

# بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی میدان زمین گرمایی سبلان با استفاده همزمان از داده‌های مگنتوتلوریک و الکترومغناطیسی حوزه زمان

غلامعباس فنائی خیرآباد<sup>۱</sup> و بهروز اسکویی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۹

## چکیده

انرژی زمین گرمایی منبع پاک و طبیعی برای تولید الکتریسته و دیگر مصارف صنعتی است. آتشفشان سبلان در استان اردبیل و در شمال باختری ایران واقع شده است. در سال ۱۹۹۸ به عنوان اولین اولویت اکتشاف انرژی زمین گرمایی در ایران، برداشت داده‌های مگنتوتلوریک و داده‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان در منطقه سبلان، در ۲۱۲ سایت انجام شده است. برداشت داده‌های مگنتوتلوریک در بازه بسامدی ۱-۸۱۹۲ هرتز در مجاورت محل برداشت داده‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان انجام گرفته است. مشکل عمده‌ای که به سبب توزیع بی‌هنجاری‌های سطحی موجب شیفت مقادیر مقاومت ویژه (بدون تغییر فاز) می‌شود با عنوان اثر استاتیک شیفت مطرح است که در این مطالعه از داده‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان برای حذف این اثرات استفاده شده است. هر دو مد داده‌های مگنتوتلوریک به وسیله انطباق با منحنی مربوط به تغییر مقاومت ویژه حوزه زمان (به ویژه در بسامدهای بالا) مورد تصحیح اثر استاتیک شیفت قرار گرفت. مدل‌سازی یک و دوبعدی بر روی داده‌های تصحیح شده با استفاده از نرم‌افزار WinGlink انجام شده است. از آنجا که ابعاد واقعی مخازن زمین گرمایی از نظر تغییرات مقاومت ویژه سه بعدی است، انجام مدل‌سازی یک‌بعدی به تنهایی تقریب صحیحی نیست. اما نتایج مدل‌سازی دوبعدی با تعیین و مطالعه دقیق استراتیک در منطقه تا حد زیادی معتبر است. در این مقاله به منظور دستیابی به موقعیت منبع حرارتی و نحوه توزیع مقاومت ویژه در منطقه، تعداد سه نمرخ متقاطع با ۵۴ سایت در اطراف آتشفشان سبلان مورد بررسی و مدل‌سازی دوبعدی قرار گرفت. با ترکیب مقاطع دوبعدی به دست آمده از مدل‌سازی، امکان دستیابی بهتر به نحوه توزیع مقاومت ویژه در ژرفا و ارائه یک مدل فرضی دو و نیم (۲/۵) بعدی فراهم شده است. این مدل نشانگر وجود احتمالی مخزن اصلی حرارتی در سمت باختر و جنوب باختر منطقه و تا حد زیادی تأیید کننده نتایج دیگر پژوهش‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی موجود در منطقه است.

**کلیدواژه‌ها:** مقاومت ویژه الکتریکی، مگنتوتلوریک، زمین گرمایی، الکترومغناطیسی حوزه زمان، برگردان دوبعدی، سبلان، ایران.

\*نویسنده مسئول: بهروز اسکویی

E-mail: boskooi@ut.ac.ir

## ۱- مقدمه

زمین ساخت پیچیده قرار گرفته است که متأثر از برخورد صفحات زمین ساختی ایران، اوراسیا و عربی است. منطقه سبلان در جنوب باختر دریای خزر واقع شده است و تنش‌های فشارشی از جهات مختلف در منطقه وجود دارد (Noorollahi et al., 2007). فعالیت‌های آتشفشانی آغاز شده از دوران ائوس تا رسوبات دوران مزوزویک و پالئوزویک دچار دگرگونی‌های حرارتی گسترش یافته‌ای در جهت‌های مختلف در منطقه سبلان است (Emami, 1994). مطالعات زمین‌شناسی توسط (Khosrawi 1996) و (Fotouhi 1995) انجام شده و اطلاعات گسل‌ها و توزیع چشمه‌های آب گرم نیز به طور دقیق در گزارش‌ها آمده است (KML, 1998).

ایستگاه‌های مگنتوتلوریک و موقعیت جغرافیای نمرخ‌های انتخابی A، B و C بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهدات اولیه پی‌جویی در منطقه سبلان، تنها بخشی از بی‌هنجاری‌های مرتبط با سازوکار زمین گرمایی را مشخص کرده است. در ادامه، پیمایش وسیع منطقه به روش مگنتوتلوریک در سال ۱۹۹۸ و مطالعات تکمیلی در سال ۲۰۰۷ با هدف مطالعه ساختارهای ژرف تر منطقه انجام گرفته است. در این مقاله مجموعه داده‌های سال ۱۹۹۸ که شامل دو دسته داده مگنتوتلوریک و الکترومغناطیسی حوزه زمان است، به منظور مطالعه ساختار مقاومت ویژه زیرسطحی و ردیابی موقعیت مخزن زمین گرمایی مرتبط با منبع اصلی حرارتی مدل‌سازی و تفسیر شده است.

