

تفسیر یک بعدی و دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک شرق دریاچه آلاگل، استان گلستان

رابعه صداقت^۱ و دکتر بهروز اسکوئی^۲

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش مگنتوتلوریک به بررسی چگونگی رسانائی الکتریکی لایه‌های زمین تا عمق ۳۰۰ در شرق دریاچه آلاگل (واقع در استان گلستان) می‌پردازیم. ساختارهای زمین‌شناسی با توجه به جنس آنها، تخلخل، میزان و نوع سیالات دارای پاسخ‌های متفاوتی در تقابل با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشند. لایه‌های حاوی آب شور دارای هدایت الکتریکی بالائی می‌باشند. سازندهای زمین‌شناسی منطقه عمدتاً رسوبات آبرفتی مربوط به دوران کواترنری است. با توجه به مدل‌های حاصل از وارون سازی یک بعدی و دو بعدی داده‌ها، سه لایه رسانا در عمق ۲۰ تا ۹۰ متر، ۱۱۰ تا ۵۰۰ متر و حدود ۱۱۰۰ متر تشخیص داده شدند. دو لایه اخیر احتمالاً حاوی آب شور می‌باشند. برای تایید صحت نتایج بدست آمده، مدل یک بعدی حاصل از داده‌های MT در مجاورت یک چاه که در ۴ کیلومتری جنوب غربی ایستگاه B51 واقع شده است با نتایج حاصل از نگار چاه مقایسه شده است.

کلید واژه‌ها: مگنتوتلوریک، میدانهای مغناطیسی و الکتریکی، دریاچه آلاگل، وارون سازی

1D and 2D interpretation of MT data in the east of Alagol Lake, Golestan province

Rabea Sedaghat and Dr. Behrooz Oskooi

Abstract

In this paper we study the subsurface down to 1300 m in the east of Alagol lake, located in the north of Golestan province, Iran. Geological structures according to the lithology, porosity and fluids have different responses to electric and magnetic fields. The layers containing salty water have high electric conductivity. The formation is Quaternary geological consists of jammed sediments. According to 1D and 2D models, three conductive layers were distinguished at the depths of 20 m to 90 m, 110 m to 500 m and about 1100 m. The last two layers are interpreted as the layers which consist of salty water. To prove the correctness of the results the 1D model of the MT data are compared with the results of a log record that is located at 4 Km southwestern of station B51.

Keywords: Magnetotelluric, Electric and magnetic fields, Alagol Lake, Inversion

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، کارشناس موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
rabeesedaghat@gmail.com

۲- استادیار گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران boskooi@ut.ac.ir

مقدمه

زون پیچیده ای از پلاسما است که به طور مداوم بوسیله باد خورشیدی (SolarWind) از طرف خورشید به سمت زمین می آید (وزوف ۱۹۹۱).

تئوری روش مگنتوتلوریک

با استفاده از نسبت متعامد اندازه گیری شده میدان الکتریکی E به میدان مغناطیسی H اطلاعات مفیدی درباره ساختار مقاومت زمین از اندازه گیری ها در سطح ($z=0$) بدست می آید و امپدانس تعیین می شود.

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

از این رابطه امپدانس Z_{xy} بدست می آید:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu_0 \rho} \quad (2)$$

با مرتب کردن جملات در رابطه (۲) مقاومت ویژه ظاهری ρ_{xy} قابل حل است:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (3)$$

و آرگومان امپدانس Z_{xy} به عنوان فاز تعیین می شود.

$$\varphi_{xy} = \arg(Z_{xy}) \quad (4)$$

در این روابط فرکانس زاویه ای $\omega=2\pi f$ است.

مقاومت ویژه ظاهری به نسبت مولفه های میدان الکتریکی و مغناطیسی وابسته است.

دترمینان تانسور امپدانس، امپدانس موثر نامیده

می شود و از رابطه زیر بدست می آید.

$$Z_{eff} = |Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}|^{1/2} \quad (5)$$

