‌های برگردان کاذب است، می‌توان تشخیص داد که پارامترهای معینی قابل تفکیک هستند یا خیر. اگر یک پارامتر به‌طور کامل تفکیک شود، بردار سطری متناظر ماتریس تفکیک می‌باید مقدار واحد را برای آن پارامتر اختیار کند و مقدار صفر در بقیهٔ سطرهای ماتریس تفکیک تولید خواهد شد. از سوی دیگر اگر پارامتری به‌هیچ‌وجه تفکیک نشود، بردار سطری شامل اعداد تصادفی خواهد بود.

برای مشخص کردن تفکیک‌پذیری از تابع توزیع باکوس-گیلبرت (منکه، ۱۹۸۹)، که به‌منظور ارزیابی توزیع مکانی بردارهای سطری ماتریس کیفیت به‌کار می‌رود، استفاده می‌شود. یک مقدار بزرگ تابع توزیع برای یک پارامتر مشخص بیانگر از بین رفتن تفکیک‌پذیری آن پارامتر و یا برعکس است. این تابع توزیع برای i–اُمین پارامتر به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$SP_i = \sum_{j=1}^{M} \{W_{ij}(1 - S_{ij})R_{ij}\}^2 \qquad (۱۰)$$

که در آن، N تعداد پارامترها و W_{ij} ضریب وزنی قابل محاسبه از فاصله مکانی بین دو پارامتر i و j است. در اینجا S_{ij} ماتریس مورد استفاده برای هموارسازی در فرایند برگردان است (برای مثال تاثیر قیدهای هموارکننده و یا میرایی). S_{ij} برابر واحد است هنگامی که C_{ij} در معادله (۵) غیر صفر باشد و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

۲-۲ متعادل‌سازی فعال

در مدل‌سازی معکوس سعی می‌کنیم برآورد خوبی از ضریب لاگرانژ داشته باشیم. اما پیدا کردن بهترین ضریب کار ساده‌ای نیست. به‌لحاظ نظری، مقادیر بزرگ برای ضریب لاگرانژ، قیدهای بیشتری را به جواب اِعمال می‌کند و تفکیک‌پذیری ضعیف‌تری از پارامترها را به‌دست می‌دهد. از سوی دیگر مقایر کم ضریب لاگرانژ

بر پایداری برگردان اثـر منفـی دارد. یـک مقـدار بینـابینـی برای ضریب لاگرانژ به‌منظور دستیابی به تفکیک‌پـذیری و پایداری لازم اسـت. ایـن رهیافـت ایـن حقیقـت را نادیـده می‌گیرد که همه پارامترها، تفکیک‌پذیری یکسانی ندارند. برای یک پارامتر غیرقابل تفکیک، در صورتی‌که ضـریب لاگرانژ داده شده خیلی کوچک باشد، تولیـد جـواب‌هـای پُر خطا خواهد شـد. بـرای پارامترهـای بـا تفکیـک‌پـذیری زیاد، تفکیک‌پذیری کاهش یافته و اطلاعـات زمـین قابـل بازیابی نخواهد بود. بنابراین تغییر ضریب لاگرانژ در حـین همگرایی معکوس‌سازی برای دستیابی بـه تفکیـک‌پـذیری بیشتر و پایداری تـرجیح داده مـی‌شـود (جـاپ و ووزوف، ۱۹۷۵؛ نمت و همکاران، ۱۹۹۷). لذا این روش در مقایسـه با حالتی کـه یـک مقـدار ثابـت بـرای ضـریب لاگرانـژ در برگردان به‌کار می‌رود دقیق‌تر است. یک رهیافت به‌منظور اسـتفاده از ضـریب لاگرانـژ متغیـر بـا تکـرار در فراینـد برگردان، استفاده از ضـریب لاگرانـژ متغیربـا مکـان اسـت (ساساکی، ۱۹۸۹)، که ایـن روش بـا آزمـون و خطـا قابـل حصول اسـت. بـرای مثـال در روش ژئـوفیزیکی مقاومـت ویژه، پارامترهای واقع در نقـاط دور از محـل‌انـدازه‌گیـری باید درحکم مکـان‌هـایی بـا تفکیـک‌پـذیری کـم در نظـر گرفته شـوند و بـرعکس. مقـادیر بـزرگ ضـریب لاگرانـژ برای نقاط با تفکیک‌پذیری کم تخصیص داده مـی‌شـود و مقادیر پایین‌تر ضریب لاگرانژ برای نقاط با تفکیک‌پذیری زیاد. این نظر با تعریف ضریب لاگرانـژ λ در معادلـه (۴) به‌منزلهٔ متغیر مکانی $\lambda(x,y,z)$ قابل تعمـیم خواهـد بـود. دراین‌صورت تابع توزیع در معادله (۴) را یـی و همکـاران (۲۰۰۳)، به‌صورت زیر بازنویسی کردند:

$$S=(e-J\Delta P)^T(e-J\Delta P)+\{(C\Delta P)^T\Lambda(C\Delta P)\} \qquad (۱۱)$$

