

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک

پایان نامه کارشناسی ارشد

وارون سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از روش اُکام به منظور اکتشاف ساختارهای ژئوترمال شمال غرب ایران

نگارنده: فاطمه فیروزی

استاد راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور

مهندس محمد فیلبندی کشکولی

مهر ۱۳۹۹

شماره: ۲۰۵، ۹۹، ۲۶-۲
تاریخ: ۱۸، ۰۹، ۹۹

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فاطمه فیروزی..... با شماره دانشجویی ۹۶۱۱۵۸۴..... رشته ژئوفیزیک.....
گرایش ژئوالکتریک. تحت عنوان وارون سازی سه بعدی داده های مگنتولوریک با استفاده از روش اکام به منظور اکتشاف ساختارهای ژئوترمال شمال غرب ایران... که در تاریخ ۹۹/۷/۲۸.. با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۹ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۷-۱۶ ☒ (د) درجه متوسط: نمره ۱۵-۱۴ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد مشاور	محمد فیلبندی کشکولی	—	
۳- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد رداد	استادیار	
۴- استاد ممتحن اول	علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۵- استاد ممتحن دوم	علی نجاتی کلاته	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد عطایی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



پایان نامه ام را تقدیم می‌دارم به خانواده‌ی بسیار مهربانم، والدین و خواهر و برادر عزیزم که در تمامی مراحل راهنما و پشتیبانم بوده‌اند.

پاس و ستایش بیکران به درگاه لایزال الهی که به شکرانه‌ی مشیت و اراده‌ی او اقبال آنرا داشتم تا چند صبحی را شکر و کلاس انسانیت، ایشا و مهربانی استاد بسیار عزیزم دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی که حضورشان نقطه‌ی عطفی در زندگی ام بوده، باشم.

بدینوسیله از ایشان به پاس زحمات و راهنمایی‌هایی که در امر این تحقیق و دمدت تحصیل برایم داشته‌اند، تقدیر و تشکر می‌نمایم. همچنین از استاد کرامی مهندس محمد فیلبندی کشتوی که مرا مورد لطف قرار داده و در این امر یاری نمودند، سپاسگزارم. از اساتید بسیار معزز و بزرگوارم دکتر عرب امیری و دکتر نجابی که علاوه بر تقبل زحمت داور این پایان نامه، پشتکار و تلاش را نیز هم از ایشان آموختم، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

از پدر و مادر عزیزم که با حمایت‌های همه‌جانبه و زحمات بی‌شائبه خود مرا تا این مقطع از تحصیل همراهی کردند، تقدیر و تشکر نموده و امیدوارم بهانی باشم که آرزویشان است.

از برادر خوبم امیر و خواهر مهربانم فائزه عزیز که همیشه در کنارم بوده و مرا از عشق و محبت خود لبریز نمودند، تشکر می‌کنم.

قلم قاصر است. بر که‌ی کاغذ محدود و زمان در گذر، آنچه که لایتنای وباقی است، پروردگار بی‌همتا و مهربان است. امیدوارم تمام این عزیزان در پناه حضرت او باشند.

تعهد نامه

اینجانب **فاطمه فیروزی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **وارون سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از روش اکام به منظور اکتشاف ساختارهای ژئوترمال شمال غرب ایران** با راهنمایی **دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
 - مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
 - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.
- . تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

روش مگنتوتلوریک یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه فرکانس است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین به منظور بررسی ساختار مقاومت‌ویژه الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند. به دلیل اینکه منابع زمین‌گرمایی تغییرات زیادی در مقاومت ویژه زیرسطحی به وجود می‌آورند، اهداف ایده آلی برای روش مگنتو-تلوریک هستند. به دلیل وجود چشمه‌های متعدد آب گرم، محدوده سبلان از سال ۱۳۵۶ به طور گسترده مورد اکتشاف متعدد ژئوفیزیکی جهت کشف و مدل‌سازی منبع زمین‌گرمایی قرار گرفته است. ویژگی شاخص سیستم‌های فعال زمین‌گرمایی، وجود یک منبع حاوی سیال‌های داغ هیدروترمال می‌باشد که اغلب سنگ‌های پیرامون منبع، توسط سیال هیدروترمال دچار دگرسانی شده‌اند. آلتراسیون هیدروترمال سبب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی (مقاومت ویژه الکتریکی، چگالی، سرعت امواج لرزه‌ای) محیط می‌شود که این تغییرات غیرعادی و یا بی‌هنجاری‌ها توسط روش‌های مختلف ژئوفیزیکی شامل روش‌های ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی، گرانی-سنجی، مغناطیسی و لرزه‌نگاری قابل تشخیص می‌باشند. روش‌های الکترومغناطیسی به خصوص روش مگنتو-تلوریک (MT) نقش پراهمیتی در تصویرسازی هندسه منابع ژئوترمال ایفا می‌کنند.

در این مطالعه مدل‌سازی ۲۴ سونداژ مگنتوتلوریک که توسط کارشناسان شرکت فیلیپینی Energy-Development Corporation در سال ۲۰۰۷ میلادی، با استفاده از دستگاه Phoenix MTU-5A با محدوده فرکانسی 0.0005 تا 320 Hz از دره موئیل واقع در دامنه‌ی غربی و جنوب غربی کوه سبلان برداشت شده انجام شده است. همچنین در این پژوهش چگونگی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های مختلف زیر سطح زمین تا عمق چند کیلومتری و رسیدن تا منابع ژئوترمال و وضعیت لایه‌های زمین شناسی مناطق مزبور مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی یک بعدی با استفاده از روش اُکام و بوستیک و مدل‌سازی دوبعدی با استفاده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی انجام شده است.

مدل‌سازی وارون سه‌بعدی با استفاده از الگوریتم مدل‌سازی WSINV3DMT صورت گرفت، نتایج به دست آمده از وارون‌سازی سه‌بعدی نشان‌دهنده‌ی این است که منطقه رسانا از عمق ۱۲۰۰-۸۰۰ متری تا ۲۵۰۰ متری

ادامه پیدا کرده است و احتمال می‌دهیم، مخزن زمین‌گرمایی باشد. منطقه دارای شکستگی‌ها و گسل‌هایی طبق نقشه‌ی زمین‌شناسی است که سیال در مرز شکستگی امتداد پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: مگنتوتلوریک، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، WSINV3DMT، روش اکام، روش گرادیان مزدوج غیرخطی

فهرست مطالب

فهرست اختصارات.....	ث
فصل ۱.....	۱
کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ سابقه تحقیق.....	۳
۳-۱ اهداف و ضرورت انجام تحقیق.....	۱۳
۴-۱ روش تحقیق.....	۱۴
۵-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۵
فصل ۲.....	۱۷
تئوری روش مگنتوتلوریک.....	۱۷
۱-۲ مقدمه.....	۱۸
۲-۲ منبع سیگنالهای مگنتوتلوریک.....	۱۸
۳-۲ تئوری امواج الکترومغناطیس.....	۲۰
معادلات ماکسول.....	۲۰
۴-۲ عمق پوست.....	۲۳
۵-۲ تانسور امپدانس و بردار تیپر.....	۲۵
۶-۲ ساختارهای یک بعدی.....	۲۷
۷-۲ ساختارهای دوبعدی.....	۲۷
۸-۲ امپدانس برای ساختارهای سه بعدی.....	۲۹
۹-۲ مقاومت ویژه ظاهری.....	۳۱
۱۰-۲ اثر جابجایی ایستا.....	۳۴
فصل ۳.....	۳۷
زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و اطلاعات مربوط به داده های برداشت شده.....	۳۷
۱-۳ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.....	۳۸
۲-۳ زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.....	۳۹
۱-۲-۳ امین شناسی و سنگ شناسی آتش فشان سبلان.....	۳۹
۲-۲-۳ چینه شناسی.....	۴۱
۳-۳ اطلاعات مربوط به داده های مگنتوتلوریک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه.....	۴۷
فصل ۴.....	۵۵
مدل سازی یک بعدی و دوبعدی داده های مگنتوتلوریک.....	۵۵
منطقه مورد مطالعه و تفسیر کمی آنها.....	۵۵
۱-۴ مقدمه.....	۵۶

۲-۴	موقعیت ایستگاهها	۵۶
۳-۴	نمودارهای قطبی تانسور امپدانس	۵۹
	امپدانس است	۵۹
۴-۴	مقایسه منحنی های مقاومت ویژه ظاهری و فاز	۶۲
۵-۴	مدل سازی یک بعدی	۷۰
۶-۴	خلاصه ای از روش هموارسازی اکام	۷۰
۷-۴	وارون سازی داده های MT	۷۷
۸-۴	مدل سازی دوبعدی	۷۸
۹-۴	روش گرادیان مزدوج غیر خطی	۷۹
	فصل ۵	۸۵
	وارون سازی سه بعدی های مگنتوتلوریک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه	۸۵
۱-۵	مقدمه	۸۶
۲-۵	چگونگی استفاده از کد WSINV3DMT	۸۶
۳-۵	مدلسازی سه بعدی دادهها	۸۷
	فصل ۶	۹۷
	نتیجه گیری و پیشنهادات	۹۷
۱-۶	نتیجه گیری	۹۸
۲-۶	پیشنهادات	۹۹
	منابع	۱۰۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مقادیر مقاومت ویژه بدست آمده از مدلسازی وارون سه بعدی در اعماق مختلف، که مناطق رسانی مشخص شده در آن منابع زمین گرمایی میباشند. ۸
- شکل ۱-۲: سمت چپ: شبه مقاطع مربوط به داده های مقاومت ویژه، از بالا به ترتیب مشاهده ای، گرادیان مزدوج غیر خطی و کمینه مربعات مفید هموار، سمت راست: شبه مقاطع مربوط به داده های فاز از بالا به پایین به ترتیب مشاهد های، گرادیان مزدوج غیر خطی و کمینه مربعات مفید هموار. ۱۰
- شکل ۱-۳: نمایش موازی مقاطع شمال- جنوبی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی دوبعدی وارون داده های دو مد TE و TM. ۱۲
- شکل ۱-۴: نمایش موازی مقاطع شرقی- غربی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون دوبعدی داده های دو مد TE و TM. ۱۲
- شکل ۱-۲: موقعیت میدانهای الکترومغناطیسی برای یک ساختار ژئوالکتریکی دوبعدی ۲۹
- شکل ۲-۲: الف- تغییر میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار در مجاورت نا همگنی جانبی ب- تمرکز جریان الکتریکی در زون رسانا ج- کاهش مقاومت ویژه ظاهری در تمام فرکانس ها در ایستگاه B ۳۶
- شکل ۲-۳: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه ۴۶
- شکل ۳-۳: نقشه موقعیت منطقه زمین گرمایی سبلان ۴۷
- شکل ۳-۴: موقعیت و مشخصات ایستگاه ها و پروفیل ها که در سال ۲۰۰۷ توسط شرکت EDC به منظور بررسی منابع زمین گرمایی در دره موئیل انجام شده است. ۴۹
- شکل ۳-۵: نقشه موقعیت ایستگاههای برداشت داده های مگنتوتلوریک (فاز یک و دو) پروژه ژئوترمال سبلان ۵۰
- شکل ۳-۶: ارتباط مدل مقاومت ویژه با درجه حرارت منطقه در چاه های NWS-1 و NWS-4 ۵۲
- شکل ۴-۱: نقشه ی موقعیت ایستگاه های برداشت داده های مگنتوتلوریک (فاز یک) پروژه ژئوترمال سبلان ۵۷
- شکل ۴-۲: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲ ۵۹
- شکل ۴-۳: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۶ ۶۰
- شکل ۴-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۱ ۶۰
- شکل ۴-۵: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۴ ۶۱
- شکل ۴-۶: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۵ ۶۱
- شکل ۴-۷: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۸ ۶۲

شکل ۴-۸: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲..... ۶۴

شکل ۴-۹: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۶..... ۶۵

شکل ۴-۱۰: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۱..... ۶۶

شکل ۴-۱۲: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۴..... ۶۷

شکل ۴-۱۱: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۵..... ۶۸

شکل ۴-۱۳: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۸..... ۶۹

شکل ۴-۱۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است..... ۷۱

شکل ۴-۱۵: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است..... ۷۱

شکل ۴-۱۶: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است..... ۷۲

شکل ۴-۱۷: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است..... ۷۲

شکل ۴-۱۸: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است..... ۷۳

شکل ۴-۱۹: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است..... ۷۳

شکل ۴-۲۰: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است..... ۷۴

شکل ۴-۲۱: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است..... ۷۴

شکل ۴-۲۲: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است..... ۷۵

- شکل ۴-۲۳: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است. ۷۵
- شکل ۴-۲۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است. ۷۶
- شکل ۴-۲۵: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است. ۷۶
- شکل ۴-۲۶: طرح کلی عملیاتی که نمایش دهنده مراحل موجود در وارون سازی کمترین ساختار است. ۷۸
- شکل ۴-۲۷: موقعیت پروفیل های مگنتوتلوریک که با خطوط مشکی مشخص شده است. ۸۱
- شکل ۴-۲۸: نمایش سه پروفیل A، B و C به منظور وارون سازی در نقشه ی توپوگرافی داده های مگنتوتلوریک. ۸۱
- شکل ۴-۲۹: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A (سونداژهای ۲، ۶، ۲۱، ۲۴، ۲۸). ۸۲
- شکل ۴-۳۰: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B (سونداژهای ۳، ۷، ۲۷، ۱۹). ۸۳
- شکل ۴-۳۱: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C (سونداژهای ۴، ۷، ۱۰، ۸، ۲۶، ۲۰). ۸۴
- شکل ۵-۱: قسمتی از مدل اولیه برای شروع وارون سازی در سه جهت X، Y و Z و دارای ابعاد $34 \times 34 \times 37$ ۸۷
- شکل ۵-۲: موقعیت پروفیل ها (A, B, C, E, F, G) در نقشه ی توپوگرافی داده های برداشت شده مگنتوتلوریک منطقه سبلان. ۸۸
- شکل ۵-۳: مقطع مقاومت ویژه ایجاد شده از مدلسازی سه بعدی برای پروفیل E (سونداژهای ۱۴، ۱۲، ۱۳، ۱۰). ۸۹
- شکل ۵-۴: مقطع مقاومت ویژه ایجاد شده از مدلسازی سه بعدی برای پروفیل F (سونداژهای ۲، ۴، ۱۷، ۲۱، ۲۰، ۲۴). ۹۰
- شکل ۵-۵: مقطع مقاومت ویژه ایجاد شده از مدلسازی سه بعدی برای پروفیل G (سونداژهای ۳، ۵، ۶، ۲۲، ۲۳، ۱۵، ۱۰). ۹۱
- شکل ۵-۶: مقادیر مقاومت ویژه در اعماق مختلف که از وارونسازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک به دست آمده اند. ۹۳
- شکل ۵-۷: ادامه شکل (۵-۶) ۹۵
- شکل ۱ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲ ۱۱۰
- شکل ۲ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۳ ۱۱۱
- شکل ۳ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۴ ۱۱۱
- شکل ۴ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۶ ۱۱۲
- شکل ۵ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۷ ۱۱۲

- شکل ۶ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۸..... ۱۱۳
- شکل ۷ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۰..... ۱۱۳
- شکل ۸ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۱..... ۱۱۴
- شکل ۹ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۲..... ۱۱۴
- شکل ۱۰ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۳..... ۱۱۵
- شکل ۱۱ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۴..... ۱۱۵
- شکل ۱۲ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۵..... ۱۱۶
- شکل ۱۳ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۶..... ۱۱۶
- شکل ۱۴ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۷..... ۱۱۷
- شکل ۱۵ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۹..... ۱۱۷
- شکل ۱۶ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۰..... ۱۱۸
- شکل ۱۷ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۱..... ۱۱۸
- شکل ۱۸ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۲..... ۱۱۹
- شکل ۱۹ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۳..... ۱۱۹
- شکل ۲۰ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۴..... ۱۲۰
- شکل ۲۱ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۵..... ۱۲۰
- شکل ۲۲ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۶..... ۱۲۱
- شکل ۲۳ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۷..... ۱۲۱
- شکل ۲۴ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۸..... ۱۲۲
- شکل ۲۵ پ: ایستگاهها و پروفیلهای تعیین شده ۱۲۴
- شکل ۲۶ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است. ۱۲۴
- شکل ۲۷ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است. ۱۲۵

شکل ۲۸ پ:مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۲..... ۱۲۵

شکل ۲۹ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۳ آورده شده است..... ۱۲۶

شکل ۳۰ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۳ آورده شده است..... ۱۲۶

شکل ۳۱ پ:مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۳..... ۱۲۷

شکل ۳۲ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۴ آورده شده است..... ۱۲۷

شکل ۳۳ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۴ آورده شده است..... ۱۲۸

شکل ۳۴ پ:مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۴..... ۱۲۸

شکل ۳۵ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است..... ۱۲۹

شکل ۳۶ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است..... ۱۲۹

شکل ۳۷ پ: مقایسه ی مقاومتیژههای ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۶..... ۱۳۰

شکل ۳۸ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۷ آورده شده است..... ۱۳۰

شکل ۳۹ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۷ آورده شده است..... ۱۳۱

شکل ۴۰ پ:مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۷..... ۱۳۱

شکل ۴۱ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۸ آورده شده است..... ۱۳۲

شکل ۴۲ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۸ آورده شده است. ۱۳۲

شکل ۴۳ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۸. ۱۳۳

شکل ۴۴ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۰ آورده شده است. ۱۳۳

شکل ۴۵ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۰ آورده شده است. ۱۳۴

شکل ۴۶ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۰. ۱۳۴

شکل ۴۷ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۱ آورده شده است. ۱۳۵

شکل ۴۸ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۱ آورده شده است. ۱۳۵

شکل ۴۹ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۱. ۱۳۶

شکل ۵۰ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۲ آورده شده است. ۱۳۶

شکل ۵۱ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۲ آورده شده است. ۱۳۷

شکل ۵۲ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری وفازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۲. ۱۳۷

شکل ۵۳ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۳ آورده شده است. ۱۳۸

شکل ۵۴ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۳ آورده شده است. ۱۳۸

شکل ۵۵ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری وفازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۳. ۱۳۹

شکل ۵۶ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۴ آورده شده است. ۱۳۹

شکل ۵۷ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۴ آورده شده است. ۱۴۰

شکل ۵۸ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۴. ۱۴۰

شکل ۵۹ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۵ آورده شده است. ۱۴۱

شکل ۶۰ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۵ آورده شده است. ۱۴۱

شکل ۶۱ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۵. ۱۴۲

شکل ۶۲ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۶ آورده شده است. ۱۴۲

شکل ۶۳ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری (خط سبز) برای سونداژ ۱۶ آورده شده است. ۱۴۳

شکل ۶۴ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۶. ۱۴۳

شکل ۶۵ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۷ آورده شده است. ۱۴۴

شکل ۶۶ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۱۷ آورده شده است. ۱۴۴

شکل ۶۷ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۷. ۱۴۵

شکل ۶۸ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۹ آورده شده است. ۱۴۵

شکل ۶۹ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۹ آورده شده است. ۱۴۶

شکل ۷۰ پ:مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۱۹..... ۱۴۶

شکل ۷۱ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۰ آورده شده است. ۱۴۷

شکل ۷۲ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۰ آورده شده است. ۱۴۷

شکل ۷۳ پ:مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۰..... ۱۴۸

شکل ۷۴ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است. ۱۴۸

شکل ۷۵ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است. ۱۴۹

شکل ۷۶ پ:مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۱..... ۱۴۹

شکل ۷۷ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۲ آورده شده است. ۱۵۰

شکل ۷۸ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۲ آورده شده است. ۱۵۰

شکل ۷۹ پ:مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۲..... ۱۵۱

شکل ۸۰ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۳ آورده شده است. ۱۵۱

شکل ۸۱ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۳ آورده شده است. ۱۵۲

شکل ۸۲ پ:مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۳..... ۱۵۲

شکل ۸۳ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است. ۱۵۳

شکل ۸۴ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است. ۱۵۳

شکل ۸۵ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۴. ۱۵۴

شکل ۸۶ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز) و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است. ۱۵۴

شکل ۸۷ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است. ۱۵۵

شکل ۸۸ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۵. ۱۵۵

شکل ۸۹ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۶ آورده شده است. ۱۵۶

شکل ۹۰ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۶ آورده شده است. ۱۵۶

شکل ۹۱ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۶. ۱۵۷

شکل ۹۲ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۷ آورده شده است. ۱۵۷

شکل ۹۳ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۷ آورده شده است. ۱۵۸

شکل ۹۴ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۷. ۱۵۸

شکل ۹۵ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است. ۱۵۹

شکل ۹۶ پ: مدلسازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدلسازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدلسازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است. ۱۵۹

شکل ۹۷ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۲۸. ۱۶۰

شکل ۹۸ پ: گرید به دست آمده با استفاده از نرم افزار وینگ لینک که محل سونداژها و پروفیلها در آن مشخص شده اند. ۱۶۰

- [illegible]

شکل ۱۲۳ پ: وارونسازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C..... ۱۷۳

شکل ۱۲۴ پ: وارونسازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C..... ۱۷۴

شکل ۱۲۵ پ: وارونسازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C..... ۱۷۴

فهرست جدول

جدول ۴-۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مگنتوتلوریک ۵۸

فهرست اختصارات

EMAP: Electromagnetic Array Profilling.....	آرایش پروفیل زنی الکترومغناطیس
GDS: Geomagnetic Depth Sounding.....	سونداژ ژئومغناطیسی
MT: Magnetotelluric.....	روش مگنتوتلوریک
NLCG: Non-linear Conjugate Gradients.....	روش گرادیان مزدوج غیر خطی
RMS: Root-Mean-Suare.....	ریشه میانگین مربعات
TE: Transverse Electric.....	حالت الکتریکی عرضی
TEM: Transient Electromagneti.....	روش سونداژ الکترومغناطیس حوزه زمان
TM: Transverse Magnetic.....	حالت مغناطیسی عرضی

فصل ۱

کلیات

۱-۱) مقدمه

روش مگنتوتلوریک (MT) یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه فرکانس است که در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای را در بین سایر روش‌های اکتشافی به خود اختصاص داده است. روش مگنتوتلوریک به لحاظ چشمه فرستنده، جزء روش‌های غیرفعال است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین به منظور بررسی ساختار مقاومت‌ویژه الکتریکی زیر سطحی استفاده می‌کند. در این روش امواج الکترومغناطیس با توجه به بسامد آنها و نیز مقاومت‌ویژه لایه‌ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به دست می‌دهند. عمق بررسی در روش مگنتوتلوریک بسیار بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. این روش را می‌توان برای کاوش‌های زیرسطحی از اعماق ده‌ها متر تا ده‌ها کیلومتر بکار برد. وجود تباین در مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی در گذر از لایه‌ها و ساختارهای زیر سطحی بهترین هدف اکتشافی برای روش مگنتوتلوریک محسوب می‌شود. روش مگنتوتلوریک به عنوان یک روش با عمق نفوذ بالا به طور گسترده‌ای در اکتشافات زمین‌گرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل اینکه منابع زمین‌گرایی تغییرات زیادی در مقاومت‌ویژه زیر سطحی به وجود می‌آورند، اهداف ایده‌آلی برای روش مگنتوتلوریک هستند. این روش از طریق اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی طبیعی متغیر با زمان، اطلاعاتی را درباره مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطحی فراهم می‌کند. با توجه به اینکه عمق نفوذ میدان‌ها به فرکانس آنها بستگی دارد، تقریبی از تغییرات مقاومت ویژه با عمق حاصل می‌شود. توزیع مقاومت ویژه حاصل شده، با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و جنس سنگ‌ها تفسیر می‌شود.

در دهه‌های اخیر روش‌های وارون‌سازی در تفسیر کمی و کیفی داده‌های مگنتوتلوریک اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند. با استفاده از روش‌های وارون‌سازی می‌توان مدلی از خواص فیزیکی را از داده‌های ژئوفیزیکی به دست آورد که ساختارهای زیرسطحی را مشخص می‌کند. روش‌های وارون‌سازی دوبعدی به دلیل سرعت بالاتر و قیمت ارزان‌تر در مقایسه با روش‌های وارون‌سازی سه‌بعدی، هنوز رایج‌ترین ابزار جهت مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک هستند. تعداد زیادی روش‌های وارون‌سازی دوبعدی وجود دارند، که ویژگی‌های اساسی مدل‌های مقاومت ویژه را محاسبه

¹ Magnetotelluric

می‌کنند. در برخی از موارد با استفاده از وارون‌سازی دوبعدی می‌توان تفسیر دقیقی از ساختارهای سه‌بعدی به دست آورد، اما عیب وارون‌سازی دوبعدی این است که در ساختارهای سه‌بعدی دارای پیچیدگی زیاد هستند. مدل‌های دوبعدی حاصل شده منطقی و مناسب نیستند و نیازمند وارون‌سازی سه‌بعدی برای بدست آوردن مدل ایده‌آل که حاوی اطلاعات کافی از منطقه مورد بررسی باشد، هستیم. انرژی زمین‌گرایی، انرژی حرارتی درون زمین است؛ که آثار سطحی آن به صورت چشمه‌های آب‌گرم و یا آبفشان‌ها است و بیشتر در امتداد صفحات تکتونیکی و در نواحی شناخته شده آتشفشانی و لرزه‌خیز متمرکز شده است. از آنجایی که منابع زمین‌گرایی معمولاً با دگرسانی‌های گرمایی همراه است؛ که نتیجه آن‌ها تولید محصولات دگرسانی (کانی-های رسی و...) با مقاومت ویژه پایین در بالا و اطراف منابع زمین‌گرایی که خود از مقاومت‌ویژه بالاتری برخوردار هستند. می‌باشند؛ به همین جهت از روش مگنتوتلوریک برای شناسایی و اکتشاف منابع زمین‌گرایی پس از بررسی‌های اولیه‌ی زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی پیش از هرگونه حفاری اکتشافی استفاده می‌شود

۱-۲ سابقه تحقیق

به دنبال یک آزمایش معمول در کاوش‌های ژئوالکتریکی، تیخونوف^۱ و کانیاردا^۲ سونداژ مگنتوتلوریک را به عنوان روشی برای مطالعه تغییرات قائم در رسانایی الکتریکی زمین طراحی کردند. آنها در مطالعات اولیه خود، از مدل یک بعدی که با امپدانس اسکالر و مقاومت ویژه ظاهری ناوردا با چرخش مشخص می‌شود، فراتر نرفتند. همان آزمایش‌های ابتدایی نشان دادند که ناهمگنی‌های ژئوالکتریکی افقی ممکن است نتایج سونداژ MT را به شدت معوج کنند. ما با نادیده گرفتن این اعوجاج‌ها به دقت تفسیر مگنتوتلوریک آسیب می‌رسانیم. شاید اطلاعات اساسی از دست رفته یا حتی برخی لایه‌ها و ساختارهای ژئوالکتریکی به طور اشتباه ظاهر شوند. تنها در اوایل دهه ۱۹۶۰ بود که نیاز مبرم مگنتوتلوریک به نظریه جامعی که میدان الکترومغناطیسی را درون زمین به طور افقی ناهمگن (دوبعدی و سه‌بعدی) توجیه کند، آشکار شد. این نظریه در موسسه مگنتوتلوریک روسیه، با عنوان نظریه اعوجاج

¹ Tikhonov

² Cagniard

ها شهرت یافت. نتایج اولیه نظریه اعوجاج حاصل کارهای پیشرو انجام شده توسط بردیچوسکی، ابوخوف^۱، دارسولیه^۲ و کونتز^۳، مان^۴، کافمن^۵ و تابورووسکی^۶ هستند. تیخونوف و دیمیتریف شالوده این نظریه را بنا نهادند. آنها سازوکار فیزیکی اعوجاج میدان‌ها را بیان و معیاری برای برآورد شدت آنها پیشنهاد کردند. در حال حاضر چالش اصلی روش مگنتوتلوریک، تفسیر دو و سه‌بعدی داده‌های MT است. روند پیشرفت‌های صورت گرفته در حل این مسئله را می‌توان در آثار آدام^۷، چاپ و ووتسوف، دیمیتریف، باراشکوف^۸، دگروت-هدلین^۹ و... (Berdichevsky and Demitriev, 2008)

پیشرفت قابل توجهی در تفسیر دوبعدی داده‌های MT حاصل شده است. امروزه برنامه‌های کامپیوتری مؤثر و سریعی در اختیار داریم که وارون‌سازی دوبعدی داده‌های MT را بر حسب محیط‌های ناهمگن هموار یا محیط‌های متشکل از قطعات همگن را که در آنها هندسه قطعه‌ها ثابت هستند، انجام می‌دهند. در مجلات جدید ژئوفیزیکی، مثال‌های متنوعی از تفسیر دوبعدی موفق سونداژهای MT را می‌توان یافت که در محدوده‌های زمین‌شناسی با ساختار ژئوالکتریکی به نسبت پیچیده انجام شده‌اند. پیشرفت در تفسیر سه‌بعدی با توسعه روش‌های سریع مدل‌سازی سه‌بعدی و اعمال رهیافت‌های شبه یک بعدی، پیوند خورده است (اسکویی و همکاران، ۱۳۹۴). این رهیافت‌های شبه یک بعدی، وارون‌سازی سه‌بعدی را به یک زنجیره از وارون‌سازی‌های یک بعدی که بر حسب عدم برازش سه‌بعدی تصحیح می‌شوند، تبدیل می‌کند (Berdichevsky and Demitriev, 2008). امروزه به واسطه نتایج امیدوارکننده‌ای که توسط ژدانوف بدست آمده‌اند، به دنبال ایجاد روش‌هایی برای دستیابی به وارون‌سازی سه‌بعدی با سرعت بالا هستیم (Berdichevsky and Demitriev, 2008).

¹ Obukhov
² D'Erceville
³ Kunetz
⁴ Mann
⁵ Kaufman

⁶ Taborvsky
⁷ Adam
⁸ Barashkov
⁹ deGroot-Hedlin

حفر اولین منابع زمین گرمایی در فاصله زمانی بین قرن های ۱۶ و ۱۷ میلادی انجام شد. قرن هجدهم میلادی اولین اندازه گیری ها در بلفورت فرانسه، اوایل قرن نوزدهم استخراج سیالات زمین گرمایی با هدف بهره برداری از پتانسیل انرژی حرارتی در ایتالیا صورت گرفت.

- ۱۸۷۰: استخراج بخارات طبیعی آب با هدف بهره برداری از انرژی مکانیکی آن انجام شد.

- ۱۹۰۴: تولید برق از این انرژی در لاردلو ایتالیا.

- ۱۹۲۰: نخستین چاه های ژئوترمال در ژاپن و کالیفرنیا به طور همزمان.

- ۱۹۲۸: استخراج سیال زمین گرمایی برای تأمین گرمایش منازل در ایسلند.

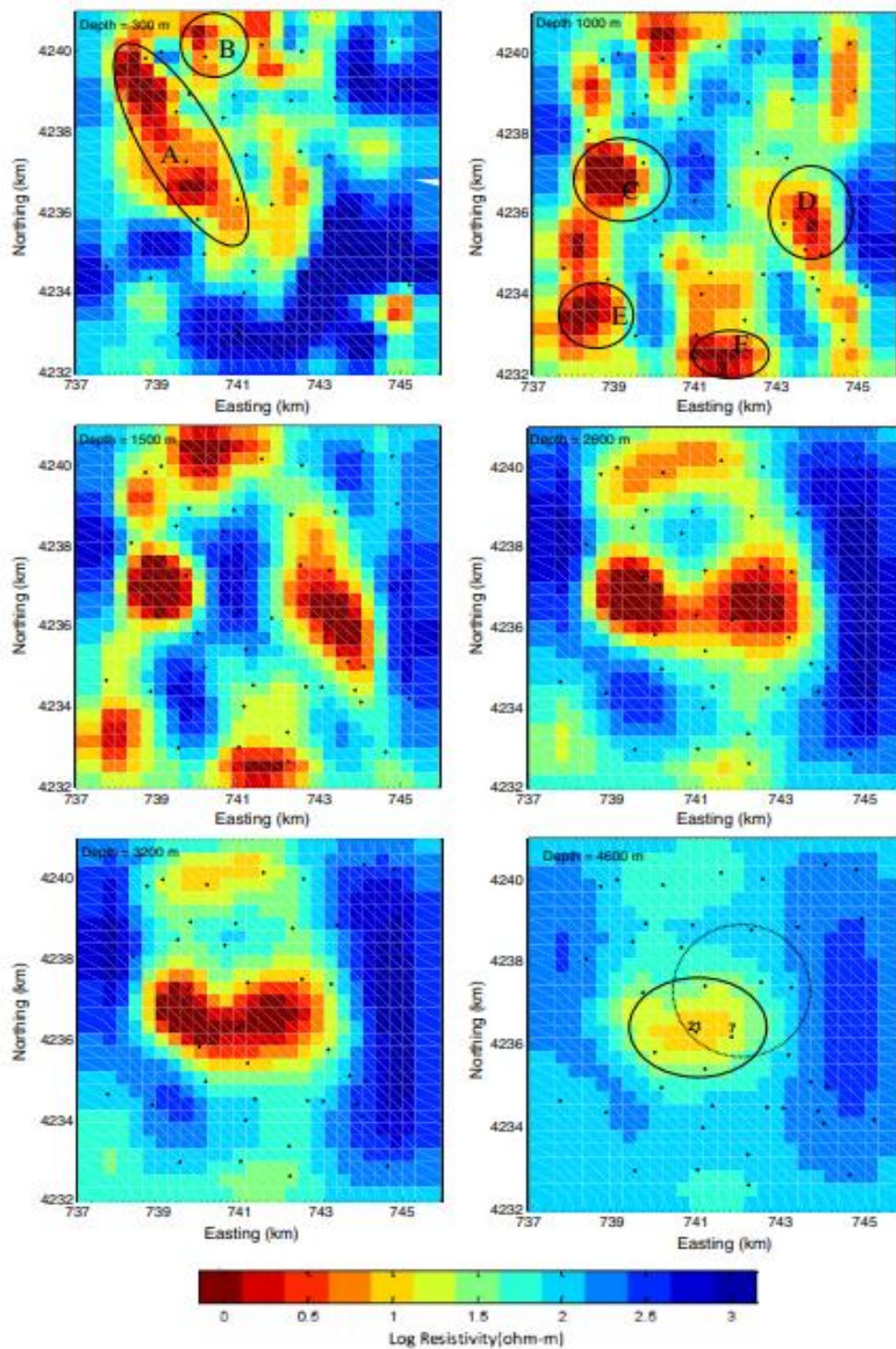
پس از جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۵۸ نیوزلند به عنوان دومین کشور فعال در این زمینه اقدام به تولید برق انرژی زمین گرمایی نمود (سایت انجمن بهینه سازی مصرف انرژی ایران، ۱۳۹۹).

در ایران از سال ۱۳۵۴ مطالعات گسترده ای به منظور شناسایی پتانسیل های منبع انرژی زمین گرمایی توسط وزارت نیرو با همکاری مهندسين مشاور ایتالیایی ENEL در نواحی شمال و شمال غرب ایران در محدوده ای به وسعت ۲۶۰ هزار کیلومتر مربع آغاز گردید. نتیجه این تحقیقات مشخص نمود که مناطق سبلان، دماوند، خوی، ماکو و سهند با مساحتی بالغ بر ۳۱ هزار کیلومتر مربع جهت انجام مطالعات تکمیلی و بهره برداری از انرژی زمین گرمایی مناسب می باشند. در همین راستا برنامه اکتشاف مشتمل بر بررسی های زمین شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمیایی برنامه ریزی شد. در سال ۱۳۶۱ با پایان یافتن مطالعات اکتشاف مقدماتی در هر یک از مناطق ذکر شده، نواحی مستعد با دقت بیشتری شناسایی شده و در نتیجه در منطقه سبلان: نواحی مشکین شهر، سرعین و بوشلی، در منطقه دماوند: ناحیه: نونال، در منطقه ماکو- خوی نواحی: سیاه چشمه و قطور و در منطقه سهند پنج ناحیه کوچکتر جهت تمرکز فعالیت های فاز اکتشاف تکمیلی انتخاب شدند. پس از یک وقفه نسبتاً طولانی و با هدف فعال نمودن مجدد طرح، گزارش های موجود مجدداً در سال ۱۳۶۹ توسط کارشناسان UNDP بازنگری شده و منطقه زمین گرمایی مشکین شهر به عنوان اولین اولویت جهت ادامه مطالعات اکتشافی معرفی شد. پیرو مطالعات ذکر شده پروژه انجام حفاری های اکتشافی، تزریقی، توصیفی به منظور شناسایی بیشتر پتانسیل در

منطقه سرعین مشکین‌شهر در سال ۱۳۸۱ گردید. اولین چاه اکتشافی زمین‌گرمایی ایران به عمق سه هزار متر آبان ماه ۱۳۸۱ آغاز و با نظارت مهندسین مشاور SKM از نیوزلند در طول زمستان ادامه یافت. عملیات حفاری اولین چاه در پایان اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۸۲ خاتمه یافت و طی مدت ۱۸ ماه حفاری‌های اکتشافی شامل سه حلقه چاه اکتشافی عمیق با عمق ۳۲۰۰ متر، ۳۱۷۶، ۲۲۶۰ متر و دو حلقه چاه تزریقی با عمق حدود ۶۵۰ متر به پایان رسید. تست دو حلقه از سه حلقه چاه اکتشافی با موفقیت انجام گرفت. تاکنون ۱۱ چاه حفر شده و سه چاه نیز مرحله آزمایش خروج بخار را با موفقیت سپری کرده‌اند. در زیر به تعدادی از مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده بر روی منطقه سبلان اشاره شده است (سایت انجمن بهینه‌سازی مصرف انرژی ایران، ۱۳۹۹).

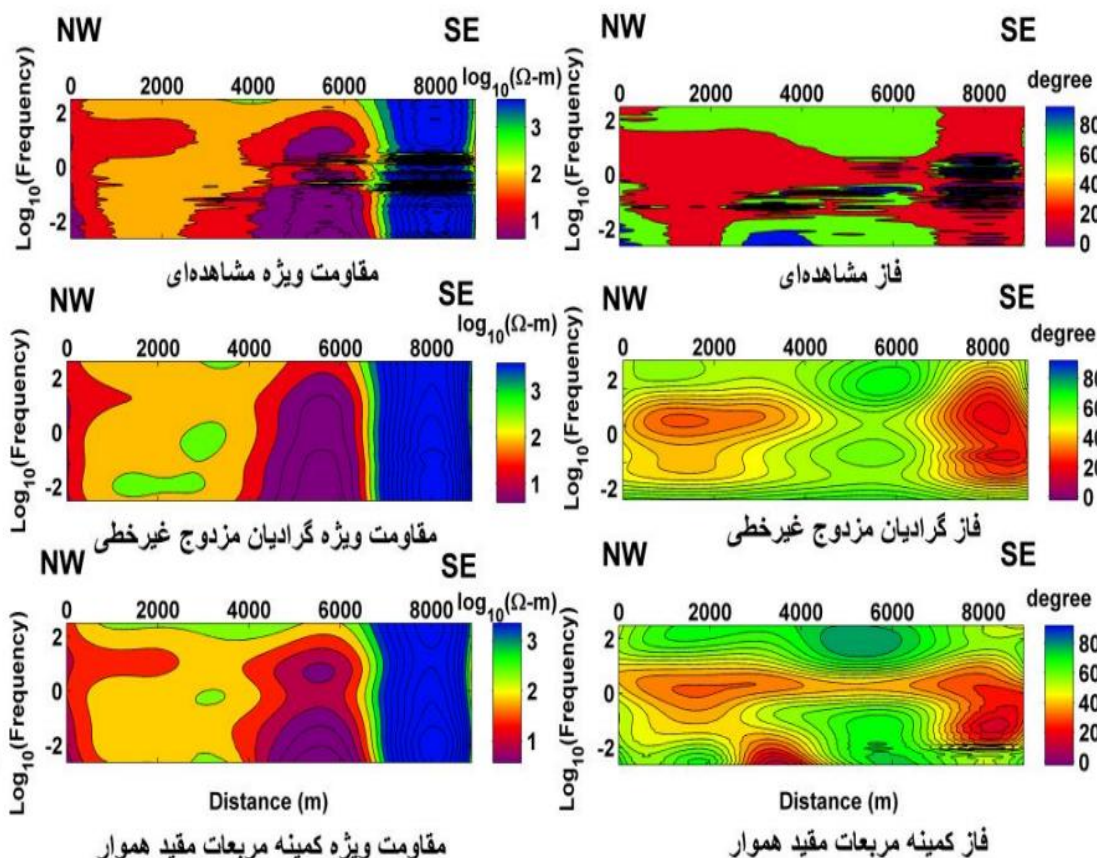
(۱) فنایی خیرآباد و دکتر اسکویی در سال ۲۰۱۱ از دانشگاه تهران مقاله‌ای با عنوان تفسیر داده‌های مگنتو-تلوریک میدان زمین‌گرمایی سبلان در شمال غرب ایران تهیه کرده‌اند. در این مقاله چهارده ایستگاه MT در امتداد یک پروفیل عمود بر ساختار زمین‌شناسی به منظور شناسایی زمین‌شناسی منطقه، از جمله گسترش لایه‌های آب-سنگ و لایه‌های خاک رس استفاده شده است. بازه فرکانسی در این پژوهش ۱ تا ۸۱۹۲ هرتز است. مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی را در طول پروفیل مورد نظر، بررسی کردند. برای تفسیر بهتر از داده‌های تعیین‌کننده برای مدل‌سازی یک بعدی و از مدهای TE و TM برای حالت دوبعدی استفاده شده است. داده‌ها با استفاده از روش مدل‌سازی بهبود یافته پردازش شده‌اند. مدل‌سازی یک بعدی با استفاده از یک ورودی بر مبنای ضریب بازتاب لایه‌ها انجام شد (ژدانو و کلر، ۱۹۹۸). و وارونگی دوبعدی بر مبنای کد معرفی شده توسط اگبرت و سیریپورن‌واراپورن در سال ۲۰۰۰، انجام شد. مدل‌های یک بعدی و دوبعدی حاصل یک توالی کاهش مقاومت طی افزایش عمق را نشان می‌دهند. لایه‌های سطحی با مقاومت ویژه بالا مربوط به بازالت، آندزیت و تراکی‌آندزیت قدیمی و دیگر سنگ‌های نفوذناپذیر همراه با رسانش‌گرمایی، می‌شوند. لایه‌ی دوم یک لایه‌ی بسیار رسانا است و به عنوان مخزنی که انتقال حرارت و مایعات گرم در شکاف‌ها و منافذ آن وجود دارد، تفسیر می‌شود. لایه‌ای که در زیر لایه‌ی مقاوم وجود دارد. به عنوان یک منبع حرارتی تفسیر می‌شود، که جریان گرمایی رسانا را به سمت مخزن تولید

می‌کند. در نتیجه، مدل مقاومت ویژه سطحی سبلان همبستگی خوبی با ویژگی‌های زمین‌شناسی دارد. این مدل یک مدل، مقاومت ویژه رایج را نشان می‌دهد که برای مخازن زمین‌گرمایی ارائه شده است. (۲) قائدرحمتی و همکاران در سال ۲۰۱۳ الگوریتم WSINV3DMT را برای وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های منطقه سبلان به کار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که از عناصر خارج از قطر ماتریس امیدانس نیز می‌توان برای نشان دادن و تفسیر منابع ژئوترمال استفاده کرد. مدل‌های سه‌بعدی به دست آمده با مدل‌های دوبعدی در دسترس و داده‌های حفاری چاه مقایسه شدند و با استفاده از آنها هندسه دقیق منبع ژئوترمال شناسایی شد (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱: مقادیر مقاومت ویژه بدست آمده از مدل سازی وارون سه بعدی در اعماق مختلف، که مناطق رسنای مشخص شده در آن منابع زمین گرمایی می باشند. (قائد رحمتی و همکاران، ۲۰۱۳)

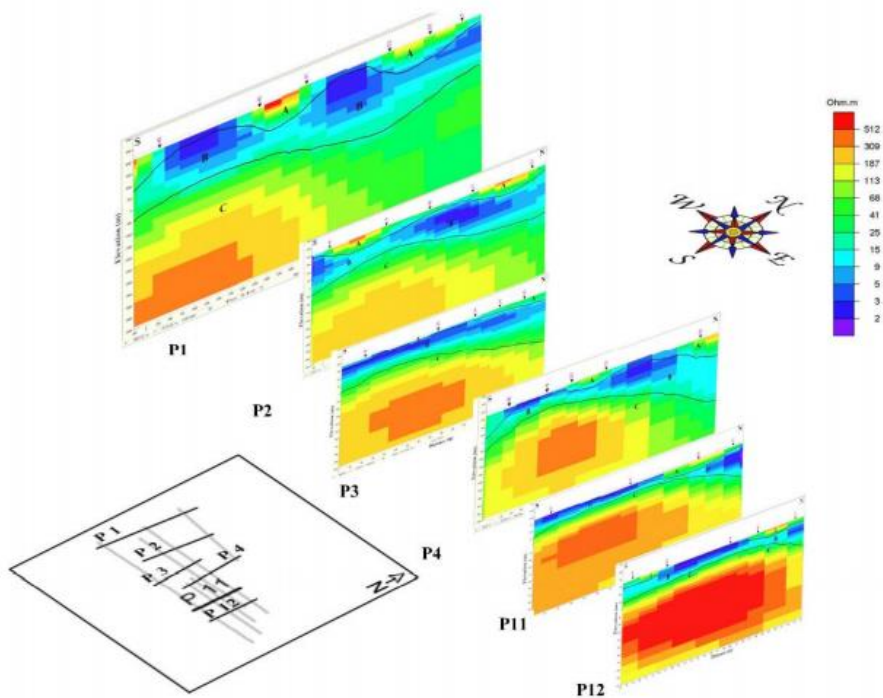
۳) محمدیان سرونمایی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای با این عنوان انجام داده‌اند: مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک سبلان با استفاده از روش‌های کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیرخطی، هدف اصلی این مطالعه بررسی ساختارهای زیرسطحی شمال غرب منطقه سبلان با استفاده از وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک به روش‌های کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیرخطی است. برای رسیدن به این 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 امیدانس نشان دادند که ساختارهای زیر سطحی ایستگاه‌های انتخاب شده، در عمق‌های کم یک بعدی یا دوبعدی و در عمق‌های میانی و عمیق عموماً سه‌بعدی 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 میانگین‌گیری فضایی برای حذف انحرافات گالوانیکی استفاده شد. بعد از تنظیم پارامترهای مدل سازی و مش‌بندی مناسب، وارون‌سازی دوبعدی داده‌ها انجام شد، مدل‌های دوبعدی بدست آمده به خوبی ساختارهای زمین‌گرمایی شامل سنگ پوش، مخزن و منبع داغ را نشان دادند، علاوه بر این تطابق خوبی بین این مدل‌ها و پژوهش‌های گذشته در منطقه وجود دارد (شکل ۱-۲).



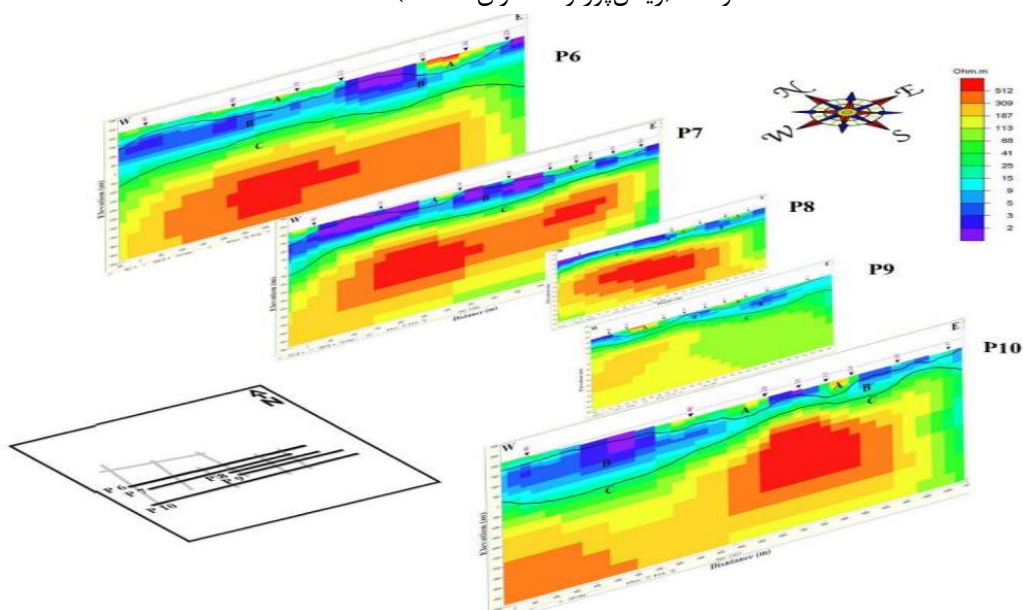
شکل ۱-۲: سمت چپ: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه، از بالا به ترتیب مشاهده‌ای، گرادیان مزدوج غیر خطی و کمینه مربعات مفید هموار، سمت راست: شبه مقاطع مربوط به داده‌های فاز از بالا به پایین به ترتیب مشاهده‌ای، گرادیان مزدوج غیر خطی و کمینه مربعات مفید هموار. (سروندانی و همکاران، ۱۳۹۴)

۴) زینال‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای درباره‌ی اکتشاف ذخایر زمین‌گرمایی در منطقه بوشلی-سبلان با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک، انجام داده‌اند، این مطالعه بر اساس داده‌های ۶۰ ایستگاه مگنتوتلوریک در منطقه‌ای به وسعت ۹۰ کیلومتر مربع در بوشلی، جنوب شرقی شهرستان نیر صورت گرفته است. ابتدا پردازش داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌هایی مبتنی بر روش‌های پایدار و مقاوم در برابر نوفه صورت گرفته است. سپس تحلیل ابعادی داده‌ها بر اساس پارامترهای چولگی، چولگی حساس به فاز، بیضی وارگی و اندیس‌های وزنی نرمال شده مورد توجه واقع شده است. بر اساس این تحلیل‌ها امتداد ساختارهای منطقه بیشتر دوبعدی و با جهت شمالی-جنوبی تشخیص داده شد. در مرحله بعد عملیات

وارون‌سازی یک بعدی و دوبعدی روی داده‌ها در طول ۱۲ پروفیل انجام گرفته است. نتایج مقاطع یک و دوبعدی مقاومت ویژه با تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی، یک سیستم زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه موقعیت مخزن زمین‌گرمایی را در منطقه جنوبی محدوده مورد نظر با کشیدگی به سمت جنوب منطقه نشان می‌دهد (شکل ۳-۱ و شکل ۴-۱).



شکل ۳-۱: نمایش موازی مقاطع شمال-جنوبی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون دوبعدی وارون داده های دو مد TE و TM (زینال پور و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۴-۱: نمایش موازی مقاطع شرقی-غربی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون دوبعدی داده های دو مد TE و TM (زینال پور و همکاران، ۱۳۹۶).

۳-۱ اهداف و ضرورت انجام تحقیق

به دلیل وجود چشمه‌های متعدد آب گرم، محدوده سبلان از سال ۱۳۵۶ به طور گسترده‌ای مورد اکتشاف متعدد ژئوفیزیکی جهت کشف و مدل‌سازی منبع زمین‌گرمایی قرار گرفته است. کوه سبلان غالباً توسط سنگ‌های نفوذی و گدازه‌های آذرین پوشیده شده است و به طور کلی می‌توان محدوده را به چهار بخش: رسوبات یخچالی، رسوبات کواترنری، جریان‌های تراکی آندزیتی پس از کالدرا با سن پلیستوسن و گنبد‌های تراکی داسیتی تا آندزیتی همزمان با کالدرا و توف و جریان‌های تراکی آندزیتی قبل از کالدرا تقسیم کرد (Dostal and Zerbi, 1978) از نظر تکتونیکی، سیستم‌های گسل امتداد لغز با روند شمال غربی- جنوب شرقی، گسل‌های نرمال شمالی - جنوبی و گسل‌های فشارشی شمال شرقی- جنوب غربی ساختارهای غالب منطقه می‌باشند. این منطقه شامل مجموعه‌ای از ولکانیک‌های جوان است، که از دیدگاه زمین‌گرمایی دارای ارزش مطالعاتی است. با توجه به اینکه سیالات از طریق شکستگی‌ها و گسل‌ها به درون واحدهای سنگی نفوذ می‌کنند، از این رو در منابع زمین‌گرمایی مطالعات ساختاری نقش مهمی دارد.

ویژگی شاخص سیستم‌های فعال زمین‌گرمایی، وجود یک منبع حاوی سیال‌های داغ هیدروترمال می‌باشد که اغلب سنگ‌های پیرامون منبع، توسط سیال هیدروترمال دچار دگرسانی شده‌اند. آلتراسیون هیدرو ترمال سبب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی (مقاومت ویژه الکتریکی. چگالی، سرعت امواج لرزه ای) محیط می‌شود که این تغییرات غیرعادی و یا بی‌هنجاری‌ها توسط روش‌های مختلف ژئوفیزیکی شامل روش‌های ژئوالکتریکی و الکترو-مغناطیسی، گرانی سنجی، مغناطیسی و لرزه‌نگاری قابل تشخیص می‌باشند. روش‌های الکترومغناطیسی به خصوص روش مگنتوتلوریک (MT) نقش پر اهمیتی در تصویرسازی هندسه منابع ژئوترمال ایفا می‌کنند. با توجه به اینکه در اکثر موارد زمین واقعی تحت مطالعه دارای پیچیدگی‌های ذاتی است، لذا انجام مدل‌سازی‌های یک بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدل‌سازی سه‌بعدی به خوبی احساس می‌شود.

۴-۱ روش تحقیق

تهیه‌ی داده‌های مورد نیاز برای انجام کار

تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی قبل از برداشت‌های ژئوفیزیکی

کیفیت داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

آنالیز و تحلیل ابعادی روی داده‌ها انجام شده است. تحلیل ابعادی داده‌های مگنتوتلوریک در انتخاب روش مناسب برای وارون‌سازی و تفسیر بسیار سودمند می‌باشد. هر چند بررسی اولیه تانسور امیدانس اطلاعاتی از بعد ژئوالکتریکی ساختارهای زیرسطحی فراهم می‌کند. به دلیل اثر ناهمگنی‌های سطحی، تانسور امیدانس به تنهایی توانایی تشخیص ابعاد صحیح ساختار ناحیه‌ای این که آیا داده‌ها متأثر از آشفتگی گالوانیک شده‌اند یا نه، را ندارد. بنابراین انجام تحلیل ابعادی در تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک ضروری است. روش‌های متنوع گرافیکی و مبتنی بر ثابت چرخش تانسور امیدانس برای تحلیل ابعادی وجود دارد.

مدل سازی یک بعدی با استفاده از روش اکام^۱ و بوستیک^۲

مدل سازی دوبعدی با استفاده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی^۳

انجام مدل سازی وارون سه بعدی که با استفاده از الگوریتم مدل سازی WSINV3DMT انجام شده است.

اگر اطلاعاتی از ساختار زیر سطحی زمین، مانند عمق لایه‌ها و یا مقدار مقاومت ویژه آنها را به عنوان اطلاعات اولیه یا مدل اولیه در فرایند وارون‌سازی جای داد، در این صورت فرایند وارون‌سازی به سمتی پیش می‌رود که مدل بدست آمده کمترین ساختار را داشته باشد، در حالی که داده‌ها هم برازش شوند. در حقیقت این گونه نسبت که در صورت نبود مدل اولیه، هیچ قید دیگری برای مدل بدست آمده وجود نداشته باشد. برازش داده‌ها تا یک حد مناسب، قیدی است که تضمین می‌کند، مدلی که با کمترین ساختار بدست آمده است، بهترین پاسخ برای فرایند وارون‌سازی است. نکته‌ای که در اینجا جای بحث دارد، تفاوت مدل اولیه با مدل آغازگر است. تفاوت این

¹ Occam

² Bostick

³ Non Linear Canjugate Gradient

دو مدل در این است که مدل اولیه دارای اطلاعات مهمی در مورد ساختار مدل اصلی، مانند ژرفای لایه‌ها است، اما مدل آغازگر فقط مدلی است که فرایند وارون‌سازی با آن شروع می‌شود و لزومی ندارد که پاسخ نهایی به آن نزدیک باشد. با شروع از یک مدل آغازگر، مدل بدست آمده در هر تکرار به مدل اصلی، که مورد نظر ماست نزدیک‌تر می‌شود تا جایی که به مقدار برازش مناسب داده‌ها برسیم. مدل آغازگر می‌تواند به صورت یک زمین همگن با مقاومت ویژه ۵۰، ۲۰، ۱۰، ۱ و یا هر مقدار منطقی دیگری باشد. باشد، مدل‌سازی ۷۰ سونداژ برداشت شده توسط کارشناسان شرکت فیلیپینی EDC در دو فاز ۱ و ۲ در سال ۲۰۰۷، چگونگی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی لایه‌های مختلف زیر سطح زمین تا عمق چند کیلومتری و رسیدن تا منابع ژئوترمال و همچنین وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی مناطق مزبور مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت عمق منابع آب‌گرم در قسمت‌های مختلف این مناطق و نقشه‌های ژئوترمال لازم از مناطق مزبور تهیه شده است.

۱-۵ ساختار پایان نامه

فصل اول شامل کلیات پایان‌نامه می‌باشد.

فصل دوم، به تئوری امواج الکترومغناطیسی و مگنتوتلوریک در ساختارهای یک بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی می‌پردازد.

فصل سوم، موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی ناحیه و منطقه‌ی مورد مطالعه و اطلاعات مربوط به برداشت داده‌های MT که در سال ۲۰۰۷ توسط شرکت EDC انجام شده است، را در بر می‌گیرد.

فصل چهارم، شامل مدل‌سازی‌های یک بعدی با استفاده از روش هموارسازی آکام و تبدیل عمق بوستیک برای سونداژهای پروفیل A (۲، ۶، ۲۱، ۲۵، ۲۴، ۲۸) و مدل‌سازی وارون دوبعدی ۲۴ داده‌ی مگنتوتلوریک منطقه مورد

مطالعه در سه پروفیل تعریف و آورده شده است. در این فصل مبحث وارون‌سازی داده های مگنتوتلوریک، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

فصل پنجم، شامل وارون‌سازی سه‌بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از روش اُکام و بهره‌گیری از کد WSINV3DMT، به همراه تفاسیر آنها می‌باشد..

فصل ششم یا فصل پایانی در برگیرنده‌ی نتیجه‌گیری و پیشنهادات در رابطه با مطالعاتی که در آینده قرار است انجام گیرد، می‌باشد.

فصل ۲

تئوری روش مگنتوتلوریک

۱-۲ مقدمه

روش مگنتوتلوریک یک تکنیک اکتشافی با چشمه طبیعی است که از طیف وسیع تغییرات طبیعی میدان ژئو-مغناطیسی به عنوان چشمه، برای القای الکترومغناطیسی در زمین بهره می‌گیرد. از این روش مگنتوتلوریک با تکنیک‌های ژئوالکتریک با چشمه مصنوعی، که در آنها یک جریان به درون زمین تزریق می‌شود، متفاوت است. مگنتوتلوریک با سونداژ ژئومغناطیسی^۱ (GDS)، دارای ارتباط بسیار نزدیکی است. سونداژ ژئومغناطیسی در اواخر سدو نوزدهم و بعد از آن که حضور میدان‌های مغناطیسی متغیر حاصل از القا به وسیله شوستر (۱۸۸۹) و لام تأیید شد، توسعه پیدا کرد. آنها یک تکنیک ریاضیاتی، که توسط گاوس (۱۸۳۹) برای جداسازی میدان‌های مغناطیسی با منشأ داخلی و منشأ خارجی ابداع شده بود، را برای داده‌های رصدخانه‌ی ژئومغناطیسی بکار گرفتند، و به یک مؤلفه داخلی مهم پی بردند. در سال ۱۹۵۰ تیخونوف و کاگنیارد (۱۹۵۳) عنوان کردند که اگر تغییرات میدان الکتریکی و مغناطیسی به طور همزمان اندازه‌گیری شوند، آنگاه نسبتی مختلط حاصل می‌شود که بیانگر نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی به درون زمین است. عمق نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی به درون زمین وابسته به دوره تناوب سونداژ الکترومغناطیسی و رسانایی زمین است. در واقع این اساس تکنیک MT است.

۲-۲ منبع سیگنال‌های مگنتوتلوریک

روش مگنتوتلوریک از سیگنال‌های الکترومغناطیسی طبیعی برای دریافت از راه دور ساختار مقاومت الکتریکی زیر زمین استفاده می‌کند. به این دلیل که عمق بررسی با ریشه مربع فرکانس رابطه معکوس دارد، روش MT می‌تواند به سه حوزه استخراج مجزا طبقه‌بندی شود.

۱. داده MT حوزه زمان برای به تصویر کشیدن عمق از 1-1000 km بکار برده می‌شود و از سیگنال‌هایی با فرکانس کمتر از 0.1 Hz استفاده می‌کند. تفکیک‌پذیری در اعماق بیش از 1-2 km کم است و این سیگنال‌های کم فرکانس، طول موج‌های طولانی دارند.

¹ Geomagnetic Depth Sounding

۲. از پهنای باند MT (0.001-500 Hz) برای مطالعات در مقیاس پوسته زمین استفاده می‌شود.

۳. ^۱ AMT از فرکانس‌های بالا (1 Hz – 10000) استفاده می‌کند تا ساختارهای با عمق کم را بررسی کند. این کار تفکیک‌پذیری خوبی در مقیاس‌های 1000 – 10 m به ما می‌دهد و در نتیجه مناسب‌ترین روش برای اکتشافات معدنی است.

در فرکانس‌های زیر 1 Hz، سیگنال‌های EM^۲ که در MT استفاده شده‌اند، ریشه در یونسفر دارند. این تغییرات از نوسانات در قدرت و حجم بادهای خورشیدی، بدست می‌آیند. در فرکانس‌های بالای 1 Hz، چشمه، فعالیت‌های بادهای خورشیدی است، که در محدوده زمین‌رسانای یونسفر در سراسر جهان منتشر می‌شود. (Vozoff, 1991). زمانی که رعد و برق به سرعت اتفاق می‌افتد، سیگنال‌های AMT عموماً در یک نوار فرکانسی کاملاً گسترده ارائه می‌شوند. با این وجود، ممکن است سیگنال‌ها در فرکانس نزدیک به 2 Hz در نوار به اصطلاح میرا شده AMT خصوصاً در طول روز، ضعیف باشند.

با اندازه‌گیری تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین اطلاعات در مورد مقاومت ویژه ساختار حاصل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌کنید عمق نفوذ میدان الکترومغناطیسی به فرکانس بستگی دارد. در اصطلاح MT، یک تمایز میان محدوده‌های فرکانسی اعمال شده، صورت گرفته است. هنگامی که تغییرات فرکانس کمتر از ۱۰ هرتز مورد استفاده قرار می‌گیرد از روش MT استفاده می‌شود، اما برای فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ هرتز از روش AMT استفاده می‌شود. این تمایز تا حدی مبتنی بر مکانیزم چشمه و عمدتاً به دلیل تفاوت در ابزار اندازه‌گیری است.

^۱ Audiomagnetotellurics

2 Electromagnetic

۳-۲ تئوری امواج الکترومغناطیس

معادلات ماکسول

ماکسول قوانین اساسی الکتریسیته و مغناطیس را با برخی تصحیحات به صورت چند معادله اساسی درآورد که در الکترومغناطیس به نام معادلات ماکسول شناخته می‌شود. این معادلات به صورت چهار معادله دیفرانسیلی زیر خلاصه می‌شوند (Telford et al., 1990):

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (۱-۲) \quad (\text{قانون فارادی})$$

$$\nabla \times \bar{H} = J + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (۲-۲) \quad (\text{قانون آمپر})$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (۳-۲) \quad (\text{قانون پیوستگی شار مغناطیسی})$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (۴-۲) \quad (\text{قانون کلمب})$$

که در آن $\bar{E}$ شدت میدان الکتریکی (v/m)، $\bar{B}$ القاء مغناطیسی (V_s/m^2)، $\bar{H}$ شدت میدان مغناطیسی (A/m)، $\bar{J}$ شدت چگالی جریان الکتریکی (A/m^2)، D جریان جابجایی (A_s/m^2)، P چگالی حجمی بار (A_s/m^3) و t زمان می‌باشند.

میدان‌های الکترومغناطیسی در محیط همگن و همسانگرد (با رسانایی الکتریکی ثابت $\left[\frac{s}{m}\right]$)، با گذردهی الکتریکی یکنواخت (A_s/v_m) و نفوذپذیری مغناطیسی μ (V_s/A_m) را می‌توان توسط معادلات ماکسول توصیف کرد. با در نظر گرفتن میدان‌های با تغییر زمانی هارمونیک ($e^{i\omega t}$) این معادلات به صورت زیر در می‌آیند (Telford et al., 1990).

$$\nabla \times \bar{E} = -i\omega\mu\bar{H} \quad (۵-۲)$$

$$\nabla \times \bar{H} = i\omega\epsilon\bar{E} + \sigma\bar{E} \quad (۶-۲)$$

برای مناطق دارای رسانایی معین، به هنگام عبور جریان بار چندانی ذخیره نمی‌شود و $P = 0$ می‌شود از این رو رابطه (۴-۲) به صورت زیر در می‌آید :

$$\nabla \cdot \bar{D} = 0 \quad (۷-۲)$$

$$\nabla \cdot \bar{J} = 0 \quad (۸-۲)$$

بر طبق معادله (۹-۲) چگالی جریان الکتریکی $\bar{J}$ طبق قانون اهم متناسب با میدان الکتریکی می‌باشد :

$$\bar{J} = \sigma\bar{E} \quad (۹-۲)$$

که در معادلات بالا $\omega = \frac{2\pi}{T}$ فرکانس زاویه‌ای می‌باشد و i شاخص قسمت موهومی عدد مختلط و برابر $\sqrt{-1}$ است. گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری نسبی مغناطیسی را در زمین مقادیر ثابتی را در نظر می‌گیرند ($\mu_2 \approx 1, \epsilon_2 \approx 1$). بدین ترتیب پارامترهای $\mu = \mu_2\mu_0$ و $\epsilon = \epsilon_2\epsilon_0$ به مقادیر خلأ (هوا ، μ_0 ، ϵ_0) میل می‌کنند. با توجه به تقریب ایستایی میدان EM ، جریان جابجایی صرف نظر می‌شود و میدان‌ها تنها به صورت پخش منتشر می‌شود ($\omega\epsilon \ll \sigma$).