مگنتوتلوریک (MT) یک روش اکتشاف الکترومغناطیسی است که منشاء آن امواج الکترومغناطیسی طبیعی ایجاد شده در مگنتوسفر، یونسفر و اتمسفر زمین می باشد. در این روش با ثبت مؤلفه های افقی عمود برهم میدان های مغناطیسی و الکتریکی در سطح زمین می توان رسانایی الکتریکی زمین تحت مطالعه را بدست آورد. اساس روش مگنتوتلوریک (MT) در سال ۱۹۵۰ توسط تیکونوف (۱۹۵۰) و کانبارد (۱۹۵۳) پایه گذاری شد و توسط کانتول (۱۹۶۰) و وزوف (۱۹۷۲ و ۱۹۹۱) توسعه داده شد. این روش یکی از روش های الکترومغناطیسی در حوزه فرکانس است. عمق بررسی در روش MT خیلی بیشتر از دیگر روش های الکترومغناطیسی است. هدف نهایی در یک مطالعه مگنتوتلوریک تعیین مقاومت ویژه ساختارهای زیرزمینی می باشد. دو چشمه اصلی سیگنال های الکترومغناطیسی طبیعی وجود دارد که در اکتشافات مگنتوتلوریک استفاده می شود. چشمه فرکانس های ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز مربوط به اتمسفر است و از رعد و برق به وجود می آید و در تمام جهان به صورت موج هدایت شده توسط زمین هادی و یونسفر انتشار می یابند (وزوف ۱۹۹۱).

اکثر سیگنال های MT کمتر از 1Hz ناشی از پلاسما خورشیدی، برهمکنش مگنتوسفری (Magnetosphere)، جریان های الکتریکی در یونسفر و مگنتوسفر و نیز عمدتاً امواج هیدرومغناطیسی در مگنتوسفر می باشند. مگنتوسفر

که در اثر فرسایش ایجاد شده است جریان یافته و عمق این دره در جهت پایاب کاهش و عرض آن افزایش می یابد. بطوری که درحوالی داشلی برون عمق رودخانه به ده متر می رسد و به تدریج کمتر شده تا به دریاچه آلاگل منتهی می گردد. این دریاچه بزرگترین دریاچه استان بوده که وسعت آن ۲۵۰۰ هکتار است.

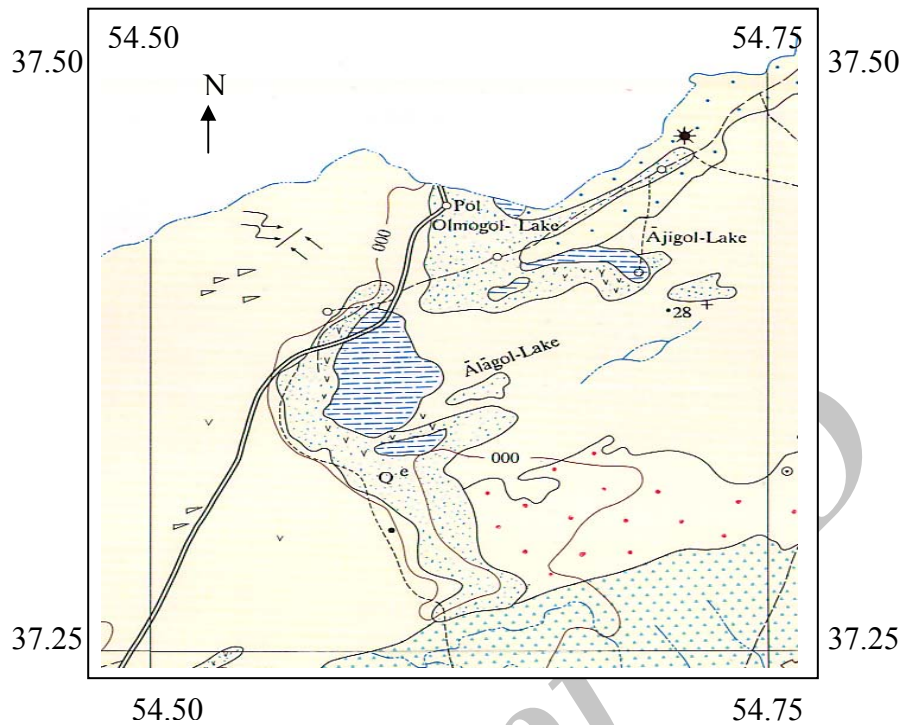
از دیدگاه خاک شناسی منطقه مورد مطالعه دشتی است که از رسوبات آبرفتی دوران چهارم بوجود آمده و کلیه آبهای جاری مواد حمل شده را در این دشت رسوب داده و بنا بر موقعیت و یا شدت جریان واحدهای فیزیوگرافی مختلف را بوجود آورده است. بطور کلی رسوبات منطقه دارای قابلیت نفوذ کم و دارای درجه شوری و قلیائیت زیاد هستند و ضخامت خاک این منطقه عموماً زیاد می باشد (اقاباتی، ۱۳۸۳). سازند زمین شناسی عمده موجود در منطقه سازند (Qfb) رسوبات آبرفتی کواترنری بوده که شامل رسوبات انباشته شده در چاله های سیلابی و همچنین ماسه های خاکستری حمل شده توسط پدیده رسوبات آبرفتی و کمان رودخانه ای محلی شامل ماسه- سیلت و رس است. شکل (۱) زمین شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

