

Audio-Magnetotelluric exploration of an aquifer structure in the Mond River basin, Bushehr province

Sakineh Najafi¹, Mansoure Montahaei^{2*}

1. M.Sc. student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
snajafib@ut.ac.ir

2. Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran
mmontaha@ut.ac.ir

Received: 2022/10/20 - Accepted: 2023/11/27

Abstract

The main purpose of this research is to analyze and model the audio-magnetotelluric (AMT) data to study the regional structure and deep groundwater of the Sena- the Shonbe aquifer system in central Zagros. We used challenging methods to determine the dimensionality of the regional structure, evaluate the degree of inherent distortion caused by small-scale, near-surface inhomogeneities, quantify these effects and remove them from MT measurements, and retrieve the main features of the regional geoelectric structure (e.g., its strike direction). Data were collected at 19 stations along the profile in the southeast of the folded belt (SFB) of the Zagros folded belt. First, the regional subsurface structure was classified using impedance and MT tensors rotational invariants (Bahr and WAL invariants). Then, the phase tensor method was used to estimate the strike direction of the regional geo-electric structure. The results of Bahr and WAL invariants confirm regional 1D and 2D structures with local galvanic distortion at most periods. Rotating the data into the strike direction of the regional structure, isotropic two-dimensional inversions of the different polarizations of the impedance data and tipper vectors were performed. The computer program used for this purpose uses the nonlinear conjugate gradient (NLCG) algorithm to minimize the cost function, which consists of data misfit and model roughness. Several numerical tests were performed to determine the optimal values of the parameters regulating this algorithm: τ , α , β , and H/V ratio. Finally, interpretations related to the resulting electrical resistivity cross-section are provided.

Keywords

Audio-magnetotelluric, Dimensionality analysis, Distortion, Strike, electrical conductivity, Inverse modeling.

* Corresponding Author



1- Introduction

AMT data are extensively used for hydrogeological studies ([1], [2], [3]) because their exploration depth (0.2-2 km) is large enough to penetrate conductive surficial sedimentary layers, and they can discriminate between brine- and fresh-water-saturated layers.

We investigate an AMT data set obtained along a profile southwest of the simply folded belt in the Zagros Mountain. We apply different methods to investigate the dimensionality of the subsurface resistivity structure from measured AMT responses. Then, we apply a 2D inversion approach for further interpretation of the data set.

2- Methods

During AMT measurements, horizontal components of the electric field (E_x , E_y) and three orthogonal components of the magnetic field (B_x , B_y , B_z) recorded in the frequency range (10 kHz—1 Hz) are processed to resolve MT transfer functions: the Impedance tensor elements (Z_{ij} in equation 1) and the tipper vectors (equation 2).

$$(1) \quad \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

$$(2) \quad \bar{B}_z(T) = W_x(T)\bar{B}_x(T) + W_y(T)\bar{B}_y(T)$$

In 2D earth situations, EM fields are decoupled into transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) modes, in which electric currents flow parallel to and perpendicular to the strike direction.

Our MT profile is located within the thick, folded sedimentary cover of the southeastern folded belt (SFB) in Bushehr province, southwestern Iran.

As the first step of MT data analysis, we applied the WAL rotational invariants method [4] to determine the dimensionality of the subsurface structure. The results (figure 1) show that at most periods of all stations, the skew values are below the thresholds suggested as a necessary condition for the 2D regional structure. It appears that the conductivity distribution is generally one-dimensional or can be explained by 2D or local galvanic distortions superimposed on a 2D regional structure. Accordingly, applying a 2D modeling approach for data interpretation is reasonable. Furthermore, we used the Groom-Baily decomposition approach [5] to remove galvanic distortions from measured data and determine the strike direction of the regional 2D structure. A rose diagram of strike angles at periods where the split in principal phases is more significant than 5° shows that the dominant strike azimuth of regional geo-electric structure is about N27°E.

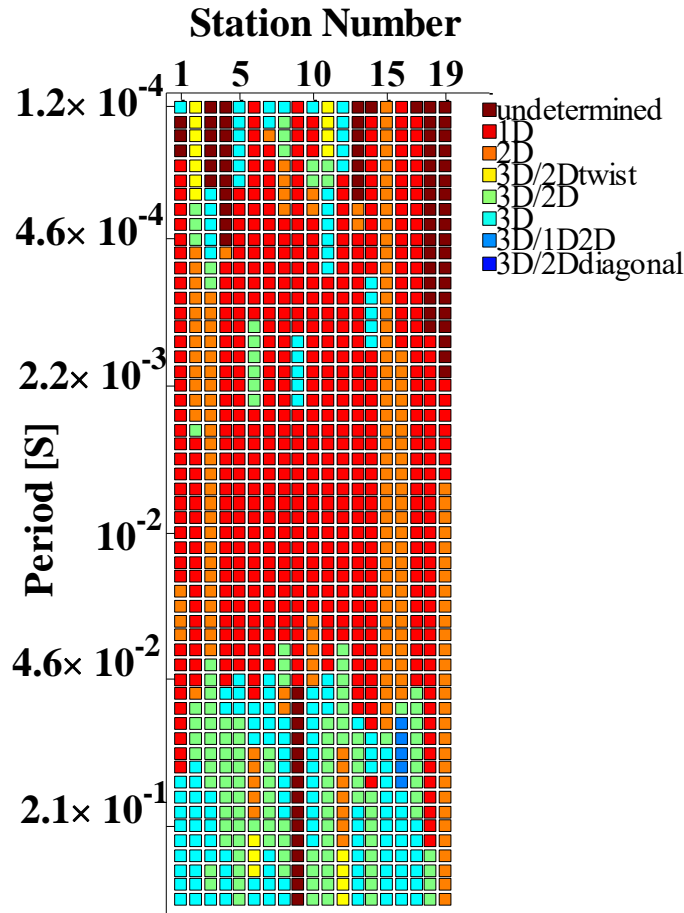


Figure 1. Dimensionality analysis results obtained by WALDIM code for AMT data along profile A08.

In the last stage, we used distortion-corrected AMT data after rotating into the strike direction of the regional structure for 2D inverse modeling. The non-linear conjugate gradient approach, as implemented in the Winglink interpretation software package [6], was used for the following inversions. Numerical experiments were conducted to determine the optimal values for the LaGrange multiplier and smoothing parameters. Based on these results, $\tau = 10$ (for the whole data set with a strike angle of 27° E of north) was chosen as the regularization parameters for the inversions. The weighting function parameters were $\alpha = 1$, $\beta = 1$, and $H/V = 50/50$ for all inversions.

For apparent resistivities, phases, and tipper data, respectively, relative error floors of 3.5% and 1° and an absolute error floor of 0.03 were adopted. All of the start models were $100\Omega\text{m}$ half space.

3- Findings and Argument

Figure (2) presents the inverse modeling result of the AMT data set. It indicates distinct conductive and resistive structures within the upper crust. The resistive and faulted structures recovered at deeper parts of the model are consistent with the seismicity level in the study area. It is located in one of the southwest dipping fault segments where the main shock rupture of the 2013 M_w 6.2 Khaki-Shonbe earthquake has been initiated [7]. According to the known stratigraphy of central Zagros, while Bakhtiyari, Asmari, Pabdeh, and Gurpi formations are moderately resistive, the Gachsaran formation is highly conductive, and the Sarvak formation is resistive. Examining the electrical resistivity section, the upper mid-resistive layer correlates with the Bakhtiyari formation. The underlying conductive layer correlates with the Asmari formation. These upper units are underlain by moderately resistive pabdeh and Gurpi shales. The basal parts of this resistivity section

may correspond to the Sarvak formation, which appears to be highly resistive and faulted.

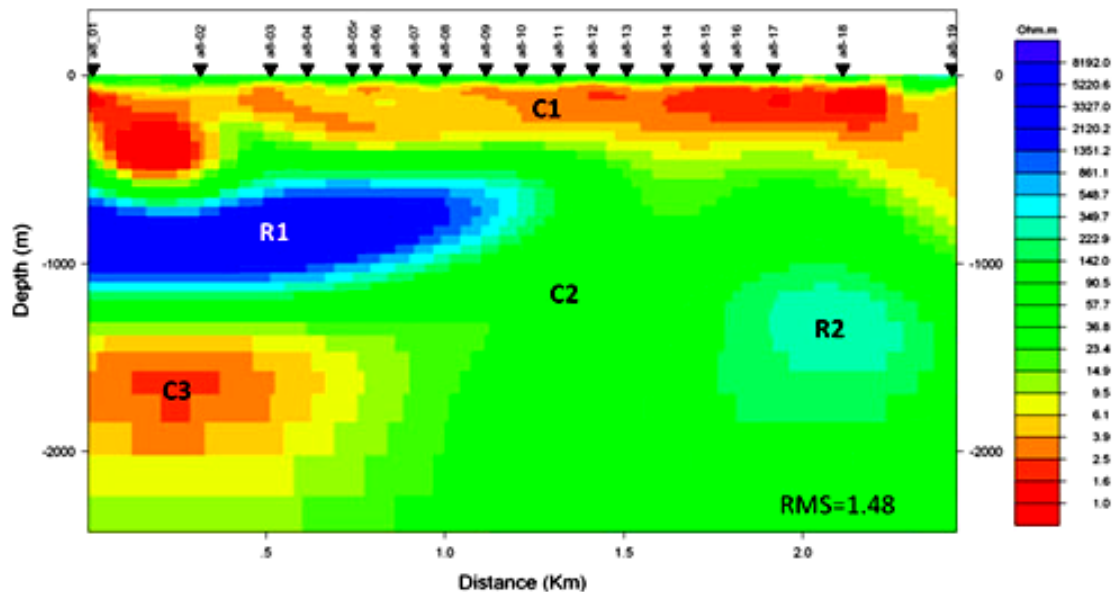


Figure 2. 2D electrical conductivity model obtained from inversion of AMT data along profile A08.

