



مدل سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک سبلان با استفاده از روش های کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیر خطی

محمد حسن محمدیان سروندانی^{۱*}، علی نجاتی کلاته^۲، رضا قائد رحمتی^۳ و ابوالقاسم کامکار روحانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار؛ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان

۴- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: mohamadian.sarvandani@gmail.com

واژگان کلیدی

چکیده

هدف اصلی این مطالعه بررسی ساختارهای زیرسطحی شمال غرب منطقه سبلان با استفاده از وارون سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک به روش های کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیرخطی است. برای رسیدن به هدف، ۸ ایستگاه مگنتوتلوریک در طول یک پروفیل در شمال غرب منطقه سبلان انتخاب شدند. تحلیل ابعادی صورت گرفته توسط کد والدیم و نمودارهای قطبی تانسور امپدانس نشان دادند که ساختارهای زیرسطحی ایستگاه های انتخاب شده، در عمق های کم یک بعدی یا دوبعدی و در عمق های میانی و عمیق عموماً سه بعدی هستند. کد والدیم، تیپر و بردارهای القایی برای تعیین امتداد ساختار ژئوالکتریکی بکار رفتند و امتداد ساختار در راستای شمال شرقی-جنوب غربی تشخیص داده شد. از روش میانگین گیری فضایی برای حذف انحرافات گالوانیکی استفاده شد. بعد از تنظیم پارامترهای مدل سازی و مش بندی مناسب، وارون سازی دوبعدی داده ها انجام شد. مدل های دوبعدی به دست آمده به خوبی ساختارهای زمین گرمایی شامل سنگ پوش، مخزن و منبع داغ را نشان دادند. علاوه بر این تطابق خوبی بین این مدل ها و پژوهش های گذشته در منطقه وجود دارد.

مگنتوتلوریک
وارون سازی دوبعدی
روش کمینه مربعات مقید هموار
گرادیان مزدوج غیرخطی
سبلان

۱- مقدمه

C به ترتیب ۲۴۲ و ۱۶۰ درجه سانتی گراد و دمای چاه B بیش از ۲۳۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است (SKM, 2005). نتایج حفاری های صورت گرفته بیانگر این است که سیالات با دمای بالا احتمالاً از قسمت های شرقی یا جنوب شرقی این چاه ها نشأت می گیرند (SKM, 2005).

طالبی و همکاران (۲۰۰۵) با تفسیر مجدد داده های مگنتوتلوریک سال ۱۹۹۸ و نتایج حفاری ها، دو چاه اکتشافی D و E را پیشنهاد کردند. در سال ۲۰۰۶ منطقه از نظر هیدرولوژیکی بررسی شد. با در نظر گرفتن مدل هیدرولوژیکی ارائه شده، در سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ در قسمت های شرقی و جنوب شرقی منطقه ارزیابی های مگنتوتلوریک به منظور پیدا کردن منبع حرارتی و تعیین نقاط حفاری صورت گرفت. نتایج بررسی های مگنتوتلوریک صورت گرفته وجود یک منبع داغ را در قسمت شرقی چاه D پیش بینی می کند. در این پژوهش با در نظر گرفتن تحقیقات قبلی یک پروفیل جهت مشخص کردن ساختارهای سیستم زمین گرمایی منطقه انتخاب شده است. با توجه به این که هریک از روش های وارون سازی مزایا و معایب خاص خود را دارند؛ به منظور تفسیر بهتر از منطقه، دو روش وارون سازی دوبعدی کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیرخطی برای مدل سازی داده ها استفاده شده است.

۲- زمین شناسی و موقعیت منطقه برداشت

منطقه زمین گرمایی سبلان در دامنه غربی تا شمال غربی کوه سبلان، در دره مویل در استان اردبیل واقع شده است (شکل ۱). چشمه های آب گرم فراوانی با ترکیبات شیمیایی SO_4^{2-} و $Cl-SO_4$ در دره مویل یافت می شوند (SKM, 2003). این منطقه شامل مجموعه ای از ولکانیک های جوان است؛ که از دیدگاه زمین گرمایی دارای ارزش مطالعاتی است. مخروط آتشفشانی سبلان از نوع چینه ای است که گدازه های آن سطحی معادل ۱۲۰۰ کیلومتر مربع را اشغال کرده اند. با بررسی سه مقطع عرضی زمین شناسی از منطقه در امتداد های شرقی-غربی، شمال غرب-جنوب شرق و شمال شرق-جنوب غرب چهار واحد اصلی چینه شناسی در منطقه شناسایی شده اند؛ که به ترتیب سن از جدید به قدیم عبارتند از: (۱) رسوبات عهد حاضر، فن و آلوویوم های کوارترنری، (۲) گدازه ها و گنبد های تراکی آندزیت بعد از تشکیل کالدرای پلیوسن، (۳) گدازه ها و گنبد های تراکی داسیت تا تراکی آندزیت همزمان با تشکیل کالدرای پلیوسن و (۴) گدازه های تراکی آندزیت، توف ها و پیروکلاستیک های قبل از تشکیل کالدرای پلیوسن (SKM, 2005). با توجه به اینکه سیالات از طریق شکستگی ها و گسل ها به درون واحدهای سنگی نفوذ می کنند؛ از این رو در منابع زمین گرمایی مطالعات ساختاری نقش مهمی دارد (Ghalehnoee and Ghadimi, 2012). در منطقه سبلان از نظر

به دلیل اینکه منابع زمین گرمایی تغییرات زیادی در مقاومت ویژه زیرسطحی به وجود می آورند؛ اهداف ایده آلی برای روش مگنتوتلوریک هستند (Didana, 2010; Fanaei and Oskooei, 2011). روش مگنتوتلوریک به عنوان یک روش با عمق نفوذ بالا به طور گسترده ای در اکتشافات زمین گرمایی مورد استفاده قرار می گیرد (Wannamaker, 1997; Oskooi et al., 2005; Harinarayana et al., 2006; Heise et al., 2008; Arnason et al., 2010). این روش از طریق اندازه گیری میدان های الکتریکی و مغناطیسی طبیعی متغیر با زمان، اطلاعاتی را درباره مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی فراهم می کند. با توجه به اینکه عمق نفوذ میدان ها به فرکانس آن ها بستگی دارد؛ تقریبی از تغییرات مقاومت ویژه با عمق حاصل می شود (Roberts and Craven, 2012). توزیع مقاومت ویژه حاصل شده، با استفاده از اطلاعات زمین شناسی و جنس سنگ ها تفسیر می شود (Orange, 1989).

