

مدل سازی دو بعدی داده‌های مگنتو تلوریک و کاربرد آن در

ذخایر زمین گرمایی منطقه مشکین شهر

نوشته: دکتر محمد کاظم حفیظی* ، عبدالمهدی رحیمی* و مهرداد ایوبی**

Geoelectric Structure of Meshkinshahr Geothermal Area Deduced from 2D Magnetotelluric Models

By: Dr. M.K.Hafizi* , A.Rahimi* & M.Aiobi**

چکیده

روش مگنتو تلوریک نسبت به تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی حساس است و از آنجا که منابع زمین گرمایی، مقاومت ویژه الکتریکی را کاهش می دهند، در نتیجه این روش به خوبی می تواند آنها را شناسایی کند و به دلیل ژرفای نفوذ بیشتر نسبت به روشهای مقاومت ویژه الکتریکی، برای اکتشاف منابع زمین گرمایی دقیق تر است. برای تفسیر بهتر نتایج مگنتو تلوریک، از مدل سازی مستقیم و معکوس استفاده شده است. در مدل سازی دوبعدی، پاسخ مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به پارامترهای مدل و نیز بسامدهای مختلف به دست آمده و سپس در مدل سازی معکوس داده های به دست آمده صحرايي با این داده ها مقایسه و پارامترهای مدل پس از به دست آوردن کمترین خطا برآورد می شود. در مدل سازی دوبعدی از روش اجزای محدود و برای انجام برگردان، از الگوریتم اکام استفاده شده است. با توجه به ماهیت بی هنجاریهای زمین گرمایی، مدل سازی دو بعدی نتایج بهتری نسبت به مدل سازی یک بعدی به دست می دهد. با ترکیب نیمرخهای مدل سازی دو بعدی، یک تفسیر دو و نیم بعدی از داده های مگنتو تلوریک ناحیه مشکین شهر به دست آمده است.

کلید واژه ها: مگنتو تلوریک، زمین گرمایی، مقاومت ویژه، مدل سازی دو بعدی، مشکین شهر

Abstract

A 2D inversion of magnetotelluric data was carried out from geothermal resources at Mount Sabalan in the north west of Iran. The algorithms used in the MT study are the 2D models of Occam's inversion. Profile A with 13 MT stations was passed through Gheynarge village and aligned NW-SE around the west flank of the volcanic mountains of Sabalan. 2D inversion of magnetotelluric indicates a zone of very low resistivity nearby Gheynarge springs. The geothermal model was considered with a 100 ohm-m cap overlaying a 5 ohm-m reservoir in a 400 ohm-m half-space. The response of the regarded model confirms the 2D Occam's inversion obtained from MT data in the west of Mount Sabalan. The Combination of 2D inversion from three profiles, which crossed on the A profile, indicates a 2.5D interpretation of Meshkin-Shahr's geothermal site's reservoir.

Keywords: Geothermal, 2D Inversion, Meshkin-Shahr, Magnetotelluric, Resistivity.

مقدمه

روش MT بر اساس محاسبه امپدانس الکترومغناطیسی زمین از راه اندازه گیری میدانهای الکتریکی و مغناطیسی افقی و عمود بر هم در سطح زمین به کار می رود. با برآورد مقدار امپدانس (که به یک مقاومت ظاهری تبدیل می شود) و تعیین فاز در بسامدهای مختلف، می توان رسانایی الکتریکی را بر حسب تابعی از ژرفا تعیین کرد. امپدانس اندازه گیری شده

در حال حاضر از لحاظ اقتصادی، مخازن زمین گرمایی دما بالا یا متوسط برای تولید انرژی الکتریکی مناسب هستند و مخازن موجود در منطقه مشکین شهر، این شرایط را دارند. در بین روشهای الکتریکی، روش مگنتو تلوریک (MT) نقش مهمی در اکتشاف منابع زمین گرمایی دارد (جدول ۱).

حاصل از برخورد موج تخت به زمین مورد نظر، پاسخ مشابهی با اندازه‌گیریها داشته باشد (Kaufman & Keller, 1981). مدل‌های حاصل از برگردان یک بعدی، چگونگی توزیع مقاومت ویژه الکتریکی را نسبت به ژرفا نشان می‌دهند. تاکنون در مقاله‌ها، مدلسازی یک بعدی و دو بعدی به کار برده شده و به تازگی مطالعات سه بعدی نیز انجام شده است. در مدلسازی دو بعدی، مقاومت ویژه الکتریکی را می‌توان با استفاده از مؤلفه‌های مختلف تانسور امپدانس MT به دست آورد. به طور معمول از تانسور امپدانس Z_{xy} و Z_{yx} در هر بسامد برای به دست آوردن مقاومت ویژه استفاده می‌شود (Ross et al., 1999). اگر بی‌هنجاریها را یک بعدی فرض کنیم، دو مؤلفه تانسور امپدانس الکتریکی ذکر شده برابر هم خواهند شد، در نتیجه برای مدلسازی یک بعدی فقط یک مقدار مقاومت ویژه، و فاز را به عنوان ورودی به برنامه استفاده می‌کنیم و به طور مستقل، مقاطع زمین شناسی بر اساس ویژگی مقاومت ویژه الکتریکی رسم می‌شود.