با ترکیب معادلات (۷-۲) و با لحاظ معادلات (۸-۲)، مشاهده می‌شود که هر دوی میدان‌ها معادله زیر را برقرار می‌کنند (Lezaeta, 2001):

$$=0\nabla^2 \left[\frac{\bar{E}}{B} \right] + y^2 \left[\frac{\bar{E}}{B} \right] \quad (۱۰-۲)$$

این معادله (معادله هلمولتز) شکل معادله انتشار موج را دارد که ثابت انتشار آن برابر مقدار زیر می‌باشد :

$$y^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma \quad (۱۱-۲)$$

حال برای یک موج انتشاری EM در امتداد محور z (که جهت z را به سمت زمین مثبت در نظر می گیرند)، معادله (۱۰-۲) دارای حل زیر می باشد :

$$e^{-\gamma z} \left[\frac{\bar{E}}{B} \right] = \left[\frac{\bar{E}_0}{B_0} \right] \quad (۱۲-۲)$$

با جایگذاری این حل در معادلات ماکسول می توان به بعضی خواص مهم امواج الکترومغناطیسی صفحه ای در یک محیط همسانگرد بدون چشمه و نامحصور پی برد. با صفر شدن دیورژانس ها، میدان ها کاملاً در صفحه x-y واقع شده و عمود بر راستای انتشار z قرار می گیرند به طوری که :

$$\bar{E} = (E_x, E_y, 0) \quad , \quad \bar{H} = (H_x, H_y, 0) \quad (۱۳-۲)$$

با استفاده از معادلات (۷-۲)، دو میدان با رابطه زیر به هم مرتبط می شوند (با در نظر گرفتن این مطلب که $\bar{B} = \mu \bar{H}$ می باشد) :

$$E_x = \frac{i\omega\mu}{y} H_y \quad , \quad E_y = \frac{-i\omega\mu}{y} H_x \quad (۱۴-۲)$$

این رابطه را می توان به صورت ماتریسی زیر درآورد (Eggers,1982) :

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{i\omega\mu}{y} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (۱۵-۲)$$

این بسط حالت الکترومغناطیسی عرضی^۱ (TE) انتشار موج را تعریف می کند، یک خاصیت مهم از این حل این است که نسبت بین مؤلفه های دو میدان برای زمین همگن ثابت می باشد :

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{i\omega\mu}{y} \quad (۱۶-۲)$$

¹ Transverse Electromagnetic

ثابت Z ، امپدانس مشخصه محیط^۱ نامیده می‌شود. این کمیت اساس روش MT را فراهم می‌کند. در نتیجه در داخل محیط رسانا (مثلاً زمین)، میدان‌ها به صورت حالت TE رفتار می‌کنند که در بالا به آن اشاره شد. نسبت میدان‌ها در داخل محیط رسانا معادله (۱۶-۲) را برقرار می‌کند. اگر یک شرط دیگر نیز به این ترتیب اضافه شود که جریان‌های رسانایی بر جریان‌های جابجایی غلبه دارند یعنی $\omega\epsilon \gg \sigma$ (که این حالت اغلب در زمین برقرار است)، در این صورت معادله (۱۶-۲) به شکل ساده زیر در می‌آید:

$$Z \approx \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}} \quad (۱۷-۲)$$

و با استفاده از این رابطه و معادله (۱۶-۲)، مقاومت ویژه نیم‌فضا با استفاده از دامنه میدان‌ها به شکل زیر به دست می‌آید (Eggers, 1982):

$$P = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (۱۸-۲)$$

در معادله (۱۱-۲) جمله $\gamma^2 = K^2 = i\omega\mu\sigma$ فاکتور پخش^۱ می‌باشد که در حالت $\omega\epsilon \gg \sigma$ حاصل می‌شود.

۲-۴ عمق پوست

عمق پوست^۲ معیاری است که نفوذ امواج الکترومغناطیسی به زمین را مشخص می‌کند. این کمیت بر اساس تعریف، ضخامتی از عمق زمین است که وقتی امواج EM به آن عمق می‌رسند، دامنه‌ی آنها به اندازه $1/e$ مقدار اولیه در سطح کاهش می‌یابد. عمق پوست δ فاکتوری برای میزان نفوذ امواج الکترومغناطیس به داخل زمین است. این فاکتور از طریق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (Jones, 1983a; Bostick, 1997; Niblett and Sayn, 1960):

$$\delta = \left(\frac{2}{\sigma\omega\mu}\right)^{1/2} = \left(\frac{2p}{2\pi f 4\pi \cdot 10^{-7}}\right)^{1/2} = 503 \left(\frac{p}{f}\right)^{1/2} \quad (۱۹-۲)$$

^۱ Characteristic impedance of the medium

^۲ Skin depth

که در آن δ عمق پوست بر حسب متر، p مقاومت ویژه بر حسب اهم متر، و f فرکانس میدان بر حسب هرتز می‌باشند.

با توجه به این رابطه، امواج الکترومغناطیسی می‌توانند نفوذ بیشتری در زمین‌های مقاوم داشته باشند و یا هنگامی که فرکانس موج بالا باشد، عمق نفوذ آنها در زمین‌های رسانا چندان زیاد نخواهد بود. وقتی مقدار $\sigma\omega\mu^{1/2}$ عددی کوچک باشد، میدان الکترومغناطیسی بدون میرایی سریع، در محیط انتشار می‌یابد و به همین دلیل این میدان نمی‌تواند جریان قابل توجهی را در زمین القا کند. همچنین در مواقعی که این مقدار عددی بزرگ باشد، جریان‌های سطحی میدان مغناطیسی ثانویه بزرگی را تولید می‌کند که غیر هم‌فاز با میدان اولیه است به طوری که بخشی یا تمام اثرات میدان اولیه را از بین می‌برد. بنابراین میدان مغناطیسی می‌تواند به آسانی در مواد با مقاومت ویژه ی بالا نفوذ کند، اما به دلیل این که این امواج توسط مواد رسانا تضعیف می‌شوند، می‌توان گفت که هر روش اکتشافی که در آن امواج الکترومغناطیسی به کار گرفته می‌شود. در تفکیک‌پذیری اجسام رسانا مؤثر است و بهترین روش برای منطق پوشیده شده توسط سنگ‌های مقاوم است (هاشمی، ۱۳۹۱، مرادزاده، ۱۹۹۸).

۲-۵ تانسور امپدانس و بردار تیپر

مؤلفه‌های تانسور امپدانس از رابطه‌های زیر بدست می‌آید :

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j} \quad (2-20)$$

در حوزه‌ی فرکانس، مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی $E(\omega)$ و مغناطیسی $H(\omega)$ توسط تانسور 2×2 امپدانس (اهم) به یکدیگر مرتبط می‌شوند. به طور مشابه، تانسور مگنتوتلوریک $M(\omega)$ به صورت رابطه‌ی بین مؤلفه‌های افقی میدان الکترکی $E(\omega)$ و میدان مغناطیسی القایی $B(\omega)$ تعریف می‌شود :

$$M(\omega) = \frac{1}{\mu_0} Z(\omega) \quad (2-21)$$

برای تبدیل مؤلفه‌های تانسور امپدانس و تانسور مگنتوتلوریک به یکدیگر می‌توان از رابطه‌ی (۲-۲۰) استفاده کرد. تانسور امپدانس برای هر فرکانس به صورت زیر بیان می‌شود :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

این تانسور می‌تواند به کمک ماتریس چرخش (رابطه‌ی ۲-۲۳) و توسط رابطه‌ی (۲-۲۴) چرخانده شود که در این رابطه R_θ^T ترانهادی ماتریس R_θ می‌باشد.

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

$$\hat{Z} = R_\theta Z R_\theta^T \quad (2-24)$$

در مبحث القاء موج، نشان داده شده است که در مورد یک توزیع رسانایی کلی در زمین، مؤلفه‌های میدان الکتریکی افقی (E_x, E_y) و مؤلفه‌های میدان مغناطیسی عمودی (H_z) به صورت زیر به مؤلفه‌های میدان مغناطیسی افقی (H_y, H_x) مرتبط هستند (Contwell, 1960).

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

$$H = T^T \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

در رابطه‌ی (۲۵-۲) ، Z یک ماتریس 2×2 است که به عنوان تانسور امپدانس مختلط شناخته می‌شود و در رابطه‌ی (۲۶-۲) T نماد ترانزفوردی بردار تیپر است.

T برداری است که به عنوان تابع تبدیل ژئومغناطیسی مختلط یا بردار تیپر^۱ شناخته شده و به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$T = (A \cdot B)^T \quad (2-27)$$

که A و B مؤلفه‌های مختلط بردار تیپر در راستای x و y است.

Z و T به عنوان توابع تبدیل مگنتوتلوریک شناخته می‌شوند. برای یک زمین یک بعدی معادلات ماکسول ساختار زیر را برای تانسور امپدانس و بردار تیپر ارائه می‌دهند.

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & Z \\ Z & 0 \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

که Z توسط معادله زیر بدست می‌آید :

$$Z = \frac{\omega \mu_0}{k} = \frac{E_x}{H_y} = - \frac{E_y}{H_x} \left(\frac{v/m}{A/m} = ohm \right) \quad (2-29)$$

¹ tipper

۶-۲ ساختارهای یک بعدی

ساختارهای یک بعدی شامل چند لایه همگن افقی می باشد که مقاومت ویژه در آنها تنها با عمق تغییر می کند. برای چنین ساختاری تغییرات افقی میدان ها صفر است. در ساختارهای یک بعدی امپدانس مستقل از جهت اندازه گیری می باشد یعنی در هر فرکانس :

$$| \varphi_{yx} - \varphi_{xy} | = 180^0 \quad \text{و} \quad P_{xy} = P_{yx} = P_a \quad \text{یا} \quad Z = \frac{E_x}{H_y} = - \frac{E_y}{H_x} \quad \text{و} \quad Z_{xy} = - Z_{yx}$$

و P_a که تابعی از فرکانس است، مقاومت ویژه ظاهری زمین لایه ای می باشد (Moradzadeh, 1998).

۷-۲ ساختارهای دوبعدی

یک ساختار دوبعدی ژئوالکتریکی، ساختاری است که مقاومت ویژه الکتریکی و میدان ها علاوه بر تغییر نسبت به عمق، در یک جهت افقی نیز به طور جانبی تغییر می کند. بیشتر ساختارهای زمین شناسی مانند تاقدیس ها، ناودیس ها، زون های همبری، دایک ها، دره های ریفی و رودخانه ای تقریباً به صورت ساختارهای دوبعدی هستند. در ساختارهای دوبعدی خواص الکتریکی به موازات یک جهت افقی (مثلاً X) ثابت است که به آن جهت امتداد گفته می شود. برای مدل دوبعدی شکل (۱-۲)، معادلات در هم کنش امواج تخت الکترومغناطیس برای دو وضعیت (مُد^۱) بررسی می شود (Vozoff, 1991; Moradzadeh, 1998).

وقتی مؤلفه میدان الکتریکی در جهت امتداد قطبیده باشد و مؤلفه مغناطیسی عمود بر آن باشد این مد را حالت الکتریکی عرضی^۲ (TE) یا E موازی (E₁) می نامند. حالت دوم موقعی است که مؤلفه میدان الکتریکی عمود بر

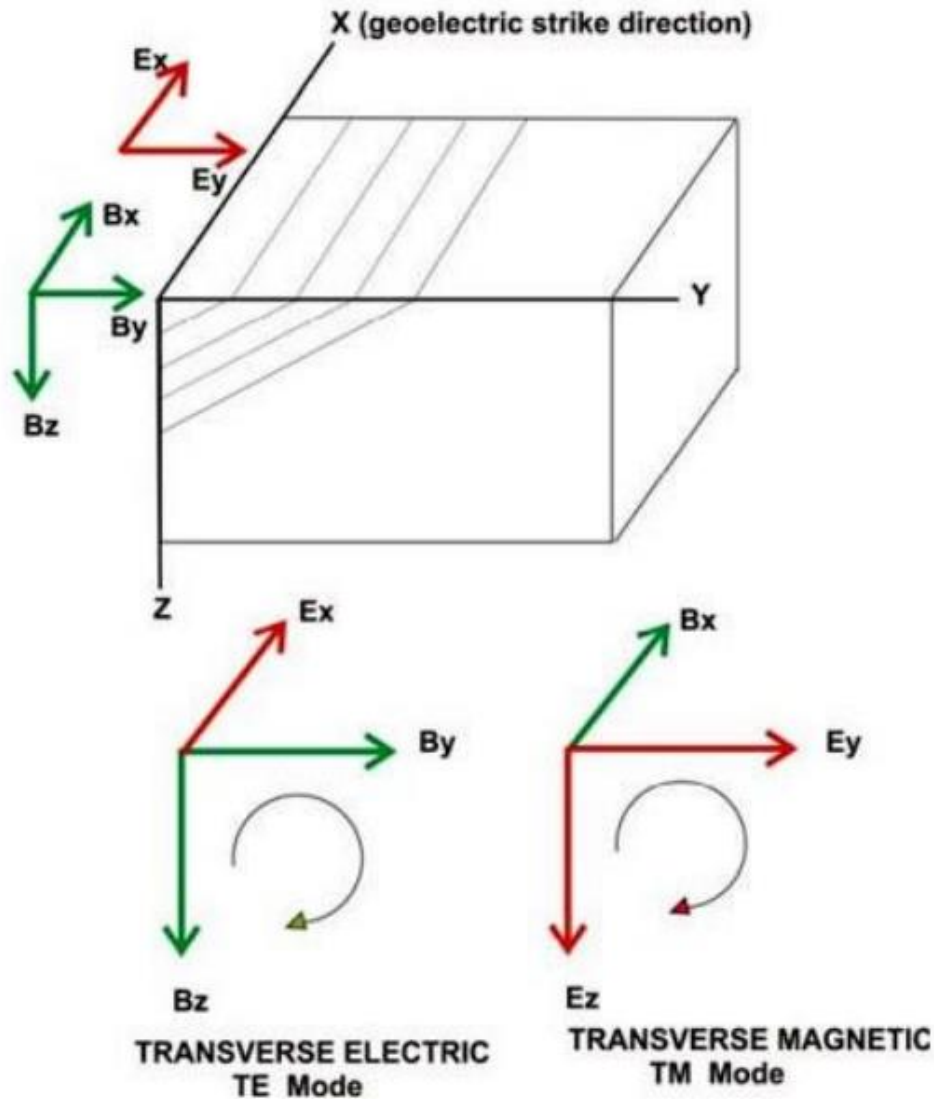
¹ Mode

² Transverse Electric

امتداد باشد (E_1) یا زمانی که مؤلفه میدان مغناطیسی در جهت امتداد قطبیده باشد، این مد را حالت مغناطیسی عرضی¹ (TM) می نامند.

رفتار این دو نوع قطبش در برخورد با ناهمگنی‌های جانبی متفاوت است. در مد TE شارش جریان در جهت امتداد ساختار است نه در جهت ناپیوستگی جانبی مقاومت ویژه و وقتی این مد به ناپیوستگی نزدیک می شود به همواری از آن عبور می کند. بنابراین اطلاعاتی که توسط پاسخ مد TE حاصل می شود، توسط ناهمگنی‌های جانبی کمتر مغشوش می شود و نسبت به این ناهمگنی‌های جانبی کمتر حساس است. در مد TM به علت وجود اختلاف در مقاومت ویژه دو طرف ناهمگنی جانبی، یک ناپیوستگی در اندازه میدان الکتریکی وجود دارد که این ناپیوستگی با تشکیل شدن بار روی سطح ناهمگنی جبران می شود. بنابراین مد TM به ناهمگنی‌های جانبی بیشتر حساس است و در تعیین سطح مشترک بین نواحی با مقاومت ویژه مختلف موثرتر است (Dobrin and Savit, 1988). در واقع مد TM ساختارها را باردار می کند و آنومالی‌های آن دارای طبیعت گالوانیکی می باشد در حالی که مد TE ساختارها را باردار نمی کند و آنومالی‌های آن دارای طبیعت القایی می باشد. مد TM به ساختارهای رسانا و نزدیک سطح حساس تر است، اما مد TE به ساختارهای مقاوم و عمیق حساس می باشد و در نهایت اینکه مد TM در برابر جابجایی استاتیکی حاصل از آنومالی‌های سه بعدی نزدیک سطح تأثیر پذیرتر از مد TE می باشد (Berdichevsky et al., 1998).

¹ Transverse Magnetic



شکل ۲-۱: موقعیت میدان‌های الکترومغناطیسی برای یک ساختار ژئوالکتریکی دوبعدی (Xiao, 2004)

در روش مگنتوتلوریک کمیت‌هایی وجود دارد که اصول تفسیر این روش بر پایه به دست آوردن این پارامترها می‌باشد. در ادامه برخی از این پارامترها به صورت مختصر توضیح داده می‌شوند.

۲-۸ امپدانس برای ساختارهای سه‌بعدی

رسانایی الکتریکی زمین ممکن است در همه جهات تغییر کند. به طوریکه تقریب‌های یک بعدی و دوبعدی ناکارآمد باشند و باعث ایجاد ساختارهای سه‌بعدی گردند. برای یک ساختار سه‌بعدی هیچ گونه قانون معینی وجود ندارد

که توابع تبدیل از آنها پیروی کنند و در این گونه ساختارها تغییرات رسانندگی در تمام جهات وجود دارد. بنابراین در این گونه ساختارها معادلات ماکسول نمی‌توانند به دو مد TE و TM تجزیه شوند و همه مؤلفه‌های تانسور امپدانس آن غیر صفر می‌باشند و به صورت معادله (۲-۳۰) نشان داده می‌شود.

$$Z_{3D} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

اگرچه تجربه عمومی وجود دارد که عناصر غیر قطری تانسور امپدانس تقریباً در همه موارد در اولین و سومین ربع در صفحه مختلط قرار می‌گیرند، اما با هیچ گونه چرخشی نمی‌توان عناصر قطری تانسور امپدانس را حذف کرد (Andemariam, 2012).

در مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با تقارن محوری، پارامتر قطبش عدم تقارن صفر است و بر قطبش خطی میدان‌های ویژه الکتریکی دلالت می‌کند. میزان عدول این پارامتر از مقدار صفر، معیاری از عدم تقارن ژئو الکتریکی است. ارتباط بین مقادیر مؤلفه‌های اصلی تانسور امپدانس و امپدانس‌های اسکالر Z_{det} و Z_{ave} که ناوردای^۱ چرخشی هستند، از رابطه زیر معرفی می‌شوند (Berdichevsky and Dmitriev, 1976).

$$Z_{ave} = \sqrt{(-Z_{xy} \cdot Z_{yx})}, \quad Z_{det} = \sqrt{(Z_{xx} \cdot Z_{yy} - Z_{xy} \cdot Z_{yx})} \quad (2-31)$$

از زمانی که بردیچوسکی و دمیتریو (۱۹۷۶) این روش را به منظور کاهش اثرات ناهمگنی‌های سطحی معرفی کردند، محققین زیادی با مطالعات خود نشان دادند که با بکارگیری و مدل‌سازی به کمک روابط معادله (۲-۳۱) می‌توانند نتایج قابل قبولی را برای داده‌های مگنتوتلوریک داشته باشند؛ حتی هنگامی که توده‌های دو و سه‌بعدی روی داده‌ها تأثیر گذاشته باشند. بنابراین از این روش برای انجام مدل‌سازی یک بعدی استفاده می‌شود (Moradzadeh, 1998).

¹ Invariant

۲-۹ مقاومت ویژه ظاهری

مقاومت ویژه ی الکتریکی در اعماق یک زمین ناهمگن را نمی‌توان به صورت غیرمستقیم و با استفاده از اندازه-گیری‌هایی که در سطح زمین صورت گرفته، به دست آورد. بلکه یک مقاومت ویژه ی ظاهری که با استفاده از عمق‌های نفوذ متناظر با میدان‌های الکترومغناطیسی به دست می‌آید، می‌تواند محاسبه شود.

مقاومت ویژه ی ظاهری بر حسب مؤلفه‌های تانسور امپدانس معادله (۲ - ۲۵) به شکل زیر تعریف می‌شود :

$$P_{aij} = |Z_{ij}|^2 / \omega \mu \quad (۲-۳۲)$$

در حالت یک زمین همگن (با رسانایی σ) ، مقاومت ویژه ی ظاهری مقدار واقعی رسانایی زمین را بازتاب می‌دهد:

$$P_a = 1/\sigma = |Z|^2 / \omega \mu \quad (۲-۳۳)$$

این کمیت یک تابعی از فرکانس می‌باشد. در اندازه‌گیری‌های صحرایی و با استفاده از واحدهای کاربردی میلی‌ولت بر کیلومتر برای میدان الکتریکی، گاما برای میدان مغناطیسی و فرکانس دوره‌های $f = \omega / 2\pi$ این معادله به شکل زیر تقلیل می‌یابد :

$$P_a = \frac{0.2}{f} |Z|^2 \quad (۲-۳۴)$$

در حضور ناهمگنی‌های جانبی در زیر زمین رابطه‌ی بین مؤلفه‌های عمودی دو میدان نیز، به راستای مختصات وابسته می‌شود و مقاومت ویژه ی ظاهری به راحتی به شکل مستقیم نمی‌تواند تعریف شود.

در یک حالت ویژه‌ی مهم، زمانی که زمین در امتداد یک محور افقی یکنواخت باشد (ساختار دوبعدی)، میدان‌ها به صورت خطی موازی با محور تقارن یا امتداد ساختار قطبیده می‌شوند و دوباره رابطه‌ی اسکالر بالا که در ابتدا

توسط کانپارد (۱۹۵۳) ارائه شد، صادق خواهد بود. در صورتی که محورهای مختصات منطبق بر محورهای اصلی ساختار باشند، تانسور امپدانس دارای مؤلفه‌های صفر بر روی قطر اصلی خواهد بود:

$$Z_{II} = \begin{bmatrix} 0 & Z_1 \\ -Z_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (۲-۳۵)$$

و یک زوج از مقاومت ویژه‌های ظاهری به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$P_{a2} = \frac{0.2}{f} |Z_2|^2 \quad \text{و} \quad P_{a1} = \frac{0.2}{f} |Z_1|^2 \quad (۲-۳۶)$$

که این مقاومت‌ها موازی و عمود بر امتداد ساختار می‌باشند. در یک ایستگاه منفرد امکان تعیین اینکه کدام محور متناظر با امتداد ساختار می‌باشد از روی Z وجود ندارد. این مسئله را می‌توان با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و یا با استفاده از داده‌های مؤلفه‌ی عمودی میدان مغناطیسی حل کرد.

با توجه به اینکه تانسور امپدانس را می‌توان با توابع ریاضی در جهت خاصی چرخاند، نیازی به گستراندن سنسورهای صحرایی در امتداد یک روند زمین‌شناسی یا محور خاصی وجود ندارد. در حالت سه‌بعدی در صورتی که نتوان تانسور امپدانس را به جهتی چرخاند که مؤلفه‌های قطر اصلی آن صفر شوند، مقاومت ویژه‌ی ظاهری را به راحتی نمی‌توان تعریف کرد. در حالت دوبعدی مرسوم است که از مؤلفه‌های قطر فرعی برای تعریف یک جفت مقاومت ویژه‌ی ظاهری استفاده می‌شود:

$$P_{xy} = \frac{0.2}{f} |Z'_{xy}|^2 \quad \text{و} \quad P_{yx} = \frac{0.2}{f} |Z'_{yx}|^2 \quad (۲-۳۷)$$

که زاویه‌ی چرخش محورها طوری انتخاب می‌شود که مؤلفه‌های قطر اصلی Z' تقریباً صفر شود.

مؤلفه‌های قطر فرعی Z که مختصات آن چرخش یافته است مؤلفه‌های اصلی تانسور امپدانس نامیده می‌شوند.

فازهای مؤلفه‌های قطر فرعی نیز که از Z' استخراج می‌شوند، پارامترهای مفیدی می‌باشند. برای یک زمین که به طور یکنواخت باشد، با استفاده از خواص تحلیلی تابع امپدانس در حیطه‌ی فرکانسی مختلط می‌توان نشان داد که فاز و دامنه $Z(\omega)$ مستقل از یکدیگر می‌باشند. بدین ترتیب در صورتی که در داده‌های واقعی برآوردهای به دست آمده از دامنه‌های میدان‌ها پراکندگی زیادی را نشان بدهند، می‌توان از رابطه‌ی بین فاز و دامنه برای درون‌یابی داخل فواصل فرکانسی استفاده کرد (Mitchell, 2014).

فاز مؤلفه‌ی امپدانس، اختلاف فاز بین مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی را توصیف می‌کند:

$$Z = \left| \frac{E_i}{H_j} \right| e^{i\varphi} \rightarrow \varphi = \psi_{Ei} - \psi_{Hj} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \right) \quad (2-38)$$

که $i, j = x, y$ و $\psi_{Ei, Hj}$ به ترتیب فاز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد. در یک

زمین همگن فاز امپدانس برابر مقدار زیر می‌شود:

$$Z = \frac{i\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \sqrt{i} \Rightarrow \varphi = \pi/4 \quad (2-39)$$

این بدین معناست که با توجه به فرایند پخش انتشار امواج صفحه‌ای الکترومغناطیسی در محیط رسانا، میدان الکتریکی به اندازه‌ی ۴۵ درجه نسبت به میدان مغناطیسی تقدم فاز می‌یابد.

در یک محیط با لایه‌بندی یک بعدی، اگر امواج الکترومغناطیسی، به یک محیط با رسانایی بالاتر نفوذ کند، فاز از ۴۵ درجه بیشتر می‌شود. همچنین اگر امواج الکترومغناطیسی به یک محیط با رسانایی کمتر نفوذ کند، تأخیر فاز از ۴۵ درجه پایین‌تر می‌رود. این بدان معناست که در فرایند پخش، اختلاف فاز بین مؤلفه‌های عمود بر هم میدان الکتریکی و مغناطیسی، در زمانی که میدان‌ها به یک محیط با رسانایی کمتر نفوذ می‌کنند، کاهش می‌یابد.

در حالت‌های یک بعدی و دوبعدی فازها در ربع اول یا سوم $\left(\left[0, \frac{\pi}{2} \right] \cdot \left[\pi, \frac{3\pi}{2} \right] \right)$ قرار می‌گیرند؛ یعنی جزءهای موهومی و حقیقی Z_{xy} (یا Z_{yx}) دارای علامت یکسانی می‌باشند. علت این امر رابطه‌ی علت معلولی تداخل

میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی القایی در زمین می‌باشد؛ یعنی هر میدان ثانویه‌ی القایی مرتبط با اختلاف رسانایی باید از میدان تابشی اولیه (چشمه‌ی اولیه) متابعت کند (Mitchell,2014).

طبق قرارداد، مؤلفه‌ی Z_{xy} مثبت و پیامد آن مؤلفه‌ی Z_{yx} به عنوان منفی در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه‌ی این فرض‌ها، فازهای امپدانس را به ترتیب در ربع‌های اول و سوم اعمال می‌کنند.

۲-۱۰ اثر جابجایی ایستا^۱

مسئله اصلی که در سونداز MT با آن مواجه می‌شویم آشفتگی میدان الکتریکی، به علت ناهمگنی‌های الکتریکی و تغییرات عرضی در مقاومت ویژه ساختارهای الکتریکی نزدیک سطح می‌باشد. دلیل ایجاد این پدیده نیز ناپیوستگی میدان الکتریکی افقی به هنگام عبور از ناهمگنی‌های جانبی است (شکل ۲-۲ (الف)).

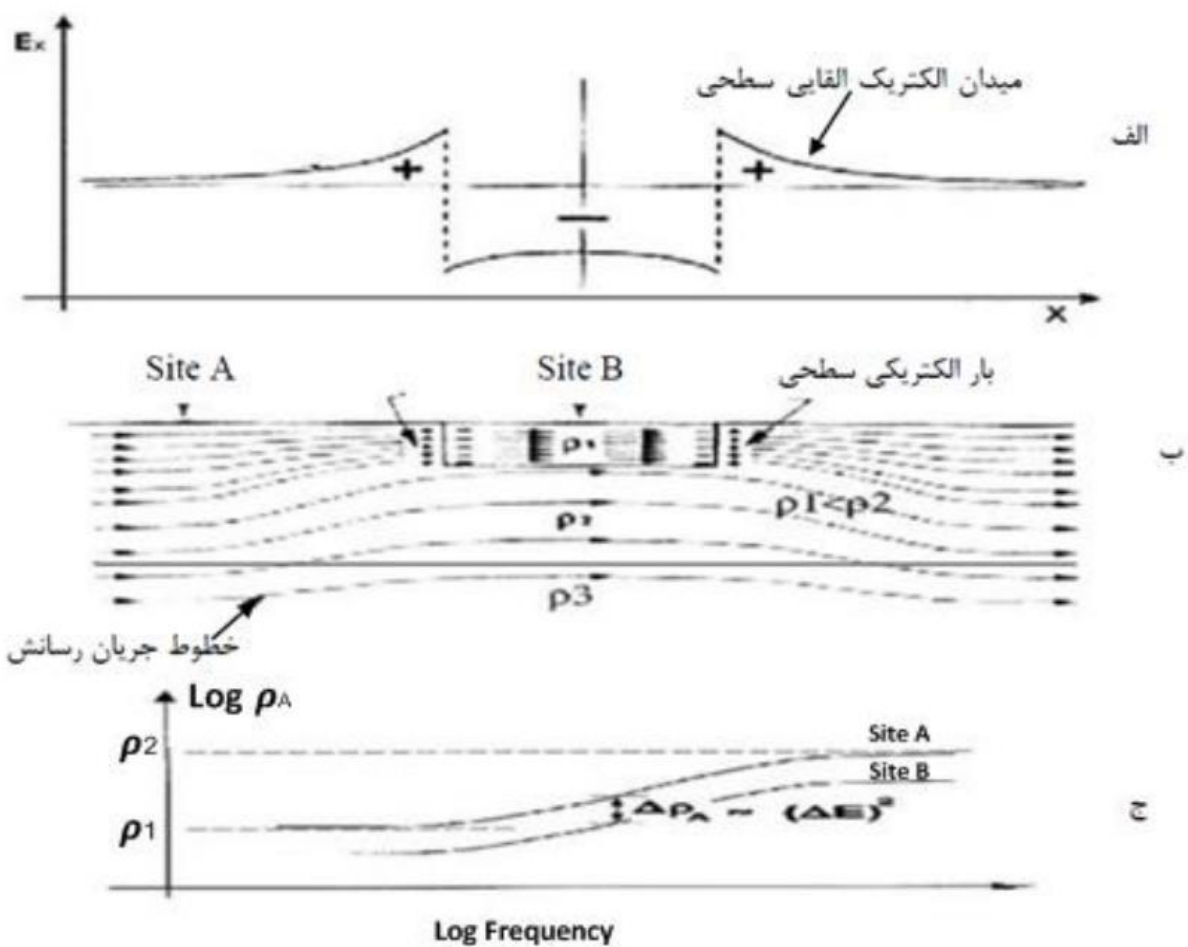
از آنجایی که در تمامی فرکانس‌ها و مقاومت ویژه‌ها، اندازه عمق پوسته از ابعاد ناهمگنی الکتریکی سطحی بزرگتر است، میدان الکتریکی در داخل توده رسانای سطحی به طور یکنواخت کاهش می‌یابد (شکل ۲-۲ (الف)). این کاهش در میدان الکتریکی، نمودار مقاومت ویژه محاسبه شده را در محل سونداز B نسبت به نمودار سونداز A نیز کاهش می‌دهد. این اثر بر روی تمام فرکانس‌ها ثابت است و وقتی داده‌های سونداز مقاومت ویژه را در مقیاس لگاریتمی کامل ترسیم می‌کنیم، منحنی مقاومت ویژه مستقل از فرکانس به سمت پایین جابجا می‌شود (شکل ۲-۲ (ج)) و اگر مقاومت ویژه سطحی جسم نسبت به محیط اطراف بیشتر باشد منحنی مقاومت ویژه سونداز MT به طرف بالا جابجا می‌شود.

در شکل (۲-۲) اگر مقاومت ویژه توده سطحی (P_1) کمتر از مقاومت ویژه زمینه (P_2) باشد آنگاه منحنی سونداز مقاومت ویژه در محل ایستگاه B به اندازه ثابت ($\Delta\rho$) نسبت به منحنی مشابه در محل سونداز A به طور مستقل از فرکانس به سمت پایین جابجا می‌شود. اگر ($P_2 < P_1$) باشد آنگاه جابجایی منحنی مقاومت ویژه در

¹ Static Shift

محل سونداژ B نسبت به محل سونداژ A به اندازه ثابت ($\Delta\rho$) به سمت بالا در تمامی فرکانس‌ها جابجا می‌شود. از آنجایی که این مقدار جابجایی منحنی مقاومت ویژه در تمام فرکانس‌ها ثابت است به همین جهت به آن جابجایی ایستا (استاتیکی) می‌نامند.

جهت آشکارسازی جابجایی ایستا، باید منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز را بر حسب فرکانس برای هر سونداژ یا به صورت شبه مقطع در طول پروفیل ترسیم نمود. در شبه مقطع مقاومت ویژه بر حسب فرکانس در طول پروفیل، جابجایی ایستا به صورت نوارهای عمودی موازی با محور فرکانس مشاهده می‌شود. این در حالی است که این سری نواری در شبه مقاطع فاز پروفیل قابل رویت نمی‌باشد (Moradzadeh, 2003).



شکل ۲-۲: الف- تغییر میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار در مجاورت نا همگنی جانبی ب- تمرکز جریان الکتریکی در زون رسانا ج- کاهش مقاومت ویژه ظاهری در تمام فرکانس ها در ایستگاه B (Moradzadeh, 2003a)

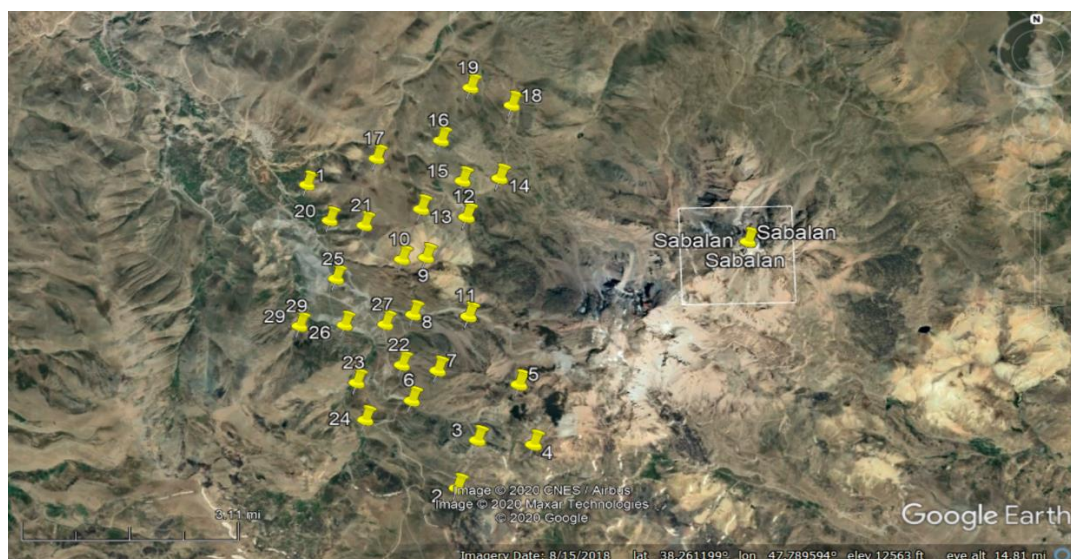
فصل ۳

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و اطلاعات مربوط به داده
های برداشت شده

۳-۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

ناحیه مورد بررسی در محدوده جغرافیایی $38^{\circ}, 30' - 38^{\circ}, 38'$ ، عرض شمالی و $48 - 47^{\circ}, 30'$ طول شرقی، در استان اردبیل قرار دارد. کوه آتشفشان سبلان با قله ای به بلندی ۴۸۱۴ متر از سطح دریا، بلندترین نقطه منطقه را تشکیل داده است و پست‌ترین نقطه با بلندی ۸۰۰ متر از سطح دریا در شمال شرقی مشکین شهر قرار دارد.

منطقه مورد بررسی در دره موئیل در شیب شمال غربی کوه سبلان در استان اردبیل قرار دارد. این منطقه در مختصات جغرافیایی $38^{\circ}, 12' - 38^{\circ}, 26'$ و $38^{\circ}, 16' - 38^{\circ}, 43'$ عرض شمالی و $47^{\circ}, 43' - 47^{\circ}, 45'$ طول شرقی، در قسمت شمال غربی منطقه زمین‌گرمایی، جنوب مشکین شهر و فاصله‌ی کمتر از ۱۲۰ کیلومتر از شهر اردبیل واقع شده است. ارتفاع منطقه در شمال، نزدیک روستای موئیل، ۲۴۰۰ متر و در جنوب نزدیک به قله سبلان، ۳۷۰۰ متر می‌باشد. بنابر مختصات مشخص شده از منطقه برداشت، فاصله‌ی آن از روستای موئیل برابر ۱/۷ کیلومتر می‌باشد. نقشه هوایی منطقه همراه با ایستگاه‌های مگنتوتلوریک در شکل (۳-۱) آورده شده است.



شکل ۳-۱: نقشه هوایی منطقه همراه با ایستگاه‌های مگنتوتلوریک (Google Earth, 2020)

۲-۳ زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی شامل مجموعه‌ای از ولکانیک‌های جوان است که از دیدگاه زمین‌گرمایی دارای ارزش مطالعاتی می‌باشد. کوه آتشفشانی سبلان، در ۴۰ کیلومتر جنوب غرب اردبیل، و در ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی مشکین شهر قرار دارد. رشته کوه آتشفشانی سبلان از دره قره سو در شمال غربی اردبیل شروع و در جهت شرقی- غربی به طول ۶۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۴۸ کیلومتر تا کوه قشا داغ در جنوب اهر، ادامه می‌یابد. مخروط آتشفشانی سبلان از نوع چینه‌ای و گدازه‌های آن سطحی معادل ۱۲۰۰ کیلومتر مربع را اشغال کرده‌اند. این مخروط بر روی یک هورست با روند شرقی- غربی قرار دارد. کوه پلیوکواترنری سبلان در انتهای شرقی رشته کوه قشا داغ قرار گرفته است (کلاگری، ۱۳۹۶).

این رشته کوه با راستای تقریباً شرقی- غربی، از گردنه گویجه بل به سوی شرق به طول حدودی ۷۰ کیلومتر امتداد یافته است. قدیمی‌ترین سنگ‌هایی که در این رشته کوه و در رخساره شیبست سبز و مرمر است. سن احتمالی این مجموعه از دگرگونی به پالئوزوئیک می‌رسد (امینی، ۱۳۶۳).

آتشفشان سبلان دارای ارتفاع ۴۸۲۰ متر از سطح دریا می‌باشد. این آتشفشان دارای سه قله است که به دلیل فروریختگی بسیار فرسوده شده است. قله بلندتر (سبلان سلطان) و قله‌های دیگر (هرم داغ یا سبلان کوچک و آقام داغ یا کسری) نام دارند. در بلندترین قله نیز دریاچه‌ای وجود دارد که بازماند دهانه آتشفشان است. مطالعات انجام شده بر روی آتشفشان سبلان نشان‌دهنده‌ی آن است که از دوره کواترنری پیشین آغاز گشته و تا آخرین دوره یخچالی (در حدود ۲۰ تا ۷۰ هزار سال پیش) ادامه داشته است (کلاگری، ۱۳۹۶).

۱-۲-۳ زمین شناسی و سنگ شناسی آتش فشان سبلان

مخروط سبلان بر روی یک سیستم مرکزی بزرگ است. این مخروط بر روی یک سیستم، هورست با روند شرقی- غربی جای گرفته است.

دیدون و ژانس در سال ۱۹۷۶ سن آتش‌فشان سبلان را پلیو کواترنر، می‌دانند. تکاپوهای آتش‌فشانی پیش از سبلان را به میوسن نسبت می‌دهند.

در حالیکه باباخانی، اسکویی و ریو (۱۳۶۹) بر این باورند که نخستین جریان گدازه سبلان بر روی توف‌ها و کنگلومراها، جای گرفته است.

این گدازه‌ها هم ارز نهشته‌های کواترنر پیشین حوضه مشکین شهر هستند. به عبارتی تکاپوهای آتش‌فشان یاد شده طی زمان‌های کواترنر پیشین آغاز شده و تا واپسین دوره یخچالی (۲۰ تا ۷۰ هزار سال پیش) دنباله داشته است. دویدن و ژومن تکاپوی آتش‌فشان را به سه بخش تقسیم کرده اند:

روانه‌های گدازه سبلان کهن:

روانه‌های گدازه‌ای که در این گام پدید آمده است، بیشترین بخش کوه سبلان را در بر می‌گیرد. نامبردگان تکاپوهای این بخش را به نوبه خود به ۵ گام بخش کرده اند. باباخانی، اسکویی و ریو آنها را در سه گام خلاصه می‌کنند. این سه گام عبارت اند از:

الف) آندزیت‌های زیرین که در دامنه‌های شمالی و شرقی، رخنمون دارند.

ب) تراکی آندزیت‌های میانی که بخش اصلی آتش‌فشان سبلان را می‌سازند. در همه‌ی کناره‌های کوه سبلان گسترش دارند.

ج) جریان گدازه داسیتی که تکامل ردیف آتش‌فشان، پیش از کالدرای آن به پایان می‌رسد.

فرونشست:

در این بخش مرکزی ساختمان پیشین گسیخته شده است. فرجام این رخداد، پیدایش فرورفتگی دایره‌ای به قطر ۲۰ کیلومتر است. همزمان با فرونشست کالدرا، فوران‌های انفجاری نیز، روی داده است. همچنین از مواد آذرآوری تشکیل شده اند. سازوکار این فرایند را این گونه توضیح می‌دهند.

نخست بهمن‌های سوزان و ویرانگر که قطعاتی از سری‌های قدیمی‌تر را نیز، با خود آورده‌اند و در دره‌های یخچالی روان شدند. سپس فوران مواد انفجاری همگام با ریختن روانه‌های ایگنمبریتی و پومسی با وسعت کم که در دره قطور سویه پخش شده اند، رخ داده است. .

گنبد ها و روانه های گدازه سبلان جوان:

پس از فرو ریزش کالدرا، فوران مواد آتش‌فشانی رخ داده است. بلندترین بخش‌های مرکزی آتش‌فشان. در این گام، پدیدار شده است. درگام یاد شده نیز گازهای گوگردی و تکاپوهای آتش‌فشانی سبلان ترکیب ریولیتی تا داسیتی دارند. نکته‌ی مهم درباره‌ی تکاپوهای آتش‌فشانی این است که همه‌ی سنگ‌های آن از نوع آلکالن سدیک هستند (قربانی و همکاران، ۱۳۸۷).

۳-۲-۲ چینه شناسی^۱

سنگ‌های دگرگون شده از نوع آمفیبول شیست و آهک‌های مرمری که در جنوب شرقی شهرستان مشکین شهر برونزد دارند، احتمالاً کهن‌ترین واحد سنگی ناحیه را تشکیل می‌دهند، زیرا نهشته‌های پرمین که قدیمی‌ترین واحد رسوبی شناخته شده ناحیه به شمار می‌رود، فاقد آثار دگرگونی است و سن دقیق آنها نا مشخص است. در محدوده مورد بررسی فعالیت‌های گسترده ماگمایی از ائوسن تا کواترنری قابل دیدن است.

¹ Stratigraphy

در طی فاز داین (پالئوسن زیرین) حجم بزرگی از ماگما بیرون آمده و در ادامه آن فاز بازشدگی صورت گرفته است. (Didon et Gemain, 1976)

گدازه‌های ائوسن در نمودار کونو (۱۹۵۹)، در محدوده آلکالن و در نمودار پسریلو و تیلور، پاره‌ای در محدوده آبساروکیت و یا شوشونیت (و یک نمونه در محدوده باناکیت) قرار گرفته است. اغلب نمونه‌ها به جز برخی از انواع اسیدی گرایش سدیک نشان می‌دهند. در نمودار میدل موست (۱۹۸۰)، بیشتر در محدوده تراکی بازالت، نفلینیت، تراکی آندزیت و یا تراکیت قرار می‌گیرند. انواع سدیک اغلب تحت اشباع هستند. آنالیزم نیز در نمونه‌های باریک تا متوسط دیده شده است. با توجه به وجود شیل و توفیت در لابه‌لای گدازه‌ها، می‌توان برای آنها محیط دریایی را تصور نمود، ولی برخی از گدازه‌ها کاوکدار بوده و برشی هستند و محیط تشکیل آنها کم عمق است. پس با توجه به گرایش آلکالن، گدازه‌ها از مسیر گسل‌های عمیق بیرون آمده‌اند.

در آغاز الیگوسن بر اثر ذوب شدن پوسته قاره‌ای، سنگ‌های نفوذی از نوع مونزونیت، کوارتز مونزونیت و گرانودیوریت به وجود آمده و ریفت ائوسن التیام یافته است.

در نئوژن نیز فعالیت گسترده آتش‌فشانی انجام گرفته و ردیفی از جریان‌های گدازه با ترکیب متوسط با سنگ‌های پیروکلاستیک با ترکیب اسیدی در محیط قاره‌ای تشکیل یافته است.

ساختار آتش‌فشانی سبلان که از نوع مرکزی است در محل تقاطع شکستگی‌های اصلی و بر روی هورست قدیمی بنا گشته و در طی مراحل رشد خود کالدرای ریزشی در محدوده‌ای به قطر ۱۲ کیلومتر به وجود آورده است. پیش از کالدرای ساختار آتش‌فشانی سبلان در طی پنج فاز تکامل یافته است. این آتش‌فشان از نوع استراتوولکان بوده است. جریان‌های گدازه اغلب از نوع تراکی آندزیت و داسیت همراه با فازهای انفجاری است که فعالیت تناوبی دارند. و از ماگمای قلیائی بازالتی پیش از سبلان (میوسن) نتیجه شده‌اند. سری‌های پس از کالدرای نیز شامل پنج

فاز عمده است که در طی آن قلل اصلی به شکل مخروط‌های استرومبولی طبقه‌ای تشکیل یافته است (دیدون و ژومن، ۱۹۷۶).

سنگ‌های دگرگون شده:

واحد sch

در جنوب شرقی شهرستان مشکین شهر، مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگون شده شامل شیست‌ها را نشان می‌دهد. N60E/29NW و آهک‌های مرمری دیده می‌شود. که شیستوزیته آنها جهت وشیب

دگرگونی آنها از نوع دما- جنبشی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست سبز است، ولی در همسایگی توده نفوذی گرانیتوئیدی به طور محلی تأثیرات دگرگونی حرارتی موجب افزایش درجه دگرگونی شده است. شیست‌ها کانی‌های کوارتز، بیوتیت، هورنبلند سبز، پلاژیوکلاز (آلبیت) و در برخی موارد کلسیت و اپیدوت را در بردارند و بافت آنها لپیدوبلاستیک تا نماتوبلاستیک می‌باشد. در آهک‌های مرمری بخش‌های تیره رنگ شامل دیوپسید، هورنبلند سبز و اپیدوت است و تکرار بخش‌های روشن و تیره ساختمان نواری در سنگ ایجاد کرده است. بر روی سطح فرسایشی آنها قرار گرفته است. در نقشه لاهرود Q^{vb} گدازه و گدازه‌های برشی واحد نهشته‌های کرتاسه بر روی سطح فرسایشی این واحد جای گرفته (باباخانی، ۱۳۷۰) و از همین رو سن آنها پیش از کرتاسه در نظر گرفته شده است، ولی در محدوده این نقشه با توجه به دگرگونی نبودن نهشته‌های پرمین سن آنها پیش از پرمین محسوب گشته است.

پالئوزوئیک بالایی و پرمین:

واحد P_d^s

این واحد شامل ماسه‌سنگ‌های آهکی متمایل به قرمز رنگ است که به طور عادی در زیر سنگ‌های آهکی روته جا گرفته و احتمال می‌رود وابسته به سازند دورود باشد. برونزد کوچکی از این واجد در محدوده نقشه وجود دارد.

واحد P_r^l

این واحد شامل سنگ‌های آهکی ستر تا متوسط لایه چرت‌دار به رنگ خاکستری تیره متمایل به قرمز است و رگچه‌های بی‌شمار کلسیتی سفید رنگ و در مواردی اکسید آهن متمایل به قرمز آنها را قطع کرده است. ضخامت آنها به ۱۰۰ متر می‌رسد. سنگ‌های آهکی این واحد به طور هم‌شیب و عادی بر روی ماسه‌سنگ‌های سازند دورود قرار گرفته است که بر روی سطح فرسایشی آنها بوده و فسیل‌های زیر را در بر دارند.

Agathammina sp., Hemigordius sp., coral

Age: Late Permian

در بررسی‌های صحرایی نیز فسیل‌های زیر دیده شده است.

Fusulinid., Bellerophontacea

سنگ‌های آهکی این واحد با سازند روته در خور سنجش است.

سنوزوئیک:

سنگ‌های آذرین، آذرآواری و رسوبی سنوزوئیک بیش از ۹۵ درصد مساحت نقشه را فرا گرفته‌اند و از قدیم به جدید به شرح زیر است.

الف) پالئوژن

ب) ائوسن

سنگ‌های آتشفشانی، آذرآواری و رسوبی ائوسن در شمال شرقی و غربی منطقه مورد بررسی گسترش دارند و ترکیب آنها اغلب در حد تراکی آندزیت، تراکی بازالت و تراکیت بوده و بخش‌هایی که ترکیب اسیدی دارند. از گسترش کمتری برخوردار می‌باشد. ضخامت آنها در مجموع به حدود ۲۰۰۰ متر می‌رسد، که در محدوده‌ی آلکانی قرار می‌گیرند. واحد های سنگی ائوسن از پائین به بالا به شرح زیر است:

شمال شرقی ورقه:

واحد E^{pb}

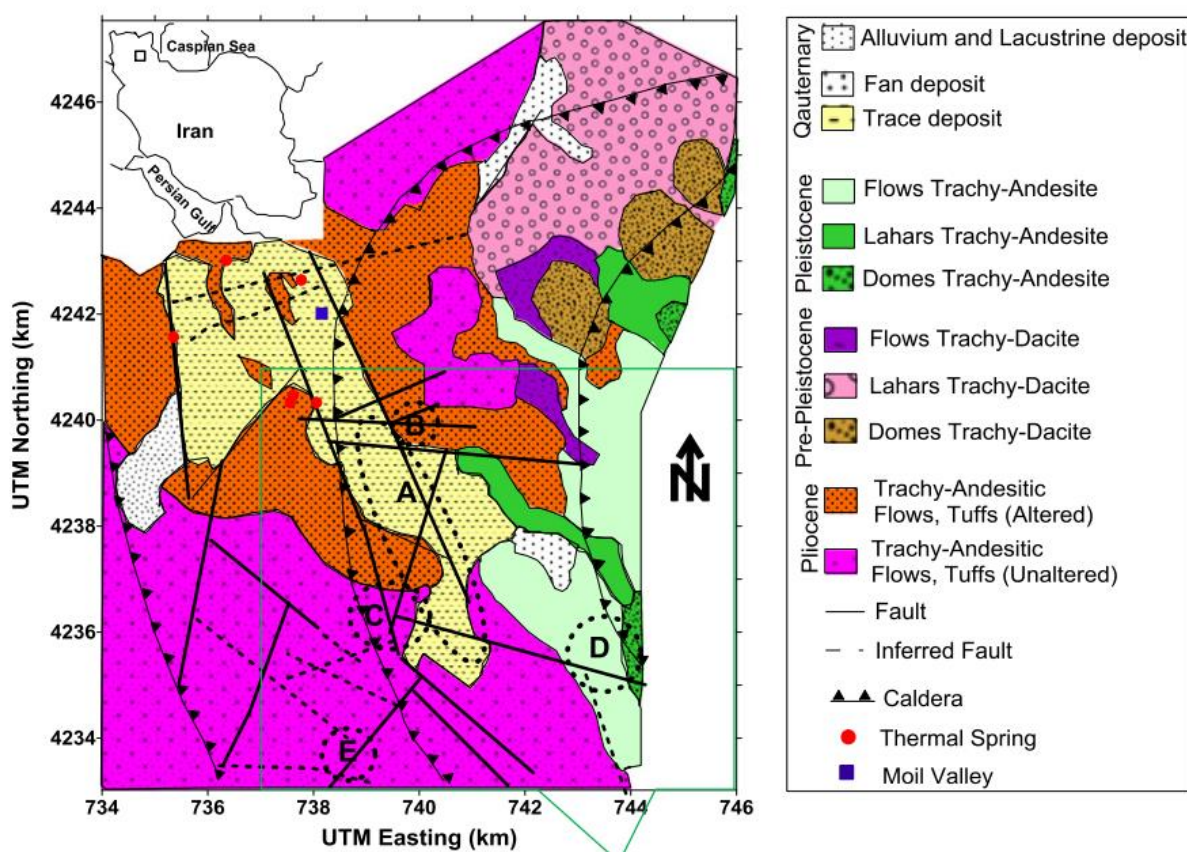
برونزد قابل ملاحظه‌ای از این واحد در شرق مشکین شهر دیده می‌شود و شامل جریان‌های گدازه با ترکیب تراکی بازالتی تا تراکی آندزیتی با بافت پورفیری به همراه توف برش و توفیت هماتیتی، کربناتی و سیلیسی شده به رنگ قهوه ای و بنفش و گدازه‌های برشی شده و برش‌های هیالو کلاستیک است که در محیط آبی کم عمق تشکیل یافته است. جریان‌های گدازه نسبت به بخش‌های برشی و توفی برجسته و صخره سازتر بوده و تکرار آنها لایه‌بندی ویژه ای به سنگ‌های این واحد داده است. دایک‌های بازالتی پیروکسن و اولیوین‌دار تغذیه کننده

سنگ‌های این واحد را قطع کرده است. بافت بخش‌های گدازه‌ای اغلب میکرولیتی پورفیری، و درشت E^b واحد بلورهای آن به رنگ روشن از نوع پلاژیوکلاز و انواع مافیک از نوع کلینوپیروکسن و اولیوین (به مقدار کم) است، پلاژیوکلازها از انواع کلسیک بوده و در جاشیه برخی از آنها فلدسپات آلکالن تشکیل یافته است. کلینوپیروکسن‌ها از نوع اوژیت هستند. اولیوین‌ها ایدینگسیتی، کمی کلریتی و کربناتی شده‌اند، در شماری از نمونه‌ها آنالیم وجود دارد. زمینه سنگ شامل میکرولیت‌های پلاژیوکلاز سدیک، فلدسپات پتاسیک، اوژیت، اولیوین دگرسان شده، کانی‌های تیره، کلسیت و کلریت است. در زمینه تعدادی از سنگ‌ها کاوکه‌های خالی وجود دارد. آپاتیت به عنوان کانی فرعی سنگ به شمار می‌رود. در داخل این واحد بخش‌هایی از گدازه ملانوبازالتی وجود دارد که به رنگ سیاه تا سبز تیره است.

درشت‌بلورها از نوع اولیوین‌های دگرسان شده (بولنژیته و کربناتی شده) و اوژیت است. این واحد از قدیم به جدید به واحدهای کوچکتری قابل تفکیک است.

واحد *Epta*

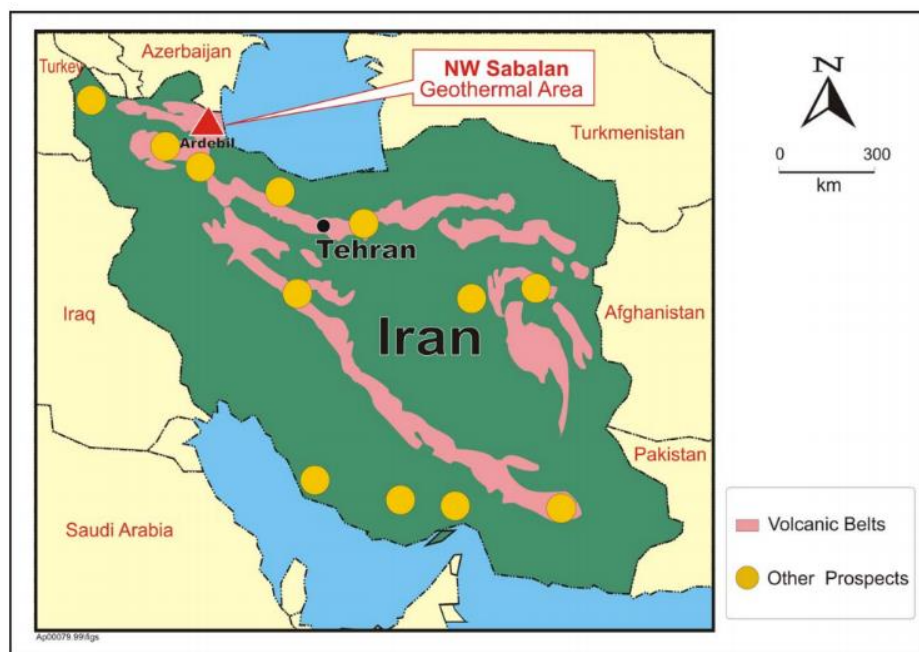
شامل گدازه‌های تراکی آندزیتی با بافت پورفیری است که ساختمان گنبد مانند داشته و برونزد کوچکی از آن در شمال شرقی ورقه دیده می‌شود.



شکل ۳-۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (قائد رحمتی و همکاران، ۲۰۱۳)

۳-۳ اطلاعات مربوط به داده های مگنتوتلوریک برداشت شده از منطقه مورد مطالعه

ناحیه حرارتی شمال غرب سبلان در شیب های شمال غربی کوه سبلان، واقع در استان اردبیل در شمال غرب ایران قرار گرفته است (شکل ۳-۳).



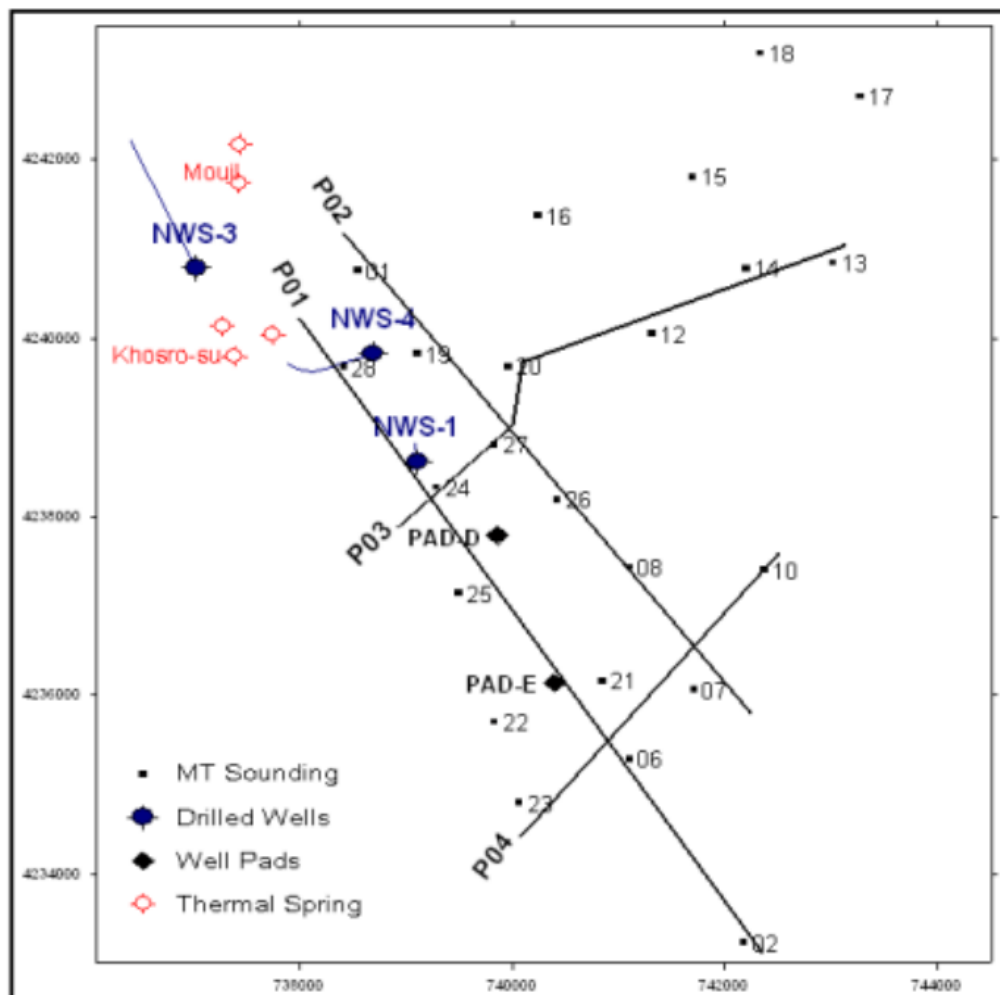
شکل ۳-۳: نقشه موقعیت منطقه زمین گرمایی سبلان (EDC, 2007)

این ناحیه از سال ۱۹۷۸ تحت مطالعات جغرافیایی قرار گرفته است (فتوحی، ۱۹۹۵). در سال ۱۹۹۸، تحقیق MT در اطراف کوه های سبلان با پوشش دهی ۲۱۲ ایستگاه انجام شد. (KML, 1997). بررسی سه چاه عمیق و دو چاه کم عمق واقع در دره موئیل با مقاومت ویژه کم از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۴ مورد بررسی قرار گرفتند. چاه NWS-3 که تا شمال غرب بررسی شد با دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد، قابل بهره برداری نبود. دمای اندازه گرفته شده در چاه NWS-4 بیشتر از ۲۳۰ درجه سانتی گراد است، در حالیکه داغ ترین چاه NWS-1 دمایی تقریباً برابر با ۲۴۰

درجه سانتی‌گراد دارد. با این وجود، مرحله اول بررسی نتوانست مکان ناحیه‌ای با دمای بالا را شناسایی کند و در سال ۲۰۰۵، SKM^۱ نتیجه گرفت که مایعات با دمای بالا احتمالاً از جنوب یا جنوب شرق جریان دارند.

تفسیر درباره داده های MT سال ۱۹۹۸ (طالبی، ۲۰۰۵) نشان می‌دهد افزایش ارتفاع زیرزمین مقاوم (افزایش به سمت جنوب) با دمای اندازه‌گیری شده، سازگار است و بیان می‌کند که جریان مایع به سمت بالا، از جنوب شرقی، می‌آید. از این رو، پادهای جدید یعنی Pad-D و Pad-E شکل (۳-۴) برای بررسی توصیه شدند و سپس به منظور آماده‌سازی برای فعالیت‌های تحقیقی مرحله دوم، انجام شدند. چاه NWS-1 جنوب شرقی در پروژه شمال غرب سبلان ساخته شد.

¹Sinclair Knight Merz



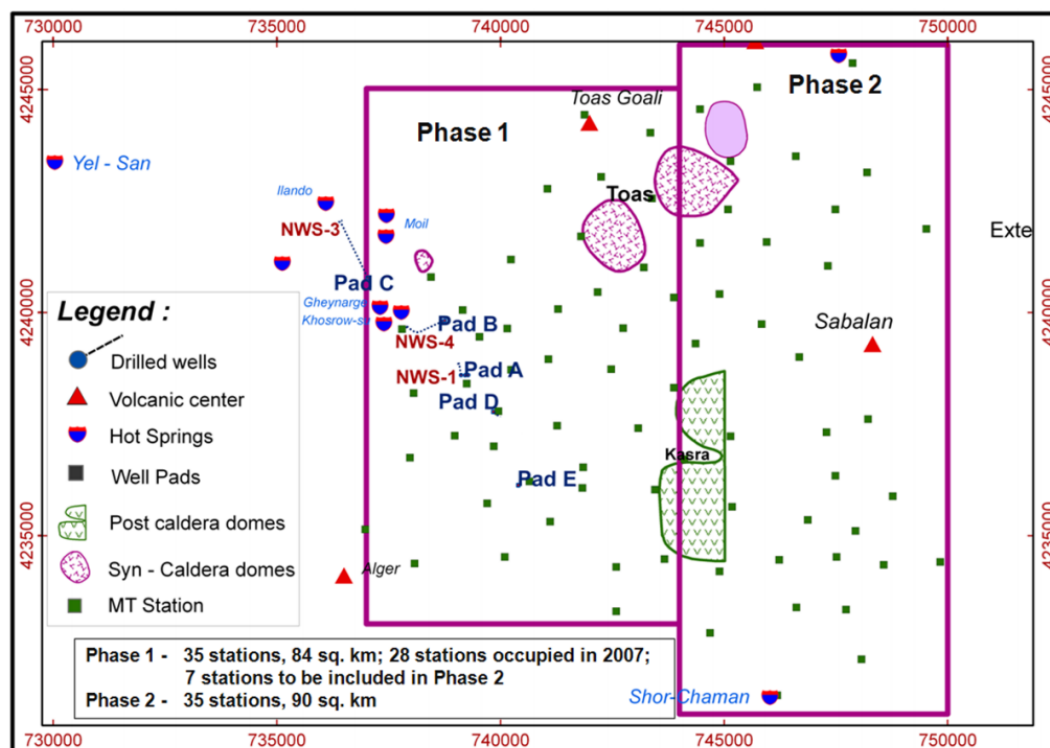
شکل ۳-۴: موقعیت و مشخصات ایستگاه‌ها و پروفیل‌ها که در سال ۲۰۰۷ توسط شرکت EDC به منظور بررسی منابع زمین- گرمایی در دره موئیل انجام شده است. (EDC, 2007)

یک تیم فنی از مؤسسه توسعه انرژی PNOC (PNOC-EDC) در سال ۲۰۰۷ گرد هم آمدند تا داده های موجود را مرور و بررسی کنند. این بررسی یک مدل پیشنهاد می دهد که بیان می کند جریان رو به بالا احتمالاً در شرق-

¹ Energy Development Corporation

جنوب شرق دره موئیل قرار گرفته است. این مدل بر مبنای الگوی زبانه رسانا است. که در نقشه هم مقاومت در ۰/۳ هرتز تعریف شده است و در حد فاصل و عمق ۱۵۰۰ متر می باشد.

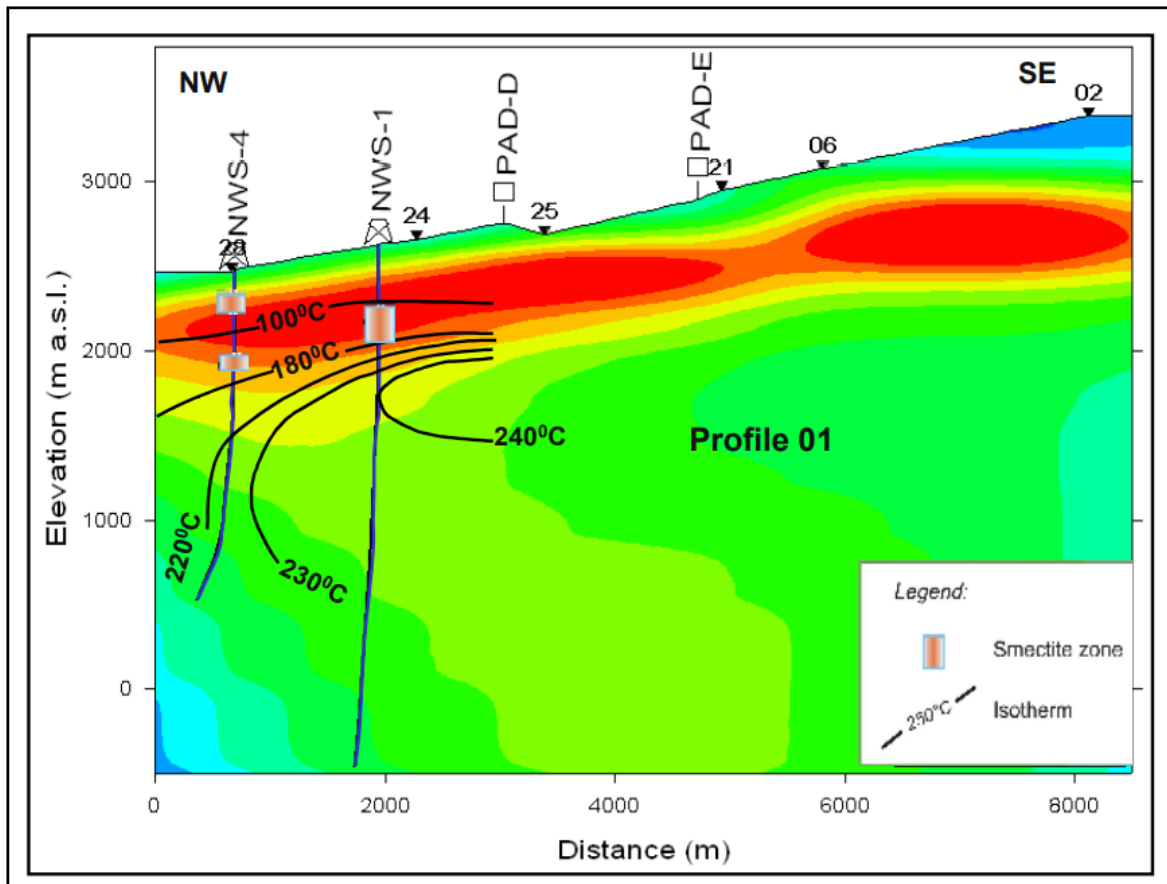
به منظور تأیید مدل پیشنهادی، در سال ۲۰۰۶، PNOG-EDC پیشنهاد داد تا قبل از هر فعالیتی بر روی پروژه، یک بررسی عمیق MT انجام دهند. پیشنهاد داده شد تا یک برنامه ۷۰ ایستگاهی در دو مرحله انجام شود. هدف مرحله ۱، پوشش نواحی شرق و جنوب شرق دره موئیل بود (شکل ۳-۵). هدف این مرحله تعیین مرکز احتمالی سیستم حرارتی و شناسایی اهداف تحقیقی برای توسعه نیروگاه برق حرارتی ۵۵ مگاواتی بود. مرحله دوم، نواحی شمال شرق و جنوبی کوه سبلان را پوشش می داد. هدف این دو مرحله تعریف مدل هیدرو فیزیکی کل مجموعه آتشفشانی سبلان بوده است.