که در آن، $\Lambda=diag(\lambda_i)$ و λ_iرا می‌توان به‌صورت $\lambda_i=\lambda(x_i,y_i,z_i)$ نوشت، که تابعی از متغیرهای مکانی **x** و **y** و **z** است. دراین‌صورت می‌توان انحراف از مدل بهینه شده را به‌صورت زیر نوشت (یی و همکاران، ۲۰۰۳):

$$\Delta P=[J^TJ+C^T\Lambda C]^{-1}J^Te \qquad (۱۲)$$

متعادل‌سازی فعال روشی برای مشخص کردن ضرایب لاگرانژ متغیر با مکان است. در متعادل‌سازی فعال، ابتدا تابع توزیع ماتریس تفکیک را از راه معادلات (۶) و (۸) با یک مقدار کوچک برای ضریب لاگرانژ (برای مثال ۰،۰۰۵) در معادله (۵) پیدا می‌کنیم. سپس تابع توزیع را به ضرایب لاگرانژ متغیر با مکان محدود شده با مقادیر از پیش تعیین شده تبدیل می‌کنیم. اگر تابع توزیع پارامتر بزرگ باشد (که نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری کم است)، متعادل‌سازی فعال مقدار بزرگی را برای ضریب لاگرانژ به آن پارامتر اختصاص می‌دهد و برعکس. بر طبق توابع توزیع، ضرایب لاگرانژ به‌صورت خطی در فضای لگاریتمی بین محدوده از پیش انتخاب شده پایین و بالا اختصاص داده می‌شوند. فضای لگاریتمی از آن جهت انتخاب می‌شود که تابع توزیع به‌صورت لگاریتمی بنا به موقعیت پارامترهای مدل تغییر می‌کند و میزان تفکیک‌پذیری به‌صورت معکوس با نسبت لگاریتم تابع توزیع ارتباط دارد. تابع زیر ضریب لاگرانژ را براساس تابع توزیع تخصیص می‌دهد (یی و همکاران، ۲۰۰۳):

$$\log(\lambda_i)=\log(\lambda_{\min})+\frac{\log(\lambda_{\max})-\log(\lambda_{\min})}{\log(SP_{\max})-\log(SP_{\min})}\times\{\log(SP_i)-\log(SP_{\min})\} \qquad (۱۳)$$

که در آن، λ_iضریب لاگرانژ برای پارامتر **i** و SP_i تابع توزیع پارامتر **i** است. $\lambda_{\min}$ و $\lambda_{\max}$ به‌ترتیب مقادیر کم و زیاد برای ضریب لاگرانژ هستند. $SP_{\min}$ و $SP_{\max}$ به‌ترتیب مقادیر کم و زیاد برای تابع توزیع هستند. می‌باید دقت شود که تابع توزیع برای یک پارامترخاص باید بین مقادیر $SP_{\min}$ و $SP_{\max}$ قرار گیرد. در انتخاب مقادیر زیاد و کم برای تابع توزیع و ضریب لاگرانژ، ضروری است که

ضریب لاگرانژ و تابع توزیع به‌دقت بررسی شود. تغییرات تابع توزیع می‌باید بین دو حد بیشینه و کمینه تعیین شده برای تابع توزیع باشد.

برای مقادیر زیاد و کم ضریب لاگرانژ نیز دو مقدار کمینه و بیشینه در نظر می‌گیریم. براساس مقادیر تخصیص داده شده برای حدود بالا و پایین تابع توزیع و ضریب لاگرانژ می‌توان توزیع ضریب لاگرانژ را به‌صورت خودکار در فضای یک، دو و سه‌بُعدی عملی ساخت. رهیافت متعادل‌سازی فعال مشابه روش پارامتری کردن بلوکی با مقادیر متغیر در برگردان غیرخطی است. در روش پارامتری کردن بلوکی، اندازه بلوک‌ها ثابت نیست و براساس تفکیک‌پذیری پارامترها تغییر می‌کند. اگرچه این روش قادر است تفکیک‌پذیری متغیر پارامترها را در نظر بگیرد، قادر به در نظر گرفتن شرایط ایجاد شده در طی فرایند برگردان با تکرار نیست. بنابراین روش متعادل‌سازی فعال برای توزیع ضرایب لاگرانژ از راه تابع توزیع به‌کار گرفته می‌شود. از سوی دیگر رهیافت متعادل‌سازی فعال قادر است خصیصه‌های مدل و داده را در فرایند برگردان نشان دهد. این ویژگی‌ها به آسانی قابل درک هستند زیرا تابع توزیع از ژاکوبی بهره می‌گیرد که وابسته به ویژگی‌های پارامترهای مدل و داده است.