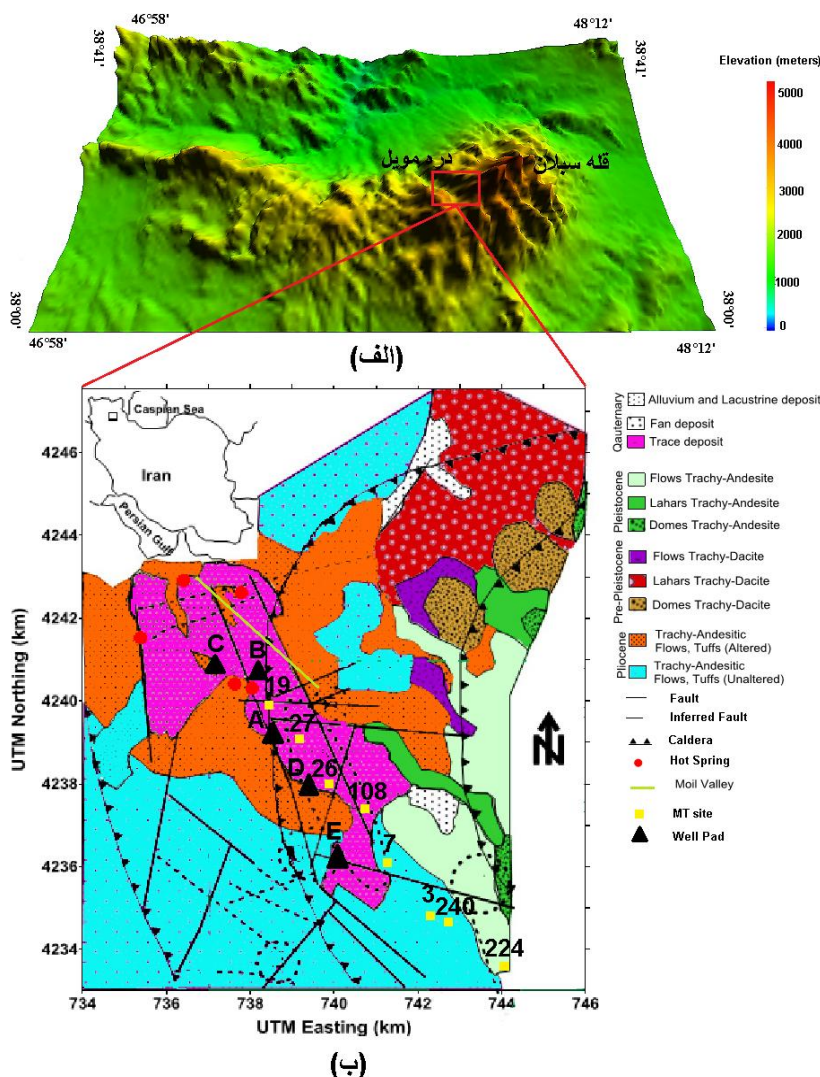
در دهه های اخیر روش های وارون سازی در تفسیر کمی و کیفی داده های مگنتوتلوریک اهمیت زیادی پیدا کرده اند. با استفاده از روش های وارون سازی می توان مدلی از خواص فیزیکی را از داده های ژئوفیزیکی به دست آورد که ساختارهای زیرسطحی را مشخص می کند. روش های وارون سازی دوبعدی به دلیل سرعت بالاتر و قیمت ارزان تر در مقایسه با روش های وارون سازی سه بعدی، هنوز رایج ترین ابزار جهت مدل سازی داده های مگنتوتلوریک هستند (Marti, 2006; Lee et al., 2009). تعداد زیادی روش های وارون سازی دوبعدی وجود دارند؛ که ویژگی های اساسی مدل های مقاومت ویژه را محاسبه می کنند (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Smith and Booker, 1991; Uchida, 1993; Siripunvaraporn and Egbert, 2000, 2007; Rodi and Mackie, 2001; Ogawa, 2002; Lee et al., 2009). در برخی از موارد با استفاده از وارون سازی دوبعدی می توان تفسیر دقیقی از ساختارهای سه بعدی به دست آورد؛ اما عیب وارون سازی دوبعدی این است که در ساختارهای سه بعدی دارای پیچیدگی زیاد، مدل های دوبعدی حاصل شده منطقی و مناسب نیستند (Wannamaker, 1984; Zhang et al., 2014).

از سال ۱۹۹۸ چندین پژوهش شامل زمین شناسی، هیدرولوژی، ژئوشیمیایی و مقاومت ویژه (TEM, MT و DC) در منطقه سبلان صورت گرفته است (KML, 1998; Bromley et al., 2000; EDC, 2008, 2010; Fanaei Kheirabad and Oskooi, 2011; Ghalehnoee and Ghadimi, 2012; Ghaedrahmati et al., 2013b). نمای سه بعدی از تغییرات توپوگرافی و نقشه زمین شناسی منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است. بین سال های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۴ سه چاه عمیق اکتشافی در منطقه سبلان حفاری شد؛ که در شکل ۱ به صورت A، B و C نشان داده شده است. دمای چاه های اکتشافی A و

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۲، ۱۳۹۴.

ساختمانی اصلی منطقه دارای روند غربی-شمال غربی است (Fanaee Kheirabad and Oskooi, 2011).

زمین‌شناسی ساختمانی، دو بخش عمده وجود دارد که عبارت‌اند از: مجموعه‌ای از گسل‌های خطی و چندین گسل حلقه‌ای. زون



شکل ۱: (الف) نمایش تغییرات توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه. (ب) نقشه زمین‌شناسی شمال غرب منطقه زمین‌گرایی سبلان. ایستگاه‌های اندازه‌گیری با علامت مربع توپر زرد رنگ و شماره ایستگاه و موقعیت چاه‌های اکتشافی با حروف لاتین و علامت مثلث توپر مشکی نشان داده شده است (Ghaedrahmati et al., 2013a).

۳- برداشت داده‌ها

راستای شمالی- جنوبی و الکترودهای E_Y و کوپل‌های H_Y در راستای شرقی- غربی قرار گرفتند.