در هر سونداژ مگنتولوریک، مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب ژرفا به دست می‌آید و در دو بعد دیگر، زمین بینهایت فرض می‌شود. از سوی دیگر، چون با فرض زمین دو بعدی مقادیر متفاوتی برای Z_{yx} و Z_{xy} به دست می‌آید (که در عمل در بیشتر مواقع با توجه به داده‌های صحرائی این فرض درست می‌باشد) فایل ورودی از تانسور امپدانس Z_{yx} و Z_{xy} نیز درصد خطای آنها در هر بسامد تشکیل می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر، در این مطالعه داده‌های مربوط به منطقه مشکین شهر به صورت دو بعدی مدلسازی شده است. به منظور تعیین گسترش بی‌هنجاری زمین گرمایی، افزون بر نیمرخ اصلی چند نیمرخ متقاطع در نظر گرفته شد که در شکل ۲، موقعیت این نیمرخها دیده می‌شود.

تفسیر نیمرخهای به دست آمده از مدلسازی و برگردان دو بعدی

با استفاده از داده‌های اولیه صحرائی، پربندهای مقاومت ویژه ظاهری برای بسامد ۳ هرترز به وسیله سحابی (۱۳۷۹) ارائه شده است. در این پژوهش، در ناحیه کمتر از ۱۰ اهم - متر پنج نیمرخ متقاطع از سونداژها انتخاب و مدلسازی دو بعدی بر روی آنها انجام شد (شکل ۲)، که نتایج حاصل از تفسیر آنها به طور خلاصه ذکر می‌شود.

در این مدلسازی، از روش برگردان دو بعدی Occam توسط (DeGroot-Hedlin & Constable, 1990) استفاده شده است. برای بررسی پاسخ مدل به بی‌هنجاریهای زمین گرمایی، مدلسازی مستقیم بر اساس شکل ۳ با رو لایه‌ای به مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم - متر بر روی زمینه‌ای به مقاومت ویژه ۴۰۰ اهم - متر و بی‌هنجاری زمین گرمایی با مقاومت ویژه ۵ اهم - متر نشان داده شده که پاسخ آن در زیر شکل دیده می‌شود. همان گونه که در پاسخ مدل نشان داده شده، مقاومت ویژه

در محل‌های مختلف رسانایی را بر حسب تابعی از تغییر مکان افقی به دست می‌دهد.

(Wannamaker et al., 1991) برای این کار از مدلسازی با روش اجزای محدود استفاده کردند. نامبردگان ۲۴ سونداژ MT عمود بر دره کالدر در کالیفرنیا را با مدل دو بعدی ارائه کرده و یک پتانسیل زمین گرمایی را در این منطقه تفسیر نمودند.

(Galanopoulos et al., 1998) برای تشخیص منطقه زمین گرمایی سوزاکی در یونان، از اطلاعات زمین گرمایی دو بعدی استفاده کرده و مقاومت ویژه بسیار پایین (۰/۵ تا ۱/۵ اهم - متر) در ژرفای ۰/۵ تا ۱/۵ کیلومتر به دست آوردند که با توجه به زمین شناسی منطقه و دیگر روشهای زمین فیزیکی، ذخایر زمین گرمایی تعیین گردید.

برای بررسی مخازن موجود در منطقه مشکین شهر، سانا با همکاری شرکت (Kingston-Morrison Limited, 1999) اندازه‌گیریهای MT را در قالب ۲۱۲ سونداژ، در این منطقه انجام داده و داده‌های صحرائی به صورت برگردان (Inversion) یک بعدی تفسیر و مقاطع توزیع مقاومت ویژه الکتریکی بر اساس این تفسیرها تهیه شدند. سحابی (۱۳۷۸) تشکیل منابع زمین گرمایی در مشکین شهر را به تفصیل شرح داده است. (Bromly et al., 2000) از برگردان یک بعدی برای تفسیر داده‌های منطقه سبلان استفاده کردند. (Hafizi et al., 2002) با انجام برگردان دو بعدی بر روی داده‌های مگنتولوریک سبلان نشان دادند که تفسیرهای یک بعدی در همه موارد، الزاما منجر به ارائه نتایج درستی نخواهد شد. در این مقاله، نتایج حاصل از مدلسازی و تفسیر دو بعدی نیمرخها به گونه‌ای ارائه خواهد شد که بتوان دیدی سه بعدی از چگونگی گسترش بی‌هنجاری زمین گرمایی در منطقه مورد نظر به دست آورد.

زمین شناسی منطقه مورد مطالعه:

جغرافیای منطقه:

ناحیه مورد بررسی در محدوده جغرافیایی $30^{\circ} 48' - 47^{\circ}$ طول خاوری و $38^{\circ} 38' - 38^{\circ}$ عرض شمالی در استان اردبیل قرار گرفته است. آتشفشان سبلان به بلندی ۴۸۱۴ متر از سطح دریا بلندترین نقطه منطقه و پست‌ترین نقطه به بلندی ۸۰۰ متر از سطح دریا در شمال باختری مشکین شهر قرار گرفته است (شکل ۱). ساختار آتشفشانی سبلان که از نوع مرکزی است در محل برخورد شکستگیهای اصلی و بر روی فرازمین قدیمی بنا شده و در مراحل رشد خود، دهانه آتشفشان ریزشی به قطر ۱۲ کیلومتر به وجود آورده است (Emami & Amini, 1994).

