

تفسیر یک بعدی و دو بعدی داده های مگنتوتلوریک شمال شرق دشت گرگان

عیسی منصوری کرمانشاهی^۱ و بهروز اسکویی^۲

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

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

(دریافت: ۱۲/۲/۲۰۰۸، پذیرش نهایی: ۱۳/۱۲/۲۰۰۸)

چکیده

تحقیق حاضر به منظور تشخیص چگونگی رسانایی لایه های زمین در شمال شرق استان گلستان و در منطقه داشلی برون با هدف ارزیابی پتانسیل موجود در منطقه از نظر وجود لایه های رسانای الکتریکی که می توانند حاوی آب شور باشد انجام پذیرفته است. با توجه به بررسی های گسترده صورت گرفته، مخازن احتمالی آب شور زیرزمینی در منطقه مورد اکتشاف به احتمال بسیار زیاد حاوی املاح با درصد زیادی از ماده معدنی ید است؛ و با توجه به ارزش این ماده معدنی و کاربرد وسیع آن در صنایع گوناگون، پژوهه اکتشافی حاضر با استفاده از روش مگنتوتلوریک صورت گرفت. در تحقق این هدف، بررسی های مگنتوتلوریک به گونه ای طراحی شده که رسانایی الکتریکی (یا مقاومت ویژه الکتریکی) در منطقه ای وسیع از سطح زمین تا عمق ۲۰۰۰ متری به نقشه درآمده است.

واژه های کلیدی: داشلی برون، ید، مگنتوتلوریک، مقاومت ویژه الکتریکی

1D and 2D interpretation of the Magnetotelluric (MT) data of northeast Gorgan plain

Mansoori Kermanshahi, I.¹ and Oskooi, B.²

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

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

(Received: 12 March 2008, Accepted: 9 March 2010)

Abstract

A detailed standard Magnetotelluric (MT) study was conducted to recognize brine bearing layers in depths of less than 2000 m in the northeast of Iran close to the southeastern shore of the Caspian Sea. Long and medium period natural-field MT methods have proved very useful for subsurface mapping purpose by determining the resistivity of the near surface structure.

MT data were analyzed and modeled using a 1D inversion scheme. Then corresponding data on eight profiles were inverted using 2D inversion schemes.

Down to 2 km, the resistivity model obtained from the MT data is consistent with the geological information from a 1200 m borehole in the area. Analysis of the MT data-set suggests signatures of salt water reservoirs in the area which are distinguished potentially positive to contain iodine. Due to the very conductive nature of the sediments regardless of all difficulties in the interpretation stage because of the lack of a considerable resistivity contrast we could recognize the more conductive zones in the less conductive host as layers of saline water.

Conductive structures are ideal targets for the Magnetotelluric method when located in a considerably resistive host. They produce strong variations in underground electrical

resistivity. In cases where the electrical resistivity of the target is not substantially different from that of it would be quite difficult to reach a promising result. Despite this limitation, we could get some useful results in our study.

Dashli-Boroon area is located in Golestan Province in the northeastern part of Iran right at the border with Turkmenistan. Geologically it is a part of the Kopeh-Dagh sedimentary basin. Kopeh-Dagh has been formed by the last orogeny phase of Alpine and the erosion that followed. Topography relief is very smooth and basically it is a flat plain consisting of loesses occurring naturally between the Elburz mountain range and the desert of Turkmenistan. Quaternary sediments including clay and evaporates and particularly salt are impenetrable.

An MT survey was carried out using GMS05 (Metronix, Germany) and MTU2000 (Uppsala University, Sweden) systems in February 2007. MT data were collected at 60 sites in a network of 2 by 2 km meshes along eight EW profiles.

For data processing a code developed by Smirnov (2003) was used. 1D and 2D inversions are conducted to resolve the conductive structures. 1D inversion of the determinant (DET) data using the code of Pedersen (2004) as well as the 2D inversion of TE, TM, TE+TM and DET mode data using a code from Siripunvaraporn and Egbert (2000) were performed.

A supplementary goal of this work is to evaluate the possibility of using surface MT measurements on the very conductive sediments to monitor the underground salt water bearing layers or bodies. Our concern which is followed in the current paper, only in the frame of one- and two- dimensional (1D and 2D) interpretation, is to place emphasis on the characteristics of the extremely conductive structures which are supposed to bear iodine in economic meanings. Based upon the MT results some sites were proposed for detail exploration by excavating deep exploration boreholes. As results the resistivity sections show a clear picture of the resistivity changes both laterally and with depth.

Key words: Dashli-Boroon, Conductivity, Iodine, Magnetotelluric, 1D and 2D inversion, Resistivity.

۱ مقدمه

میدان‌های الکترومغناطیسی کمتر باشد، عمق نفوذ میدان‌ها بیشتر خواهد شد و هرچه لایه‌های سطحی رساناتر باشند، عمق نفوذ میدان‌ها کاهش خواهد یافت. هدف از تحقیقات مگنتوتولوریک، تعیین مقاومت ویژه (یا رسانایی بررسی) ساختارهای زیرزمینی است. محدوده بسامد مورد بررسی در روش مگنتوتولوریک با چشم‌های طبیعی ۰/۰۰۰۱ تا ۱۰۰۰ هرتز است (کانیارد، ۱۹۵۳). هدف نهایی در این بررسی مگنتوتولوریک، تعیین مقاومت ویژه ساختارهای زیرزمینی است. لایه‌ای حاوی آب شور دارای رسانایی الکتریکی زیادی هستند. در این مقاله نتیجه پردازش (Processing)

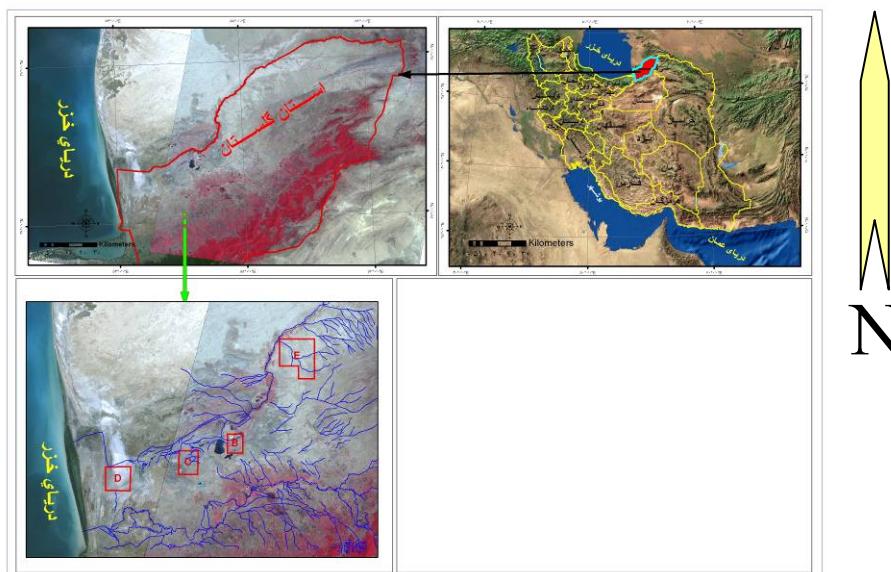
روش مگنتوتولوریک (MT) یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه بسامد است. این روش یک فن رئوفیزیکی سطحی غیرفعال (Passive) است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین در بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند. در این روش امواج الکترومغناطیسی با توجه به بسامدشان و نیز مقاومت ویژه لایه‌ها، اطلاعاتی از اعمق زمین به دست می‌دهند. عمق بررسی در روش مگنتوتولوریک خیلی بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. این روش را می‌توان در کاوش‌های زیرسطحی از اعمق دهها متر تا دهها کیلومتر به کار گرفت. هرچه بسامد نوسان‌های