## ۳- مدل مفهومی مقاومت ویژه برای یک سامانه زمین گرمایی

انرژی زمین گرمایی همان حرارت طبیعی ذخیره شده در آب و سنگ‌های درون زمین است. در شرایط زمین‌شناسی مطلوب می‌توان انرژی زمین گرمایی را با حفر چاه‌هایی (با ژرفای به طور معمول کمتر از ۳ کیلومتر) در حوزه‌های رسوبی، در امتداد

منابع زمین گرمایی به طور ذاتی مرتبط با آب و حرارت هستند. هدایت الکتریکی کمیت فیزیکی از مواد زیر سطح زمین است که غالباً متأثر از تغییرات دما و میزان آب است. دگرسانی‌های گرمایی در حضور کانی رس، به طور مستقیم یا غیرمستقیم به وسیله تباین ایجاد شده در مقاومت ویژه الکتریکی قابل پی‌جویی هستند. از آنجا که حضور کانی‌های رسی در مجاورت سیال‌های گرمایی دلیل اصلی ایجاد بی‌هنجاری مقاومت ویژه پایین در اکتشافات الکترومغناطیسی هستند، این روش‌ها غالباً به عنوان روش‌های پایه در پی‌جویی منابع زمین گرمایی به کار گرفته می‌شوند (Meju, 2002). به منظور به نقشه در آوردن مخازن زمین گرمایی سبلان، از پردازش دوباره داده‌های مگنتوتلوریک سال ۱۹۹۸ در بازه بسامدی ۱ تا ۸۱۹۲ هرتز استفاده شد که به همراه داده‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان در منطقه برداشت شده است. تعداد ۵۴ ایستگاه مگنتوتلوریک در امتداد سه نمرخ A، B و C پیرامون آتشفشان سبلان، بررسی شد. توزیع سایت‌ها و نمرخ‌های انتخابی بر روی نقشه توپوگرافی منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است.

از آنجا که روش مگنتوتلوریک با مشکل شیفت ایستا در مناطق با توپوگرافی شدید همراه است، روش‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان با چشمه طبیعی برای تصحیح این اثر کارآمد است. در این پژوهش توزیع مقاومت ویژه در پیرامون آتشفشان سبلان با استفاده از دو مجموعه داده الکترومغناطیسی موجود مورد شرح و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- پیشینه مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی منطقه

در سال‌های اخیر، آتشفشان سبلان مورد ارزیابی‌های دقیق سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی قرار گرفته است. از نظر ساختاری، منطقه سبلان در یک ناحیه با

مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده از این داده‌های ثانویه ثبت شده، به عنوان مبنای مقدار مقاومت ویژه در ژرفاهای کم در تصحیحات شیف‌ت ایستا موجود در داده‌های مگنتوتلوریک استفاده می‌شود. چون اساس روش الکترومغناطیس حوزه زمان ثبت میدان‌های ثانویه است، این روش کمتر از بی‌هنجاری‌های سطحی و شرایط توپوگرافی سطح زمین تأثیر می‌پذیرد.

داده‌ها در روش الکترومغناطیس حوزه زمان کیفیت بالایی دارند و به ویژه در ژرفای کم از سطح زمین (۵۰ تا ۵۰۰ متر از سطح زمین) ساختار مقاومت ویژه معتبری را ارائه می‌دهند. در این ژرفای کم روش مگنتوتلوریک به دلیل قدرت کم سیگنال‌های چشمه و نوفه‌های محیطی قادر به تشخیص دقیق ساختارها مانند روش الکترومغناطیس حوزه زمان نیست (Irfan et al., 2010). در این پژوهش تصحیح اثر نامطلوب شیف‌ت ایستا در داده‌های مگنتوتلوریک به خوبی به وسیله داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان انجام شده است.

#### ۵- تصحیح عملی اثر شیف‌ت ایستا با استفاده از داده‌های حوزه زمان

در پی جویی ساختارهای زمین‌شناسی و اکتشاف منابع طبیعی که در آن فواصل ایستگاه‌های برداشت زیاد باشد، با مشکل آشوب‌های گالوانیکی ناشی از تغییرات الگوی جریان الکتریکی بر روی منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری مواجه می‌شویم که در داده‌های مگنتوتلوریک و روش ژئوالکتریک تحت عنوان اثر شیف‌ت استاتیک نامیده می‌شود (Jones, 1988; Sternberg et al., 1988).

اثر شیف‌ت استاتیک غالباً به صورت یک جابه‌جایی قائم در مقادیر مقاومت ویژه ظاهری نمایان می‌شود، در حالی که مقادیر فاز بدون تغییر هستند و در پایان اگر تصحیح نشوند، سبب ایجاد خطاهایی در محاسبه ژرفا و مقاومت ویژه ساختارها می‌شوند (Berdichevsky & Dmitriev, 1976). در این پژوهش حذف اثر شیف‌ت استاتیک پیش از مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک انجام شده است. انجام این تصحیحات در عمل با استفاده از داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان و مقایسه روابط موجود بین ژرفای نفوذ امواج در دو روش به صورت زیر است:

$$\delta = 36 (\rho t)^{1/2} \quad (4)$$

$$\delta = 5.3 (\rho T)^{1/2}$$

که در اینجا  $T$  دوره تناوب بر حسب ثانیه برای داده‌های مگنتوتلوریک و  $t$  زمان تأخیر داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان بر حسب میلی‌ثانیه است. در یک ژرفای نفوذ یکسان برای دو روش فرض می‌شود که زمان تأخیر  $t$  با دوره تناوب  $T$  هم‌عرض است. در شکل ۶ مثالی از کاربرد هم‌زمان این دو روش نشان داده شده است. داده‌های حوزه زمان (مربع‌های مشکی) و داده‌های مگنتوتلوریک در سمت چپ شکل نشان داده شده است. ترکیب این دو دسته از داده‌ها به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود که توسط Meju (1996) و Pellerin & Hohmann (1990) ارائه شده است:

$$T = 3/92 t \quad (5)$$

در این رابطه  $t$  زمان گذار بر حسب ثانیه و  $T$  زمان هم‌عرض آن و معادل دوره تناوب داده‌های مگنتوتلوریک بر حسب ثانیه است. کاربرد عملی این روش در تصحیح اثر شیف‌ت ایستا در داده‌های سبلان انجام و نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مربع‌های سرخ توپر، داده‌های مگنتوتلوریک و مربع‌های خاکستری، داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان هستند.