با استفاده از امپدانس موثر، مقاومت ویژه ظاهری دترمینان به عنوان ورودی برنامه های وارون سازی یک بعدی و دو بعدی، محاسبه می شود. مزیت استفاده از داده دترمینان آن است که مقدار میانگینی از امپدانس برای همه جهت های جریان فراهم می کند.

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه و دریاچه آلاگل قسمتی از حوضه رسوبی کپه داغ می باشد که در اثر آخرین فازهای چین خوردگی آلپی و فرسایش پی آمد آن سیمای فعلی را به خود گرفته است. مورفولوژی منطقه در مراحل جوانی بوده و توپوگرافی آن رابطه مستقیمی با ساختمان های زمین شناسی دارد. بطوریکه تاقدیس ها عمدتاً ارتفاعات و کوهها را ساخته و ناودیس ها نیز اغلب دشتهای میان کوهی را تشکیل داده اند.

بستر رودخانه اترک در قسمت اترک شرقی عموماً پرشیب بوده و از رسوبات آبرفتی درشت دانه پوشیده می باشد. مناطق میانی در اثر جریان یافتن سیل دچار فرسایش شده و عموماً از بریدگی ها و پیچ و خمهای ناشی از فرسایش تشکیل شده است. در بخش غربی حوزه، رودخانه اترک در دره عمیقی

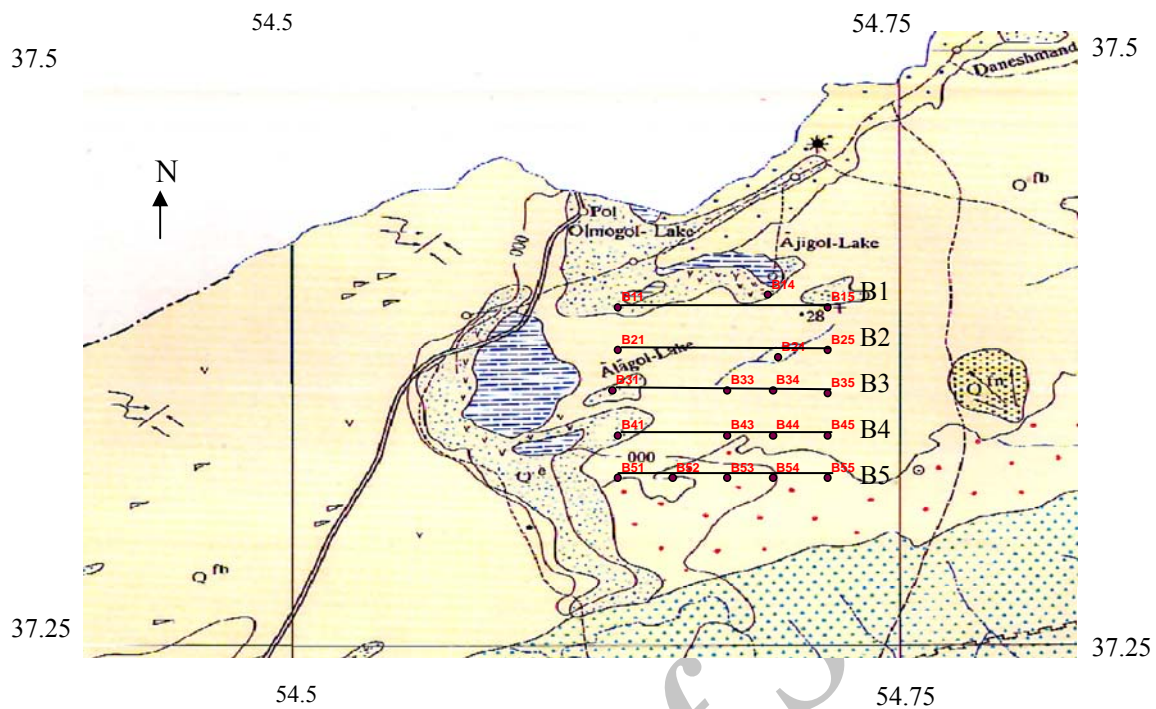


شکل (۱) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

برداشت داده‌ها

مطالعه مگنتوتلوریک در این منطقه زمستان سال ۱۳۸۵ انجام شد. دستگاه مورد استفاده در این عملیات دستگاه مگنتوتلوریک GMS05 ساخت شرکت مترونیکس آلمان بود. در مرحله اول طراحی سایت‌ها ۵ پروفیل، هر کدام شامل ۵ ایستگاه به