تعیین مدل‌های MT منطقه مشکین شهر

منظور از مدلسازی MT تفکیک لایه‌های زمین بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی و ژرفای آنهاست به گونه‌ای که ویژگیهای الکترومغناطیسی

الکتریکی زیر ۵ اهم - متر به صورت یک نوار عمودی کاربرد روش MT را برای مطالعات زمین‌گرمایی تأیید می‌کند. شرح مدل‌سازی دو بعدی برای هر یک از نیمرخهای پنجگانه A تا E در زیر آمده است.

شرح نیمرخها

نیمرخ A: شکل - ۴، نتایج مدل‌سازی را روی ۱۳ سونداژ ۵۲، ۴۷، ۴۹، ۲۰۰، ۱۹۹، ۷۲، ۷۱، ۱۶۹، ۱۰۰، ۲۱۲، ۱۷۰، ۵۳ و ۱۲۳، نشان می‌دهد که در محل سونداژ ۱۰۰ با نیمرخ B و در محل سونداژ ۷۱ با نیمرخ C و در محل سونداژ ۷۲ با نیمرخ D و در محل سونداژ ۲۰۰ با نیمرخ E برخورد دارد. در محل سونداژ ۴۷، یک ناحیه با مقاومت ویژه پایین در حد ۵ تا ۱۰ اهم متر دیده می‌شود که به دلیل سطحی بودن، مربوط به آبرفتهای سطحی به نظر می‌رسد. در محل سونداژهای ۷۱ و ۷۲، یک منطقه با مقاومت ویژه پایین دیده می‌شود، این منطقه از ژرفای ۲ تا ۴ کیلومتری گسترش یافته و با توجه به چشمه‌های موجود در نزدیکی این سونداژ می‌توان آن را به عنوان یک مخزن زمین‌گرمایی در نظر گرفت. مقاومت ویژه این ناحیه در حدود ۵ تا ۱۰ اهم متر و گسترش آن در امتداد نیمرخ حدود ۴ کیلومتر است.

نیمرخ B: شکل - ۵، نتایج مدل‌سازی دو بعدی را بر روی چهار سونداژ ۸۱، ۱۰۰، ۱۶۷ و ۱۷۸، نشان می‌دهد که در محل سونداژ ۱۰۰ با نیمرخ A مشترک است. در ناحیه بین دو سونداژ ۱۶۷ تا ۱۷۸، مقاومت ویژه در حدود ۱۰ اهم متر مشاهده می‌گردد که مقاومت ویژه پایین است، اما به دلیل سطحی بودن و نیز با توجه به اینکه بی‌هنجاریهای زمین‌گرمایی در ژرفا دیده می‌شوند، نمی‌توان این بی‌هنجاری را به یک منبع زمین‌گرمایی نسبت داد. مقاومت ویژه الکتریکی تا ژرفای ۱/۵ کیلومتری در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر و در ژرفای بیشتر، گستره‌ای از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ اهم متر دیده می‌شود.

نیمرخ C: شکل - ۶، نتایج مدل‌سازی دو بعدی را روی چهار سونداژ ۷۱، ۷۶، ۱۶۸، نشان می‌دهد که در محل سونداژ ۷۱ با نیمرخ A برخورد دارد. مقدار مقاومت ویژه به دست آمده در این منطقه در محل سونداژ ۸۲، حدود ۱۰ اهم متر است. حداقل بین سونداژ ۷۱ تا ۱۶۸، مقاومت ویژه بسیار پایین و در حدود ۱ تا ۵ اهم متر نشان می‌دهد که با توجه به نزدیکی به چشمه آبگرم می‌توان آن را به یک بی‌هنجاری زمین‌گرمایی نسبت داد. طول این نیمرخ در حدود ۴ کیلومتر و فاصله سونداژ ۷۱ تا ۱۶۸ در حدود ۲ کیلومتر است و این بی‌هنجاری زمین‌گرمایی تا ژرفای ۴ کیلومتری ادامه دارد.

نیمرخ D: شکل - ۷، نتایج مدل‌سازی را روی ۵ سونداژ ۵۱، ۷۳، ۷۲، ۸۰ و

۱۱ نشان می‌دهد که در محل سونداژ ۷۲ با نیمرخ A برخورد دارد. محل سونداژهای ۸۰ و ۱۱، یک ناحیه با مقاومت ویژه بسیار پایین در حدود ۵ اهم متر در ژرفای ۳ تا ۸ کیلومتری دیده می‌شود. بین سونداژهای ۷۳ تا ۸۰، یک ناحیه با مقاومت ویژه ۸ تا ۱۰ اهم متر دیده می‌شود. فاصله نیمرخ بین سونداژ ۷۳ تا ۱۱ را با توجه به ژرفای ناحیه هادی و نزدیکی به چشمه آبگرم، می‌توان به بی‌هنجاری زمین‌گرمایی نسبت داد.