به طور خلاصه تصحیح شیف‌ت ایستا در عمل به وسیله جابه‌جایی مقادیر مقاومت ویژه حاصل از روش مگنتوتلوریک به مقادیر مقاومت ویژه به دست آمده از داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان در بسامدهای زیاد (ژرفاهای کم) انجام می‌شود. مدل‌سازی یک‌بعدی برای داده‌های تصحیح شده دارای اثر شیف‌ت ایستا برای سایت شماره ۱۷۷ سبلان نیز در شکل ۷ آمده است.

نواحی گسلس منطقه و یا در نواحی حضور چرخه‌های آب زیرزمینی به دست آورد. سامانه‌های زمین‌گرایی به طور کلی از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند (شکل ۳). این سه بخش شامل منبع اصلی حرارتی در ژرفای زیاد، ناحیه گذار حرارتی و ناحیه دارای لایه‌های محافظ پایدار با نفوذپذیری کافی و قابلیت ذخیره آب‌های زیرزمینی است که به عنوان مخزن زمین‌گرایی عمل می‌کند (Meju, 2002). یکی از رایج‌ترین شرایط مربوط به شکل‌گیری مخازن زمین‌گرایی مربوط به زمانی است که ماگما به پوسته بالایی نزدیک می‌شود. منابع زمین‌گرایی ایجاد شده در دیگر شرایط زمین‌شناسی و تعادل ماگما و سیال توسط (Meju, 1996) ارائه و بحث شده است.

#### ۴- مفاهیم تئوری روش‌های مگنتوتلوریک و الکترومغناطیس حوزه زمان

##### ۴-۱. روش مگنتوتلوریک

چشمه سیگنال‌های مگنتوتلوریک همان امواج الکترومغناطیس طبیعی القا شده توسط جریان‌های یونسفر و مگنتوسفر در سطح زمین، هستند. این سیگنال‌ها برای به تصویر کشیدن مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطح زمین به کار گرفته شده‌اند (Vozoff, 1987; Jiracek et al., 1995). به دلیل دور بودن فاصله چشمه سیگنال از سطح زمین، سیگنال‌های مگنتوتلوریک به صورت موج تخت در سطح زمین رفتار می‌کنند (Zhdanov & Keller, 1998).

امواج مگنتوتلوریک شامل مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند که برای ثبت آنها از دو آرایه الکتریکی متعامد در سطح زمین در دو راستای شمال-جنوب ( $E_x$ ) و خاور-باختر ( $E_y$ ) و سه سیم پیچ مغناطیسی (دو سیم پیچ به صورت افقی در سطح زمین ( $H_x, H_y$ ) و یک سیم پیچ در ژرفای ( $H_z$ ) استفاده می‌شود. اساس تمام روش‌های اکتشاف الکترومغناطیسی از جمله روش مگنتوتلوریک، معادلات ماکسول است. به طور عملی ثابت شده است که مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_{xy}, \rho_{yx}$ ) زمین به صورت تابعی از بسامد به صورت زیر از مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی میدان به دست می‌آید:

$$\rho_{xy} = 0.2 T |E_x/H_y|^2 \quad (1)$$

$$\rho_{yx} = 0.2 T |E_y/H_x|^2$$

که دوره  $T$  تناوب سیگنال‌ها،  $E_x$  و  $E_y$  مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی (میلی‌ولت بر کیلومتر) و  $H_x$  و  $H_y$  مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی بر حسب نانو-تسلا هستند. ژرفای نفوذ سیگنال‌های مگنتوتلوریک ( $\delta$ ) یکی از مفاهیم اساسی است که با عنوان ژرفای پوستی مطرح می‌شود و مطابق رابطه زیر قابل برآورد است (Vozoff, 1987):

$$\delta = 5.03 \sqrt{\rho \times T} \quad (2)$$

مفهوم مقاومت ویژه ناورد ( $\rho_{inv}$ ) به صورت میانگین هندسی مقاومت ویژه در دو جهت  $X$  و  $Y$  ساختارهای زیرسطحی تعریف شده است که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\rho_{inv} = \sqrt{\rho_{xy} \times \rho_{yx}} \quad (3)$$

##### ۴-۲. روش الکترومغناطیس حوزه زمان

در این روش برخلاف روش مگنتوتلوریک، از چشمه مصنوعی (فعال) به عنوان فرستنده سیگنال استفاده می‌شود که بر اساس اصول القایی الکترومغناطیسی و بسامد معمولاً زیاد چشمه فرستنده، ساختار مقاومت ویژه زیر سطحی در ژرفای کم قابل تعیین است. ترکیب و آرایش تجهیزات اندازه‌گیری داده‌ها در روش الکترومغناطیس حوزه زمان در شکل ۴ نمایش داده شده است.

زمانی که یک جریان الکتریکی پایدار در کابل‌های پیچیده مربعی شکل برقرار می‌شود در حقیقت یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان تولید می‌شود (شکل ۵). این میدان مغناطیسی متغیر با زمان مطابق قانون القای فارادی ایجاد میدان الکتریکی می‌کند و پس القای ثانویه در ساختارهای زیر سطح زمین و قطع سریع میدان فرستنده که توسط دستگاه گیرنده میدان القایی ثانویه ایجاد شده است، ثبت می‌شود.

## ۶- ساختارهای مقاومت ویژه دوبعدی در ژرفای کم

پس از حذف اثر شیفیت ایستا از تمام داده‌ها، از نرم‌افزار WinGlink برای انجام فرایند مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌ها (Rodi & Mackie, 2001) استفاده شد. مد میانگین هندسی داده‌های مگنتوتلوریک در فرایند مدل‌سازی به کار گرفته شده که نتایج برای سه نیم‌رخ انتخابی در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ آمده است. مدل دوبعدی به دست آمده برای نیم‌رخ A (شکل ۸، پنجره بالایی) نشان‌دهنده یک ساختار رسانای شیب‌دار در سمت جنوب باختر منطقه است که در زیر یک لایه مقاوم سبتر در درون سنگ بستر ۱۰۰ متر قرار گرفته است.