ترکمنستان، از شرق به ارتفاعات شمال غرب گند کاووس، از جنوب به دشت گند کاووس و گرگان و از غرب به دریای مازندران محدود می شود. بررسی های مگنتوتولوریک در ۴ قسمت (بلوک) متفاوت با نام های B، C، D و E صورت گرفت که طرح حاضر، بخش E، C و D این ترتیب را شامل می شود (نقشه ۱).

رودخانه اصلی این محدوده اترک است که از مرز شمالی دشت می گذرد. رودها و مسیل های کوچکی نیز که زهکش دشت اند و همچنین دریاچه های متعددی با آب لب شور نظیر آلاگل و داشمند در این محدوده قرار دارند. رودخانه اترک در موقع سیالابی این دریاچه ها را به هم پیوند می دهد و زمین های باتلاقی اطراف را می پوشاند. در قسمت شرقی محدوده ارتفاعات کپه داغ قرار گرفته که حداقل ارتفاع آن طبق گزارش های قبلی حدود ۱۰۰۰ متر و حداقل آن نزدیک به صفر است.

وارون سازی (Interpretation) و تفسیر (Inversion) داده های MT حاصل از تحقیقات ژئوفیزیکی به روش مگنتوتولوریک در منطقه پیش گفته آورده شده است. این نتایج به صورت نقشه های هم ضخامت و هم عمق لایه های رسانا و همچنین مقاطع مقاومت ویژه حقیقی حاصل از وارون سازی یک بعدی (در محل هر سایت) و دو بعدی (در امتداد هر نیم رخ) داده ها آورده شده اند. در این تحقیق لایه های دارای رسانایی الکتریکی زیاد به لایه های دارای پتانسیل احتمالی وجود آب شور نسبت داده می شوند. در ضمن همه اندازه گیری های MT با استفاده از دستگاه های ساخت شرکت مترونیکس (Metronix) آلمان (GMS05) صورت گرفته است.

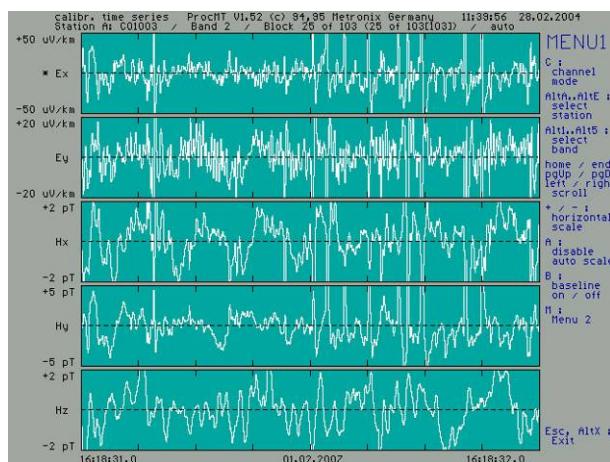
۲ زمین شناسی منطقه مورد بررسی
محدوده طرح در غربی ترین بخش و منتهی الیه غربی ارتفاعات کپه داغ (شمال شرقی ترین بخش دشت گرگان) واقع شده است. از شمال به مرز ایران و جمهوری



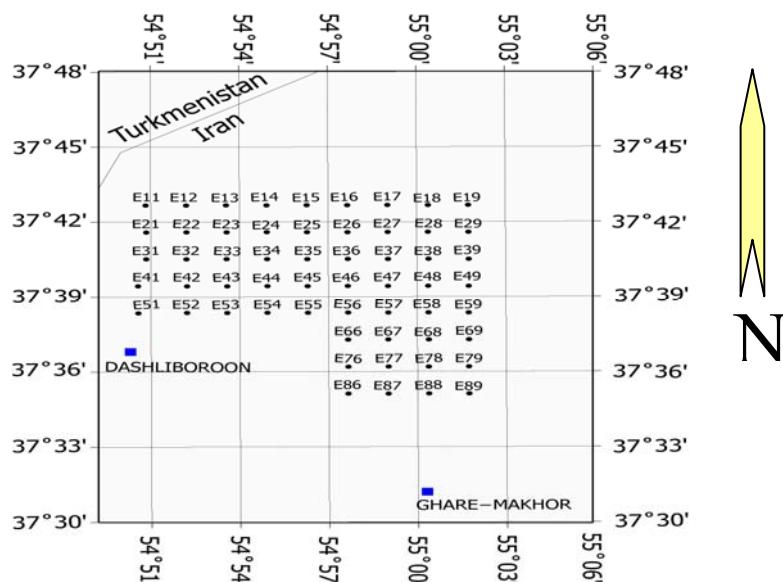
نقشه ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی (گزارش طرح شرکت تهران پادیر، ۱۳۸۵).

۳ برداشت و پردازش داده‌های مگنتوتولوریک در تحقیق حاضر ۵۷ ایستگاه مگنتوتولوریک در امتداد ۸ نیم رخ شرقی - غربی مجزا برداشت شده است. فاصله ایستگاه‌ها و همچنین نیم رخ‌ها از یکدیگر ۲ کیلومتر است. همه داده‌ها به شکل سری‌های زمانی خام برای ۵ مولفه میدان‌های الکتریکی (Ex, Ey) و مغناطیسی (Hx, Hy, Hz) اندازه‌گیری شده است (شکل ۱). موقعیت کلی و نقشه جغرافیایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری مگنتوتولوریک در نقشه ۲ آمده است.

منطقه داخلی برون بخشی از حوزه رسویی کپه داغ است که با آخرین فازهای چین خوردگی آلب و فرسایش حاصل از آن ایجاد شده است. توبوگرافی منطقه شامل لس‌های (رسوبات بادی) است که به طور طبیعی از اختلاف دما بین البرز و بیابان ترکمنستان ایجاد شده‌اند. این رسوبات نفوذناپذیر و در برابر فرسایش نایاب‌اند. سازند منطقه اکثراً مربوط به دوران کواترنری و شامل رسوبات انباشت در چاله‌های سیلانی است (آقانباتی). (۱۳۸۳)



شکل ۱. سری‌های زمانی خام ایستگاه E35 در محدوده بسامدی ۸ تا ۲۵۶ هرتز.