4- Conclusions

This study investigated an AMT data set recorded at 19 stations along a 2.5 km long profile. Dimensionality and directionality analyses reveal that the data set is compatible with the 2D assumption for the regional geoelectric structure with a dominant strike direction of N27°E. A 2D resistivity model has been derived from distortion-corrected data. Classical 2D smooth inversion resolves a shallow conductive layer extending throughout the model and a resistive basement detached by a moderately conductive zone underlying the conductive layer. The recovered conductivity model is compatible with the known stratigraphy of the study region.

References

1. Brasse, H., Rath V., 1997. Audiomagnetotelluric investigations of shallow sedimentary basins in northern Sudan. *Geophys J Int* 128(2):301–314
2. Giroux, B., Chouteau, M., Descloitres, M., Ritz, M., 1997. Use of the magnetotelluric method in studying the deep Maestichtian aquifer in Senegal. *Journal of Applied Geophysics*, No. 38 P. 77-96.
3. Tarabees, B., Tewksbury, C., Mehrtens, J., Younis, A., 20017. Audio-magnetotelluric surveys to constrain the origin of a network of narrow synclines in Eocene limestone, Western Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 136, 168–175.
4. Marti, A., Queralt, P., & Ledo, J. (2009). "WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariant of the magnetotelluric tensor." *Computers & Geosciences*, 35(12), 2295-2303.
5. McNeice, G. W., & Jones, A. G. (2001). Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data. *Geophysics*, 66, 158–173.
6. Rodi, W. and Mackie R.L.; 2001; "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion". *Geophysics* 66, 174–187



مقاله پژوهشی

مطالعه ساختار یک آبخوان در حوزه آبریز رود مند در استان بوشهر با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک حوزه شنوایی

سکینه نجفی^۱، منصوره منتهایی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، snajafib@ut.ac.ir

۲. استادیار دانشگاه تهران، mmontaha@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶

چکیده

در این پژوهش برای تصویرسازی ساختار منطقه‌ای و سیستم‌های آب زیرزمینی عمیق، داده‌های مگنتوتلوریک حوزه شنوایی (AMT: Audio Magnetotelluric) ثبت شده در ۱۹ ایستگاه واقع در امتداد نیم‌رخ در جنوب شرقی کمر بند ساده چین خورده (SFB) رشته کوه زاگرس، بررسی شده. در ابتدا ابعاد ساختار زیرسطحی منطقه‌ای با استفاده از اسکيو تانسور فاز و ناوردهای چرخشی تانسور امپدانس (WAL و Bahr) طبقه‌بندی شده و سپس استرایک ساختار منطقه از روش تانسور فاز تعیین شد. نتایج حاصل از ناوردهای Bahr و WAL در اکثر دوره‌های تناوبی حضور ساختارهای یک‌بعدی و دوبعدی منطقه‌ای متاثر از اعوجاج گالوانیکی محلی را تایید می‌کنند. تجزیه و تحلیل استرایک بر روی تمام داده‌هایی که اختلاف فازهای اصلی آن‌ها بیشتر از ۵ درجه است، استرایک منطقه‌ای را حدود $N27^{\circ}E$ نشان می‌دهد. پس از چرخش داده‌های امپدانس در راستای استرایک ساختار منطقه، وارونسازی دوبعدی همسانگرد از قطبش‌های مختلف داده‌های امپدانس و نیز تابع تبدیل ژئومغناطیسی با استفاده از الگوریتم گرادیان‌های مزدوج غیرخطی انجام گرفت. آزمون‌های عددی متعددی انجام گرفت تا مقادیر بهینه پارامترهای تنظیم‌کننده این الگوریتم (β ، α ، τ) و نیز نسبت (H/V) تعیین شوند. در ادامه وارون‌سازی قطبش‌های مختلف داده‌های MT انجام گرفت. مدل نهایی تصویر واضحی از ساختار هدایت‌ویژه الکتریکی آبخوان منطقه ارائه می‌دهد. لایه کم‌عمق رسانا حاوی آب شور منطبق با مطالعات هیدروژئولوژیکی قبلی در سرتاسر آبخوان گسترده شده است. این لایه رسانا بر روی پی‌سنگ بختیاری قرار گرفته که از نظر الکتریکی بسیار مقاوم است و مطابق با تحلیل‌های ساختاری قبلی در منطقه با انشعابی از گسل پیشانی کوهستان گسسته شده است. این گسلش امکان چرخش شورابه‌ها بین قسمت‌های عمیق‌تر حاوی نمک‌های تبخیری هرمز و آب‌های زیرزمینی که در اعماق کمتر جریان دارند را فراهم آورده است. در واقع نتیجه حاصل از این مدل‌سازی‌ها برای نخستین بار نقش ساختارهای خطی موجود در این منطقه در شوری بسیار بالای آب‌های سطحی را به تصویر در می‌آورد.

کلمات کلیدی

مگنتوتلوریک- حوزه شنوایی، تحلیل ابعادی، اعوجاج گالوانیکی، استرایک، رسانایی ویژه الکتریکی، مدل‌سازی وارون، زاگرس، ساختار منطقه‌ای، آب زیرزمینی، آبخوان.



۱- مقدمه

امروزه مطالعات آب زیرزمینی چه از منظر شناخت ذخایر موجود (آب‌های سطحی و عمیق) و چه از دیدگاه حفظ این ذخایر و جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی اهمیت زیادی دارد. از این‌رو شناخت چگونگی گسترش سیستم‌های آب زیرزمینی در اعماق زیاد زیر سطح زمین برای مدیریت و حفظ منابع آب زیرزمینی ضروری است. با در نظر گرفتن این موضوع، ذخایر آب‌های زیرزمینی از نظر زمین‌شناسی به دو دسته آب‌های زیرزمینی موجود در شکستگی‌ها و گسلش‌ها و دیگری آب‌های موجود در سازندهای سخت تقسیم می‌شوند.

آب‌های زیرزمینی عمیق را می‌توان به عنوان ذخایر تجدیدنپذیر در نظر گرفت، این موضوع اهمیت مدیریت و شناسایی این ذخایر را صد چندان می‌کند. روش‌های ژئوفیزیکی یکی از بهترین روش‌های شناسایی و تعیین چگونگی گسترش سیستم‌های ذخایر آب زیرزمینی بدون ایجاد تاثیرات مخرب زیست محیطی مانند حفاری و نظایر آن است. اگر چه روش ژئوالکتریک DC و نیز روش‌های الکترومغناطیسی (EM) حوزه زمان برای مطالعه ساختارهای ژئوالکتریک واقع در اعماق کم مناسبند اما فراهم آوردن امکانات لجستیکی این روش‌ها به منظور اکتشاف اعماق بیشتر، بسیار دشوار است. این مشکل با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین برطرف می‌شود. روش مگنتوتلوریک (MT) از جمله این روش‌ها است و اصولاً برای ترسیم ساختار مقاومت الکتریکی عمیق زمین در سه دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از تغییرات میدان مغناطیسی طبیعی باعث می‌شود این روش عملاً برای هر مکان روی زمین قابل اجرا باشد.

علل استفاده از روش مگنتوتلوریک حوزه شنوایی به شرح زیر است:

- روش‌های EM قادرند که توزیع سیال در زیر سطح زمین، درصد شوری و نیز ترکیبات آن‌ها را به روش غیرمخرب تعیین کنند.
- این روش‌ها تصویربرداری زیرسطحی را با کیفیت و وضوح بالا انجام داده و اطلاعات مفصلی از چگونگی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی در عمق زیاد (در محدوده عمق پیش‌بینی شده از ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر) ارائه می‌دهند.
- روش AMT کم‌هزینه، دقیق و نیازمند به حداقل پرسنل

میدانی در مقایسه با روش لرزه‌نگاری است [۱،۲].

- این روش از جمله روش‌های مبتنی بر اثر القای الکترومغناطیس است که در آن عمق اکتشاف به دوره تناوبی نوسانات EM و نیز هدایت‌ویژه الکتریکی زیرسطح زمین بستگی دارد.

منطقه مورد مطالعه در این مقاله آبخوان سنا- شنبه واقع در حوزه آبریز رود مند در شرق استان بوشهر است. مطالعات هیدروژئولوژیک معمول این منطقه بر مبنای اطلاعات زمین‌شناسی و چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری است که در این منطقه حفر شده‌اند. حوزه آبریز رود مند به ۳۹ محدوده مطالعاتی تقسیم شده که وضعیت سطح آب در آن با شبکه‌ای حاوی ۶۵۶ حلقه چاه مشاهده‌ای رصد می‌شود. آبخوان سنا- شنبه در این حوزه وسعتی معادل با ۱۷۷/۷ کیلومتر مربع دارد و ۱۳ حلقه چاه مشاهده‌ای از این مجموعه در آن واقع شده است [۳]. رضایی [۴] با استفاده از نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مربوط به چاه‌های بهره‌برداری و تحلیل آماری این نتایج، عوامل موثر در شوری منابع آب دشت مند را بررسی کرده است. محمدی و همکاران [۵] با استفاده از داده‌های رادیوایزوتوپ و هیدروژئوشیمیایی، فرآیندهای کنترل‌کننده ترکیبات شیمیایی آب‌های زیرزمینی در منطقه را بررسی کردند. از طرف دیگر تصادم صفحات قاره‌ای اوراسیا- عربی باعث شده تا نمک‌های تبخیری هرگز که یکی از سازندهای اصلی چینه‌شناسی در این منطقه است به شکل بیش از ۲۰۰ گنبد یا دپایر نمکی در شرق خلیج فارس (که محدوده مورد مطالعه در آن واقع است) برون‌زد یابند و آزمایشگاه طبیعی برای مطالعه ساختارهای نمکی در مقیاس بزرگ فراهم آورند که از قرن هفدهم میلادی کاوش شده است ([۶]، [۷]، [۸]). اثر این ساختارهای نمکی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی همواره با مطالعات زمین‌ساختاری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است ([۹]، [۱۰]، [۱۱]).