با حرکت از سمت راست به سمت چپ در امتداد نیم‌رخ، لایه رسانا تا حد زیادی گسترش می‌یابد به طوری که دو ساختار با رسانایی به نسبت بالا در زیر سایت‌های شماره ۲۳ و ۸۲ قابل توجه هستند. داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز به همراه پاسخ‌های مدل به دست آمده نیز همپوشانی خوبی داشته‌اند (شکل ۸، پنجره‌های پایین). نقاط تقاطع سه نیم‌رخ به وسیله پیکان‌هایی نشان داده شده است تا امکان تطابق چگونگی گسترش و تغییر مقاومت ویژه در ژرفا، به همراه یک تصور ساده برای موقعیت میدان اصلی حرارتی و مخزن زمین‌گرمایی (مدل ۲/۵ بعدی مفهومی) مهیا شود. تصحیح اثر شیفیت ایستا نشان‌دهنده نبود آشوب‌های گالوانیکی در مدل‌ها (بی‌هنجاری‌های کروی شکل مصنوعی) به دلیل تأثیرات ناشی از تصحیح نشدن شیفیت ایستا پیش از مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک در امتداد نیم‌رخ A بوده است (Fanaee Kheibad et al., 2010).

وارون‌سازی داده‌های نیم‌رخ B نیز مدلی را به دست داده است (شکل ۹، پنجره بالایی) که تغییرات مشخصی در توزیع مقاومت ویژه در طول نیم‌رخ نشان می‌دهد. در یک نیم فضای ۱۰۰ متر (مدل اولیه) دو ساختار رسانا و یک جسم با مقاومت ویژه بالا که در ژرفاهای کم گسترش دارد، قابل تشخیص است. بی‌هنجاری‌های رسانا به طور معمول می‌توانند از دو منشأ سامانه زمین‌گرمایی یا درزه و شکاف‌های پر از سیال گسترش یافته تا سطح، ناشی شود. به احتمال زیاد، بی‌هنجاری رسانای سمت چپ نیم‌رخ مرتبط با ساختار زمین‌گرمایی در منطقه است زیرا سه بخش اساسی لازم برای یک سامانه زمین‌گرمایی (سنگ پوش، مخزن زمین‌گرمایی و منبع حرارتی) به صورت ساختار مقاومت ویژه متفاوت با مقادیر متغیر به صورت بالا-کم - خیلی کم در امتداد نیم‌رخ دیده می‌شوند. مقاومت ویژه ظاهری و فاز به همراه پاسخ مدل نیز تطابق خوبی در امتداد نیم‌رخ دارد (شکل ۹، پنجره‌های پایین).

همچنین برای نیم‌رخ C، مدل‌سازی دوبعدی داده‌ها نتایج جالب توجهی به دلیل تغییرات مقاومت ویژه در امتداد نیم‌رخ به همراه داشته است (شکل ۱۰، پنجره بالایی). دو ساختار رسانای جدا از هم در درون یک سنگ بستر با مقاومت ویژه به نسبت بالا (۱۰۰ متر) وجود دارد که ساختار موجود در نقاط تقاطع نیم‌رخ‌های A و C (سایت ۱۵۴ و سایت ۱۱۲) به دلیل توزیع مقاومت ویژه شبیه به آنچه در نقاط برخورد در شکل‌های ۸ و ۹ است، ارزیابی می‌شود.

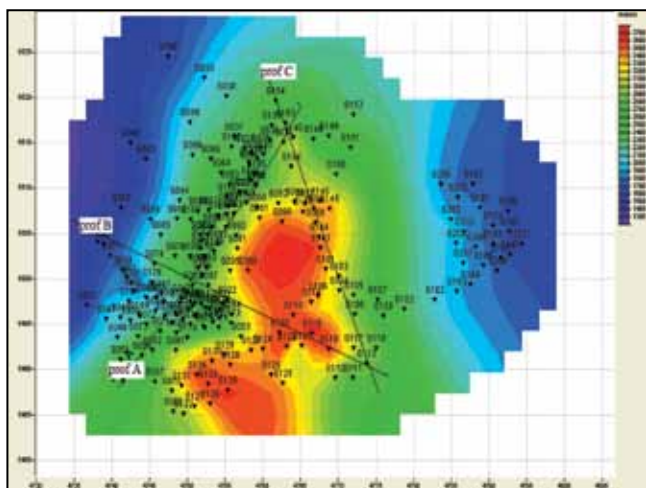
مقاومت ویژه ظاهری و داده‌های تولید شده از پاسخ این مدل برای نیم‌رخ نیز انطباق خوبی داشته است (شکل ۱۰، پنجره‌های پایین). ترکیب نتایج سه مدل‌سازی دوبعدی انجام شده در امتداد نیم‌رخ‌ها نقاط برخوردی در محل سایت‌های ۱۱۲، ۱۵۴ و ۸۳ دارد که می‌تواند بیانگر یک مدل ۲/۵ بعدی برای وضعیت مخزن زمین‌گرمایی در پیرامون آتشفشان سبلان باشد (شکل ۱۱). بی‌هنجاری رسانا در امتداد نیم‌رخ A گسترشی از سمت باختر به جنوب باختر در پیرامون آتشفشان سبلان (دره موئیل) دارد. منطقه شناسایی شده دره موئیل به عنوان نقطه پرامید و هدف در مطالعات بعدی منطقه سبلان بوده است به طوری که یک عملیات اکتشاف مگنتوتلوریک نیز در سال ۲۰۰۷ در این منطقه انجام شده است.