نقشه ۲. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های اندازه‌گیری بلوك E واقع در شمال شرق استان گلستان.

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu} |Z|^r = \frac{1}{\omega \mu} \left| \begin{matrix} E_x \\ H_y \end{matrix} \right|^r \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{\partial \log \rho_a}{\partial \log T} \right) \quad (3)$$

که در اینجا ρ_a مقاومت ویژه ظاهری، Φ فاز امپدانس، T دوره تناوب سیگنال دریافتی، E تراوایی مغناطیسی و Ω نیز بسامد زاویه ای سیگنال دریافتی است.

۴ تحلیل بعد داده ها (Dimensionality Analysis)

سویفت (۱۹۶۷) پارامتر اسکیو (Skew) را که از عضوهای ماتریس امپدانس برای تحلیل بعد داده ها قابل محاسبه است، به صورت زیر تعریف می کند.

$$S = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right| \quad (4)$$

هنگامی که مقدار پارامتر اسکیو برحسب بسامد مقدار کوچکی باشد (نزدیک به صفر)، ساختارهای زمین شناسی را می توان به صورت ساختارهای یک بعدی یا دو بعدی غیر آشته (Undistorted 1D and 2D Structures) تعریف کرد، در غیر این صورت ساختارهای موجود یا به صورت ساختارهای یک بعدی یا دو بعدی آشته (Distorted 1D and 2D Structures) و یا به صورت ساختارهای سه بعدی تعریف می شوند. تحلیل بعد داده های مگنتوتولوریک نشان می دهد که داده ها ناشی از چه نوع ساختاری هستند و نوع برنامه برگردان (Inversion) براساس آن انتخاب می شود.

تحلیل بعد داده ها در مورد داده های مگنتوتولوریک منطقه داشلی برون نشان می دهد که حالت داده های یک بعدی و دو بعدی غیر آشته صادق است. شکل (۲) مقدار اسکیو را برای یک سایت E35 نشان می دهد (لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به این ایستگاه صرفاً برای نمونه آورده شده است). مقادیر اسکیو عمده تا با میزان

در روش مگنتوتولوریک، پردازش مشاهدات صحرایی به منظور به دست آوردن مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز، به اندازه جمع آوری اولیه داده ها و حتی بیشتر نیازمند کار و تحلیل دقیق است. مسئله اساسی در پردازش داده ها این است که مشاهدات صحرایی به منزله تابعی از زمان (سری های زمانی، Time series) به دست می آیند، ولی از طرف دیگر پایه های نظری که برای این روش بسط داده شده اند همگی در حیطه بسامد به دست آمده اند. بدین ترتیب لازم است قبل از اینکه نظریه با مشاهدات صحرایی منطبق شود، داده های صحرایی را به حیطه بسامد تبدیل کرد و یا نتایج نظری را به حیطه زمان برد. در حال حاضر تنها روشهایی که در عمل از آن استفاده می شود تبدیل داده های صحرایی از حیطه زمان به حیطه بسامد است. معادلاتی که در روش مگنتوتولوریک استفاده موردن استفاده قرار می گیرند مولفه های میدان الکترومغناطیسی را با مولفه های میدان مغناطیسی مرتبط می کنند. این معادلات را می توان به شکل نماد تانسوری نوشت (کانیارد، ۱۹۵۳):

$$E_i = Z_{ij} H_j \quad i, j = x, y, z \quad (1)$$

در اغلب کارهای پردازشی داده های مگنتوتولوریک، فرض می شود که H_z وجود ندارد و در نتیجه معادله (۱) به یک زوج از معادلات، با امپدانسی که تنها با چهار مولفه نمایش داده می شود تقلیل می یابد: Z_{xx} , Z_{yy} و Z_{xy} .

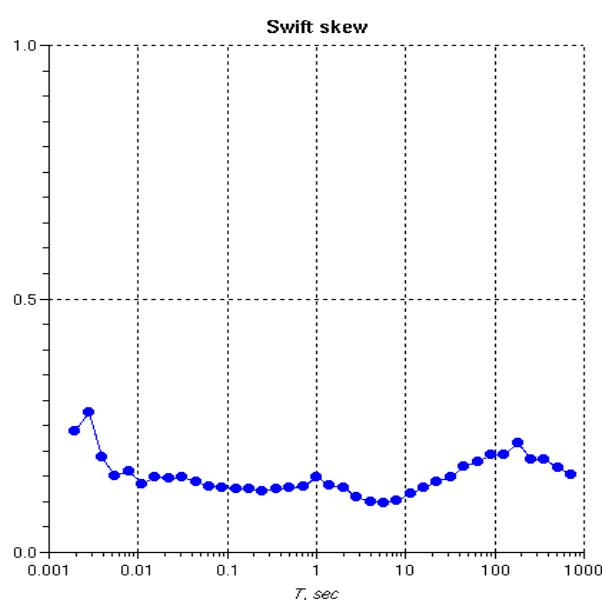
پردازش شامل دو مرحله کلی است: مرحله اول تبدیل منحنی های حیطه زمان مربوط به H_y , H_x , E_y , E_x و H_z به حیطه بسامد (محاسبه طیف) و مرحله دوم شامل به دست آوردن چهار یا نه مولفه تانسور امپدانس، از طریق طیف ها است. پس از اعمال مراحل اولیه پردازش، داده های مگنتوتولوریک به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز برحسب بسامد (یا دوره تناوب) از تانسور امپدانس قابل محاسبه هستند:

فرمت فایل‌های داده‌های الکتریکی مبادله‌ای (Electrical Data Interchange, EDI) است که به‌منزله شکل استاندارد برداشت داده‌های مگنتوتولوریک شناخته شده‌اند. در حقیقت فایل‌های EDI شکل استاندارد مصوب از فایل تansor امپدانس هستند که در نهایت داده‌ها با هر دستگاهی که برداشت شده باشند باید به این فرمت درآورده شوند تا نرم‌افزارهایی که برای تفسیر در روش مگنتوتولوریک عرضه می‌شوند، دچار پیچیدگی‌های تعريف فرمتهای متفاوت نشوند. لازم به ذکر است که در این تحقیق، پردازش داده‌های مگنتوتولوریک با استفاده از رهیافت اسمیرنو (Sмирнов ۲۰۰۳) انجام شده است.