نیمرخ E: شکل - ۸، نتایج مدل‌سازی را روی پنج سونداژ ۴۸، ۲۰۰، ۸، ۱۷۹ و ۱۹۷، نشان می‌دهد که در محل سونداژ ۲۰۰ با نیمرخ A مشترک است. در محل سونداژ ۱۹۷، از سطح تا ژرفای ۸۰۰ متر، یک منطقه با مقاومت ویژه الکتریکی پایین دیده می‌شود که به دلیل سطحی بودن آن در محل سونداژ ۱۹۷، مربوط به هاله زمین‌گرمایی نیست. در بین سونداژهای ۲۰۰ و ۸، یک ناحیه با مقاومت ویژه ۳۰ تا ۱۰۰ اهم متر دیده می‌شود که نسبت به اطراف مقاومت ویژه کمتری دارد ولی از نظر زمین‌گرمایی، امید بخش نیست. سقف مخزن زمین‌گرمایی با توجه به نیمرخهای A، C و D، در شکل ۹ نشان داده شده که از ۲۰۰ متر تا ۵ کیلومتری متغیر است.

نتیجه‌گیری

۱- بی‌هنجاریهای زمین‌گرمایی در مشکین شهر که به عنوان مخزن انرژی زمین‌گرمایی شناخته می‌شوند، مقاومت ویژه پایین و در حدود ۵ اهم - متر نشان می‌دهند.

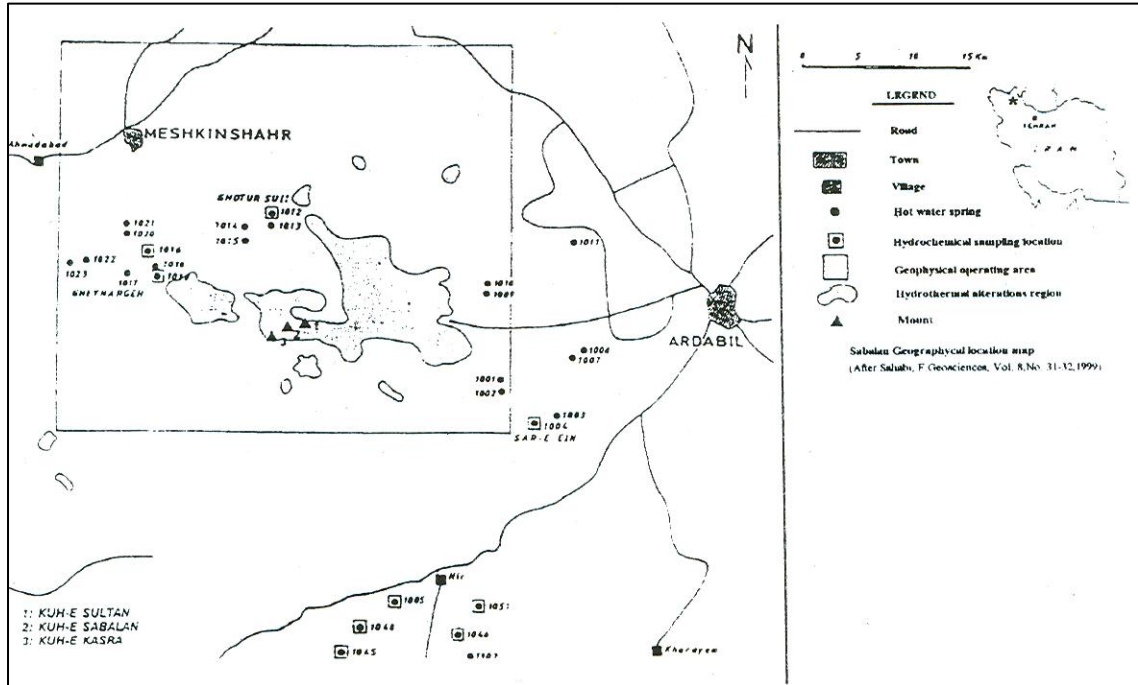
۲- نیمرخهای A و C و D ناحیه‌ای مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۵ اهم - متر را نشان می‌دهد که حاکی از منبع زمین‌گرمایی است.

۳- با برگردان دو بعدی نیمرخها، و ترکیب آنها، مخزن زمین‌گرمایی به صورت سه بعدی تجسم می‌شود.

۴- مخزن زمین‌گرمایی در منطقه مشکین شهر از ژرفای حدود ۲۰۰ متری تا عمق حدود ۵ کیلومتری برآورد می‌شود.

تشکر و قدردانی

بخشی از این پژوهش با استفاده از اعتبار ویژه شماره ۶۵۲/۶/۸۷۴ معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران با عنوان «مدل‌سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف منابع زمین‌گرمایی» انجام شده است که بدین وسیله مراتب قدردانی خود را از معاونت پژوهشی اعلام می‌دارد. از مسئولان محترم سانا مخصوصاً آقایان مهندس موسوی آرا قایم مقام محترم معاونت وزیر نیرو در امور انرژی، مهندس طالبی کارشناس محترم ژئوترمال جهت در اختیار قرار دادن داده‌ها تشکر می‌نماید.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه مشکین شهر (سحابی، ۱۳۷۹).