۴- پردازش داده‌ها

داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از نرم‌افزار SSMT2000 ساخت شرکت Phoenix پردازش شدند و داده‌های پردازش‌شده به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز برحسب فرکانس به دست آمده است. محاسبه مقاومت ویژه ظاهری و فاز در محدوده فرکانسی ۰/۰۰۱۱-۳۲۰ هرتز صورت گرفته است. در شکل ۲ منحنی‌های مقاومت ویژه و

در این پژوهش ۸ ایستگاه از میان ۷۸ ایستگاه برداشت‌شده توسط شرکت Energy Development Corporation (EDC) (2008,) در طول یک پروفیل استفاده می‌شود. محل قرارگیری ایستگاه‌های انتخاب شده در شکل ۱ نشان داده شده است. برداشت داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از دستگاه MTU-5A ساخته شده توسط شرکت Phoenix انجام شده است (Ghaedrahmati et al., 2013b). در هر ایستگاه دو مؤلفه افقی میدان الکتریکی E_X و E_Y ، دو مؤلفه قائم میدان مغناطیسی H_X و H_Y و یک مؤلفه قائم میدان مغناطیسی H_Z ثبت شده‌اند. الکترودهای E_X و کوپل‌های H_X در

تعیین امتداد ساختار روش والدیم وجود دارد؛ تیپر و بردارهای القایی برای رفع این ابهام به کار رفتند. تیپر و بردارهای القایی کل ایستگاه ها در ۴ محدوده فرکانسی در شکل ۳ نشان داده شده اند. تیپر و بردارهای القایی روند شمال شرقی-جنوب غربی را تأیید کردند؛ که با پژوهش های قبلی مطابقت دارد. در هر ایستگاه مؤلفه xy منطبق بر مد TE (مد الکتریکی عرضی) و مؤلفه yx منطبق با مد TM (مد مغناطیسی عرضی) است.

۶- تصحیح جابجایی ایستا

انحرافات در روش مگنتوتلوریک به وسیله ناهمگنی های سطحی که خیلی کوچک تر از هدف مورد بررسی هستند؛ به وجود می آیند. این ناهمگنی ها با به وجود آوردن توزیع بار و جریان های القایی، اندازه گیری های مگنتوتلوریک را در مقیاس مورد مطالعه یا مقیاس منطقه ای تغییر می دهند. جریان های القایی انحرافات القایی را به وجود می آورند. انحرافات القایی اندازه کوچکی دارند و عموماً نادیده گرفته می شوند. توزیع بار جمع شده روی ناهمگنی های سطحی انحرافات گالوانیکی را سبب می شوند. انحرافات گالوانیکی یک تغییر مکان ثابت مقاومت ویژه را در طول همه فرکانس ها به وجود می آورند. به همین دلیل انحرافات گالوانیکی معروف به جابجایی ایستا هستند (Marti, 2006; Naidu, 2012). با توجه به اینکه اهداف اکتشافی در روش مگنتوتلوریک عموماً ساختارهای منطقه ای هستند؛ از روش فیلترینگ فضایی برای حذف اثرات انحراف گالوانیکی استفاده شد (Sternberg et al., 2010; Moradzadeh, 1998). در این روش میانگین مقاومت ویژه هر ایستگاه و میانگین مقاومت ویژه ایستگاه های مجاور آن محاسبه می شود. سپس منحنی مقاومت ویژه هر ایستگاه به اندازه اختلاف میان این دو میانگین به سمت بالا یا پایین جابجا می شود.

۷- وارون سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک

وارون سازی دوبعدی داده های مد TE ، TM و $TE+TM$ با استفاده از روش های کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیرخطی انجام شد. اگرچه در برخی منابع، از مدل های حاصل از وارون سازی دوبعدی مد $TE+TM$ جهت تفسیر داده های مگنتوتلوریک استفاده می شود (Oskooi et al., 2007; Fanaee Kheirabad and Oskooi, 2011)؛ با این وجود برخی دیگر از مد TM به دلیل برازش بهتر به ساختارهای سه بعدی استفاده می کنند (Wannamaker et al., 1984; Boerner et al., 1999; Uchida et al., 2002; Ghaedrahmati et al., 2013a). در این پژوهش با توجه به اینکه ساختارهای زیرسطحی در عمق اهداف منطقه عموماً سه بعدی هستند؛ تنها وارون سازی مد TM نشان داده شده و تفسیر می شود.

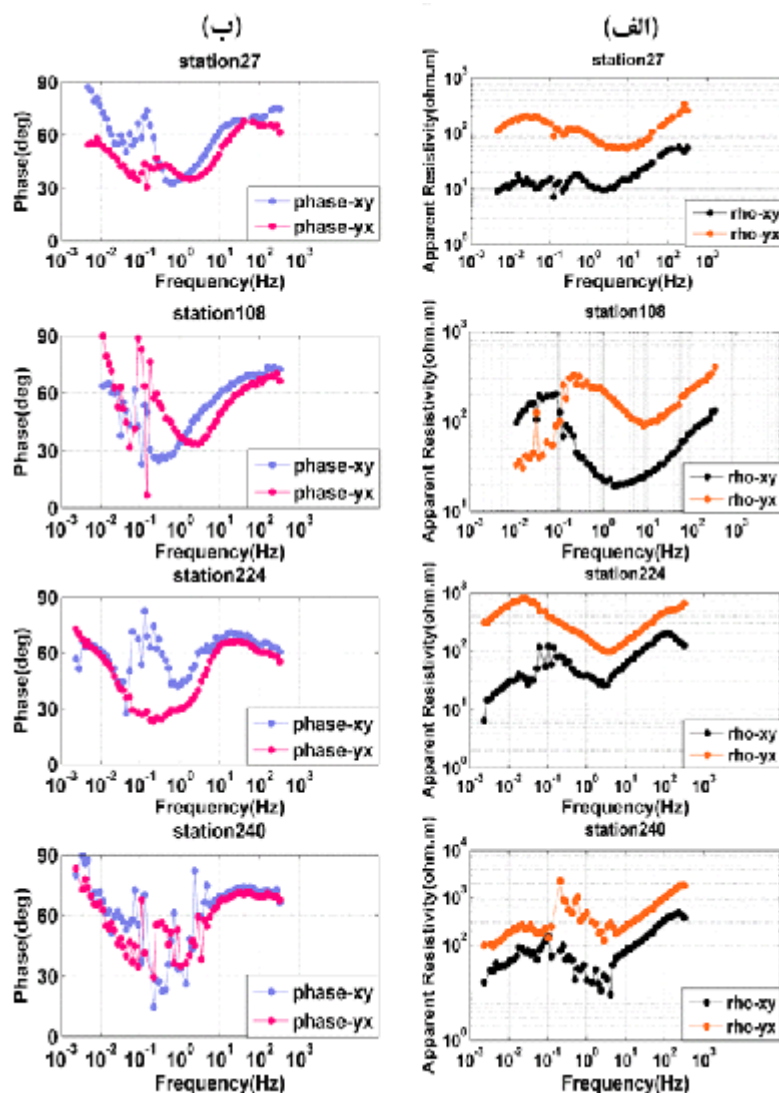
فاز مشاهده ای ۴ ایستگاه نشان داده شده است. شکل عمومی منحنی ها برای هر دو حالت xy و yx هموار و پیوسته است و لذا کیفیت داده ها برای وارون سازی مناسب است (Ghaedrahmati et al., 2013b). منحنی های مقاومت ویژه ایستگاه ها، اختلاف رسانایی احتمالی را در محل های مختلف نشان می دهند. داده های نویزی بعضی از فرکانس ها در هنگام وارون سازی حذف شدند.