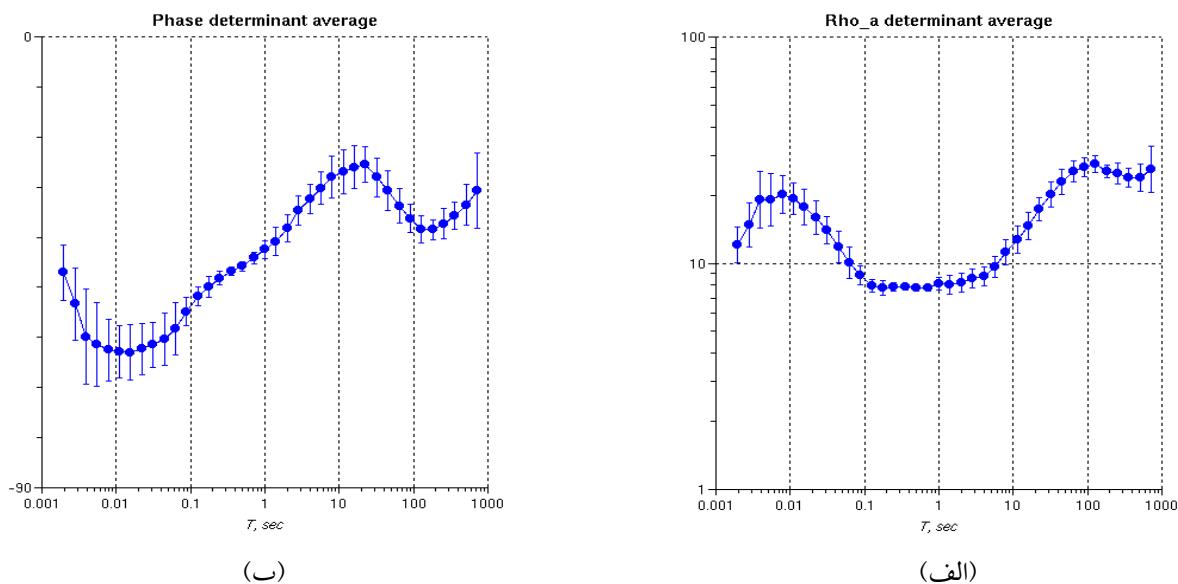
در شکل زیر نتایج نهایی حاصل از پردازش داده‌های مگنتوتولوریک که شامل به‌دست آوردن مقادیر مقاومت ویژه ظاهری (الف) و فاز (ب) از تانسور امپدانس است، برای ایستگاه E35 آورده شده است (لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به این ایستگاه صرفاً برای نمونه آورده شده است).

کمتر از ۰/۲ نشان‌دهنده ساختارهای 1D یا 2D است. برای بعضی از سایت‌ها پارامتر اسکیو مقادیر نسبتاً زیادی را نشان می‌دهد که می‌تواند در اثر وجود آشفتگی‌های گالوانیکی (Galvanic Distortion) و یا رفتار سبعدی ساختارهای زیرسطحی باشد (اسکوئی، ۲۰۰۴)، ولی در عین حال سایت‌های دیگر برای بیشتر دوره‌ها، مقادیر اسکیو نسبتاً کوچکی را نشان می‌دهند که یک تقریب‌زنی مناسب را برای تحلیل‌های 1D یا 2D از داده‌ها در منطقه به‌دست می‌دهد. مقادیر اسکیو همچنین برای بعضی از سایت‌ها، آن هم در مورد کمترین بسامد ها، مقادیر زیادی را به‌دست می‌دهند که می‌تواند نشان‌دهنده یک تبدیل از حالت 1D به حالت‌های 2D یا 3D در اعماق باشد.

۵ پردازش داده‌های مگنتوتولوریک منطقه داشلی بروون پردازش داده‌های مگنتوتولوریک داشلی بروون طبق مراحلی که در بخش قبلی شرح داده شد صورت پذیرفت. نتیجه نهایی این مرحله ایجاد فایل ماتریس تانسوری امپدانس با



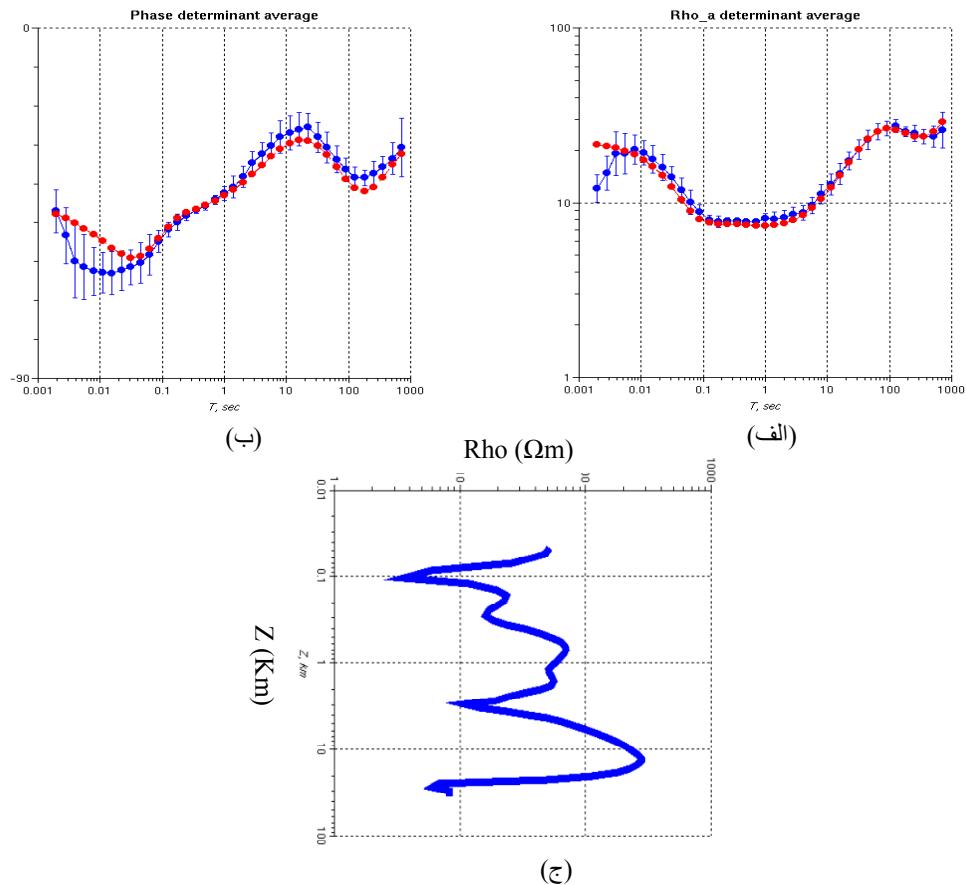
شکل ۲. مقدار اسکیو برای سایت E35.