شکل ۳-۵: نقشه موقعیت ایستگاه‌های برداشت داده‌های مگنتوتلوریک (فاز یک و دو) پروژه ژئوترمال سبلان (EDC, 2007)

این مطالعه نتایج مرحله اول را ارائه می‌دهد، مرحله‌ای که در طول بررسی یک ماهه، ۲۸ ایستگاه MT راپوشش داد. این تحقیق ۱۶ اکتبر ۲۰۰۷ آغاز شد.

تحقیق MT سال ۲۰۰۷، بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کم را که در شرق Pad E و غرب حوزه جوان مواد مذاب کوه آتش‌فشانی کسرا قرار گرفته است، به تصویر کشید. این بی‌هنجاری، کانون احتمالی سیستم حرارت مرکزی زمین در شمال غرب سبلان را نشان می‌داد. سطح مشترک بین لایه رسانا و لایه مقاوم بیشتر در عمق و زیر سطح دره موئیل در ۲۰۰۰ متر قرار دارد، و عمق آن در جنوب-جنوب شرق به ندرت در حال کاهش است. عمق ۲۵۰۰ متر کم عمق ترین قسمت Pad E در شرق است. این سطح مشترک با ناحیه لایه رسانا منطبق می‌شود و در چاه‌های NWS-1 و NWS-4 با هم روبه‌رو می‌شوند، جاییکه حداقل دمای آن ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. نتیجه گرفته ایم که دماهای بیشتر از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد، و احتمالاً بیشتر از ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، در لایه‌های زیرین با هم روبه‌رو می‌شوند، جایی که کم عمق‌ترین بخش سطح مشترک لایه رسانا و لایه با مقاومت ویژه بیشتر، قرار دارند (شکل ۳-۶)



شکل ۳-۶: ارتباط مدل مقاومت ویژه با درجه حرارت منطقه در چاه‌های NWS-4 و NWS-1 (EDC, 2007)

بی‌هنجاری مقاومت ویژه شمال غرب، در عمق ۸۰۰ متر تشخیص داده شد و در عمق ۲۳۰۰ متر و ۲۶۰۰ متر با الگوی ساختاری دره موئیل سازگار است. این نشان می‌دهد که شکستگی‌های زمین در این جهت دارای نفوذپذیری خوبی هستند و اهداف مناسبی برای حفاری می‌باشند. نواحی نفوذپذیر در چاه‌های NWS-4 و NWS-1 به گسل NNW2 نسبت داده شده‌اند (Bogie, 2005). شیب مقاومت ویژه بین ایستگاه‌های ۶ و ۷ (شکل ۳-۴) به گسترش احتمالی جنوب شرقی گسل NNW3 اشاره دارد و یک هدف حفاری خوب برای آزمایش دماهای بیشتر در ناحیه شرقی Pad E است.

با این وجود، داده‌های MT سال ۲۰۰۷ نمی‌تواند تصویر هندسی کامل و درک بهتری از طبیعت سیستم حرارتی شمال غرب سبلان فراهم کند و دلیل آن پوشش‌دهی نامناسب ایستگاهی در شرق است. تنها نیمه غربی و شمال

غربی بی‌هنجاری، به وسیله MT ترسیم شده است. نیمه شرق- جنوب شرقی بی‌هنجاری و مرزهای آن هنوز در دست بررسی هستند. به منظور دستیابی به این اهداف، اندازه‌گیری دقیق‌تر ایستگاه‌های MT در شرق مرکز فرضی منبع حرارتی به شدت توصیه می‌شود.

فصل ۴

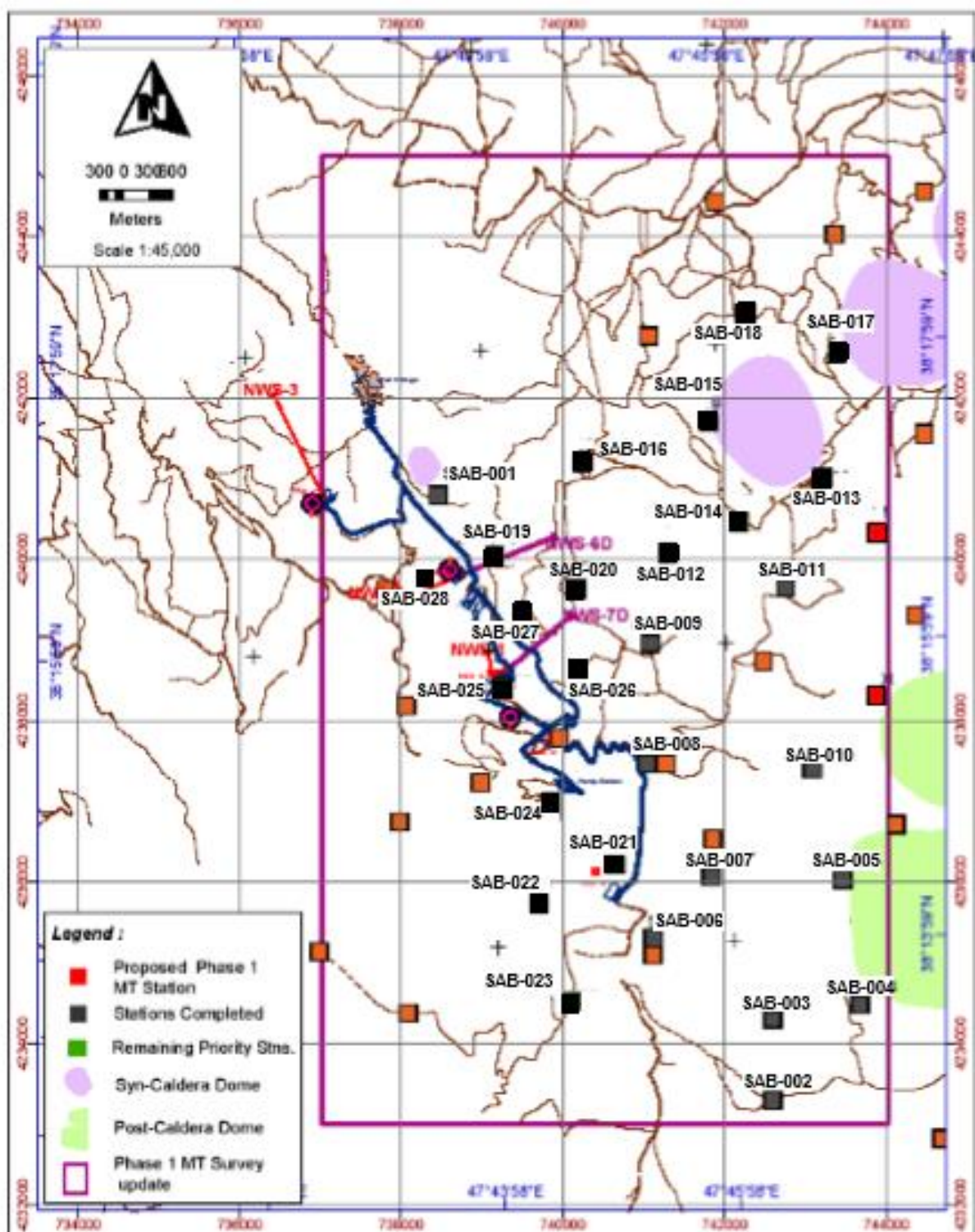
مدل سازی یک بعدی و دوبعدی داده های مگنتوتلوریک
منطقه مورد مطالعه و تفسیر کمی آنها

۴-۱ مقدمه

در چندین سال گذشته پیشرفت‌های چشم‌گیری در تئوری و توسعه و تکامل تجهیزات، امکان مدل‌سازی‌های دقیق از توزیع رسانایی ساختارهای زیرسطحی در اختیار گذاشته شده است. بعد از تفسیر کیفی داده‌ها و برای دستیابی دقیق‌تر به ساختار هندسی و پارامترهای آنومالی‌های الکتریکی زیرسطحی، اصولاً مدل‌سازی عددی داده‌ها انجام می‌گیرد. برای مدل‌سازی یک بعدی و دوبعدی داده‌ها از نرم‌افزار WinGLink استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی داده‌های متنوع ژئوفیزیکی از جمله گرانی‌سنجی، مغناطیس، روش‌های الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (قندی، ۱۳۸۶).

۴-۲ موقعیت ایستگاه‌ها

در این تحقیق از داده‌های سونداژ مگنتوتلوریک منطقه سبلان که در سال ۲۰۰۷ برداشت شده است، استفاده شده است. نام و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها در جدول (۴-۱) آورده شده است. همچنین موقعیت ایستگاه‌ها در شکل (۴-۱) نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱: نقشه‌ی موقعیت ایستگاه‌های برداشت داده‌های مگنتوتلوریک (فاز یک) پروژه ژئوترمال سبلان (EDC, 2007)

ردیف	شماره ایستگاه	طول جغرافیایی (متر)	عرض جغرافیایی (متر)	مختصات شرقی (UTM)	مختصات شمالی (UTM)	ارتفاع (متر)
۱	SAB-001	۴۷,۷۲۷۲۶۶۶۷	۳۸,۲۸۳۲۸۳۳۳	۷۳۸۵۴۳,۸۳۳	۴۲۴۰۷۶۵,۵۰۶	۲۴۰۰
۲	SAB-002	۴۷,۷۶۶۱۶۶۶۷	۳۸,۲۱۴۶۰۰۰۰	۷۴۲۱۷۴,۹۰۳	۴۲۳۳۲۴۳,۶۸۲	۳۳۹۰
۳	SAB-003	۴۷,۷۷۱۴۱۶۶۷	۳۸,۲۲۴۹۵۰۰۰	۷۴۲۶۰۰,۲۱۷	۴۲۳۴۴۰۶,۱۵۱	۳۶۸۵
۴	SAB-004	۴۷,۷۸۵۳۱۶۶۷	۳۸,۰۲۲۴۱۰۰۰۰	۷۴۳۸۲۰,۰۴۰	۴۲۳۴۳۴۸,۳۵۵	۳۷۲۰
۵	SAB-005	۴۷,۷۸۲۲۱۶۶۷	۳۸,۲۳۷۲۸۳۳۳	۷۴۳۵۰۴,۶۲۰	۴۲۳۵۸۰۳,۳۷۲	۳۸۳۰
۶	SAB-006	۴۷,۷۵۴۵۳۳۳۳	۳۸,۲۳۳۳۵۰۰۰	۷۴۱۰۹۴,۲۸۱	۴۲۳۵۲۹۴,۲۹۹	۳۰۸۰
۷	SAB-007	۴۷,۷۶۱۷۱۶۶۷	۳۸,۲۴۰۲۱۶۶۷	۷۴۱۷۰۰,۳۷۴	۴۲۳۶۰۷۵,۱۵۸	۳۳۸۰
۸	SAB-008	۴۷,۷۵۵۲۸۳۳۳	۳۸,۲۵۲۶۸۳۳۳	۷۴۱۰۹۶,۰۱۶	۴۲۳۷۴۴۲,۰۰۱	۲۹۵۰
۹	SAB-009	۴۷,۷۵۸۸۸۳۳۳	۳۸,۲۶۵۵۶۶۶۷	۷۴۱۳۶۸,۴۱۸	۴۲۳۸۸۸۱,۲۸۱	۲۹۱۰
۱۰	SAB-009B	۴۷,۷۵۲۵۰۰۰۰	۳۸,۲۶۵۲۸۳۳۳	۷۴۰۸۱۰,۷۹۰	۴۲۳۸۸۳۳,۱۸۴	۲۸۵۰
۱۱	SAB-010	۴۷,۷۶۹۷۳۳۳۳	۳۸,۲۵۲۱۱۶۶۷	۷۴۲۳۶۲,۵۵۲	۴۲۳۷۴۱۶,۸۸۹	۳۲۹۰
۱۲	SAB-011	۴۷,۷۶۹۹۱۶۶۷	۳۸,۲۷۶۲۰۰۰۰	۷۴۲۳۰۵,۱۰۶	۴۲۳۹۸۷۰,۱۹۵	۳۳۰۰
۱۳	SAB-012	۴۷,۷۵۸۶۰۰۰۰	۳۸,۲۸۲۸۳۳۳۳	۷۴۱۳۰۸۴۰۴	۴۲۴۰۰۶۰,۷۰۷	۳۳۳۰
۱۴	SAB-013	۴۷,۷۷۸۳۸۳۳۳	۳۸,۲۸۲۵۱۶۶۷	۷۴۳۰۱۷,۱۳۳	۴۲۴۰۸۴۸,۷۷۶	۳۱۷۰
۱۵	SAB-014	۴۷,۷۶۸۹۸۳۳۳	۳۸,۲۹۱۸۶۶۶۷	۷۴۲۱۹۵,۸۴۵	۴۲۴۰۷۸۸,۹۴۶	۳۱۲۰
۱۶	SAB-015	۴۷,۷۶۳۶۱۶۶۷	۳۸,۲۸۸۳۰۰۰۰	۷۴۱۶۹۵,۳۱۳	۴۲۴۱۸۱۲,۶۲۸	۳۰۳۰
۱۷	SAB-016	۴۷,۷۴۶۸۳۳۳۳	۳۸,۲۹۹۵۵۰۰۰	۷۴۰۲۳۹,۰۱۲	۴۲۴۱۳۷۲,۹۹۲	۲۹۳۵
۱۸	SAB-017	۴۷,۷۸۱۸۶۶۶۷	۳۸,۳۰۴۱۳۳۳۳	۷۴۳۲۶۶,۰۰۱	۴۲۴۲۷۱۳,۲۹۷	۲۹۸۵
۱۹	SAB-018	۴۷,۷۷۱۳۰۰۰۰	۳۸,۲۷۴۷۵۰۰۰	۷۴۲۳۲۶,۵۷۴	۴۲۴۳۱۹۴,۲۱۳	۲۸۱۰
۲۰	SAB-019	۴۷,۷۳۳۳۳۳۳۳	۳۸,۲۷۳۲۱۶۶۷	۷۳۹۱۰۲,۵۶۷	۴۲۳۹۸۳۴,۰۹۸	۲۵۱۰
۲۱	SAB-020	۴۷,۷۴۳۰۸۳۳۳	۳۸,۲۴۱۳۰۰۰۰	۷۳۹۹۶۰,۶۶۷	۴۲۳۹۶۸۹,۱۹۰	۲۸۶۰
۲۲	SAB-021	۴۷,۷۵۲۰۰۰۰۰	۳۸,۲۳۷۴۳۳۳۳	۷۴۰۸۴۶,۲۵۷	۴۲۳۶۱۷۰,۰۴۳	۲۹۵۰
۲۳	SAB-022	۴۷,۷۴۰۱۶۶۶۷	۳۸,۲۲۹۲۰۰۰۰	۷۳۹۸۲۳,۱۶۸	۴۲۳۵۷۱۰,۱۴۳	۲۸۷۰
۲۴	SAB-023	۴۷,۷۴۲۵۶۶۶۷	۳۸,۲۶۱۲۰۰۰۰	۷۴۰۰۶۰,۳۴۷	۴۲۳۴۸۰۲,۵۸۰	۲۹۷۰
۲۵	SAB-024	۴۷,۷۳۴۸۸۳۳۳	۳۸,۲۵۰۵۳۳۳۳	۷۳۹۲۸۲,۶۷۳	۴۲۳۸۳۳۴,۲۳۷	۲۶۶۰
۲۶	SAB-025	۷۴,۷۳۶۹۳۳۳۳	۳۸,۲۵۹۶۸۳۳۳	۷۳۹۶۹۷,۱۰۷	۴۲۳۷۱۵۵,۶۸۷	۲۶۹۰
۲۷	SAB-026	۴۷,۷۴۷۷۵۰۰۰	۳۸,۲۵۹۶۸۳۳۳	۷۴۰۴۱۳,۶۱۹	۴۲۳۸۱۹۹,۲۹۲	۲۸۲۰
۲۸	SAB-027	۴۷,۷۴۱۲۸۳۳۳	۳۸,۲۶۵۴۰۰۰۰	۷۳۹۸۲۸,۹۰۵	۴۲۳۸۸۱۶,۹۶۹	۲۷۰۰
۲۹	SAB-028	۴۷,۷۲۵۴۰۰۰۰	۳۸,۲۷۳۵۵۰۰۰	۷۳۸۴۱۲,۳۹۱	۴۲۳۹۶۸۰,۴۱۷	۲۴۷۰

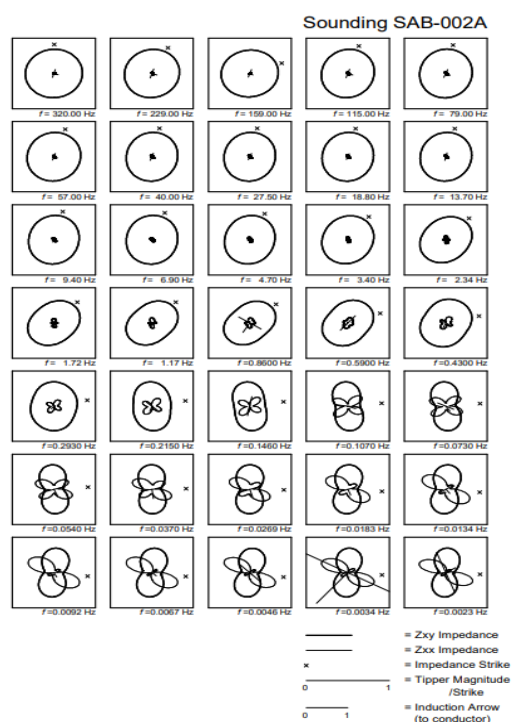
جدول ۴-۱: موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مگنتوتلوریک (EDC, 2007)

۳-۴ نمودارهای قطبی تانسور امپدانس

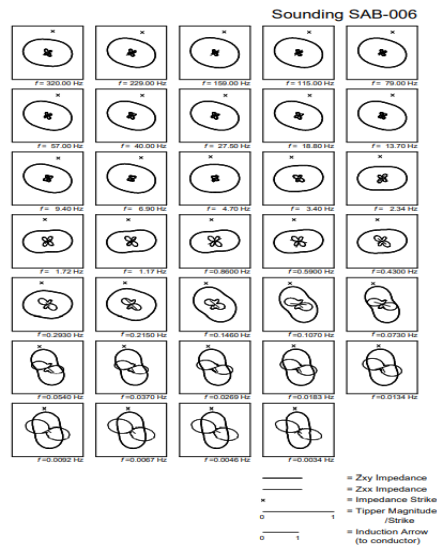
وابستگی امپدانس به جهت‌گیری محورهای اندازه‌گیری را به طور گرافیکی می‌توان با نمودارهای قطبی نمایش داد. هیچ محدودیت ساختاری یا بسامدی برای ترسیم نمودارهای قطبی امپدانس وجود ندارد. همانطور که در فصل دوم گفته شد مؤلفه XY تانسور امپدانس برای ساختارهای یک بعدی به شکل دایره و برای ساختارهای دو و سه‌بعدی در یک امتداد کشیده شده است.

مؤلفه XX تانسور امپدانس برای ساختارهای یک بعدی صفر، ساختارهای دوبعدی به شکل یک گلبرگ متقارن و برای ساختارهای سه‌بعدی در یک امتداد کشیده شده است که اندازه اش قابل مقایسه با مؤلفه XY تانسور امپدانس است.

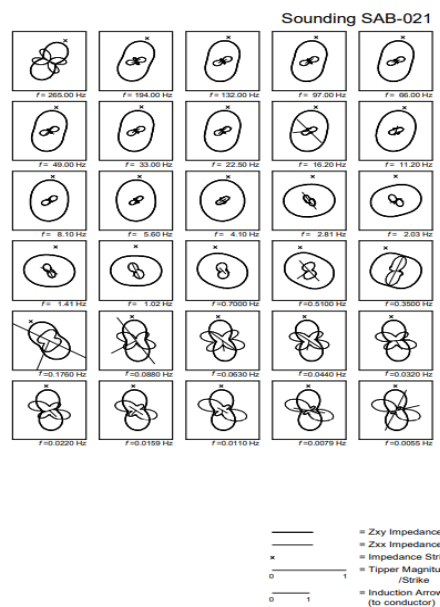
نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژهای پروفیل A (۲، ۶، ۲۱، ۲۵، ۲۴، ۲۸) به ترتیب در شکل‌های (۲-۴) تا (۷-۴) آورده شده است.



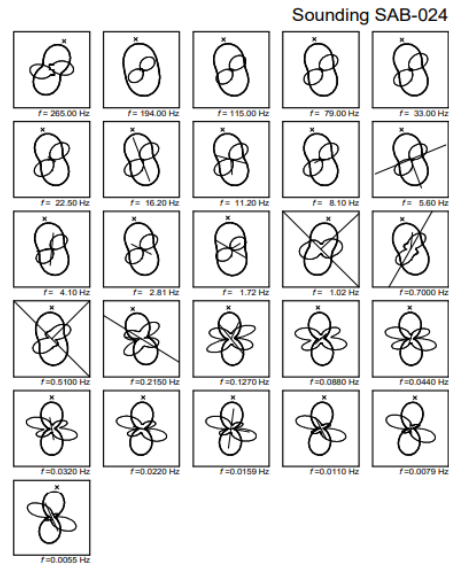
شکل ۲-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲



شکل ۴-۳: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۶

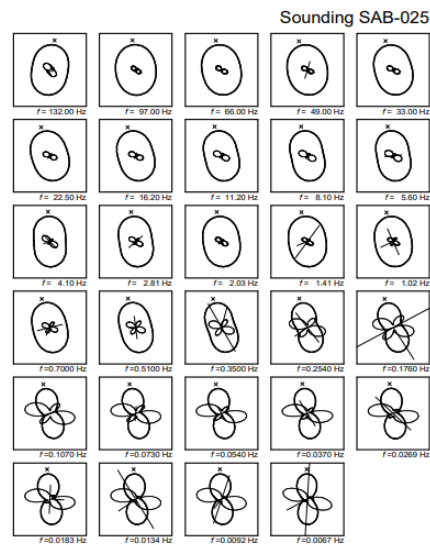


شکل ۴-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۱



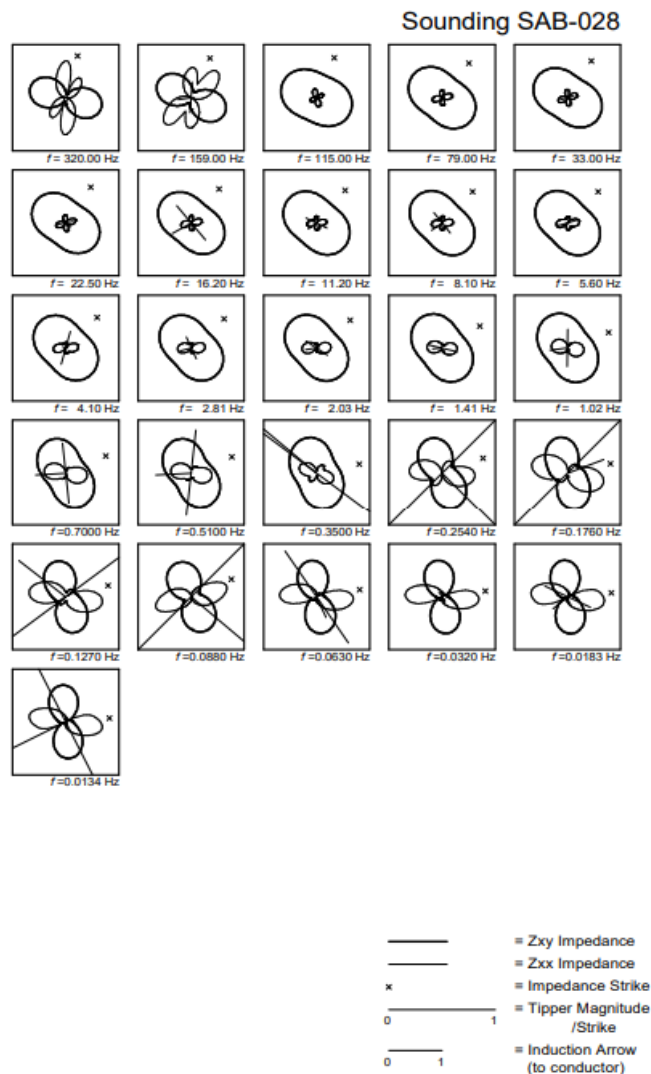
— = Zxy Impedance
 — = Zxx Impedance
 x = Impedance Strike
 0 — 1 = Tipper Magnitude / Strike
 0 — 1 = Induction Arrow (to conductor)

شکل ۴-۵: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۴



— = Zxy Impedance
 — = Zxx Impedance
 x = Impedance Strike
 0 — 1 = Tipper Magnitude / Strike
 0 — 1 = Induction Arrow (to conductor)

شکل ۴-۶: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۵



شکل ۴-۷: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۸

۴-۴ مقایسه منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز

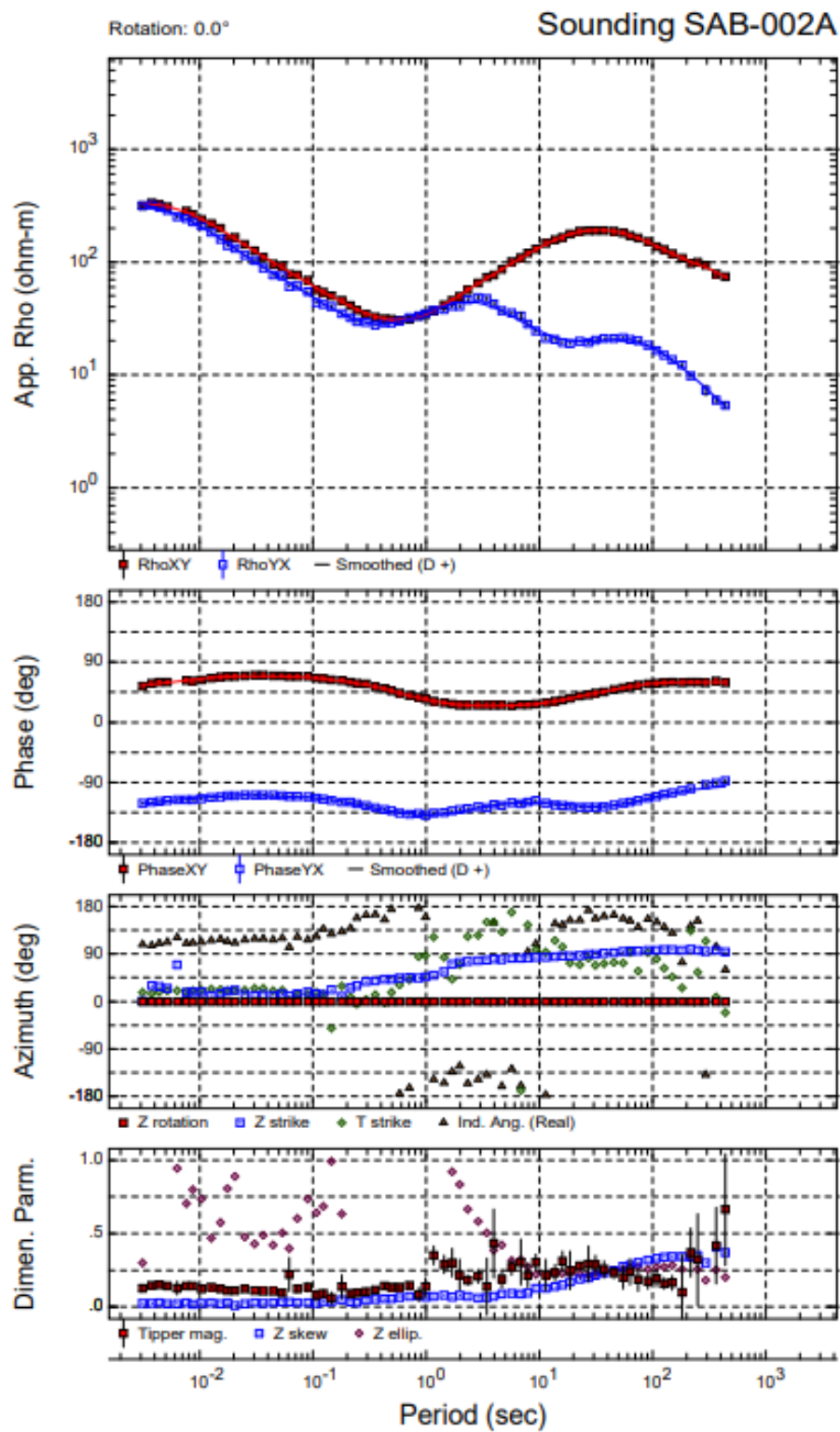
کمیت مقاومت ویژه ظاهری، اساسی‌ترین پارامتر در تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک می‌باشد که از روی مؤلفه‌های اصلی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مورد نظر قابل محاسبه است. با کمک این مقادیر منحنی‌های مقاومت ویژه در دو مؤلفه XY و YX (مد TE و TM) بدست می‌آید.

با بررسی منحنی‌های مقاومت ویژه تمام ایستگاه‌ها، مشخص گردید که در روی این منحنی‌ها و در بعضی فرکانس‌ها مقدار خطای اندازه‌گیری (به دلیل وجود خطای برداشت و نوفه‌های الکترومغناطیسی در منطقه) بالا بود، که این

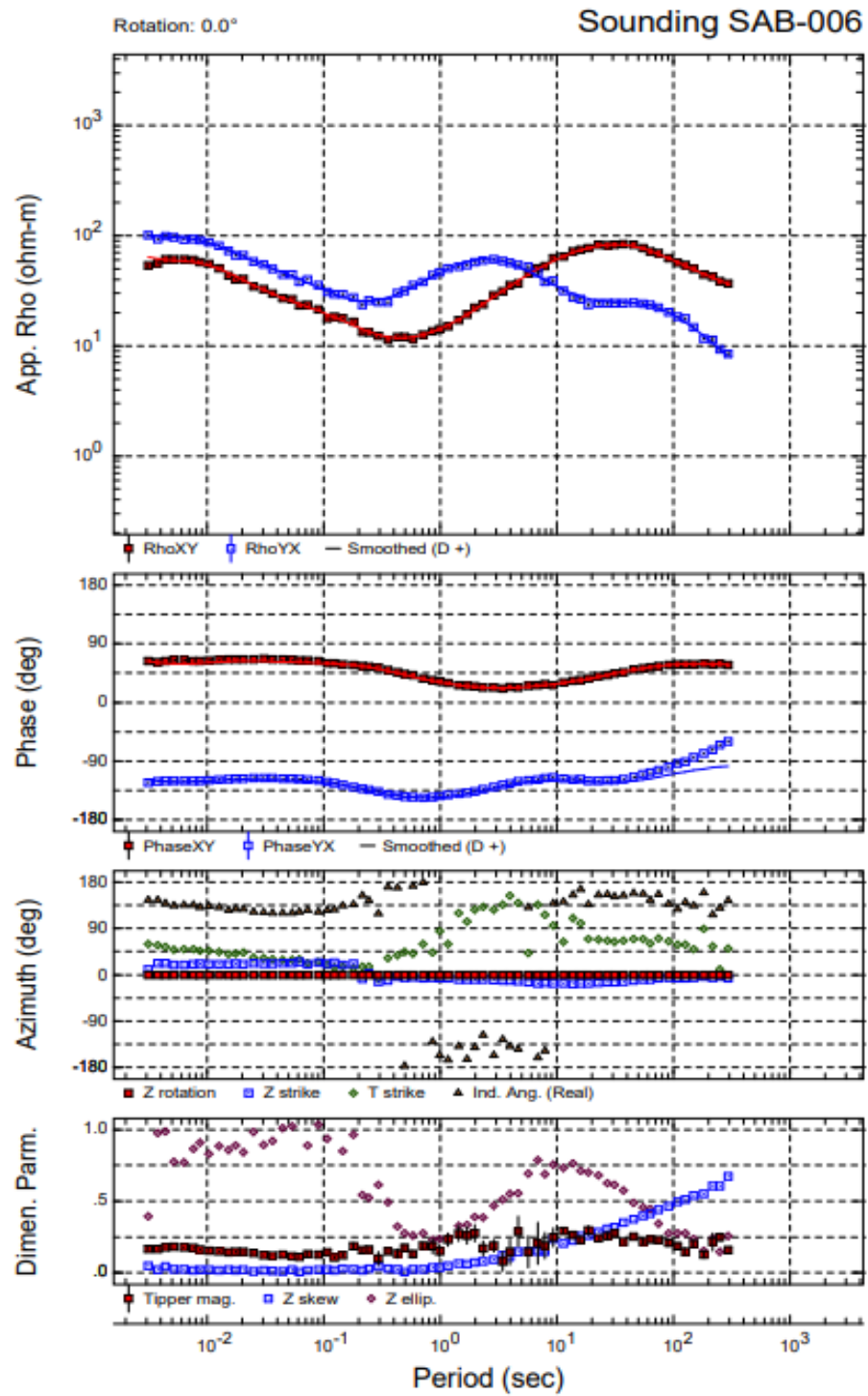
فرکانس‌ها غیر فعال شدند و همچنین روند منحنی‌های موجود مورد بازبینی قرار گرفت تا کیفیت داده‌ها افزایش یابد.

با توجه به اینکه هر یک از مؤلفه‌های تانسور امپدانس اعداد مختلط می‌باشند پس می‌توان مقدار فاز هر یک از این اعداد مختلط را حساب کرد و مقدار این فاز را به صورت نمودارهایی بر حسب فرکانس برای مؤلفه‌های مختلف تانسور امپدانس نشان داد. همچنین می‌توان گفت کمیت فاز به دلیل عدم تأثیرپذیری از ناهمگنی‌های سطحی، یکی از مزیت‌های روش مگنتوتلوریک به روش جریان مستقیم ژئوالکتریک می‌باشد که باعث به دست آمدن اطلاعات بیشتری در مورد ساختارهای زیر سطحی و توزیع مقاومت ویژه در آن‌ها می‌شود (هاشمی، ۱۳۹۱).

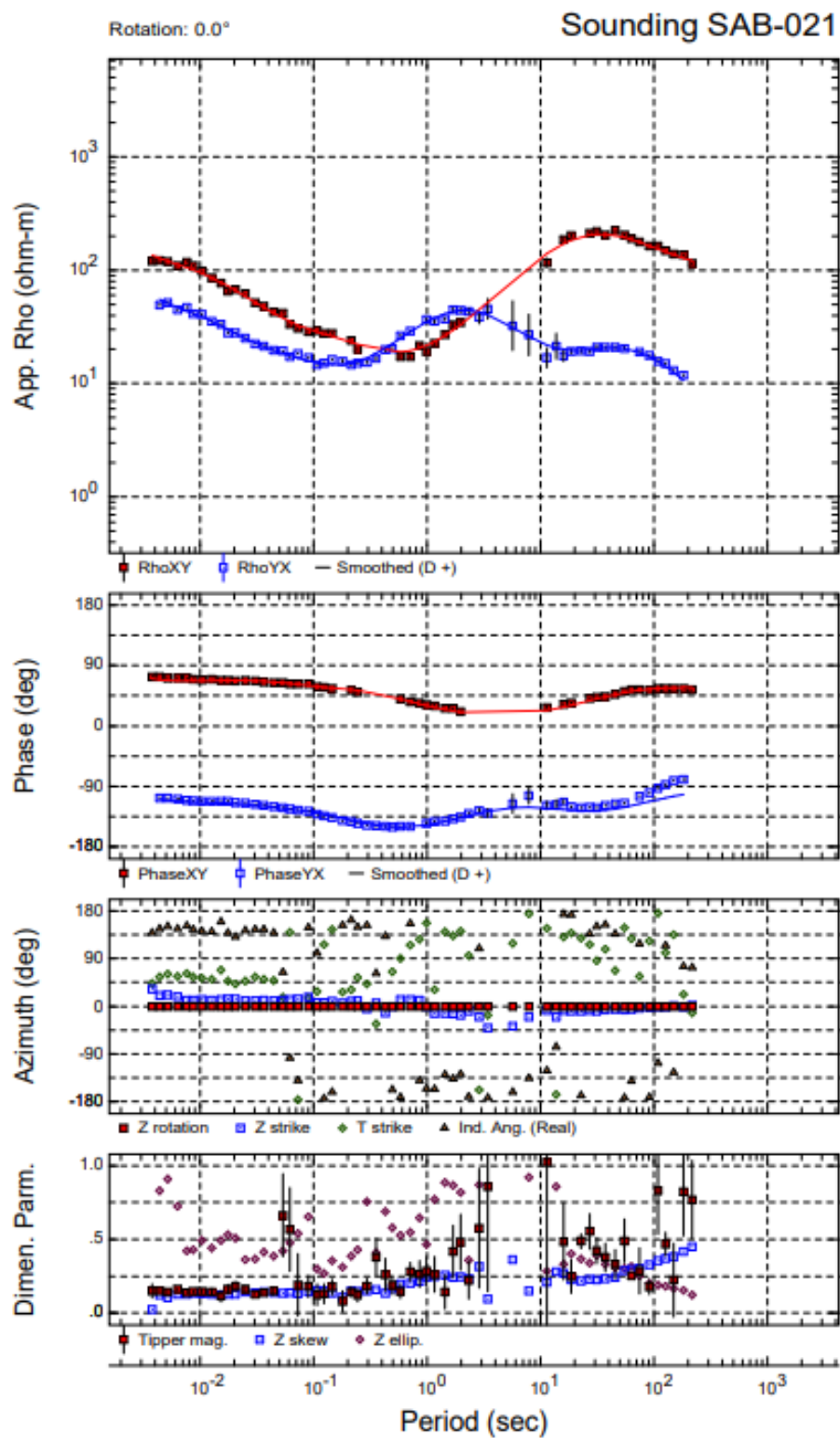
منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز برای سونداژهای پروفیل A (۲، ۶، ۲۱، ۲۵، ۲۴، ۲۸) به ترتیب در شکل‌های (۴-۸) تا (۴-۱۳) آورده شده است.



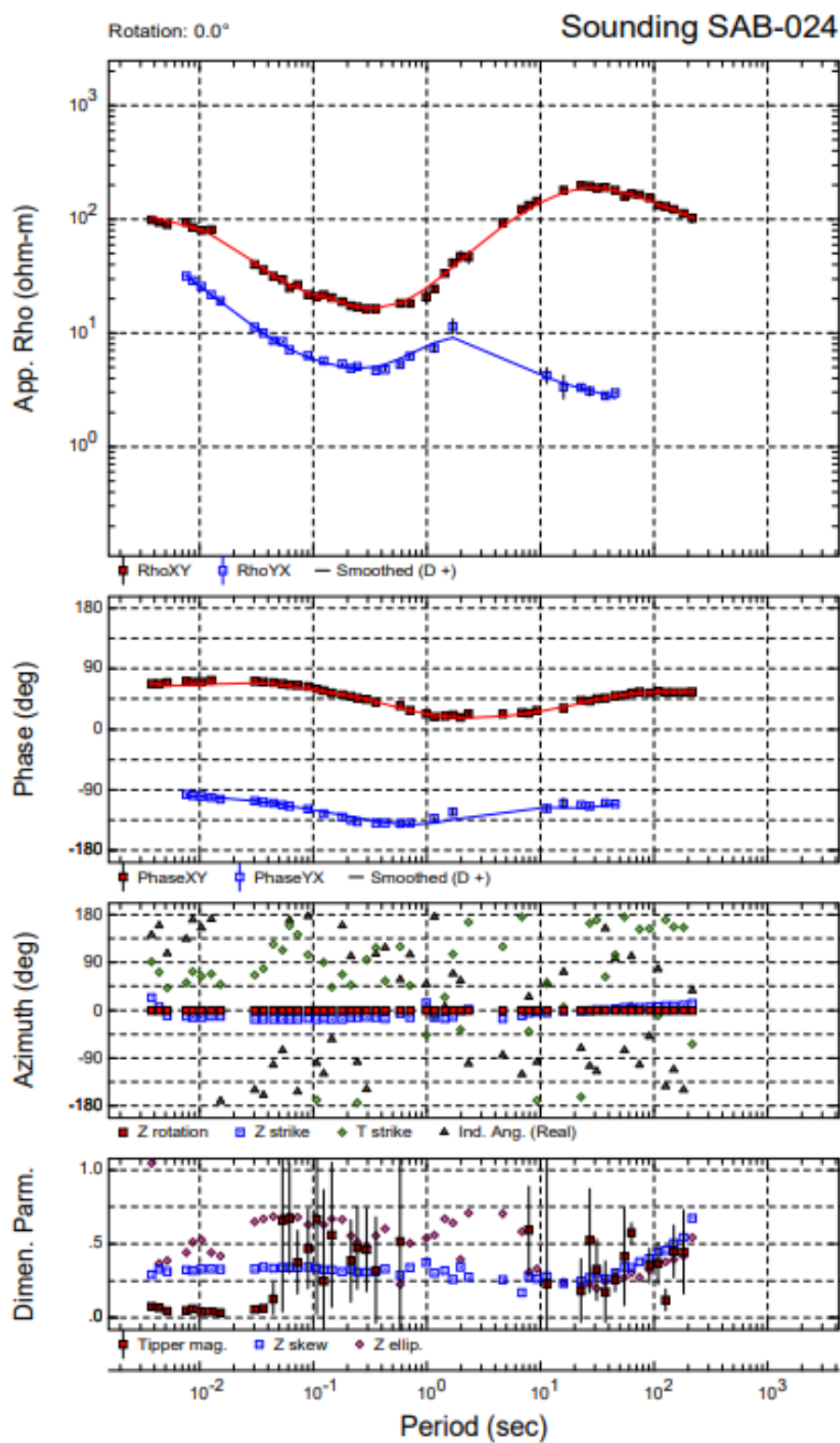
شکل ۴-۸: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲



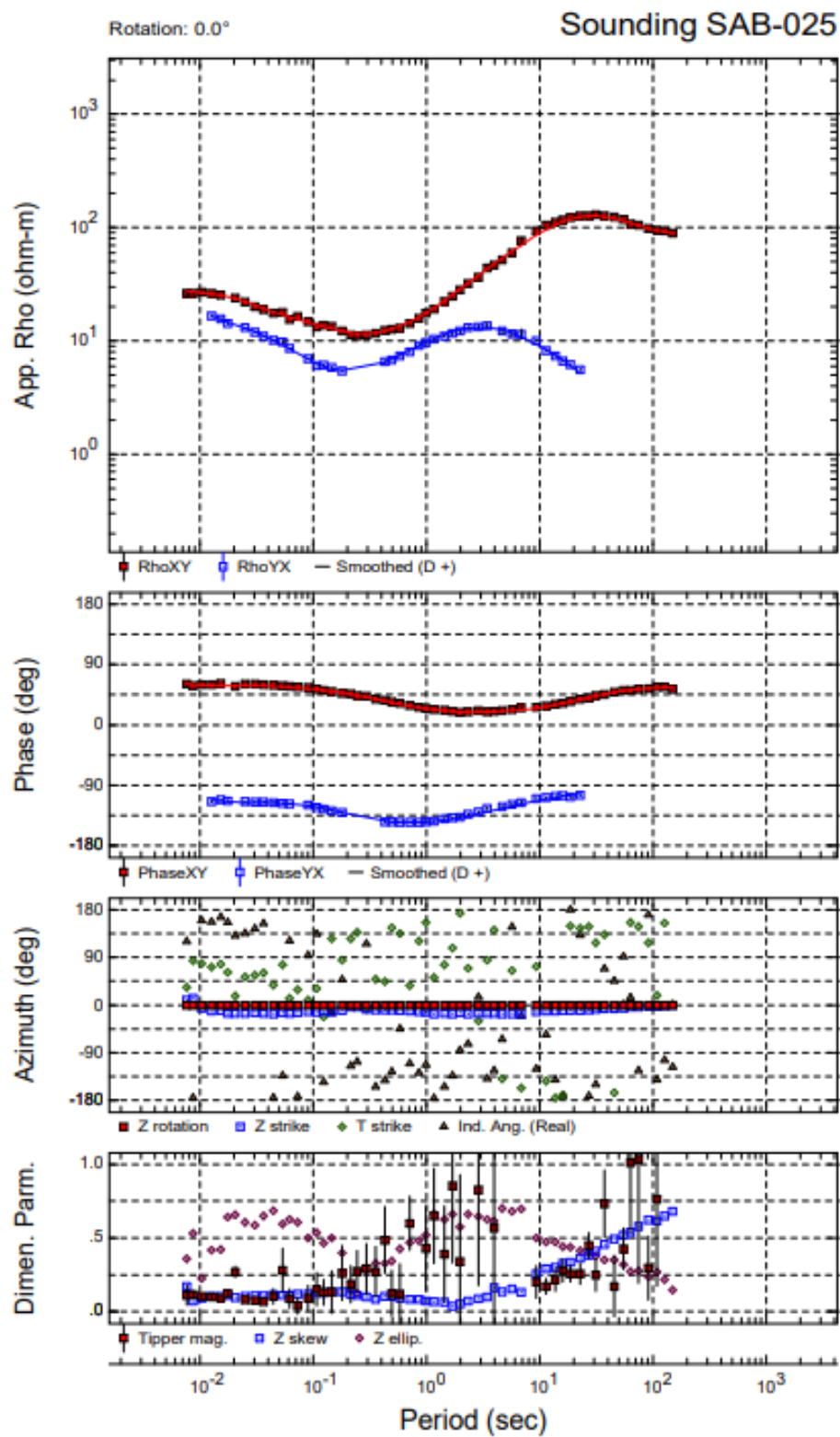
شکل ۴-۹: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۶



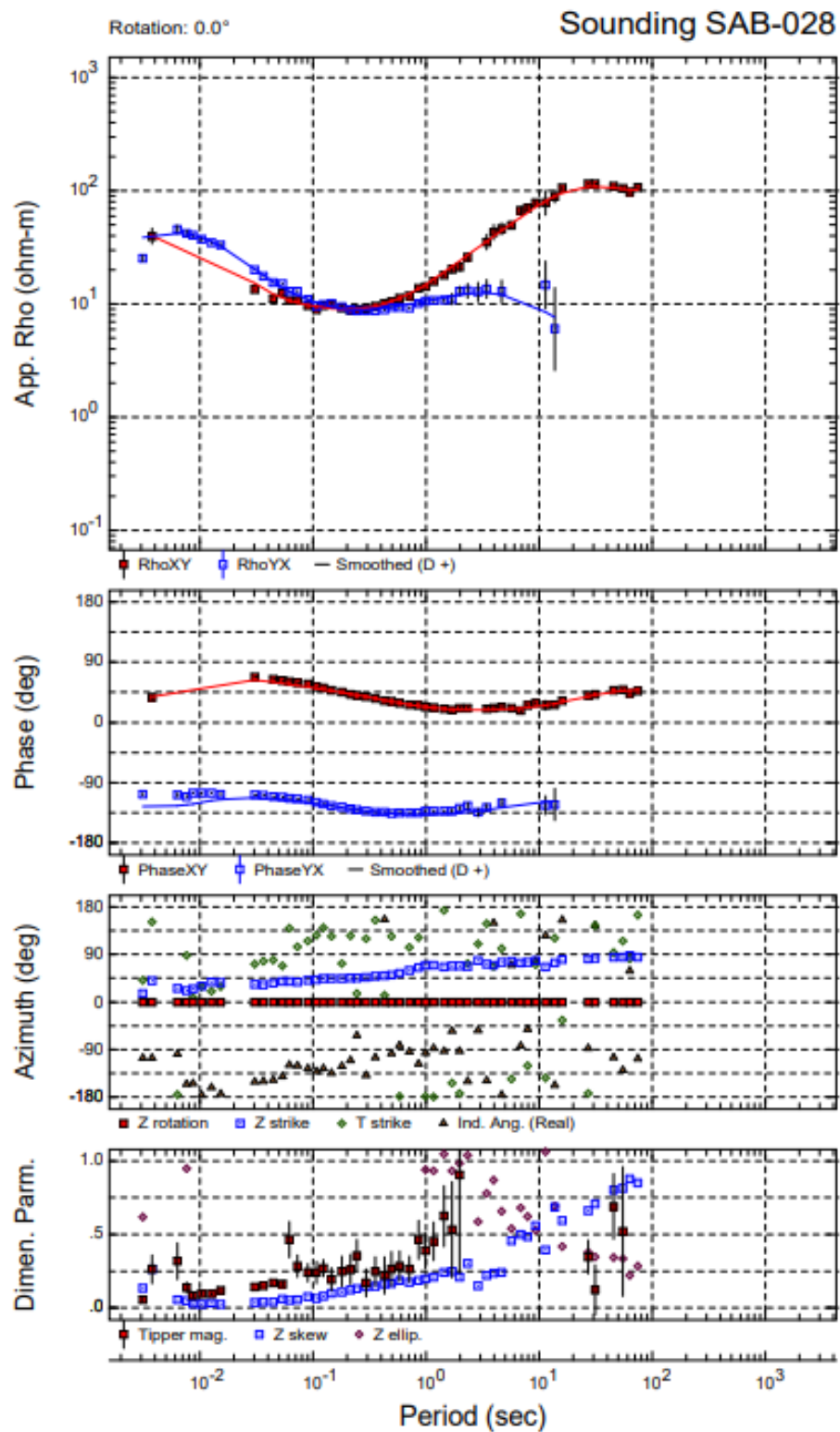
شکل ۴-۱۰: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۲۱



شکل ۴-۱۲: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۴



شکل ۴-۱۱: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۲۵



شکل ۴-۱۳: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۸

۴-۵ مدل سازی یک بعدی

الگوریتم استفاده شده در وارون سازی یک بعدی داده ها، در نرم افزار WinGLink الگوریتم وارون سازی هموار اکام و بوستیک می باشد، به دلیل آنکه مدل انتخابی تطابق زیادی با مدل مشاهده ای دارد و ملاک های مبهم به مجموع پاسخ ها وارد نمی شوند، مدل حاصل در این الگوریتم می تواند گویای مدل واقعی زمین باشد (فیلبندی کشکولی، ۱۳۹۵).

۴-۶ خلاصه ای از روش هموار سازی اکام

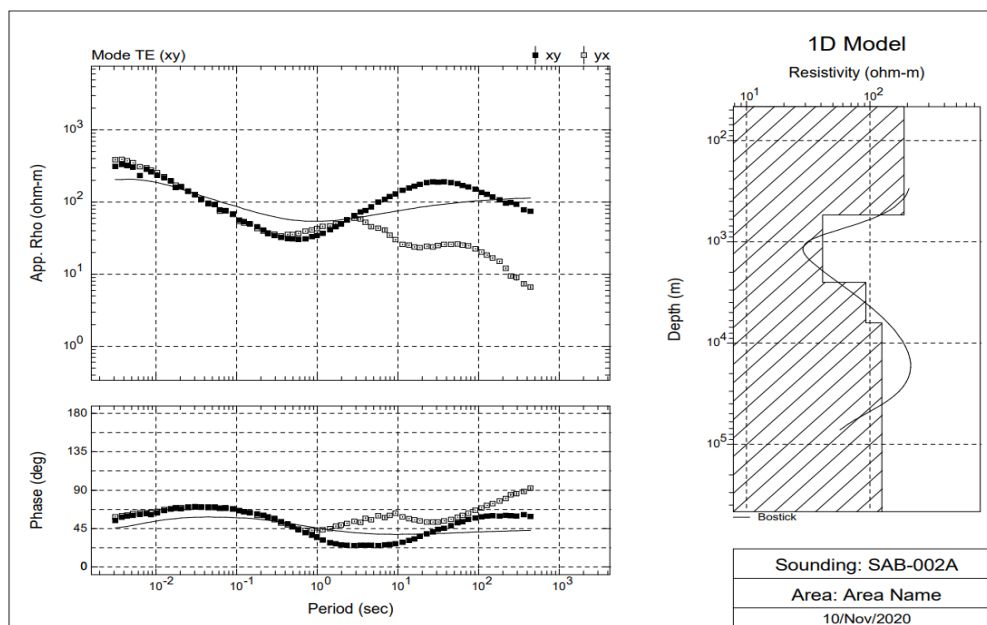
وارون سازی اکام یکی از روش های وارون سازی برای داده های ژئوفیزیکی است که برای حل مسئله وارون غیر خطی استفاده می شود و فلسفه آن پیدا کردن حداکثر نرمی مدل ساختار هدف است که با توجه به مزیت این روش در وارون سازی از لحاظ قابلیت اجرایی و انطباق پذیری در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل سازی وارون، از داده های حاصل از عملیات برداشت صحرایی به عنوان ورودی استفاده شده و خروجی فرایند پس از انجام یک عملیات بهینه سازی و محاسبات ریاضی، مدل بازسازی شده زمین و پارامترهای فیزیکی آن خواهند بود. جواب وارون سازی هرگز یکتا نبوده و تمام جواب ها با یک خطای معین تعیین می گردند (Jakson, 2001).

هدف اصلی در روش وارون سازی اکام به دست آوردن مدلی است که از نظر ژئوفیزیکی قابل تفسیر باشد و بتواند مشاهدات را به طور مناسبی بازسازی کند. این امر با کمینه کردن تابع هدف مدل صورت می گیرد در حالی که داده ها هم به طور مناسبی برازش شود (Constable, 1987).

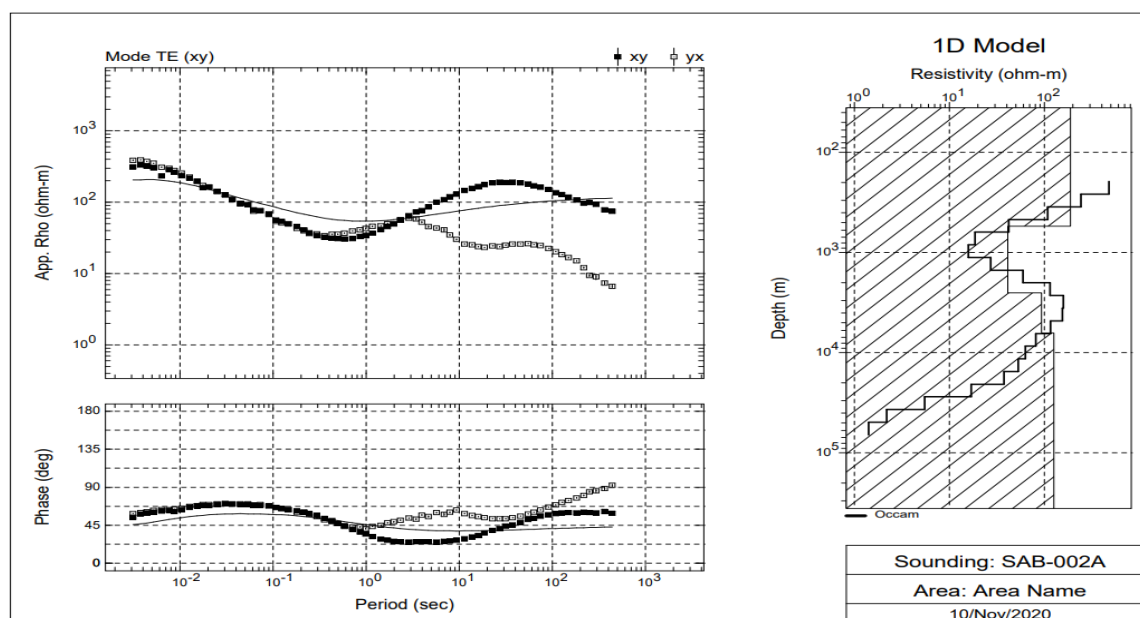
انجام این الگوریتم به مدل پیشرو غیر خطی و ماتریس ژاکوبین آن نیاز دارد (کلاگری، ۱۳۹۶). اساس معکوس سازی غیر خطی اکام استفاده تکراری از خطی سازی محلی بر اساس بسط تیلور است (نعمت اله، ۱۳۹۳).

مدل سازی های یک بعدی با استفاده از روش های اکام و بوستیک برای سونداژهای تشکیل دهنده ی پروفیل A

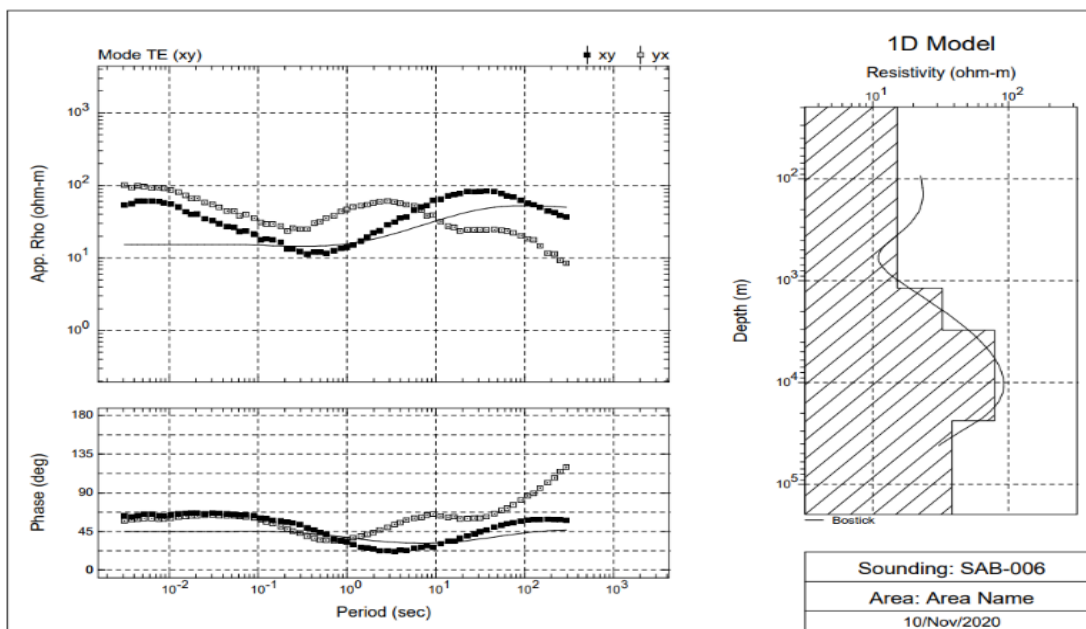
(۲، ۶، ۲۱، ۲۵، ۲۴، ۲۸)، به ترتیب در شکل های (۴-۱۴) تا (۴-۲۵) را مشاهده می کنید.



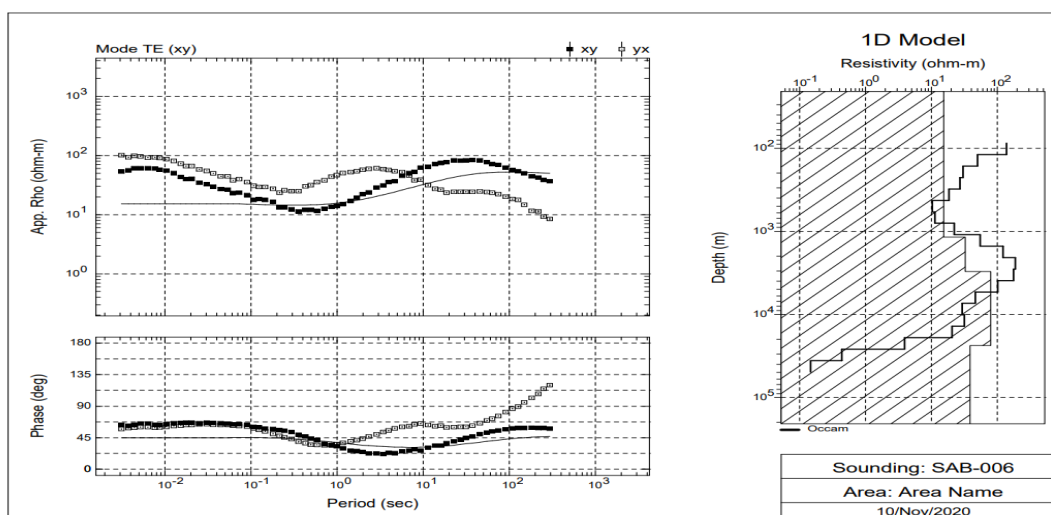
شکل ۴-۱۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است.



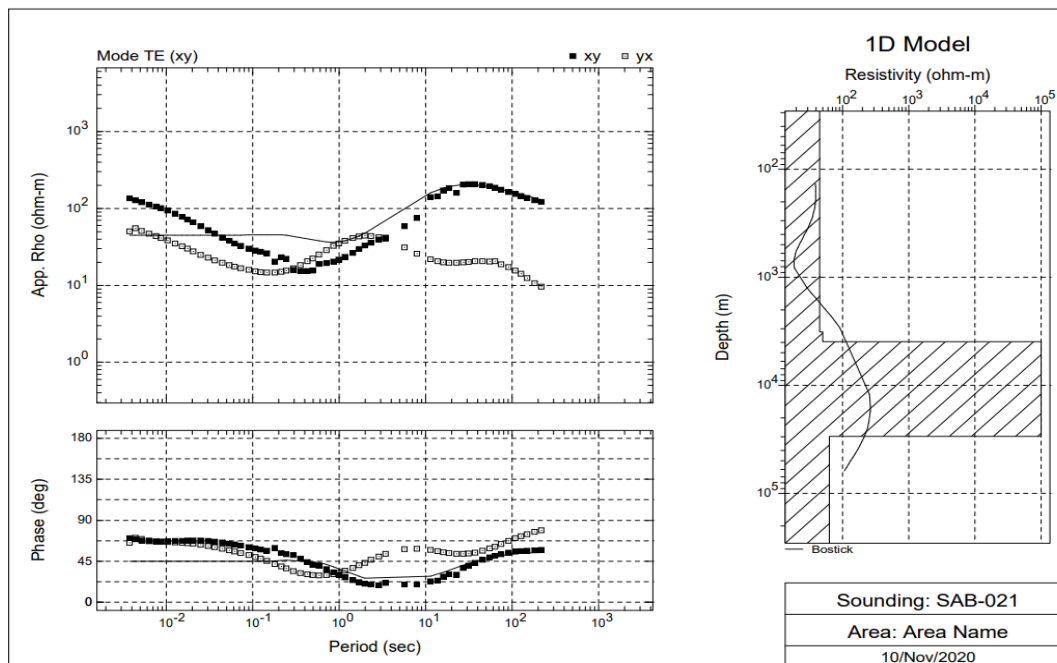
شکل ۴-۱۵: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اُکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است.



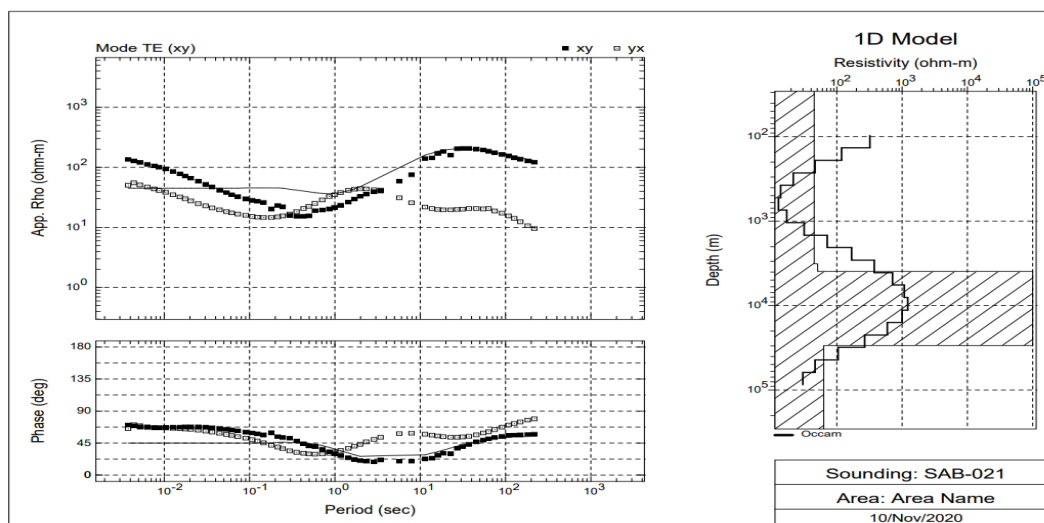
شکل ۴-۱۶: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است.



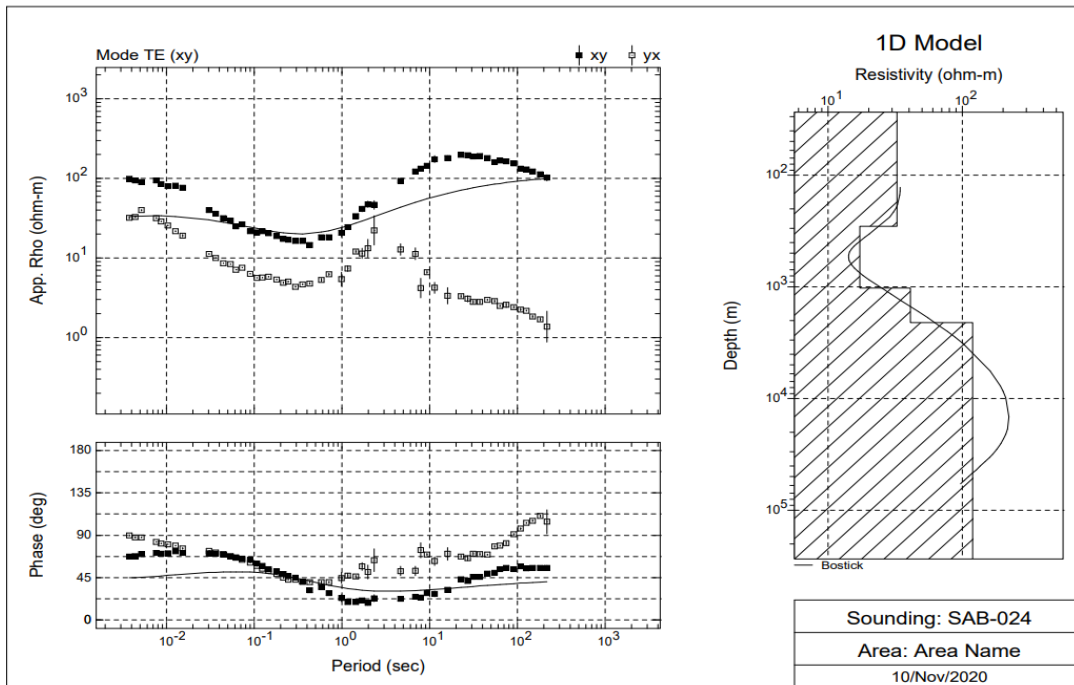
شکل ۴-۱۷: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است.



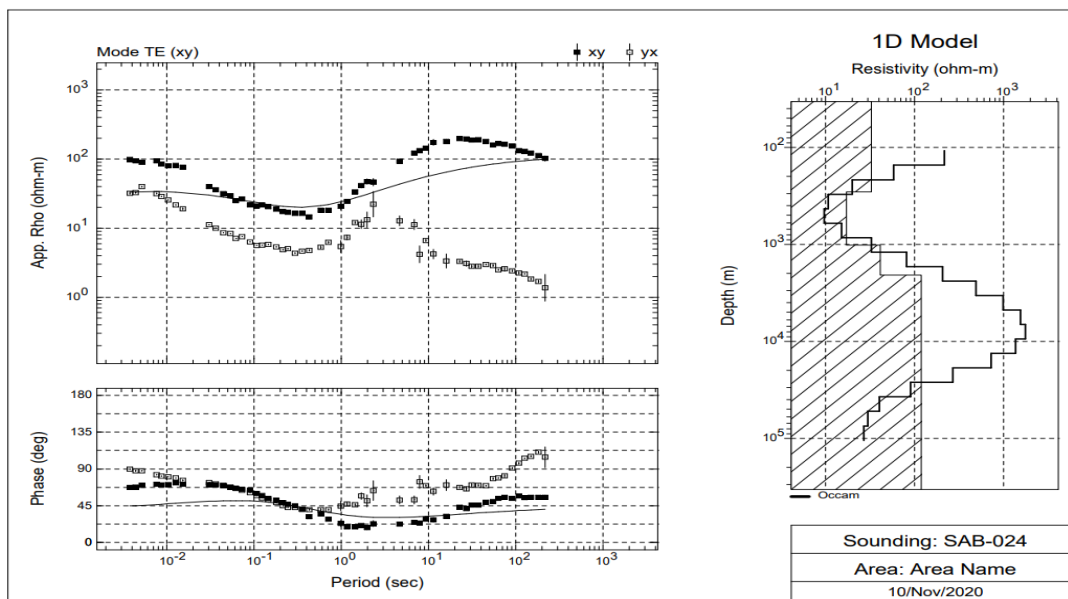
شکل ۴-۱۸: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است.