مدیریت کارآمد مصرف آب در نواحی گرم و خشک مستلزم ارزیابی منابع کم‌عمق و عمیق آب‌های زیرزمینی و شناخت کافی عوامل ساختاری است که وجود آب زیرزمینی و نیز تغذیه آبخوان‌ها را کنترل می‌کنند [۱۲]. این در حالی است که در مورد آبخوان سنا- شنبه مطالعات ژئوفیزیکی (لرزه‌ای، الکترومغناطیسی، ژئوالکتریک و نظایر آن) که تصویری از ساختار زیرسطح زمین ارائه دهد، وجود ندارد. نداشتن شناخت

مزدوج غیرخطی (NLCCG) [۱۹] انجام می‌شود تا مدلی از چگونگی گسترش آبخوان زیرزمینی در اعماق زیاد منطقه، ارایه شود.

۲- زمین‌شناسی منطقه

منطقه مطالعه بخشی از سیستم آبخوان سنا- شنبه در حوزه آبریز رود مند است. رود مند یکی از مهم‌ترین رودهای جنوب ایران است که از نواحی مرتفع زاگرس سرچشمه می‌گیرد. این رود پس از طی مسافت تقریباً ۶۰۰ کیلومتری در یک جهت NE-SW به خلیج فارس می‌ریزد. زمین‌شناسی حوزه رود مند پیچیده و تا حد زیادی متأثر از فرآیندهای تکتونیکی است که در کمربند چین‌خورده و گسلیده زاگرس (ZFTB) رخ می‌دهد [۲۰].

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختاری، شکل‌گیری زاگرس با حرکت همگرای مداوم صفحه عربستان در جنوب‌غرب و خرد قاره ایران مرکزی در شمال شرق که خود ناشی از حرکت به سوی شمال شرق صفحه آفریقا - عربستان نسبت به اوراسیا است، مرتبط است [۲۰]. سنگ‌های زاگرس را می‌توان به دو گروه پی‌سنگ دگرگونی و پوشش رسوبی روی پی‌سنگ تقسیم کرد. کوتاه‌شدگی پی‌سنگ در اثر گسلش‌های معکوس و یا حرکت معکوس گسل‌های نرمال در حین چین‌خوردگی قبلی زاگرس رخ داده است. همزمان با آن پوشش رسوبی نیز در اثر چین‌خوردگی، دچار کوتاه‌شدگی شده است. ناحیه زاگرس (شکل ۱) شامل ساختارهای مهمی از جمله موارد زیر است:

- کمربند تراستی - چین‌خورده زاگرس (ZFTB)
- ناحیه سندانج - سیرجان (SSZ) که به موازات ZFTB است و بطور عمده از سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین تشکیل شده است.
- اجتماع ماگمایی ارومیه - دختر (UDMA) یک قوس ماگمایی آتشفشانی است که در حاشیه جنوبی بلوک قاره‌ای ایران مرکزی قرار گرفته و از سنگ‌هایی در محدوده سنی اواخر ژوراسیک تا کواترنری تشکیل شده است.
- گسل زاگرس مرتفع (HZF) در کناره جنوب‌شرق گسل اصلی معکوس زاگرس قرار دارد و علت نامگذاری آن، وجود مرتفع‌ترین توپوگرافی‌های زاگرس در این منطقه است. به علت وجود سری‌های به شدت دگرگون شده متشکل از توالی رسوبی به این ناحیه منطقه خردشده زاگرس نیز گفته می‌شود.

کافی از چگونگی گسترش مکانی این آبخوان و نیز ساختارهای خطی (مانند گسل‌ها) که شرایط مرزی در آن را تعیین می‌کنند باعث شده تا ارزیابی‌هایی که در این منطقه از میزان تغذیه آبخوان به عمل آمده، قابل اعتماد نباشند [۱۳] و [۱۴]. علاوه بر این میزان شوری آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی دشت مند بسیار بالا است. مطالعات هیدروژئوشیمیایی که در این دشت انجام گرفته، هدایت ویژه‌های الکتریکی بالا از مرتبه ۶۰۰۰ میکروئانیه/سانتی‌متر را برای نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داده است. اگرچه این مطالعات فرآیندهای ژئوشیمیایی کنترل‌کننده ترکیبات آب زیرزمینی را تعیین کرده‌اند [۴] و [۱۲] اما در این منطقه که تکتونیک فعالی دارد [۱۵] اثر ساختارهای خطی (مانند گسل‌ها) در شکل‌گیری آب‌های زیرزمینی و شوری بالای این آب‌ها شناخته شده نیست. برای رفع نسبی این مشکل، تعیین چگونگی گسترش آبخوان در زیرسطح زمین و نیز شناخت عوامل ساختاری که هندسه آبخوان و نیز کیفیت آب آن را کنترل می‌کند، برداشت‌های AMT در امتداد نیمرخ حوازی ۱۹ ایستگاه در منطقه‌ای نزدیک به روستای شنبه در شرق استان بوشهر انجام گرفته است. محدوده سیکنی این داده‌ها $[10^{-5}, 0.5]$ ثانیه است. بر اساس رابطه عمق پوست و مقاومت ویژه میانگینی که در این مجموعه داده مشاهده می‌شود حداکثر عمق اکتشافی فراهم آمده به وسیله آن‌ها ۱۷۰۰ متر است. به عبارت دیگر این مجموعه داده برای نخستین بار تصویری از پی‌سنگ، سطوح آب زیرزمینی و گسل‌هایی که این آبخوان را محدود کرده‌اند بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی آن‌ها فراهم می‌آورد.

ابتدا با تحلیل و بررسی تانسور امپدانس و توابع تبدیل مغناطیسی، ابعاد ساختار منطقه و نیز آثار اعوجاجی آمیخته با داده‌ها بررسی شده و سپس با انجام مدل‌سازی‌های وارون از این داده‌ها، مقاطع مقاومت ویژه حاصل برای تعیین ویژگی‌های مورد مطالعه، بحث و بررسی می‌شوند.

در این پژوهش با استفاده از ابزارهای تحلیلی جدیدتر تانسور فاز [۱۶]، کد تحت فرترن WALDIM [۱۷] و نیز روش تجزیه تانسور Groom-Baily (GB) [۱۸] مراحل تحلیل ابعادی، تعیین استرایک ساختار منطقه‌ای و نیز حذف آثار اعوجاج گالوانیکی انجام می‌شوند. وارون‌سازی 2D داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار WingLink، مبتنی بر الگوریتم گرادیان‌های

مغناطیسی که بر سطح زمین ثبت شده‌اند، استفاده می‌شود. اندازه‌گیری این میدان‌های الکترومغناطیسی (EM) در فرکانس‌های مختلف امکان تعیین هدایت ویژه الکتریکی زمین را از اعماق کم تا پوسته و گوشته فراهم می‌آورد [۱].

تابع پاسخ (تبدیل) مگنتوتلوریک به عنوان تابعی تعریف می‌شود که میدان‌های EM اندازه‌گیری شده در یک فرکانس معین را به هم مرتبط می‌سازد و تنها به خواص الکتریکی زمین، نه طبیعت موج EM وابسته است. متداول‌ترین تابع پاسخ MT تانسور امیدانس (رابطه ۱) است. علاوه بر آن تانسور MT نیز تابع تبدیل ژئومغناطیسی (رابطه ۲) نیز محاسبه می‌شود:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

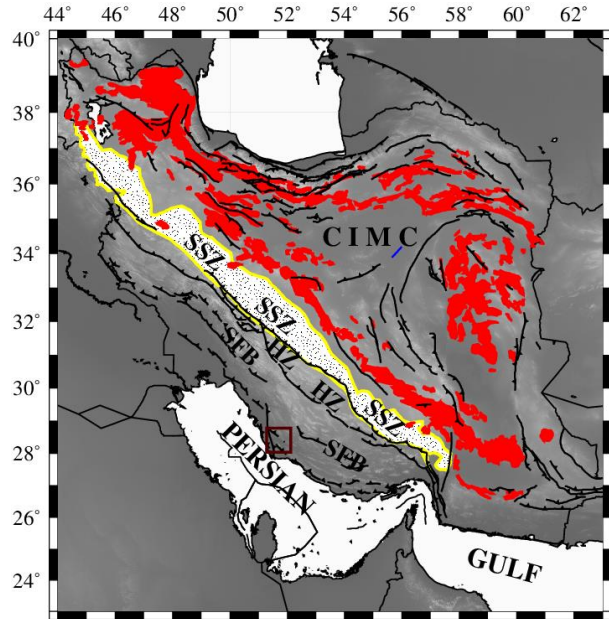
$$H_z = (T_x \quad T_y) \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2)$$

۴- تحلیل ابعادی و تعیین راستای استرایک ساختار هدایت ویژه الکتریکی منطقه

برای یک زمین لایه‌ای همسانگرد یک‌بعدی، رسانایی الکتریکی تنها با عمق تغییر می‌کند. مولفه‌های قطری تانسور امیدانس (رابطه ۱) مربوط به میدان الکتریکی و مغناطیسی افقی، صفرند. روابط ماکسول در حالت دوبعدی، به دو مد مجزا TE و TM تقسیم می‌شوند که هر یک دارای سه مولفه عمود بر هم‌اند و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به هم مرتبط می‌سازند.