شکل ۳. نمودار های داده های مگنتوتلوریک برای ایستگاه E35

نمایش این دادهها و پاسخ مدل هر دو در یک نمودار منفرد (برازش دادهها (Data Fit)) نشان دهنده چگونگی تطبیق مدل به دست آمده با مدل واقعی زمین است. در قسمت (ج) نیز مدل یک بعدی حاصل از وارون سازی داده های مگنتوتلوریک برای ایستگاه E35 آورده شده است (لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به این ایستگاه صرفاً برای نمونه آورده شده است). مدل یک بعدی حاصل از وارون سازی داده های هر سایت نشان دهنده چگونگی تغییرات در رسانایی لایه های زمین در محل سایت است. اگرچه برآورد ابتدایی این مدل ها نشان دهنده مجموعه ای از لایه های رسانا از سطح تا عمق است، لیکن با توجه به اینکه جنس و محتوای شاره های موجود در لایه ها نسبت به عمق متفاوت اند، مقادیر مقاومت ویژه نسبتا کمتری برای بعضی از لایه ها نسبت به عمق مشاهده می شود. لایه های رساناتر ممکن است حاوی آب با درجه شوری زیاد باشند.

۶ وارون سازی یک بعدی داده های مگنتوتلوریک وارون سازی یک بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از رهیافت عرضه شده پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. در این برنامه، از خطای میانگین مربعی کل (Total Mean-Square Error (MSE)) مدل برآورده شده، برای تعریف سطح برش (Truncation Level) استفاده می شود تا تعادل معقولی بین قدرت تفکیک و واریانس مدل به دست آید. این تعادل عمده تا با داده ها تعیین می شود و فرضیات بیشتری به جز اینکه جملات گرایست (Bias Terms) باید به خوبی برآورده شوند، لازم نیست. داده های مگنتوتلوریک شامل مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس (بر حسب بسامد یا دوره تناوب) در حکم ورودی به برنامه وارون سازی پدرسن (۲۰۰۴) داده شده اند که به ترتیب در قسمت های (الف) و (ب) شکل (۴) با رنگ آبی نشان داده شده اند. منحنی های سرخ رنگ، پاسخ مدل یک بعدی به دست آمده از مرحله نهایی وارون سازی داده ها هستند.



شکل ۴. (الف) و (ب) انطباق داده‌های صحرایی با پاسخ مدل محاسباتی توسط برنامه وارونسازی، (ج) مدل یک‌بعدی مقاومت ویژه حقیقی در محل سایت E35

منتظر با هریک از این لایه‌های رسانا را رسم کرد.

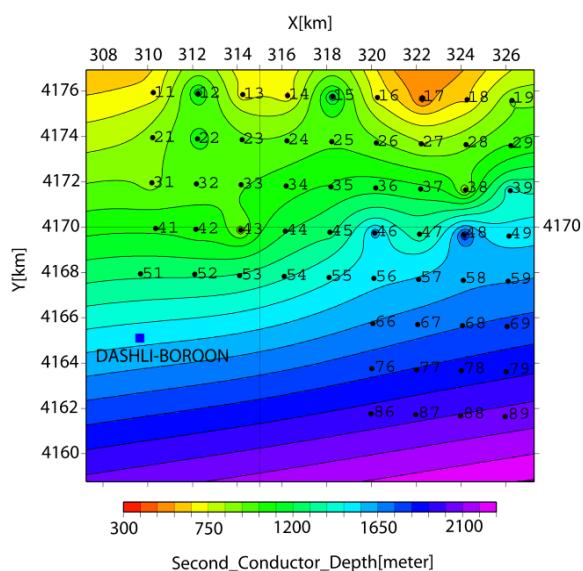
۷ وارونسازی دو‌بعدی داده‌های مگنتوتولوریک
براساس چگونگی بعد ساختارهای موجود در منطقه عملیاتی که با استفاده از زمین‌شناسی، زمین‌ساخت و داده‌های مگنتوتولوریک به دست می‌آید، وارونسازی داده‌های مگنتوتولوریک مدنظر قرار گرفت. در این ارتباط با توجه به اینکه ساختارهای منطقه عمدهاً یک‌بعدی و دو‌بعدی تشخیص داده شد، وارونسازی داده‌ها ابتدا به صورت یک‌بعدی صورت گرفت. براساس تفسیر نتایج وارونسازی یک‌بعدی، مدل‌های اولیه (Initial Model)

مقاومت ویژه ظاهری و فاز محاسبه شده از تansور امپانس با فرض یک زمین لایه‌ای با استفاده از رهیافت پدرسن وارونسازی شد. از بررسی مقاطع مقاومت ویژه حقیقی (مدل‌های یک‌بعدی زمین در محل هر سایت) نتیجه می‌شود که به طور کلی از نظر الکتریکی منطقه مورد بررسی رسانا است و بین عمق ۱۰۰ متر تا ۱۲۰۰ متر دو لایه خیلی رساناتر قابل تشخیص هستند که با تفکیک این لایه‌ها (با استخراج عمق تا سطح لایه رسانای اول و دوم و تطبیق داده‌ها با محل سایت‌های اندازه‌گیری شده) می‌توان نقشه‌های هم‌عمق و هم‌چنین نقشه‌های هم‌ضخامت (با استفاده از داده‌های حاصل از وارونسازی یک‌بعدی)

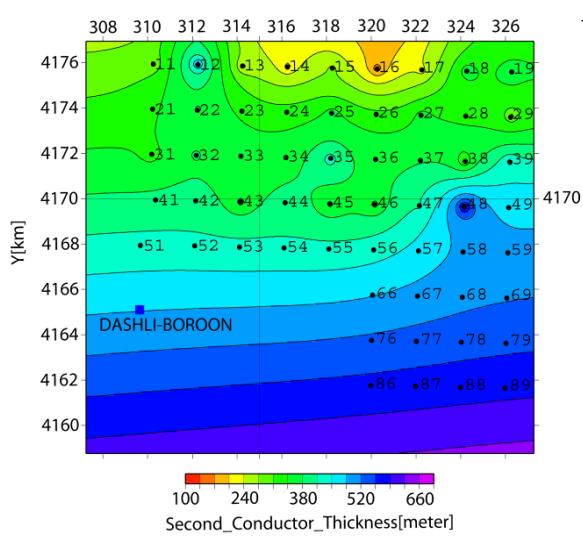
که براساس یک بعدی وارون سازی قابل برآورد هستند، وارون سازی دو بعدی صورت می گیرد. داده ها در امتداد نیم رخ ها باستی درجه قابل قبولی از خطای جذر میانگین مربع (RMS) که با خطای داده ها نرمال شده است، داشته باشند.

برای وارون سازی دو بعدی داده ها طراحی شدند.