فاصله دو کیلومتر از یکدیگر در نظر گرفته شده بود که بدلیل وجود درختزار امکان برداشت در ایستگاه‌های B12, B13, B22, B23, B32, B42 وجود نداشت و در نهایت اندازه گیری در ۱۹ ایستگاه انجام شد. شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری MT را نشان می‌دهد.



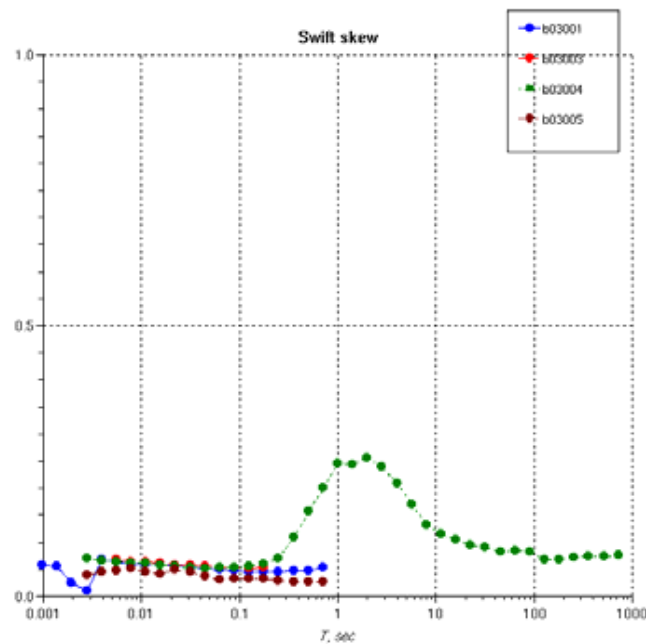
شکل (۲) موقعیت ایستگاه های مگنتوتلوریک برداشت شده در شرق دریاچه آلاگل.

$$S = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (۶)$$

هنگامی که مقدار این پارامتر بر حسب فرکانس مقدار کوچکی باشد (نزدیک به صفر)، ساختارهای زمین شناسی می توانند به صورت ساختارهای یک بعدی یا دو بعدی غیر آشفته تعریف شوند، در غیر این صورت ساختارهای موجود یا به صورت ساختارهای یک بعدی یا دو بعدی آشفته و یا به صورت ساختارهای سه بعدی تعریف می شوند. تحلیل بعد داده های مگنتوتلوریک نشان می دهد که داده ها ناشی از چه نوع ساختاری هستند و بر اساس آن نوع برنامه برگردان انتخاب می شود.

پردازش و تحلیل بعد داده ها

مسئله اساسی در پردازش داده ها این است که مشاهدات صحرائی به عنوان تابعی از زمان (سری های زمانی) بدست می آیند، ولی از طرف دیگر پایه های تئوری که برای این روش بسط داده شده اند همگی در حیطه فرکانس بدست آمده اند. بدین ترتیب لازم است داده های صحرائی را از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل کرد. سوئیفت (۱۹۶۷) پارامتر اسکيو (Skew) را که از عناصر ماتریس امیدانس برای تحلیل بعد داده ها قابل محاسبه است، به صورت زیر تعریف می کند:



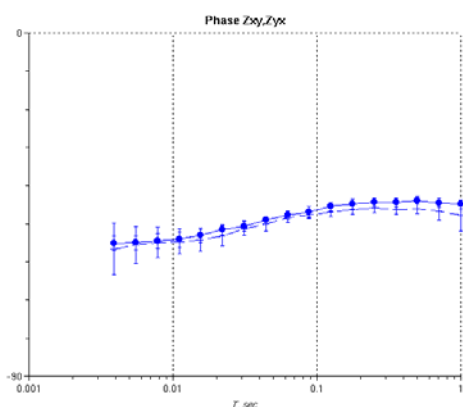
شکل (۳) مقادیر اسکيو برای سایت‌های اندازه‌گیری شده در امتداد پروفیل ۳

تحلیل‌های 1D یا 2D از داده‌ها در منطقه ارائه می‌دهد. مقادیر اسکيو همچنین برای بعضی از سایت‌ها، آن‌هم در مورد پایین‌ترین فرکانس‌ها، مقادیر بالایی را ارائه می‌دهند که می‌توانند نشان‌دهنده یک تبدیل از حالت 1D به حالت‌های 2D یا 3D در اعماق باشد.