۳ مثال‌های عددی

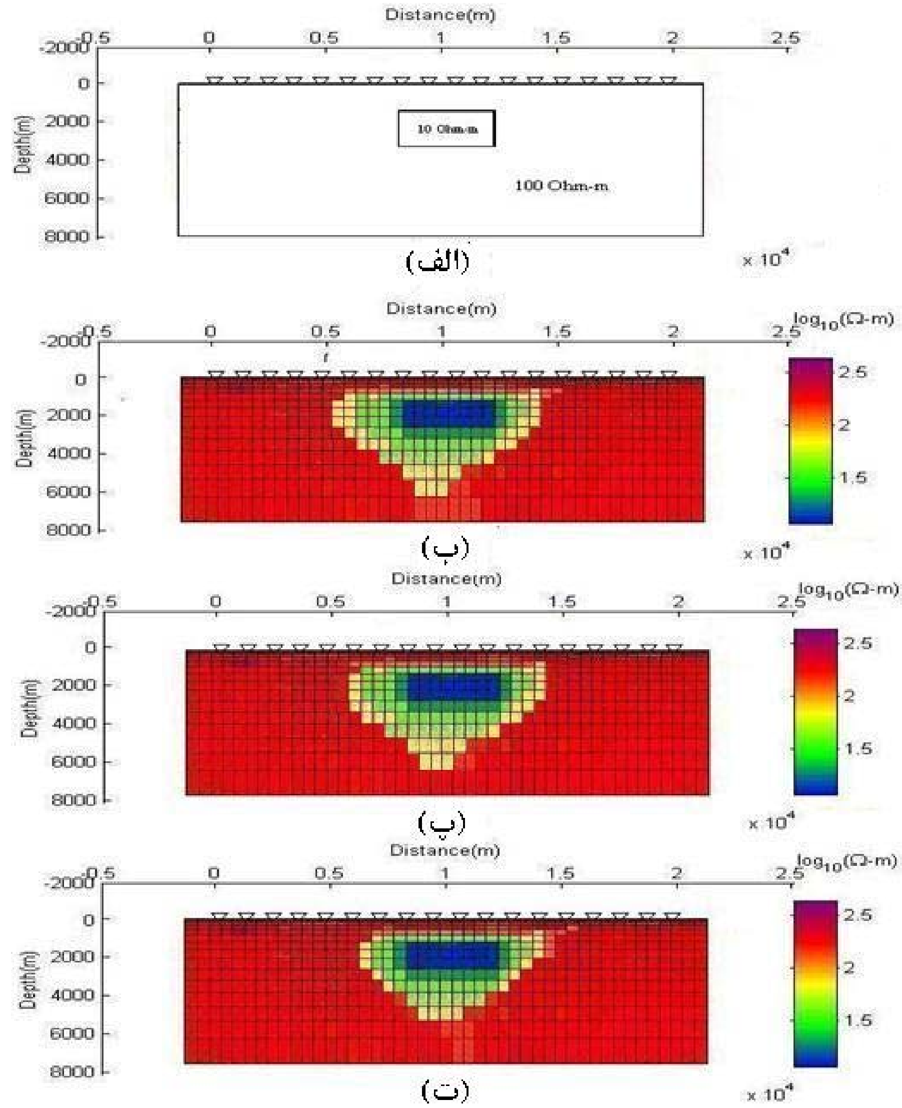
۳-۱ برگردان داده‌های مصنوعی

شکل ۱، نتایج حاصل از برگردان داده‌های مصنوعی برای مدلی (شکل ۱-الف) شامل یک مستطیل با مقاومت ویژه ۵ اهم‌متر را در نیم‌فضای ۱۰۰ اهم‌متر نشان می‌دهد (جمیع و اسکویی، ۲۰۱۰). داده‌های مصنوعی با استفاده از کُد دوبُعدی مدل‌سازی مستقیم RRI نرم‌افزار GEOTOOLS-MT (بوکر و اسمیت، ۱۹۹۳) برای یک نیم‌رخ شرقی-غربی به طول ۲۰ کیلومتر شامل ۱۸ ایستگاه MT با استفاده از ۲۸ بسامد در محدوده بسامدی بین 0.001 Hz تا 1000 Hz تولید شده‌اند. فاصله ایستگاه‌های MT از یکدیگر حدود ۱۱۰۰ متر است. تعداد بلوک‌های به‌کار رفته در برگردان در راستای x و z به‌ترتیب برابر ۴۵ و ۱۵ است. نتایج حاصل از برگردان داده‌های مصنوعی برای مد TE (شکل ۱-ب)، مد TM (شکل ۱-پ) و ترکیب دو مد TE و TM (شکل ۱-ت) از راه برنامه نشان داده شده‌اند.

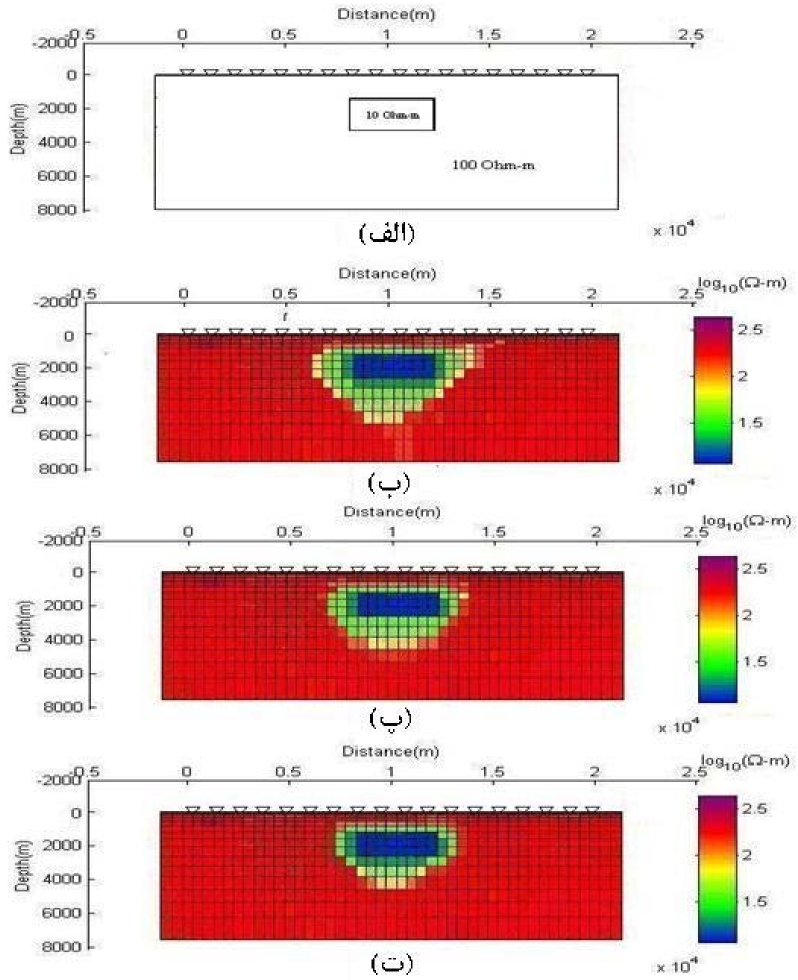
شکل ۲، نتایج حاصل از برگردان داده‌های مصنوعی برای مد TM را بعد از اِعمال رهیافت متعادل‌سازی فعال بر فرایند برگردان نشان می‌دهد. شکل۲-ب نشان‌دهنده مقطع مقاومت ویژه برگردان شده با استفاده از روش مرسوم با ضریب لاگرانژ ثابت ۲ است. شکل۲-پ و ت، مقاطع مقاومت ویژه برگردان شده بعد از اِعمال رهیافت متعادل‌سازی فعال را نشان می‌دهد. در شکل ۲-پ، ضریب لاگرانژ بیشینه ۸ با فاصله گام ۰٫۵ خطای rms = ۰٫۰۰۸ و نبود تجانس داده ۰٫۰۳ را به‌دست می‌دهد و در حالی که با استفاده از ضریب لاگرانژ بیشینه ۸ و فاصله گام ۰٫۱ خطای rms = ۰٫۰۰۳۶ و نبود تجانس داده ۰٫۰۰۱۷ به‌دست می‌آید (شکل ۲-ت) که بهینه‌ترین مدل به‌دست آمده با آزمون و خطا است که بیشترین تفکیک‌پذیری را در مقایسه با سایر مدل‌های برگردان شده دارد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، ضریب لاگرانژ (λ) درحکم یک متعادل‌ساز به‌منظور کمینه کردن نبود تجانس نرم داده و مدل عمل می‌کند. مقادیر بزرگ ضریب لاگرانژ سبب کاهش نبود تجانس داده و مدل و در نتیجه تولید مدلی هموارتر می‌شود. در حالت عکس، هنگامی که $\lambda \to 0$ ، مسئله معکوس به یک مسئله کمترین مربعات بدرفتار نزدیک می‌شود که در نتیجه ایجاد مدلی غیرقابل‌قبول می‌کند (پارکر، ۱۹۸۰).