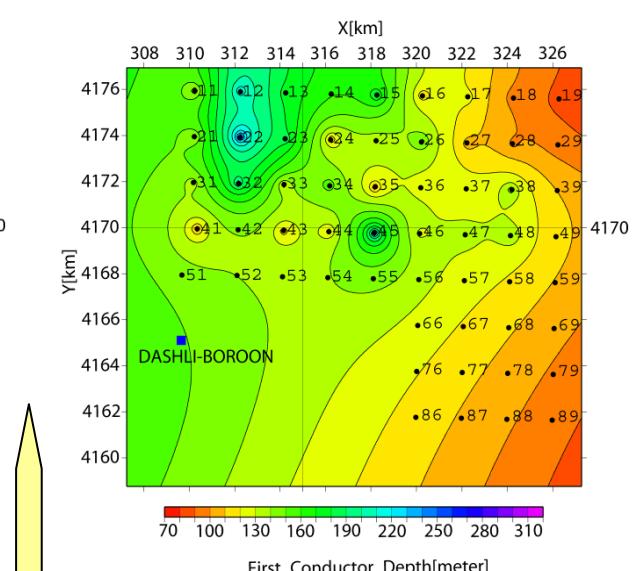
در حال حاضر سه نوع الگوریتم برای وارون سازی دو بعدی داده های MT استفاده می شود. در این تحقیق از Siripunvaraporn and Egbert (2000) استفاده شده است. در این مرحله با استفاده از (Apriori Model) مدل های اولیه و مدل های پیش فرض (Priori Model)



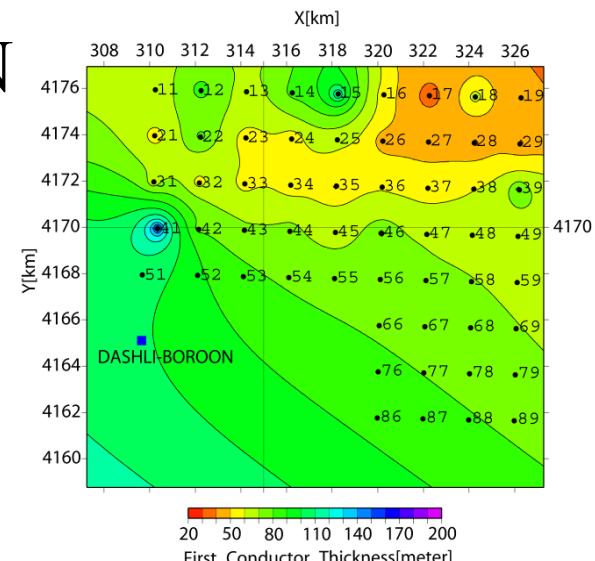
ب) عمق تا سطح فوقانی لایه رسانای دوم



د) ضخامت لایه رسانای دوم

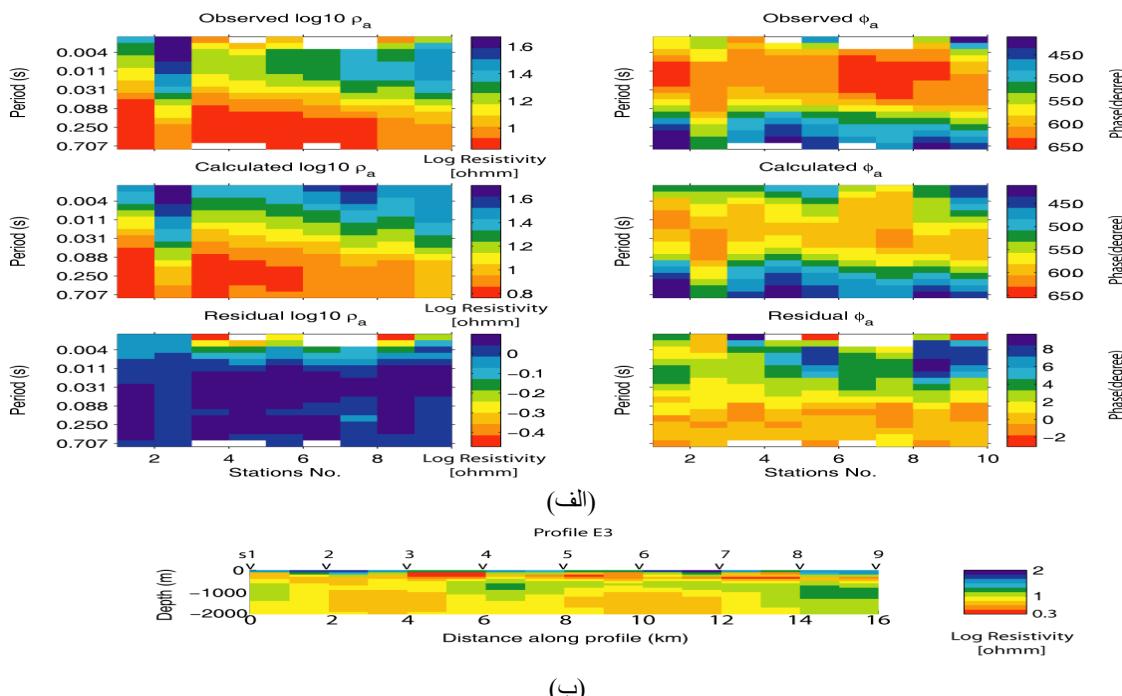


الف) عمق تا سطح فوقانی لایه رسانای اول



ج) ضخامت لایه رسانای اول

شکل ۵. نقشه های هم عمق و هم ضخامت برای لایه های رسانای اول و دوم.



شکل ۶. داده‌های مربوط به وارونسازی دوبعدی در امتداد نیم‌رخ E3. داده‌های صحرایی (قسمت بالایی الف)، مدل محاسباتی (قسمت میانی الف)، تفاضل ریاضی بین داده‌های صحرایی و مدل محاسباتی (قسمت پایینی الف) و مدل دوبعدی مقاومت ویژه حقیقی در امتداد نیم‌رخ (ب).

ممکن است به خاطر تأثیر ساختارهای سه‌بعدی در امتداد نیم‌رخ باشد. به طور کلی نتایج تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که یک تفسیر دوبعدی می‌تواند در منطقه مورد تحقیق خصوصیات منطقه را از سطح تا عمق، مورد بررسی بیشتر قرار دهد و در جهت تکمیل بررسی‌های یک‌بعدی ایفای نقش کند.

در نهایت با توجه به تفسیر یک‌بعدی و دوبعدی داده‌های مگنتوتولوئیک، لایه‌های رسانای زیرزمینی در محل هر برداشت و در طول نیم‌رخ‌های متفاوت، براساس مقاومت ویژه تفکیک شدند که شرح آن در جدول ۱ آمده است.

در شکل (۶) داده‌های مربوط به وارونسازی دوبعدی در امتداد نیم‌رخ ۳ آمده است (لازم به ذکر است که اطلاعات مربوط به این نیم‌رخ صرفاً برای نمونه آورده شده است) که قسمت بالایی الف شامل داده‌های صحرایی براساس دوره تناب، قسمت میانی، پاسخ مدل زمینی (پاسخ آخرین مدل حاصل از وارونسازی) و قسمت پایینی، تفاضل ریاضی بین مقادیر داده‌های صحرایی و داده‌های محاسبه شده از مدل نهایی است. قسمت ب نیز مدل دوبعدی مقاومت ویژه حقیقی زمین در امتداد نیم‌رخ پیش‌گفته است. البته در بعضی از موارد یک ناهمپوشانی بین داده‌های صحرایی و داده‌های محاسبه شده دیده می‌شود که

جدول ۱. تفکیک لایه های رسانای زیرزمینی در محل هر ایستگاه براساس تفسیر یک بعدی و دو بعدی داده های زمین مغناطیسی.