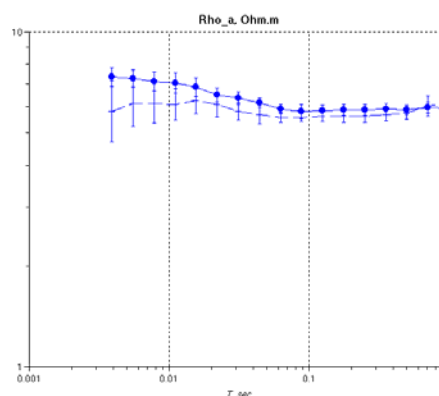
پردازش داده‌ها با استفاده از رهیافت اسمیرنو (۲۰۰۳) صورت گرفته است.

پس از اعمال مراحل پردازش، داده‌های مگنتوتلوریک به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز بر حسب فرکانس (یا دوره تناوب) نمایش داده می‌شوند. نمونه‌ای از این داده‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل منحنی‌های توپر ρ_{xy} و φ_{xy} و خط چین‌ها ρ_{yx} و φ_{yx} را نشان می‌دهند.

تحلیل بعد داده‌ها در مورد داده‌های مگنتوتلوریک منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که حالت داده‌های یک بعدی و دو بعدی غیر آشفته صادق می‌باشد. شکل (۳) مقادیر اسکيو را برای سایت‌های اندازه‌گیری شده در امتداد پروفیل B3 نشان می‌دهد. مقادیر اسکيو عمدتاً کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده ساختارهای 1D و کمتر از ۰/۲ نشان‌دهنده ساختارهای 2D است. برای بعضی از سایت‌ها پارامتر اسکيو مقادیر نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد که می‌تواند در اثر وجود آشفتگی‌های گالوانیکی و یا رفتار سه بعدی ساختارهای زیر سطحی باشد، ولی در عین حال سایت‌های دیگر برای بیشتر پروده‌ها مقادیر اسکيو نسبتاً کوچکی را نشان می‌دهند که یک تقریب زنی مناسبی را برای



(ب)



(الف)

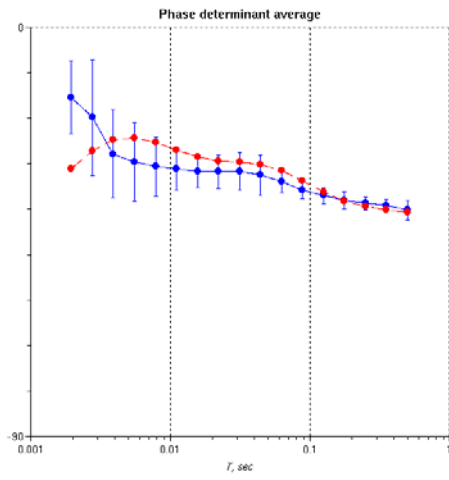
شکل (۴) نمونه ای از داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده در منطقه آلاگل. الف) مقاومت ویژه ظاهری. ب) فاز امپدانس

در این مطالعه از الگوریتم با قاعده REBOCC

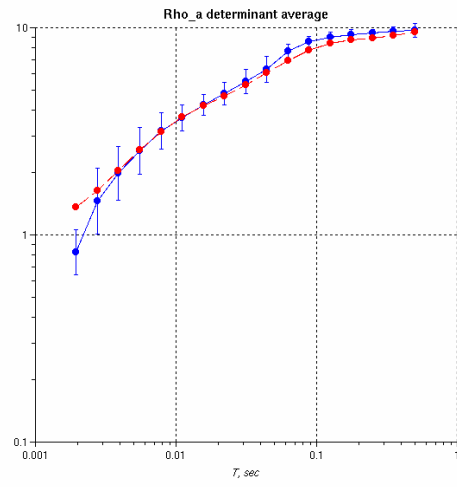
(سیریپون و وراپون و اگبرت، ۲۰۰۰) استفاده شده است. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود که در ۳ پروفیل اول که تنها با سه ایستگاه وارون سازی دوبعدی صورت گرفته، نتایج وارون سازی در بین ایستگاه‌های ۱ تا ۴ قابل اعتماد نمی‌باشد. در پروفیل ۴ و ۵ پدیده جالبی قابل رویت است که حاکی از گسترش متقاطع دو توده رسانا و مقاوم است به نحوی که توده رسانا در پروفیل ۴ از ایستگاه‌های ۱ تا ۳ به سمت ایستگاه ۴ پروفیل ۵ گسترش یافته و این در حالی است که توده مقاوم از محل ایستگاه‌های ۴ و ۵ پروفیل ۴ به سمت ایستگاه‌های ۱ تا ۳ پروفیل ۵ گسترش یافته است.