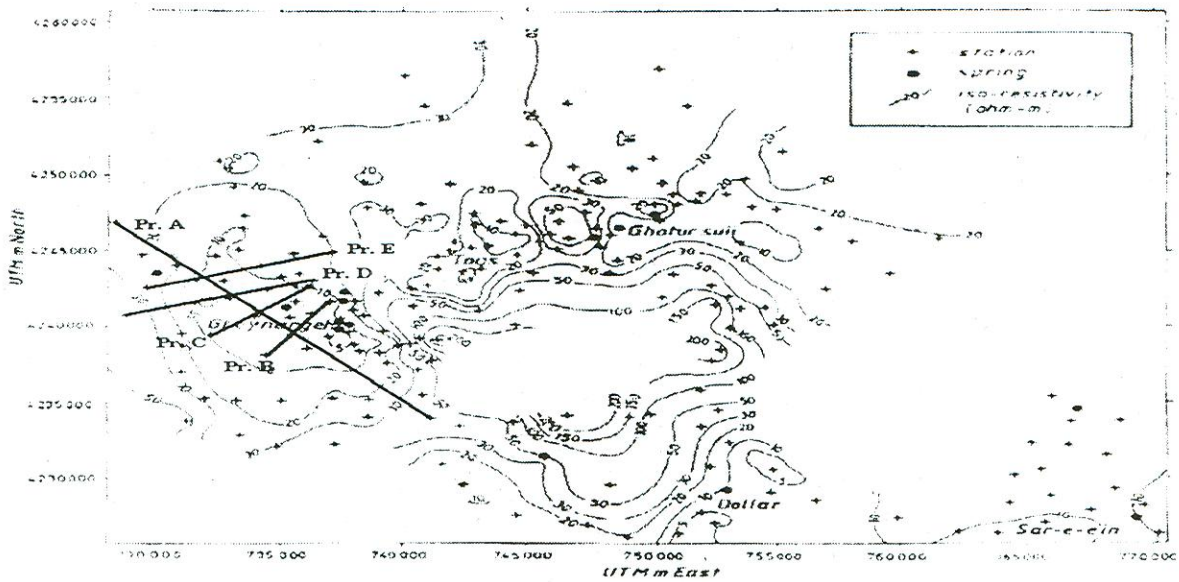
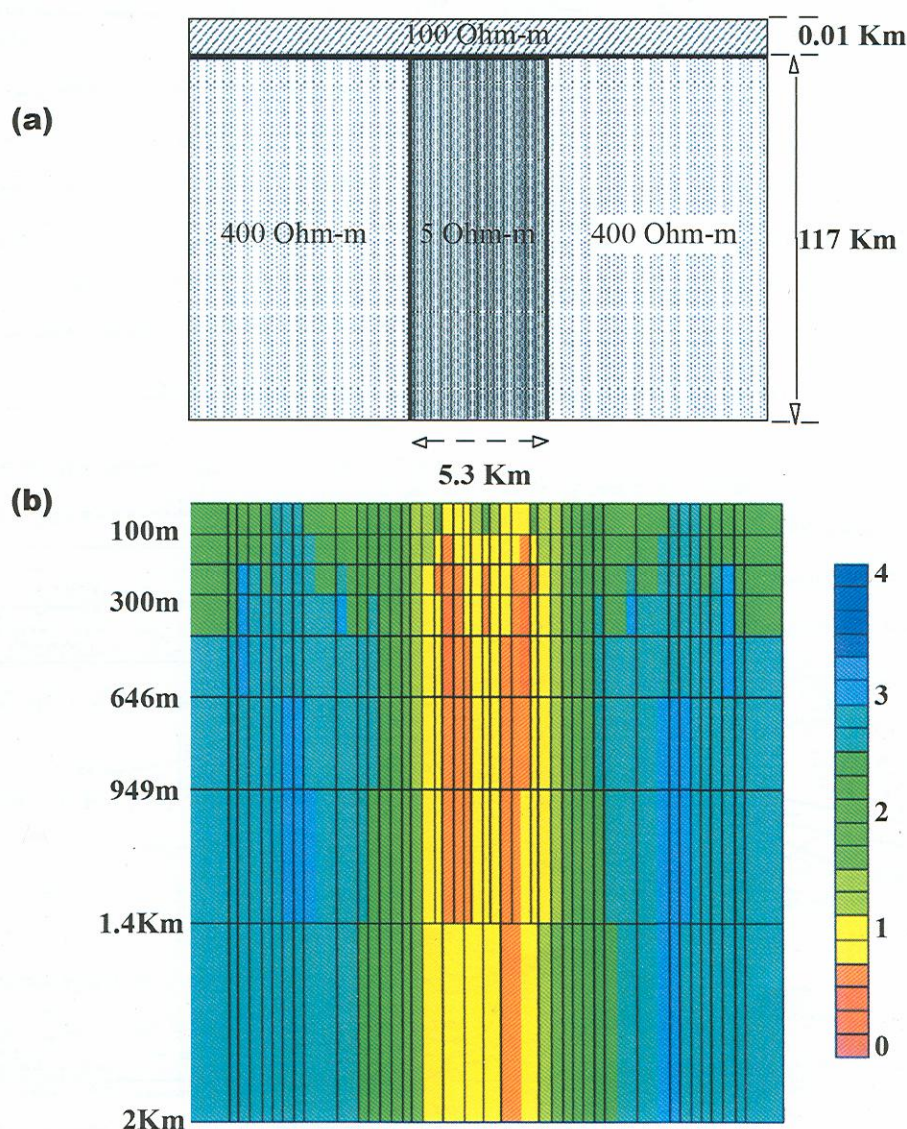