۵- تعیین بعد و تعیین امتداد ساختارهای شناسایی شده

توزیع فضایی رسانایی الکتریکی ساختارهای زیرسطحی به عنوان بعد ژئوالکتریکی شناخته می شود؛ که می تواند به صورت ساختارهای یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی دسته بندی شود. تعیین بعد داده های مگنتوتلوریک ابزار قدرتمندی است که از طریق آن می توان با توجه به بعد ساختارها وارون سازی یک بعدی، دوبعدی و یا سه بعدی را انتخاب کرد. علاوه بر این بعضی از روش های تعیین ابعادی مشخص می کنند که داده های مگنتوتلوریک تحت تأثیر ناهمگنی های سطحی قرار گرفته اند یا خیر. به منظور تعیین بعد ساختارهای زیرسطحی و تشخیص انحرافات گالوانیکی از کد والدیم (Marti et al., 2009) و نمودارهای قطبی استفاده شد. این کد با در نظر گرفتن سطح نویز موجود در داده های مگنتوتلوریک به طور خودکار به تعیین بعد داده ها می پردازد. در روش نمودارهای قطبی برای ساختارهای یک بعدی شکل نمودار برای مؤلفه Z_{xx} نقطه و برای مؤلفه Z_{xy} دایره است. در ساختارهای دوبعدی شکل Z_{xx} به صورت یک گل با چهارپر و Z_{xy} شکل تخم مرغی دارد و در ساختارهای سه بعدی هم Z_{xx} و هم Z_{xy} شکل اوربیتالی پیدا می کنند و اندازه Z_{xx} قابل مقایسه با Z_{xy} می شود.

در جدول ۱ نتایج والدیم، ۸ ایستگاه انتخاب شده برای ۴ محدوده فرکانسی نشان داده شده است. تحلیل ابعادی صورت گرفته با کد والدیم بیانگر این است که ساختارهای زیرسطحی در عمق های کم عموماً دوبعدی هستند و در عمق های میانی و زیادتر عموماً سه بعدی هستند. علاوه بر این در بعضی فرکانس ها انحرافات گالوانیکی تشخیص داده شد. نمودارهای قطبی نتایج تحلیل ابعادی روش والدیم را تأیید کردند. شکل ۳ نمودارهای قطبی پروفیل انتخاب شده را در ۴ محدوده فرکانسی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در فرکانس های پایین شکل اوربیتالی Z_{xx} و Z_{xy} ساختارهای سه بعدی را نشان می دهد و در فرکانس های بالا پیکربندی نمودارهای قطبی وجود ساختارهای دوبعدی را پیش بینی می کند.

روش های والدیم، بردارهای القایی و تیپر جهت تعیین امتداد ساختار به کار رفتند. امتداد ساختار شمال شرقی- جنوب غربی برای کل پروفیل تشخیص داده شد. به دلیل اینکه ابهام ۹۰ درجه در



شکل ۲: الف) نمودارهای مقاومت ویژه مشاهده‌ای به ترتیب از بالا به پایین ایستگاه‌های ۲۷، ۱۰۸، ۲۲۴ و ۲۴۰ در دو حالت xy و yx. ب) نمودارهای فاز مشاهده‌ای به ترتیب از بالا به پایین ایستگاه‌های ۲۷، ۱۰۸، ۲۲۴ و ۲۴۰ در دو حالت xy و yx.

جدول ۱: نتایج تحلیل ابعادی کل ایستگاه‌ها به روش والدیم 2D و 3D بیانگر ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی در فرکانس مربوطه هستند. نسبت 3D/2D انحراف گالوانیکی روی ساختارهای دوبعدی ناشی از ساختارهای سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

Frequency range (Hz)	Site3	Site7	Site19	Site26	Site27	Site108	Site224	Site240
115-320	2D	3D/2D	2D	3D/2D	3D	3D	2D	3D
11.2-97	2D	3D	2D	3D	3D	3D	2D	3D
1.02-9.4	3D	3D/2D	3D	3D	3D	3D/2D	3D/2D	3D
0.107-0.088	3D/2D	3D/2D	3D	3D	3D	3D	3D	3D/2D
0.011-0.088	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D/2D	3D
0.0011-0.0092	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D

۷-۱- روش گرادیان مزدوج غیرخطی

مسئله معکوس به صورت زیر بیان می‌شود (Rodi and Mackie, 2001):

$$d = f(m) + e \quad (1)$$

که در آن d بردار داده‌ها، m بردار پارامترهای مدل، e بردار خطای داده‌ها و f تابع مدل‌سازی پیشرو هستند. تابع هدف تعریف شده در این روش به صورت زیر است (Rodi and Mackie, 2001):

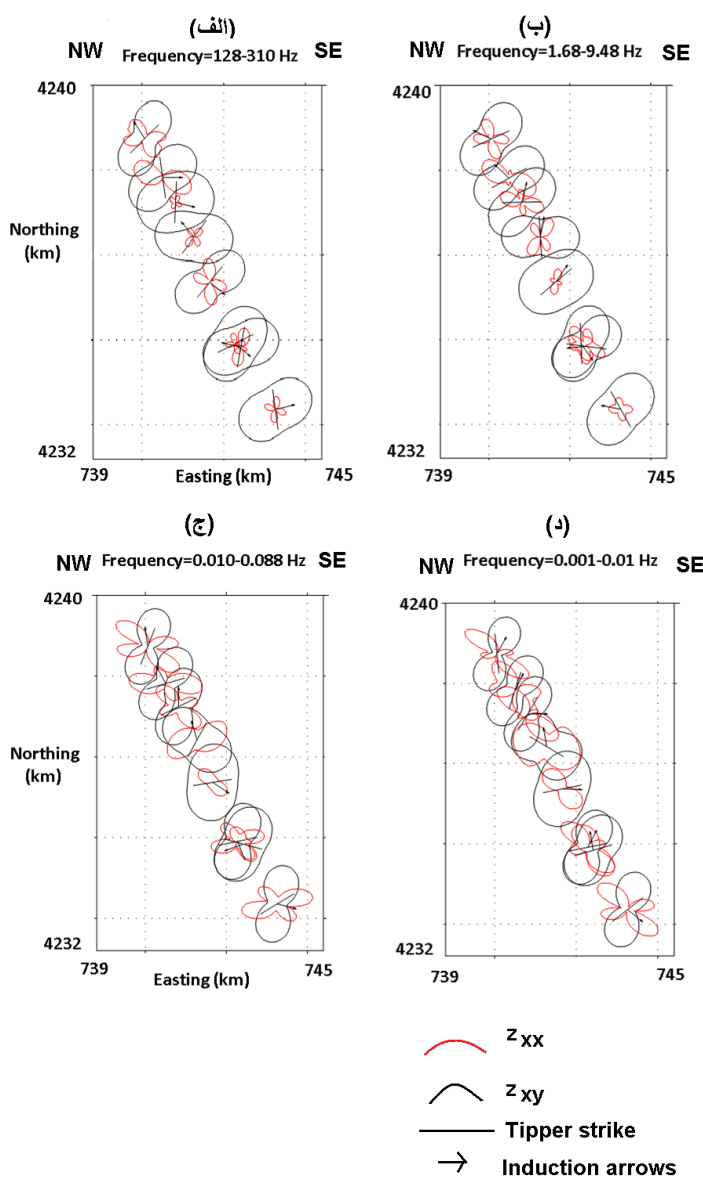
است: الف) محاسبه گرادیان تابع هدف ب) پیدا کردن مقدار α که عبارت $\psi(m) + \alpha u$ را برای پارامتر مدل مشخص m و بردار جهت جستجو (search direction) کمینه می کند.