وارون سازی یک بعدی و دو بعدی داده‌ها

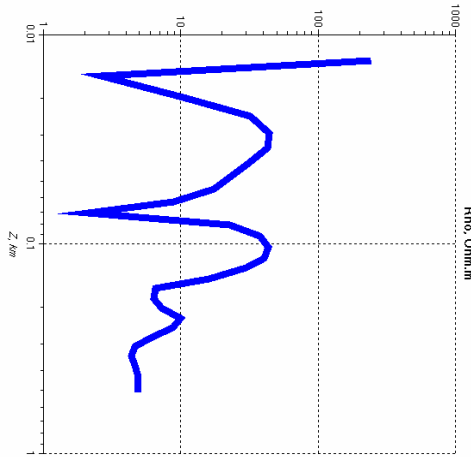
وارون سازی یک بعدی داده‌های دترمینان با استفاده از رهیافت ارائه شده توسط پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. در این برنامه خطای میانگین مربعی کل مدل تخمین زده شده جهت تعریف سطح برش استفاده می‌شود تا تعادل معقولی بین قدرت تفکیک و واریانس مدل بدست آید. شکل (۵) نتایج حاصل از وارون سازی یک بعدی داده‌های MT ایستگاه B55 را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه ساختارهای منطقه عمدتاً 1D و 2D تشخیص داده می‌شود برگردان داده‌ها ابتدا به صورت یک بعدی صورت گرفت. بر اساس نتایج برگردان داده‌های یک بعدی مدل‌های اولیه برای برگردان دوبعدی داده‌ها نیز انجام پذیرفت.



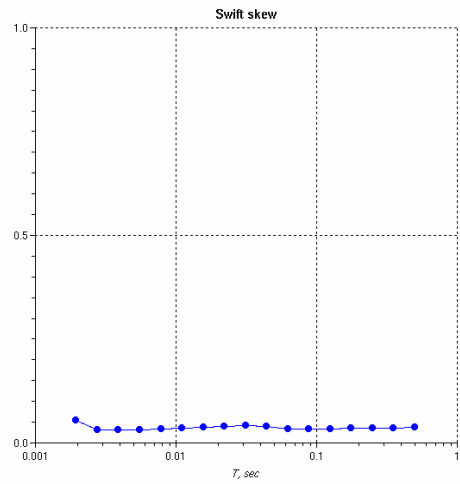
(ب)



(الف)