اعوجاج در داده‌های مگنتوتلوریک پدیده‌ای است که با وجود اجسام کم عمق محلی یا ناهمگنی‌های کوچک مقیاس (کوچکتر از عمق پوست) ایجاد می‌شوند. این اجسام توزیع بار و جریان‌های القا شده‌ای را ایجاد می‌کنند که باعث تغییر و یا اعوجاج پاسخ‌های مگنتوتلوریک در مقیاس منطقه‌ای یا مقیاس مورد مطالعه می‌شوند. در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل ابعادی و اعوجاج داده‌های مگنتوتلوریک و در نتیجه حذف اثرات اعوجاجی داده‌ها و بازیابی پاسخ‌های منطقه‌ای از ناوردهای چرخشی تانسور امیدانس (WAL)، تانسور فاز و تجزیه گروم-بیلی (GB) استفاده شد.

ناوردهای چرخشی تانسور امیدانس، پارامترهایی‌اند که به صورت تحلیلی از مولفه‌های آن به دست می‌آیند و با چرخش محورهای مختصات تغییر نمی‌کنند. ناوردهای WAL به‌گونه‌ای



شکل ۱. نقشه توپوگرافی ایران به همراه ساختارهای مهم زاگرس. محدوده مورد مطالعه در این شکل با مربع قرمز رنگ نشان داده شده است.



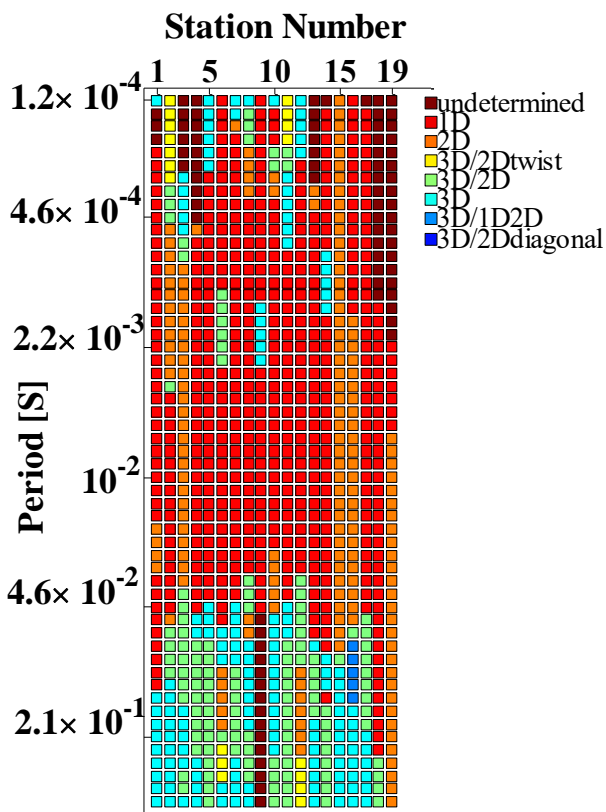
شکل ۲. تصویر ماهواره‌ای منطقه کاوش‌های AMT در شمال روستای شنبه. نقاط A1 تا A19 ایستگاه‌های اندازه‌گیری‌اند.

آبخوان سنا- شنبه یکی از ۶۵ آبخوان آبرفتی است که حوزه آبریز رود مند را شکل می‌دهد. موقعیت منطقه و نیز مکان ایستگاه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. این منطقه بین عرض‌های جغرافیایی [28.4°, 28.42°] شمالی و طول‌های جغرافیایی [51.74°, 51.77°] غربی قرار گرفته است.

۳- کلیات و مبانی اکتشافی روش AMT

مگنتوتلوریک (MT) یک روش منفعل (ناشی از یک چشمه طبیعی) در اکتشافات ژئوفیزیکی است که از آن برای تصویرسازی ساختار رسانایی زیرسطح زمین استفاده می‌شود. در این روش از تغییرات زمانی مولفه‌های افقی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و نیز مولفه قائم میدان

شبه‌مقطع مربوط به زوایای اسکویو β محاسبه شده در کل محدوده پریودی همه ایستگاه‌ها در شکل ۴ آمده است. این نتایج در اغلب پریودها و ایستگاه‌ها اثر حضور یک ساختار منطقه‌ای 2D را نشان می‌دهد.



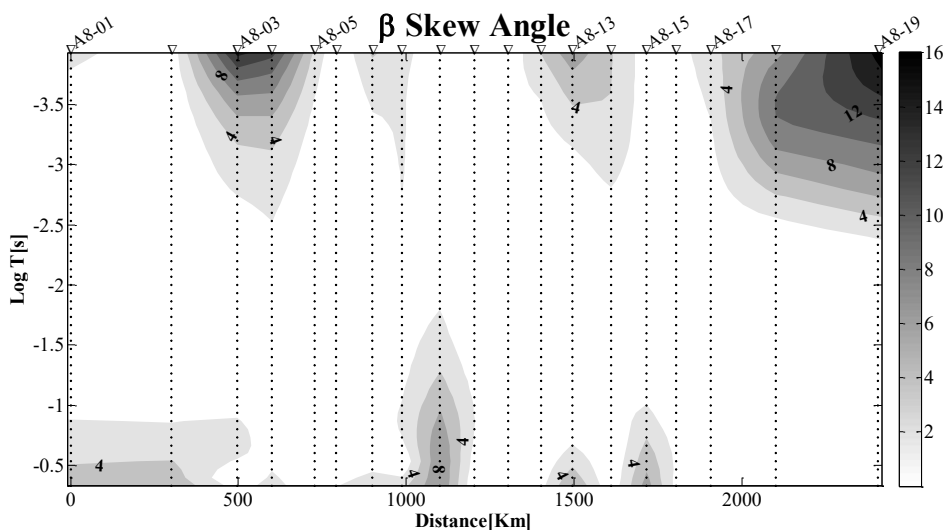
شکل ۳- نتایج تحلیل ابعادی با استفاده از برنامه والدیم برای داده‌های نیمرخ A08

تعریف شده‌اند که نمایش واضحی بر یک دیاگرام دایره‌ای مور داشته باشند [۱۷]. نتایج حاصل از تحلیل ابعادی داده‌های نیمرخ A08 با استفاده از ناوردهای WAL در شکل ۳ آورده شده است. اثر ساختارهای یک‌بعدی در بازه‌های پریودی کوتاه و متوسط و نیز وجود ساختار دوبعدی در پریودهای بلندتر تمام ایستگاه‌ها مشهود است. علاوه بر این در پریودهای بلند اغلب ایستگاه‌ها اثرات اعوجاجی حضور دارند. در این پریودهای بلند و در برخی ایستگاه‌ها اثر وجود ساختار منطقه‌ای 3D مشاهده می‌شود.

روابط فازی موجود در تانسور امیدانس MT به عنوان تانسور فاز، یک تانسور مرتبه دو، در نظر گرفته می‌شود. در مواردی که اثرات گالوانیکی تولید شده با ناهمگنی‌های الکتریکی نزدیک به سطح باعث اعوجاج پاسخ MT منطقه‌ای می‌شود، تانسور فاز اطلاعات فاز منطقه را حفظ می‌کند. اگر بخش‌های حقیقی و موهومی تانسور امیدانس به صورت $Z = X + iY$ در نظر گرفته شود، تانسور فاز مگنتوتلوریک با رابطه ۳ تعریف می‌شود:

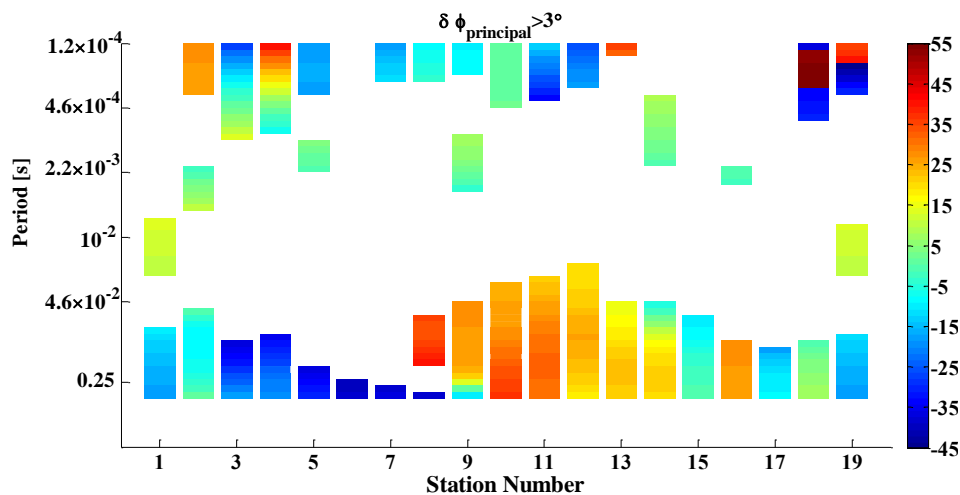
$$\Phi = X^{-1}Y = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

زاویه اسکویو (β) تقارن یا عدم تقارن تانسور فاز را نشان می‌دهد. مقدار صفر این زاویه اسکویو به معنای تقارن تانسور فاز و در نتیجه وجود ساختار منطقه‌ای دو بعدی است. البته از لحاظ تجربی اگر این زاویه اسکویو در بازه $[-5^\circ, 5^\circ]$ قرار بگیرد، ساختار منطقه‌ای دوبعدی در نظر گرفته می‌شود [۱۶].



شکل ۴- نتایج حاصل از تحلیل ابعادی داده‌های MT در امتداد نیمرخ A08 با استفاده از روش تانسور فاز. نقاط پریودهایی را نشان می‌دهند که در آن‌ها داده برداری شده است.