بردار جهت جستجو u در هر تکرار با استفاده از گرادیان محاسبه شده تابع هدف به دست می آید. مقدار α در هر تکرار با استفاده از کمینه سازی تک متغیره یا بررسی خطی محاسبه می شود (Ghaedrahmati et al., 2013a). بعد از محاسبه u و α مدل به صورت زیر به دست می آید (Rodi and Mackie, 2001):

$$m_{k+1} = m_k + \alpha_k u_k \quad (3)$$

(۲) $\psi(m) = (d - f(m))^T V^{-1} (d - f(m)) + \lambda m^T L^T L m$ در تابع هدف V نقش یک ماتریس وزنی را ایفا می کند که برحسب انحراف معیار داده ها تعیین می شود. جمله اول بیانگر عدم برازش پارامترهای مدل به داده ها است. در جمله دوم، λ پارامتر منظم سازی است؛ که عددی مثبت است و L عملگر تفاضل محدود مرتبه دوم است؛ که با لاپلاس گرفتن از مقاومت ویژه باعث پایداری مدل می شود.

روش گرادیان مزدوج غیرخطی به طور مستقیم مسائل غیرخطی را کمینه می کند. این روش از متغیر پولاک-ریبیر (Polak, 1971) برای کمینه کردن تابع هدف (معادله ۲) استفاده می کند. برای استفاده از این روش در مسائل وارون سازی دو بخش از محاسبات نیاز



شکل ۳: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس منطبق بر ایستگاه های انتخاب شده بر روی پروفیل در ۴ محدوده فرکانسی (الف) ۱۲۸-۳۱۰، (ب) ۹/۴۸-۱/۶۸، (ج) ۰/۰۸۸-۰/۰۱ و (د) ۰/۰۱-۰/۰۰۱ هرتز. نمودارهای قرمز مؤلفه Z_{xx} و نمودارهای مشکی مؤلفه Z_{xy} را نشان می دهند. خطی که دارای فلش است جهت گیری بردارهای القایی و خط راست امتداد ساختار تعیین شده توسط تیپر را نشان می دهد.

۸- شبه مقاطع وارون سازی

در روش مگنتوتلوریک شبه مقاطع برازش بین داده‌های مشاهده‌ای با پاسخ‌های حاصل از مدل را نشان می‌دهند. شبه مقاطع داده‌های مقاومت ویژه و فاز مشاهده‌ای و پاسخ‌های مدل حاصل از وارون سازی مد TM در شکل ۵ نشان داده شده است. اختلاف ناچیز بین داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ‌های مدل مد TM بیانگر این است که هر دو روش وارون سازی برازش خوبی را با داده‌های مشاهده‌ای انجام داده‌اند. در شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه و فاز مشاهده‌ای و پاسخ‌های مدل در مد TE اختلاف زیادی بین شبه مقاطع پاسخ‌های مدل و داده‌های مشاهده‌ای وجود داشت؛ که بیانگر این است که پاسخ‌های مدل در مد TE به سستی به داده‌های مشاهده‌ای برازش پیدا می‌کنند.

۹- تفسیر نتایج وارون سازی

با در نظر گرفتن شکل (۴) لایه‌های سطحی منطقه مقاومت ویژه بالایی دارند (بیش از ۲۰۰ اهم متر) و این موضوع بیانگر این است که این لایه‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های زمین گرمایی قرار نگرفته‌اند. این لایه مقاوم می‌تواند ناشی از سنگ‌های نفوذناپذیر منطقه مانند بازالت و گدازه‌های تراکی آندزیت باشد و به صورت سنگ پوش سیستم تفسیر شود. در عمق ۱۰۰۰ متری بین ایستگاه‌های ۲۴۰ و ۲۲۴ در قسمت جنوب شرقی پروفیل و بین ایستگاه‌های ۲۶ و ۱۰۸ در قسمت شمال غربی پروفیل، دو محدوده با مقاومت ویژه پایین مشاهده می‌شود که به شکل ۷ است؛ این دو محدوده از عمق بیش از ۳۵۰۰ متری نسبت به سطح زمین به هم متصل می‌شوند و تا عمق ۴۵۰۰ متری ادامه دارند. این محدوده با مقاومت ویژه کم می‌تواند ناشی از یک منطقه تکتونیزه و جریان‌های گرمایی و یا وجود محلول‌های نمکی باشد. این آنومالی را می‌توان به عنوان مخزن منطقه در نظر گرفت. شکل ۷ این آنومالی احتمالاً ناشی از حرکت سیالات داغ رو به بالا است. در کل پروفیل در عمق بیش از ۴۵۰۰ متری یک لایه خیلی رسانا (کمتر از ۱۰ اهم متر) مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد این لایه منبع داغ منطقه سبلان است. با این وجود این لایه رسانای عمیق می‌تواند ناشی از سیالاتی باشد که در زون‌های دارای شکستگی زیاد نفوذ کرده‌اند. با در نظر گرفتن گسل‌های منطقه ارتباط بین رسانایی این لایه و نفوذ سیالات در این شکستگی‌ها تأیید می‌شود.

۱۰- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پیدا کردن پارامتر منظم سازی روش کمینه مربعات مقید هموار بهتر از روش گرادیان مزدوج غیرخطی عمل می‌کند؛ زیرا با جستجوی کمتر می‌توان پارامتر منظم سازی مناسب را انتخاب کرد؛ با این حال با توجه به اینکه کد MT2DInvMatlab قابلیت ارتقا دارد، پیشنهاد می‌گردد روش‌های جدیدتری نسبت به الگوریتم

اندیس K مشخص کننده شماره تکرار است. در این الگوریتم، از محاسبه کامل ماتریس حساسیت و حل کامل سیستم معادلات نرمال اجتناب می‌شود. وارون سازی داده‌ها در این روش با نرم افزار WinGlink انجام شد. اگرچه در این روش می‌توان داده‌های مقاومت ویژه، فاز و تیر را وارون سازی کرد؛ اما فقط داده‌های مقاومت ویژه و فاز وارون سازی شدند. تعداد بلوک‌های مش بندی 15×27 است. برای داده‌های مقاومت ویژه و فاز ۵ درصد نویز در نظر گرفته شد. مطابق با مطالعات صورت گرفته در (قائد رحمتی، ۱۳۹۲)، پارامترهای مختلف منظم سازی (از ۱ تا ۳۰) بررسی شد و در نهایت عدد ۳ به عنوان پارامتر منظم سازی در نظر گرفته شد. مدل به دست آمده از این روش برای مد TM در شکل ۴ نشان داده شده است. عدم برازش RMS بین داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ‌های مدل $3/73$ بود؛ که قابل پذیرش است.