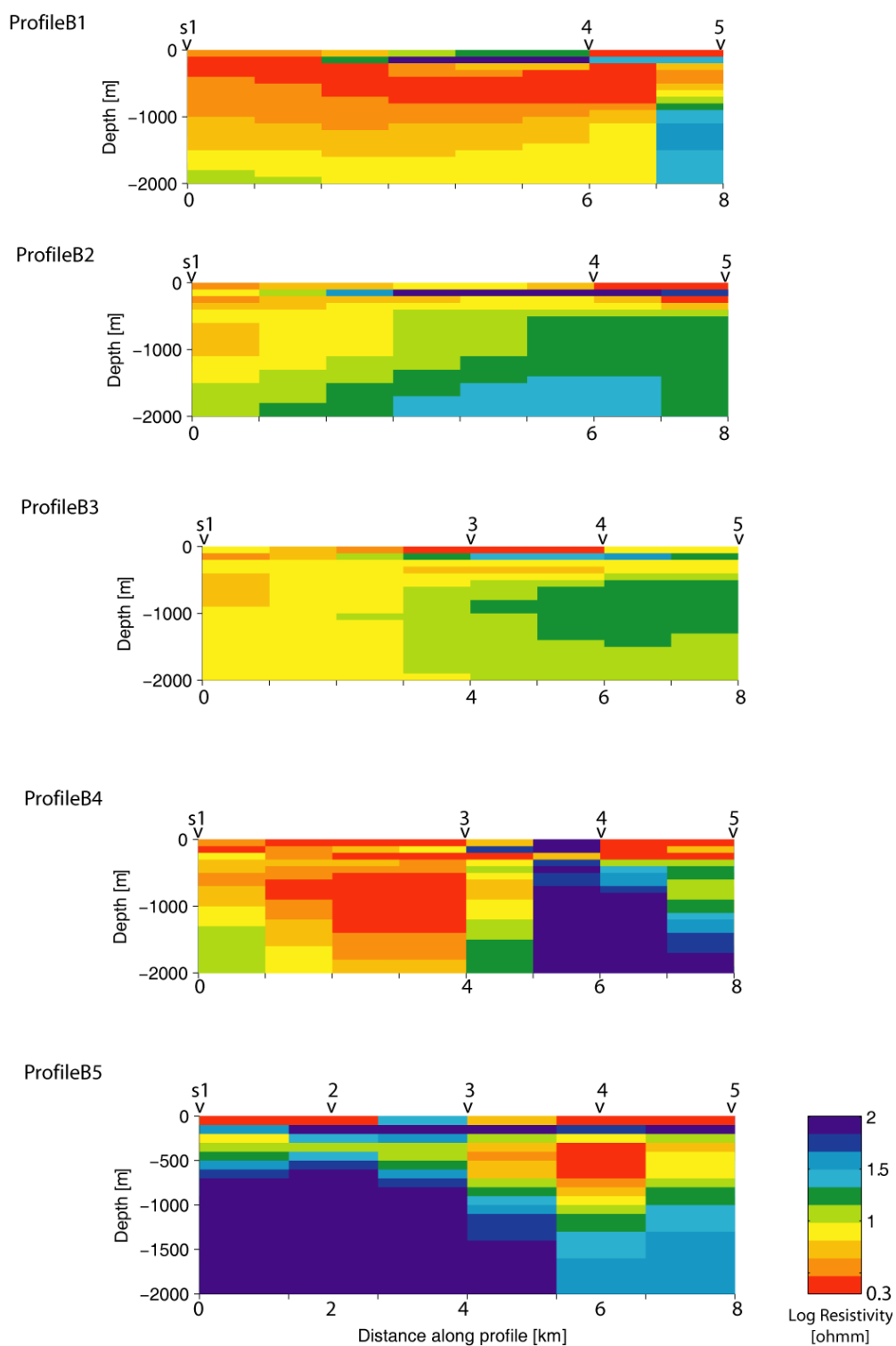


(د)



(ج)

شکل (۵) منحنی داده‌ها برای ایستگاه B55. الف) مقاومت ویژه ظاهری. ب) فاز. ج) اسکینو. د) مدل یک بعدی



شکل (۶) مقاطع مقاومت ویژه در امتداد پروفیلها

شده است. در این جدول عمق سطح لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها و مقاومت ویژه آنها آمده است.

لایه‌های زیرزمینی در محل هر برداشت براساس مقاومت ویژه به تفکیک در جدول (۱) نشان داده

جدول (۱) تفکیک لایه‌های رسانای زیر زمینی در محل هر برداشت بر اساس مقاومت

نام سایت	لایه رسانای اول			لایه رسانای دوم		
	عمق	ضخامت	مقاومت ویژه	عمق	ضخامت	مقاومت ویژه
B11	80	20	4	400	100	2
B14	35	10	0.01	xxx	xxx	xxx
B15	35	10	1.4	110	40	4
B21	40	10	5	150	50	3.5
B24	50	10	1	130	30	2
B25	50	10	4	200	50	2
B31	90	20	1.2	280	40	4
B33	45	10	2.5	160	40	1.1
B34	95	25	6	500	100	11
B35	40	15	6.5	180	50	2.5
B41	75	10	0.3	500	100	2
B43	40	10	1.6	170	20	1.4
B44	50	10	12	380	40	6
B45	60	10	1.2	170	40	1
B51	xxx	xxx	xxx	450	100	4
B52	60	10	1	xxx	xxx	xxx
B53	35	10	1	200	100	0.5
B54	40	10	5	xxx	xxx	xxx
B55	65	10	1.5	300	100	5

نگار حاصل از چاه

می‌دهد. با توجه به اطلاعات این چاه لایه‌های قسمت‌های فوقانی زمین در محل چاه شامل توالی از مقاومت متوسط و مقاومت بالا می‌باشد. در عمق ۶۷۰-۸۴۰ متر یک لایه رسانا شامل سفره آب شور تحت فشار تشخیص داده شده است. لایه رسانای بعدی در عمق ۱۰۲۵-۱۵۵۰ متری واقع شده است.