مقایسه مدل خام حاصل از داده‌های مصنوعی با پاسخ مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه و فاز مد TM در شکل ۳ آورده شده است. شکل‌های ۳-الف و ۳-پ، به‌ترتیب مدل خام برای مقاومت ویژه و فاز هستند

و شکل‌های ۳–ب و ۳–ت به‌ترتیب مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه و فاز را نشان می‌دهند. نتایج حاصل بعد از اِعمال متعادل سازی فعال بر فرایند برگردان مد TM به‌منظور مقایسه مدل خام حاصل از داده‌های مصنوعی با پاسخ مدل پیش‌بینی شده با برنامه در شکل ۴ آورده شده‌اند. با مقایسه نتایج حاصل در شکل‌های ۳ و ۴ به‌راحتی تاثیر اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال بر افزایش پایداری فرایند برگردان و نیز کاهش نبود تجانس بین مدل مشاهده شده و پیش‌بینی شده با برنامه و لذا حصول مدلی با تفکیک‌پذیری بیشتر قابل مشاهده است. مقاطع مقاومت ویژه برگردان شده با کد برگردان دوبُعدی RRI نرم‌افزار تجاری GEOTOOLS-MT برای مدل مصنوعی عرضه شده در شکل ۱–الف با استفاده از نرم دو و نرم یک به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. نتایج حاصل از برگردان داده‌های مصنوعی با ۵٪ نوفه تصادفی گاوسی برای، (الف) مدلی شامل یک مستطیل با مقاومت ویژه ۵ اهم‌متر در نیم‌فضای ۱۰۰ اهم‌متر، مشابه مدل به‌کار رفته در جمیع و اسکویی (۲۰۱۰)، نتایج حاصل از برگردان داده‌های مصنوعی برای، (ب) مد TE، (پ) مد TM و (ت) ترکیب دو مد TE و TM.