## ۷- نتیجه‌گیری

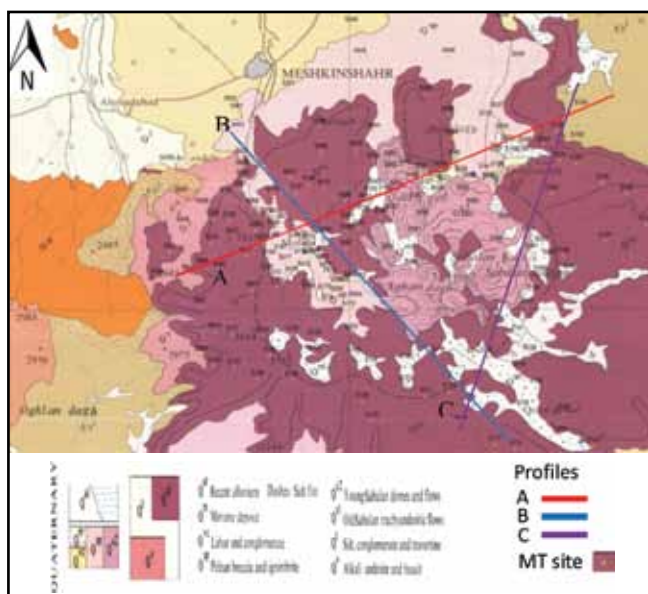
تحلیل و مدل‌سازی داده‌های دو روش مگنتوتلوریک و الکترومغناطیس حوزه زمان به طور هم‌زمان و به منظور کاوش در منطقه زمین‌گرمایی سبلان و مطالعه ساختارهای مقاومت ویژه الکتریکی در ژرفاهای کم به کار گرفته شد. داده‌های حوزه زمان به منظور حذف اثر آشوب‌های گالوانیکی محلی که به صورت شیفیت ایستا در داده‌ها نمایان می‌شود، به کار گرفته شده است. ترکیب مدل‌های دوبعدی به دست آمده گسترش بی‌هنجاری‌های رسانا را به سمت باختر و جنوب باختری نشان می‌دهد که به دلیل وضعیت توپوگرافی و هدایت بارش‌های جوی و آب‌های باران سطحی به این منطقه، به احتمال زیاد نشان‌دهنده یک مخزن زمین‌گرمایی فعال در ژرفاهای کم در منطقه دره موئیل است.

## سپاسگزاری

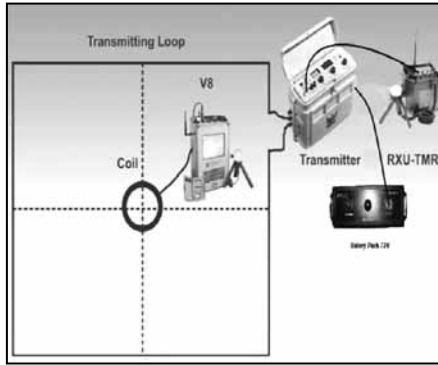
نگارندگان از سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) نیز برای در اختیار قرار دادن مجموعه داده‌های مورد نیاز، سپاسگزاری می‌نمایند.



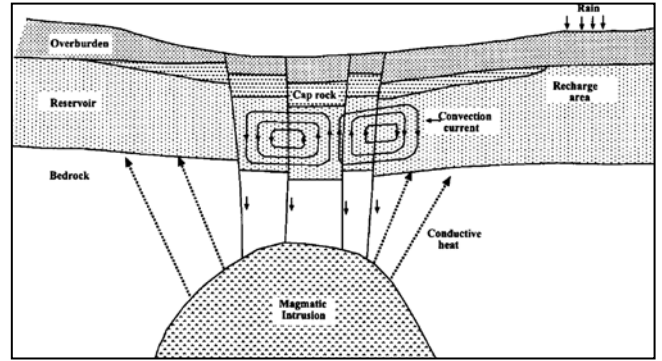
شکل ۱- نقشه توپوگرافی منطقه سبلان دارای ایستگاه‌های برداشت داده‌های مگنتوتلوریک و سه نیم‌رخ انتخابی A، B و C.



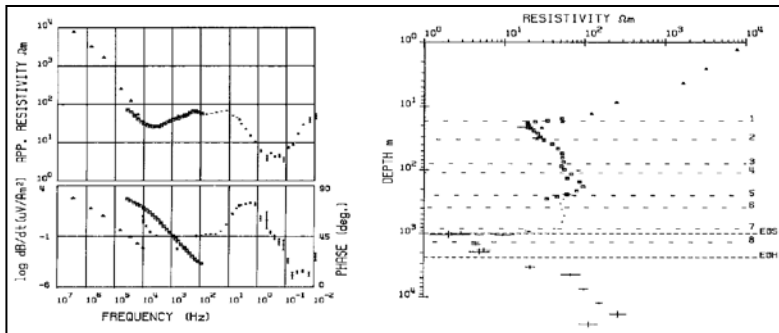
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی به همراه ایستگاه‌های مگنتوتلوریک و نیم‌رخ‌های انتخاب شده در منطقه مورد مطالعه (Amidi, 1978).



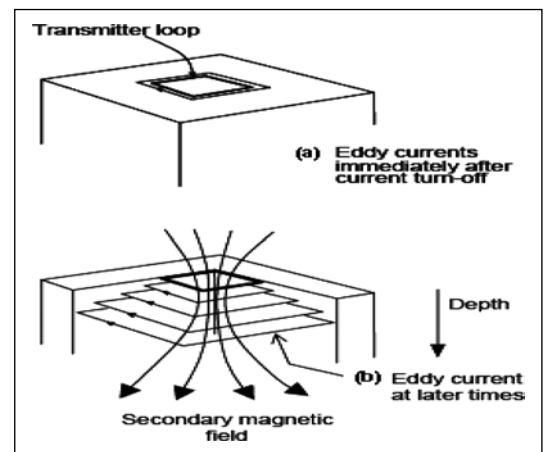
شکل ۴- دستگاه‌های برداشت داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان (Irfan et al., 2010).