۷-۲- روش کمینه مربعات مقید هموار

تابع هدف این روش از رابطه (۴) به دست می‌آید (deGroot- Hedlin and Constable, 1990; Ghaedrahmati et al., 2013a):

$$\psi(m) = (m - m_0)^T L (m - m_0) + \lambda^{-1} \{ (d - f(m))^T V (d - f(m) - \chi^2) \} \quad (4)$$

در این تابع m_0 بیانگر مدل اولیه است و χ^2 عدم برازش هدف محسوب می‌شود. بعد از اینکه تابع پیشروی f با استفاده از بسط مرتبه اول تیلور خطی شد، کمینه کردن تابع هدف با استفاده از الگوریتم گاوس نیوتن صورت می‌گیرد (Rodri and Mackie, 2001; Ghaedrahmati et al., 2013a). سپس یک سیستم تکراری از معادلات خطی برای پیدا کردن مدل حاصل می‌شود:

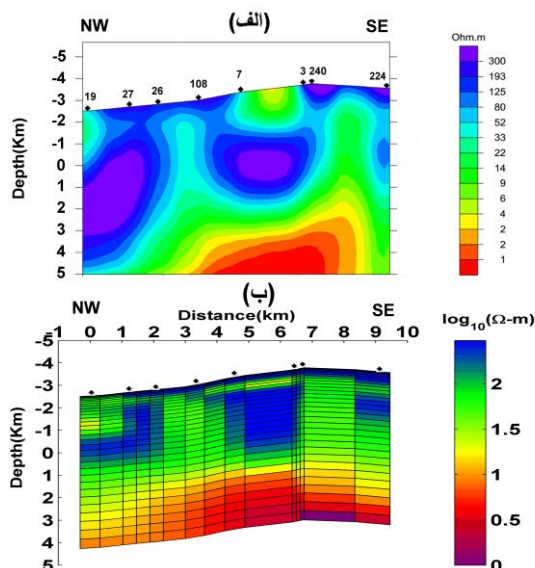
$$m_{k+1} = [\lambda L + (J_k^T V J_k)]^{-1} J_k^T V [d - f(m_k) + J_k (m_k - m_0)] + m_0 \quad (5)$$

که در آن J ماتریس ژاکوبین است. در این روش پارامتر منظم سازی در طول فرایند وارون سازی ثابت است. وارون سازی داده‌ها در این روش با استفاده از کد MT2DInvMatlab (Lee et al., 2009) صورت گرفت. در این روش داده‌های مقاومت ویژه و فاز وارون سازی می‌شوند. تعداد بلوک‌های مش بندی 15×31 است. برای داده‌های مقاومت ویژه و فاز ۵ درصد نویز در نظر گرفته شد. برای تعیین پارامتر منظم سازی مناسب الگوریتم ACB (Yi et al., 2003) بکار گرفته شد. در این الگوریتم λ به صورت تابع مکانی در نظر گرفته می‌شود و با تحلیل تباین پارامتری تعیین می‌شود (Menke, 1989; Yi et al., 2003; Lee et al., 2009). در الگوریتم ACB کمینه و بیشینه پارامتر منظم سازی $\lambda_{\min}$ و $\lambda_{\max}$ هستند؛ که توسط کاربر تعیین می‌شوند. بر اساس تحلیل تباین پارامتری، $\lambda_{\min}$ و $\lambda_{\max}$ به ترتیب ۲ و ۱۰ انتخاب شدند. عدم برازش RMS، ۴، به دست آمد.

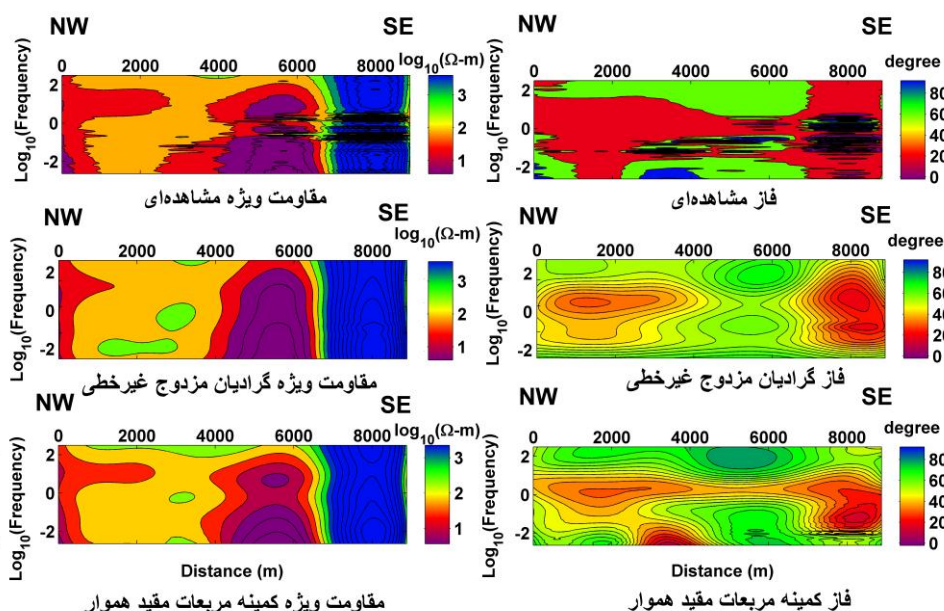
محمدیان سرونندانی و همکاران، مدل سازی دوبعدی داده های مگنتوتلوریک سیلان با استفاده از روش های کمینه مربعات مقید هموار و ...، صفحات ۱۱۹-۱۳۰.

بر این نتایج حاصل از وارون سازی مد TM انطباق بهتری با وارون سازی سه بعدی صورت گرفته در سیلان داشت (Ghaedrahmati et al., 2013b). با در نظر گرفتن نتایج مدل سازی، پیشنهاد می شود یک چاه جدید در جنوب شرق چاه E و در حوالی ایستگاه ۷ حفر شود.