Fig. 2. Map of stations and profiles with resistivity contours of 3 Hz MT (After Sahabi, 1379)

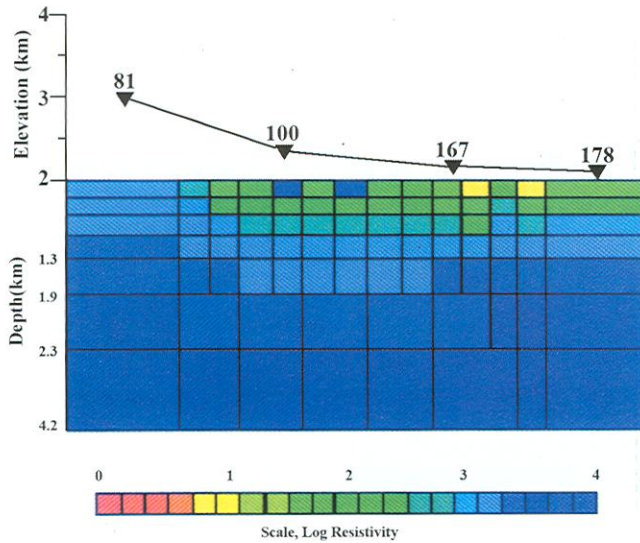
شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های مگنتوتلوریک و نیمرخ‌های مربوطه به همراه پربندهای مقاومت ویژه بسامد ۳ هرتز در منطقه مشکین شهر (سحابی، ۱۳۷۹)

جدول ۱ - کاربرد روشهای الکتریکی در اکتشاف زمین گرمایی (Yungul, 1996)

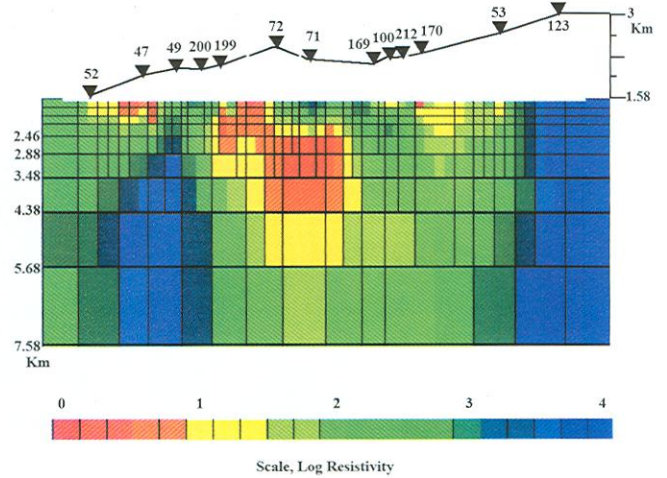
مقاومت ویژه.....	شوراب بسیار گرم، هواز دگی، گسلها
قطبش القایی.....	هواز دگی، کانی سازی
مگنتوتلوریک عددی بسامد شنوایی و الکترومغناطیس با منبع کنترل شده.....	شوراب بسیار گرم، هواز دگی، گسلها
مگنتوتلوریک / مگنتوتلوریک بسامد شنوایی.....	شوراب بسیار گرم، محفظه ماگما، ذوب جزیی، ساختار سنگ
پتانسیل خودزا.....	جریان سیال و گرما
تلوریک.....	شوراب بسیار گرم، هواز دگی، گسلها



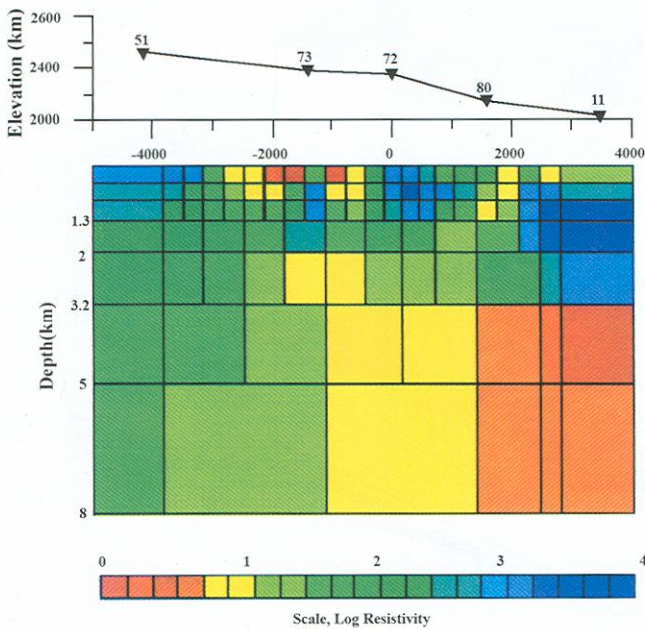
شکل ۳- مدل سازی مستقیم (Forward). بالا: مدل ارائه شده برای برگردان. رولایه ۱۰۰ اهم- متر بر روی نیم فضای ۴۰۰ اهم- متر که در آن مقاومت ویژه ۵ اهم- متر مربوط به بی هنجاری زمین گرمایی به سببرای ۵/۳ کیلومتر منظور شده است. پایین: پاسخ حاصل شده از مدل بالا پس از مدل سازی مستقیم. هاله زمین گرمایی با مقاومت ویژه حدود ۵ اهم- متر دیده می شود و کاربرد روش مگنتوتلوریک را تأیید می کند. مقیاس جانبی مقادیر لگاریتمی را نشان می دهد.