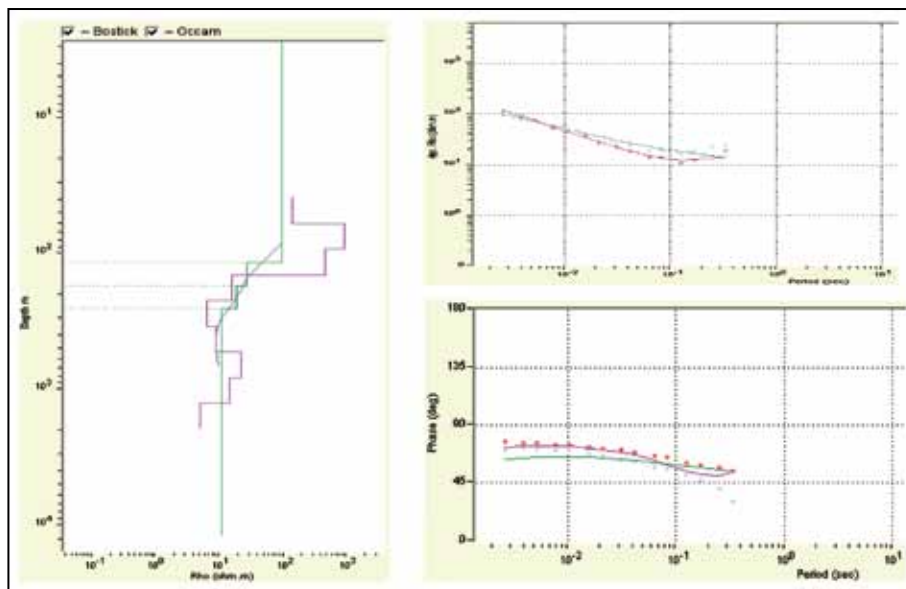
شکل ۳- مدلی از اجزای اصلی یک سامانه زمین‌گرایی ایده آل (Meju, 2002).



شکل ۶- مثالی از ترکیب داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان و داده‌های مگنتوتلوریک. منحنی مقاومت ویژه حاصل از روش مگنتوتلوریک در بسامدهای زیاد به مقدار مقاومت ویژه حاصل از روش الکترومغناطیس حوزه زمان انتقال می‌یابد (Meju, 2002).



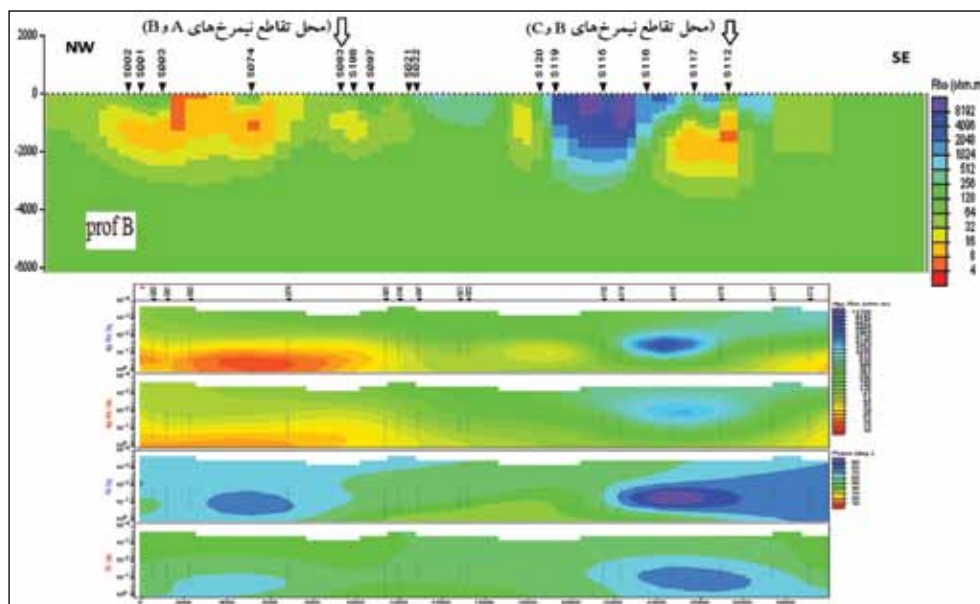
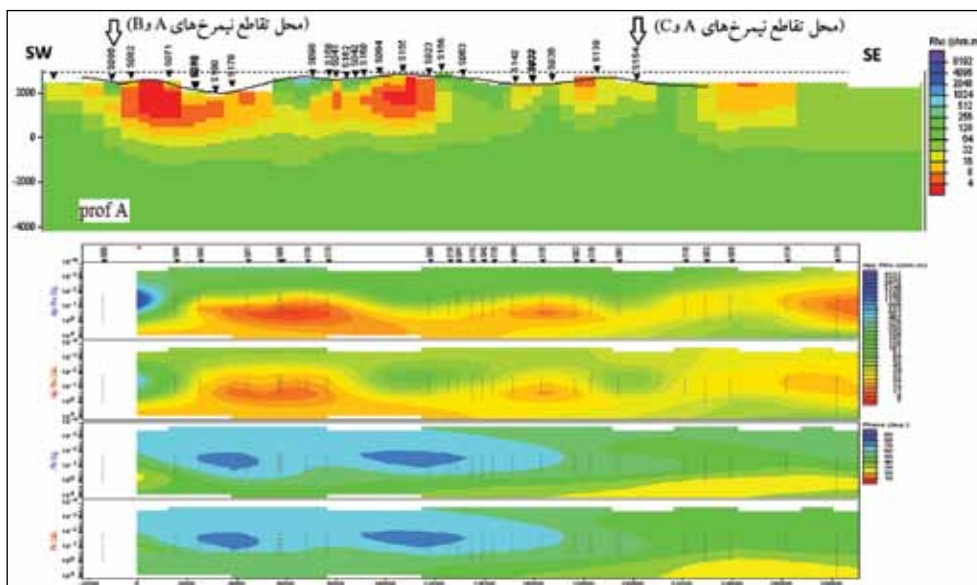
شکل ۵- نحوه انتشار جریان از پیچه فرستنده در ژرفا و ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی ثانویه پس از قطع جریان اولیه (Irfan et al., 2010).