زده شده پراکندگی زیادی داشته باشند. در ادامه پریودهایی که اختلاف فاز مدهای اصلی امیدانس در آن‌ها کمتر از 3° است را حذف و استرایک تخمین زده شده در پریودهای باقی‌مانده در شکل ۵ نمایش داده شده است. با نمایش فراوانی نمای این مقادیر در نمودار گل سرخی شکل ۶ اثر ساختار منطقه‌ای واضح‌تر شده و راستای $N27^\circ E$ را می‌توان راستای روند این ساختار در نظر گرفت.



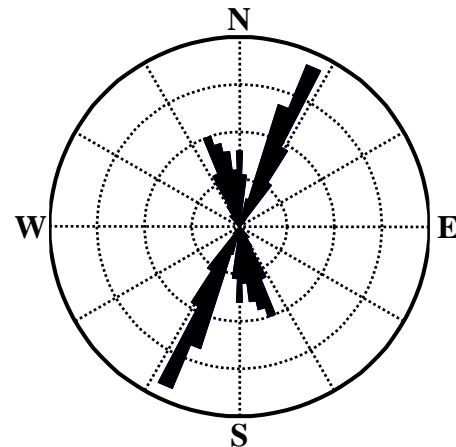
شکل ۵- مقادیر استرایک تخمین زده شده از روی تانسور فاز برای همه ایستگاه‌های واقع در امتداد نیم‌رخ. آزمون‌های نمایش داده شده صرفاً به پریودهایی مربوط‌اند که جدایش فازهای اصلی تانسور امیدانس در آن‌ها بیشتر از 3° است ($|\phi_{xy} - \phi_{yx}| > 3^\circ$).

می‌شود (مدل 3D/2D). آثار گالوانیکی ناشی از ساختارهای محلی عموماً پاسخ‌های القایی ساختار منطقه‌ای را معوج ساخته و تصویرسازی موثق ساختار هدایت ویژه الکتریکی زیرسطحی را دشوار می‌سازند. بدیهی است که بدون حذف این آثار، تفسیرها و مدل‌های حاصل از داده‌های MT کاملاً غیرقابل اعتماد است [۱۸].

در روش GB آثار گالوانیکی به بخش‌های قابل تعیین (از نظر چرخش (پیچش $tg^{-1}t$) و برش ($tg^{-1}s$) جریان‌های تلوریک منطقه‌ای) و غیرقابل تعیین تقسیم می‌شوند. در این رویکرد، تانسور امیدانس اندازه‌گیری شده به عنوان یک مدل هفت پارامتری برحسب استرایک ساختار ژئوالکتریک منطقه (θ)، امیدانس‌های منطقه‌ای (Z_{yx}, Z_{xy}) و دو پارامتر اعوجاج تلوریک (e, t) بازنویسی می‌شود (رابطه ۴).

سپس با استفاده از رویکرد کمترین مربعات این مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش می‌یابد.

در مورد ساختار ژئوالکتریک منطقه‌ای دوبعدی، تانسور فاز ماتریسی قطری و متقارن است و یکی از محورهای اصلی آن به موازات روند این ساختار قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب برای تعیین راستای استرایک ساختار منطقه، جهت‌گیری محورهای اصلی این تانسورها در پریودهای مختلف همه ایستگاه‌ها محاسبه شدند. وجود ساختار لایه‌ای در اعماق کم باعث شده که مقادیر استرایک تخمین

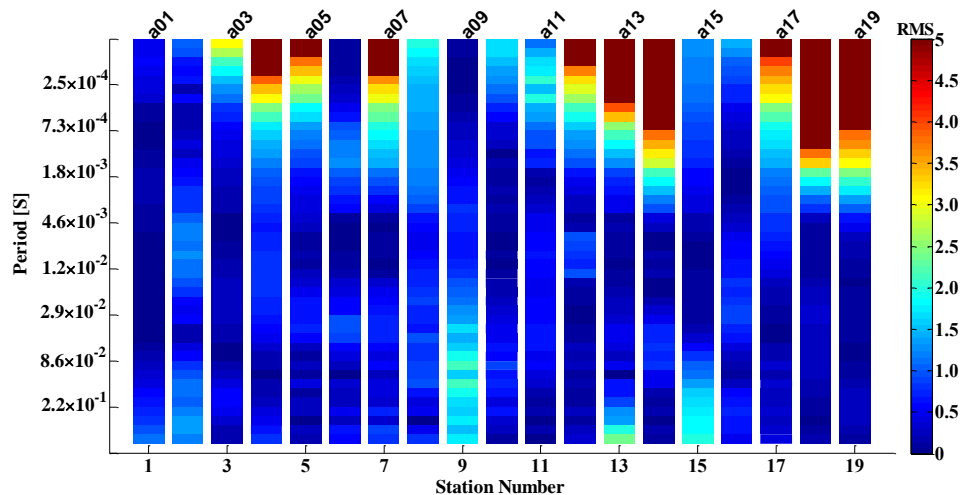


شکل ۶- نمودار گل سرخی استرایک محاسبه شده از داده‌ها در پریودهایی که در آن‌ها اختلاف فاز مدهای اصلی امیدانس بزرگتر از 5° است.

۴-۱- شناسایی و حذف اثرات اعوجاج گالوانیکی از توابع پاسخ اندازه‌گیری شده MT

در روش GB برهم‌نهی از ناهمگنی‌های سه‌بعدی کوچک مقیاس محلی و یک ساختار منطقه‌ای دوبعدی در نظر گرفته

$$Z_{\text{measured}} = \text{RTSZ}_{\text{regional}}R^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - te & e - t \\ e + t & 1 + te \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (۶)$$



شکل ۷- خطای عدم برازش مدل GB برای تجزیه تانسور امیدانس که برای داده‌های همه ایستگاه‌های نیمرخ A08 در همه پریودهای داده‌برداری محاسبه شده است

جابجایی ایستا است و این اثر می‌تواند باعث تقویت عدم برازش‌ها شود. بدین علت در آزمایش‌های عددی که برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیم‌کننده تابع هدف وارون‌سازی انجام می‌شوند، صرفاً از داده‌های فاز استفاده می‌شود. علاوه بر این قبل از وارون‌سازی 2D، داده‌ها در راستای روند ساختار منطقه چرخانده شدند تا دستگاه مختصات برداشت داده و ساختار منطقه هم‌راستا شوند. علاوه بر این قبل از وارون‌سازی با استفاده از رویکرد D^+ سازگاری داده‌های مقاومت‌ویژه و فاز بررسی شد. روش D^+ بر مبنای این واقعیت بنا شده است که پاسخ‌های گسسته MT از یک نیمرخ هدایت‌ویژه الکتریکی یک‌بعدی در تعداد محدودی از فرکانس‌ها را به خوبی می‌توان با پاسخ یک سیستم معین متشکل از توابع دلتا برازش داد.

شکل ۸ منحنی سعی و خطای بین مقادیر عدم برازش (RMS) داده‌ها و پاسخ‌های مدل و نرم تابعک زبری مدل را به ازای مقادیر مختلف ضریب لاگرانژ τ نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های عددی انجام گرفته برای تعیین مقادیر بهینه ضرایب α , β , H/V نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

از این نتایج مقدار $\tau=10$ که در گوشه منحنی L قرار گرفته و باعث شده تا به‌طور هم‌زمان تابعک عدم برازش (ϕ_d) و تابعک زبری مدل (ϕ_m) کمینه شوند و نیز مقادیر $\alpha=\beta=1$ و نیز $H/V=50m/50m$ که کمینه مقادیر RMS را نتیجه داده‌اند، به عنوان مقادیر بهینه برای این پارامترها انتخاب شده‌اند.

نتایج حاصل از اعمال روش GB بر روی داده‌های AMT که در این مقاله ارائه شده با در نظر گرفتن مقدار کف خطای یک درصد برای داده‌های امیدانس بوده است. پارامترهای اعوجاج بازیابی شده در سرتاسر محدوده پریودی داده‌ها مستقل از فرکانس و در محدوده $[10^\circ, -10^\circ]$ بوده‌اند. میزان خطای عدم برازش این مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شده، تخمینی از احتمال سه‌بعدی بودن ساختار ژئوالکتریک منطقه فراهم می‌آورد. توزیع این خطای عدم برازش (شکل ۷) نشان می‌دهد که در اغلب پریودهای این ایستگاه‌ها مقدار خطای RMS کمتر از یک است و بنابراین فرض دوبعدی بودن ساختار ژئوالکتریک منطقه معقول است. بیشترین مقدار این خطای عدم برازش در کوتاه‌ترین پریودها بوده‌اند که بر اساس نتایج حاصل از ناوردهای WAL می‌توان آن را به علت لایه‌ای بودن ساختار منطقه در اعماق کم دانست (شکل ۳).

۵- مدل‌سازی دوبعدی از داده‌های AMT

در ادامه مدل مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی از منطقه مورد مطالعه با استفاده از وارون‌سازی داده‌های AMT استخراج شده است. بدین منظور از الگوریتم گرادینان‌های مزدوج غیرخطی که در نرم‌افزار winglink اجرا شده [۱۹] برای وارون‌سازی داده‌های امیدانس و تیپر برداشت شده در امتداد نیمرخ A08 (حاوی ۱۹ ایستگاه و در محدوده فرکانسی 2-8600 Hz)، استفاده شده است.