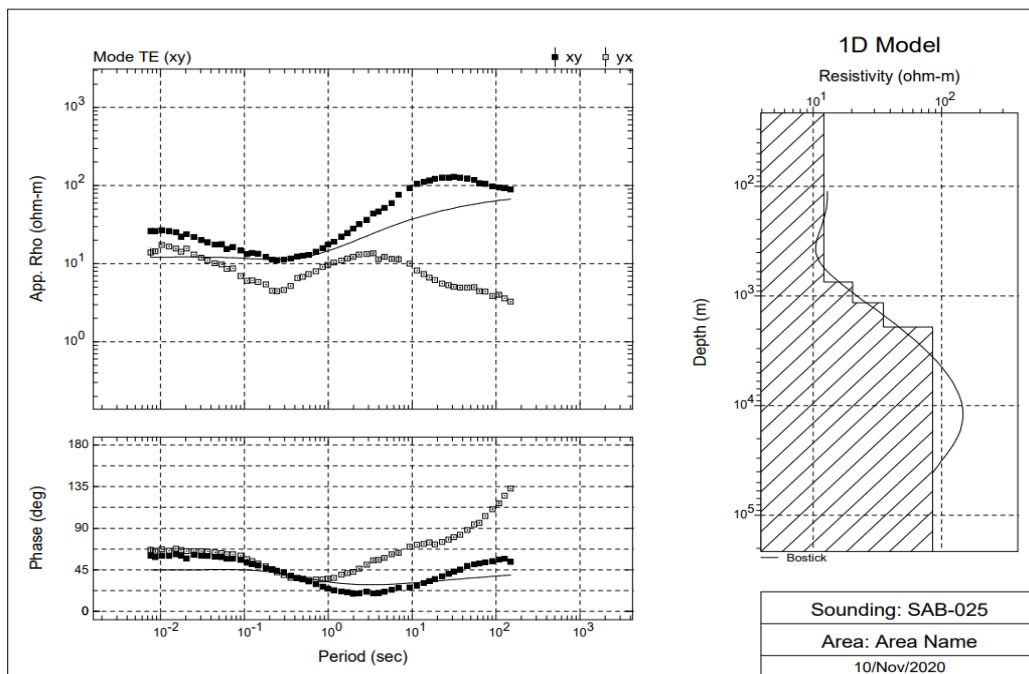
شکل ۴-۱۹: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اُکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است.



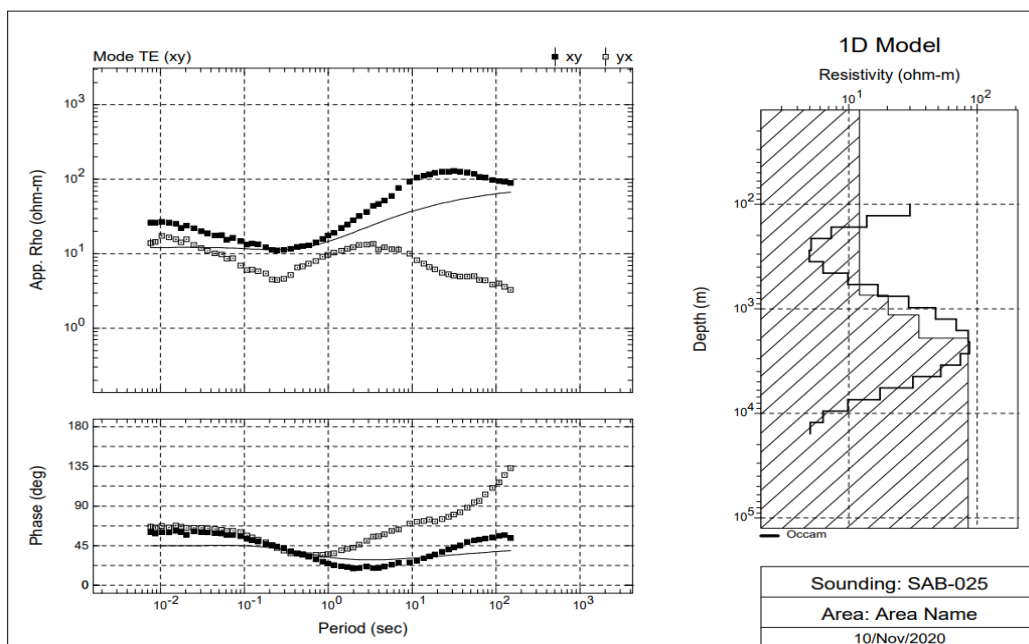
شکل ۴-۲۰: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است.



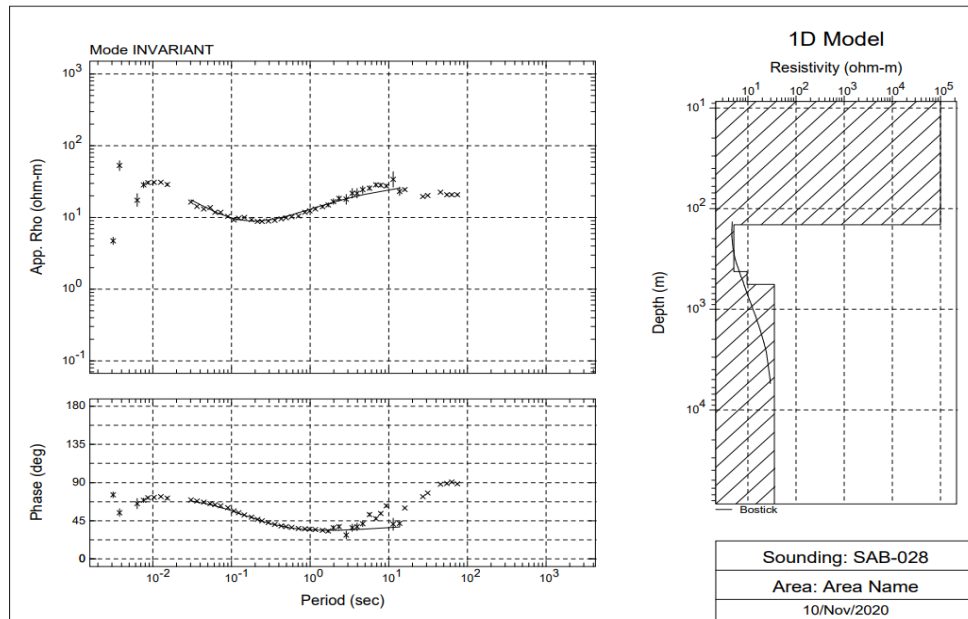
شکل ۴-۲۱: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است.



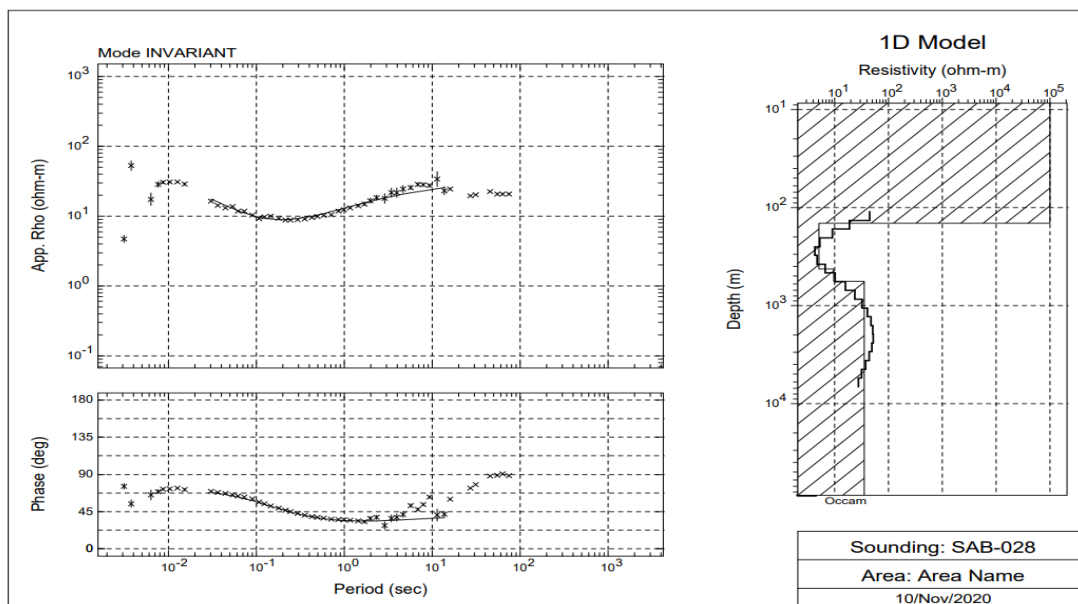
شکل ۴-۲۲: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است.



شکل ۴-۲۳: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است.



شکل ۴-۲۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است.



شکل ۴-۲۵: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است.

۴-۷ وارون سازی داده های MT

طرح‌های وارون‌سازی^۱ با رسیدن از داده به مدل، سریع‌ترین راه را در میان دیگر روش‌های موجود برای مدل -

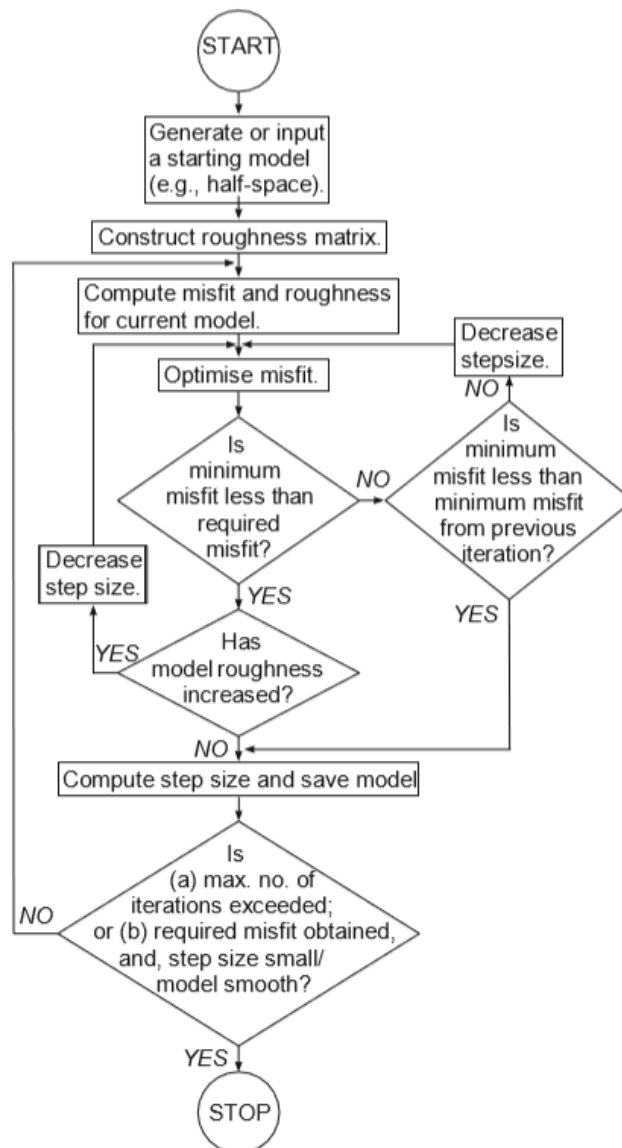
سازی داده‌ها فراهم می‌کنند، بدون آنکه مدل‌سازی پیشرو را زیر سؤال ببرد (Simpson and Bahr, 2005).

در بعضی از طرح‌های وارون‌سازی، رابطه غیرخطی بین مدل و داده، باید با استفاده از تبدیل آنها به یک مدل و داده‌ی جایگزین، به یک رابطه شبه‌خطی تبدیل شود. در دیگر طرح‌ها، فرض می‌شود که تغییرات کوچک مدل، دارای یک رابطه خطی با تغییرات کوچک داده‌ها می‌باشد.

زمانی که سیستم خطی مورد نیاز برای معادلات استخراج شد، مسئله به مسئله‌ی وارون کردن یک ماتریس، ساده می‌شود. وارون‌سازی‌های مونته - کارلو کلاس دیگری از الگوریتم‌های مدل‌سازی را شکل می‌دهند. از نقطه نظر ریاضی، آنها هیچ وقت دقیقاً وارون‌سازی نیستند. بلکه مراحل طولانی از مدل‌های پیشرو هستند که در آن رسانندگی‌ها به طور رندم دچار اغتشاش می‌شوند و چون انرژی الکترومغناطیسی به صورت پخش شونده‌ای انتشار می‌یابد، سونداژزنی MT بیشتر گرادیان‌های رسانندگی را تفکیک می‌کند، نه مرزهای تیز و لایه‌های نازک. بنابراین ما باید MT را به صورت یک تصویر مبهم از ساختار زمین واقعی در نظر بگیریم تا به صورت تصویری که واضح باشد. علاوه بر این چون سونداژ MT یک سونداژ حجمی است، شکل‌های مشابه، هنگامی که طول مقیاس القایی از مرتبه فاصله بین سایتی یا بزرگتر از آن باشد، با استفاده از داده های MT در سایت‌های نزدیک نمونه برداری خواهند شد. بنابراین بسیاری از طرح‌های وارون‌سازی بر مبنای فلسفه‌ی کمینه کردن پیچیدگی مدل هستند که تا حد امکان بیشتر از آنکه به دنبال برازش داده های عملی باشیم (که ضخامت مدل را بیشینه می‌کند)، در جستجوی هموارترین مدلی هستیم که داده‌ها را با یک آستانه پذیرفته شده تطبیق دهد. از یک سو مدل‌های هموار یا حداقل ساختار، میل ما را به انجام تفسیر بیش از حد داده‌ها کاهش می‌دهند. از سوی دیگر مرزهای تیز اغلب در طبیعت رخ می‌دهند، یک مثال اتصال بین بدنه یک کانسار و سنگ میزبان مقاوم است.

¹ Inversion

یک فلوچارت از مراحل موجود در فرایند وارون‌سازی در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است. آزمایش کردن مدل‌های اولیه متفاوت برای اطمینان از اینکه جواب یکسانی مستقل از مدل اولیه بدست می‌آید، توصیه می‌شود.



شکل ۴-۲۶: طرح کلی عملیاتی که نمایش‌دهنده مراحل موجود در وارون‌سازی کمترین ساختار است (Groot-Hedlin and Constable, 1990)

۴-۸ مدل‌سازی دوبعدی

در این مطالعه برای مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های MT از نرم افزار WinGLink استفاده شده است. روشی که در اینجا برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است، روش وارون‌سازی هموار دوبعدی رودی و مکی بوده

است (Rodi & Mackie, 2001) این روش بر پایه گرادیان مزدوج غیرخطی استوار است. در این الگوریتم تلاش بر حداقل کردن تابع هدف است که در واقع مجموع خطاهای نرمال شده داده‌ها و همواری‌سازی مدل می‌باشد (قندی، ۱۳۸۶).

۴-۹ روش گرادیان مزدوج غیر خطی

اضافه شدن قیدها به مسائل وارون برای غلبه بر عدم یکتایی پارامترهای مدل در روش مگنتوتلوریک، روند منظم سازی تیختو (۱۹۷۷) نامیده می‌شود. قید مورد نظر به دست آوردن هموارترین مدل، منطبق به داده‌ها می‌باشد به این صورت که مدل مقاومت ویژه باید تا حد امکان هموار باشد و همچنین برازش خوبی با داده های MT مشاهده‌ای داشته باشد. تیختو و آرسن (۱۹۷۷) برای پیدا کردن مدل m در مسئله وارون MT یک حل منظم را تعریف کردند که این تابع هدف Ψ را که به صورت زیر تعریف می شود کمینه می‌کند:

(۴-۱)

$$\Psi(d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \tau m^T L^T L m$$

در این معادله d بردار داده های مشاهده‌ای، F عملگر مدل سازی پیشرو و m بردار پارامترهای مدل می‌باشند. ماتریس معین و مثبت V نقش ماتریس وزنی داده‌ها که یک ماتریس قطری است و حاوی خطای داده‌ها می‌باشد را یاری می‌کند. ماتریس L یک عملگر ساده خطی می‌باشد t پارامتر منظم‌سازی می‌باشد که عددی مثبت است. در معادله (۴-۱) جمله اول در طرف راست بیانگر عدم برازش داده و جمله دوم هموار بودن مدل و نزدیک بودن آن به مدل اولیه را بیان می‌کند و در نهایت همواری مدل وارون می‌تواند با تغییر در مقدار پارامتر منظم‌سازی t کنترل شود. برازش داده های اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه و فاز مگنتوفلوریک $(\varphi^{Data}, \rho^{data})$ با پاسخ محاسبه شده وارون $(\varphi^{resp}, \rho^{resp})$ می‌تواند با استفاده از ریشه میانگین مربعات (RMS) مورد ارزیابی قرار گیرد.

اگر داده های مقاومت ویژه ظاهری و فاز در N ایستگاه و M فرکانس موجود باشند، آنگاه ریشه میانگین مربعات (RMS) خطای مدل سازی به صورت زیر بیان می شود (Xiao.2004).

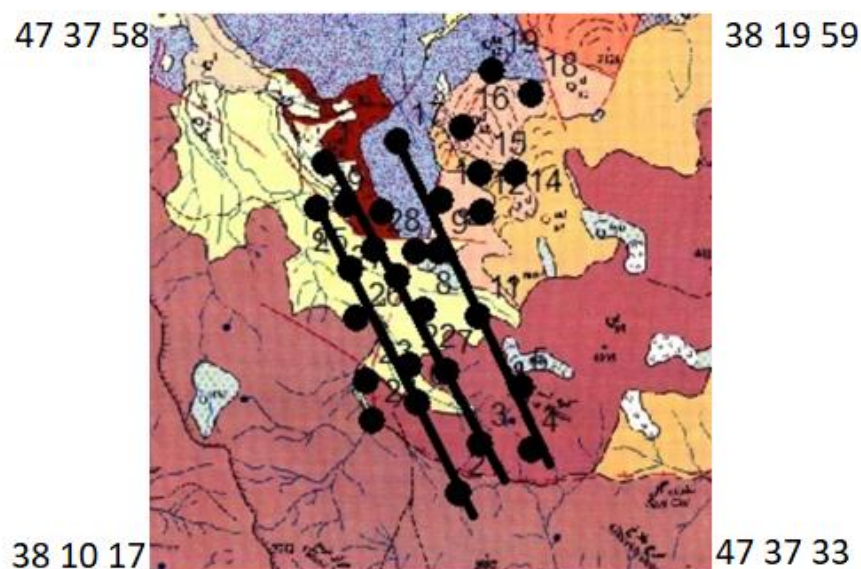
(۴-۲)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{2NM} \sum_{j=i}^M \sum_{i=i}^N \frac{(\rho_{ij}^{data} - \rho_{ij}^{resp})^2}{e_{ij}^{r1}} + \frac{1}{2NM} \sum_{j=i}^M \sum_{i=i}^N \frac{(\rho_{ij}^{data} - \rho_{ij}^{resp})^2}{e_{ij}^{p1}}}$$

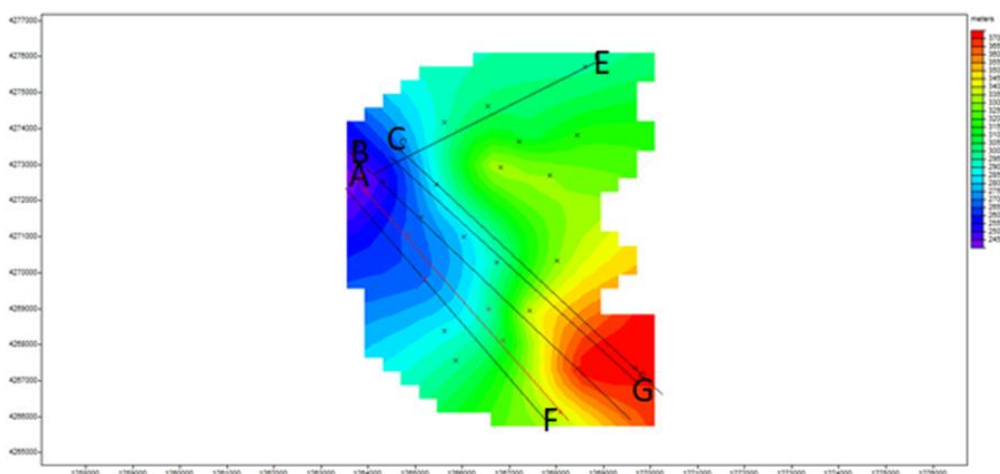
که در آن e^p و e^i به ترتیب خطای استاندارد (خطای کف) داده های اندازه گیری شده مقاومت ویژه و فاز هستند. اگر تابع عدم برازش RMS خیلی بزرگتر از خطای استاندارد مقاومت ویژه یا فاز یا هر دو باشد، بیانگر این است که مدل ارائه شده برازش خوبی با داده های MT ندارد و همچنین نوفه موجود در داده ها بزرگتر از خطای پیش بینی شده است و یا اینکه اثرات سه بعدی ناهمگنی های سطحی داده ها را تحت تأثیر قرار می دهند.

اگر مقدار RMS خیلی کوچکتر از خطای استاندارد مقاومت ویژه یا فاز یا هر دو باشد، بدین معنی است که خطای مدل سازی خیلی زیاد است و مدل وارون به دست آمده ناهموار است. مسئله اصلی در وارون سازی داده های ژئوفیزیکی بسط یک راه حل پایدار در وارون سازی است که بتواند به طور همزمان ساختارهای پیچیده ژئوفیزیکی را حل کند. روش موسوم برای به دست آوردن راه حل پایدار بر اساس بیشترین مقدار هموارسازی است. (Portninguine,1999).

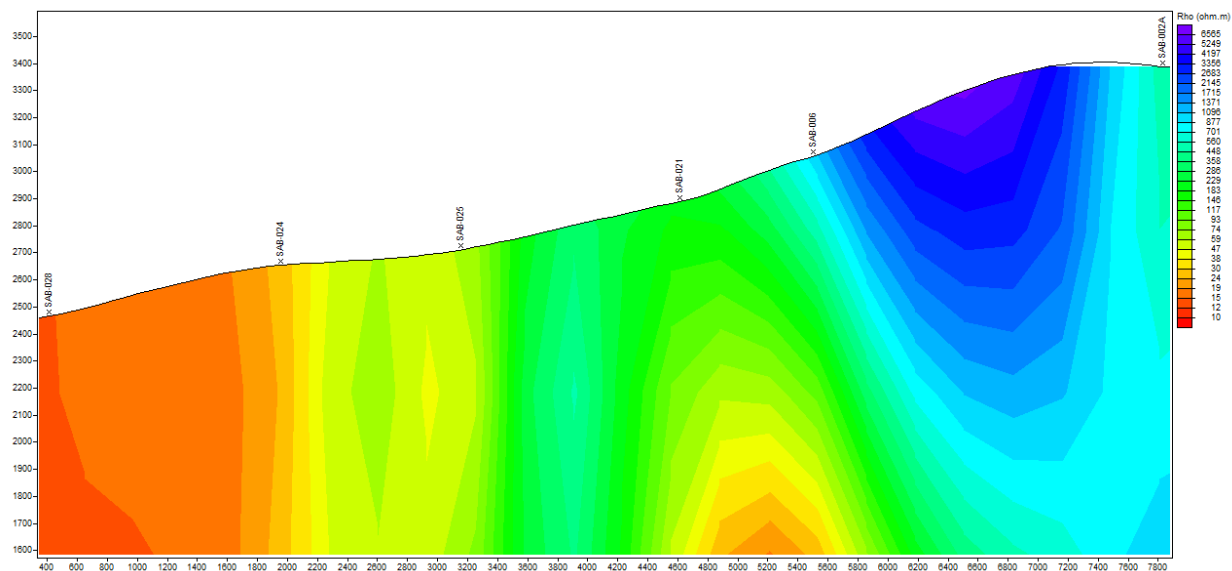
به منظور وارون‌سازی دوبعدی با استفاده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی سه پروفیل A ، B و C در راستای شمال غربی - جنوب شرقی انتخاب نموده ایم (شکل‌های (۴-۲۷) و (۴-۲۸)) که مدل‌سازی دوبعدی آنها در شکل‌های (۴-۲۹) و (۴-۳۰) و (۴-۳۱) آورده شده است. مقاومت ویژه مش ۱۰۰۰ اهم متر و تاو (ضریب منظم‌سازی)، ۳ در نظر گرفته شده و از مد TM و TE جهت مدل‌سازی دوبعدی هر سه پروفیل استفاده شده است.



شکل ۲۷-۴: موقعیت پروفیل‌های مگنتوتلوریک که با خطوط مشکی مشخص شده است.



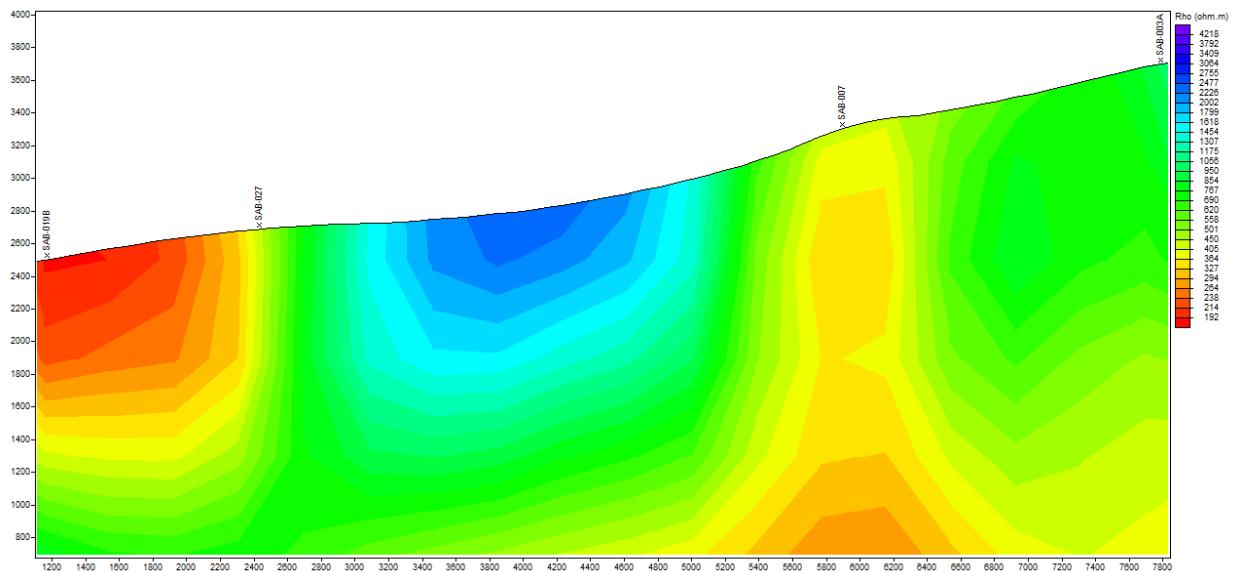
شکل ۲۸-۴: نمایش سه پروفیل A ، B و C به منظور وارون‌سازی در نقشه‌ی توپوگرافی داده‌های مگنتوتلوریک



RMS=1.871

شکل ۴-۲۹: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A (سونداژ های ۲، ۶، ۲۱، ۲۵، ۲۴، ۲۸)

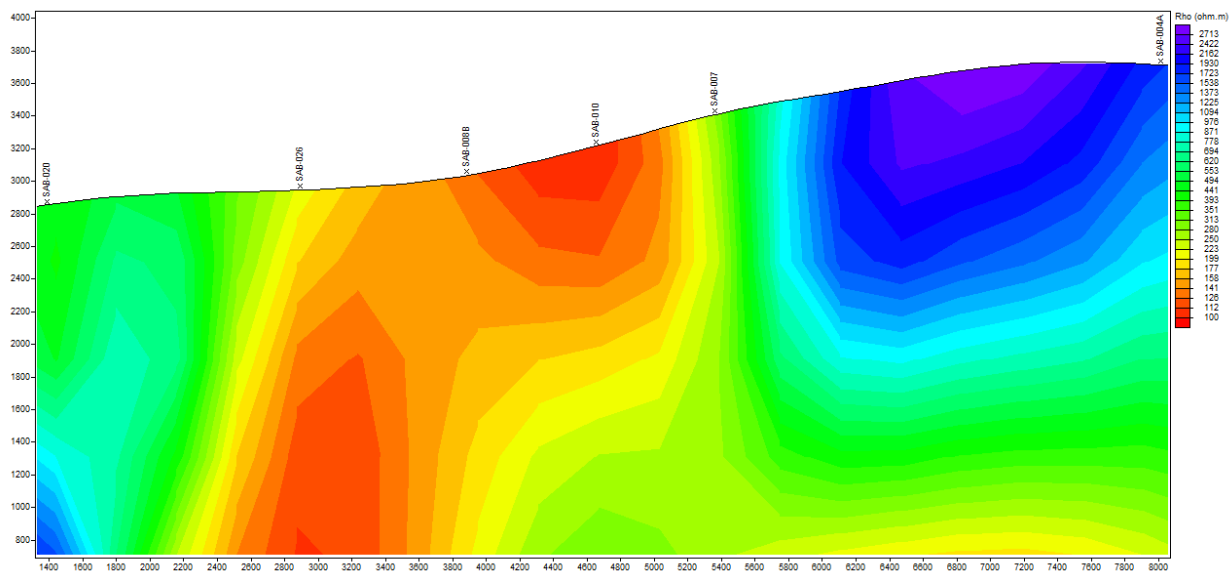
نتایج وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A نشان می دهد که مقاومت ویژه لایه سطحی در سمت راست این پروفیل بالاست اگر چه در عمق بیشتر از مقاومت ویژه لایه ها کاسته می شود. در مرکز و سمت چپ این پروفیل، مقاومت ویژه لایه سطحی پایین است که می تواند حاکی از وجود لایه های رسی باشد. در اعماق زیاد در سراسر این پروفیل، مقاومت ویژه لایه ها افزایش می یابد.



RMS=1.933

شکل ۴-۳۰: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B (سوندازهای ۱۹،۲۷،۷،۳)

نتایج وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B حاکی از آن است که مقاومت ویژه لایه سطحی در سمت راست این پروفیل متوسط است ولی در مرکز این پروفیل، مقاومت ویژه لایه سطحی بالا آمده و در سایر بخش های این پروفیل، مقاومت ویژه لایه سطحی متوسط است. در عمق بیشتر، در سمت چپ این پروفیل، مقاومت ویژه به شدت کاسته می شود. در سایر قسمت های این پروفیل، مقاومت ویژه لایه ها متوسط است.



RMS=2.241

شکل ۴-۳۱: وارون‌سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C (سونداهای ۷۰۴، ۸۱۰، ۲۶، ۲۰)

نتایج وارون‌سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C نشان می دهد که مقاومت ویژه لایه سطحی در سمت راست این پروفیل نیز بالاست ولی در سایر قسمت‌های این پروفیل، مقاومت ویژه لایه سطحی متوسط است به طوری که در عمق بیشتر، در مرکز و سمت چپ این پروفیل، مقاومت ویژه به شدت کاسته می‌شود. در عمق بیشتر، در همه قسمت‌های این پروفیل، مقاومت ویژه لایه‌ها متوسط به بالاست.

فصل ۵

وارون سازی سه بعدی داده های مگنتو تلوریک برداشت
شده از منطقه مورد مطالعه

۵-۱ مقدمه

WSINV3DMT (سیریپورن واراپورن و همکاران، ۲۰۰۵) یک برنامه وارون سازی کامل سه بعدی برای داده های مگنتوتلوریک است. این وارون سازی از وارون سازی فضای داده دوبعدی به روش هموارسازی اکام (سیریپورن واراپورن و اگبرت ۲۰۰۰) استفاده می کند. وارون سازی به دنبال هموارترین مدل ساختاری با حداکثر تناسب با داده ها است. الگوریتم WSINV3DMT از روش تفاضلات محدود و شبکه مستطیلی جهت گسسته سازی فضای مدل و تکنیک وارون سازی اکام را به منظور پیدا کردن یک مدل هموار به کار می گیرد (سیریپورن واراپورن، ۲۰۰۵)

وارون سازی اصلی اکام توسط کانستیبیل و همکاران (۱۹۸۷) که برای داده های یک بعدی مگنتوتلوریک، معرفی شد. بعدها توسط دگروت-هدلین و کانستیبیل (۱۹۹۰)، داده های دو بعدی مگنتوتلوریک گسترش یافتند.

۵-۲ چگونگی استفاده از کد WSINV3DMT

در درجه ی اول به سه داده ورودی نیاز داریم، مدل، دیتا و استارتاپ، ابتدا باید در نرم افزار WinGLink کیفیت داده ها مورد بررسی قرار گیرد و بعد از آن خروجی EDI گرفته شود.

قبل از اینکه داده ها، مدل و استارتاپ را بسازیم به این نکته باید توجه کنیم که کد WSINV3DMT رم زیادی را مصرف می کند. پارامترهای M و N را داریم که N تعداد پیوندها، ایستگاه ها و تعداد مؤلفه ها را مشخص می کند و M تعداد مش ها در راستای X, Y, Z را مشخص می کند.

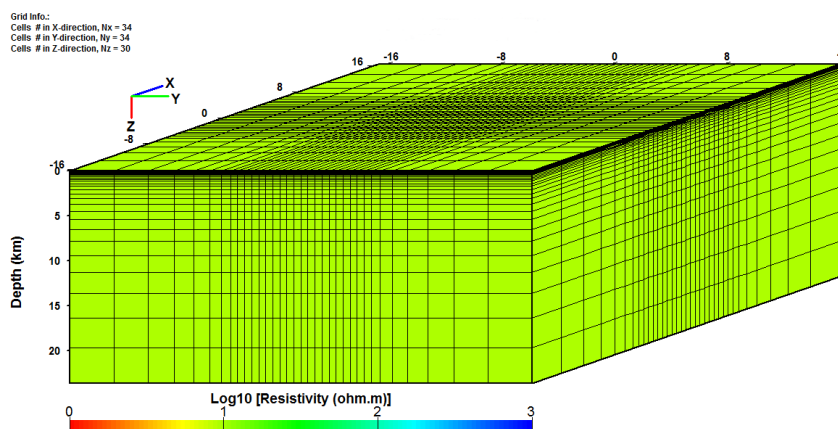
استارتاپ دارای ۱۰ پارامتر ورودی است و دیتا شامل پارامترهای تعداد ایستگاه ها، تعداد دوره ها، فرکانس ها و تعداد اجزای امپدانس می باشد. در ضمن فایل دیتا بر اساس دوره است.

بعد از فایل دیتا، فایل مدل را می‌سازیم. در این مرحله باید موقعیت ایستگاه‌ها و فاصله‌ی هر یک را مشخص کنیم. برای ساختن مدل، بخش مرکزی و خروجی تعریف می‌کنیم. بعد از اینکه فایل مدل، فایل داده‌ها و فایل استارت‌آپ را ساختیم، برای کد، تعداد ایستگاه‌ها، تعداد دوره‌ها، تعداد مؤلفه‌ها. تعداد مش در راستای X ، تعداد مش در راستای Y و تعداد لایه‌ها یا Z را تعریف می‌کنیم.

۵-۳ مدل‌سازی سه بعدی داده‌ها

مدل اولیه (شکل ۳-۱) در نظر گرفته شده دارای ابعاد $34 \times 34 \times 37$ به ترتیب در جهت X ، Y و Z است.

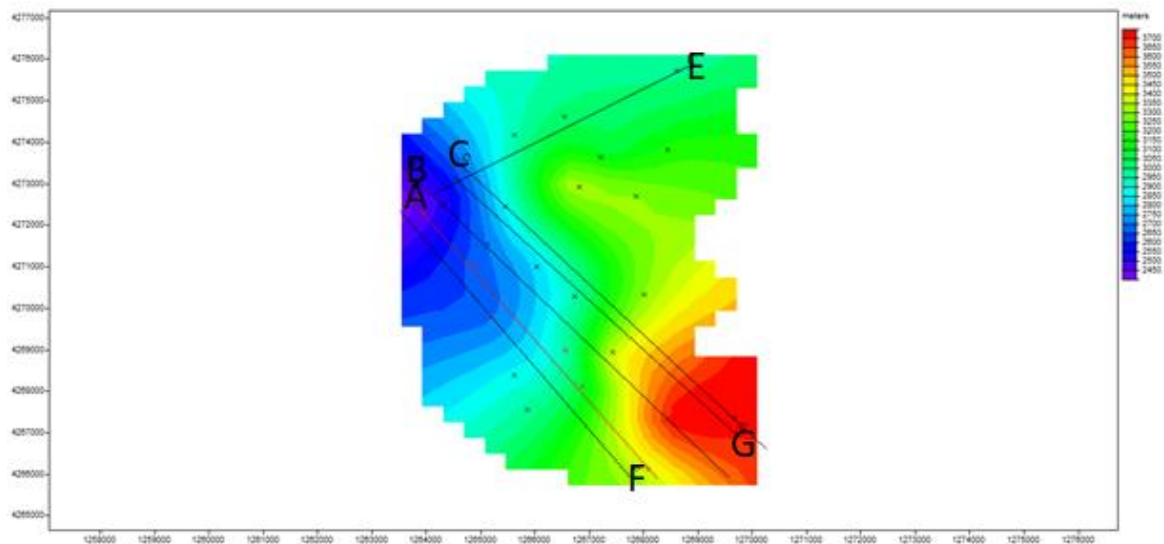
از مجموع ۳۷ بلوک در نظر گرفته شده در جهت Z تعداد ۷ بلوک برای لایه هوا است. بلوک مرکزی دارای ابعاد 500×500 متر است و ضریب افزایشی برای بلوک‌های خارج از بخش مرکزی در جهت X و Y ، مقدار ۱،۳ می‌باشد. ضخامت لایه اولیه در جهت Z ، مقدار ۲۰ متر انتخاب شده است. مقاومت ویژه مدل اولیه برابر ۱۰ اهم‌متر است. وارون‌سازی با تمام مؤلفه‌های امپدانس^۱ و طی ۵ تکرار انجام شده است و RMS نهایی برابر $2/734$ می‌باشد. مقطع‌های گرفته شده در جهت XY تا عمق ۷۸۵۰ متر گرفته شده است. سه مقطع در جهت XZ نیز گرفته شده است.



شکل ۵-۱: قسمتی از مدل اولیه برای شروع وارون‌سازی در سه جهت X ، Y و Z دارای ابعاد $34 \times 34 \times 37$

¹ Full impedance

جهت مدل سازی وارون سه بعدی، سه پروفیل E، F و G انتخاب شده است که در شکل (۵-۲) مشاهده می کنید.

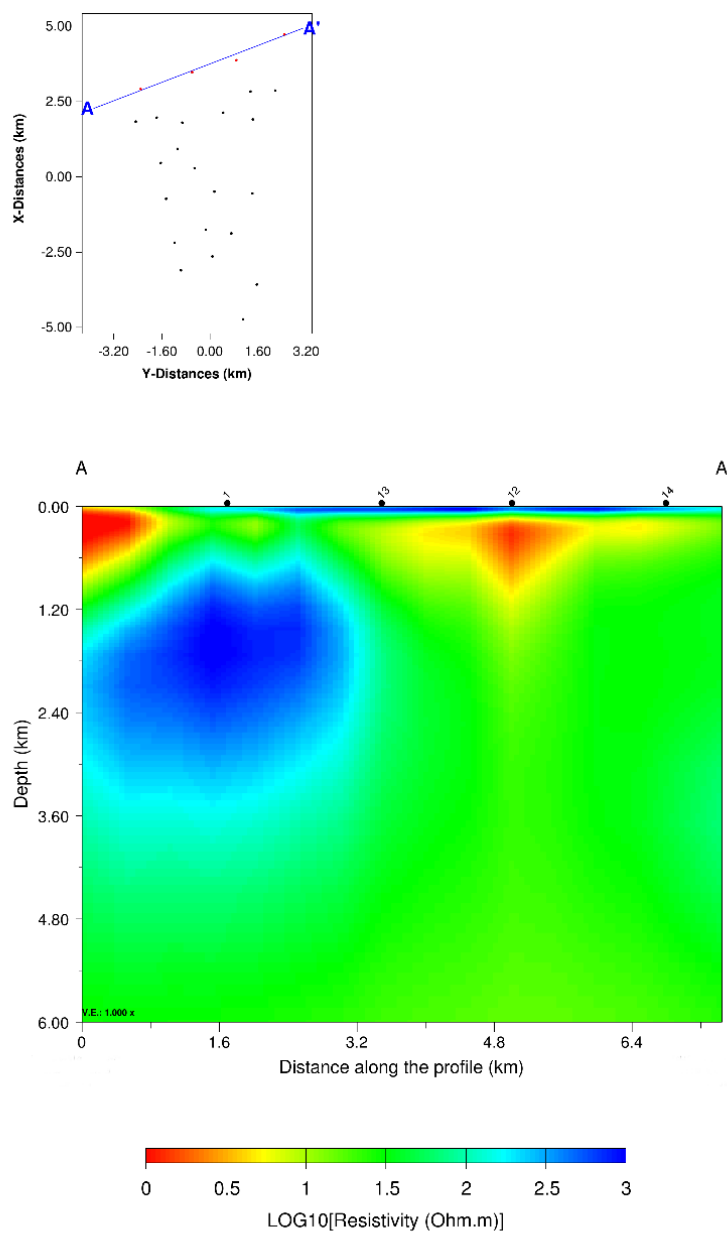


شکل ۵-۲: موقعیت پروفیل ها (A,B,C,E,F,G) در نقشه ی توپوگرافی داده های برداشت شده مگنتوتلوریک منطقه سبلان

مقاطع مقاومت ویژه ایجاد شده از مدل سازی وارون سه بعدی، سه پروفیل E, F, G را در شکل های (۵-۳)، (۵-۴)،

(۵-۵) در ادامه مشاهده می کنید و مقادیر مقاومت ویژه در اعماق مختلف ایجاد شده از مدل سازی وارون

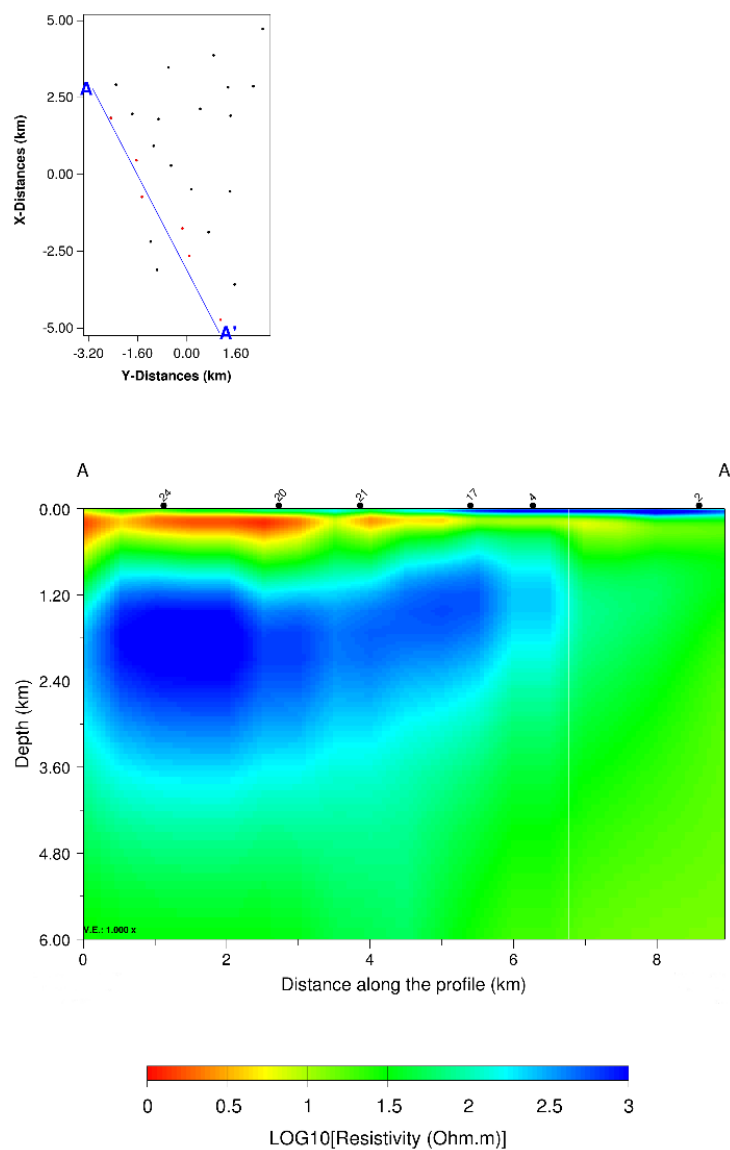
سه بعدی در اشکال (۵-۶) و (۵-۷) مشخص شده است.



شکل ۳-۵: مقطع مقاومت ویژه ایجاد شده از مدل سازی سه بعدی برای پروفیل E (سوندازهای ۱۲، ۱۳، ۱۴)

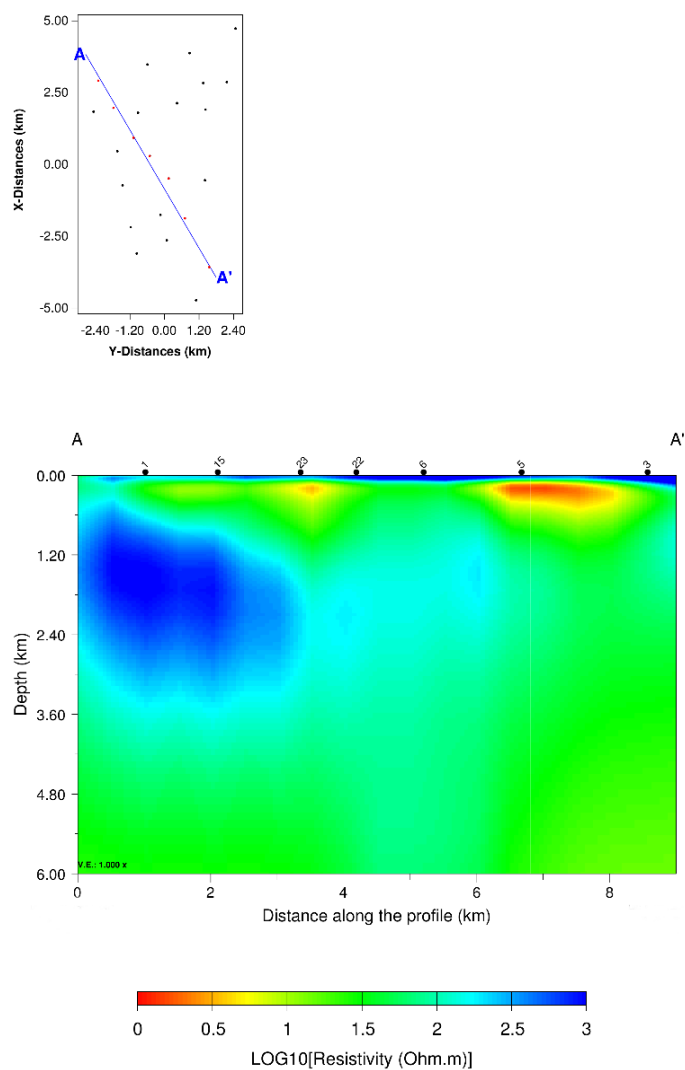
همانطور که در شکل (۳-۵) مشاهده می کنید، در ابتدای پروفیل E یک زون مقاوم وجود دارد که بر اساس اطلاعات زمین شناسی می توان آن را تشخیص داد. در ابتدای پروفیل از سطح تا عمق ۷۰۰-۸۰۰ متر، زون رسانا و در زیر

سطح ایستگاه ۱۲ یک زون رسانا با مقاومت ویژه کمتر از ۱۰ اهم‌متر وجود دارد و سطح زمین دارای مقاومت ویژه بالایی می‌باشد.



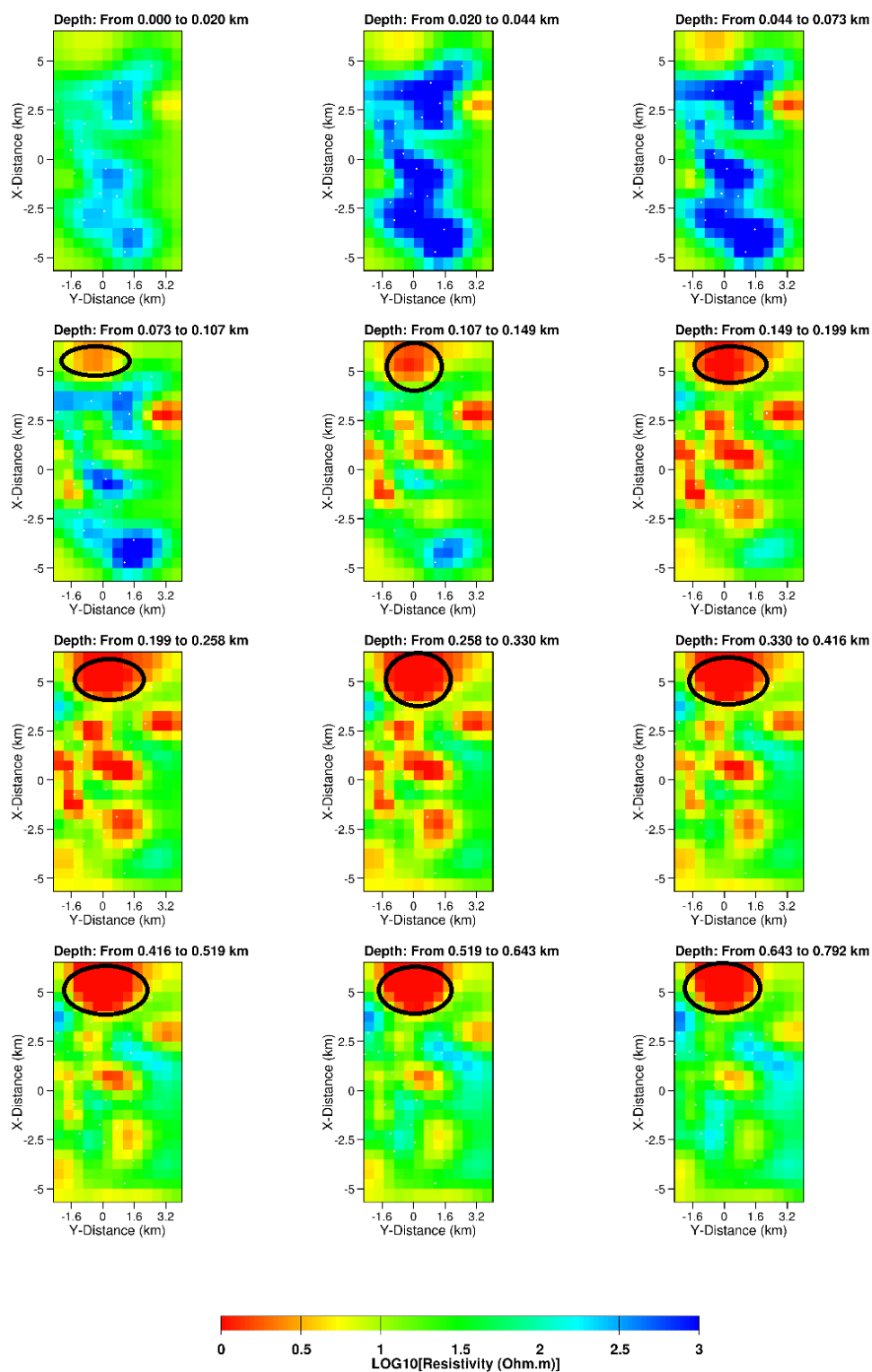
شکل ۴-۵: مقطع مقاومت‌ویژه ایجاد شده از مدل‌سازی سه‌بعدی برای پروفیل F (سوندازهای ۲، ۴، ۱۷، ۲۱، ۲۰، ۲۴)

با توجه به شکل (۴-۵)، زون رسانا از ابتدای پروفیل F تا عمق کم، به طور تقریبی ۶۰۰ متر گسترش یافته است. در اواسط پروفیل، لایه‌ها یا زون رسانای سطحی وجود دارد که عمق آن از ۲۰۰-۳۰۰ متر بیشتر نیست. در اینجا یک زون مقاوم هم دیده می‌شود.



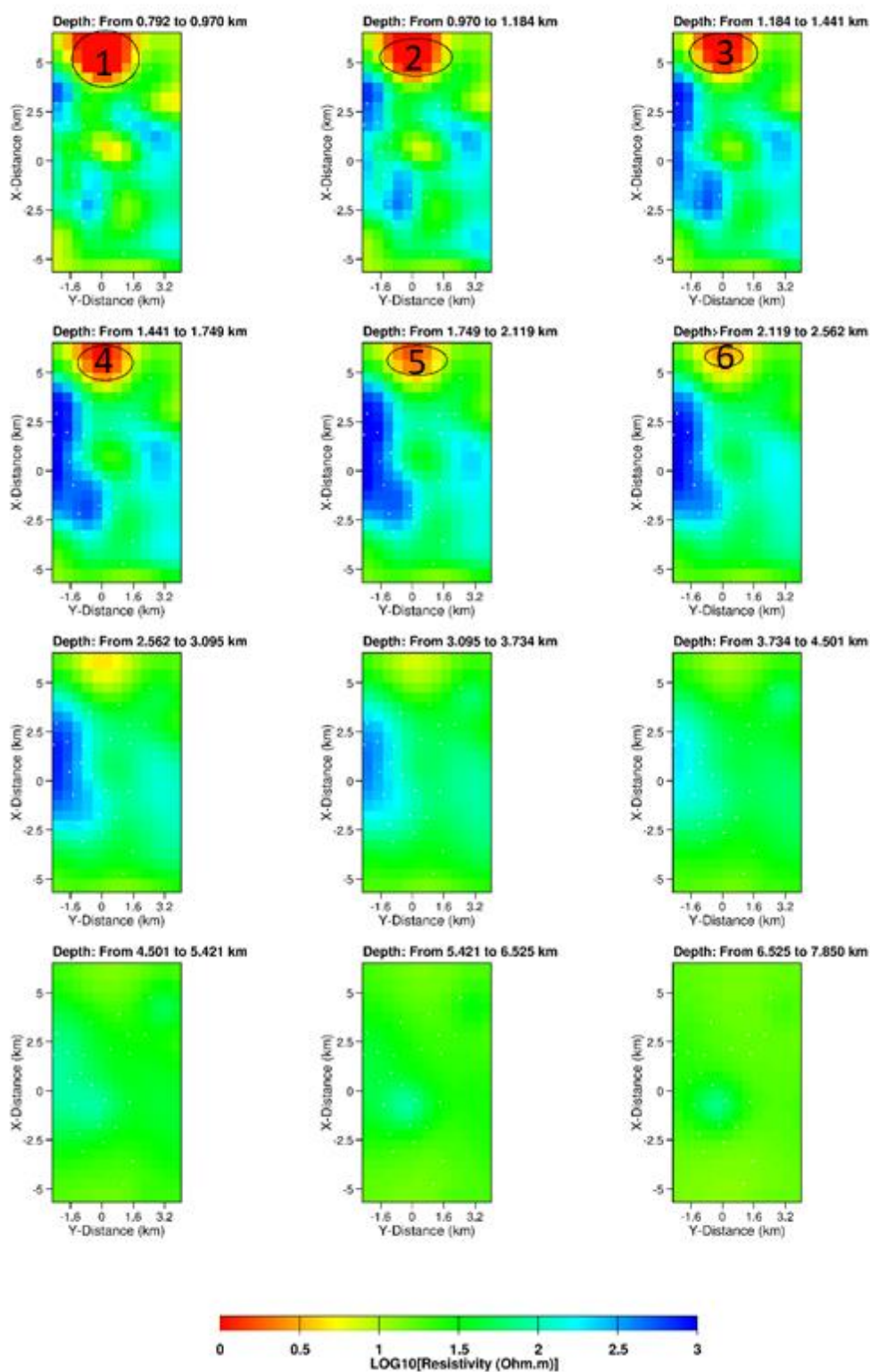
شکل ۵-۵: مقطع مقاومت ویژه ایجاد شده از مدل‌سازی سه‌بعدی برای پروفیل G (سوندازهای ۱، ۱۵، ۲۳، ۲۲، ۶، ۵، ۳)

با توجه به شکل (۵-۵) یک زون مقاوم در ابتدای پروفیل G وجود دارد که گسترش جانبی آن حدود ۳۰۰۰ متر و بیشتر است و گسترش عمقی آن ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر می‌باشد. در اواسط پروفیل زیر سطح ایستگاه ۲۳ زون رسانا وجود دارد. زون رسانی وسیع‌تر در انتهای پروفیل و زیر سطح ایستگاه ۵ می‌باشد و به صورت عمقی لایه‌ی رسانا، ۲۰۰-۳۰۰ متر گسترش یافته است. در سطح زمین لایه‌های مقاومی که مقاومت ویژه آن‌ها به ۱۰۰۰ اهم‌متر می‌رسد، دیده می‌شوند که گسترش عمقی آن‌ها به ۱۰۰ متر هم نمی‌رسد.



شکل ۵-۶: مقادیر مقاومت ویژه در اعماق مختلف که از وارون سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک به دست آمده اند.

با توجه به شکل (۵-۶) که نشان‌دهنده‌ی مقادیر مقاومت ویژه در اعماق مختلف است، عمق ۰ تا ۲۰ متر، لایه‌های سطحی را نشان می‌دهد و زون‌های رسانای محدودی داریم. با افزایش عمق، زون‌های رسانا که با بیضی و دایره در شکل مشخص شده اند، افزایش می‌یابند اثر آلتراسیون و دگرسانی سنگ‌ها باعث افزایش رسانندگی و تشکیل رس که یکی از محصولات دگرسانی است، می‌شوند. رس‌ها دارای مقاومت ویژه پایینی هستند. در این شکل زون‌های رسانا که با دایره و بیضی مشخص شده‌اند، مربوط به بالای سطح مخزن زمین‌گرمایی می‌باشند..



شکل ۵-۷: ادامه شکل (۵-۶)

با توجه به شکل (۷-۵) در عمق ۷۹۲ تا ۹۷۰ متر، مخزن زمین‌گرمایی گسترش یافته است و از عمق ۹۷۰ تا ۱۱۸۴ متر، مخزن زمین‌گرمایی گسترش خوبی پیدا کرده است و تا اعماق ۲۵۶۲ متر، زون‌های رسانا که نشان‌دهنده‌ی مخزن زمین‌گرمایی می‌باشند. امتداد پیدا کرده‌اند و موقعیت مخزن زمین‌گرمایی در اعماق مختلف طبق شکل (۷-۵) با اعداد ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) مشاهده می‌شود، منطقه رسانا از عمق ۱۲۰۰-۸۰۰ متر شروع شده و تا عمق تقریبی ۲۵۰۰ متر ادامه پیدا کرده است. احتمال آن وجود دارد که این منطقه رسانا، مخزن زمین‌گرمایی را نشان می‌دهد. این منطقه عمیق می‌تواند با جریان سیال درون مناطق دارای چگالی بیشتر مرتبط باشد. این زون، تنها در زیر سطح دگرگونی ترد و شکننده قرار دارد و اگر چنین باشد، احتمالاً نشان‌دهنده پیوستگی سیال در امتداد مرز شکستگی است. به عبارت دیگر جریان بیشتر این مناطق با تخلخل کمتر (چگالی بیشتر) و یا به طور کلی مقاومت ویژه کم‌تر سیال منفذی قابل توضیح است. علاوه بر این، مناطق با مقاومت ویژه بیشتر را می‌توان به عنوان تخلخل بیشتر (چگالی کم‌تر) تفسیر کرد. با توجه به وجود گسل‌های متعدد در منطقه و تقاطع آن‌ها (نقشه زمین‌شناسی)، فرضیه فوق مبنی بر اینکه این زون با رسانندگی بالا ممکن است به زون‌های شکستگی وابسته باشد، تایید شده است.

فصل ۶

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری

۱- از بررسی های مدل سازی های دوبعدی و سه بعدی می توان نتیجه گرفت، مخزن زمین گرمایی به طور تقریبی از عمق ۸۰۰-۱۲۰۰ تا عمق ۲۵۶۲ متر امتداد پیدا کرده است و با توجه به شکل (۵-۷) از عمق ۹۷۰ متر تا عمق ۱۱۸۴ متر، مخزن زمین گرمایی گسترش خوبی یافته است.

۲- از بررسی های قبلی انجام شده و بررسی های انجام شده در این تحقیق می توان نتیجه گرفت، لایه ها و زون های رسانا که احتمال آن وجود دارد رس باشند، سطح بالای مخزن زمین گرمایی را پوشش می دهند.

۳- با توجه به شکل های (۵-۳) و (۵-۵)، سطح زمین دارای مقاومت ویژه بالا و ۱۰۰۰ اهم متر می باشد.

۴- منطقه عمیق رسانا که مربوط به مخزن زمین گرمایی می باشد، می تواند با سیال درون مناطق دارای چگالی بیشتر، مرتبط باشد.

۵- نتایج تفسیر مقاطع مقاومت ویژه نشان می دهد، زون های رسانا که مخزن زمین گرمایی زیر سطح آنها قرار گرفته و به صورت توده ای در شکل (۵-۶) دیده می شوند، محصولات حاصل از دگرسانی و آلتراسیون سنگ ها می باشند.

۶- با توجه به بررسی های قبلی انجام شده سیال هیدروترمال در مرز شکستگی امتداد پیدا کرده است و جهت جریان سیال هیدروترمال از شمال غرب به جنوب شرق یعنی از شرق دره موئیل به سوی غرب آن می باشد.

۷- با توجه به وجود گسل های متعدد در منطقه و اطلاعات زمین شناسی، زون رسانا به زون های شکستگی وابسته است.

۸- با توجه به مطالعات پیشین، نوع سیستم ژئوترمال در این منطقه، هیدروترمال با فاز سیال غالب آب می باشد و توده های نفوذی واقع در زیر آتشفشان، منبع اصلی حرارتی سیستم محسوب می شوند که در عمقی بین ۵ تا ۶ کیلومتر قرار دارند و ساختار سنگی از گرانیات تا گابرو دیوریت را در بر می گیرد (کلاگری، ۱۳۹۶).

۶-۲ پیشنهادات

از مجموع بررسی‌های انجام شده و نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان پیشنهادات زیر را برای ادامه کار توصیه نمود:

۱- پیشنهاد می‌شود تا اطلاعات مربوط به تعداد ایستگاه‌های MT بیشتری جهت وارون‌سازی سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بعد از پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها بتوان هندسه‌ی دقیق‌تری از مخزن زمین‌گرمایی تعیین نمود.

۲- با استفاده از نتایج بدست آمده از مدل‌سازی و تفسیر داده‌های MT و همچنین نتایج بدست آمده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی (گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی) می‌توان اطلاعات بیشتری از زمین‌شناسی مخزن زمین‌گرمایی و همچنین توده‌های نفوذی و ماگمایی مرتبط با مخزن زمین‌گرمایی بدست آورد.

۳- برای مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی داده‌های MT پیشنهاد می‌شود از برنامه یا کد کامپیوتری ModEM هم استفاده شود و نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی بدست آمده از دو برنامه‌ی ModEM و WSINV3DMT با هم مقایسه گردند. بر اساس بررسی‌های انجام شده قبلی، به نظر می‌رسد زمان محاسبات یا اجرای برنامه با استفاده از برنامه ModEM کمتر از برنامه‌ی WSINV3DMT باشد، با این حال به نظر می‌رسد کیفیت، دقت و توانمندی برنامه‌ی WSINV3DMT بیشتر از برنامه‌ی ModEM باشد. این مورد نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

منابع

- البرزیان جونقانی ش. (۱۳۹۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد: مدل سازی مرزهای تیز (شارپ باندری) داده های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری منطقه سراب گچساران، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- امینی، ب، (۱۳۶۳)، نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مشکین شهر، انتشارات زمین شناسی کشور.
- اسکویی، ب، حبیبیان دهکردی، ب، منتهایی، م، (۱۳۹۴)، کتاب مدل ها و روش های مگنتوتلوریک، جلد اول حسنعلی زاده کلاگری، م، (۱۳۹۶). پایان نامه کارشناسی ارشد: مقایسه ی وارون سازی هموار و متمرکز داده های مگنتوتلوریک در اکتشاف ژئوترمال شمال غرب ایران، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- زینال پور، ع.، قائد رحمتی، ر.، مراد زاده، ع.، رحمانی، م.، (۱۳۹۷)، اکتشاف ذخایر زمین گرمایی در منطقه بوشلی-سبلان با استفاده از داده های مگنتوتلوریک، نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی.
- فیلبندی کشکولی، م، کامکار روحانی، ا، مراد زاده، ع، عاصی، ح، (۱۳۹۵)، مطالعه ساختارهای هیدروکربوری یکی از میادین جنوب غرب ایران با استفاده از داده های مگنتوتلوریک، ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۷.
- سایت انجمن بهینه سازی مصرف انرژی ایران، (۱۳۹۹)
- قندی، ر، (۱۳۸۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد: ارائه روشی برای کاهش اثرات ناهمگنی های سطحی روی داده های مگنتوتلوریک و مدل سازی داده های آن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدیان سروندانی، م.، نجاتی کلاته، ع.، قائد رحمتی، ر.، کامکار روحانی، ا.، (۱۳۹۴)، مدل سازی دوبعدی داده های مگنتو تلوریک سبلان با استفاده از روش های کمینه مربعات مقید هموار و گرادیان مزدوج غیرخطی، نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی.

نعمت اله محمد، ن.، مشین چی اصل، م.، عابر، ح.، (۱۳۹۳). وارون سازی دوبعدی داده های مقاومت ویژه با استفاده از روش اکام، شانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۵۴-۵۸.

هاشمی ن. (۱۳۹۱)، پایان نامه کارشناسی ارشد: وارون سازی داده های مگنتو تلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری کپه داغ غربی، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

Arnason, K., Karlsdottir, R., Eysteinnsson, H., Flovenz, O.G. and Gudlaugsson, S.T.(2000), The Resistivity Structure of High-Temperature Geothermal Systems in Iceland, Geothermal Congress, KyushuTohoku, Japan, pp. 923-928.

Andemariam, T. B., (2012), Msc thesis: Multidimensional inversion of MT data from Alid Geothermal area Eritrea comparison with geological structures and identification of a geothermal reservoir , Schoole of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland.

Bahr, K. (1991), 'Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types', Physics of the Earth and Planetary Interiors, 66, (1-2), pp. 24-38.

Berdichevsky, M. N. Dmitrievm V. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Vol.1

Berdichevsky, M. N. Dmitrievm V. I. and Ppzdnejakova, E. E. (1998). On two dimensional interpretation of magnetotelluric soundings . Geophys. J.Int. V. 133, pp.

Bogie, I., Cartwright, A.J., Khosrawi, K., Talebi, B. and Sahabi, F. (2000), The Meshkin Shahr Geothermal Prospect, Iran. Geothermal Congress, Japan.

Beamish, D. and Travassos, J. M. (1992). Magnetotelluric imaging of basalt-covered sediments, *First Break*, 10(9), 345-357.

Booker, J.R.: 'The magnetotelluric phase tensor: a critical review', *Surv Geophys*, (2014), 35, (1), pp. 7-40.

Berdichevsky, M.N., Dmitriy, V.I., (1976), Basic principles of interpretation of magnetotelluric sounding curves, in *Geoelectric and geothermal studies*, A., KAPG Geophysical Monograph, Akademiai Kiado, 165-221.