شکل ۷- نتیجه مدل‌سازی یک‌بعدی برای داده‌های مگنتوتلوریک سایت شماره ۱۷۷ که اثر شیفت استاتیک با استفاده از داده‌های الکترومغناطیس حوزه زمان برای آن تصحیح شده است. داده‌های فاز و مقاومت ویژه ظاهری ناوردا (میانگین هندسی مقاومت ویژه در دو امتداد عمود بر هم) به همراه پاسخ مدل (دو شکل سمت راست) آمده است. مدل‌های یک‌بعدی به دست آمده به روش اکام (منحنی صورتی) و روش بوسیتیک (منحنی سبز رنگ) در سمت چپ نشان داده شده است.

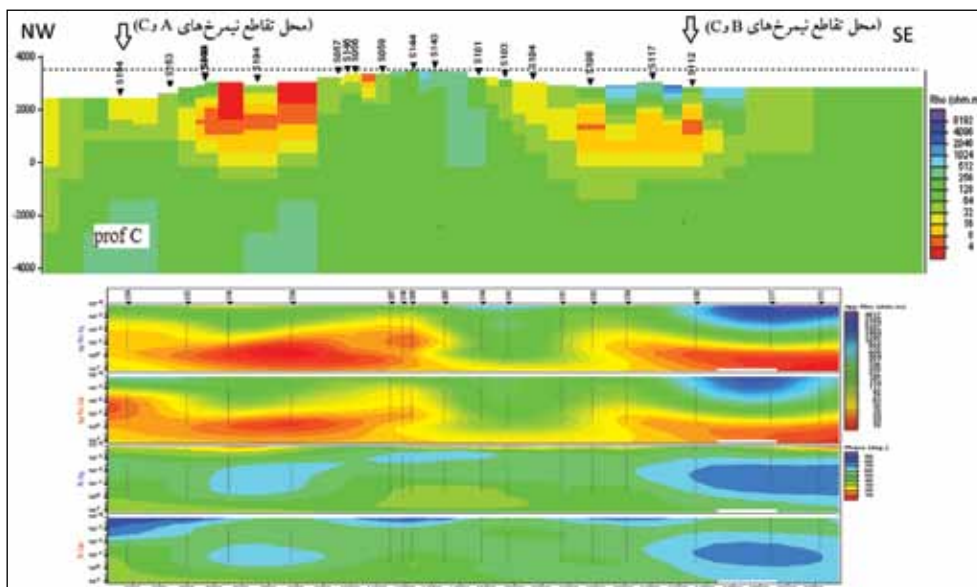


شکل ۸- مدل دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌ها در امتداد نیم‌رخ A (شکل بالا)، داده‌های مقاومت ویژه و فاز به همراه پاسخ مدل به عنوان مقیاس عدم برازش داده‌ها (شکل پایین).

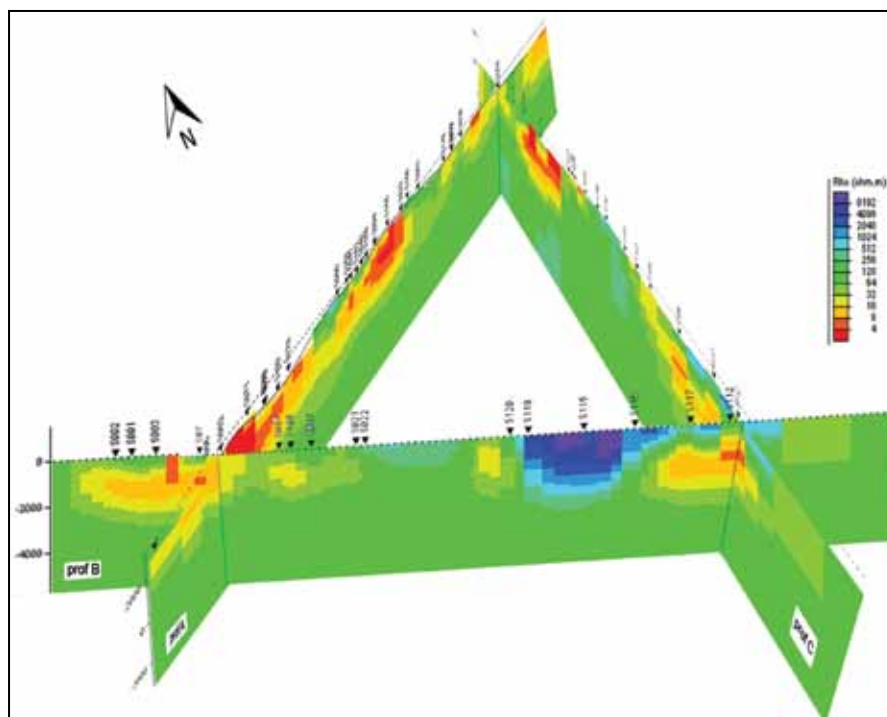


شکل ۹- مدل دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌ها در امتداد نیم‌رخ B (شکل بالا)، داده‌های مقاومت ویژه و فاز به همراه پاسخ مدل به عنوان مقیاس عدم برازش داده‌ها (شکل پایین).