با وجود حذف اثرات اعوجاج گالوانیکی از روی داده‌ها در مرحله قبل، داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی متأثر از اثر مزاحم

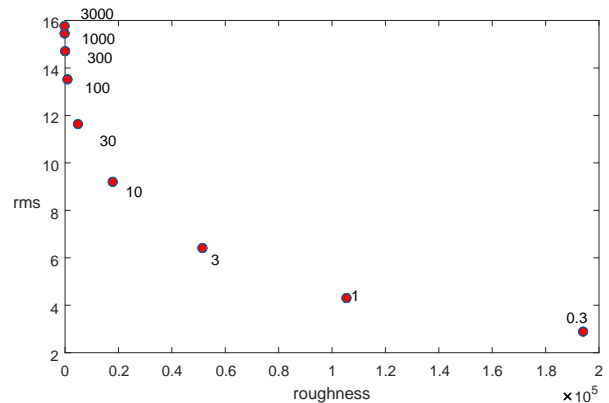
- وارون سازی برای داده‌های اندازه‌گیری شده انجام شده است.
- خطاهای اندازه‌گیری در فرآیند وارون سازی وارد شده و در غیر این صورت ۱۰ و ۵ درصد خطا به ترتیب برای مقادیر مقاومت ویژه و فاز لحاظ شده‌اند.
- داده‌های تابع تبدیل ژئومغناطیس (tipper) نیز در فرآیند وارون سازی داده‌ها وارد شده‌اند.
- مقدار کف خطای ۳/۵ درصد برای داده‌های مقاومت ویژه ظاهری، ۳ درصد داده‌های فاز و مقدار ۰/۰۳ برای داده‌های تیپر در نظر گرفته شده است.
- مدل آغازین وارون سازی در این وارون سازی‌ها اغلب یک نیم فضای $100\Omega m$ است.
- مقادیر جابه‌جایی ایستای مقاومت ویژه‌های ظاهری مدهای TE و TM به‌عنوان یک پارامتر مجهول در فرآیند وارون سازی وارد شده و به مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری این مدها اضافه می‌شود. به عبارت دیگر در الگوریتم‌های وارون سازی، لگاریتم مقاومت ویژه الکتریکی با یک ضریب ثابت تغییر می‌کند. قیدی که در این الگوریتم‌ها به طور معمول بر ضرایب شیفیت ایستا اعمال می‌شود آن است که مجموع لگاریتم‌های این ضرایب برابر صفر است. در واقع فرض اصلی آن است که ضرایب شیفیت ایستا ناشی از ناهمگنی‌های کوچک مقیاس مقاوم با ضرایب شیفیت ایستای ناهمگنی‌های رسانا متوازن می‌شود [۲۰، ۱۹].

نتایج حاصل از وارون سازی هریک از قطبش‌های داده و نیز ترکیب انواع داده‌ها در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارایه شده‌اند. در وارون سازی‌های ترکیبی مدل سازی با داده‌های فاز مد TM شروع شده و به تدریج داده‌های فاز مد TE، مقاومت ویژه مد TM، مقاومت ویژه مد TE و در نهایت داده‌های تیپر در فرآیند وارون سازی داخل می‌شوند.

پاسخ‌های MT حاصل از این مدل‌ها و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌اند. این شکل برازش مطلوب داده‌ها و پاسخ‌های مدل را نشان می‌دهد.

۶- تفسیر نتایج وارون سازی داده‌های نیمرخ A8

قطبش‌های مختلف داده‌های امیدانس و نیز داده‌های تیپر (داده‌های TE, TM, TP) حساسیت‌های مختلفی نسبت به ساختارهای زیرسطح زمین دارند و جامع‌ترین و قابل اعتمادترین اطلاعات درباره ساختار هدایت ویژه زمین از تفسیر



شکل ۸- منحنی سعی و خطا بین مقادیر تابع عدم برازش و نرم تابعک تثبیت‌ساز.

جدول ۱- نتایج مدل سازی‌های عددی برای تعیین مقادیر بهینه ضرایب وزن دهنده تابع هزینه وارون سازی

شماره آزمایش	α	β	H[m]/V[m]	RMS
۱	۰	۰	۱۰۰/۱۰۰	۲,۶۴۶
۲	۰	۰,۳	۱۰۰/۱۰۰	۱,۹۹۳
۳	۰	۱	۱۰۰/۱۰۰	۱,۰۴۹
۴	۰	۳	۱۰۰/۱۰۰	۰,۶۵۲۹
۵	۰,۳	۰	۱۰۰/۱۰۰	۰,۵۳۴
۶	۰,۳	۰,۳	۱۰۰/۱۰۰	۲,۲۳۱
۷	۰,۳	۱	۱۰۰/۱۰۰	۱,۰۶۵
۸	۰,۳	۳	۱۰۰/۱۰۰	۰,۶۵۲
۹	۱	۰	۱۰۰/۱۰۰	۳,۶۷۶
۱۰	۱	۰,۳	۱۰۰/۱۰۰	۲,۳۲۱
۱۱	۱	۱	۱۰۰/۱۰۰	۱,۰۶۱
۱۲	۱	۳	۱۰۰/۱۰۰	۰,۶۵۵
۱۳	۳	۰	۱۰۰/۱۰۰	۳,۷۸
۱۴	۳	۰,۳	۱۰۰/۱۰۰	۲,۳۹۳
۱۵	۳	۱	۱۰۰/۱۰۰	۱,۰۶۷
۱۶	۳	۳	۱۰۰/۱۰۰	۰,۶۰۲
۱۷	۱	۱	۵۰/۵۰	۰,۸۱۴
۱۸	۱	۱	۱۰۰/۱۰۰	۱,۰۶۱
۱۹	۱	۱	۵۰۰/۵۰۰	۲,۳۱۱

در همه مدل سازی‌های وارون داده‌های این منطقه تنظیمات زیر انجام شده است:

- داده‌های وارد شده در این وارون سازی‌ها در چهار دهه لگاریتمی که کمینه آن 10^{-4} ثانیه است گسترده شده‌اند.

چهرم (سازنده اصلی تاقدیس کوه نمک) ایجاد شده‌اند. این واقعیت چرخش شورابه را بین ساختارهای سطحی و عمیق تر منطقه نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

منابع محدود آب‌های زیرزمینی از یک طرف و نیازهای آبی فزاینده در نواحی خشک و نیمه‌خشکی که جمعیت و اقتصاد رو به رشد دارند، باعث شده که بودجه‌بندی آب در آبخوان‌های این نواحی نامتوازن باشد. پمپاژ بیش از حد آب در این آبخوان‌ها برای برآورده ساختن نیاز فزاینده جمعیت به آب آشامیدنی باعث خراب شدن کیفیت و شور شدن این آب‌ها شده است. این عوامل باعث می‌شوند که مدیریت آبخوان‌ها در نواحی خشک و نیمه‌خشک بسیار پیچیده باشد. مدیریت صحیح یک آبخوان مستلزم آن است که ماهیت آن با دقت تعیین شده باشد.

نتایج حاصل از این بررسی‌ها به شرح زیر است:

- تحلیل ابعادی داده‌ها با استفاده از اسکيو تانسور فاز و ناوردهای چرخشی تانسور امپدانس، نشان داد که ساختار ژئوالکتریک منطقه در بازه‌های پریودی کوتاه و متوسط یک بعدی و در بازه‌های پریودی بلندتر دوبعدی و متاثر از اعوجاج گالوانیکی است.
- تحلیل استریکی داده‌های AMT با استفاده از روش تانسور فاز نشان می‌دهد که برای داده‌های با اختلاف فازهای اصلی بیشتر از 30° ، روند ساختار ژئوالکتریک منطقه $N27^\circ E$ است.
- نمودارهای آماری (فراوانی‌نمای) زوایای برش و پیچش حاصل از اعمال کد WALDIM بر داده‌های ثبت شده در ۱۹ ایستگاه اندازه‌گیری منطقه مورد مطالعه، نشان می‌دهد که اثرات اعوجاجی آلوده‌کننده این داده‌ها ضعیف‌اند.
- وارون‌سازی دوبعدی همسانگرد از قطبش‌های مختلف (TE, TM) داده‌های امپدانس و تابع تبدیل ژئومغناطیسی (TP)، پس از حذف آثار اعوجاجی از داده‌های امپدانس و چرخش آن‌ها در راستای استریک منطقه با استفاده از نرم‌افزار WingLink انجام گرفت. جامع‌ترین و قابل اعتمادترین اطلاعات از ساختار هدایت ویژه زمین از تفسیر هم‌زمان تمام داده‌ها با استفاده از وارون‌سازی ترکیبی TE, TM و TP حاصل شد.
- بارزترین عارضه رسانای بازیابی شده در این مدل لایه رسانایی است که از عمق تقریبی ۳۰ متری شروع و در

هم‌زمان همه داده‌ها حاصل می‌شود. بدین علت تفسیر نتایج وارون‌سازی بر اساس عوارض بازیابی شده در وارون‌سازی هم‌زمان همه داده‌ها ارایه می‌شود (شکل ۱۲). با توجه به نبود مطالعات ژئوفیزیکی در این منطقه، تفسیر مدل نهایی با توجه به نتایج هیدروژئولوژی [۱۳، ۵، ۴] و تحلیل‌های زمین‌ساختاری [۲۱] انجام می‌گیرد.

- ساختار C_1 : این ساختار برجسته‌ترین عارضه رسانایی است که در مدل بازیابی شده است. این لایه رسانا از یک عمق تقریبی ۳۰ متر شروع و در سرتاسر مدل گسترده شده است. بر مبنای اطلاعات هیدروژئولوژی قبلی در این منطقه این لایه را می‌توان به آب‌های شور نسبت داد که در سرتاسر دشت مند جریان دارند. براساس این مطالعات عمق سطح ایستابی در آبخوان سنا- شنبه بین ۲۴-۴۶ متر متغیر است و کندوکنانس الکتریکی آب‌های زیرزمینی در دشت مند به مقادیر بالای ۶۰۰۰ میکروثانیه نیز می‌رسد [۴].

- ساختارهای مقاوم R_1 و R_2 که با رسانای متوسط C_2 از هم جدا شده‌اند. مطالعات هیدروژئولوژی محدودی که در منطقه شنبه انجام گرفته آبخوان آبرفتی با پوشش رسوبی ضخیمی را بازیابی کرده‌اند که بر فراز پی‌سنگی از جنس سازند بختیاری قرار گرفته است [۲۳]. براساس این داده‌های زمین‌شناسی توده‌های مقاوم R_1 و R_2 را می‌توان به سازند بختیاری نسبت داد که با انشعابی از گسل پیشانی کوهستان (MFF) از هم جدا شده‌اند.