Cagniard, L., (1953), Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605-635.

Constable, S. C., Parker, R. L. & Constable, C. G., (1987), Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: *Geophysics*,

Contwell, T. (1960), PhD. Thesis, Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signals. MIT University. 52, 289-300.

De Groot-Hedlin, C. and Constable, S. C. (1990). Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* 55: 1613-1624.

De Groot-Hedlin, C. (1991). Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion. *Geophysics* 56: 2102-2106.

Eggers, D.E., (1982), An eigenstate formulation of the magnetotelluric tensor, *Geophysics*, 47, 1204-1214.

Fotouhi, M., (1995). Geothermal Development in Sabalan, Iran. *Proceedings, 1995 world Geothermal Conference*, Italy.

Ghaed rahmati, R., Moradzadeh, A., Fthianpour, N., Lee, S, Po rkhial , S,(2013),3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran, Journal of Applied Geophysics.pp,12-22.

Hoversten, G. M., (1996), Papua New Guinea MT: looking where seismic is blind, Geophysical Prospecting. 44, 935-961.

Hojati, N., Porkhial, S., Rezaeian, M., and Faridi, M., (2015), ‘Geothermal Energy Studies and Evaluation the Potential of Sabalan Volcano in the NW of Iran’. Proc. Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 pp. Pages.

Jackson, P. D., Earland, S. J., Reece, G. J., (2001), 3D resistivity inversion using 2D measurmants of the electric field. Geophys. Prosp. 49.26-39.

Lichoro, C.M., Árnason, K., and Cumming, W., (2017), ‘Resistivity imaging of geothermal resources in northern Kenya rift by joint 1D inversion of MT and TEM data’, Geothermics, , 68, pp. 20-32.

Mackie, R. L., Rieven, S. and Rodi, W. (1997). Users Manual and Software Documentation for Two dimensional Inversion of Magnetotelluric Data. San Francisco: GSY-USA Inc.

Mansoori, I., Oskooi, B. and Pedersen, L. B., (2015), Magnetotelluric signature of anticlines in Iran's Sehqanat oil field, Tectonophysics, 654, 101-112.

Mansoori, I., Oskooi, B., Pedersen, L. B. and Javaheri, R., (2016), Three-dimensional modelling of magnetotelluric data to image Sehqanat hydrocarbon reservoir in southwestern Iran, Geophysical Prospecting, 64, 753-766.

Martini, F., Hobbs, R. W., Bean, C. J. and Single, R., (2005), A complex 3D volume for subbasalt imaging, First Break, 23, 41-51.

Moradzadeh, A. (1998). Electrical imaging of the Adelaide geosyncline using magnetotelluric . Ph.D thesis, Flinders university of south Australia. Pp. 334.

Moradzadeh , A. (2003a). Static shift appraisal and its correction in Magnetotelluric survey. 21st Geoscience Conference and Exposition Tehran.

Mitchell V. Lidell., (2014), Magnetotelluric Imaging of Electrically Anisotropic Crust near Fort McMurray, Alberta: Implications for Engineered Geothermal Systems , Msc thesis, Department of Physics, University of Alberta.

Models and Methods of Magnetotellurics / Mark N. Berdichevsky and Vladimir I.Dmitriev.

Oskooi, B., Pedersen, L. B., Smirnov, M., Arnasson, K., Esteinsson, H. and Manzella, A., the DGP working group, (2005), The deep geothermal structure of the Mid-Atlantic ridge deduced from MT data in SW Iceland, Phys. Earth planet. Inter., 150, 183-195.

Oskooi, B. and Darijani, M., (2013), 2D inversion of the magnetotelluric data from Mahallat geothermal field in Iran using finite element approach, Arab. J. Geosci., doi: 10.1007/s12517-013-0893-6.

Oskooi, B., Pedersen, L. B. and Koyi, H. A., (2014), Magnetotelluric signature for the Zagros collision, Geophys. J. Int., 196, 1299-1310.

Oskooi, B. and Mansoori, I., (2014), Iodine- bearing saline aquifer prospecting using magnetotelluric method in Golestan plain, NE Iran, Arab J Geosci, doi:10.1007/s12517014-1634-1.

Oskooi, B., Mansoori, I., Pedersen, L. B. and Koyi, H. A., (2015), A magnetotelluric survey of ophiolites in the Neyriz area of southwestern of Iran, Pure Appl. Geophys., 172(2), 491-502. Pandey.

Oskooi, B., (2004), A Broad View on the Interpretation of Electromagnetic Data (VLF, RMT, MT, CSTMT). Acta Universitatis Upsaliensis, Comprehensive Summaries of Uppsala. Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 959, 68 pp. Uppsala. ISBN 91-554-5925-0.

Orange, A. S., (1989), Magnetotelluric exploration for hydrocarbons, Proceedings of the IEEE 77, 287-317.

Pandey, D., MacGregor, L., Sinha, M. and Singh, S., (2008), Feasibility of using the magnetotelluric method for subbasalt imaging at Kachchh, India, Applied Geophysics., 5(1), 74-82.

PNOC-EDC,(2006). Proposal for Magnetotelluric Measurements in Mt. Sabalan Geothermal Project to SUNA Renewable Energy Organization of Iran, 12p.

Portniaguine, O., Zhdanov, M., (1999), Focusing geophysical inversion images, Geophysics, 64(3), 874-887.

Rodi, W. L. and Mackie, R. L., (2001), Nonlinear conjugate gradients algorithm For 2D magnetotelluric inversion, Geophysics, 66, 174-187.

Sarvandani, M.M., Nejati, A., and Ghaedrahmati, R., (2016) 'Comparison of various dimensionality methods on the Sabalan magnetotelluric data', Journal of Applied Geophysics, , 128, pp. 179-190.

SKM, (2005) 'Resource review of the Northwest Sabalan geothermal project', in Editor (Ed.)^(Eds.): 'Book Resource review of the Northwest Sabalan geothermal project', edn.), pp. 61.

Simpson, F. and Bahr, K. (2005). Practical Magnetotellurics.

Siripunvaraporn W., G. Egbert, Y. Lenbury and M. Uyeshima, (2005), Three-Dimensional Magnetotelluric: Data Space Method, Physics of the Earth and Planetary Interiors , 150,3-14.

Siripunvaraporn W. and G. Egbert, (2000), An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric, Geophysics, 65, 791-803.

Smith, T. and Booker , J. (1988). Magnetotelluric inversion for minimum structure. Geophysics 53:1565-1576.

(1991). Rapid inversion of two and Three-dimensional magnetotelluric data. J. Geophys. Res., 96:3905-3922.

Telford, W.M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., (1990), Applied Geophysics , Cambridge University Press, 770.

Talebi, B., Khosrawi, K., and Ussher, G. H. (2005). Review of Resistivity Surveys from the NW Sabalan Geothermal Field, Iran. Proceedings, 2005 World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.

Travassos, J. M. and Menezes, P. T. L., (1999), Geoelectric structure beneath limestones of the Sao Francisco Basin, Brazil. Earth Planets Space, 51, 1047-1058.

Vozoff, K., (1991), The magnetotelluric method, in J. D, Corbett, ed., Electromagnetic method in applied geophysics-applications part A and part B, Society of Exploration Geophysicists, 641-711.

Warren, R. K. and Srnka, L. J., (1992), Exploration in the basalt-covered areas of the Columbia River Basin, Washington, using electromagnetic array profiling (EMAP), Geophysics, 57(8), 986-993.

Weaver, J.T., Agarwal, A.K., and Lilley, F., (2000), 'Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants', *Geophysical Journal International*, , 141, (2), pp. 321-336.

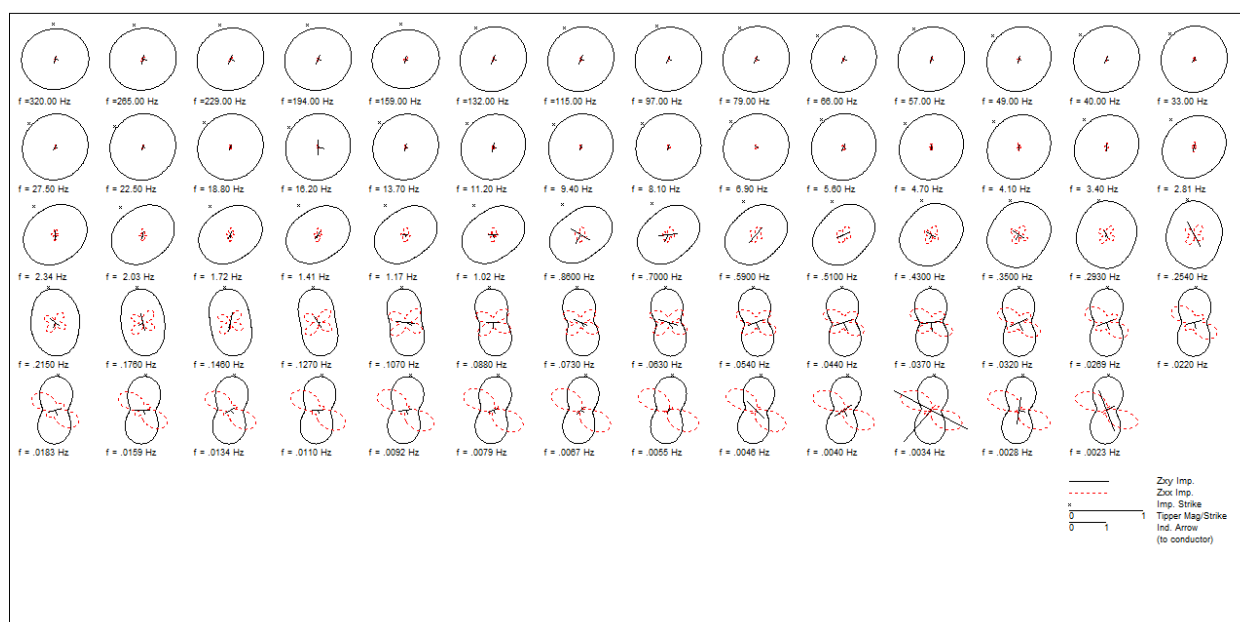
Xiao, W., (2004), Ms Thesis, Magnetotelluric exploration in the Rocky Mountain Foothills, University of Alberta, Edmonton, Canada.

TXiao, W. and Unsworth, M., (2006), Structural imaging in the Rocky Mountain Foothills (Alberta) using magnetotelluric exploration, *AAPG Bulletin*, 90(3), 321-333.

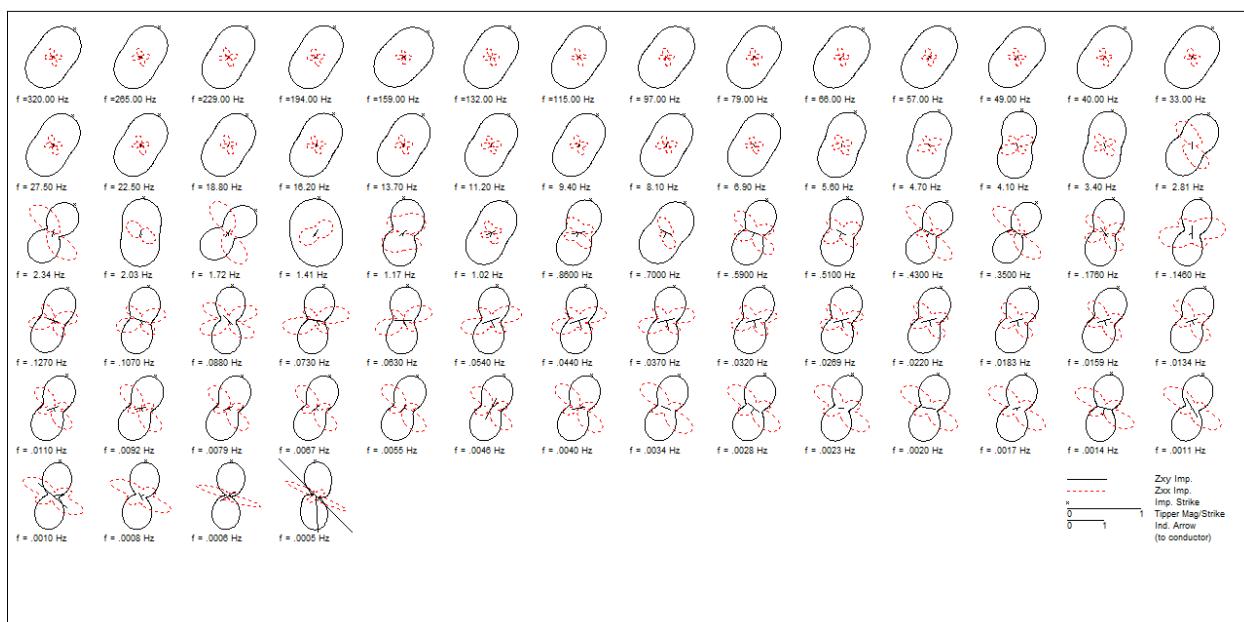
پیوست ۱

نمودارهای قطبی تانسور امپدانس

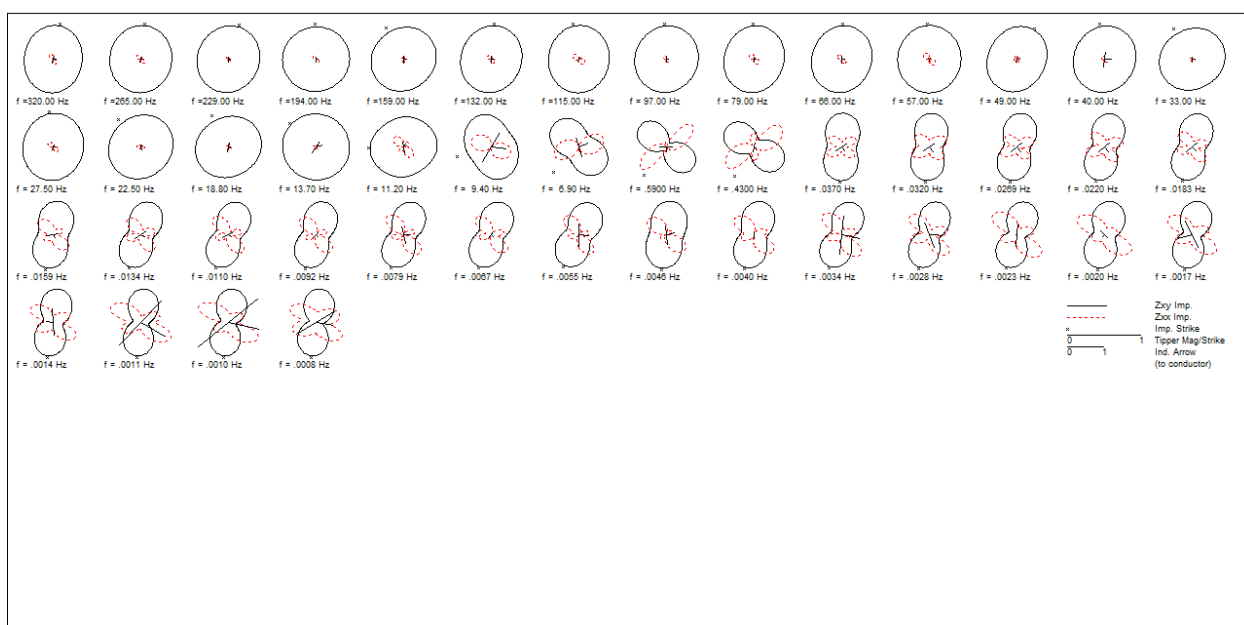
وابستگی امپدانس به جهت گیری محورهای اندازه گیری را به طور گرافیکی می توان با نمودارهای قطبی نمایش داد. هیچ محدودیت ساختاری یا بسامدی برای ترسیم نمودارهای قطبی امپدانس وجود ندارد.



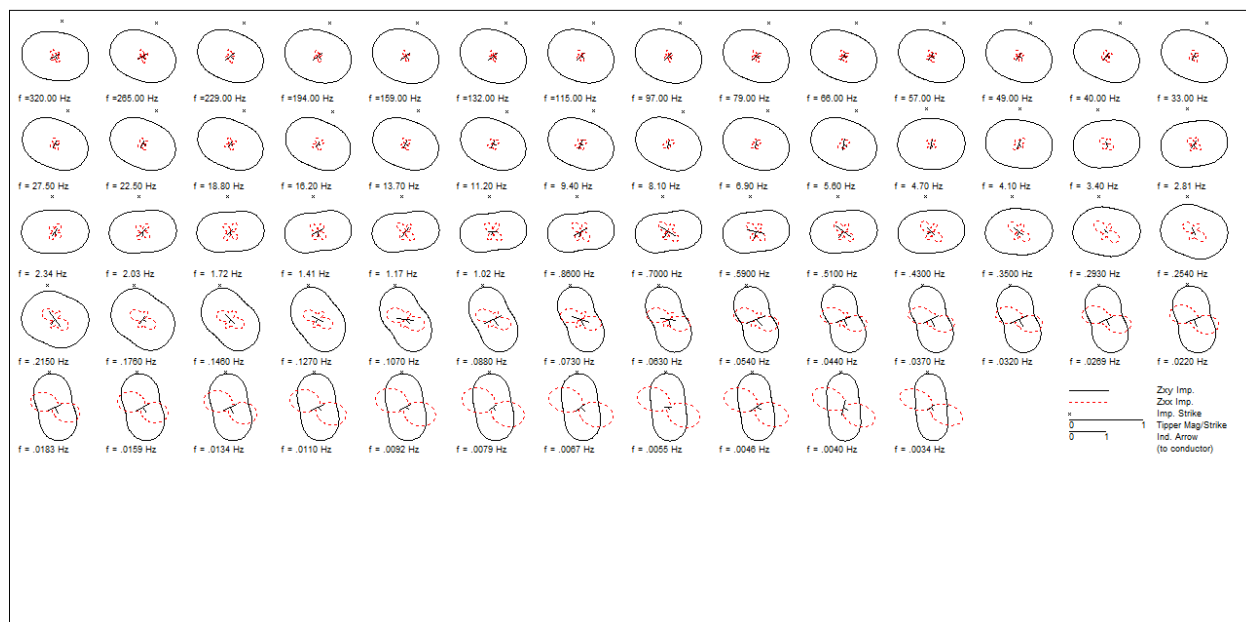
شکل ۱ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲



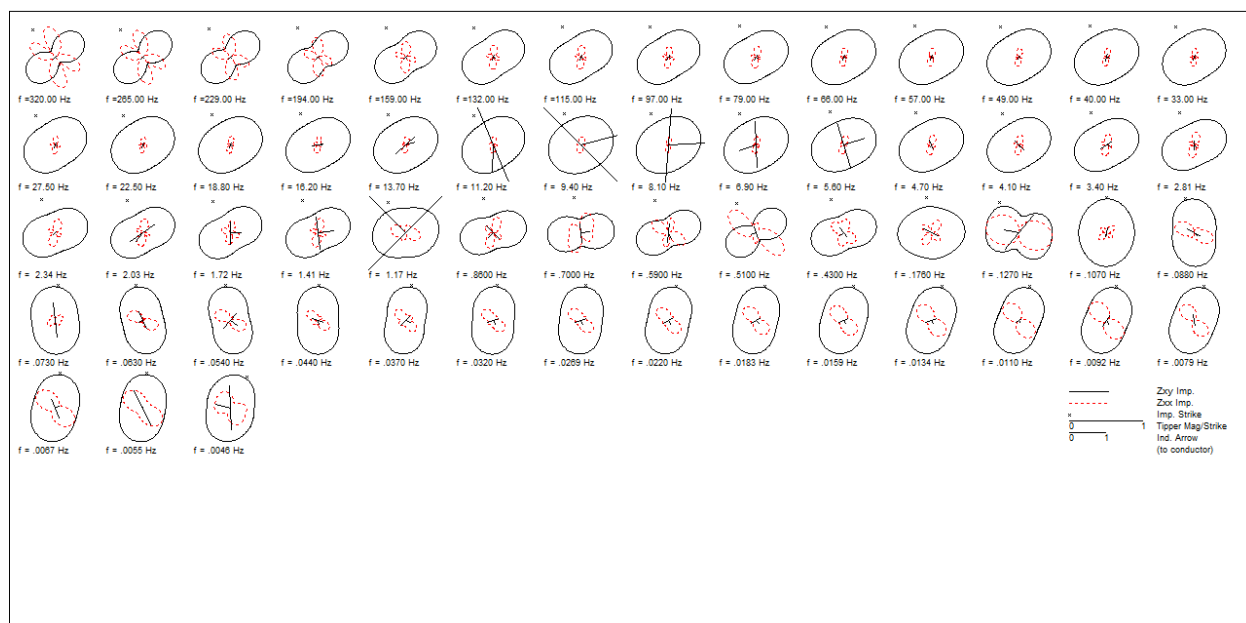
شکل ۲: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۳



شکل ۳: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۴



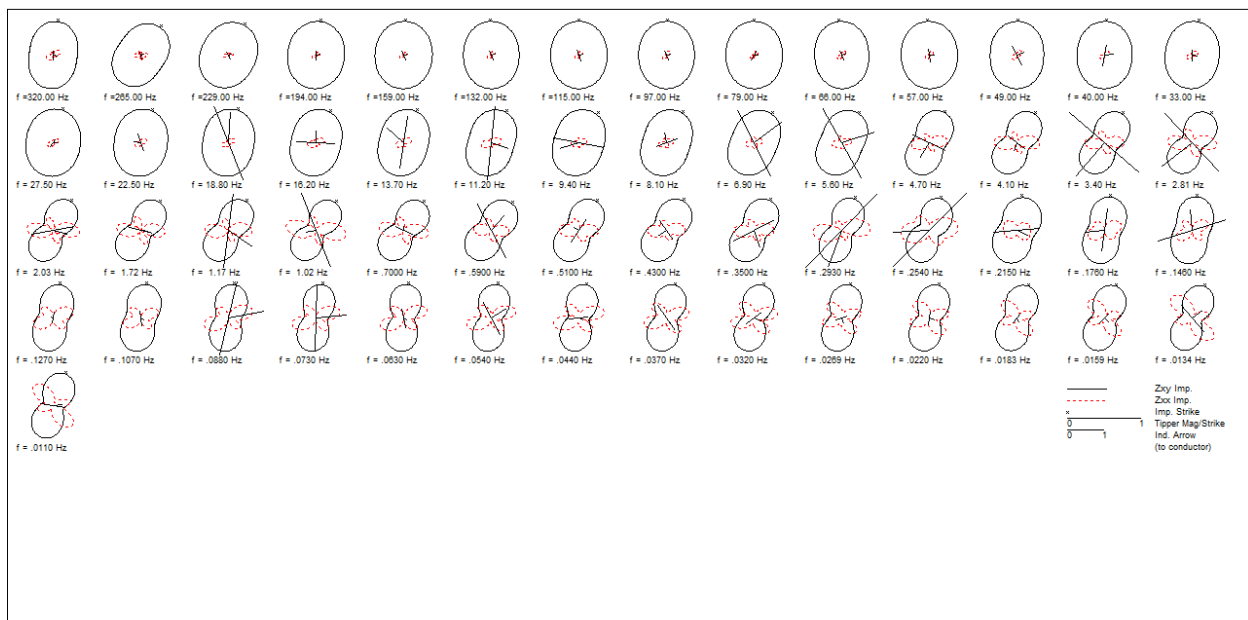
شکل ۴ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۶



شکل ۵ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۷



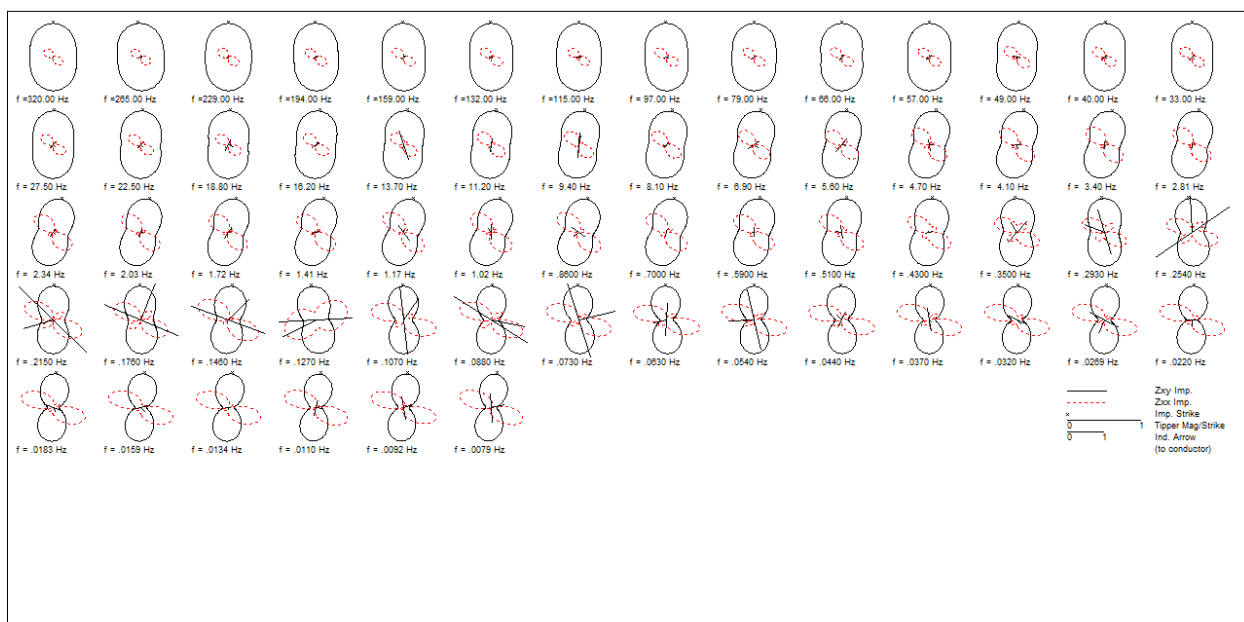
شکل ۶ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۸



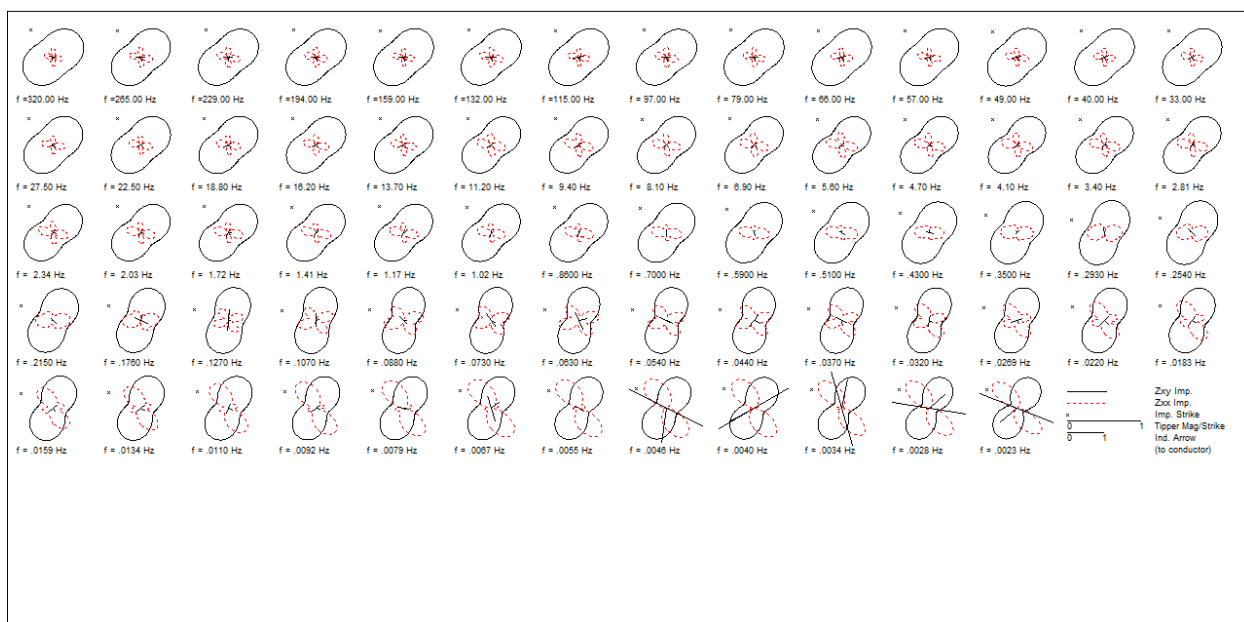
شکل ۷ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۰



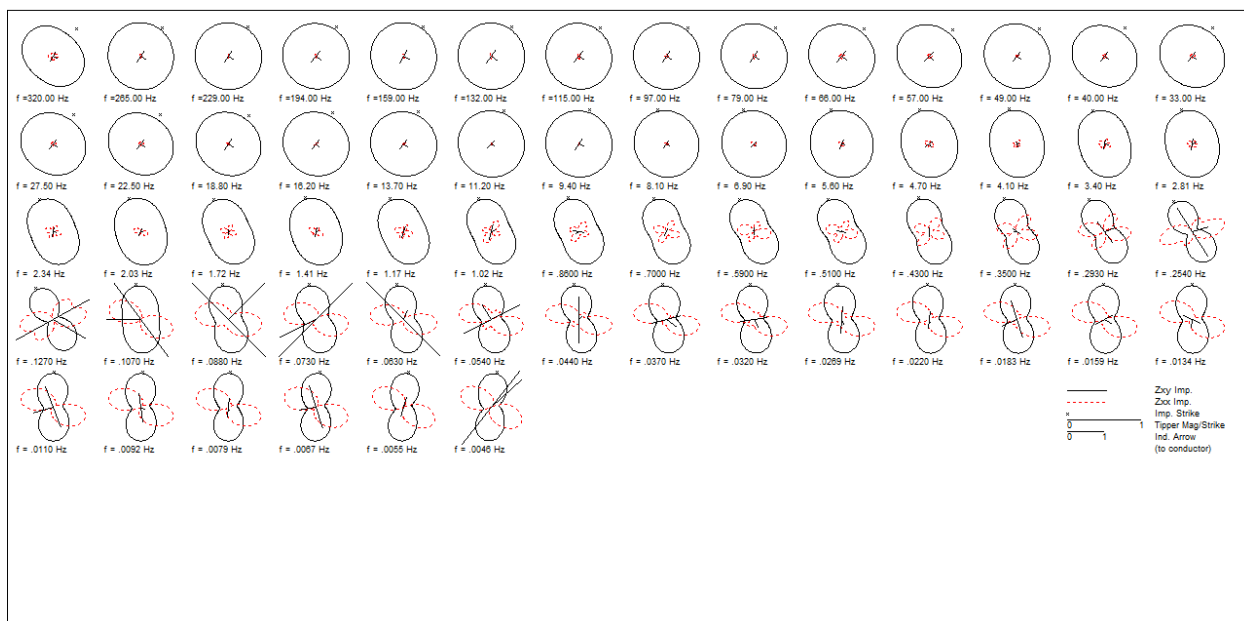
شکل ۸ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۱



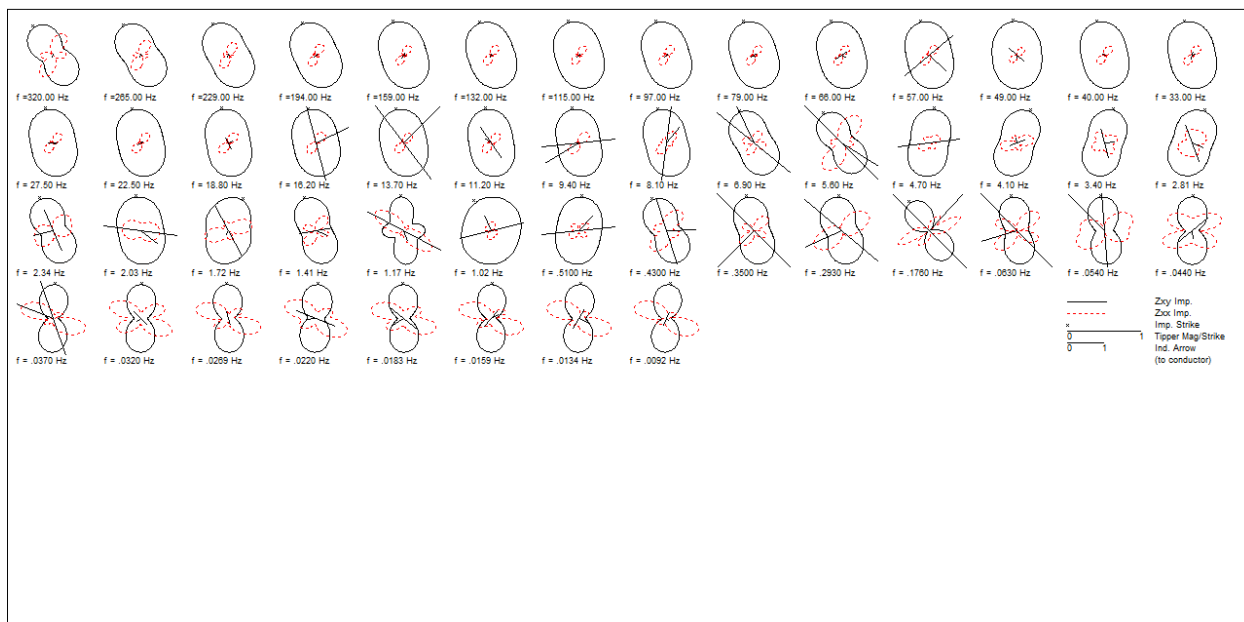
شکل ۹ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۲



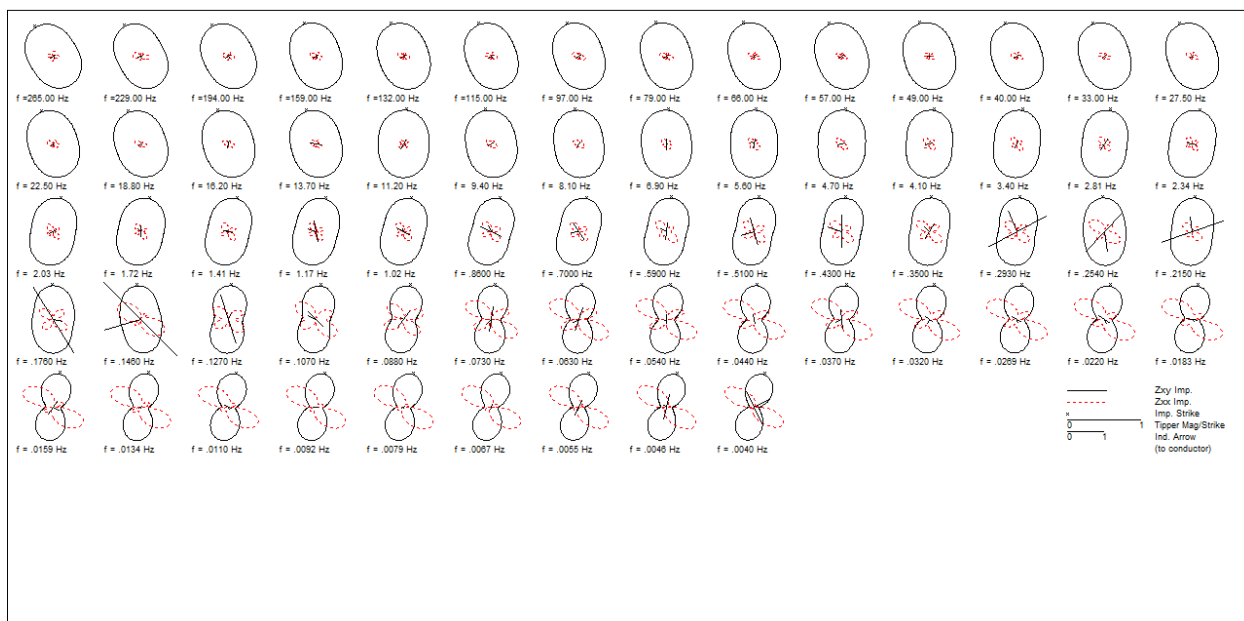
شکل ۱۰ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۳



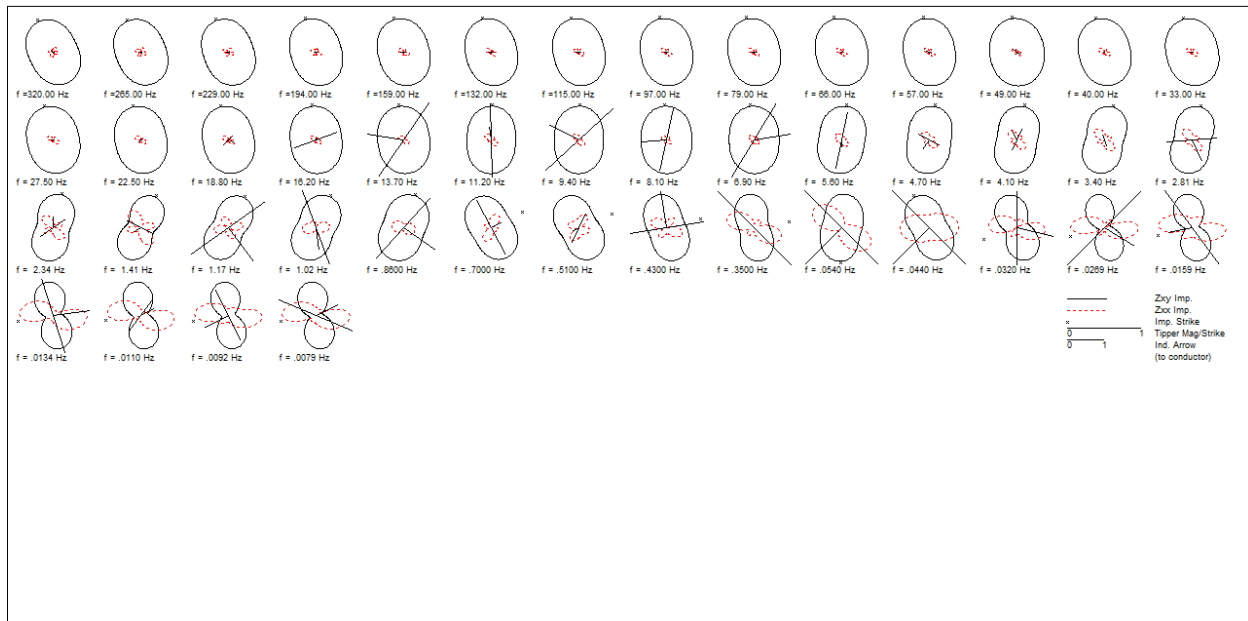
شکل ۱۱ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۴



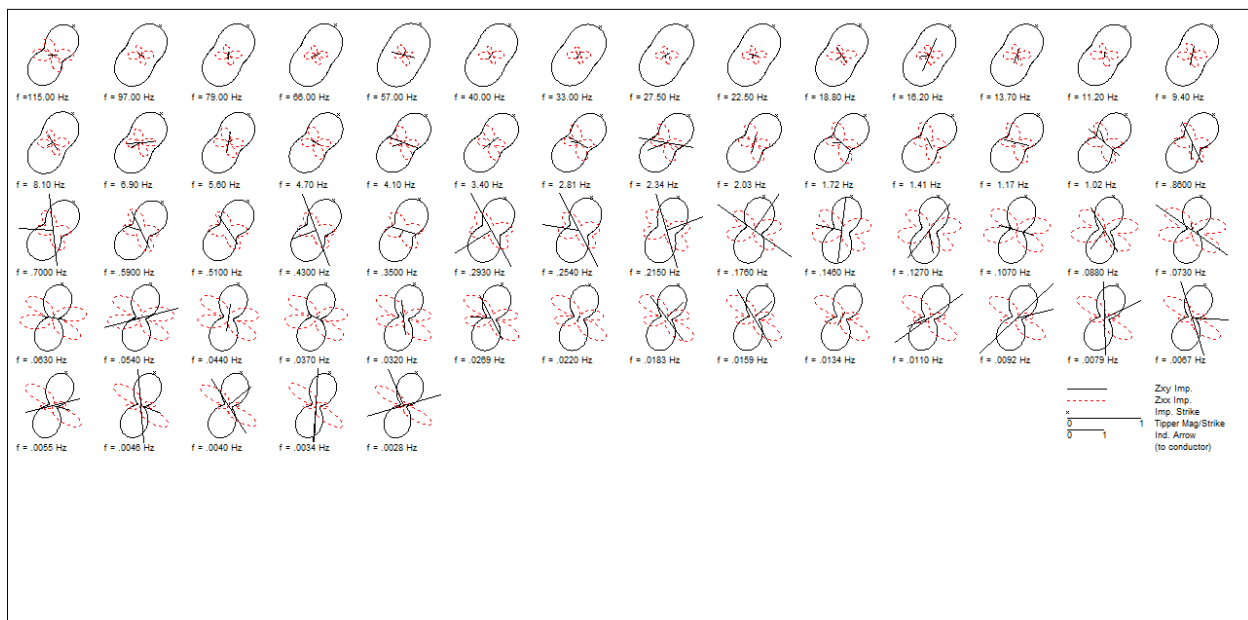
شکل ۱۲ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۵



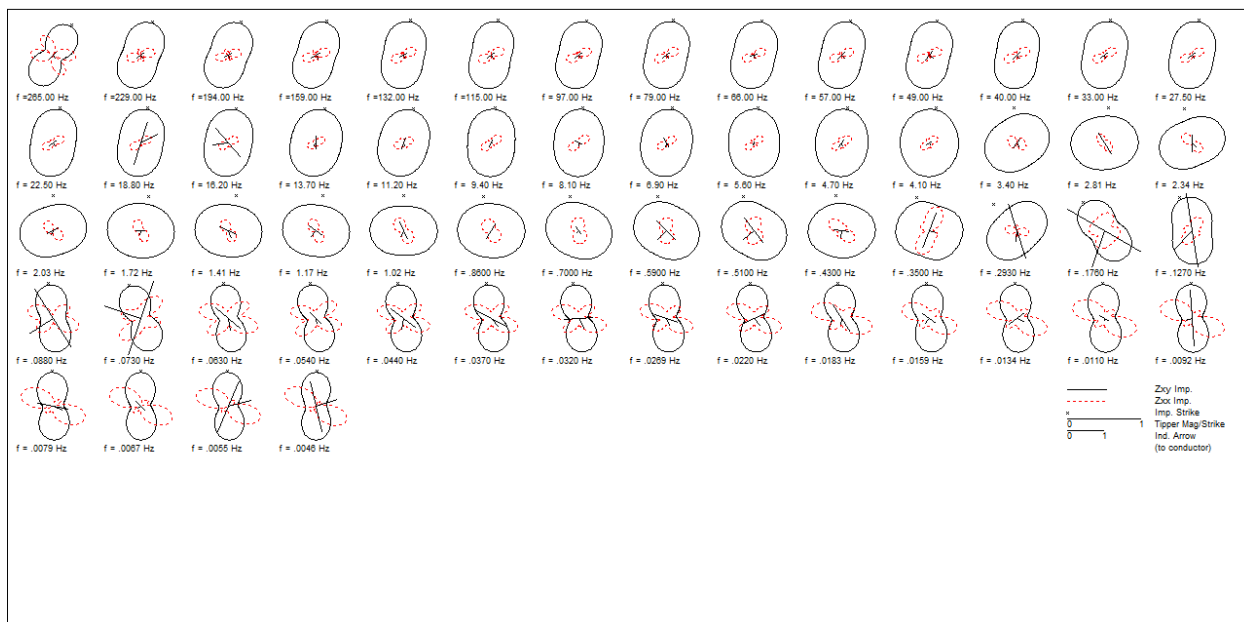
شکل ۱۳ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۶



شکل ۱۴ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۷



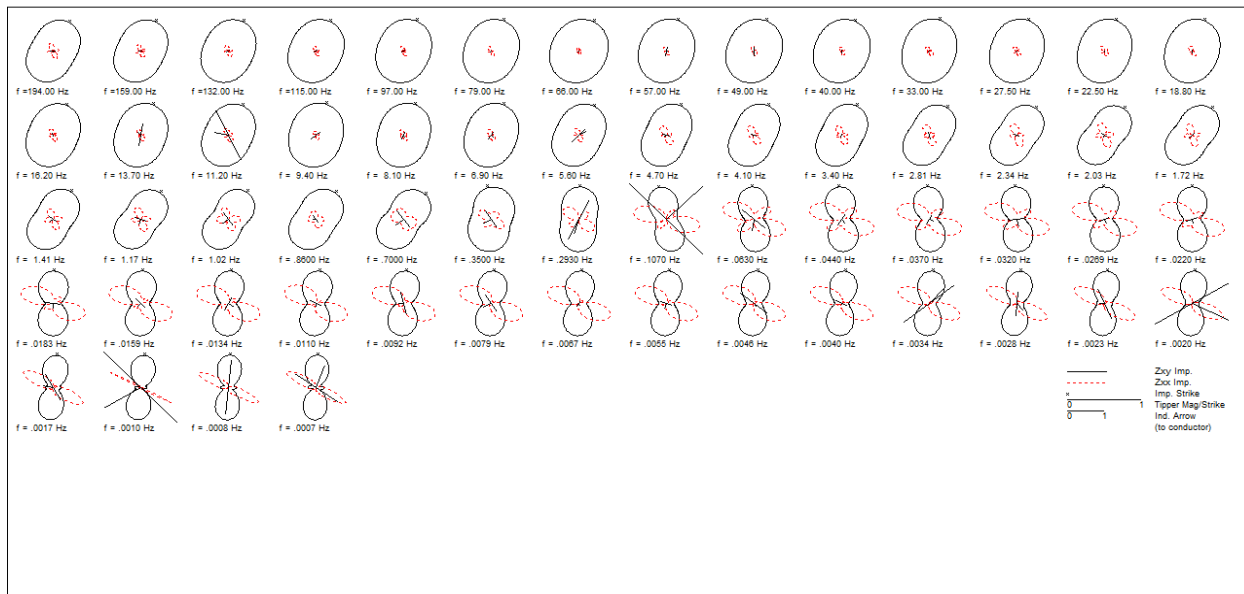
شکل ۱۵ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۱۹



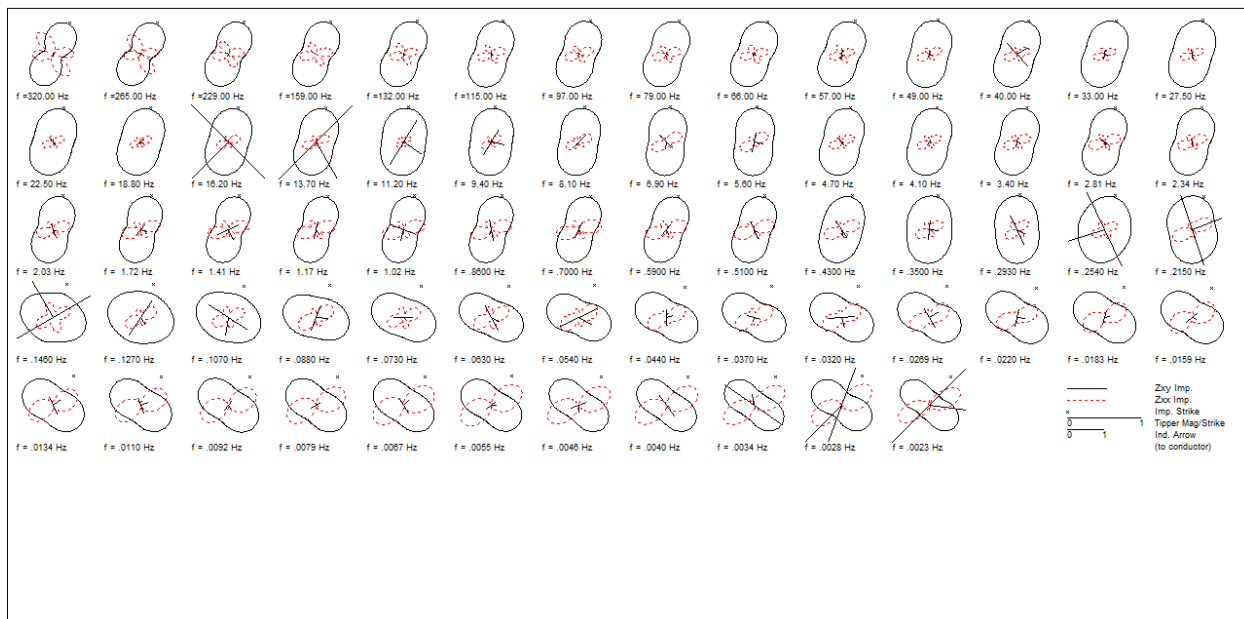
شکل ۱۶ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۰



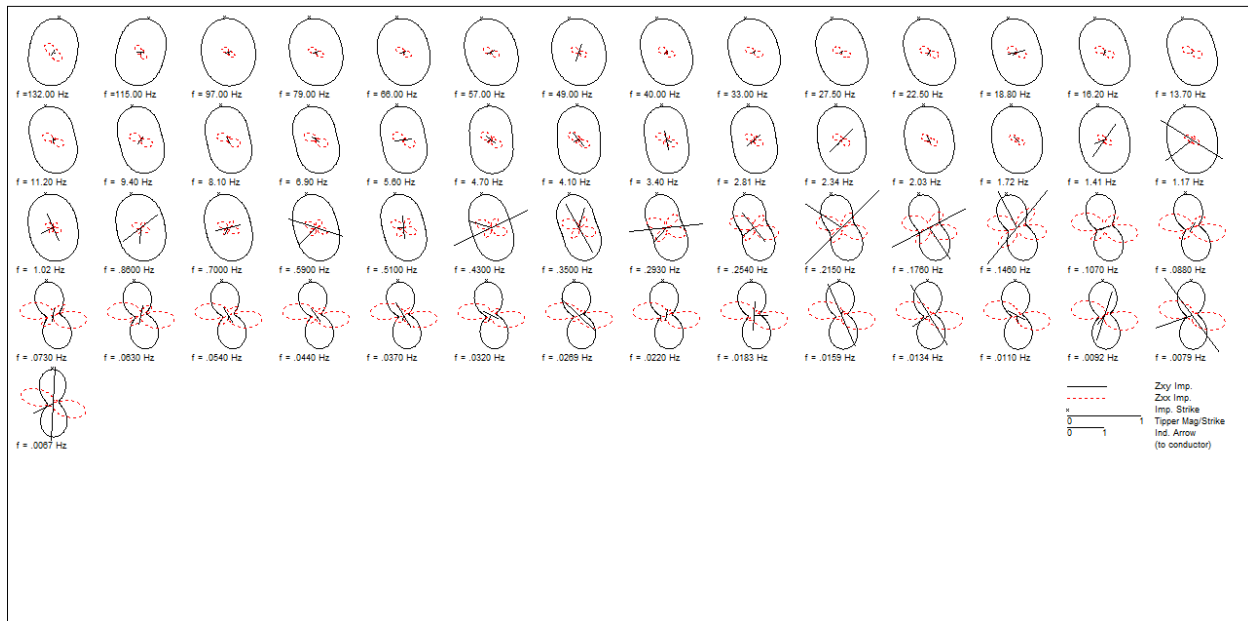
شکل ۱۷ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۱



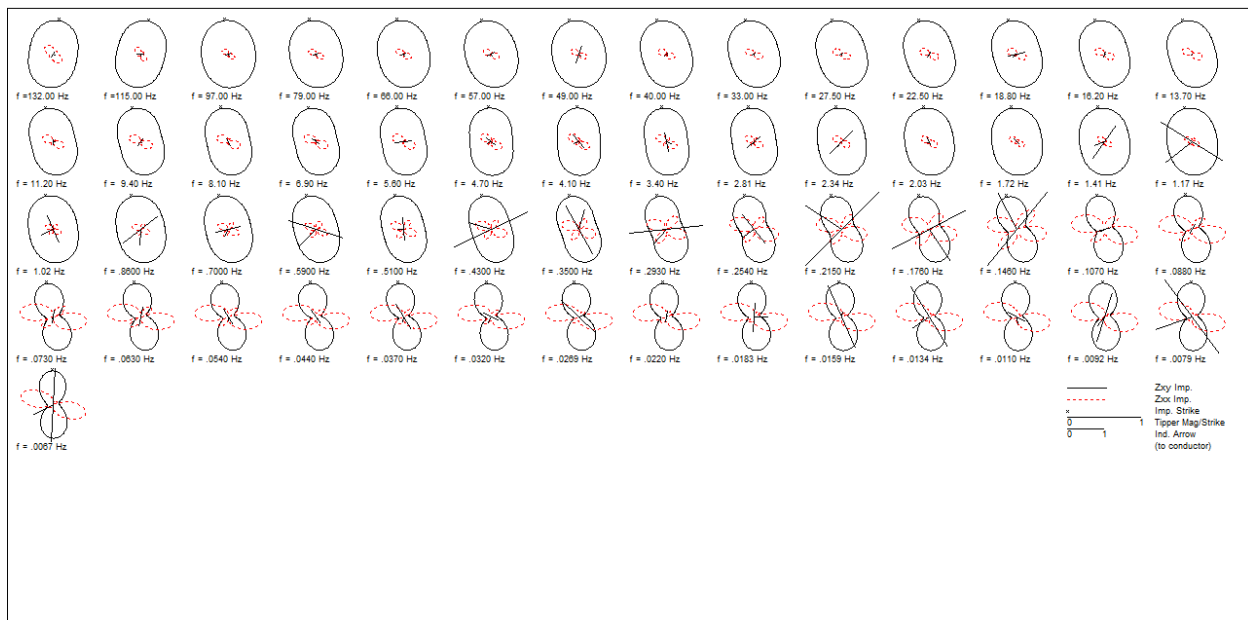
شکل ۱۸ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۲



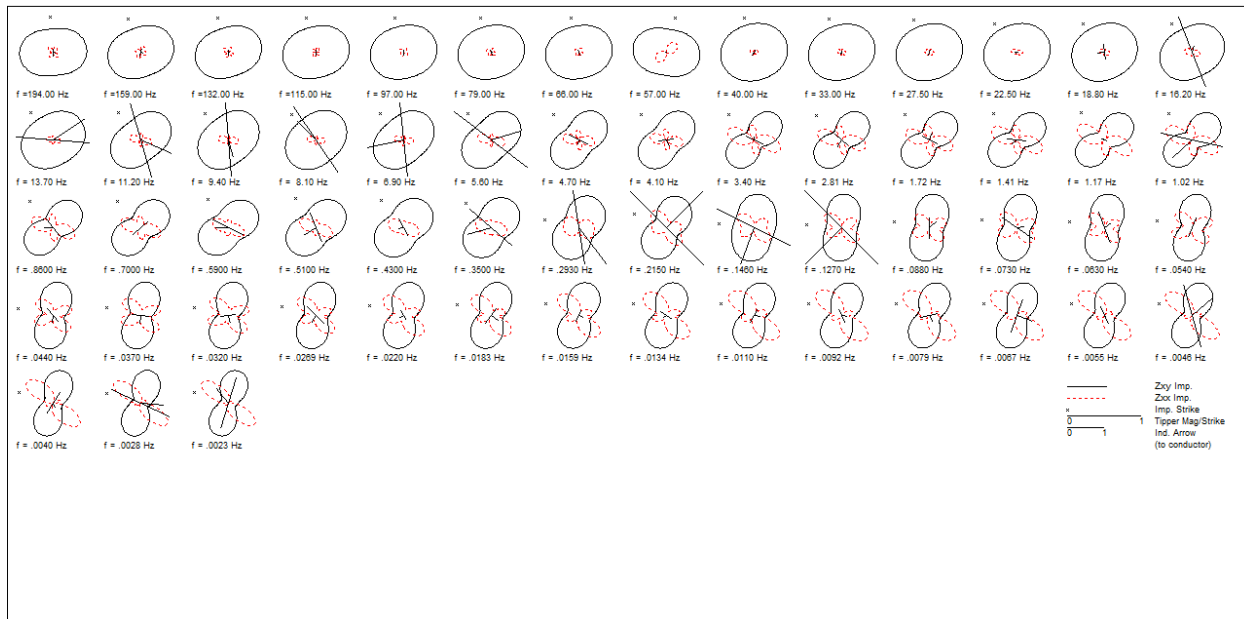
شکل ۱۹ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۳



شکل ۲۰ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۴



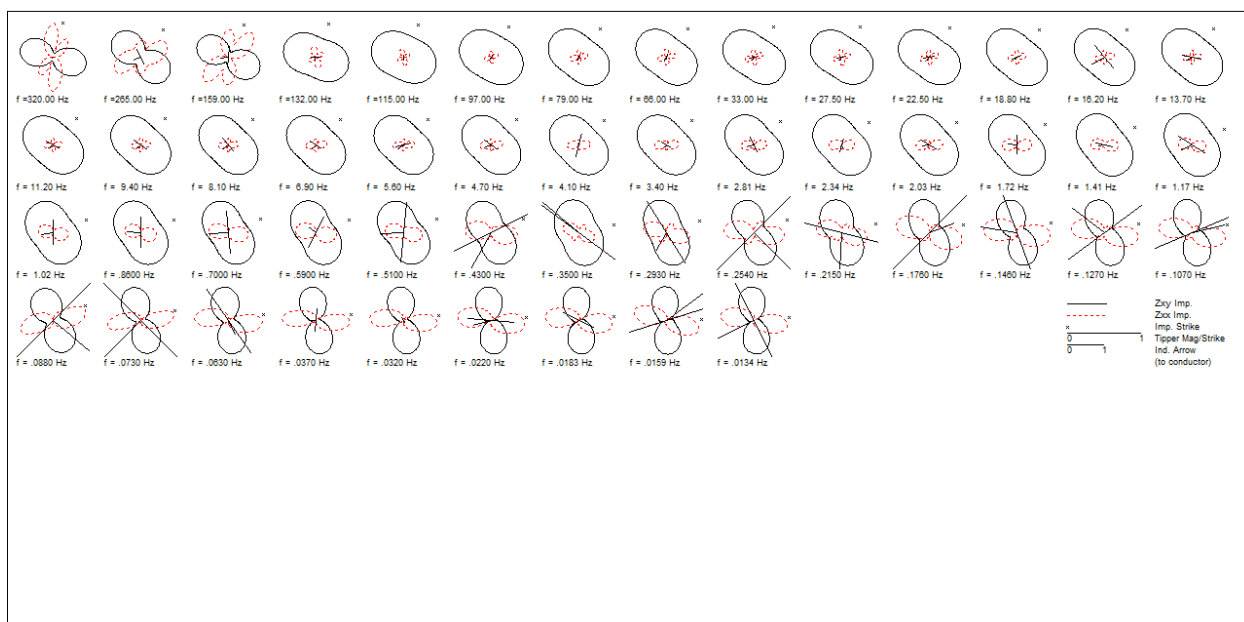
شکل ۲۱ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۵



شکل ۲۲ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۶



شکل ۲۳ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۷



شکل ۲۴ پ: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس برای ایستگاه ۲۸

مدل سازی یک بعدی داده ها با استفاده از روش هموارسازی اکام و تبدیل عمق بوستیک

پردازش، فرایندی است که داده های برداشت شده را آماده تفسیر می کند. بنابر این از متمم های اولیه پردازش، بحث تعیین امپدانس است. بدون تعیین امپدانس، تعیین مقاومت ویژه و فاز زیر سطحی امکان پذیر نیست. برای تعیین امپدانس، ابتدا باید بُعد ساختار را مشخص کنیم. بیشتر روش های تعیین بُعد ساختار کیفی هستند. روش کمی تعیین بُعد ساختارها، وقتی امکان پذیر است که داده ها را مدل سازی کرده باشیم. سپس با توجه به تغییراتی که مقاومت ویژه ها دارند، با توجه به شکل ساختار و تغییرات، بعد ساختار مشخص می شود.

ابتدا مدل سازی را انجام می دهیم زیرا باید امپدانس را تعیین کنیم که به بعد ساختار نیاز داریم. امپدانس مؤلفه های میدان الکتریکی را به مؤلفه ی میدان مغناطیسی در دو جهت عمود و مخالف بر هم، ربط می دهد. امپدانس وابسته به فرکانس است و باید در فرکانس های مختلف مشخص شود. فرکانس های زیاد، عمق کم و فرکانس های کم، عمق

زیاد را نشان می‌دهند. مقدار امپدانس هم در فرکانس‌های زیاد، اطلاعات را از عمق کم می‌دهد. سونداژ مگنتو-تلوریک با تغییر فرکانس‌های مختلف مشخص می‌شود. با تغییر فرکانس، تغییر پارامتر مورد نظر مقاومت ویژه یا فاز را به صورت عمقی بررسی می‌کنیم.

اگر ساختار یک بعدی باشد، فقط یک امپدانس داریم. که تابع فرکانس است. تنها تفاوتشان این است که امپدانس جهت‌دار است و قدر مطلقشان با هم برابر است. در ساختارهای یک بعدی، تغییرات مقاومت ویژه و فاز در یک بعد که عمق است مشخص می‌شود.

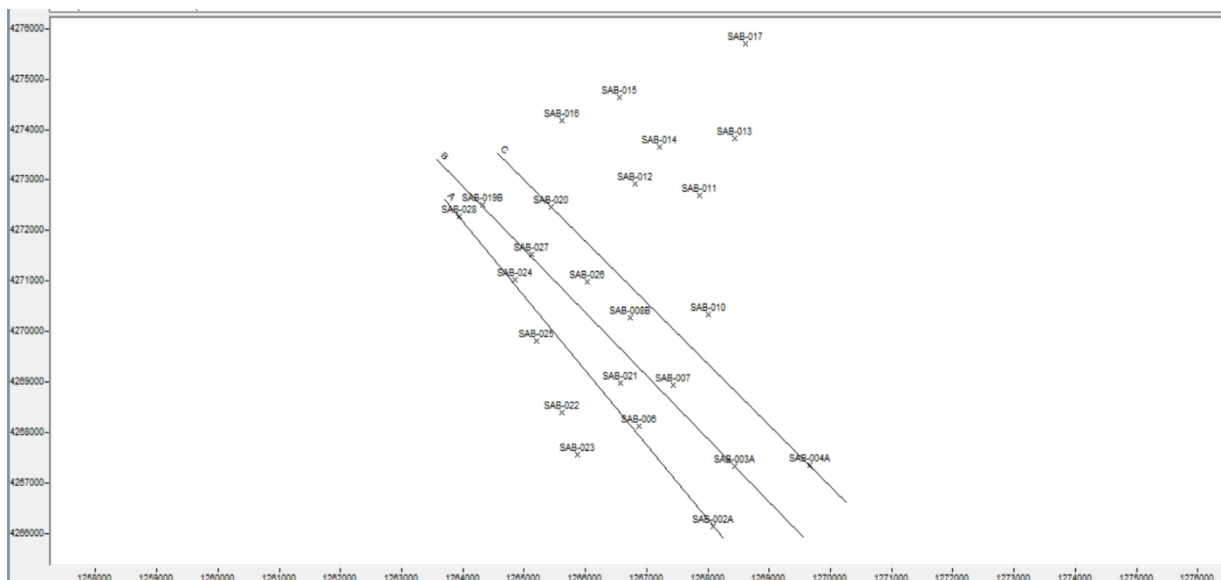
پس در حالت یک بعدی، یک مقاومت ویژه و یک فاز برای هر فرکانس داریم. تفسیر یک بعدی به ندرت قابل استفاده است و فقط وقتی قابل استفاده است که لایه‌ها کاملاً افقی و همگن باشند. به عبارت دیگر تغییرات مقاومت ویژه و فاز صرفاً در یک جهت که جهت عمقی است انجام می‌شود.

ساختارها به ندرت حالت یک بعدی یا لایه‌ای دارند. در نتیجه سراغ ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی می‌رویم. که در این ساختارها بیش از یک امپدانس داریم و امپدانس‌ها در حالت سه‌بعدی یک تانسور و در حالت دوبعدی ماتریس دو در دو است. که بیان می‌شود. در ساختارهای دوبعدی باید مد یا حالت یا وضعیت قرار گیری مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی را نسبت به ساختارها بدانیم. نحوه قرارگیری جهت مؤلفه‌های الکتریکی و هستند. TE و TM مغناطیسی با ساختارها دو مد را به وجود می‌آورند. ساختارهای دو بعدی شامل مدهای

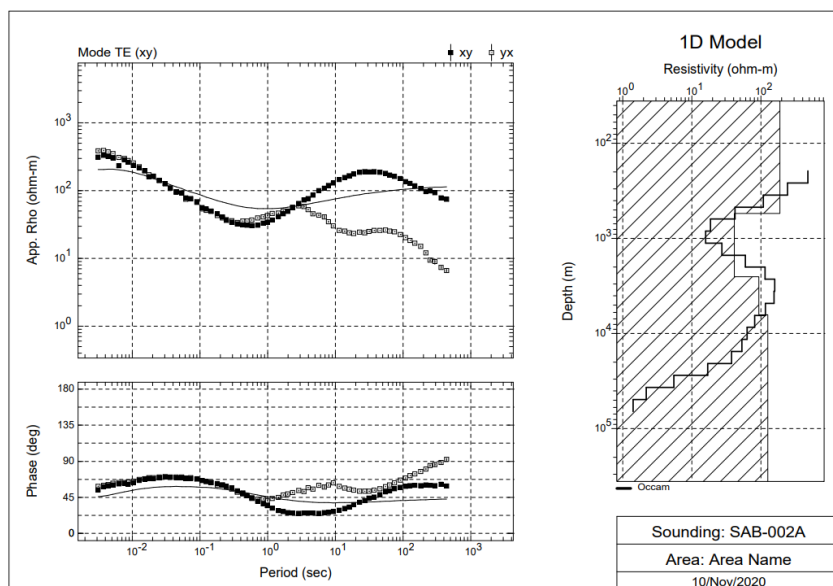
TM: مؤلفه‌ی میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار و مؤلفه‌ی میدان مغناطیسی در جهت ساختار قطبیده می‌شود یا قرار می‌گیرد.

TE: میدان الکتریکی در جهت امتداد ساختار قطبیده شده و میدان مغناطیسی عمود بر آن است.

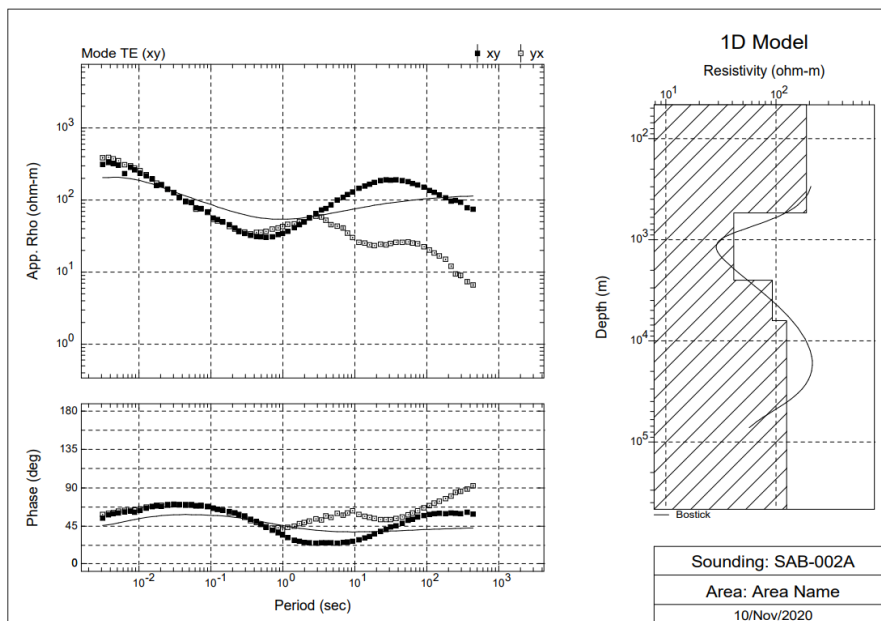
بنابراین در حالت دوبعدی، ابتدا باید مد را مشخص کنیم. به دلیل مشخص نبودن امتداد ها خیلی اوقات، تفسیرهایمان را با مجموع هر دو مد انجام می‌دهیم.