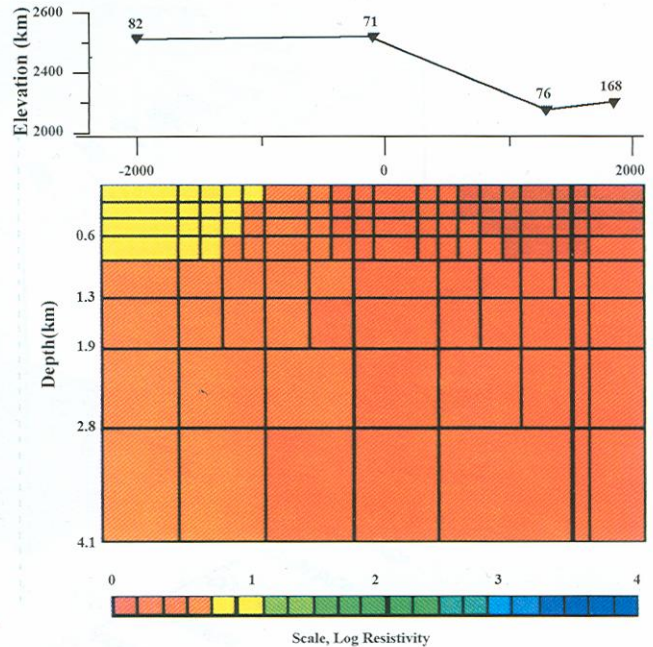
شکل ۵- برگردان دو بعدی چهار سونداژ تشکیل دهنده نیمرخ B که در بالای توپوگرافی نیمرخ و در پایین هیچ گونه بی‌هنجاری زمین گرمایی دیده نمی‌شود.



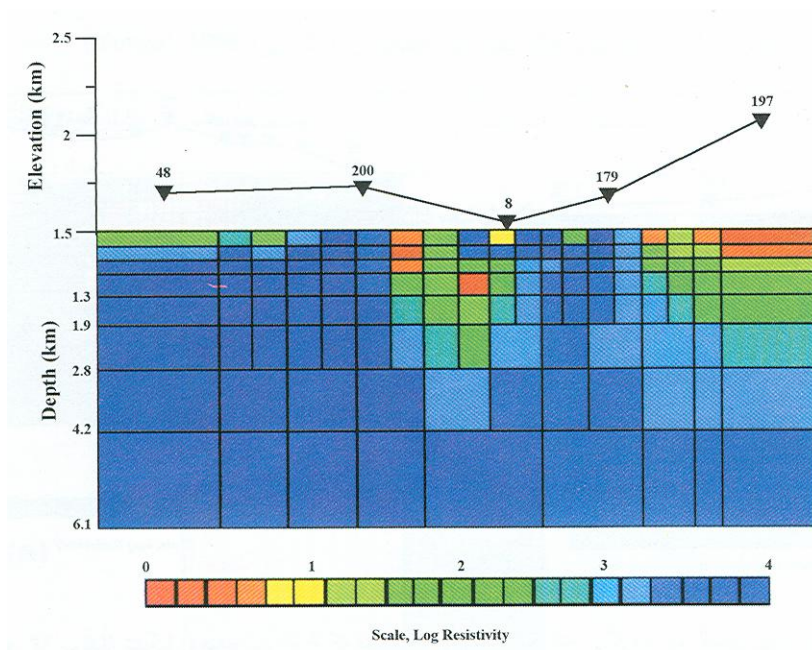
شکل ۴- برگردان دو بعدی ۱۳ سونداژ تشکیل دهنده نیمرخ A که قسمت بالای توپوگرافی نیمرخ و قسمت پایین محل هاله زمین گرمایی در زیر سونداژ ۷۱ و در ژرفای ۲/۵ تا ۴/۵ کیلومتری با مقاومت ویژه الکتریکی زیر ۵ اهم- متر دیده می‌شود.