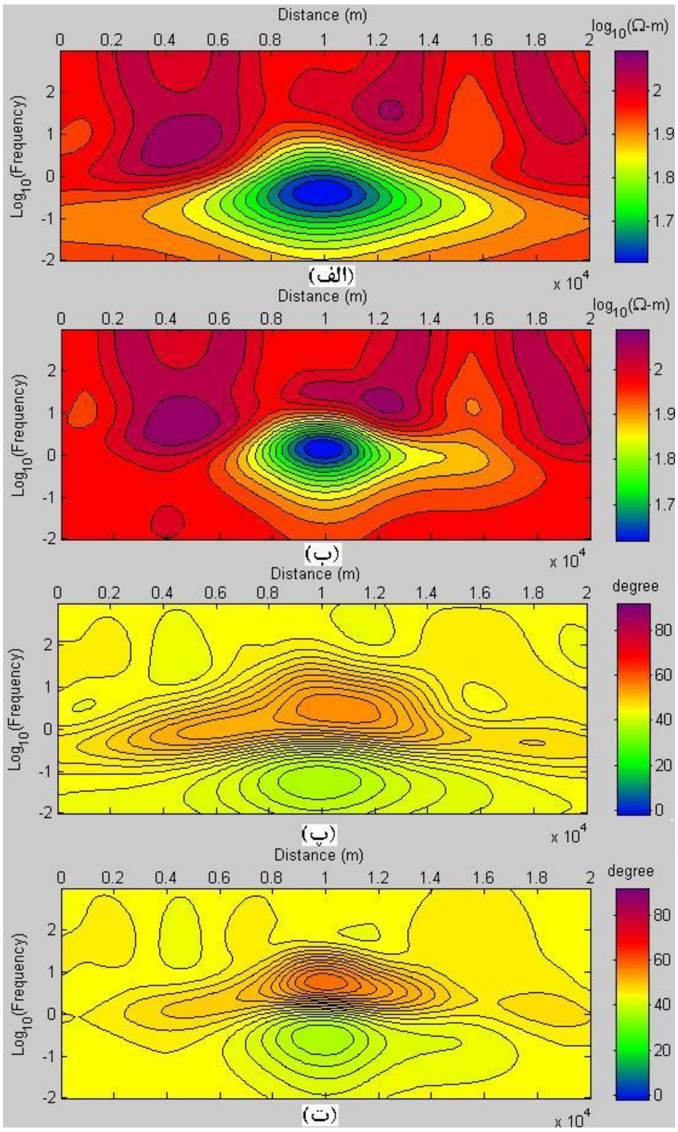


شکل ۲. نتایج حاصل از برگردان داده‌های مصنوعی ترکیب دو مد TE و TM با ۵٪ نوفه تصادفی گاوسی برای مدل به‌کار رفته در شکل (۱-الف) برای، (ب) با استفاده از روش مرسوم با ضریب لاگرانژ ثابت ۲ و (پ) و (ت) مقاطع مقاومت ویژه برگردان شده بعد از اِعمال رهیافت متعادل‌سازی فعال را نشان می‌دهند.

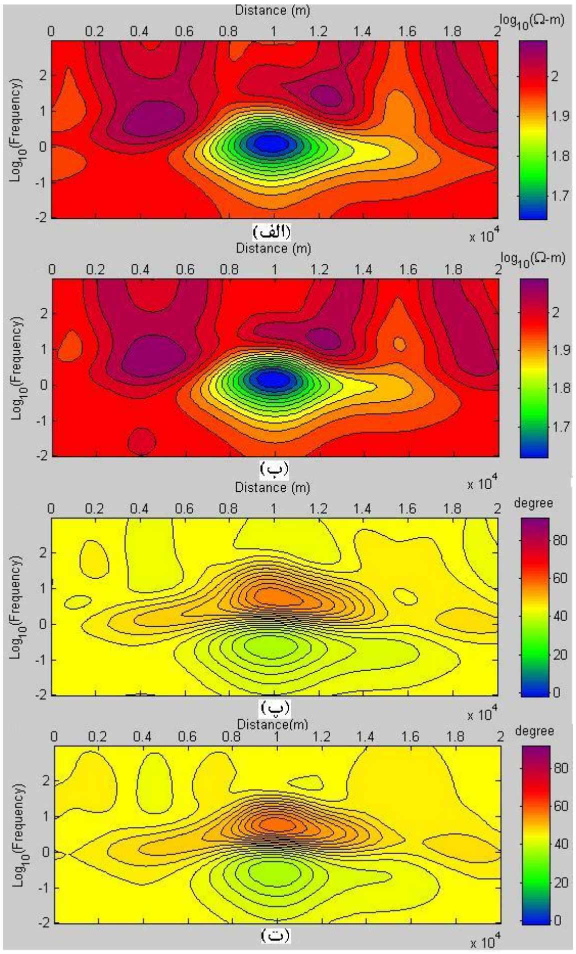
۳-۲ اِعمال برنامه بر داده‌های واقعی

به‌منظور سنجش نتایج برگردان حاصل از اِعمال برنامه، بعد از اِعمال آن بر داده‌های ژئوفیزیکی صحرایی دوبُعدی، نتایج به‌دست آمده با نتایج به‌دست آمده از برنامه برگردان REBOCC (سیرپینواراپورن و اگبرت، ۲۰۰۰) مقایسه شده‌اند. داده‌ها صحرایی مورد استفاده در این تحقیق، داده‌های MT دوبُعدی برداشت شده از منطقهٔ اینچه‌برون استان گلستان واقع در ۸۰ کیلومتری شمال شهر گرگان است که به‌منظور بررسی الکتریکی لایه‌های زیرسطحی با هدف بررسی منطقه از نظر لایه‌های رسانا که ممکن است حاوی آب شور و به احتمال زیاد ترکیبات یددار باشند، صورت گرفته است. برای سنجش اعتبار برنامه و نیز الگوریتم متعادل‌سازی فعال، داده‌های برداشت شده حاصل از ۱۷ ایستگاه با فاصله ۱۰۰۰ متر از یکدیگر واقع بر یک نیمرخ غربی-شرقی به طول ۱۷ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفته است. داده برداری برای مد TE با تعداد ۲۸ بسامد صورت گرفته است. بسامدهای مورد استفاده برحسب هرتز عبارت‌اند از: ۰٫۰۱۵۶۰، ۰٫۰۲۲۱۰،