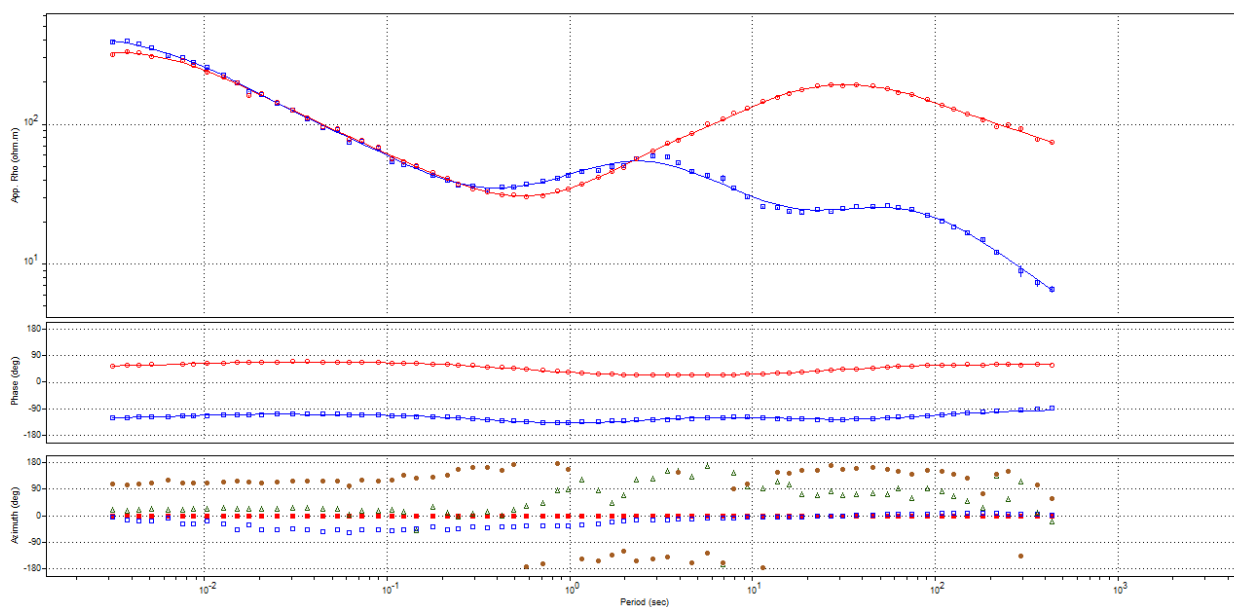
شکل ۲۵ پ: ایستگاه‌ها و پروفیل‌های تعیین شده



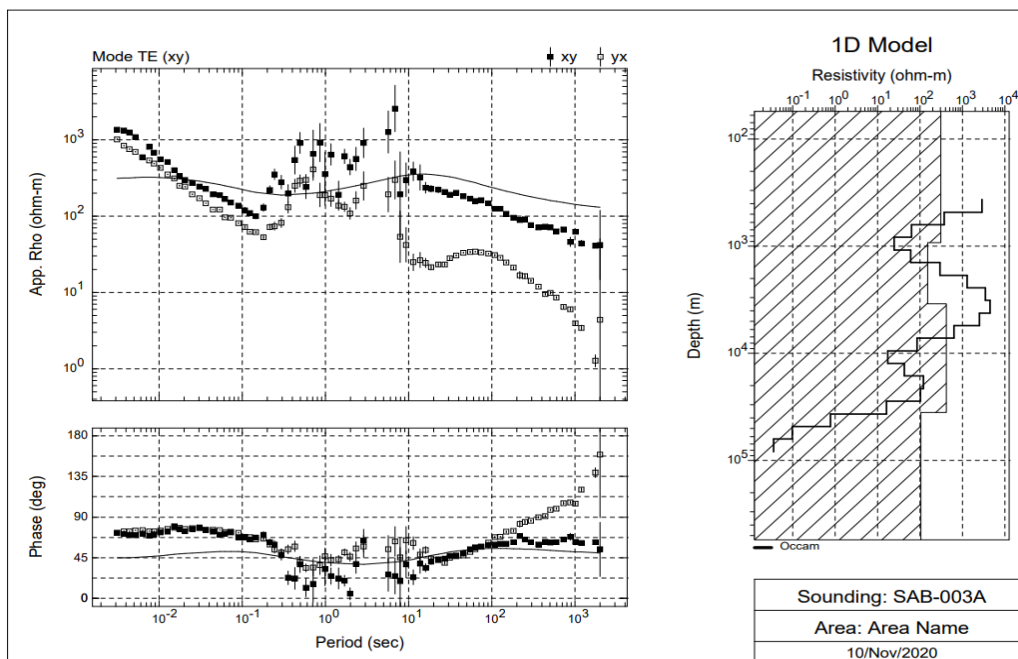
شکل ۲۶ پ: مدل‌سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل‌سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده‌های مشاهده‌ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل‌سازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است.



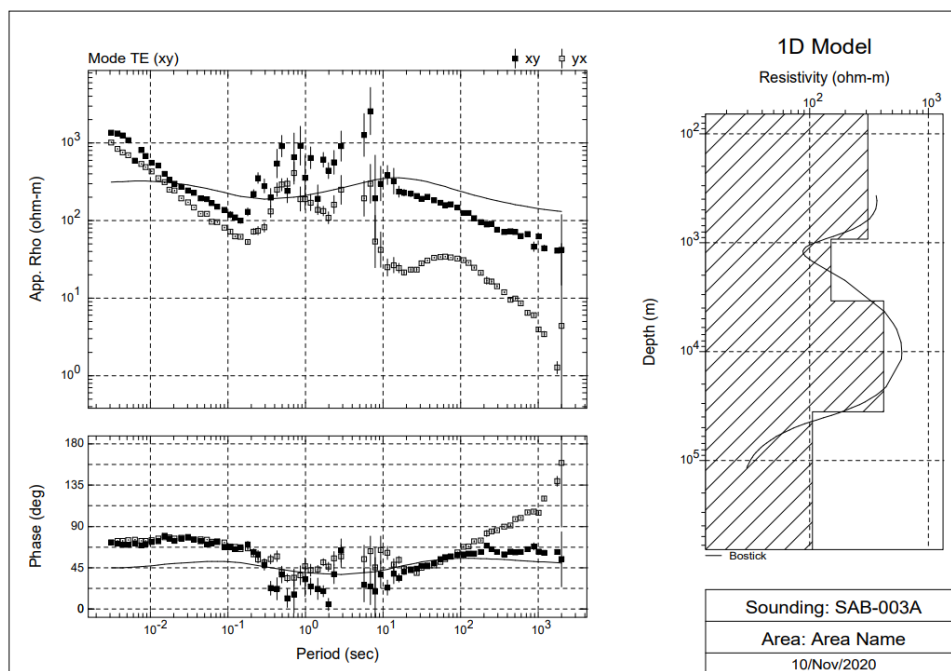
شکل ۲۷ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲ آورده شده است.



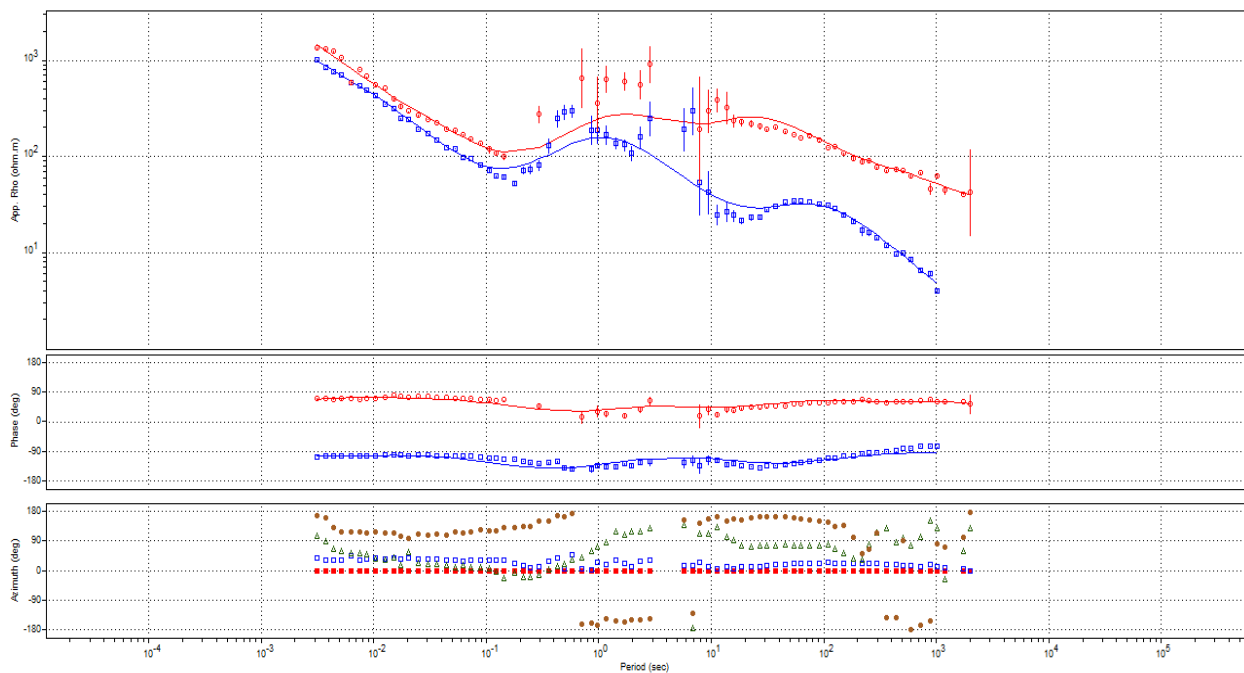
شکل ۲۸ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲



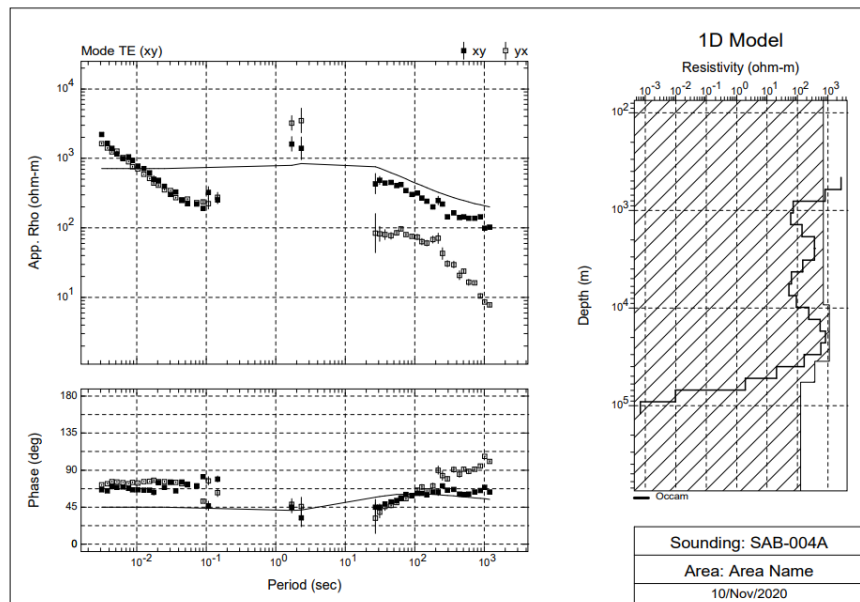
شکل ۲۹ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده-ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۳ آورده شده است.



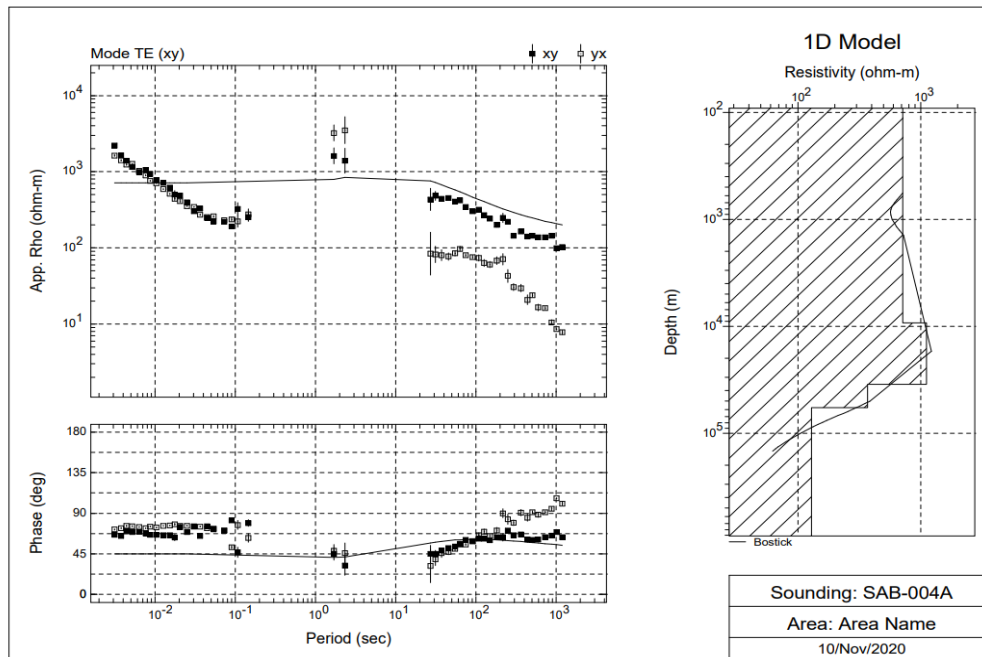
شکل ۳۰ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهدهای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۳ آورده شده است.



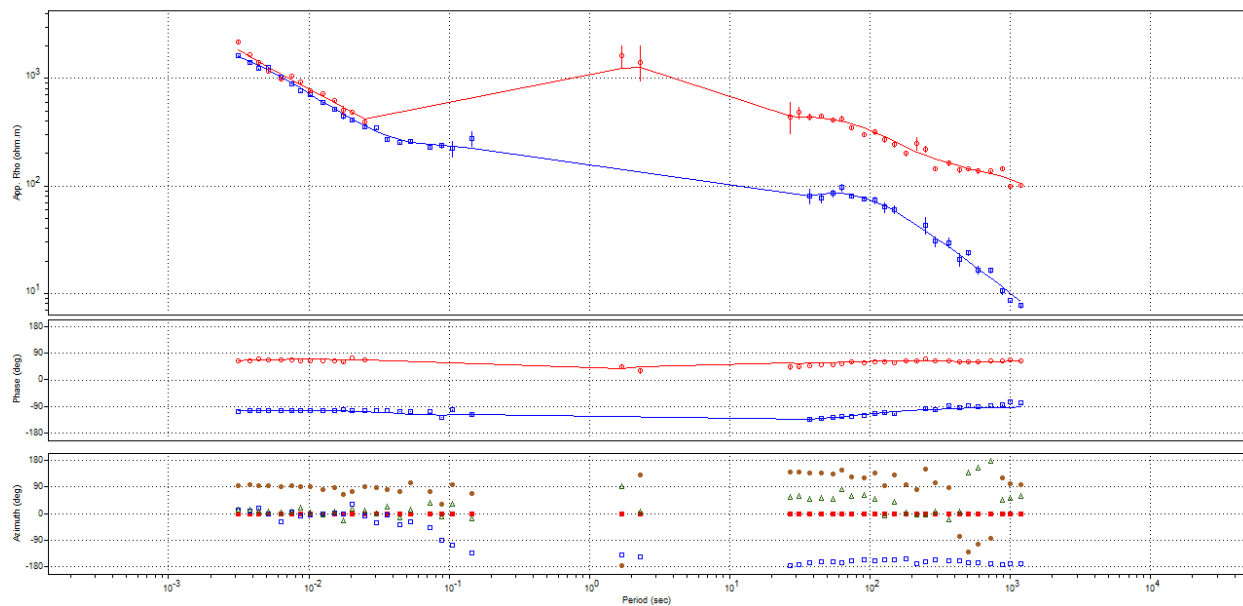
شکل ۳۱: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۳



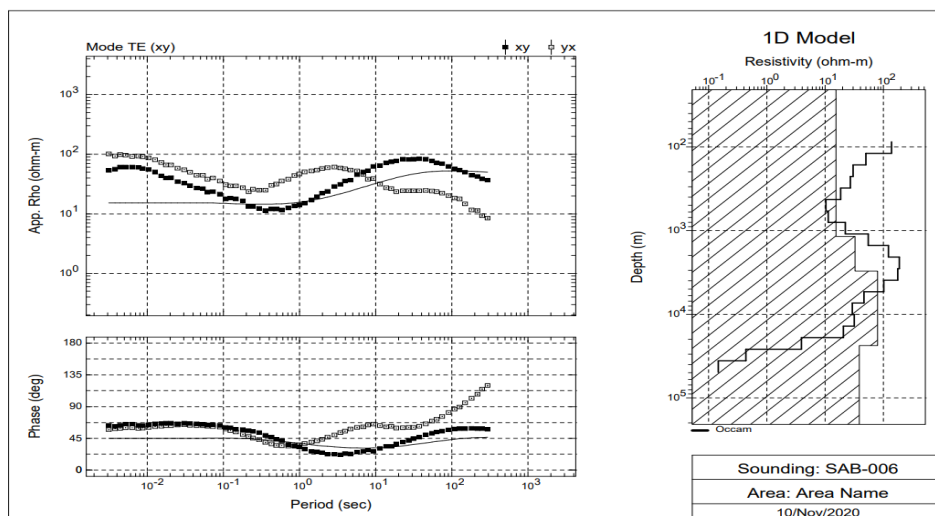
شکل ۳۲: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۴ آورده شده است.



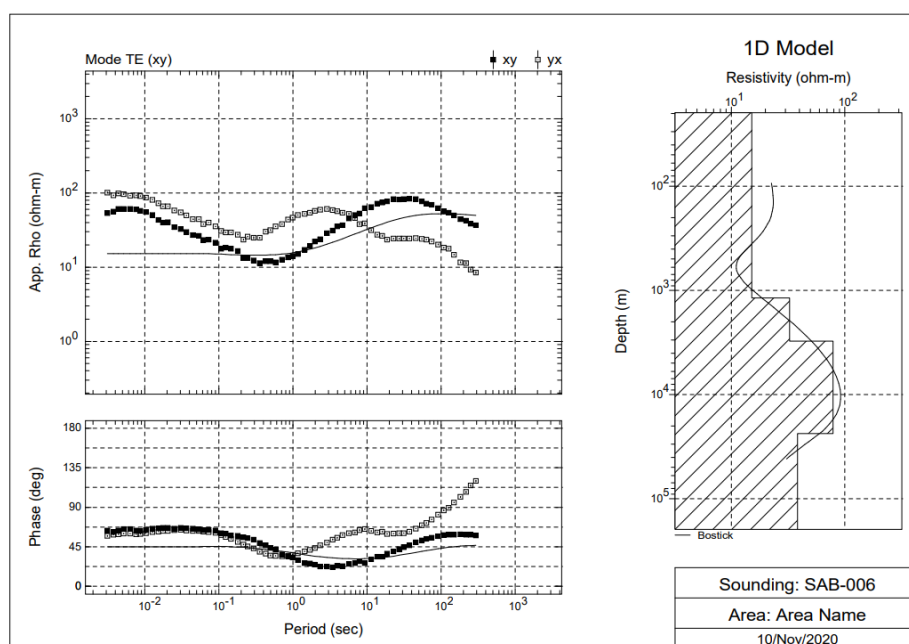
شکل ۳۳ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۴ آورده شده است.



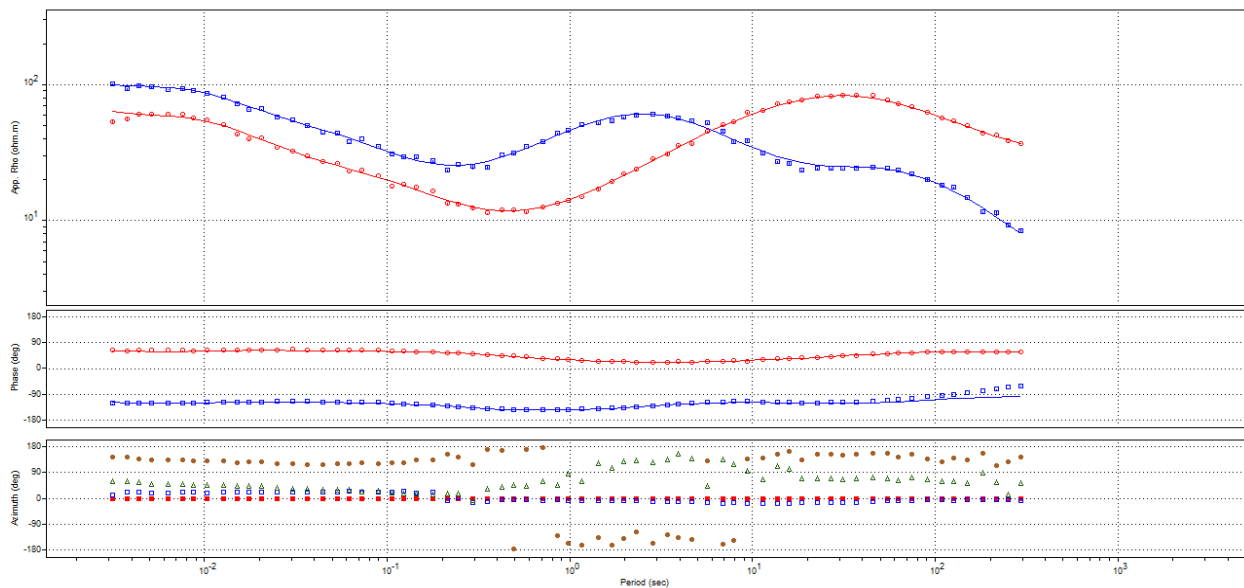
شکل ۳۴ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امیدانسی برای ایستگاه ۴



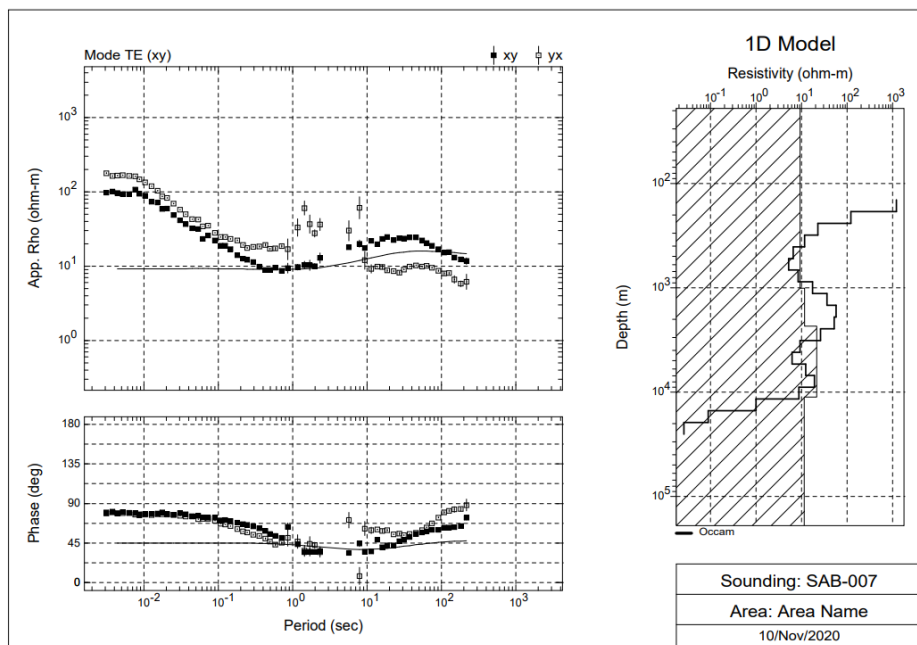
شکل ۳۵: پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است.



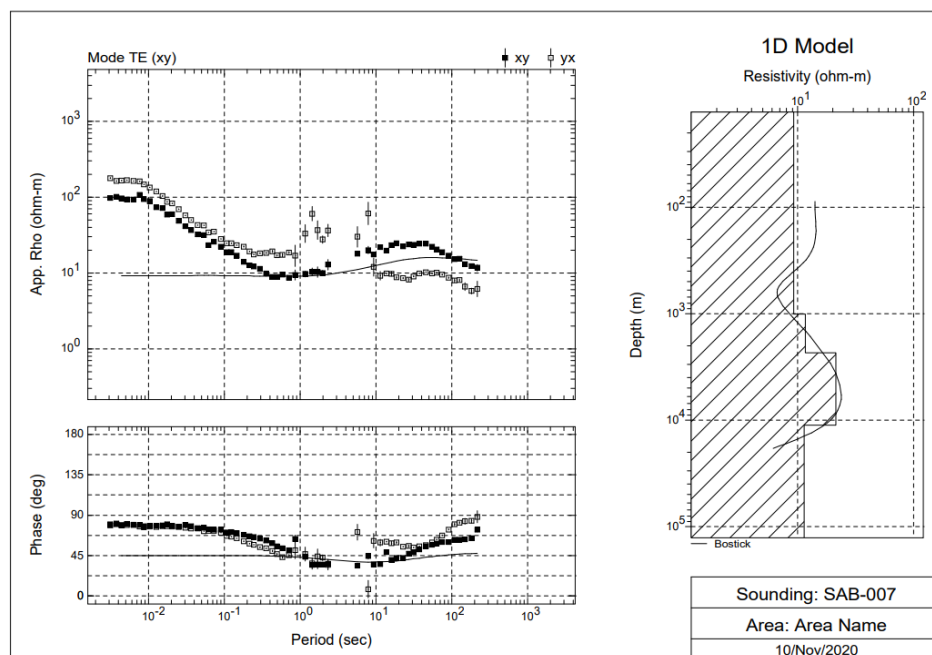
شکل ۳۶: پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۶ آورده شده است.



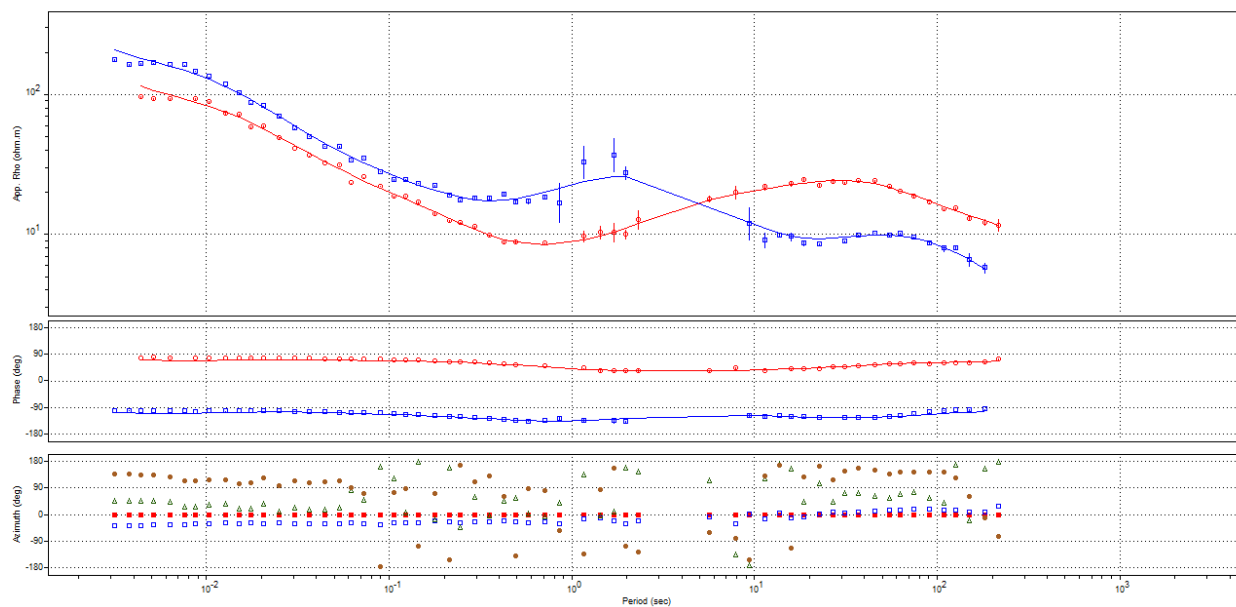
شکل ۳۷: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۶



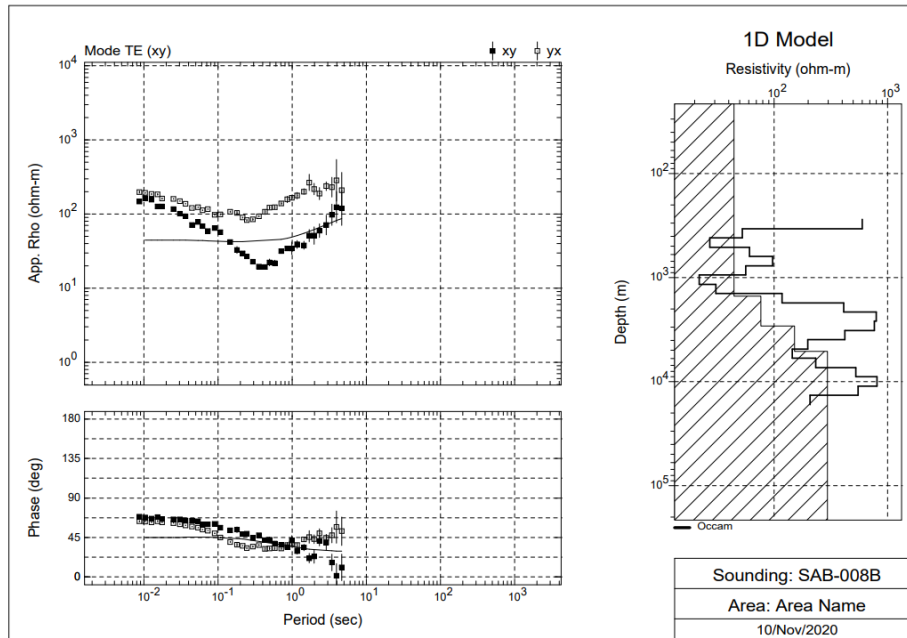
شکل ۳۸: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۷ آورده شده است.



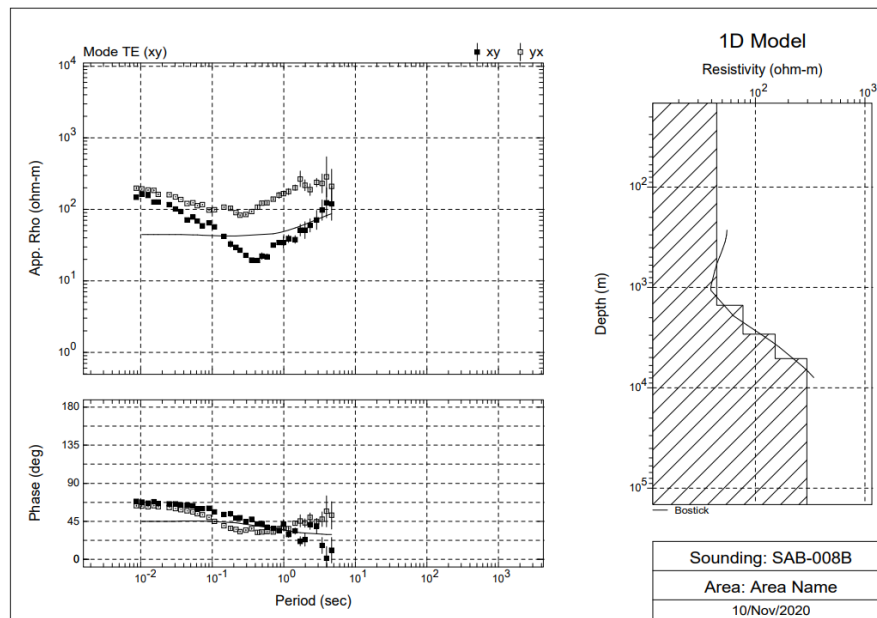
شکل ۳۹ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۷ آورده شده است.



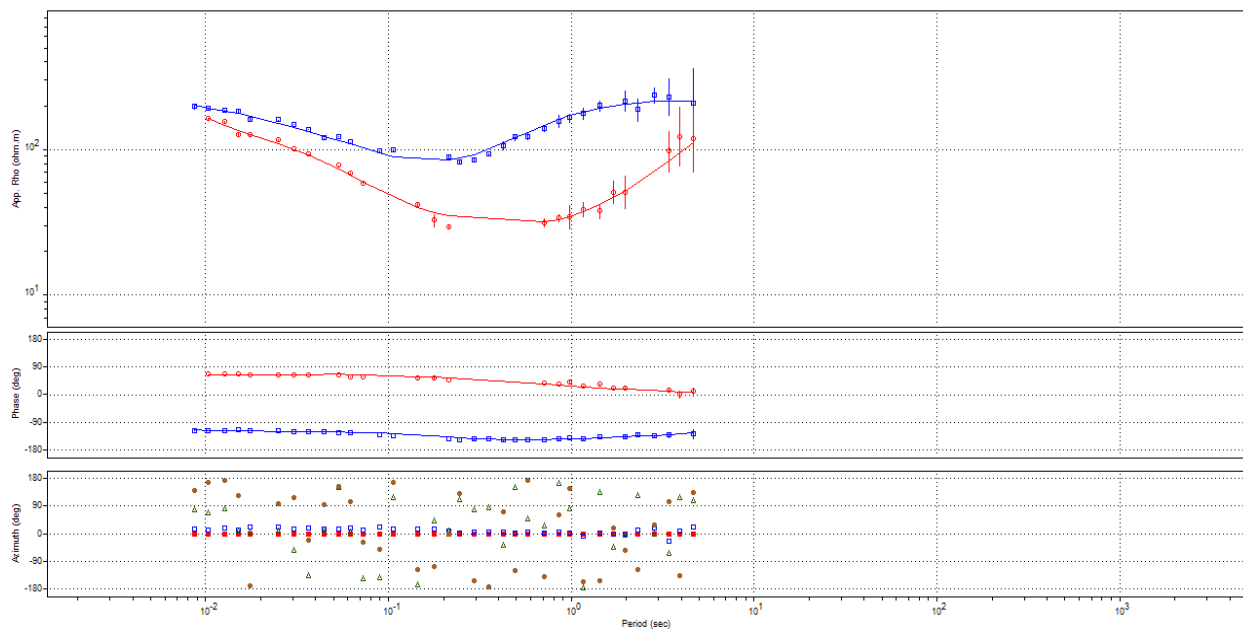
شکل ۴۰ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۷



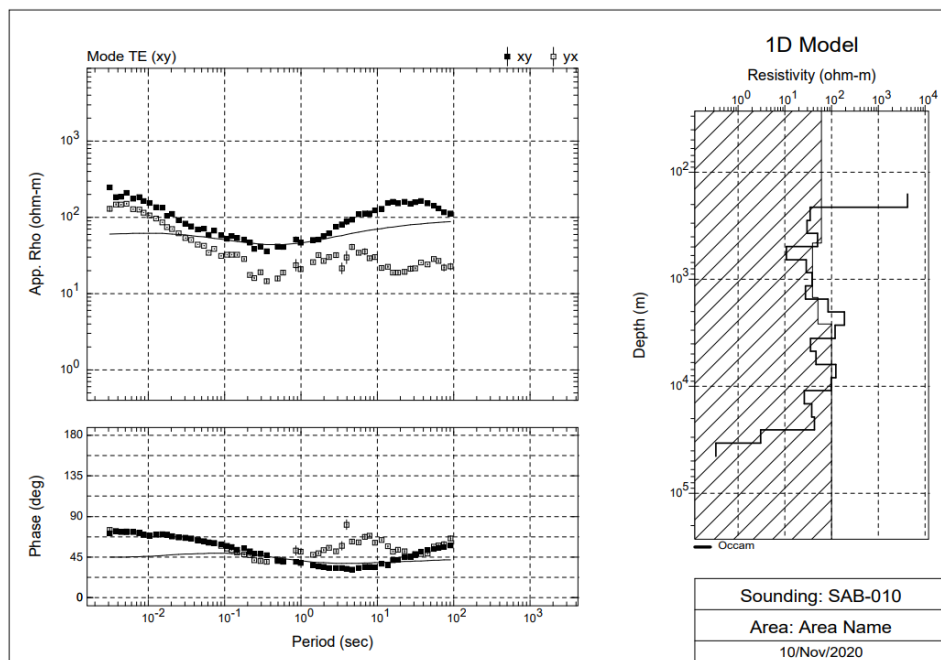
شکل ۴۱: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۸ آورده شده است.



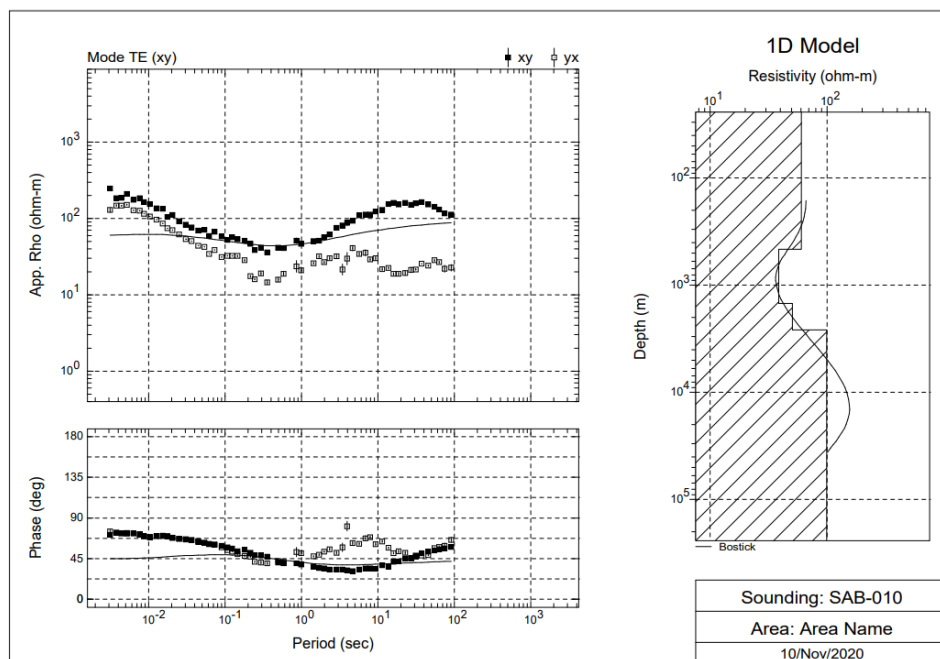
شکل ۴۲: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۸ آورده شده است.



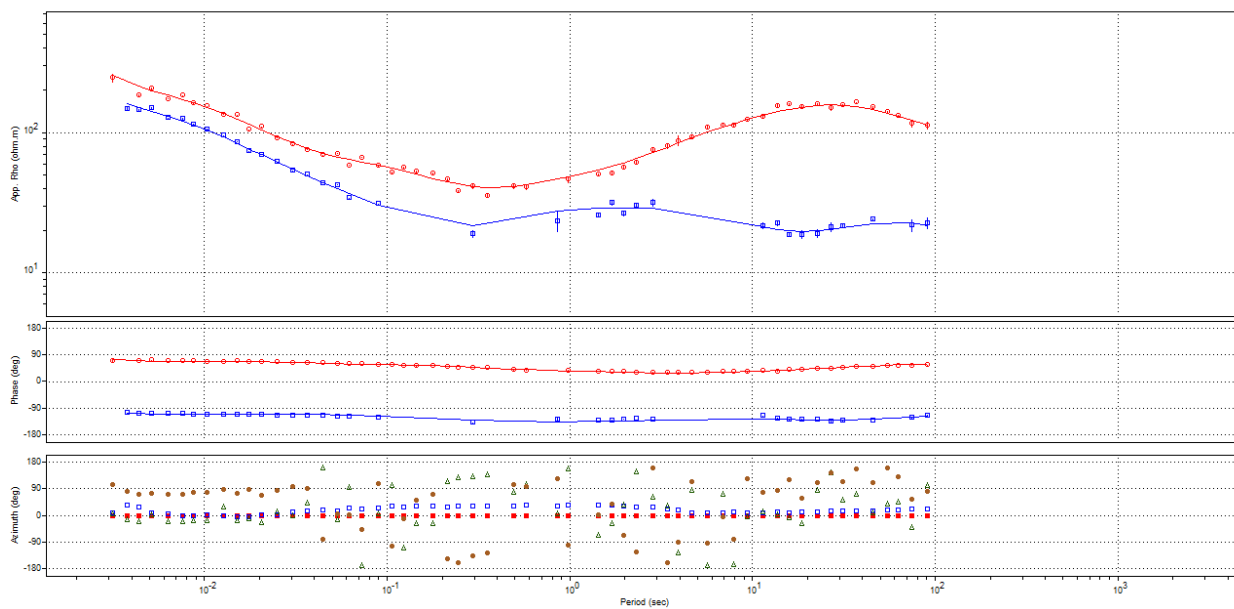
شکل ۴۳: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۸



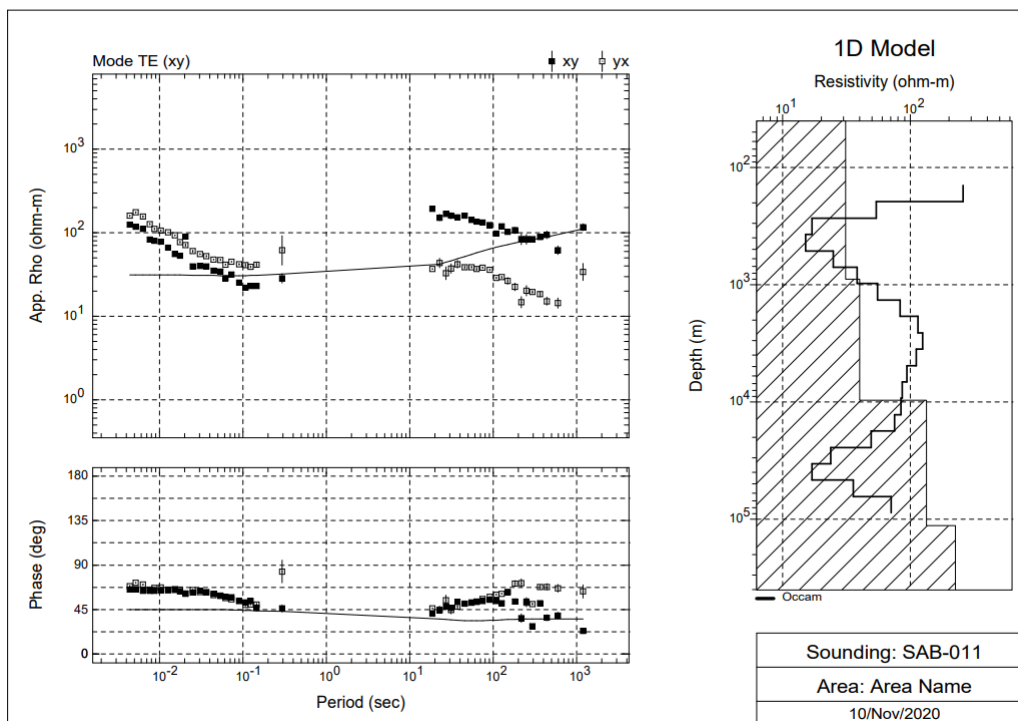
شکل ۴۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۰ آورده شده است.



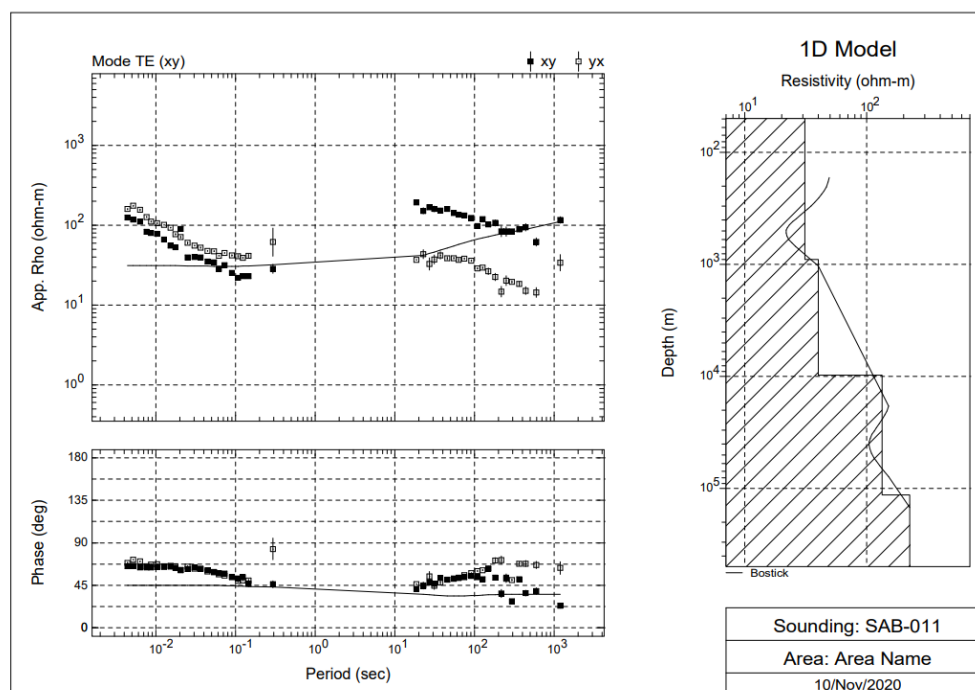
شکل ۴۵: پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهدهای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۰ آورده شده است.



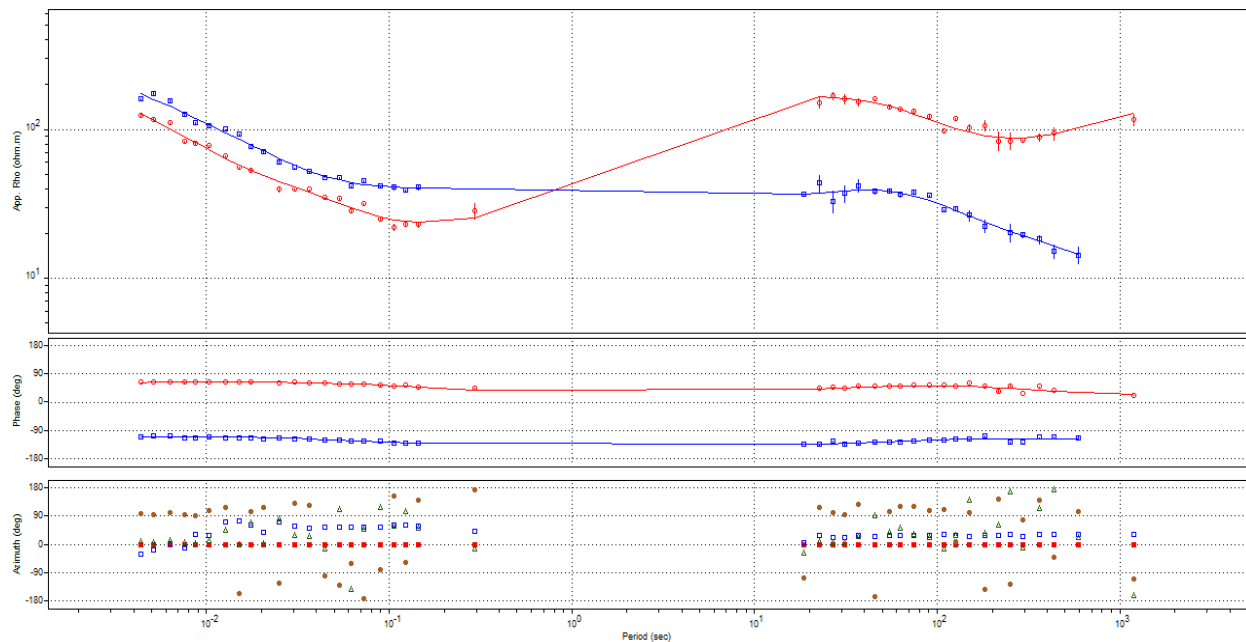
شکل ۴۶: پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۱۰



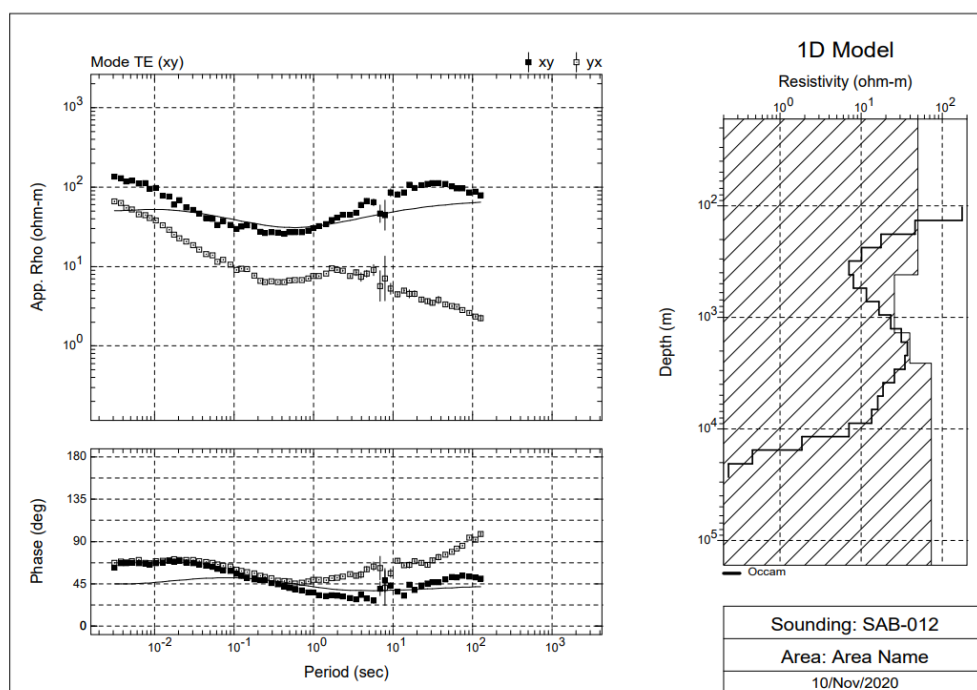
شکل ۴۷ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۱ آورده شده است



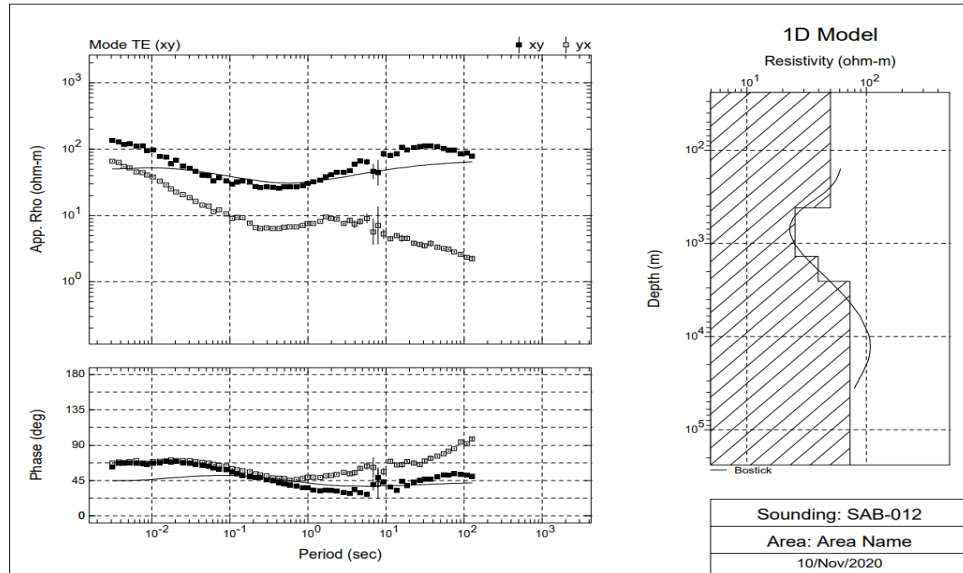
شکل ۴۸ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۱ آورده شده است.



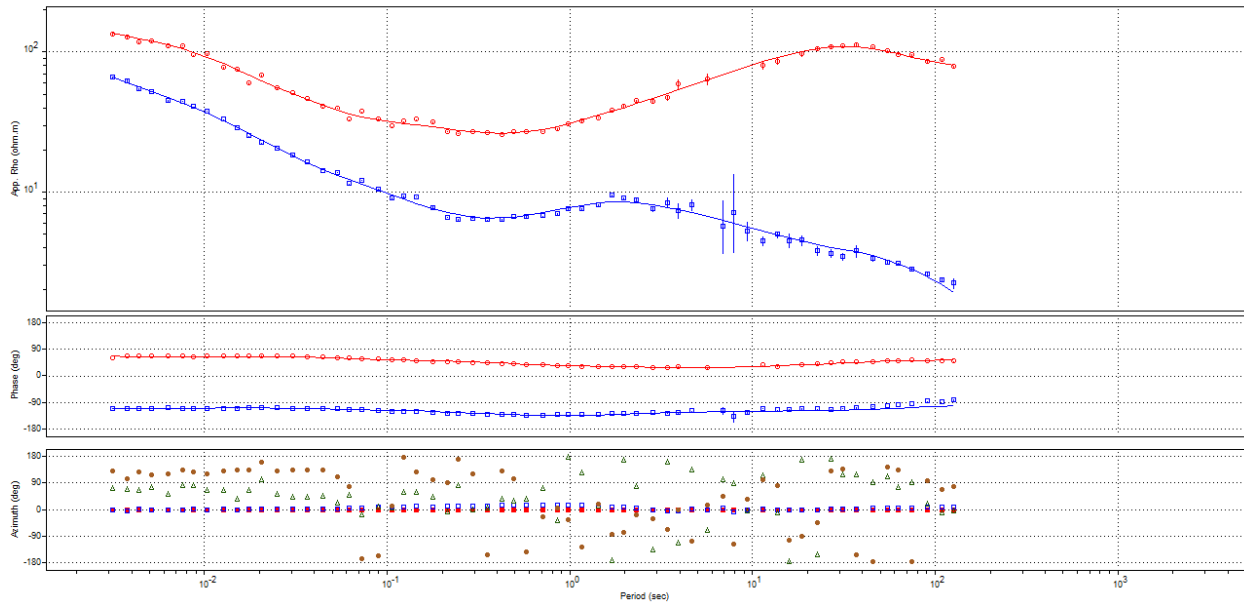
شکل ۴۹ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۱۱



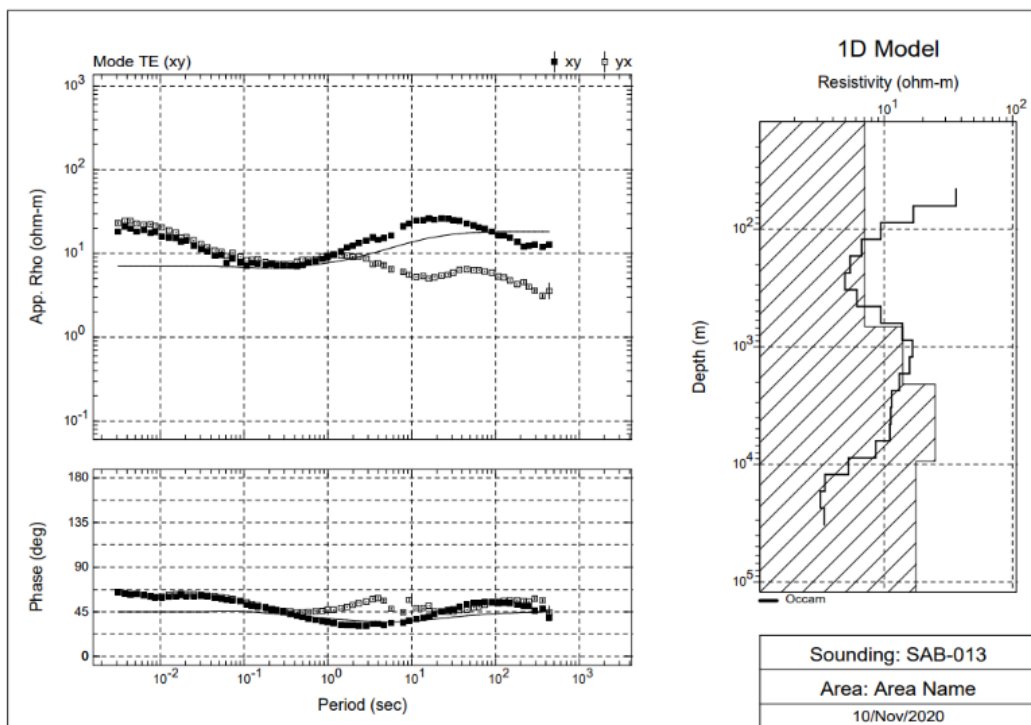
شکل ۵۰ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۲ آورده شده است.



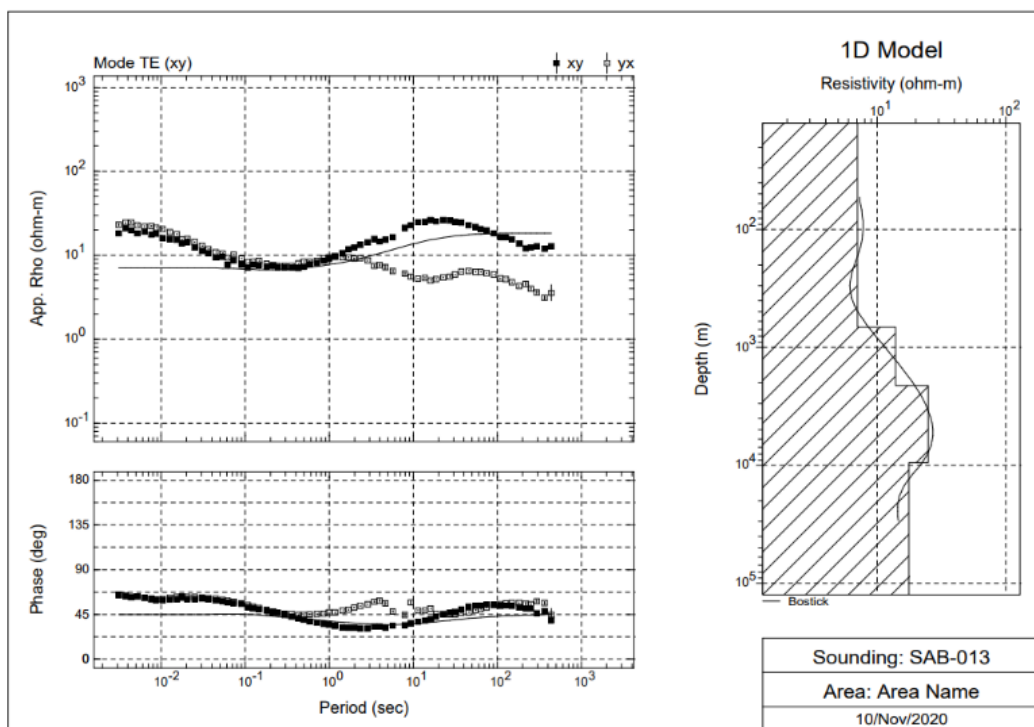
شکل ۵۱ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوسستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۲ آورده شده است.



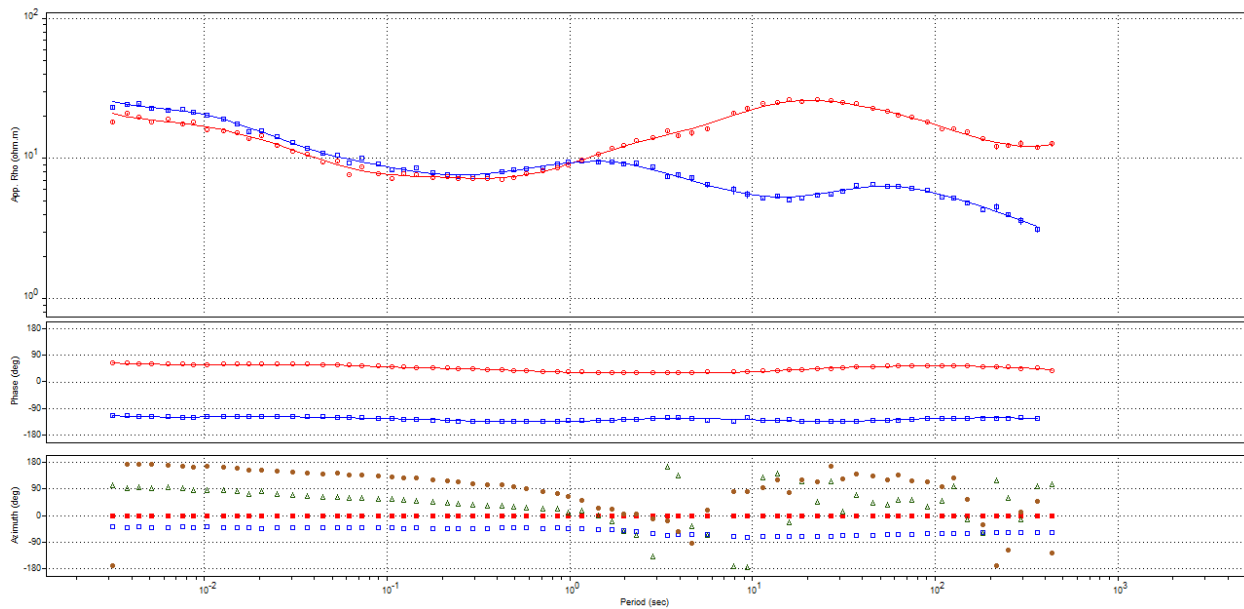
شکل ۵۲ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری وفازهای امپدانسی برای ایستگاه ۱۲



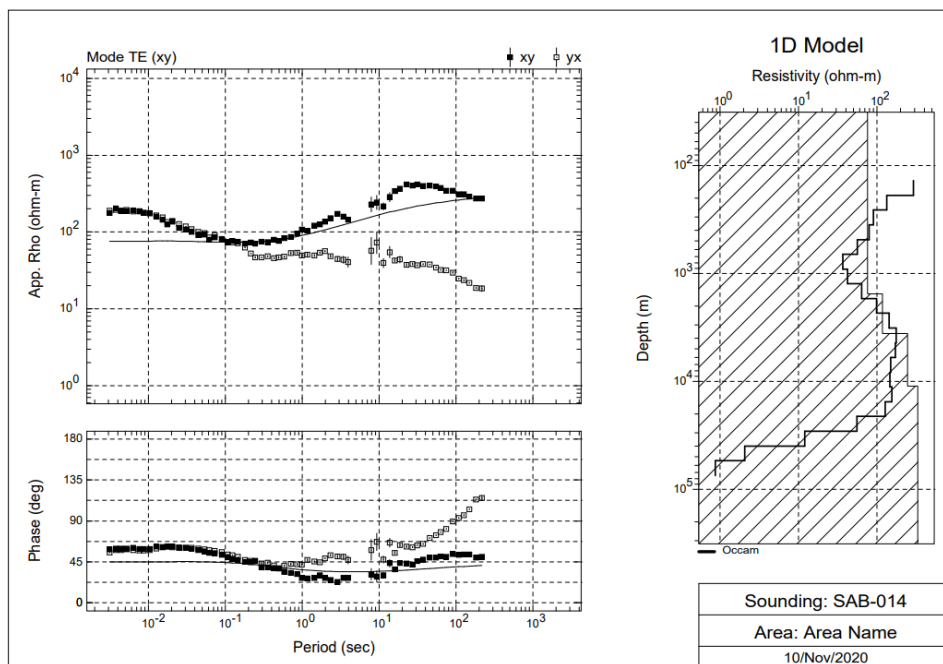
شکل ۵۳ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۳ آورده شده است.



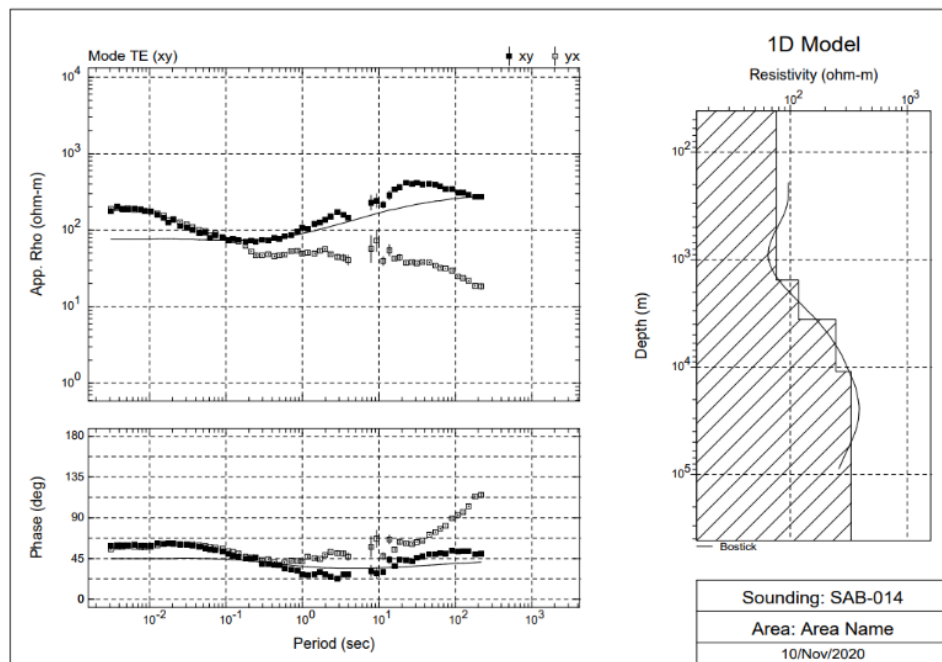
شکل ۵۴ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۳ آورده شده است



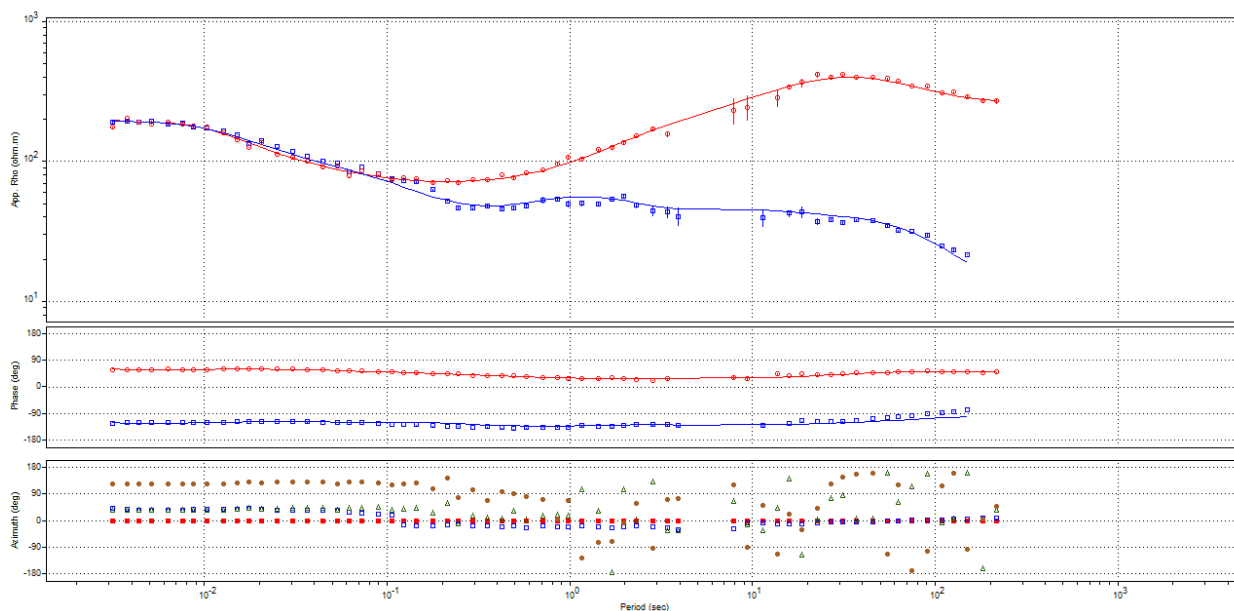
شکل ۵۵: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۱۳



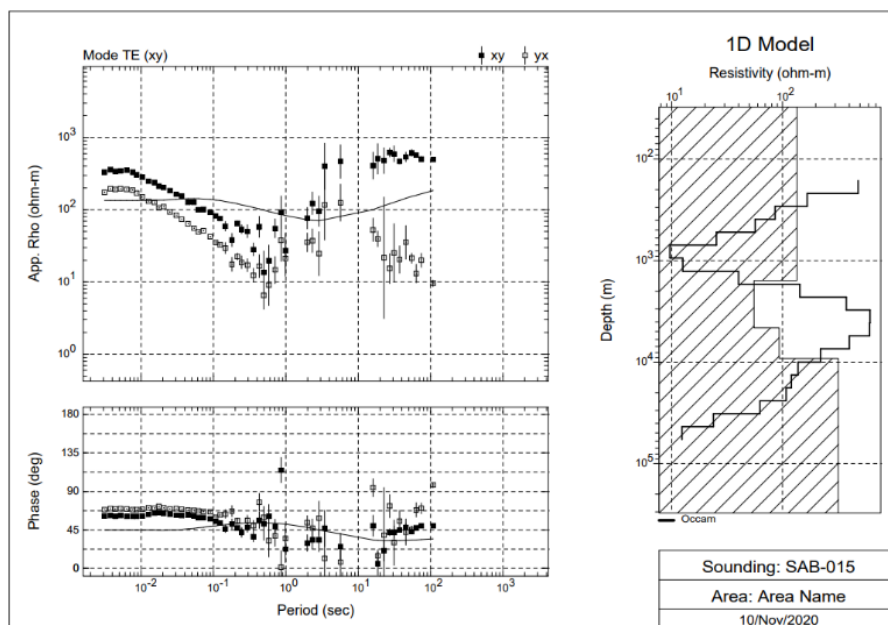
شکل ۵۶: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۴ آورده شده است.