نام سایت	لایه اول			لایه دوم		
	عمق (m)	ضخامت (m)	مقاومت ویژه (Ωm)	عمق (m)	ضخامت (m)	مقاومت ویژه (Ωm)
E11	120	60	4	600	250	8
E12	240	100	2	1400	600	8
E13	170	60	5.5	600	200	6
E14	160	90	10	600	200	7
E15	200	150	2	1200	300	6.5
E16	100	50	2.2	1100	500	3.3
E17	130	20	7	300	200	10
E18	90	80	7	600	400	35
E19	80	40	4	1000	400	10
E21	120	40	6	1100	400	10
E22	300	100	7	1200	400	9
E23	200	40	1	1200	500	9
E24	80	40	6	1100	500	20
E25	130	60	3.5	1000	400	35
E26	170	30	5	1100	400	5
E27	90	40	2.5	800	400	9
E28	90	30	5	900	300	9
E29	90	30	2	1000	200	9
E31	120	50	3	800	300	10
E32	230	40	6	1000	400	7
E33	110	50	2.5	1000	400	5
E34	170	50	5	1100	400	8
E35	80	40	30	1100	300	8
E36	120	60	1	1200	300	9
E37	120	50	4	1000	350	10
E38	160	60	15	600	250	18
E39	110	100	8	1600	300	8
E41	90	190	1	1200	300	9
E42	140	70	4	1000	400	5
E43	100	70	4	1000	300	6
E44	100	80	2	1200	400	8
E45	270	60	10	1200	300	9
E46	120	90	6	1800	300	7
E47	140	70	2.1	1200	400	8
E48	150	70	3	2100	700	4
E49	150	50	2	1300	300	12
E51	70	30	2.2	1300	300	1.1
E52	110	70	1.3	1200	400	4.5
E53	90	60	3	1100	300	6
E54	320	110	1.8	1200	400	30
E55	110	70	1.6	1500	600	4
E56	120	30	5	1500	400	4
E57	100	40	3.5	1700	450	6
E58	70	40	7	1500	350	16
E59	90	50	9	1200	400	10
E66	90	40	2	1100	500	7
E67	90	30	7	1700	600	5
E68	200	80	2.4	1800	400	6
E69	130	70	30	1500	500	6
E76	70	20	2.3	1400	500	2
E77	70	30	1	1500	400	6
E78	100	50	1	1200	400	8
E79	90	30	10	1200	300	9
E86	100	80	3	1400	400	9
E87	140	40	7	1400	500	12
E88	130	40	1	1000	500	12
E89	150	60	20	1200	500	10

۸ بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های مگنتوتولوریک با توجه به اصل بررسی بعد داده‌ها (Dimensionality Analysis) مورد ارزیابی قرار گرفته است. منطقه مورد بررسی به دلیل وجود لایه‌های رسی همراه با کانی‌های نمکی از سطح تا عمق مورد کاوش، عموماً دارای مقاومت ویژه بهنسبت^{*} کمی (کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر) است، بنابراین عمق نفوذ سیگنال‌های الکترومغناطیسی که بستگی مستقیم به مقاومت ویژه کلی منطقه دارد، در منطقه مورد بررسی که از لحاظ الکتریکی دارای رسانایی فوق العاده زیادی است، کاهش یافته و مانع بررسی‌های مگنتوتولوریک عمیقتر شده است. زمین‌شناسی سطح‌الارضی منطقه، حالتی یک‌بعدی را برای رسوبات آبرفتی به دست می‌دهد که می‌تواند تا اعماق بیشتر و حتی در سازندگان زمین‌شناسی عمیق نیز صادق باشد. بررسی بعد داده‌های (Skew Investigation) مگنتوتولوریک این حالت را تا حدود زیادی تأیید می‌کند. با توجه به وارون‌سازی یک‌بعدی و دو‌بعدی داده‌های مگنتوتولوریک در منطقه موردنظر، به طور کلی ۲ تا ۳ لایه کاملاً رسانا در عمق‌های متفاوت قابل تشخیص هستند. لایه‌های کمتر رسانا (به اصطلاح مقاوم) نیز در بین این لایه‌های رسانا قابل تفکیک‌اند. با توجه به تفسیر یک‌بعدی و دو‌بعدی داده‌ها، به طور کلی لایه‌های کاملاً رسانا در منطقه پیش‌گفته در اعماق و مقادیر متفاوتی از مقاومت ویژه الکتریکی شناسایی شده که در جدول ۱ به تفصیل آورده شده است. لازم به توضیح است که در همه سایت‌های موجود در منطقه مورد بررسی این توالی لایه‌ها به طور یکسان قابل تفکیک نیست. دلیل این موضوع آن است که اولاً به دلیل منابع ناشناخته نوافه در منطقه، داده‌های مگنتوتولوریک در یک محدوده بسامد گسترد و یکنواخت برای همه سایت‌ها قابل اندازه‌گیری نبوده است؛ ثانیاً رسانایی فوق العاده زیاد لایه‌های رسی سطحی در منطقه، مانع از نفوذ سیگنال‌های الکترومغناطیس در زمین

شده است.