تحلیل‌های زمین‌ساختاری نشان داده‌اند که جنس سنگ‌ها در این منطقه اثر برجسته‌ای دارد و ماهیت هیدروژئولوژیکی آن را کنترل می‌کند. روند غالب تخمین زده شده از روی سیستم شکستگی‌ها با جهت جریان آب‌های زیرزمینی به خوبی هم‌بسته است. سازندهای سنگی بر مبنای جنس سنگ‌ها و ویژگی‌های ژئوشیمیایی آن‌ها به دو طبقه تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۱]، یکی سازندهایی که کیفیت آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند (سازندهای گچساران، میشان و آقاجاری) و دیگری سازندهایی که جهت جریان آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند (سازندهای آسماری، بختیاری و سروک).

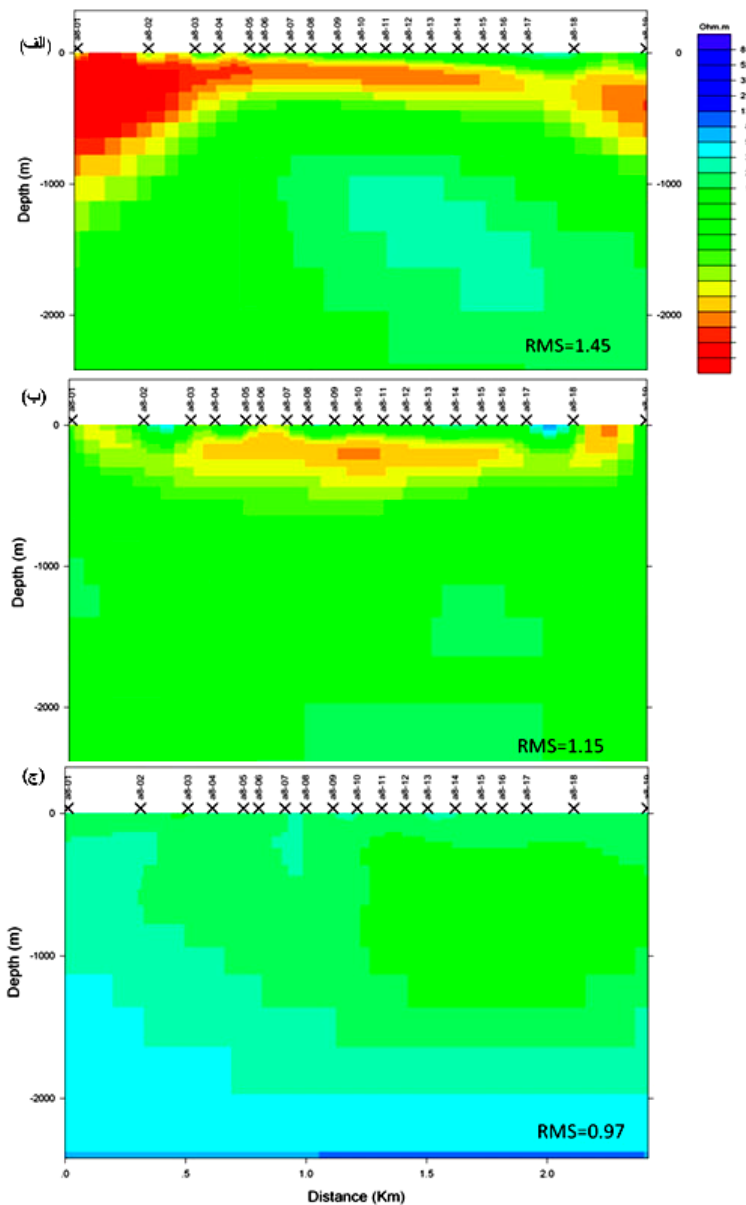
- ساختار C_3 : این ساختار رسانا در قسمت‌های عمیق مدل را می‌توان به شکستگی‌های مملو از سیالی نسبت داد که در لایه‌های شکننده سنگ آهک مربوط به سازند آسماری-

گسلش امکان جریان شورابه‌ها از قسمت‌های عمیق به سمت لایه‌های سطحی حاوی آب زیرزمینی را فراهم آورده است. به عبارت دیگر این مدل نقش ساختارهای خطی موجود در این منطقه را که از نظر تکتونیکی فعال است [۱۵] در شوری آب‌های سطحی برجسته می‌سازد.

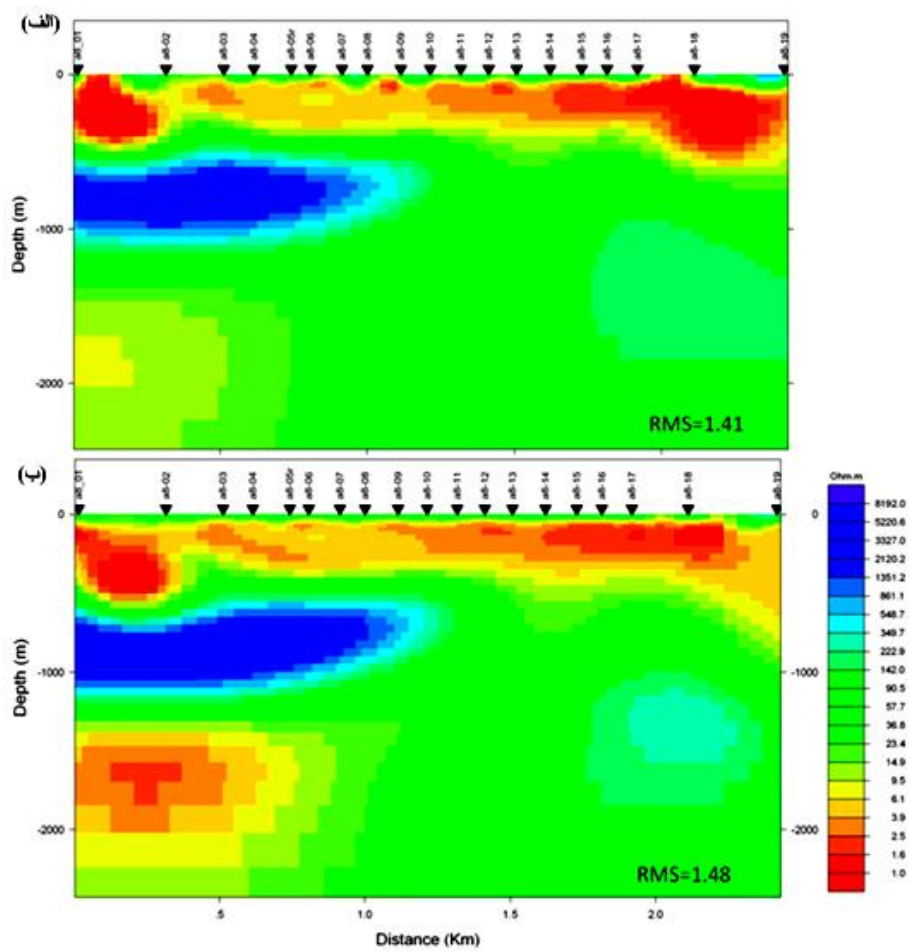
• ساختار رسنای دیگر در قسمت‌های عمیق‌تر را می‌توان به شکستگی‌های مملو از سیالی نسبت داد که در لایه‌های شکننده سنگ آهک مربوط به سازند آسماری-چهرم (سازنده اصلی تاقدیس کوه نمک) ایجاد شده است و چرخش شورابه را بین ساختارهای سطحی و عمیق‌تر منطقه نشان می‌دهد.

سرتاسر مدل گسترده شده است. با توجه به اطلاعات حاصل از هیدروژئولوژی این منطقه این لایه را می‌توان به آب‌های شور جریان‌یافته در سرتاسر دشت مند نسبت داد.