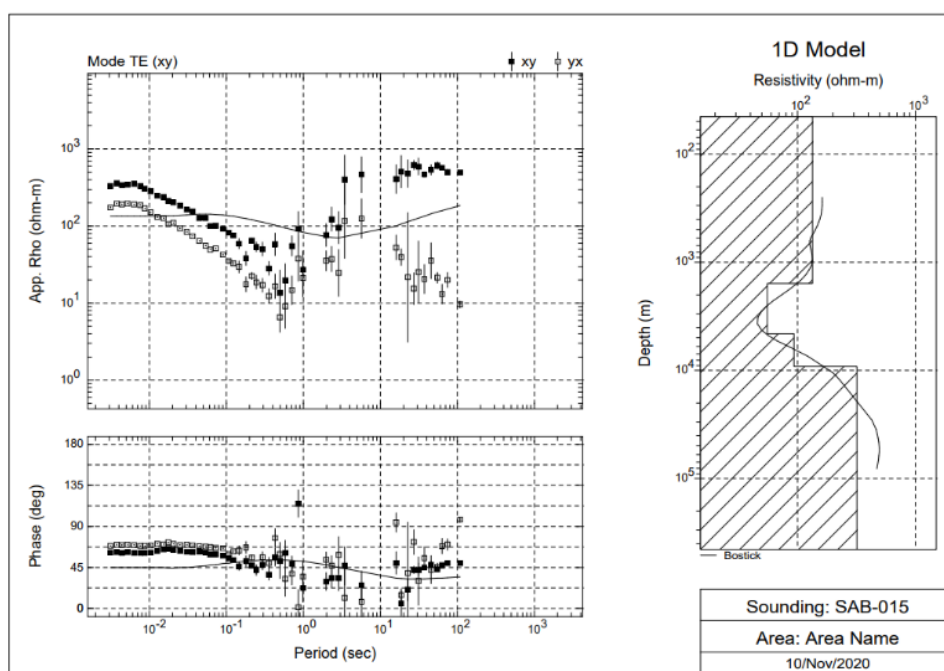
شکل ۵۷ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۴ آورده شده است.



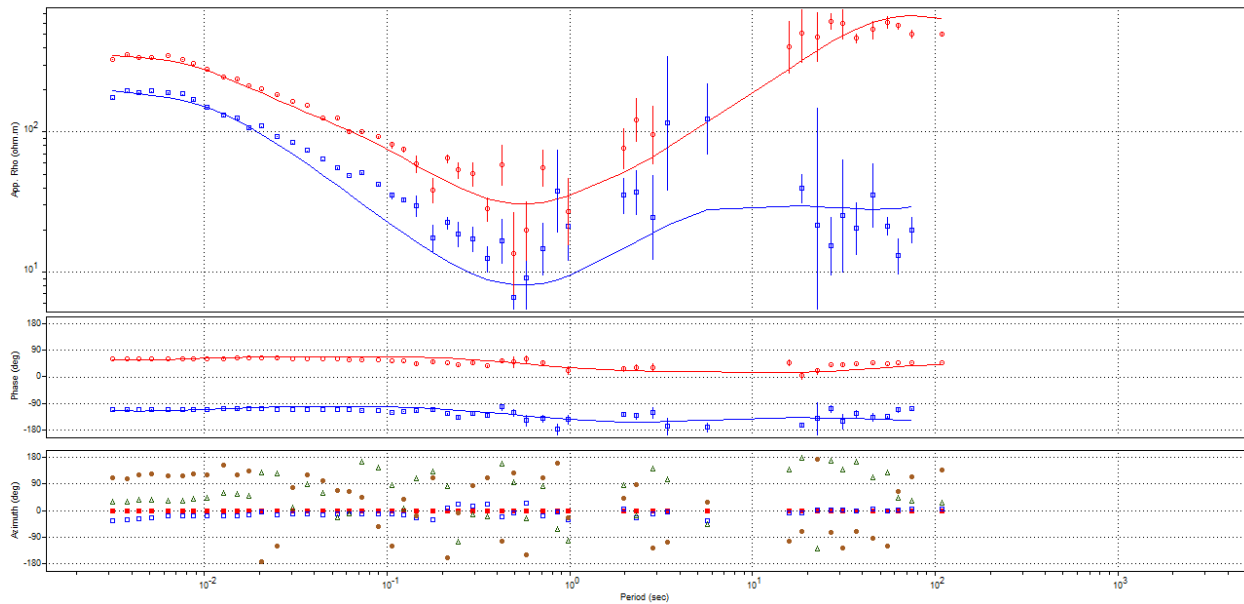
شکل ۵۸ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری وفازهای امپدانسی برای ایستگاه ۱۴



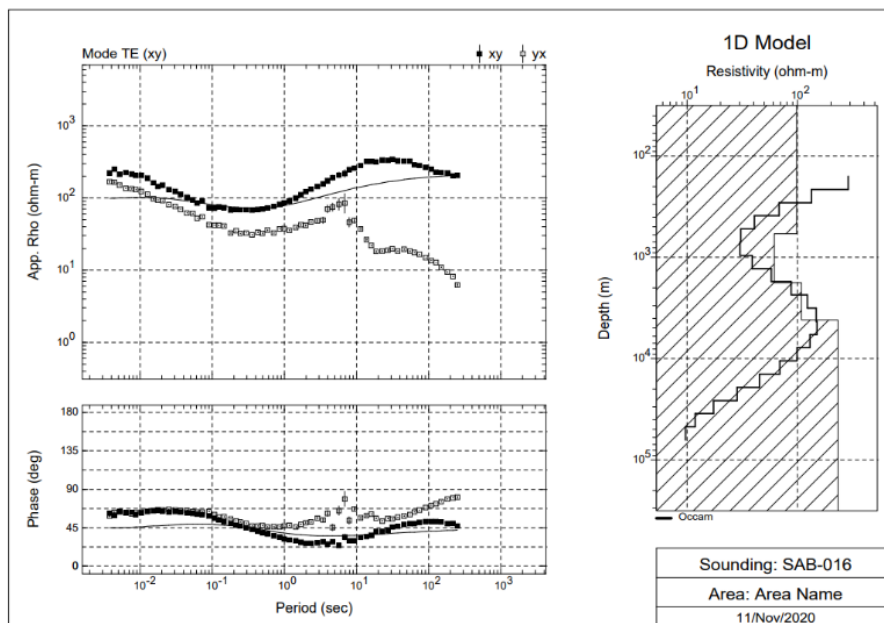
شکل ۵۹: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و عموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۵ آورده شده است.



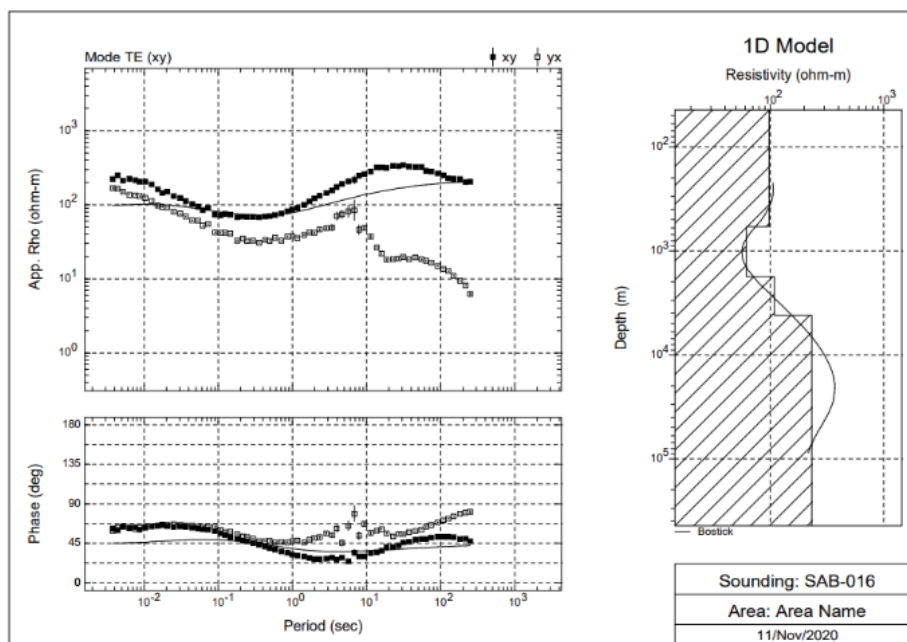
شکل ۶۰: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۵ آورده شده است.



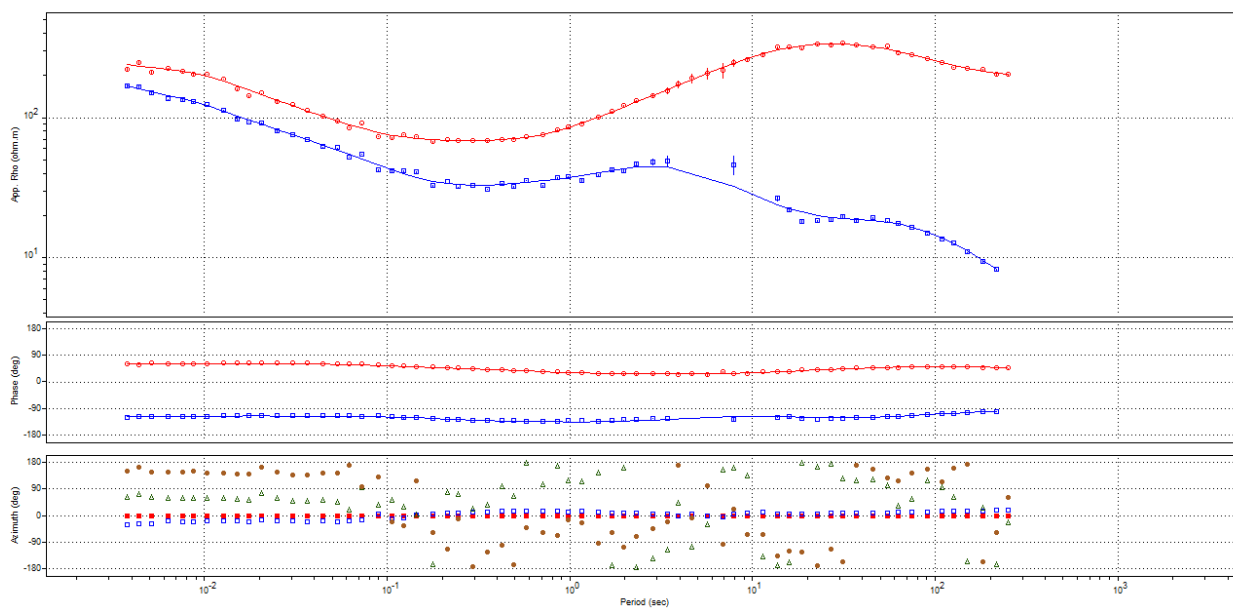
شکل ۶۱: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۱۵



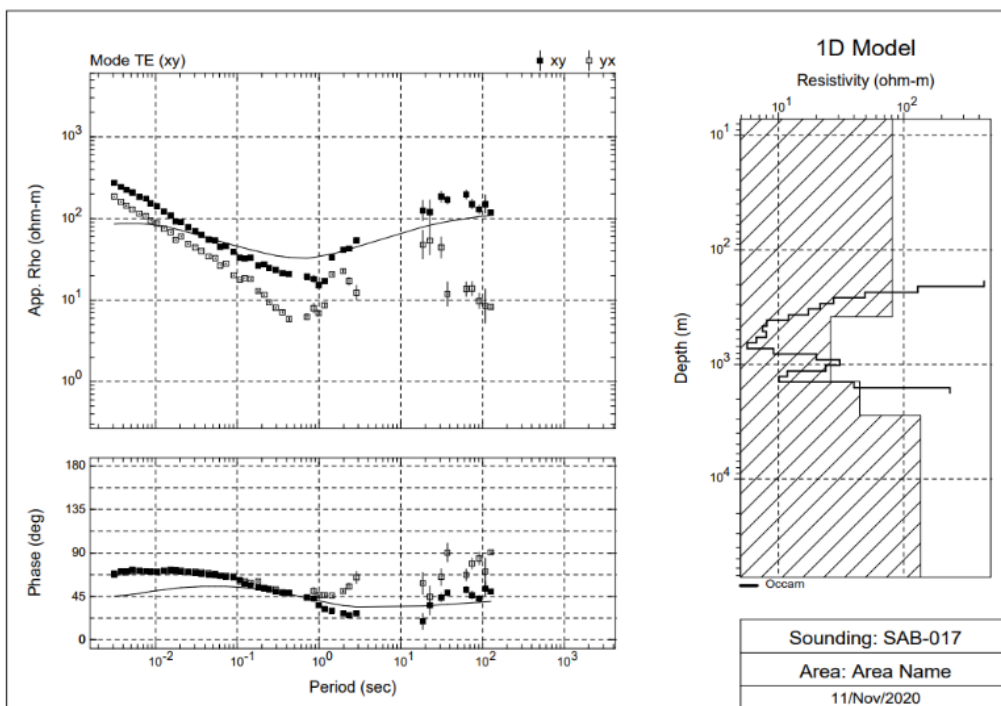
شکل ۶۲: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۶ آورده شده است.



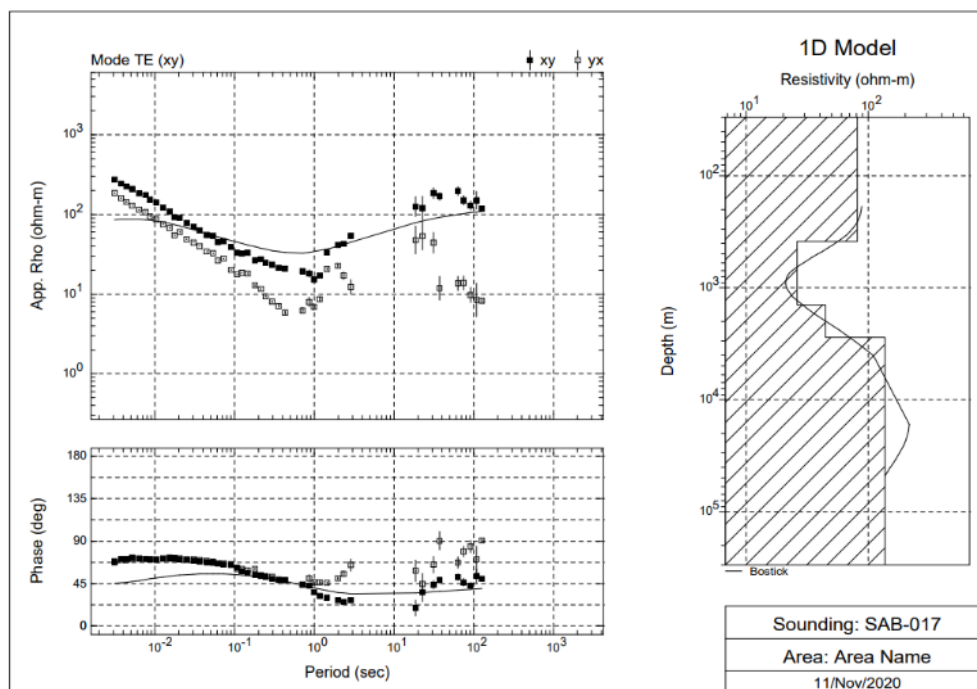
شکل ۶۳ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) برای سونداژ ۱۶ آورده شده است.



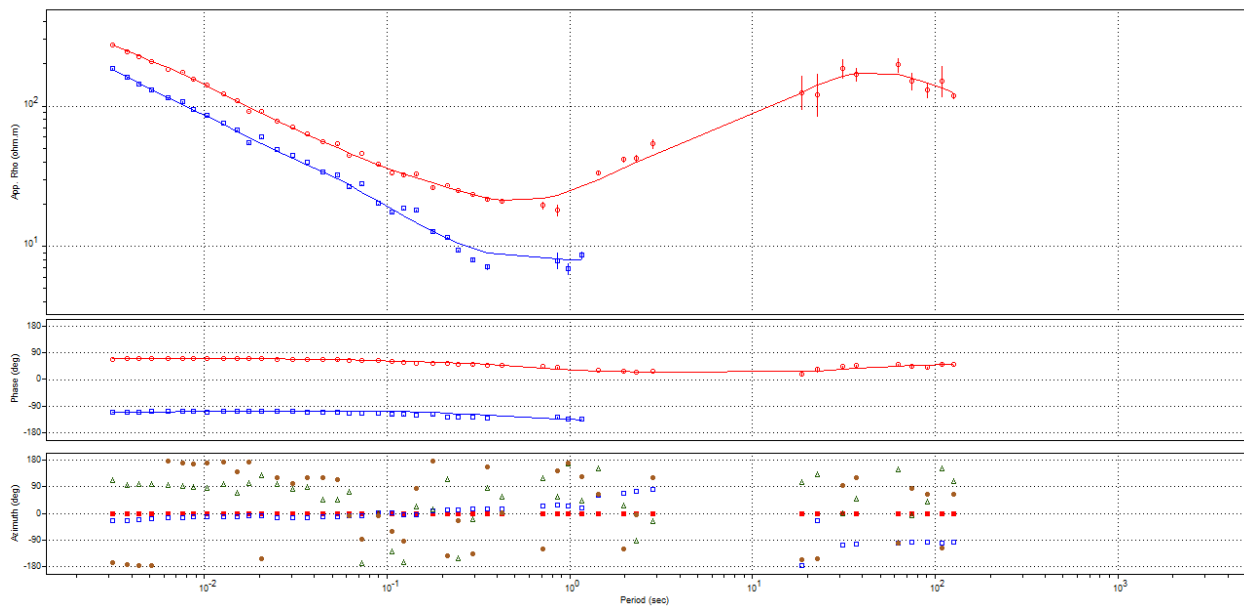
شکل ۶۴ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۱۶



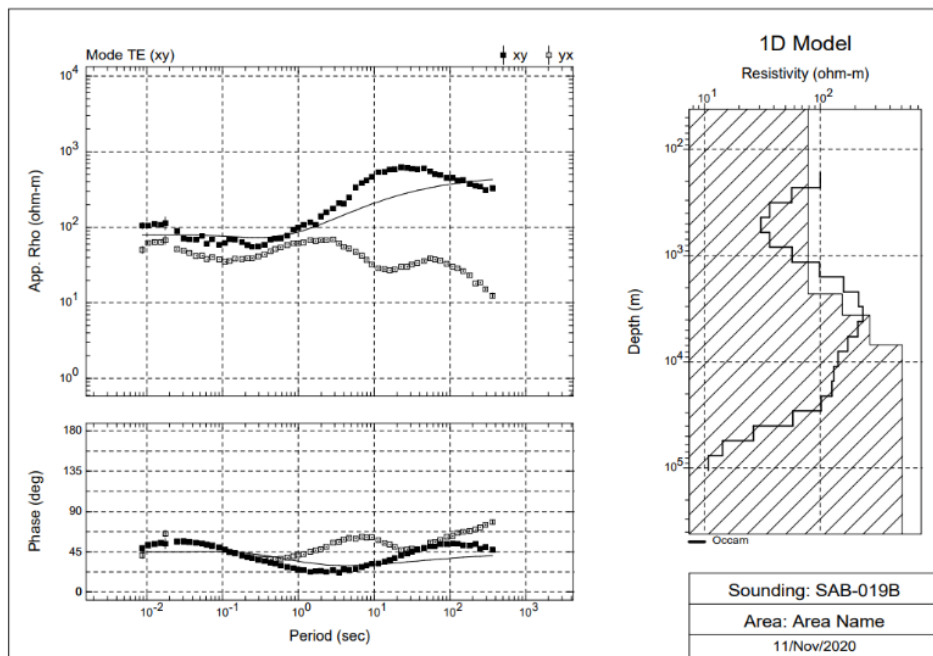
شکل ۶۵: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۷ آورده شده است .



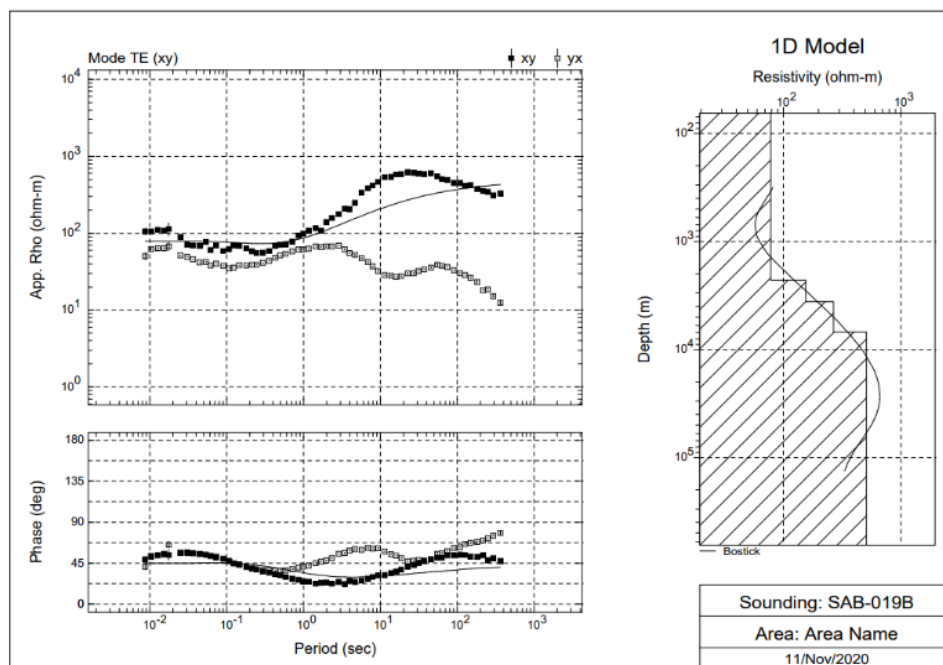
شکل ۶۶: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۷ آورده شده است.



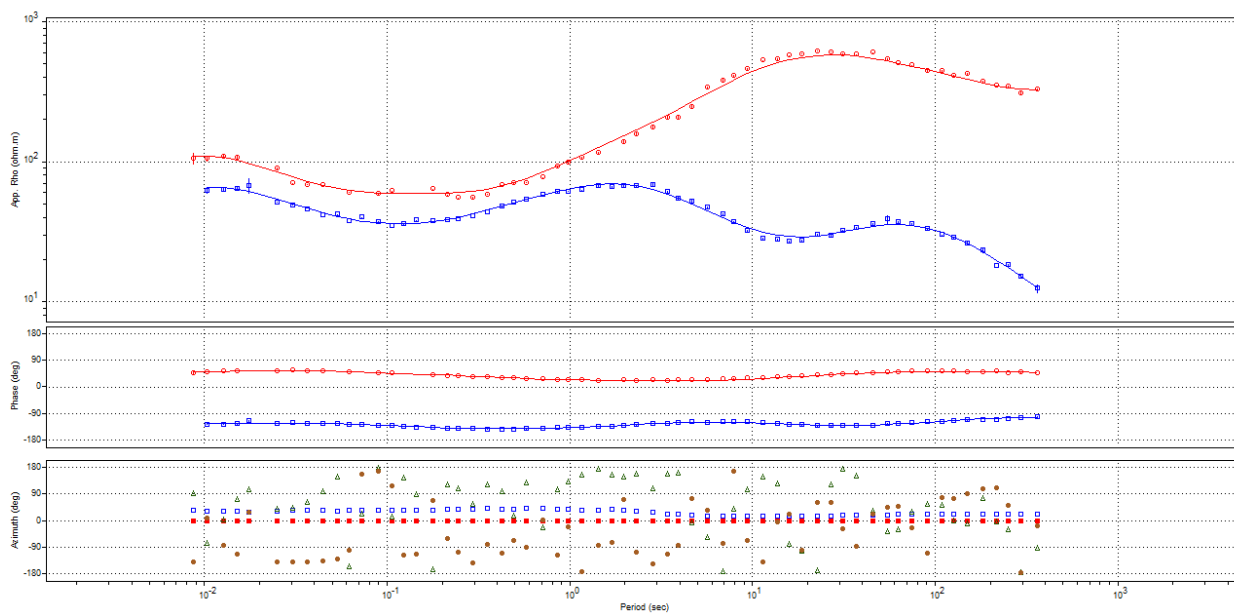
شکل ۶۷: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۱۷



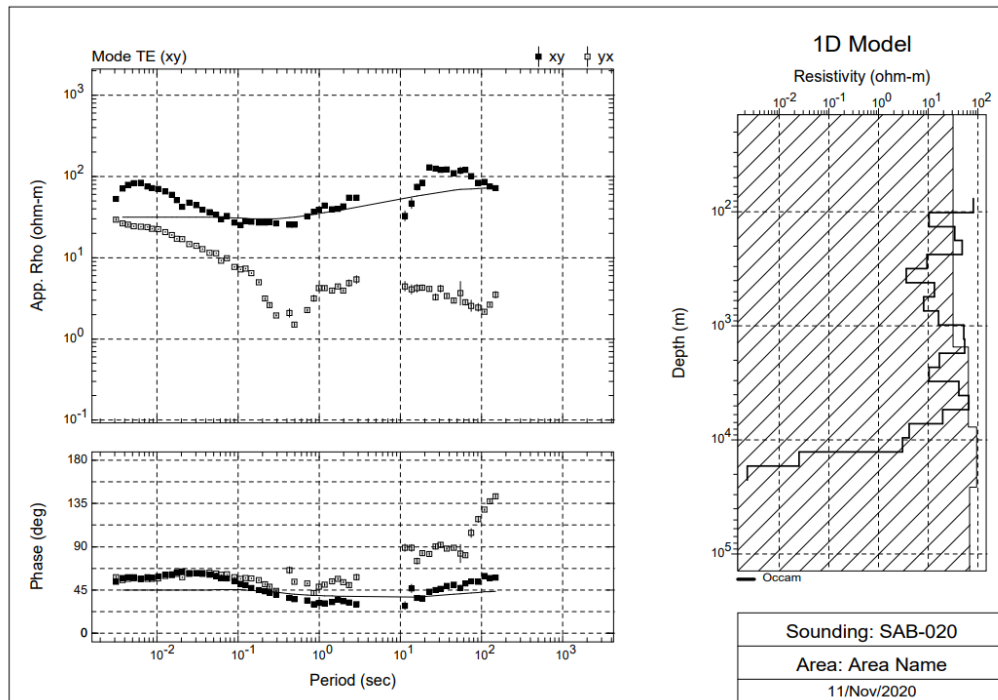
شکل ۶۸: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۹ آورده شده است.



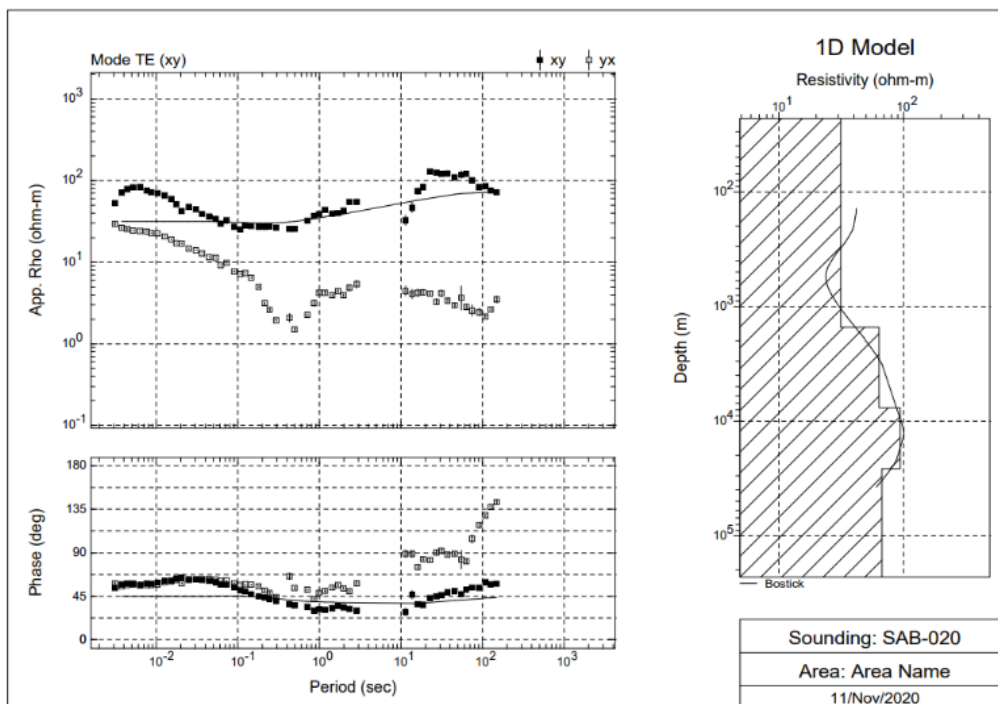
شکل ۶۹: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۱۹ آورده شده است.



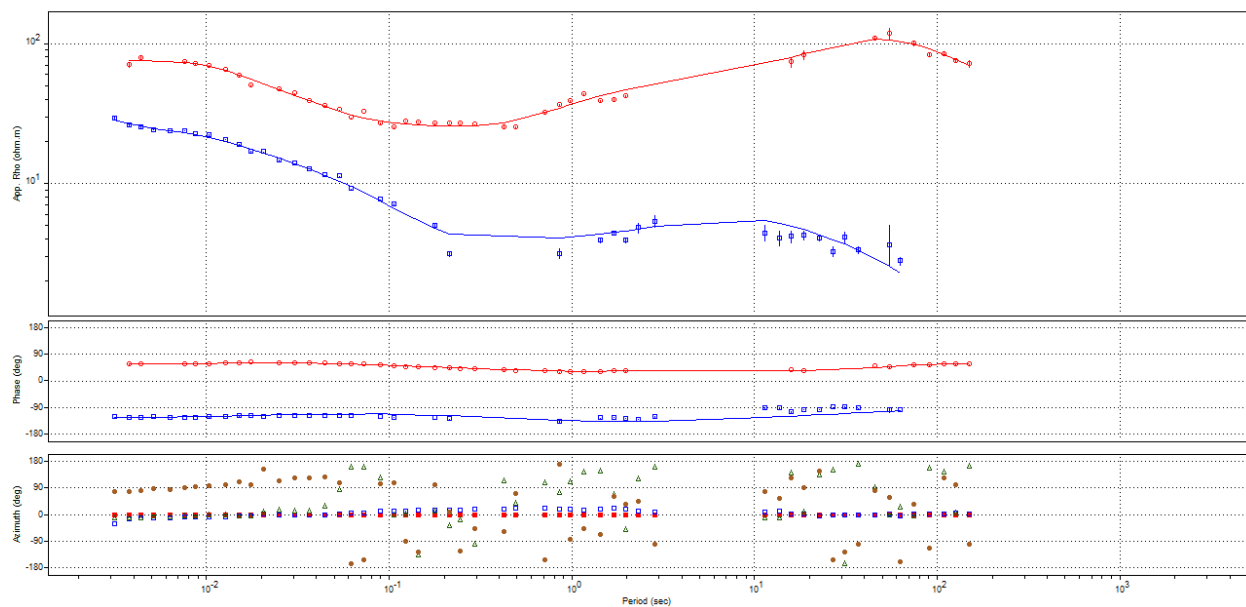
شکل ۷۰: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۱۹



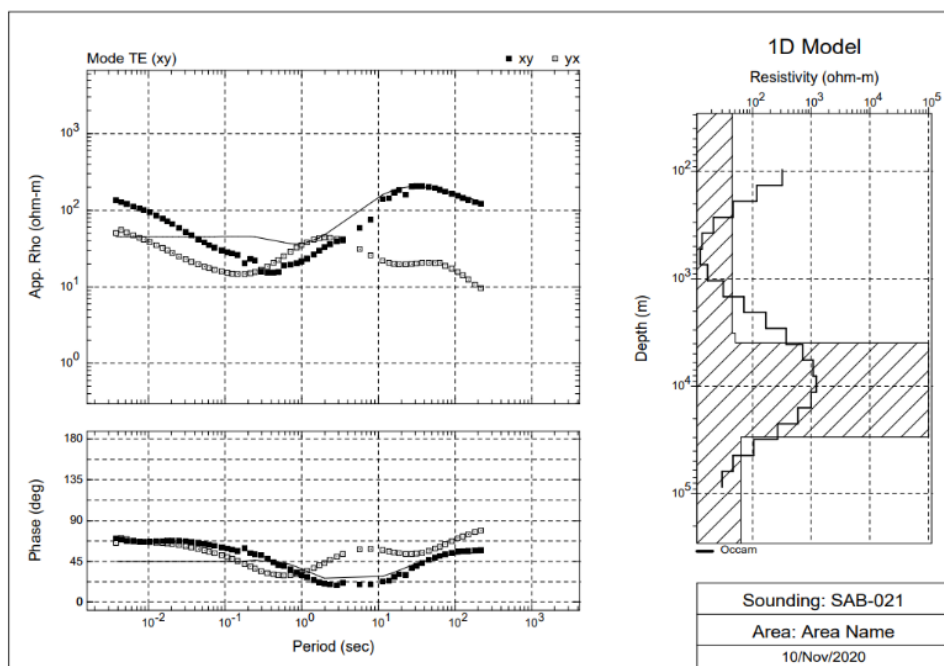
شکل ۷۱ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۰ آورده شده است.



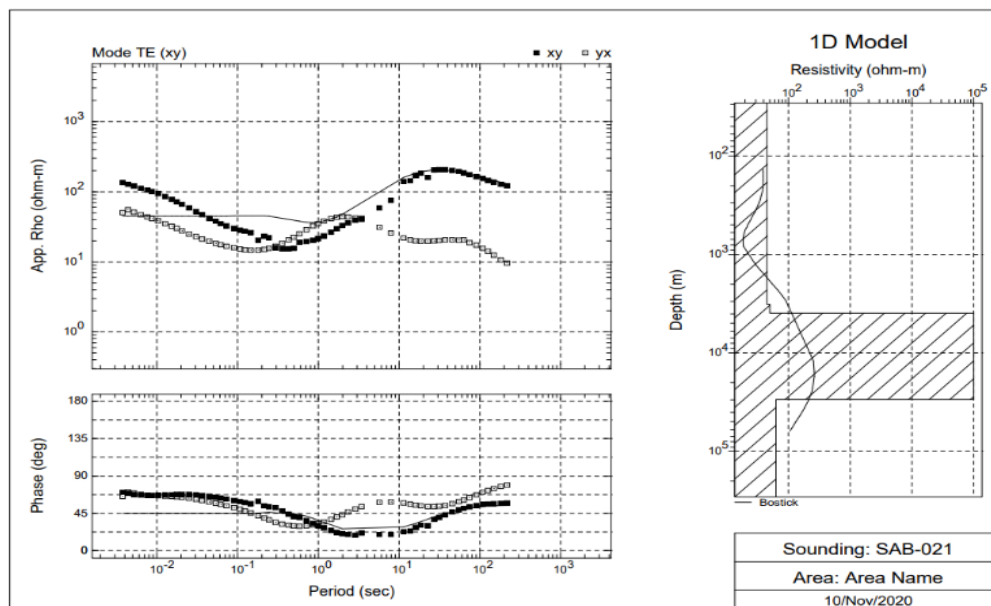
شکل ۷۲ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۰ آورده شده است .



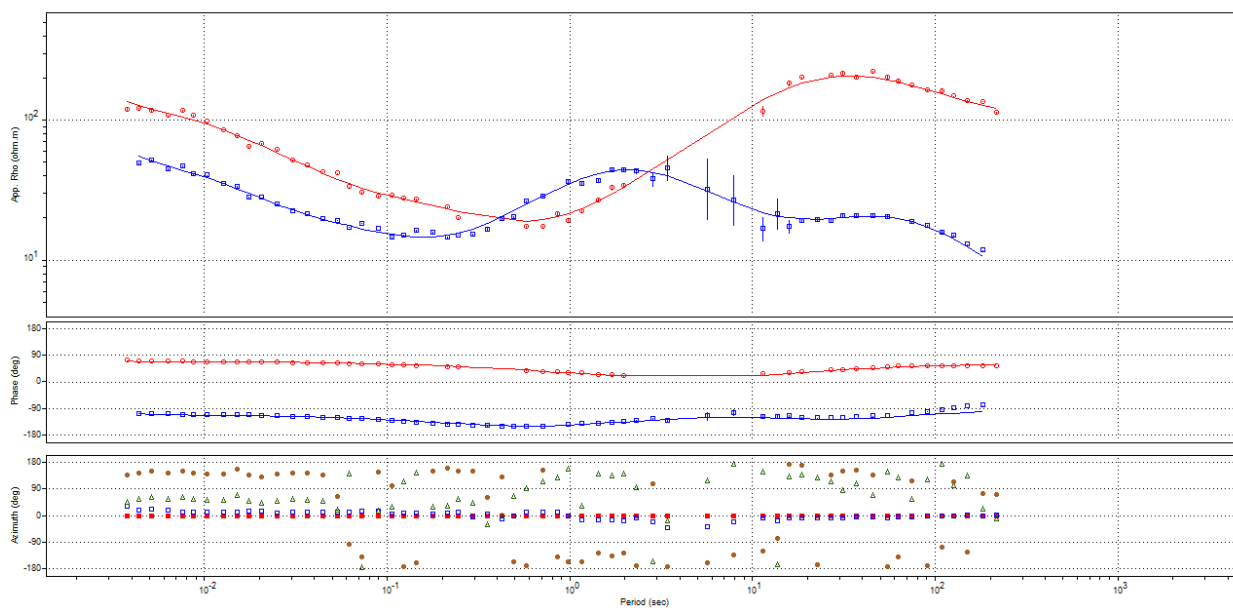
شکل ۷۳: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۰



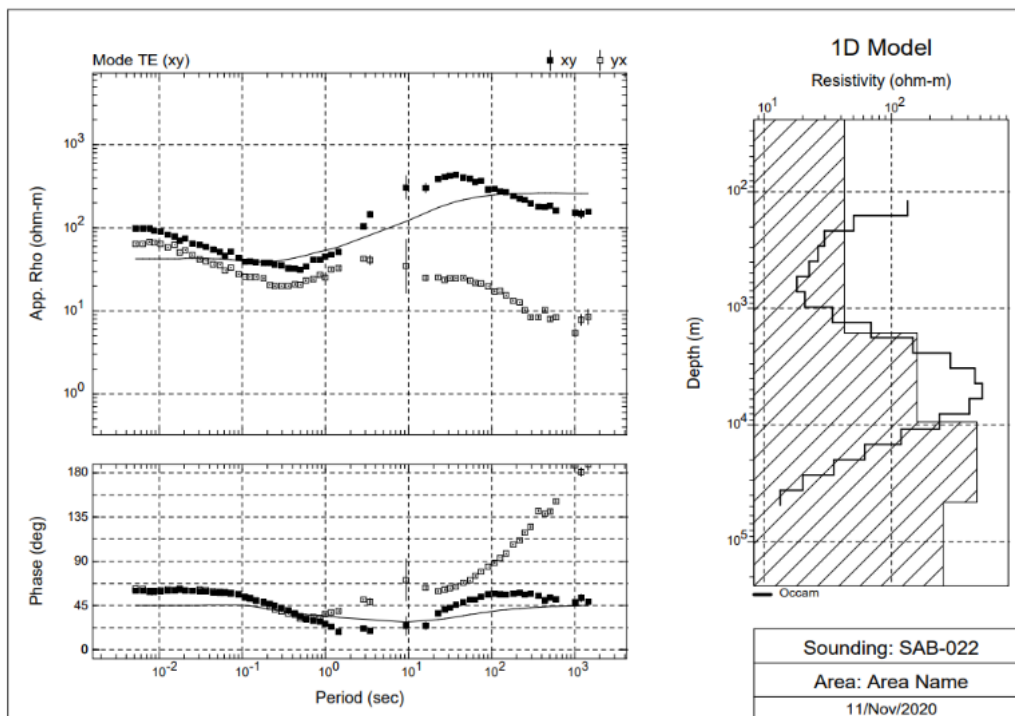
شکل ۷۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است.



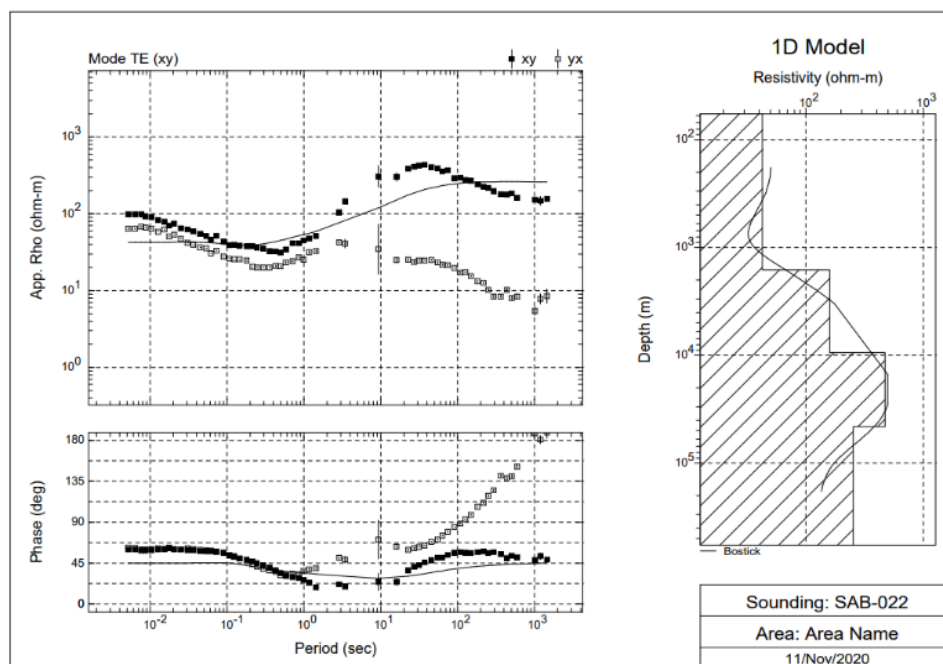
شکل ۷۵ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۱ آورده شده است



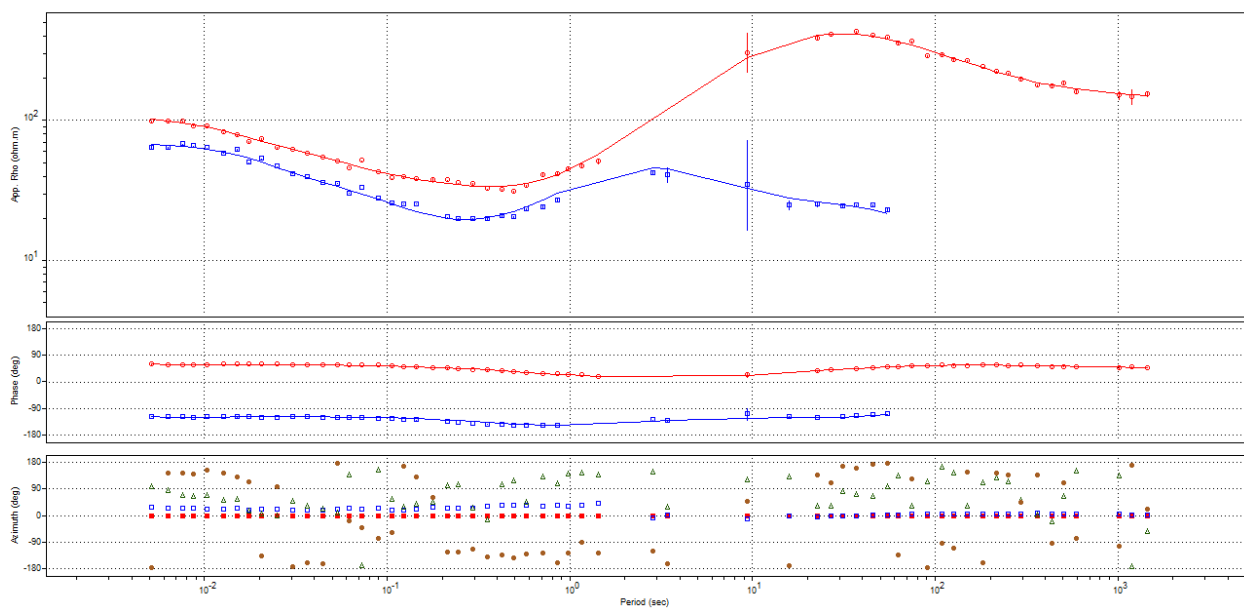
شکل ۷۶ پ: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۱



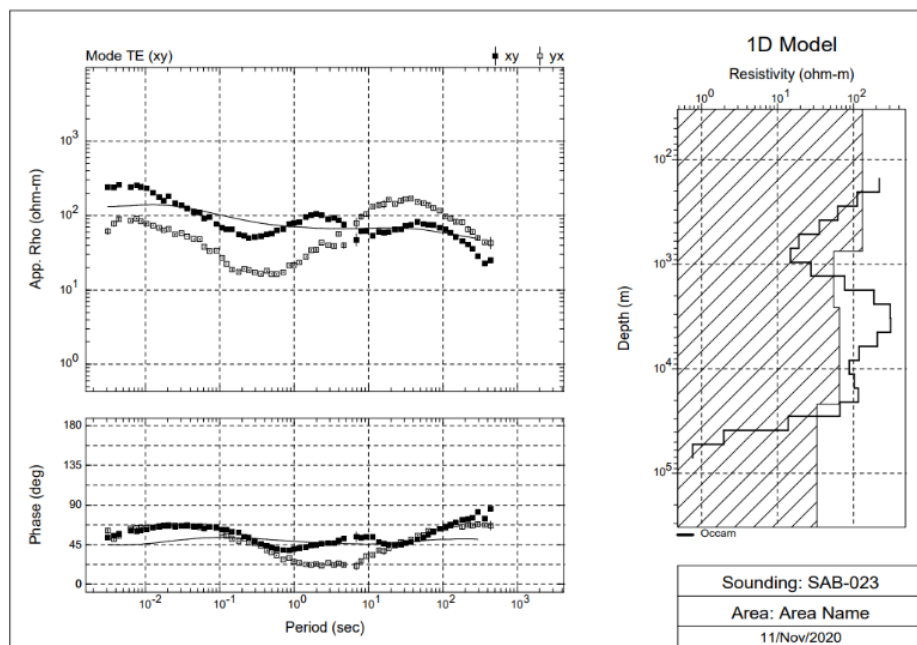
شکل ۷۷ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموارسازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۲ آورده شده است.



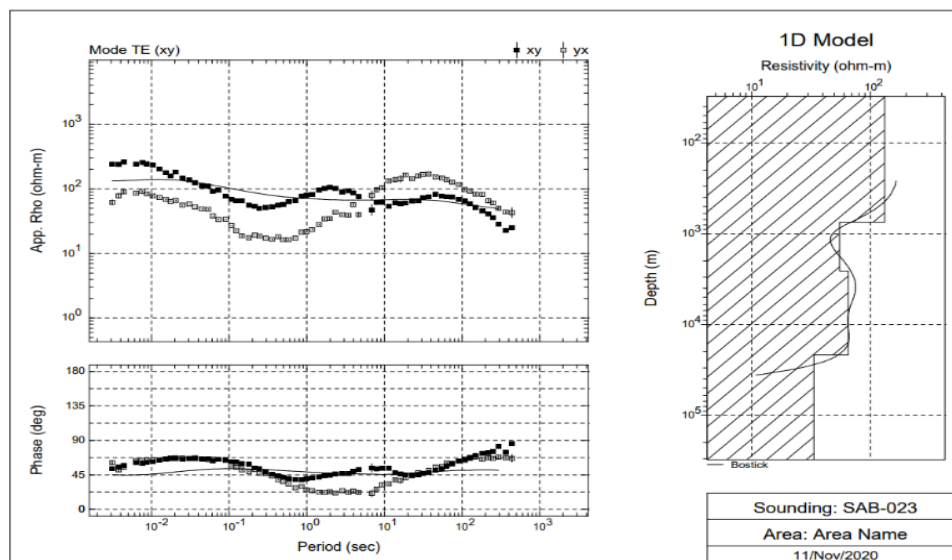
شکل ۷۸ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۲ آورده شده است.



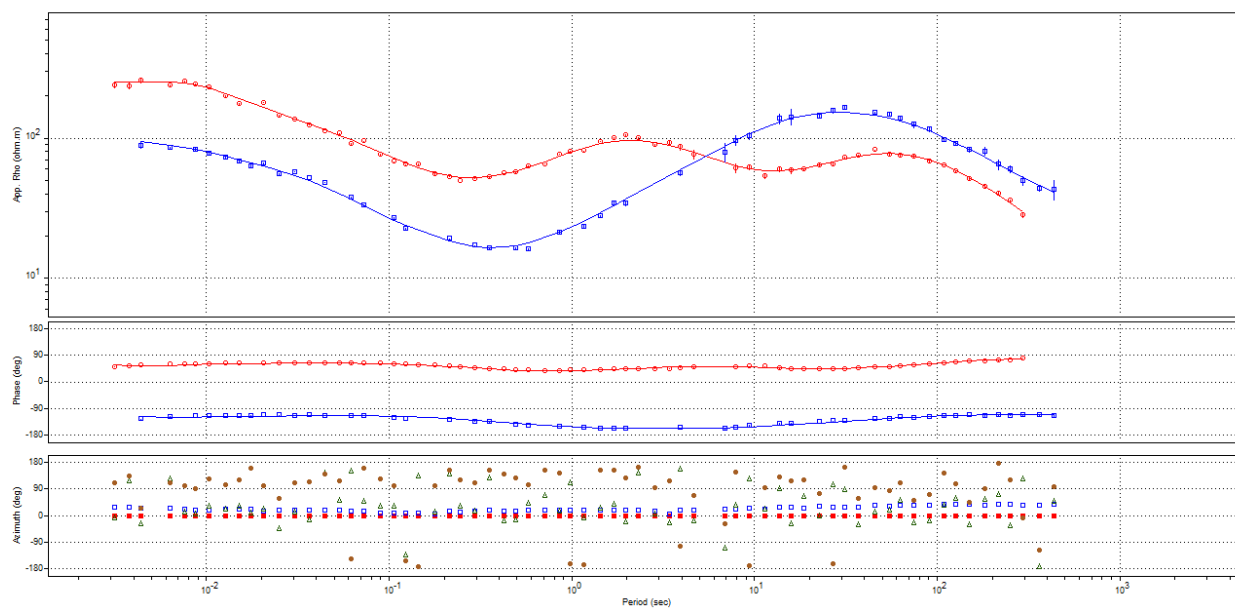
شکل ۷۹ پ: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای اмпدانسی برای ایستگاه ۲۲



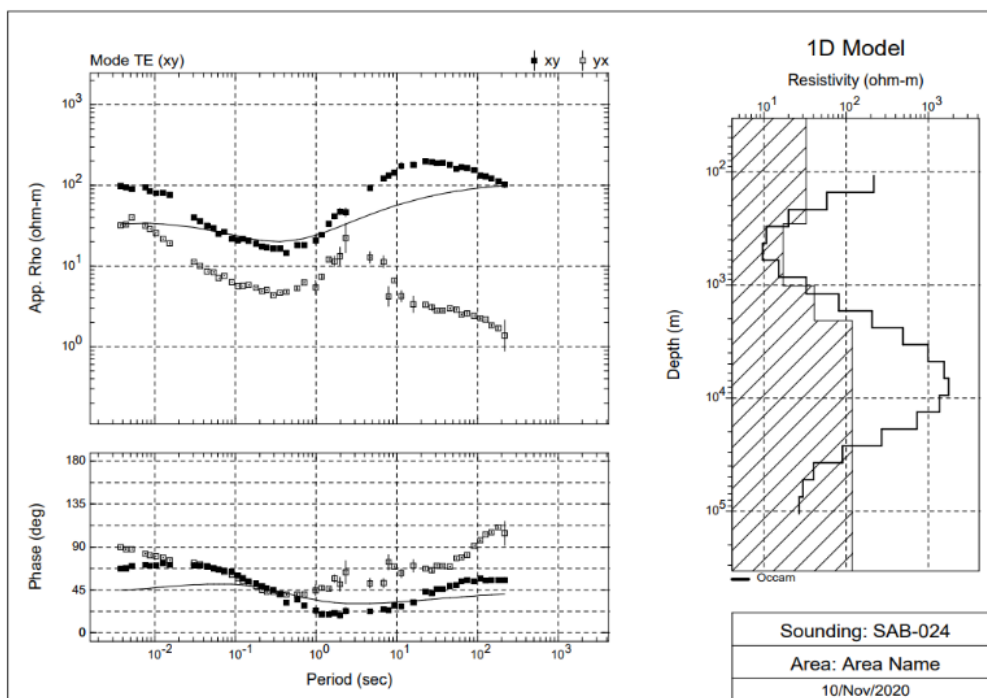
شکل ۸۰ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۳ آورده شده است.



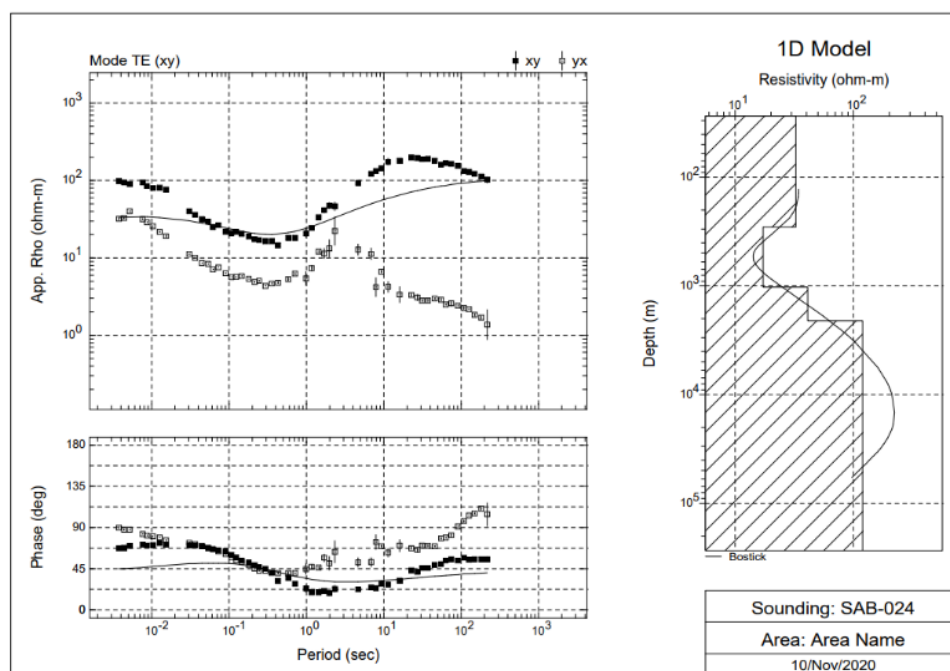
شکل ۸۱ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق پوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۳ آورده شده است



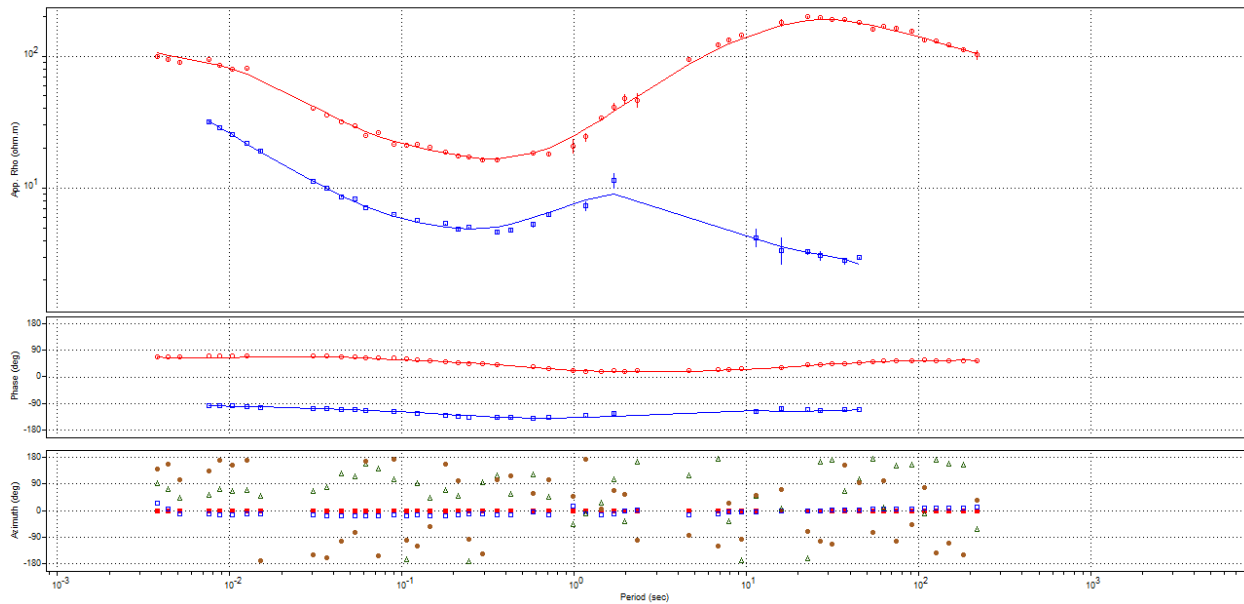
شکل ۸۲ پ: مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانسی برای ایستگاه ۲۳



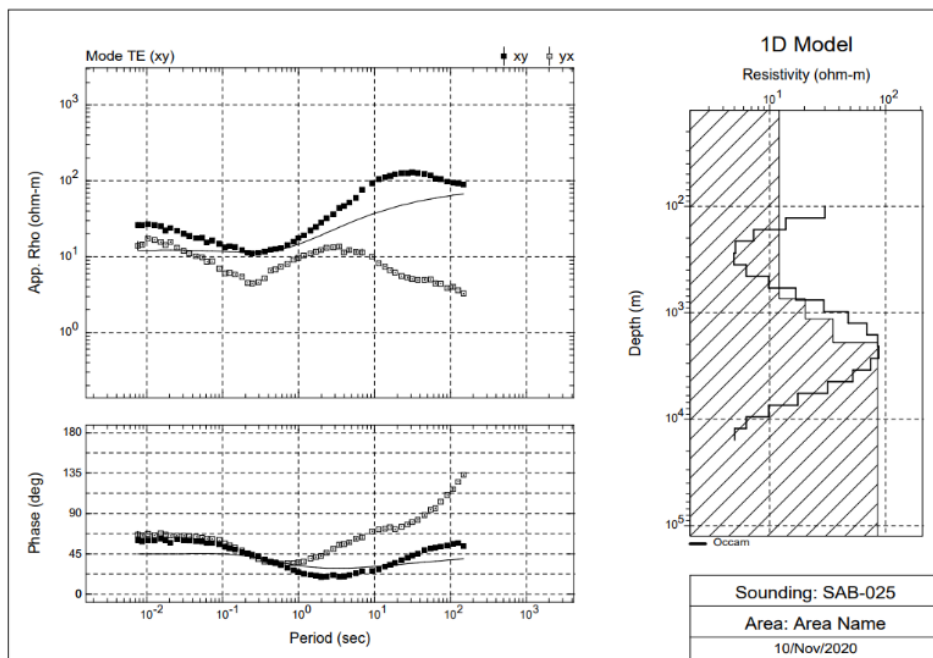
شکل ۸۳: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است.



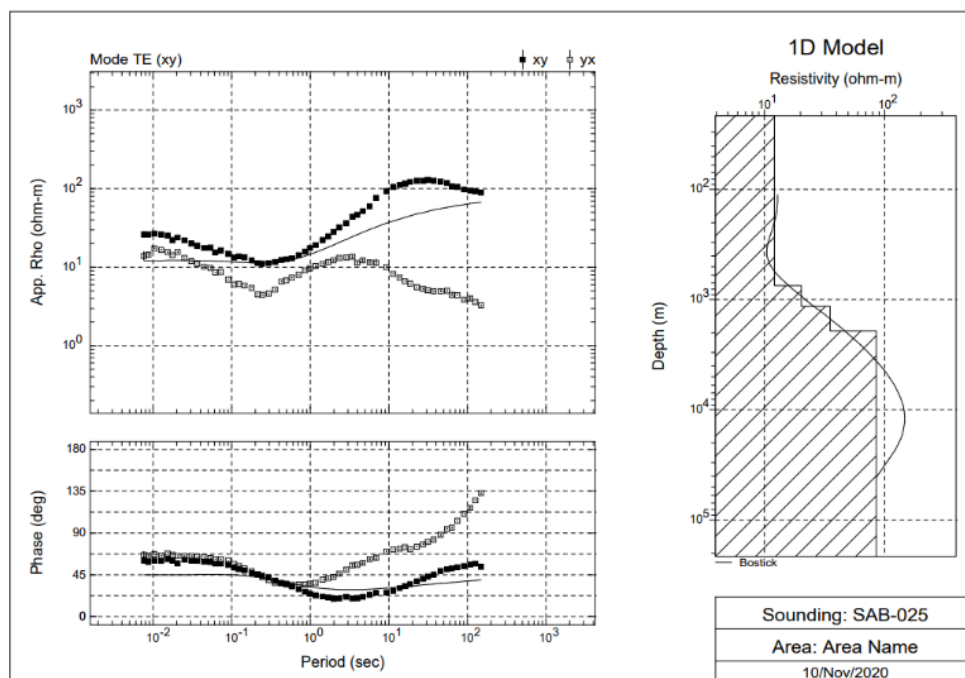
شکل ۸۴: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۴ آورده شده است.



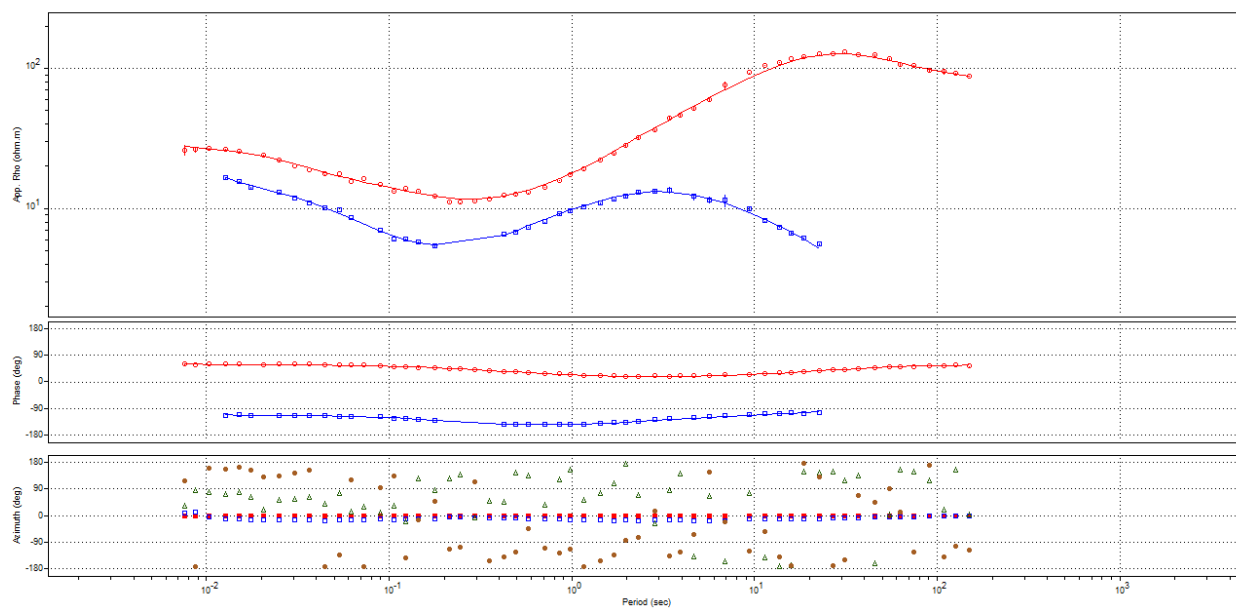
شکل ۸۵ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۴



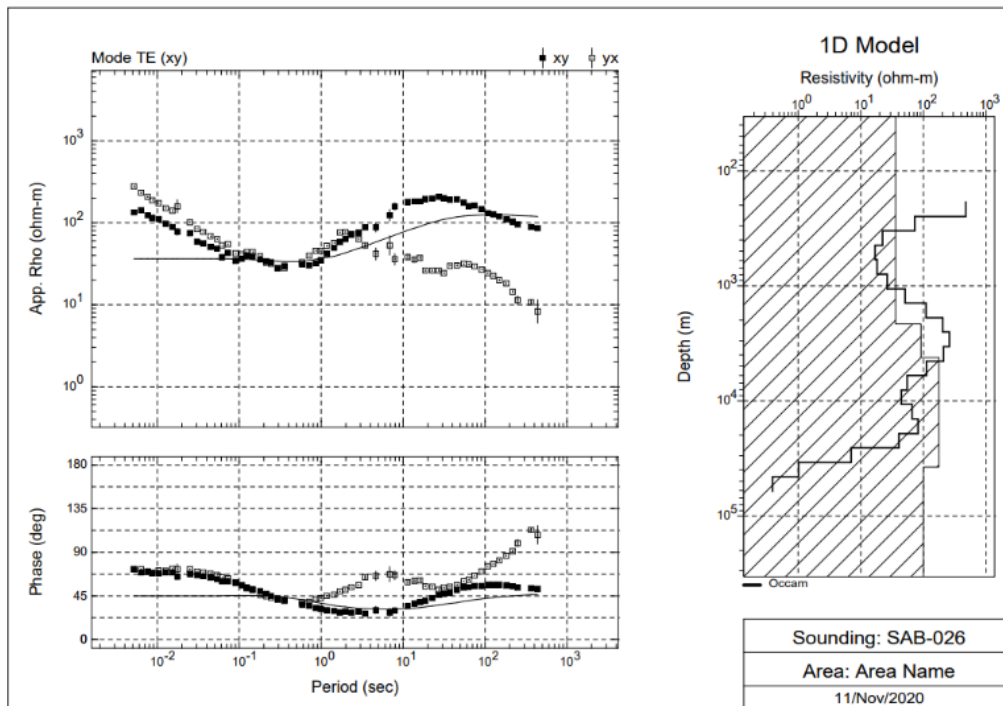
شکل ۸۶ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز) و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است.