ACB برای تعیین پارامتر منظم سازی، اعمال شوند. مش بندی روش کمینه مربعات تا حد زیادی خودکار است. این ضعف سبب شده است که مش بندی مناسبی در شکل ۴ دیده نشود و این مش بندی ضعیف سبب شده است؛ که اختلاف مقاومت ویژه به خوبی تفکیک نشود. برازش بین داده های مشاهده ای و پاسخ های حاصل از مدل در مد TM نسبت به دو مد TE و TM+TE راحت تر به دست آمد. علاوه



شکل ۴: مدل حاصل از وارون سازی داده های مقاومت ویژه و فاز مد TM الف) با استفاده از روش گرادین مزدوج غیرخطی ب) با استفاده از روش کمینه مربعات مقید هموار.



شکل ۵: سمت چپ: شبه مقاطع مربوط به داده های مقاومت ویژه، از بالا به پایین به ترتیب مشاهده ای، گرادین مزدوج غیرخطی و کمینه مربعات مقید هموار. سمت راست: شبه مقاطع مربوط به داده های فاز از بالا به پایین به ترتیب مشاهده ای، گرادین مزدوج غیرخطی و کمینه مربعات مقید هموار.

۱۱- منابع

- Geothermal Area, Iran, *Indian Journal of Geosciences*, 66, 39-48.
- Harinarayana, T., Abdul Azeed, K.K., Murthy, D.N., Veeraswamy, K., Eknath Rao, S.P., Manoj, C. and Naganjaneyulu, K., 2006, Exploration of geothermal structure in Puga geothermal field, Ladakh Himalayas, India by magnetotelluric studies, *Journal of Applied Geophysics*, 58, 280-295.
- Heise, W., Caldwell, T.G., Bibby, H.M. and Bannister, S.C., 2008, Three-dimensional modelling of magnetotelluric data from the Rotokawa geothermal field, Taupo Volcanic Zone, New Zealand, *Geophysical Journal International*, 173, 740-750.
- KML, 1998, Sabalan geothermal project, stage 1-surface exploration, final exploration report, report number, 2505- RPT-GE-003, Renewable Energy Organization of Iran and Kingston Morrison Limited Co., 83 P.
- Lee, S.K., Kim, H.J., Song, Y. and Lee, C., 2009, MT2DInvMatlab-A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion, *Comput Geosci*, 35, 1722-1735.
- Marti, A., 2006, Ph.D. Thesis, A Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of The Central Betic Crustal Structure, University of Barcelona.
- Marti, A., Queralt, P.A.G. and Ledo, J., 2009, WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor, *Computers & Geosciences* 35, 2295-2303.
- Menke, W., 1989, *Geophysical Data Analysis Discrete Inverse theory*, revised ed. Academic Press Inc, San Diego, CA, 289 P.
- Moradzadeh, A., 1998, Ph.D Thesis, Electrical imaging of the Adelaide geosyncline using Magnetotelluric (MT), Flinders University of south Australia, 334 P.
- Naidu, G.D., 2012, Deep Crustal Structure of the Son-Narmada-Tapti Lineament, Central India. Berlin, Springer, 13-35.
- Ogawa, Y., 2002, On two-dimensional modeling of Magnetotelluric field data, *Surv Geophys*, 23, 251-273.
- Orange, A.S., 1989, magnetotelluric exploration for hydrocarbons, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 77, 287-317.
- Oskooi, B., Pedersen, L.B., Smirnov, M., Árnason, K., Eysteinnsson, H. and Manzella, A., 2005, The deep Geothermal Area, Iran, *Indian Journal of Geosciences*, 66, 39-48.
- حافظی، م.ک.، رحیمی، ع. و ایوبی، م.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک و کاربرد آن در ذخایر زمین‌گرمایی منطقه مشکین‌شهر، فصلنامه علوم زمین، ۵۴، ۲۰-۲۷.
- قائد رحمتی، ر.، ۱۳۹۲، تخمین بهینه پارامتر منظم سازی برای بهبود معکوس‌سازی دو و سه‌بعدی داده‌های مگنتوتلوریک، رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Arnason, K., Eysteinnsson, H. and Hersir, G.P., 2010, Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland, *Geothermics* 39, 13-34.
- Boerner, D.E., Kurtz, R.D., Craven, J.A., Ross, G.M., Jones, F.W. and Davis, W.J., 1999, Electrical conductivity in the Precambrian lithosphere of western Canada, *Science*, 283, 668-670.
- Bromley, C.J., Khosrawi, K. and Talebi, B., 2000, Geophysical exploration of the Sabalan geothermal prospects in Iran, *Proceedings, World Geothermal Congress 2000*, 1009-1014.
- Degroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- Didana, Y.L., 2010, Master Thesis, Multidimensional inversion of MT data from Krysvic High Temperature Geothermal Field, SW-Iceland, and study of how 1D and 2D inversion can reproduce a given 2D/3D resistivity structure using synthetic MT data, University of Iceland.
- EDC (Energy Development Corporation), 2008, 2007 MT survey of NW Sabalan geothermal project, NW Iran, Report submitted to SUNA. (19 P).
- EDC (Energy Development Corporation), 2010, 2009 MT survey of NW Sabalan geothermal project, NW Iran, Report submitted to SUNA. (13 P).
- Fanaee Kheirabad, G.A. and Oskooi, B., 2011, Magnetotelluric interpretation of the Sabalan geothermal field in the northwest of Iran, *Journal of the Earth and Space Physics*, 37, 1-11.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N. and Lee, S., 2013, Investigation 2D MT inversion codes using real field data, *Arab J Geosci*, 7, 1-16.
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S. and Porkhial, S., 2013, 3D inversion of MT data from the sabalan geothermal field, Ardabil, Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 93, 12-24.
- Ghalehnoee, M.H. and Ghadimi, F., 2012, Magnetotelluric sounding in the Sabalan