برای تایید صحت نتایج بدست آمده، مدل یک بعدی حاصل از داده‌های MT در مجاورت یک چاه (متعلق به سازمان صنایع و معادن استان گلستان) که در ۴ کیلومتری جنوب غربی ایستگاه B51 واقع شده است با نتایج حاصل از نگار چاه مقایسه شده است. جدول (۲) نگار حاصل از چاه مزبور را نشان

جدول (۲) نگار حاصل از چاه

m	Geological Structure	Resistivity description
0	Clay_Sand group1 (Neo Caspian formation Holocene	Medium resistivity
122	آهک انولیتی	High resistivity
125	Oelitic section Ancient Caspian Pleistocen	Medium resistivity
222	آهک انولیتی	High resistivity
225	Clay Sand group 2 Khazar formation Pleistocen	High resistivity
310	Baku formation	High resistivity
430	Upper Apsheron formation Pliocene	High resistivity
670	Lower Apsheron formation سیلت، رس و ماسه سنگ دانه ریز سفره ی آب شور تحت فشار	Low resistivity
840	Akhggl formation Pliocen	High resistivity
850	Tuff section Pliocen	High resistivity
910	Papery Shale	High resistivity
960	Brown Bed	Moderate resistivity
1025	Chelecken formation Pliocene	Moderate resistivity
1550	Sarnatian formation	Increasing resistivity
1850	Conglomerate section	Increasing resistivity
2050	Shale	Decreasing resistivity
2200	آهک	Increasing resistivity
2250	شیل و سیلت	Decreasing resistivity
2400		

بحث و نتیجه گیری

بدلیل رسانایی بالا از لحاظ الکتریکی، کاهش یافته و مانع انجام مطالعات مگنتوتلوریک عمیق در مناطق مذکور شده است. برگردان یک بعدی و دو بعدی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل های ۱ و ۲ زمین را بصورت لایه بندی تفکیک می کند. بطور کلی دو یا سه لایه رسانا در عمق های کمتر از ۹۰ متر، بین ۱۱۰ تا ۵۰۰ متر و حدود ۱۱۰۰ متر قابل تشخیص هستند. لایه های مقاوم تر نیز در بین این لایه های رسانا قابل تفکیک است. لایه مقاومی در

پس از پردازش داده ها و ارزیابی بعد داده های مگنتوتلوریک منطقه آلاگل، ساختارهای این منطقه بصورت یک بعدی و دو بعدی غیر آشفته تشخیص داده شد. منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود لایه های رسی همراه با کانیهای نمکی عموماً دارای مقاومت ویژه نسبتاً پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم متر) می باشد، بنابراین عمق نفوذ سیگنالهای الکترومغناطیسی که بستگی مستقیم به مقاومت ویژه کلی منطقه دارد،

- Cantwell, T., 1960. Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signal. Ph.D. thesis. Geology and Geophysics, Massachusetts Institute of technology.
- 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. and 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. Geothermics, 14, 654-662.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Tikhonov, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust. Doklady, 73, 281-285.
- Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins: Geophysics, 37, 98-141.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in Nabighian, M. N., ed., Electromagnetic methods in applied geophysics: Tulsa, Oklahoma, Soc. Exp. Geophysicists, 2, 641-711.

عمق حدود ۱۰۰ متر تا ۲۰۰ متر در اکثر پروفیل‌ها مشاهده می‌شود که احتمالاً مربوط به لایه سنگ آهک می‌باشد.

با توجه به اطلاعات مربوط به چاه حفاری در زیر ایستگاه‌های شماره ۱ پروفیل‌های ۱ تا ۴ در عمق ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر توده رسنایی مشاهده می‌شود که احتمالاً مربوط به سازند آپشرون پایینی می‌باشد. لایه رسنایی در عمق حدود ۱۰۰۰ متر تا ۱۵۰۰ متر در اکثر پروفیل‌ها (به جز پروفیل ۵) مشاهده می‌شود که رسنایی کمتری دارد و احتمالاً با توجه اطلاعات چاه مربوط به سازند چلکن می‌باشد. افزایش مقاومت الکتریکی در اعماق زیاد در پروفیل‌های ۴ و ۵ احتمالاً مربوط به لایه‌های مقاوم شامل توف، شیل، کنگلومرا و سنگ آهک می‌باشد.

منابع

- آقائباتی، ع. (۱۳۸۳): زمین‌شناسی ایران، ناشر: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران
- Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. Geophysics 8, 605-635.