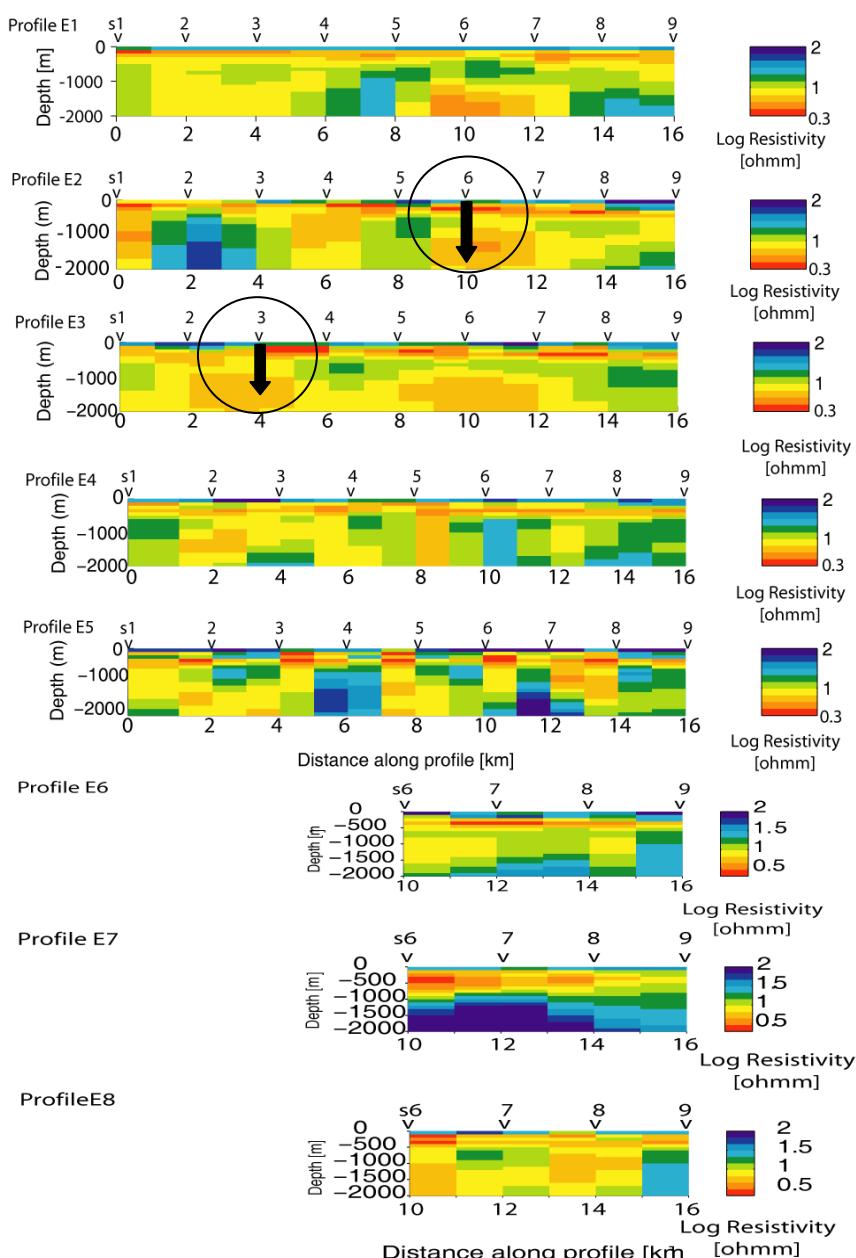
در وارون‌سازی دو‌بعدی داده‌ها عملاً نگاه جامع‌تری نسبت به مدل زمین وجود دارد و پارامترهای مدل‌سازی همه سایت‌های موجود در امتداد هر نیم‌رخ به طور هم‌زمان (Joint) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بنابراین می‌توان مدل‌های دو‌بعدی را حالت تعیین یافته‌ای از مدل‌های یک‌بعدی تصور کرد. درنهایت نتایج حاصل از تلفیق شبکه‌مقاطع داده‌های مقاومت ویژه و فاز و مدل‌های حاصل از وارون‌سازی یک‌بعدی و دو‌بعدی برای منطقه مورد بررسی به شرح زیر است.

با توجه به شکل (۷)، با نگاهی کلی به روند تغییرات در هندسه لایه‌های رسانا و توده‌های رسانای عمیق در امتداد نیم‌رخ‌ها این نتیجه حاصل می‌شود که به جز لایه رسانای سطحی که در عمق ۱۰۰ تا ۳۰۰ متری دیده می‌شود، تعدادی توده‌های رسانای عمیق متصل به لایه اول و تعدادی هم توده‌های رسانای عمیق منفرد در طول نیم‌رخ‌ها در عمق‌های متفاوت تشخیص داده می‌شوند. لایه دوم با استفاده از تفسیر یک‌بعدی داده‌ها که در شکل (۵) آورده شده، قابل تفکیک است. این لایه در محل برخی از سایت‌ها حتی پس از برگردان یک‌بعدی نیز دیده نمی‌شود. به طور مشابه این لایه در امتداد مقاطع مقاومت ویژه دو‌بعدی نیز به صورت توده‌هایی در محل بعضی از ایستگاه‌ها قابل تفکیک بوده است. لذا در برگردان دو‌بعدی داده‌ها این توده‌ها به صورت لایه قابل تفسیر نیستند و در عین حال در برگردان یک‌بعدی به دلیل منطق این نوع برگردان که شامل تفسیر داده‌های مربوط به نقاط برداشت به طور منفرد است، از این توده‌ها به صورت لایه نام برده شده است.

در سایت‌های گوناگون لایه‌های زمین تا عمق ۲۰۰۰ متری دارای خواص الکتریکی تقریباً مشابهی است و غیر از تغییرات جزئی در امتداد نیم‌رخ‌ها حالت‌های یکنواختی را نشان می‌دهند. در منطقه موردنظر به طور کلی یک لایه

منظم ظاهر شده اند. در عین حال در محل بعضی از سوندazerها در اعمق بیشتر توده های رسانای منفرد قابل شناسایی هستند. این توده های رسانا که عمدتاً در اعمق زیر ۱۰۰۰ متر واقع اند، از نظر وجود مخازن احتمالی آب های شور حائز اهمیت هستند.

رسانای سطحی از حدود ۱۰۰ متری سطح زمین تا عمق حدود ۲۰۰ متری قابل تفکیک است که این لایه رسانا به صورت یک نوار در طول مقاطع مقاومت ویژه حقیقی بدست آمده با مقاومت ویژه زیر ۱۰ اهمتر قابل ردیابی است. توده های نارسانایی نیز در طول نیم رخ ها به طور غیر



شکل ۷. محل های پیشنهادی برای حفاری های اکتشافی.

PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

نتیجه کلی از وضعیت لایه‌بندی زمین با توجه به خواص الکتریکی مواد زیرسطحی در محدوده شمال شرق استان گلستان به طور کلی وضعیت مناسبی از نظر وجود لایه‌های آب شور حاوی املاح معدنی به دست می‌دهد. بنابراین به منظور گسترش عملیات اکتشافی و کسب اطلاعات جامع در این مورد، با توجه به اطلاعات تلفیقی از مقاطع مقاومت ویژه حقیقی یک‌بعدی و دو‌بعدی مگنتوتلوریک، نقاط مناسب برای حفاری‌های اکتشافی در منطقه مورد تحقیق اخیر به شرح زیر پیشنهاد می‌شود: در محدوده تحقیقاتی، سوندazer ۶ از نیم‌رخ E2 تا عمق حد اکثر ۱۵۰۰ متر و همچنین سوندazer ۳ از نیم‌رخ E3 تا عمق حد اکثر ۱۴۰۰ متر.

منابع

- آقانباتی، ع. (۱۳۸۳) : زمین شناسی ایران، ناشر : سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- مطالعات ژئوفیزیکی به روش مگنتوتلوریک در استان گلستان، ۱۳۸۵. گزارش طرح شرکت تهران پادیر.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. *Geophysics* **8**, 605-635.
- Oskooi, B., 2004, A broad view on the interpretation of Electromagnetic data (VLF, RMT, MT, CSTMT). Comprehensive summaries of Uppsala Dissertation: ISBN: 91-554-5925-0.
- Pedersen, L. B., 2004, Determination of the regularization level of truncated singular-value decomposition inversion: The case of 1D inversion of MT data. *Geophysics*, **52**, 261-270.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., 2000, An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, **65**, 791–803.
- Smirnov, M. Yu., 2003, Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point. *Geophysics, J. Int.* **152**, 1-7.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States.