شکل ۱۰- مدل دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌ها در امتداد نیم‌رخ C (شکل بالا)، داده‌های مقاومت ویژه و فاز به همراه پاسخ مدل به عنوان مقیاس عدم برازش داده‌ها (شکل پایین).



شکل ۱۱- مدل نهایی توزیع مقاومت ویژه به صورت دوونیم‌بعدی (۲/۵) حاصل از ترکیب سه مدل دویعدی در امتداد نیمرخ‌های انتخابی.



## References

- Amidi, M., 1978- 1:250,000 Geological quadrangle map of Iran-Ahar. Ministry of Mine and Metals. Geological Survey of Iran.
- Berdichevsky, M. N. & Dmitriev, V. I., 1976- Distortion of magnetic and electric fields by near-surface lateral inhomogeneities. *Acta Geodaet. Geophys. Montanist. Acad. Sci. Hung.* 11, 447-483.
- deGroot-Hedlin, C., 1991- Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion, *Geophysics*, 56, 2102 - 2106.
- Emami, H., 1994 - Meshkinshahr 1; 100, 000 Scale Geological Map. Geological Survey of Iran.
- Fanaee Kheibad, G. A., Oskooi, B., Porkhial, S. and Rahmani, M. R., 2010- Investigation of Sabalan geothermal field structure using Magnetotelluric data, Presented in 14th Geophysics Conference of Iran, Tehran, Iran.
- Fotouhi, M., 1995- Geothermal Development in Sabalan, Iran. *Proceedings, World Geothermal Congress, Italy.*
- Irfan, R., Kamah, Y., Gaffar, E. & Winarso, T., 2010- Magnetotelluric Static Shift Correction Using Time Domain Electromagnetics Case Study: Indonesian Geothermal Rough Fields, *Proceedings World Geothermal Congress Bali, Indonesia*, 25-29
- Jiracek, G. R., Haak, V. & Olse, K. H., 1995- Practical Magnetotellurics in a continental rift environment, in *Continental Rifts: Evolution, Structure and Tectonics*, edited by K.H. Olsen, Elsevier, New York, 103-129.
- Jones, A. G., 1988- Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment: *Geophysics*, 53, 967-978.
- Khosrawi, K., 1996- Geochemistry of geothermal springs in the Sabalan area, Azarbydjan, Iran. *The United Nations University Geothermal Training Program Reports (Iceland)*, 1996 Number 7.
- KML, 1998- Sabalan geothermal project, Stage 1, Surface exploration, final exploration report. Kingston Morrison Limited Co. Report 2505-RPT-GE-003 for the Renewable Energy Organization of Iran (SUNA), Tehran, Iran, 83 pp
- Meju, M. A., 1996- Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: some effective practical considerations, *Geophysics* 61, 56- 65.
- Meju, M.A., 2002- Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges. *Surveys in Geophysics*, 23, 133-205.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. & Tanaka, T., 2007- Geothermal resources exploration and wellsite selection with environmental consideration using GIS in Sabalan Geothermal area, *Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California*, January 22-24, 2
- Pellerin, L. & Hohmann, G. W., 1990- Transient electromagnetic inversion: a remedy for magnetotelluric static shifts, *Geophysics*, 55, 1242-1250.
- Rodi, W. L. and Mackie, R. L., 2001- Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion, *Geophysics*, 66, 174-187, doi:10.1190/1.1444893.
- Sternberg, B. K., Washburne, J. C. & Pellerin, L., 1988- Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings. *Geophysics* 53, 1459-1468.
- Vozoff, K., 1987- The magnetotelluric method, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol. 2: Application, Parts A and B, pp. 641-711, ed. Nabighian, M.N., SEG, Tulsa.
- Zhdanov, M. S. & Keller, G. V., 1998- *The Geoelectrical Method in Geophysical Exploration*, Elsevier Amsterdam, pp. 873.

# Electrical Resistivity Structure of the Sabalan Geothermal System Inferred from Magnetotelluric and TDEM Data

G.A. Fanaee-Kheirabad <sup>1</sup> & B. Oskooi <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. , Department of Mining, Birjand University of Technology, Birjand , Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2010 October 13

Accepted: 2011 May 09

## Abstract

Geothermal energy is playing a large role as an alternative energy source for both electricity generation and space heating. Sabalan is a high temperature geothermal region in Ardabil province northwestern of Iran. In this study the conductivity structure of the top crust (depth lower than 2 kilometers) is examined using data from collected 212 magnetotelluric (MT) and time-domain electromagnetic (TDEM) soundings across the Sabalan volcano in 1998. The MT data collected between 1-8192 Hz is of useful quality and provides good control on the surface layers in majority of sites. The MT data were corrected for static shift effect using TDEM data. The TDEM data and MT data were jointly inverted to yield 1D and 2D models. In practice for geothermal investigation, measured MT data are never entirely 1D and diagonal elements of the impedance tensor are always non-zero. However, in many cases the Earth response is dominated by an overall 2D structure, permitting data analysis within these lower dimensions. In this study, in order to have the best possible interpretation we used two modes MT data in 2D inversion. Static shift correction and inversion approach accomplished by using WinGlink software. We choose three intersect profiles with 54 MT sites along with, to show resistivity distribution around Sabalan and try to predict the main intrusive magma chamber position as the heat source of the system. MT resistivity images confirmed the findings of previous surveys and the reported geological features in the Sabalan field. To have a better view about resistivity distribution, we combine the 2D models at the intersection points to obtain a 2.5D view about the resistivity in the area. The resulting models reveal the extension of the high conductivity anomalies in the western and southwestern parts of the area that most probably is related to the main heat source of the geothermal system at shallow depths.

**Keywords:** Electrical resistivity, Magnetotelluric, Geothermal, TDEM, 2D Inversion, Sabalan, Iran.

For Persian Version see pages 29 to 34

\*Corresponding author: B. Oskooi; E-mail: boskooi@ut.ac.ir