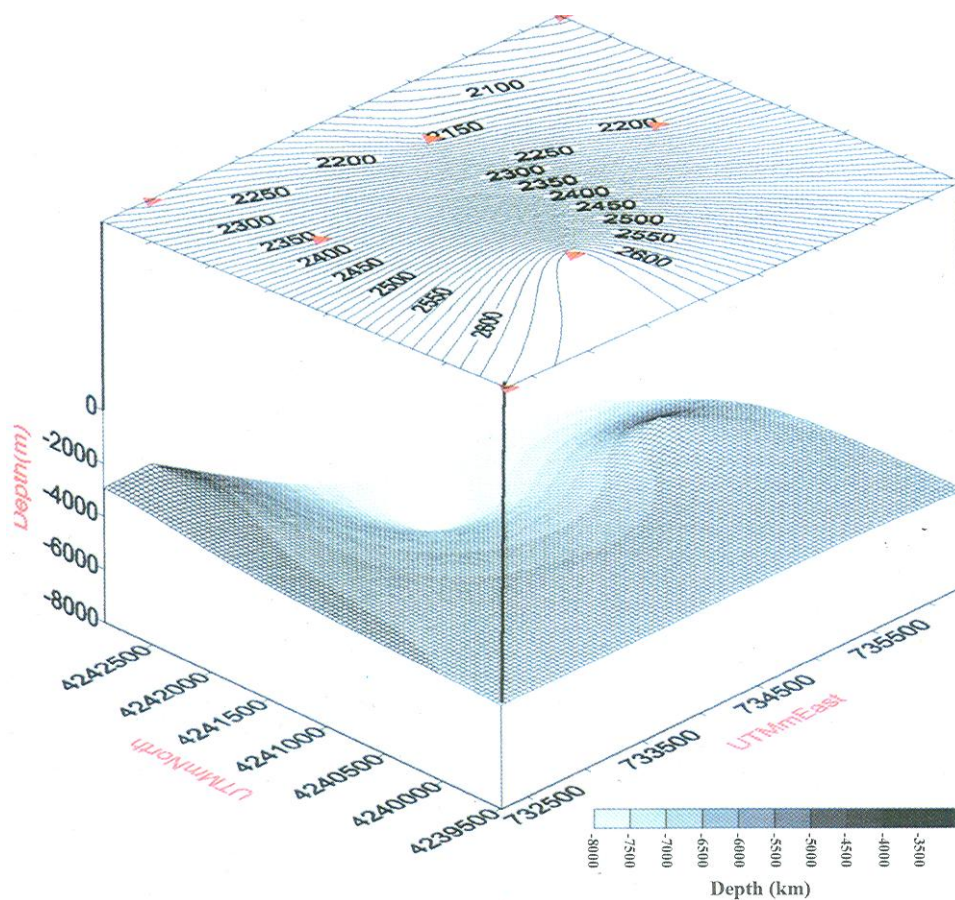
شکل ۷- برگردان دو بعدی حاصل از ۵ سونداژ تشکیل دهنده نیمرخ D که در بالا توپوگرافی و در پایین در محل سونداژ ۱۱ بی‌هنجاری زمین گرمایی حدود ۵ اهم- متر دیده می‌شود.



شکل ۶- برگردان دو بعدی حاصل از ۴ سونداژ تشکیل دهنده نیمرخ C که در قسمت بالا توپوگرافی و در قسمت پایین در محل سونداژهای ۷۱ تا ۱۶۸ بی‌هنجاری زمین گرمایی با مقاومت ویژه حدود ۵ اهم- متر دیده می‌شود.



شکل ۸- برگردان دو بعدی حاصل از ۵ سونداژ تشکیل دهنده نیمرخ E که در آن بی هنجاری زمین گرمایی دیده نمی شود.



شکل ۹- وضعیت ۳ بعدی بخش بالایی مخزن زمین گرمایی در منطقه مشکین شهر (پایین) و موقعیت ایستگاههای دارای پتانسیل زمین گرمایی (بالا).

کتابنگاری

سحابی، ف.، ۱۳۷۸- بررسی آتشفشان سبلان با توجه خاص بر روند تشکیل منابع زمین گرمایی مشکین شهر- استان اردبیل مجله علوم زمین جلد ۸ شماره ۳۱ و ۳۲.

References

- Bromly, C., Khosravi, K. & Talebi, B., 2000- Geophysical Exploration of Sabalan Geothermal Prospects in Iran, Proceedings of the world Geothermal Congress, Japan.
- DeGroot-Hedlin, C. & Constable, S., 1990- Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-dimensional Models from Magnetotelluric Data, Geophysics, Vol. 55, No. 12.
- Emami, M. H. & Amini, B., 1994- 1:100000 Geological map of Iran, sheet 5566 (Meshkinshahr), Geological Survey of Iran.
- Galanopoulos, D., E. Lagios, Dawes, G.J.K., Hobbs, B.A., 1998- Geoelectric Structure of Sousaki Geothermal Area (Greece) deduced from Two Dimensional Magnetotelluric Studies, Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 1, No. 4, pp. 60-74.
- Hafizi, M. K., Aiobi, M., Rahimi, A., 2002- Combination of 2D and 1D inversion for 2.5D interpretation of Magnetotelluric Geothermal Sites, EAGE 64th Conference, Florence, Italy.
- Kaufman, A. A. & Keller, G.V., 1981- The Magnetotelluric Sounding Method, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kingston-Morrison Limited, Renewable Energy Organization of Iran, SUNA, 1999- Sabalan Geothermal Project, Stage 1- Surface Exploration, Vol. 4, MT Resistivity Layered Models.
- Ross, W., Groom, W. & Baily, C., Decomposition of Magnetotelluric impedance Tensor in the presence of 3-D galvanic distortion.
- Wannamaker, P.E., Wright, P.M., Zi-Xing, Z. et al., 1991- Magnetotelluric transect of Long Vally caldera-resistivity cross-section, structural implications, and the limits of a 2-D analysis. Geophysics, 56, 926-940.
- Wright P. M., Ward S. H., Ross H. P., West R. C., State-of-art geophysical exploration for geothermal resources., Geophysics., Vol. 50., No. 12., 2666-2699.
- Yungul, S. H., 1996- Electrical Methods in Geophysical Exploration of Deep Sedimentary Basins, Chapman & Hall.

*Institute of Geophysics, Tehran University.

**Dept. of Geophysics, Iranian National Oil Co.

*مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

**شرکت ملی نفت ایران، بخش ژئوفیزیک