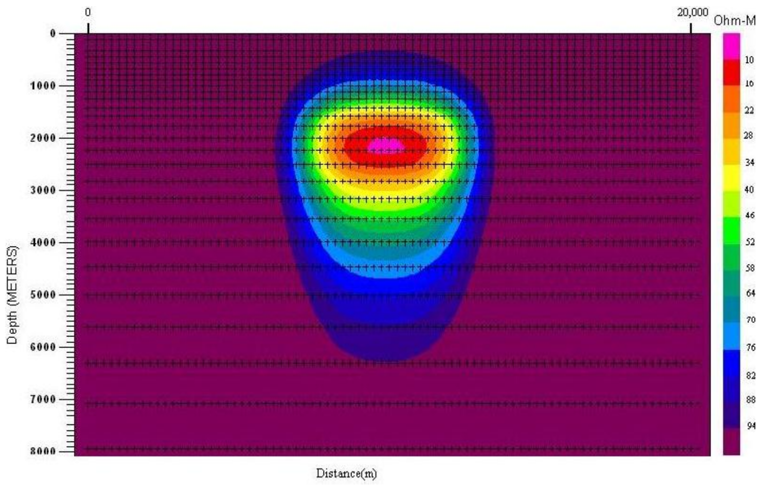
۰٫۰۳۱۲۰، ۰٫۰۴۴۲۰، ۰٫۰۶۲۵۰، ۰٫۰۸۸۴۰، ۰٫۱۲۵۰۰، ۰٫۱۷۶۸۰، ۰٫۲۵۰۰۰، ۰٫۳۵۳۶۰، ۰٫۵۰۰۰۰، ۰٫۷۰۷۲۰، ۱٫۰۰۰۰۰، ۱٫۴۱۴۲۰، ۲٫۰۰۰۰۰، ۲٫۸۲۸۱۰، ۴٫۰۰۰۰۰، ۵٫۶۵۶۱۰، ۸٫۰۰۰۰۰، ۱۱٫۳۱۳۵۰، ۶٫۰۰۰۰۰، ۲۲٫۶۲۹۶۰، ۳۲٫۰۰۰۰۰، ۴۵٫۲۴۸۹۰ ، ۶۳٫۹۷۹۵۰، ۹۰٫۵۷۹۷۰، ۱۲۷٫۹۹۱۰۰،۱۸۱٫۰۲۸۰۰. به‌دلیل مسطح بودن منطقه نیازی به در نظر گرفتن توپوگرافی در برگردان نیست. شکل ۷–الف، ۷–ب و ۷–پ) نشان‌دهنده نتایج برگردان مد TE، با استفاده از برنامه مورد استفاده است. شکل ۷–الف مقطع مقاومت ویژه برگردان شده را با استفاده از روش مرسوم و با ضریب لاگرانژ ثابت ۲ نشان می‌دهد. شکل ۷–ب نتایج حاصل بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال با ضریب لاگرانژ ۶ و طول گام ۰٫۲ را نشان می‌دهد که خطای rms = ۰٫۱۸ و نبود تجانس داده ۰٫۰۹ را به دست می‌دهد.



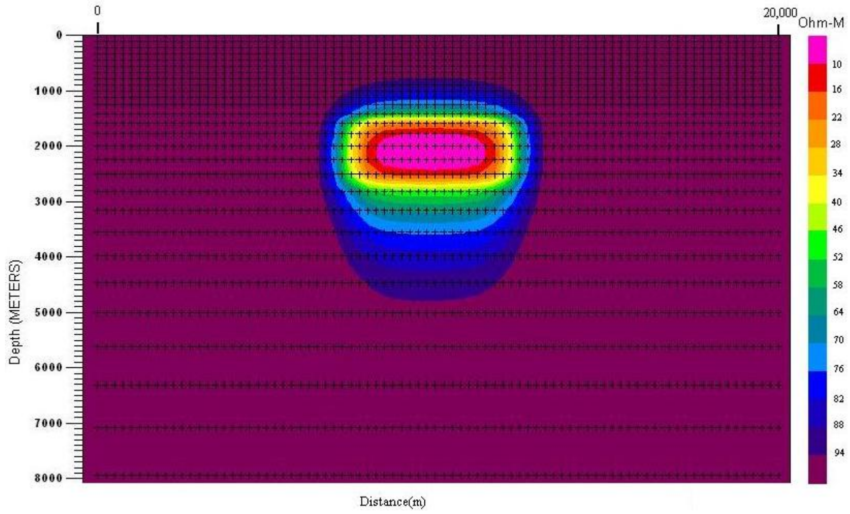
شکل ۳. مقایسه مدل خام حاصل از داده‌های مصنوعی با پاسخ مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه و فاز برای ترکیب دو مد TE و TM (الف) و (پ) به‌ترتیب مدل خام برای مقاومت ویژه و فاز هستند و (ب) و (ت) به‌ترتیب مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه و فاز را نشان می‌دهند.



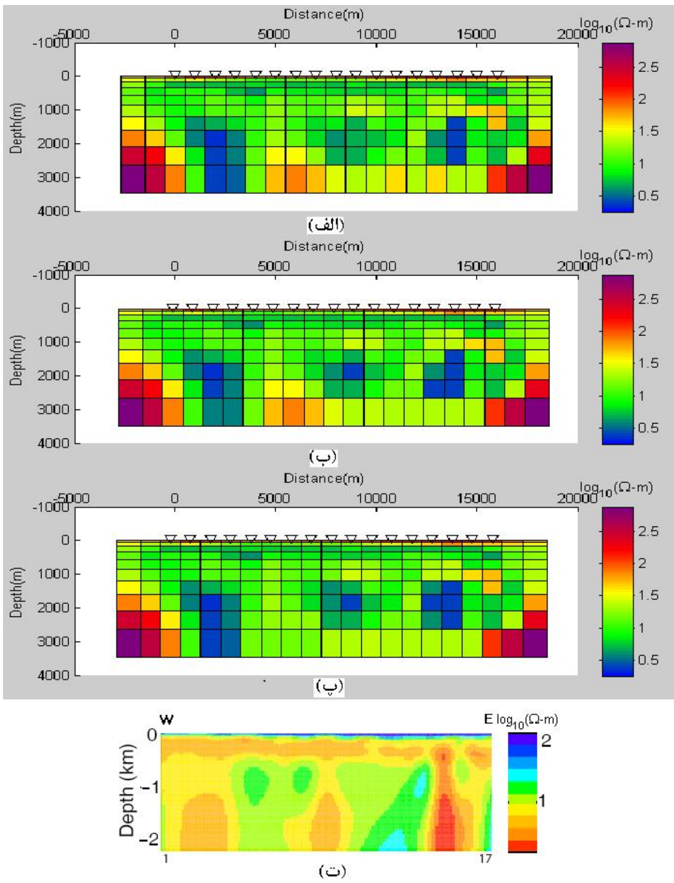
شکل ٤. مقایسه مدل خام حاصل از داده های مصنوعی با پاسخ مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه و فاز برای ترکیب دو مد TE و TM بعد از اعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال بر فرایند برگردان (الف) و (پ) به‌ترتیب مدل خام برای مقاومت ویژه و فاز هستند و (ب) و (ت) به‌ترتیب مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه و فاز را نشان می‌دهند.