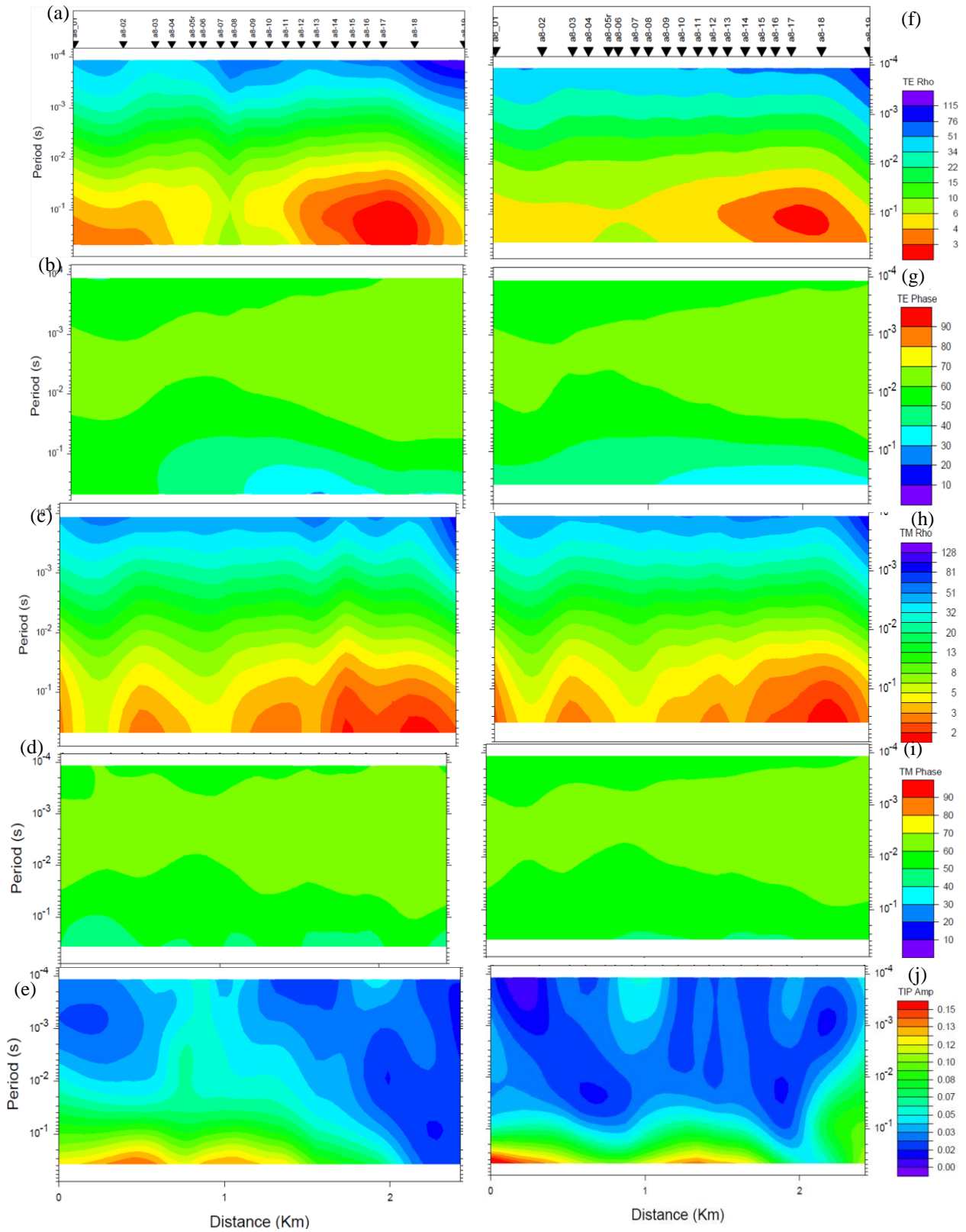
• عارضه دیگر دو توده مقاوم (R_1 , R_2) در محدوده عمق ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ متری و ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ متری است که با توده نسبتا رسنای (C_2) از هم جدا شده‌اند. بر اساس داده‌های زمین‌شناسی این توده‌های مقاوم به سازند بختیاری که با انشعابی از گسل پیشانی کوهستان (MFF) از هم جدا شده‌اند، نسبت داده می‌شوند. این مدل آبخوان آبرفتی با پوشش رسوبی ضخیم در منطقه شنبه را نشان می‌دهد که بر روی پی سنگ بختیاری گسلیده قرار گرفته است. این



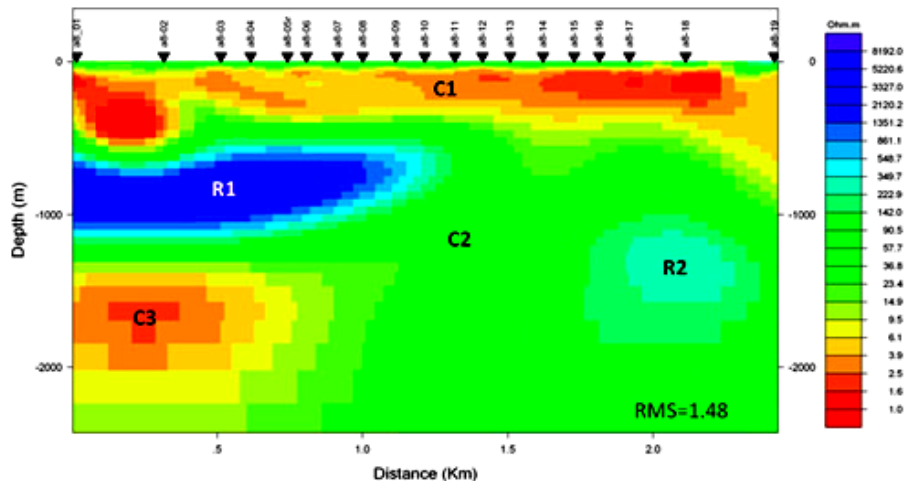
شکل ۹- نتایج حاصل از وارون‌سازی داده‌های الف) مد TE امپدانس، ب) مد TM امپدانس و ج) TP



شکل ۱۰. نتایج حاصل از وارون‌سازی همزمان داده‌های (الف) قطبش TE+TM امپدانس. (ب) TE+TM+TP



شکل ۱۱- شبه مقطع داده‌های اندازه‌گیری شده (ستون سمت چپ) و (ب) پاسخ‌های محاسبه شده برای داده‌های مقاومت‌ویژه TM (ردیف اول) فاز TM (ردیف دوم)، مقاومت‌ویژه TE (ردیف سوم)، فاز TE (ردیف چهارم) و داده‌های TP (ردیف پنجم)



شکل ۱۲- مقطع مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شده

86, 426-446.

منابع

- Sharafi, A., Raeisi, E., & Farhoodi, G. (2002). The effect of Darab salt dome on the quality of adjacent karstic and alluvium aquifers (south of Iran). *Acta Carsologica*, 31(2).
- Zarei, M., Raeisi, E., & Talbot, C. J. (2012). Karst development on a mobile substrate: Konarsiah salt extrusion, Iran. *Geological magazine*, 149(3), 412-422.
- Ghanbarian, M. A. (2016). Structural analysis of the Konarsiah and the Mangerak salt domes and its influence in ground water contamination, Zagros foreland folded belt, SW Iran. *International Journal of Environmental Sciences*, 7(1), 70-82.
- Meju, M. A. (2002). Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges. *Surveys in Geophysics*, 23, 133-206.
- Mohammadi, Z., Salimi, M., & Faghih, A. (2014). Assessment of groundwater recharge in a semi-arid groundwater system using water balance equation, southern Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 95, 1-8.
- Chenini, I., & Kouzana, L. (2016). Comment on 'Assessment of groundwater recharge in a semi-arid groundwater system using water balance equation, southern Iran' by Mohammadi et al. [J. Afr. Earth Sci. 95 (2014) 1-8]. *Journal of African Earth Sciences*, 118, 313-314.
- Elliott, J. R., Bergman, E. A., Copley, A. C., Ghods, A. R., Nissen, E. K., Oveisi, B., ... & Yamini-Fard, F. (2015). The 2013 Mw 6.2 Khaki-Shonbe (Iran) earthquake: Insights into seismic and aseismic shortening of the Zagros sedimentary cover. *Earth and Space Science*, 2(11), 435-471.
- Caldwell, T.G., Bibby, H. M. & Brown, C. (2004). The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical*
- Elhamy, A., Tarabees, B., J., Charlotte, T., J. Younis, M.A.; 2017; "Audio-magnetotelluric surveys to constrain the origin of a network of narrow synclines in Eocene limestone Western Desert, Egypt" *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 136, 168-175.
- Asaue, H., Kubo, T., Yoshinaga, T., and Koik; .2012; *Application of Magnetotelluric (MT) Resistivity to Imaging of Regional Three Dimensional Geologic Structures And Groundwater System. Natural Resources Research*, Vol. 21, No. 3.
- Tabarmayeh, M., & Zarei, M. (2021). Characterizing groundwater stress in the Mond Basin, southern Iran. *39th National Congress and 4th International Congress of Earth Sciences*.
- Rezaee, M. ;2011; "Assessing the controlling factors of groundwater hydrochemistry in Mond alluvial aquifer, Bushehr". *Journal of Environmental studies*, 37(58), 105-116.
- Mohammadi, Z., Zare, M., & Sharifzade, B. (2012). Delineation of groundwater salinization in a coastal aquifer, Bousheher, South of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 67, 1473-1484.
- Tavernier, J. B. (1718). *Les six voyages de Jean Baptiste Tavernier: en Turquie, en Perse et aux Indes*. H. Scheurleer.
- Talbot, C. J., & Jarvis, R. J. (1984). Age, budget and dynamics of an active salt extrusion in Iran. *Journal of Structural Geology*, 6(5), 521-533.
- Jahani, S., Hassanpour, J., Mohammadi-Firouz, S., Letouzey, J., de Lamotte, D. F., Alavi, S. A., & Soleimany, B. (2017). Salt tectonics and tear faulting in the central part of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*,

21. Ghanbarian, M.A.; 2016; "Structural analysis of the Konarsiah and the Mangerak salt domes and its influence in ground water contamination, Zagros foreland folded belt, SW Iran" International Journal of Environment and Science, 7, 70-82.
22. Collignon, M., Haghypour, N., Lupker, M., Mohammadi, A., Christl, M., Burg, J-P; 2019; "Short-time (<10 ka) denudation rates as a marker of active folding in the Zagros Fold Belt (Iran)". *Terra Nova*, 31, 111-119. <https://doi.org/10.1111/ter.12376>.
23. Mohammadi, Z., Zare, M., & Sharifzade, B; 2012; "Delineation of groundwater salinization in a coastal aquifer, Bousheher, South of Iran" *Environmental and Earth Sciences*, 67(5), 1473-1484.
- Journal International, 158(2), 457-469.
17. Marti, A., Queralt, P., & Ledo, J. (2009). "WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor". *Computers & Geosciences*, 35(12), 2295-2303.
18. Groom, R.W., and Bailey, R. C.; 1991; "Analytical investigations of the effects of near surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decomposition": *Geophysics*, 56, 496-518.
19. Rodi, W. and Mackie R.L.; 2001; "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion". *Geophysics* 66, 174-187.
20. de Groot-Hedlin, C., & Constable, S. (2004). Inversion of magnetotelluric data for 2D structure with sharp resistivity contrasts. *Geophysics*, 69(1), 78-86.