- Sternberg, B.K., Buller, P.L. and Kisabeth, J.L., 1982, Electrical methods for hydrocarbon exploration II. Magnetotelluric method. Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas III, 202-230. Dallas.
- Talebi, B., Khosrawi, K. and Ussher, G.H., 2005, Review of resistivity surveys from the NW Sabalan geothermal field, Iran, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
- Uchida, T., 1993, Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC, J Geomag Geoelectr, 45, 841-858.
- Uchida, T., Lee, T.J., Honda, M. and Andan, A., 2002, 2-D and 3-D interpretation of Magnetotelluric data in the Bajawa geothermal field, central Flores, Indonesia, Bull Geol Surv Japan, 53, 265-283.
- Wannamaker, P.E., Ward, S.H. and Hohmann, G.W., 1984, Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earth, Geophysics, 49, 1517-1533.
- Wannamaker, P.E., 1997, Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U.S.A., Part II. Implications for CSAMT methodology, Geophysics, 62, 466-476.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H. and Chung, S.-H., 2003, Enhancing the resolving power of leastsquares inversion with active constraint balancing, Geophysics, 68, 931-941.
- Zhang, K., Wei, W., Lu, Q., Dong, H. and Li, Y., 2014, Theoretical assessment of 3D magnetotelluric method for oil and gas exploration, Synthetic examples, Journal of Applied Geophysics, 106, 23-36.
- geothermal structure of the Mid-Atlantic Ridge deduced from MT data in SW Iceland, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 150, 183-195.
- Oskooi, B. and Kermanshahi, I.M., 2007, 1D and 2D Inversion of the Magnetotelluric Data for Brine Bearing Structures Investigation, Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Hotel Maxičky, Děčín, Czech Republic, 291-301.
- Polak, E., 1971, Computational methods in optimization, A unified approach, Academic Press.
- Roberts, B. and Craven, J., 2012, Results of a Magnetotelluric Survey in Churchill, Manitoba, GEM Energy, Hudson Bay, Geological Survey of Canada, Open File 7151.
- Rodi, W.L. and Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, Geophys, 66, 174-187.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An efficient data-sub space inversion method for 2-D magnetotelluric data, Geophysics, 65, 791-803.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2007, Data space conjugate gradient inversion for 2-D magnetotelluric data, Geophys J Int, 170, 986-994.
- SKM (Sinclair Knight Merz), 2003, Northwest Sabalan geothermal project, MT survey reanalysis. Report submitted to SUNA. (12 P).
- SKM (Sinclair Knight Merz), 2005, Resource review of the Northwest Sabalan geothermal project. Report submitted to SUNA. (61 P).
- Smith, J.T. and Booker, J.R., 1991, Rapid relaxation inversion of two- and three dimensional magnetotelluric data, J Geophys Res, 96, 3905-3922.



2-D Modeling of Sabalan Magnetotelluric Data using Nonlinear Conjugate Gradient and Smoothness-Constrained Least Square Methods

Mohamadhasan Mohamadian Sarvandani^{1*}, Ali Nejati, Kalateh², Reza Ghaedrahmati³ and Abolghasem Kamkar-Rouhani⁴

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran

4- Associate Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 28 October 2015; Accepted: 8 January 2016

Corresponding author: mohamadian.sarvandani@gmail.com

Keywords

Magnetotelluric
2-D inversion
Smoothness-constrained least
square method
Nonlinear conjugate gradient
method
Sabalan

Extended Abstract

Summary

The main objective of this research work is to investigate the subsurface structures in Sabalan geothermal field using two-dimensional (2-D) nonlinear conjugate gradient and smoothness-constrained least square inversion methods of magnetotelluric (MT) data. To achieve the goal, 8 MT sites in the Sabalan area have been selected along one profile. Dimensionality analysis using the WALDIM code and impedance polar diagrams indicated that the subsurface structures of the selected sites are One-dimensional (1-D) or 2-D at shallow depths, whereas they are mainly three-dimensional (3-D) at middle and lower depths. Tipper and induction arrows have been used to determine the geoelectrical strike. As a result, NE-SW direction has been identified as the major strike direction of subsurface structures in the area. Spatial averaging method has also been used to remove the galvanic distortions. After setting up the modeling parameters and appropriate mesh design, 2-D inversion of the MT data has been performed using nonlinear conjugate gradient and smoothness-constrained least square methods. The obtained 2-D models have illustrated very well the geothermal structures including cap rock, reservoir and the heat source. Moreover, there is a close correspondence between these models and past investigations in the area.

Introduction

The Sabalan geothermal field is located on the western slopes of Sabalan mountain in the Moil valley in Ardabil province. Warm and hot springs are found within the Moil valley in the area. The four major units, originally identified and used for the original geologic study and mapping at northwest of Sabalan, are in order of increasing age: Quaternary alluvium, fan and terrace deposits; Pleistocene post-caldera tracheyandesite flows, domes and lahars; Pleistocene syn-caldera tracheydacitic to tracheyandesitic domes, flows and lahars; Pleistocene pre-caldera tracheyandesitic lavas, tuffs and pyroclastics. Fractures and faults can play an important role in geothermal fields, as fluid mostly flows through them in the source rocks. Structural study confirms two major types of structural setting: a set of linear faults and several ring-faults. Sabalan area has been under studies including geology, hydrology, geochemistry and resistivity survey since 1998. Three deep exploratory wells were consequently drilled from 2002 to 2004 within the moil valley. Measured temperature at wells drilled in the area varies between 160 to 250°C. In 2006, a hydrological model of the region has been proposed. In 2007 and 2009, considering the proposed hydrological model, MT survey was conducted to determine the possible center of the geothermal system and identify the drilling targets. In this research work, the subsurface structures in Sabalan geothermal field is investigated using 2-D nonlinear conjugate gradient and smoothness-constrained least square inversion methods of the acquired MT data from 8 MT sites in the area. Based on the inversion results, the geoelectrical model or specifications of subsurface structures in the area will be estimated.

Methodology and Approaches

To investigate the subsurface structures in the Sabalan area using 2-D nonlinear conjugate gradient and smoothness-constrained least square inversion methods of MT data, 8 MT sites were selected from 78 MT sites measured in 2007 and 2009 MT survey, and then, the MT data of these 8 sites were used in the inversion process. The survey utilized a Phoenix MTU-5A data acquisition system, which is a standard five-channel system recording both two electric and

three magnetic field components. The raw time series data were processed using SSMT2000 software. The processed data were then used to obtain the impedance tensors from which the apparent resistivity and phase data in a frequency range of 0.0011-320 Hz were calculated. WALDIM code and Polar diagrams were used for dimensionality analysis of MT data. Static shift correction based on the similarity between the MT curves of adjacent sites was utilized to remove the effects of galvanic distortions. After dimensionality analysis and static shift correction, and then, setting up the modeling parameters and appropriate mesh design, we performed 2-D inversion of the MT data by employing nonlinear conjugate gradient and smoothness-constrained least square methods in MT2InvMatlab code and WinGLink software. Because the fitting of the transverse magnetic (TM) mode data in the 2-D inversion can be more easily achieved even for a 3-D structure, often the TM mode data is only used for 2-D inversion of MT data in geothermal fields. Therefore, we have only shown the inversion results of TM mode data and interpretation has also made for the obtained model of the TM mode data.

Results and Conclusions

As a result of the inversion of the MT data, 2-D models of subsurface geoelectrical structures have been obtained, and consequently, the cap rock, reservoir and heat source of Sabalan geothermal field have been identified. Moreover, the ACB algorithm introduced by Yi et al. (2003) has been used to stabilize the inversion process and provide a high-resolution optimal earth model in the MT2InvMatlab code. Constructing the forward and inversion mesh in the MT2InvMatlab code is also made automatically.