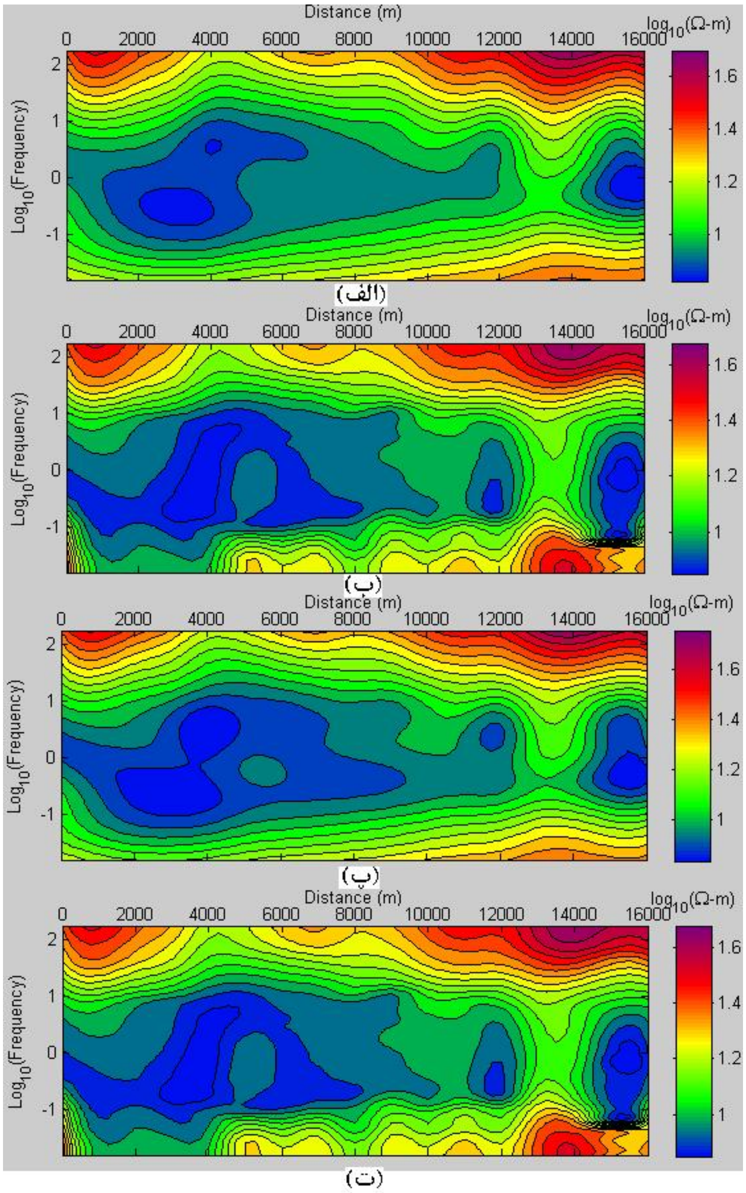
شکل ٥. مقطع مقاومت ویژه برگردان شده با کد برگردان RRI نرم افزار تجاری GEOTOOLS-MT برای مدل مصنوعی داده شده در شکل ۱–الف با استفاده از نرم دو.



شکل ٦. مقطع مقاومت ویژه برگردان شده با کد برگردان RRI نرم‌افزار تجاری GEOTOOLS-MT برای مدل مصنوعی عرضه شده در شکل ۱–الف با استفاده از نرم یک.



شکل ۷. مقایسه نتایج برگردان داده‌های صحرایی مد TE با استفاده از برنامه مورد استفاده برای (الف) روش مرسوم با ضریب لاگرانژ ثابت۲، (ب) بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال با ضریب لاگرانژ ٦ و طول گام ۰٫۲ و (پ) بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال با ضریب لاگرانژ ۸ و طول گام ۰٫٤، با نتیجه برگردان این داده‌ها با استفاد از برنامه REBOCC (مقطع شکل ۷–ت از اسکویی، ۱۳۸۹ اقتباس شده است).



شکل ۸. مقایسه مدل خام حاصل از داده‌های واقعی با پاسخ مدل محاسبه شده توسط برنامه برای مقاومت ویژه مد TE قبل از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال با ضریب لاگرانژ ثابت ۲ برای (الف) مدل خام حاصل از داده‌های مصنوعی و (ب) پاسخ مدل محاسبه شده توسط برنامه. پاسخ مدل محاسبه شده توسط برنامه برای مقاومت ویژه مد TE بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال با ضریب لاگرانژ ۸ و طول گام ۰٫٤ برای (پ) مدل خام حاصل از داده‌های مصنوعی و (ت) پاسخ مدل محاسبه شده توسط برنامه.

شکل ۷–پ که بهینه‌ترین مقطع به‌دست آمده از نظر تفکیک‌پذیری است، بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال با ضریب لاگرانژ ۸ و طول گام ۰٫۴ منجر به خطای rms =۰٫۰۳۸ نبود تجانس داده ۰٫۰۰۳۸می‌شود. با مقایسه نتایج حاصل در اشکال ۷–ب و ۷–پ، به‌راحتی تاثیر اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال بر افزایش پایداری فرایند برگردان و نیز کاهش فقدان تجانس بین مدل مشاهده شده و پیش‌بینی شده با برنامه و لذا حصول مدلی با تفکیک‌پذیری بیشتر قابل مشاهده است.

شکل ۸ مقایسه مدل خام حاصل از داده‌های مصنوعی

با پاسخ مدل پیش‌بینی شده با برنامه برای مقاومت ویژه قبل و بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال را نشان می‌دهد. بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال، با کاهش نبود تجانس بین داده مشاهده شده و برآورد شده با برنامه، مدلی قابل قبول‌تر حاصل شده است. نتایج حاصل از برگردان داده‌های صحرایی با استفاده از برنامه REBOCC در شکل ۷–ت نشان داده شده است. نتایج حاصل از برگردان با برنامه در تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از برنامه REBOCC هستند که این نشان‌دهنده اعتبار برنامه برای برگردان داده‌های صحرایی است.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رهیافت متعادل‌سازی فعال معرفی شده است که در آن ضریب لاگرانژ درحکم متغیر مکانی برای افزایش تفکیک‌پذیری نتایج حاصل از برگردان دوبُعدی به روش کمترین مربعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاثیر این روش در افزایش تفکیک‌پذیری از راه ماتریس تفکیک و تابع پخش مورد ارزیابی قرار گرفته است و ضرایب لاگرانژ بهینه با توزیع مکانی به‌منظور افزایش تفکیک‌پذیری در نتایج حاصل از برگردان تعیین و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از اِعمال رهیافت متعادل‌سازی فعال روی داده‌های مصنوعی مگنتوتلوریک برای مدل ساده‌ای از زمین با یک جسم رسانای مستطیل شکل با مقاومت ویژه ۱۰ اهم‌متر واقع در مرکز یک نیم‌فضا با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم‌متر و برای مد TE و TM ترکیب این دو مد در مقایسه با روش مرسوم که از ضریب لاگرانژ ثابت در کل فرایند برگردان استفاده می‌کند، دارای خطای rms کمتر و نبود تجانس کمتری بین داده و مدل هستند. در نتیجه مدل به‌دست آمده واقعی‌تر است و تفکیک‌پذیری بیشتری دارد. از سوی دیگر توانایی الگوریتم متعادل‌سازی فعال در ارتقاء تفکیک‌پذیری و پایداری داده‌های صحرایی، با اِعمال آن بر داده‌های دوبُعدی مگنتوتلوریک برداشت شده به‌منظور پی‌جویی ید از دشت گلستان، مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های مورد استفاده داده‌های حاصل از ۱۷ ایستگاه به فاصله ۱۰۰۰متراز یکدیگر در امتداد یک نیم‌رخ غربی–شرقی است. مقاطع برگردان شده، سه زون حاوی آب شور را در اعماق بین ۱۳۰۰ تا ۲۰۰۰ متری نشان می‌دهند که انطباق قابل‌قبولی با نتایج به‌دست آمده از برنامه REBOCC دارد. بعد از اِعمال الگوریتم متعادل‌سازی فعال بر برگردان داده‌های صحرایی، معلوم می‌شود که این روش رهیافتی بسیار مفید برای دستیابی به نتایجی با پایداری و تفکیک‌پذیری بیشتر است.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم می‌دانیم از حمایت مالی معاونت پژوهش و توسعه شرکت ملی نفت ایران در جهت به‌انجام رسیدن این تحقیق تقدیر و تشکر کنیم.

منابع

اسکویی، ب، ۱۳۸۹، گزارش تحقیقات ژئوفیزیکی روش MT با هدف اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی عمیق حاوی ید در منطقه شمال استان گلستان، گزارش موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به سازمان زمین‌شناسی.

Booker, J. R. and Smith, J. T., 1993, Rapid two-dimensional inversion of COPROD2 data, J. Geomag. Geoelec., **45**, 1073-108.

Constable, S. C., Parker, R. L. and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data, Geophysics, **52**, 289-300.

deGroot- Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, Geophysics, **55**,1613-1624.

Jamie, M. and Oskooi, B., 2010, Enhancing the resolution power of leastsquares inversion results of 2-D magnetotelluric data, Near Surface 2010, EAGE, Zurich.

electromagnetic induction: Existence and construction of solutions based on incomplete data, J. Geophys. Res., **85**(B8), 4421-4428.

Sasaki, Y., 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data, Geophysics, **54**, 254-262.

Siripunvaraporn,W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data, Geophysics, **65**, 791-803.

Yi, M. J., Kim, J. H. and Chung, S. H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, Geophysics, **68**, 931-941.

Jupp, D. L. and Vozoff, K., 1975, Stable iterative methods for the inversion of geophysical data, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., **42**, 67-72.

Lines, L. R. and Treitel, S., 1984, Review of least-squares inversion and its application to geophysical problems, Geophys. Prosp., **32**, 159-186.

Menke, W., 1989, Geophysical data analysis discrete inverse theory, reviseded, Academic Press Inc, San Diego, CA, 289pp.

Nemeth, T., Normark, E. and Qin, F., 1997, Dynamic smoothing in crosswell traveltime tomography, Geophysics, **62**, 168-176.

Parker, R. L., 1980, The inverse problem of