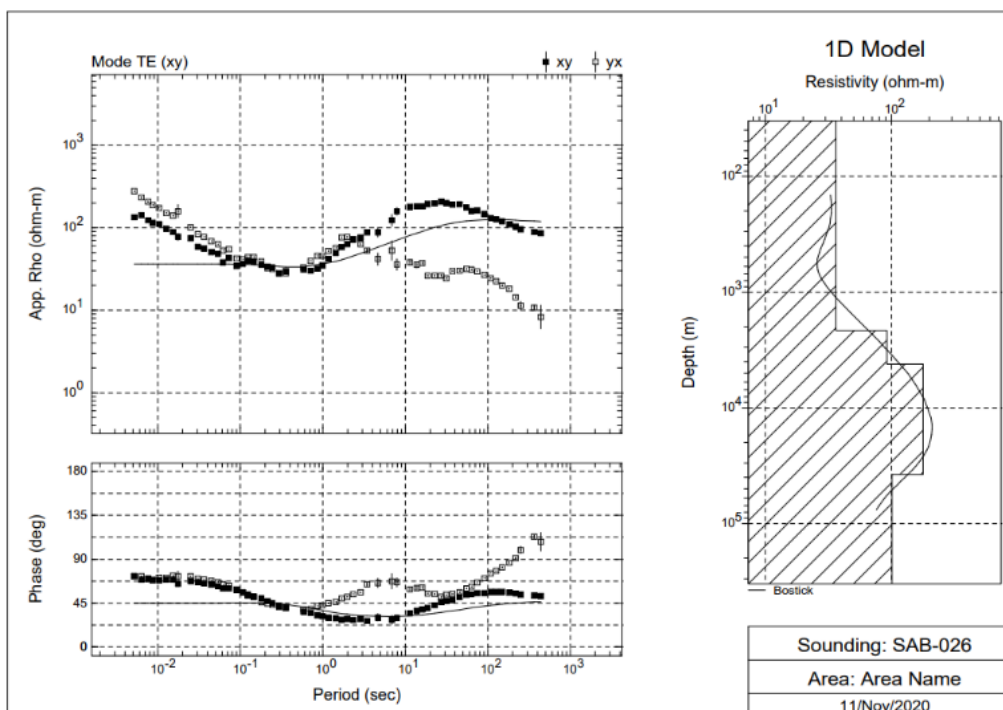
شکل ۸۷ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۵ آورده شده است.



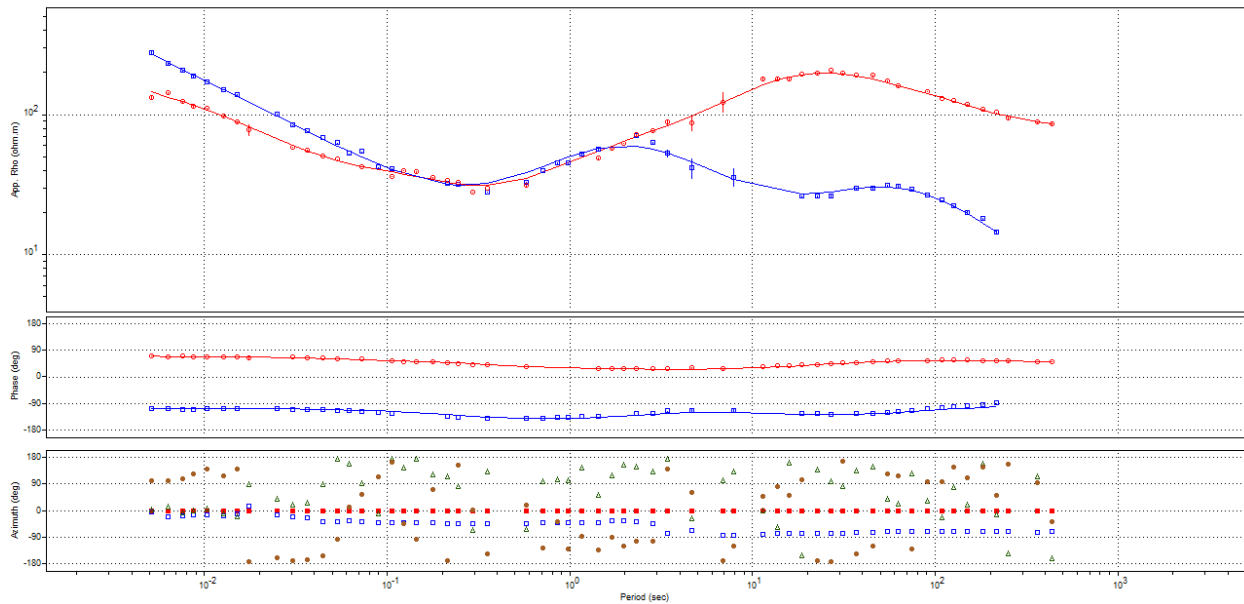
شکل ۸۸ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۵



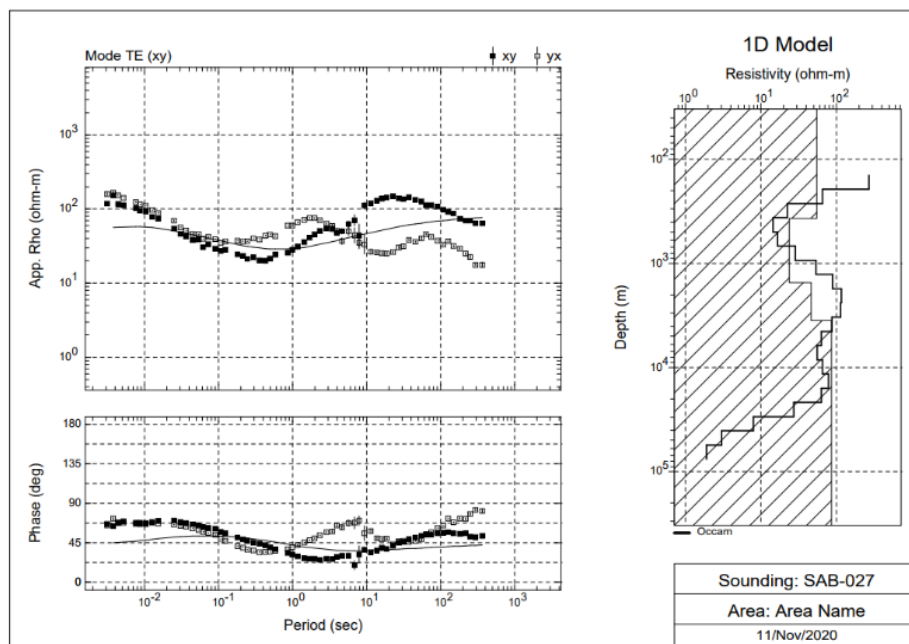
شکل ۸۹ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۶ آورده شده است.



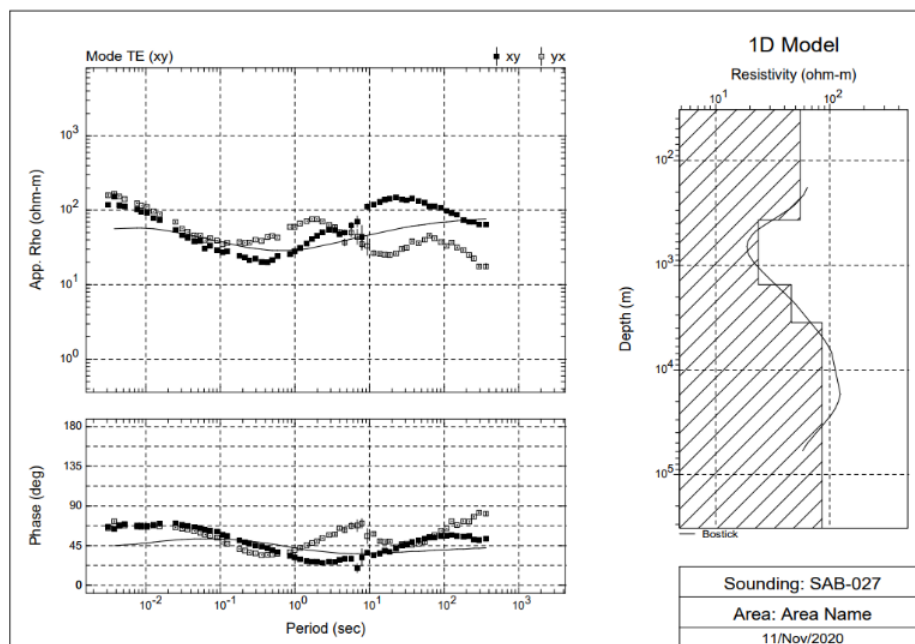
شکل ۹۰ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۶ آورده شده است.



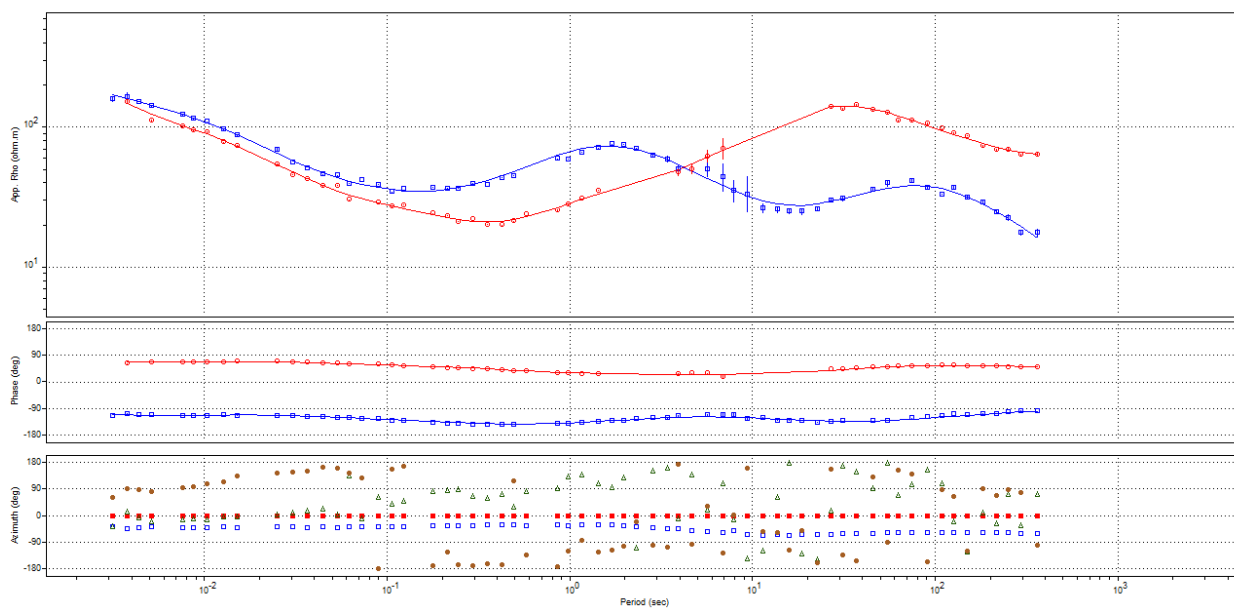
شکل ۹۱ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۶



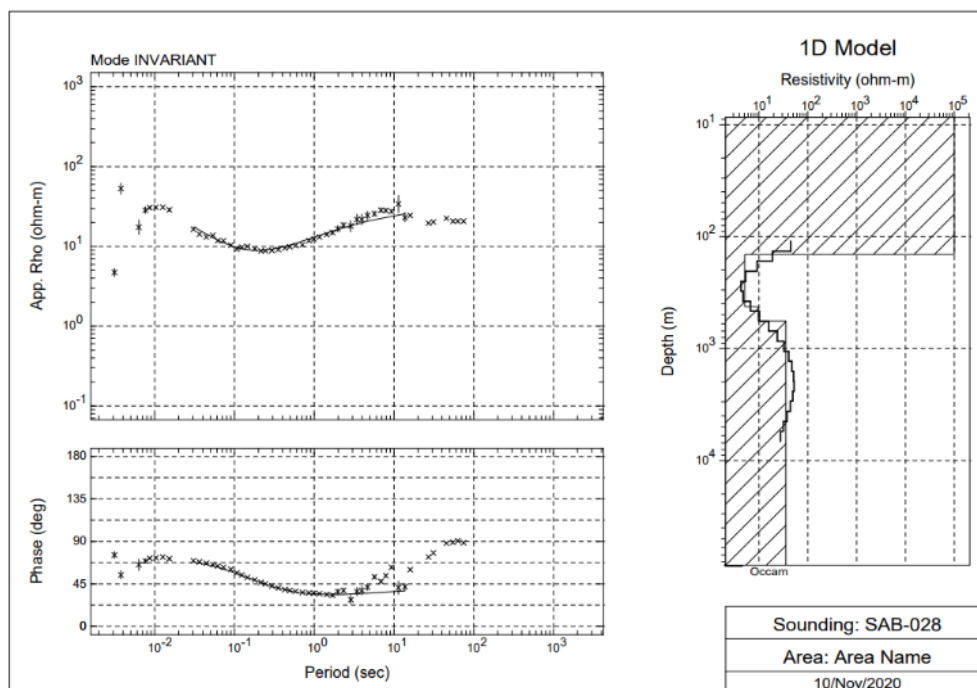
شکل ۹۲ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۷ آورده شده است.



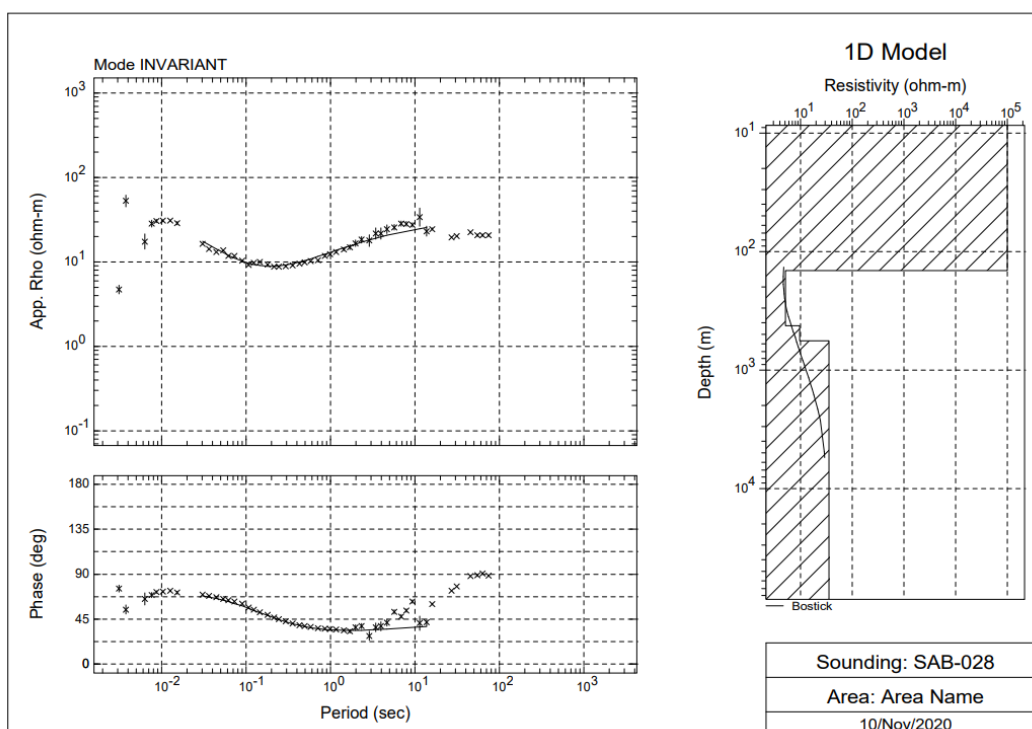
شکل ۹۳ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۷ آورده شده است.



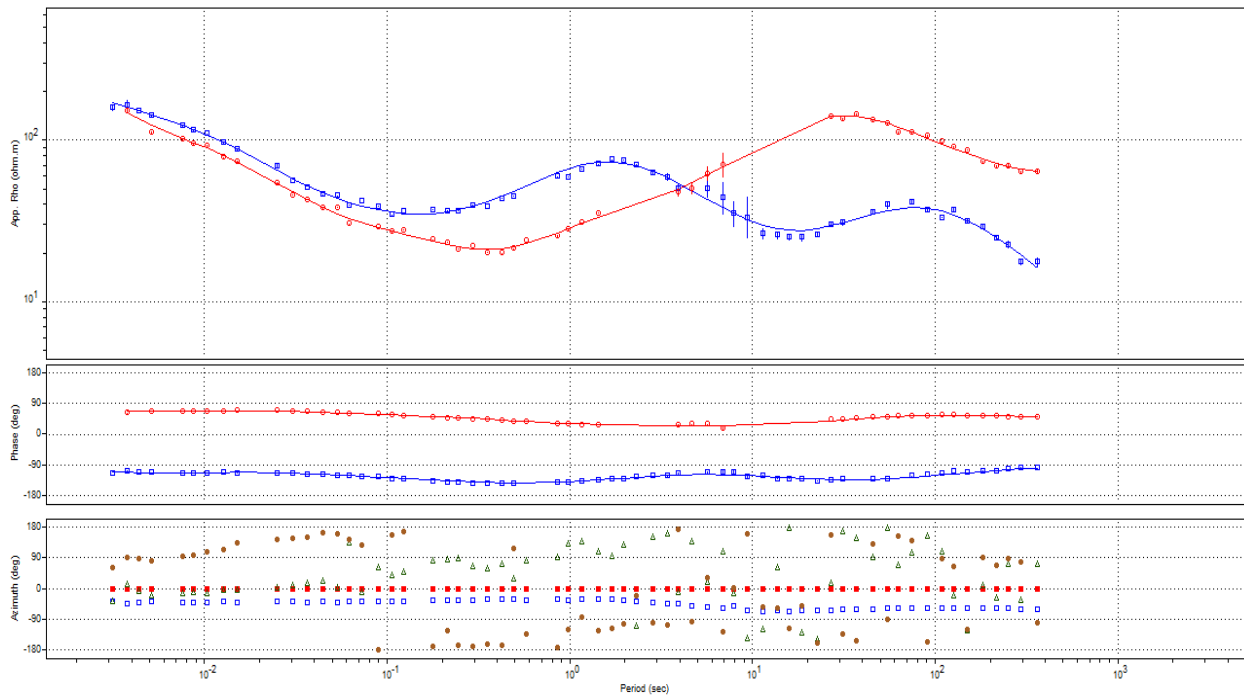
شکل ۹۴ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۷



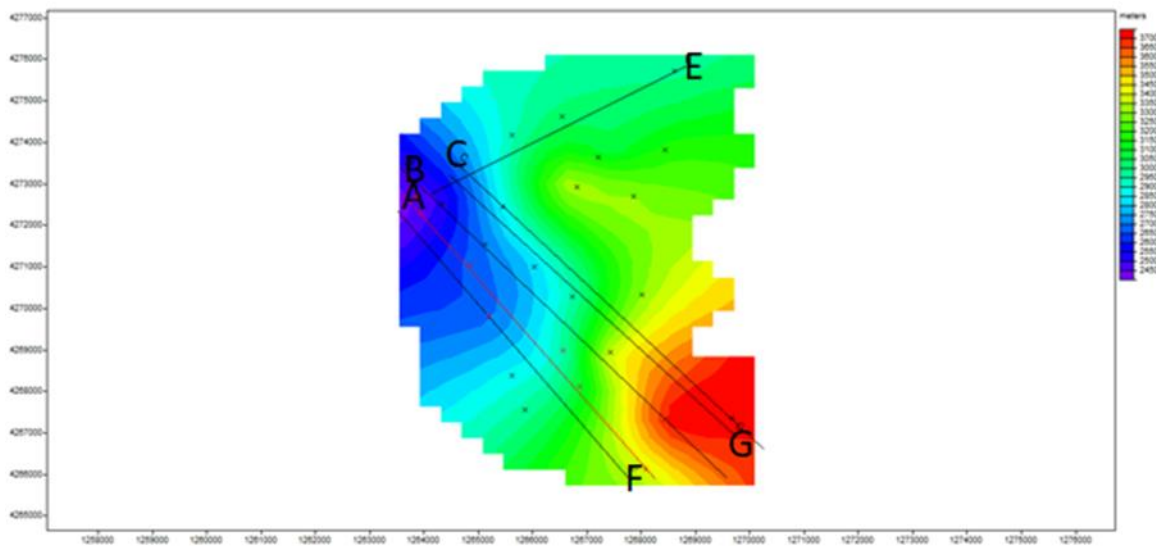
شکل ۹۵ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و هموار سازی اکام، در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است.



شکل ۹۶ پ: مدل سازی هموار سونداژ یک بعدی برای مدل سازی پارامتری و تبدیل عمق بوستیک در سمت چپ داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز و نتایج مدل سازی پارامتری برای سونداژ ۲۸ آورده شده است.



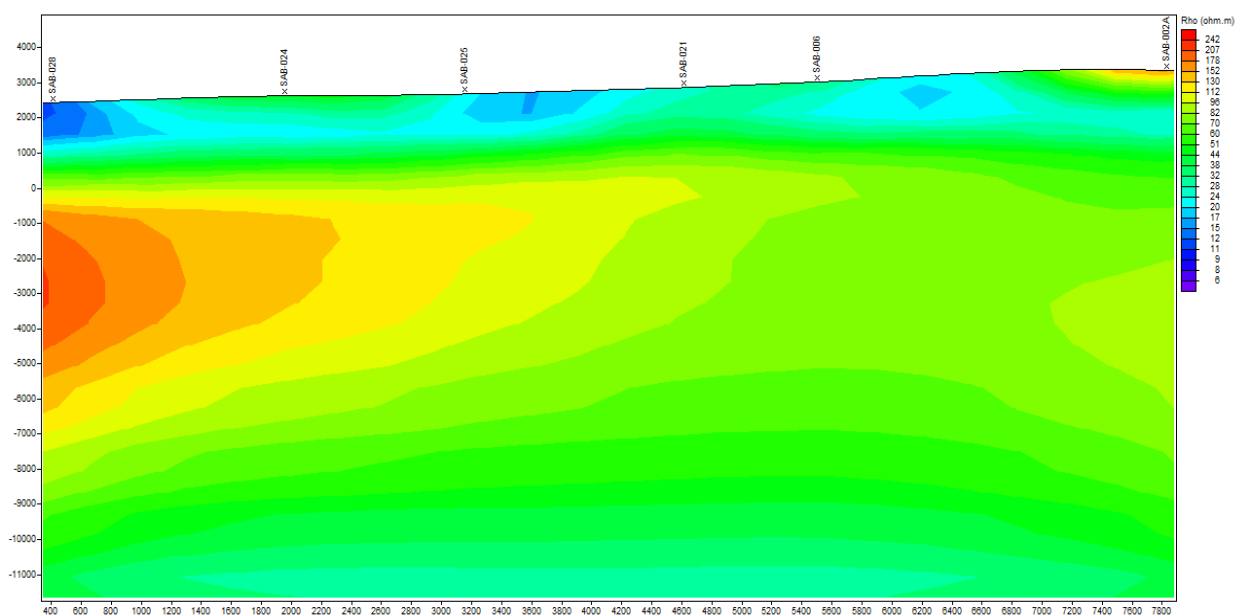
شکل ۹۷ پ: مقایسه ی مقاومت ویژه های ظاهری و فازهای امپدانی برای ایستگاه ۲۸



شکل ۹۸ پ: گرید به دست آمده با استفاده از نرم افزار وینگ لینک که محل سونداژها و پروفیل ها در آن مشخص شده اند.

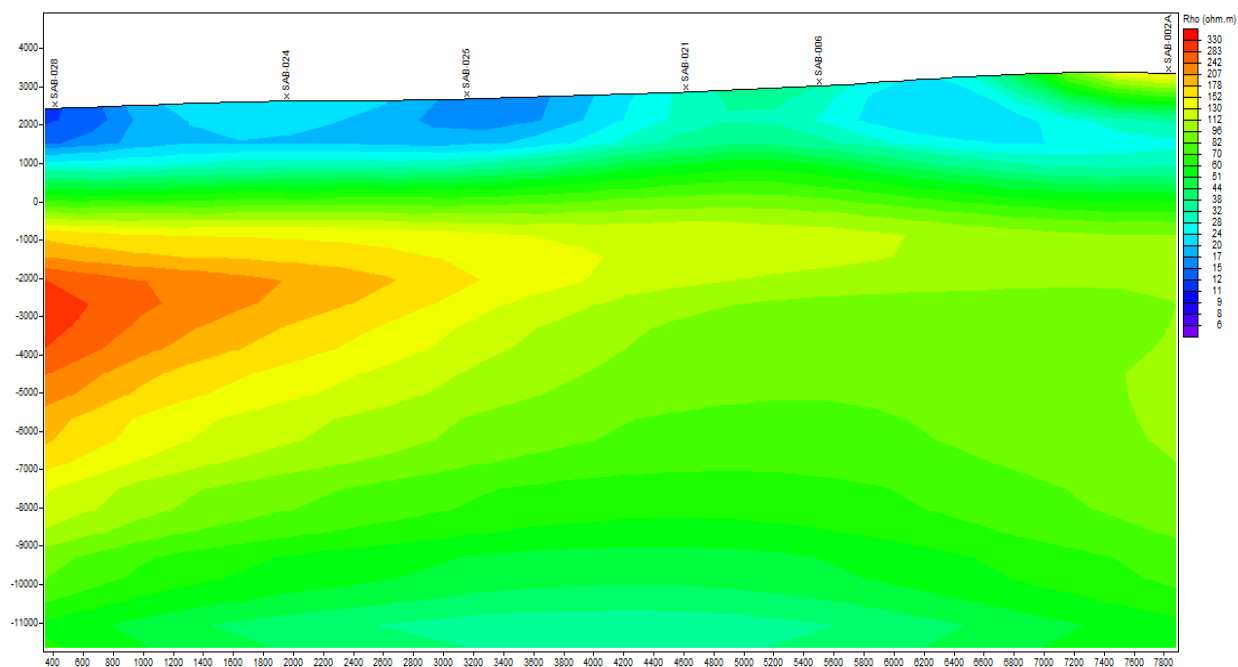
تمامی مدل‌سازی‌های وارون دو بعدی برای سه پروفیل A·B·C

در این مطالعه برای مدل‌سازی وارون دوبعدی از روش گرادیان مزدوج غیرخطی استفاده شده است. در این الگوریتم تلاش بر حداقل کردن تابع هدف است که در واقع مجموع خطاهای نرمال شده داده‌ها و همواری مدل می‌باشد.



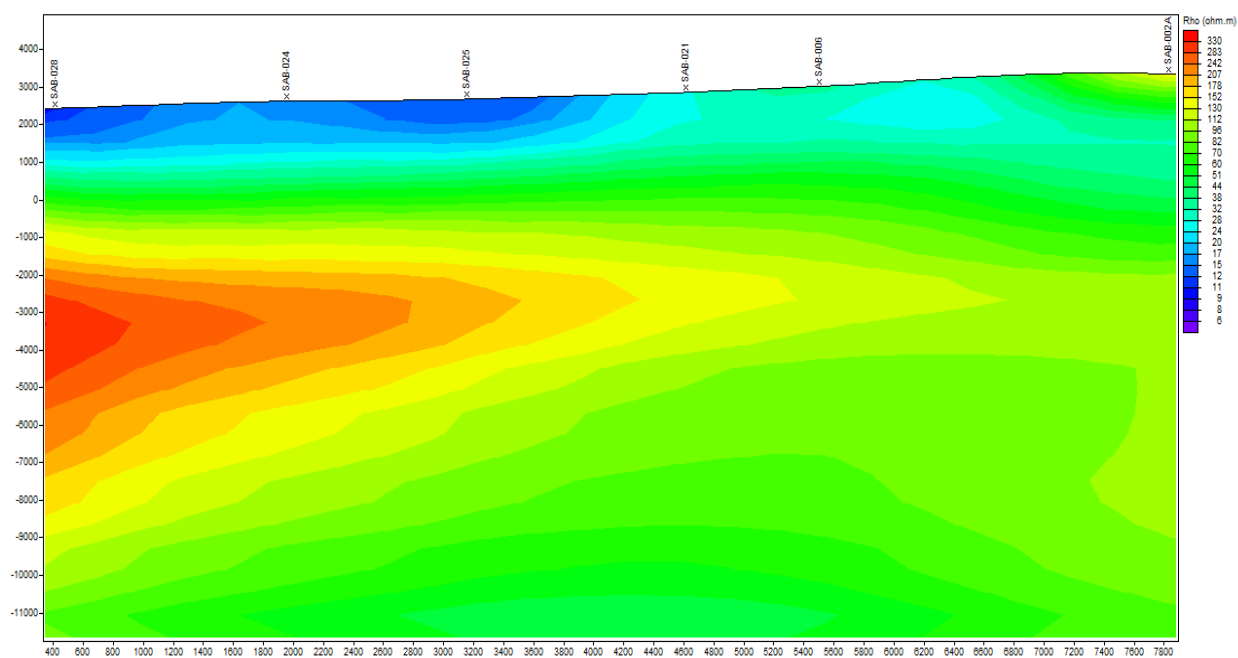
پارامتر هموارسازی = ۳ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰ ، آر ام اس = ۳/۶۹۴

شکل ۹۹ پ: وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



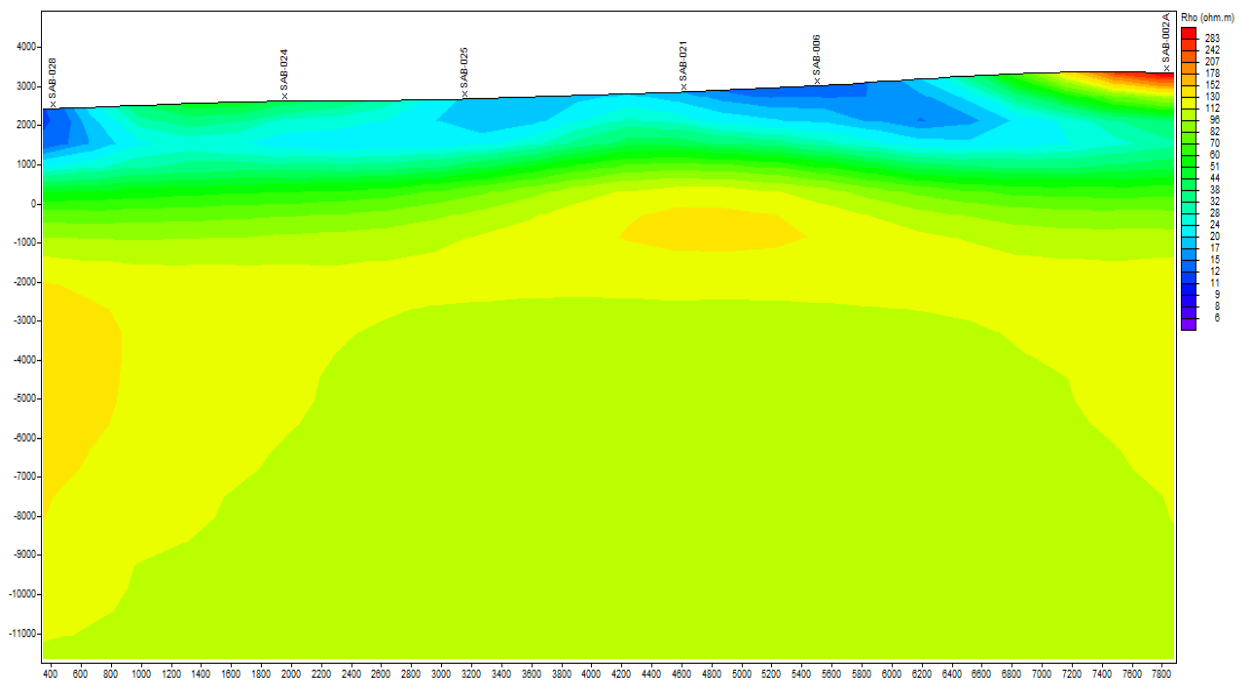
پارامتر هموارسازی=۱۰ ، مقاومت ویژه مش=۱۰ ، آرام اس=۳/۹۱۲

شکل ۱۰۰ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



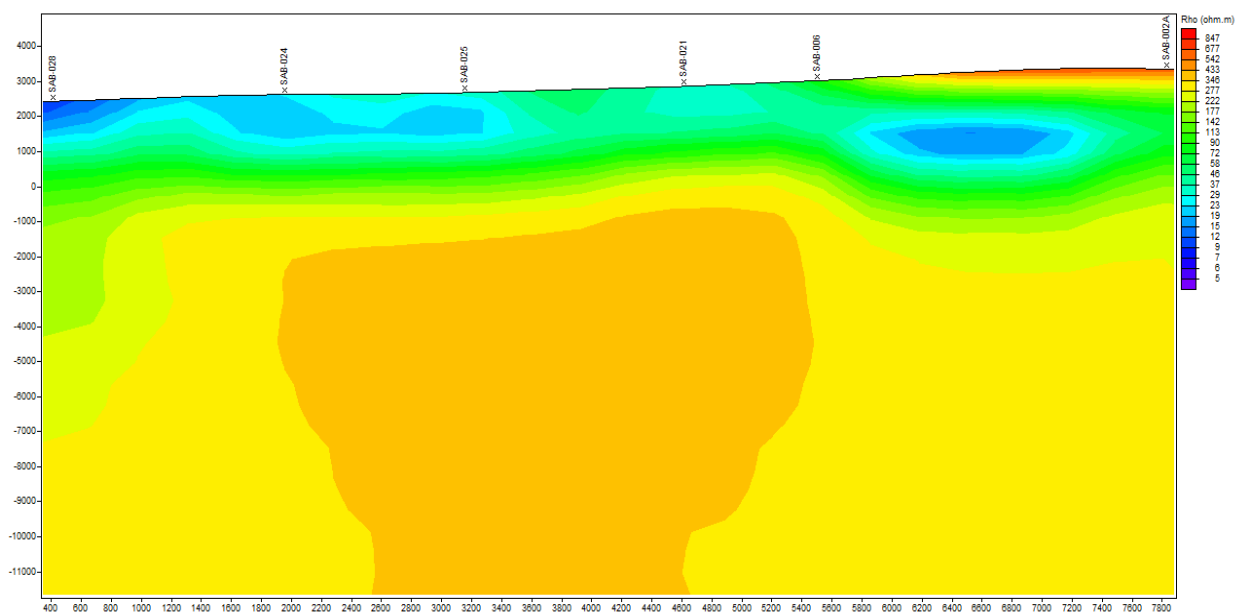
پارامتر هموارسازی=۲۰ ، مقاومت ویژه مش=۱۰ ، آرام اس=۳/۹۸۴

شکل ۱۰۱ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



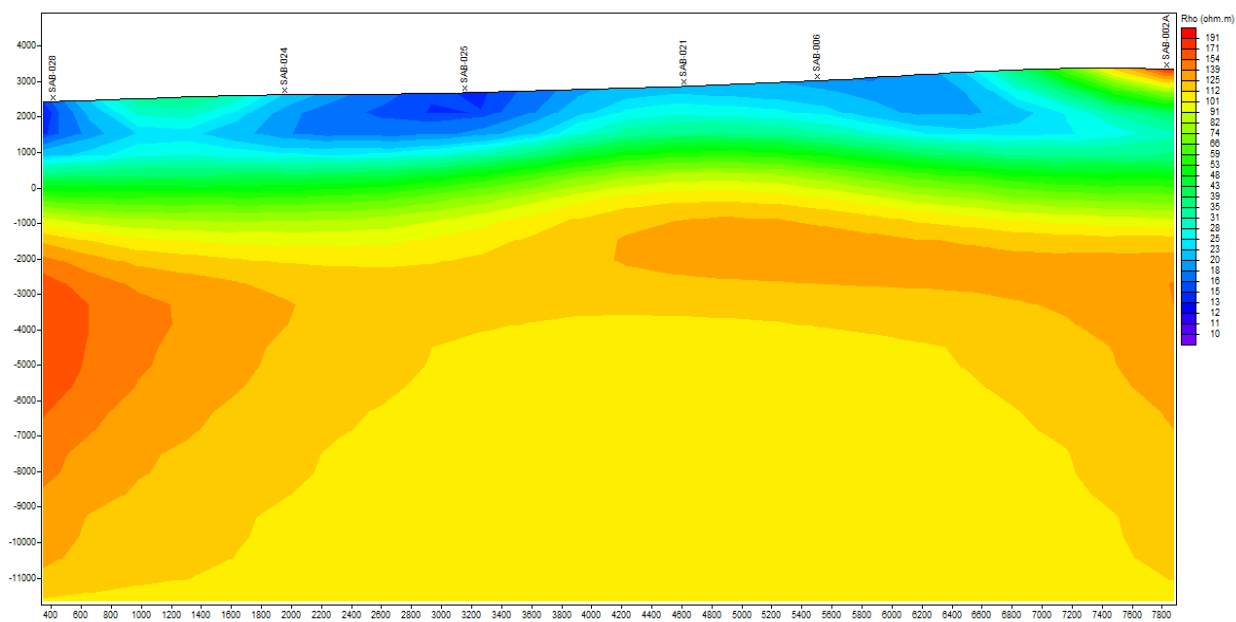
پارامتر هموارسازی=۳ ، مقاومت ویژه مش=۱۰۰ ، ارام اس=۲/۵۷۵

شکل ۱۰۲ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



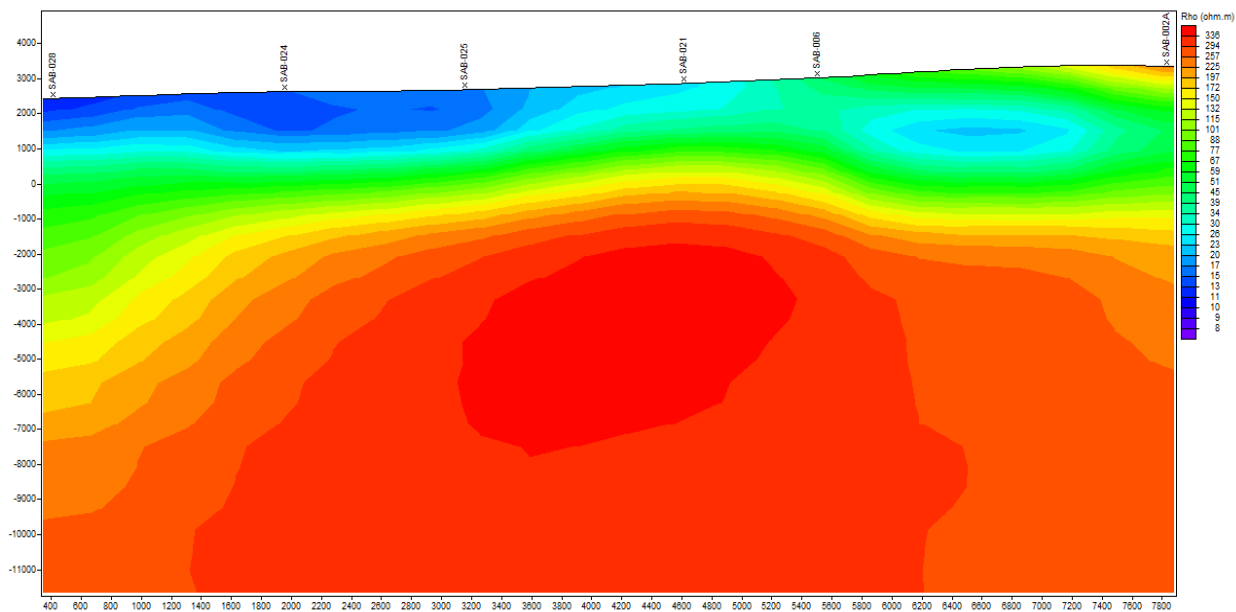
پارامتر هموارسازی=۳ ، مقاومت ویژه مش=۱۰۰۰ ، ارام اس=۳/۳۶۶

شکل ۱۰۳ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



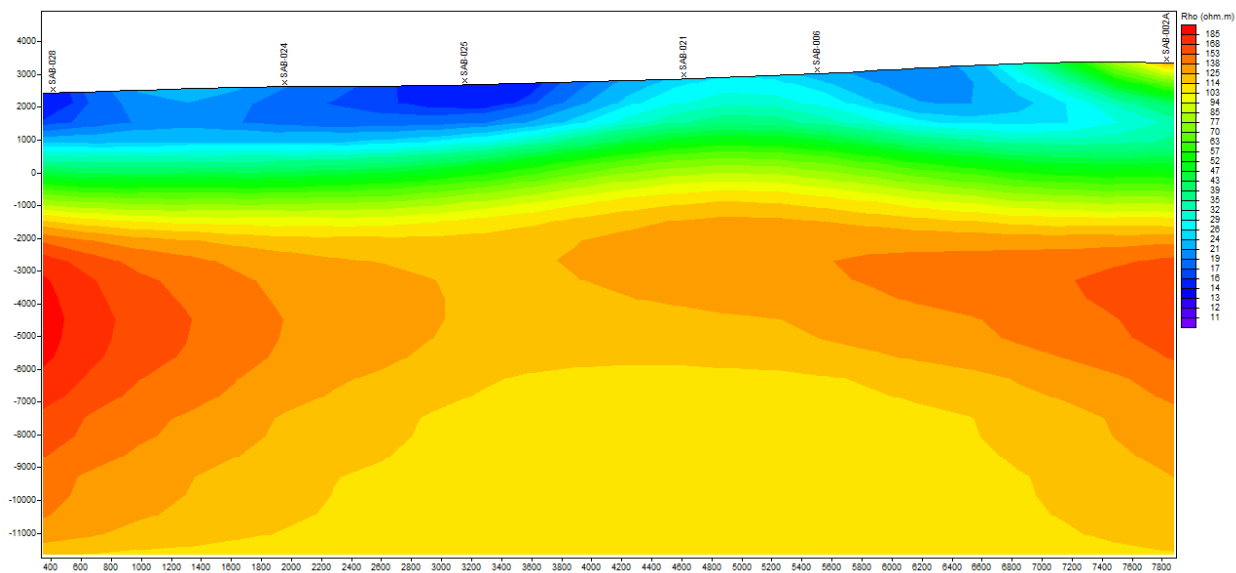
پارامتر هموارسازی= ۱۰ ، مقاومت ویژه مش= ۱۰۰ ، ارام اس= ۳/۰۷۷

شکل ۱۰۴ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



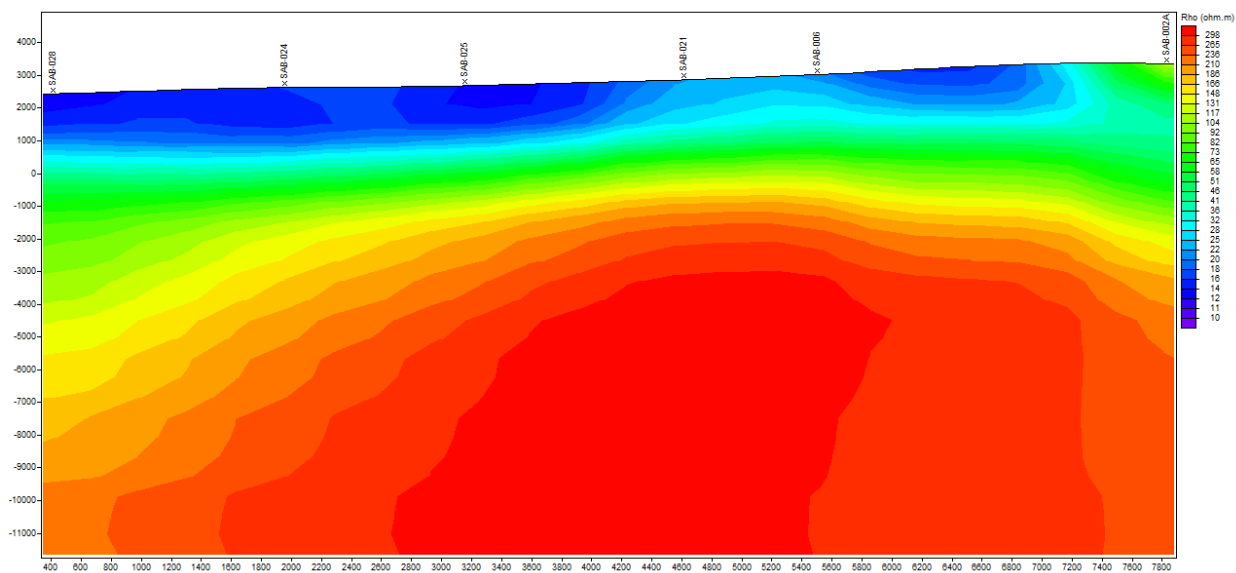
پارامتر هموارسازی= ۱۰ ، مقاومت ویژه مش= ۱۰۰۰ ، ارام اس= ۳/۶۴۶

شکل ۱۰۵ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



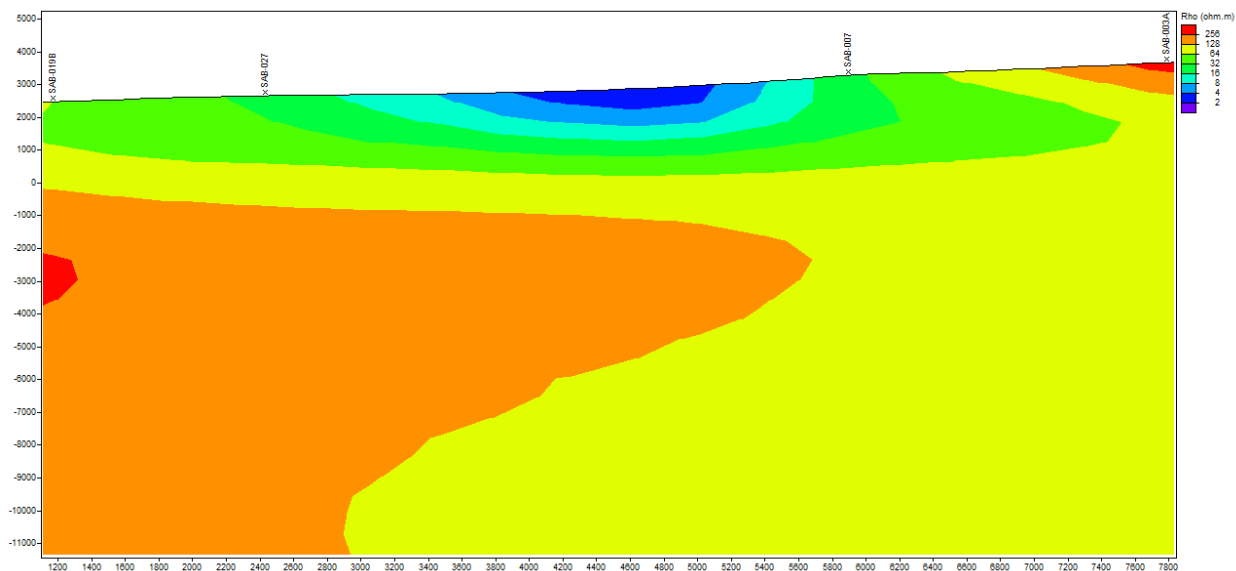
پارامتر هموارسازی=۲۰ ، مقاومت ویژه مش-۱۰۰ ، ارام اس=۳/۳۴۳

شکل ۱۰۶ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



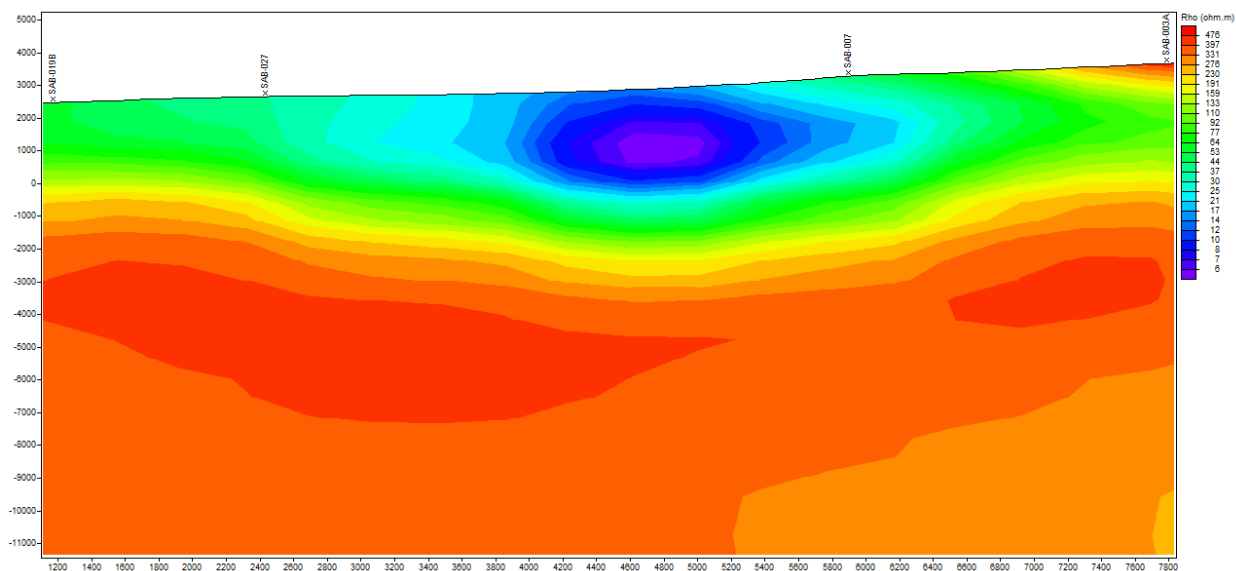
پارامتر هموارسازی=۲۰ ، مقاومت ویژه مش-۱۰۰۰ ، ارام اس=۳/۴۸۳

شکل ۱۰۷ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل A



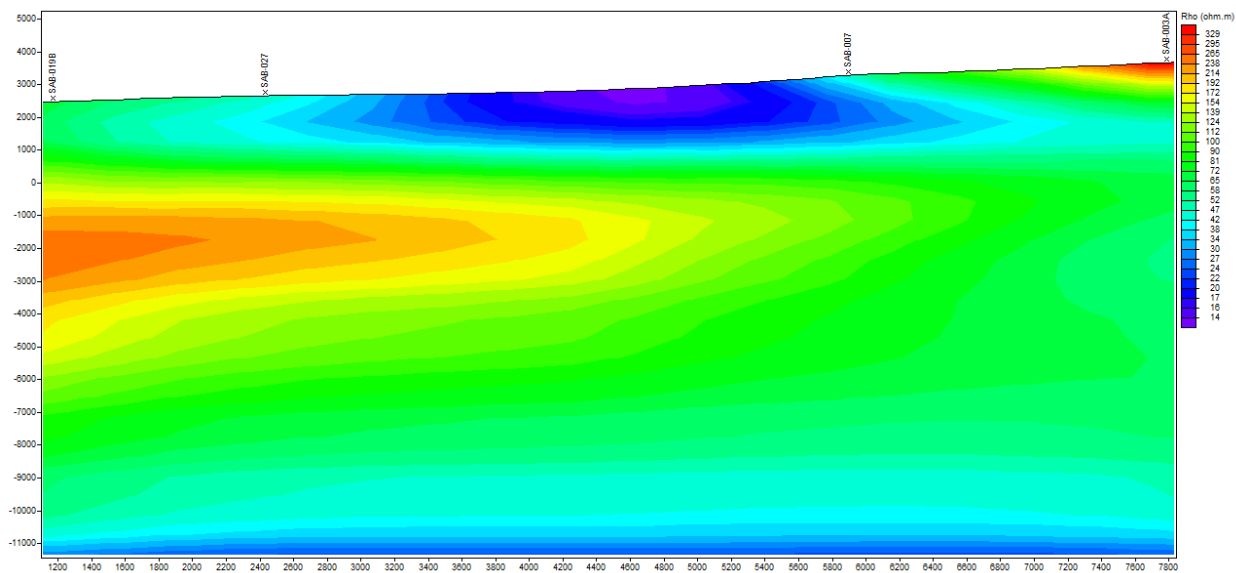
پارامتر هموارسازی=۱۰، مقاومت ویژه مش=۱۰۰، ارام اس=۴/۵۸۴

شکل ۱۰۸ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



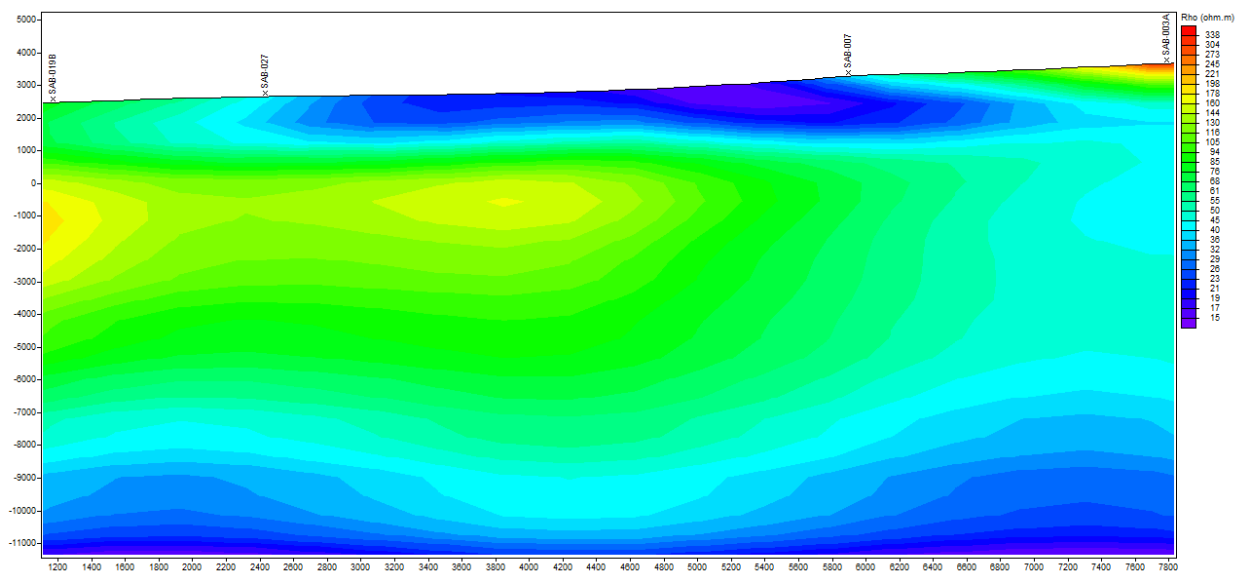
پارامتر هموارسازی=۱۰، مقاومت ویژه مش=۱۰۰۰، ارام اس=۴/۷۶۱

شکل ۱۰۹ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



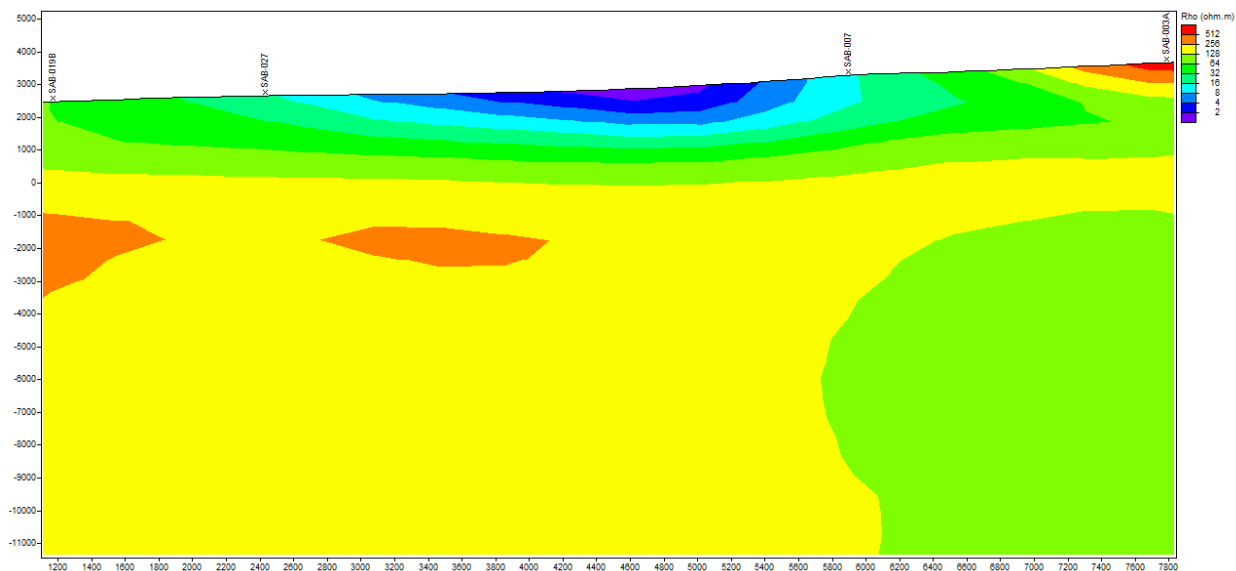
پارامتر هموارسازی = ۱۰، مقاومت ویژه مش = ۱۰، آرام اس = ۵/۹۶

شکل ۱۱۰ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



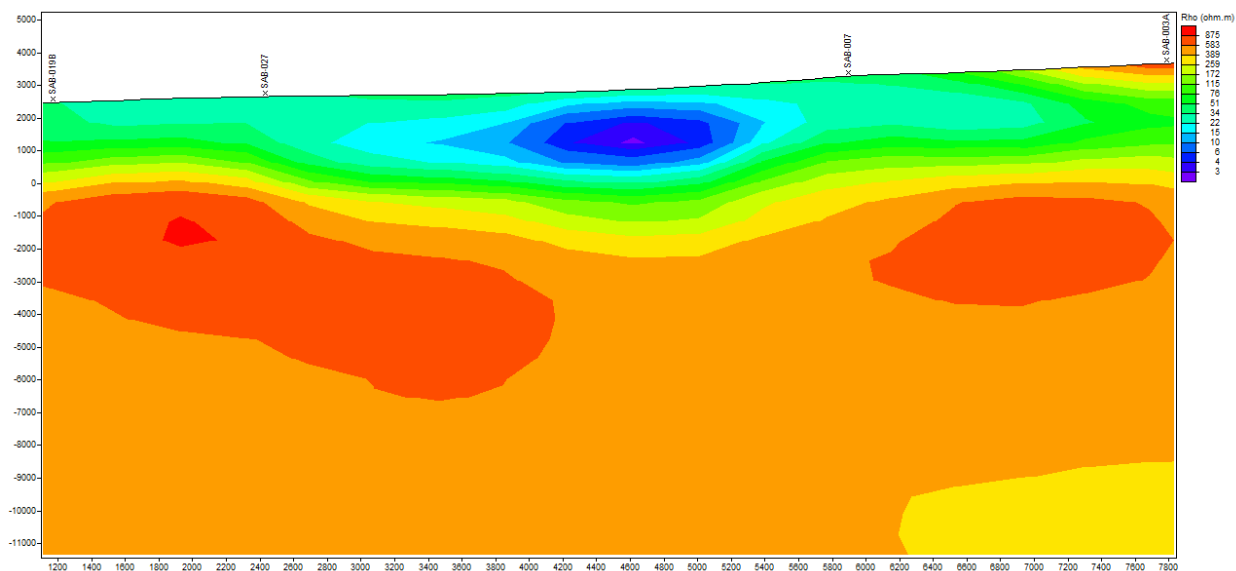
: پارامتر هموارسازی = ۳، مقاومت ویژه مش = ۱۰، آرام اس = ۶/۰۵۴

شکل ۱۱۱ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



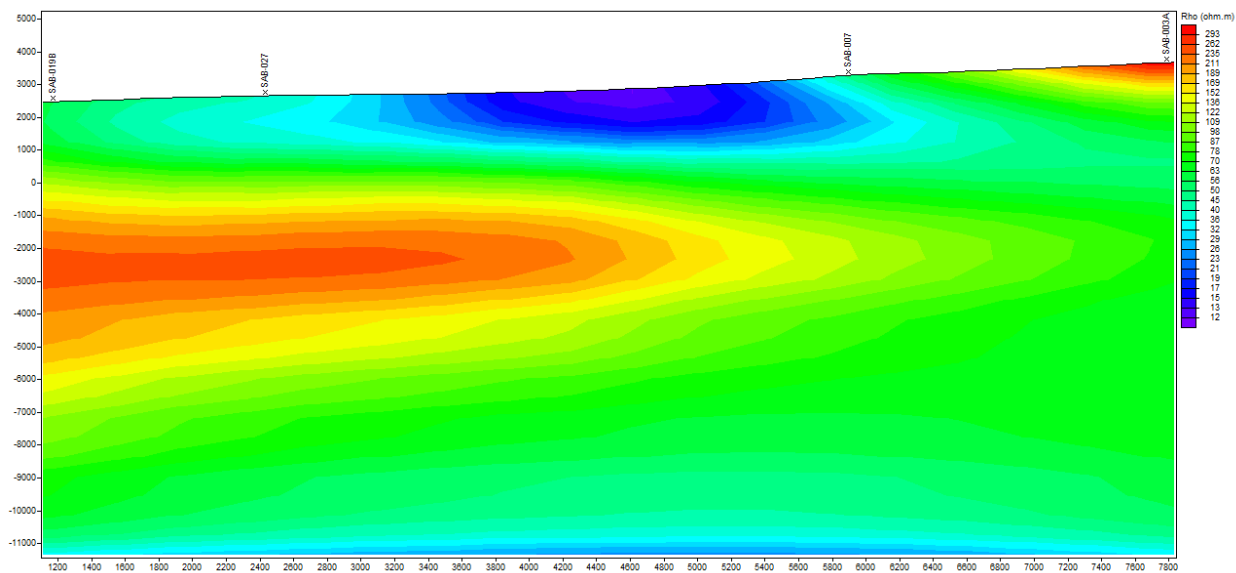
پارامتر هموارسازی = ۳ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰ ، آرام اس = ۴/۲۷۷

شکل ۱۱۲ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



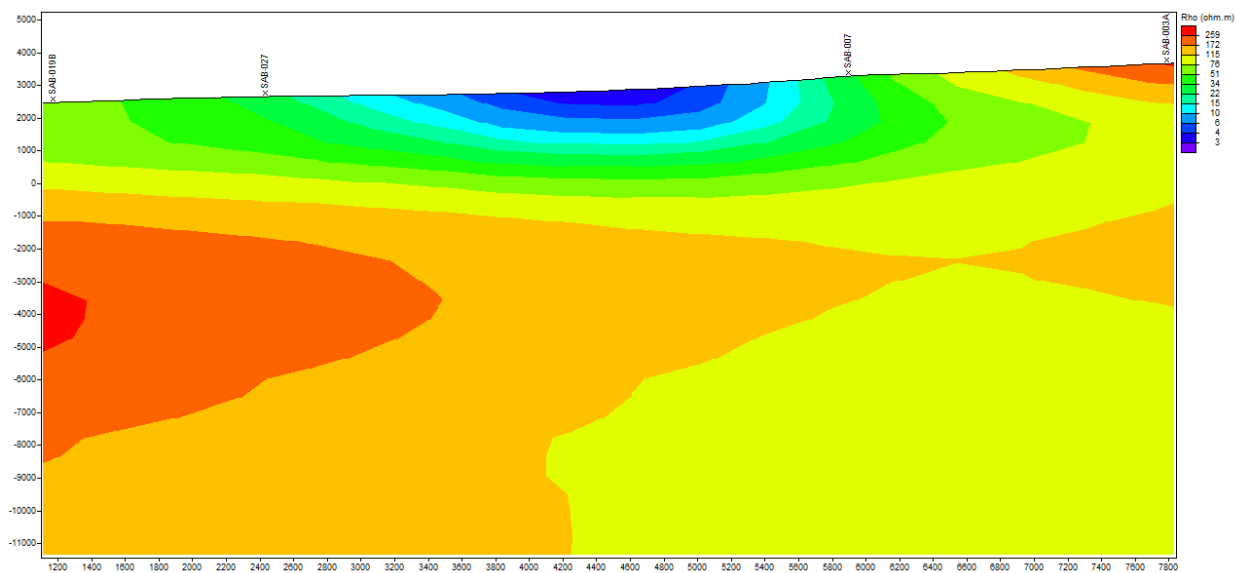
پارامتر هموارسازی = ۳ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰۰ ، آرام اس = ۴/۳۹۷

شکل ۱۱۳ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



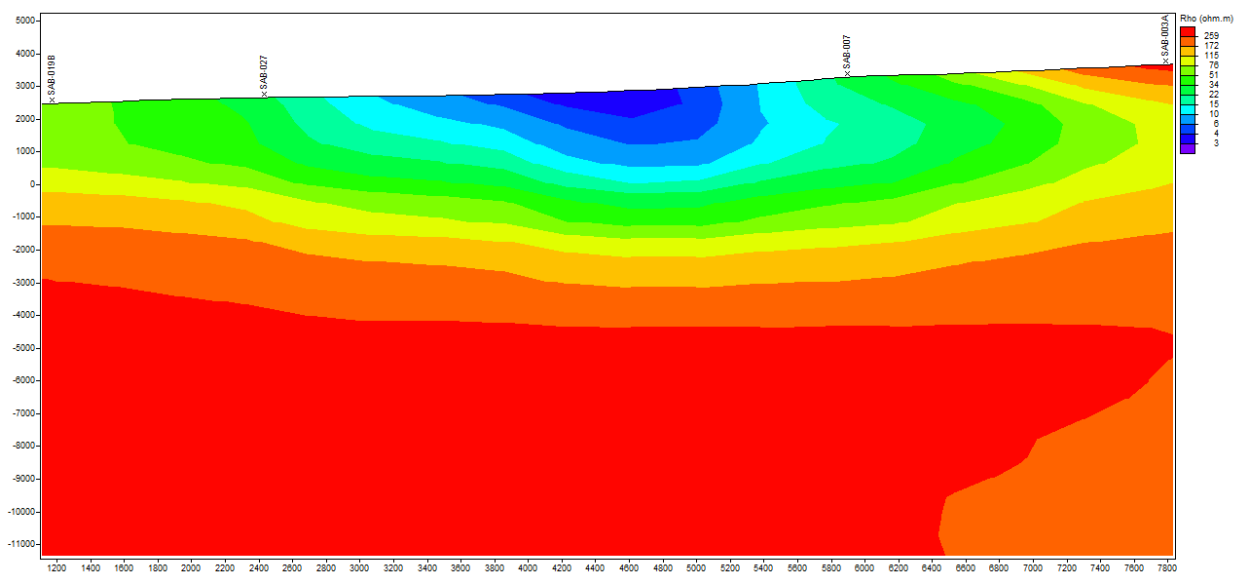
پارامتر هموارسازی = ۲۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰ ، آرام اس = ۵/۹۰۹

شکل ۱۱۴ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



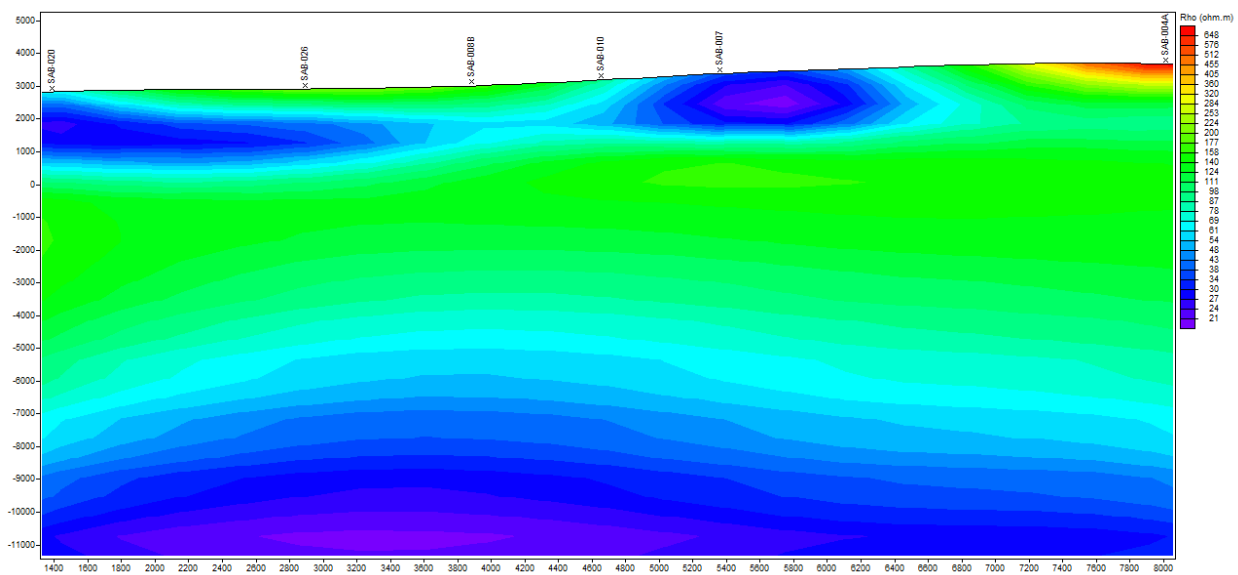
پارامتر هموارسازی = ۲۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰ ، آرام اس = ۴/۶۸۲

شکل ۱۱۵ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



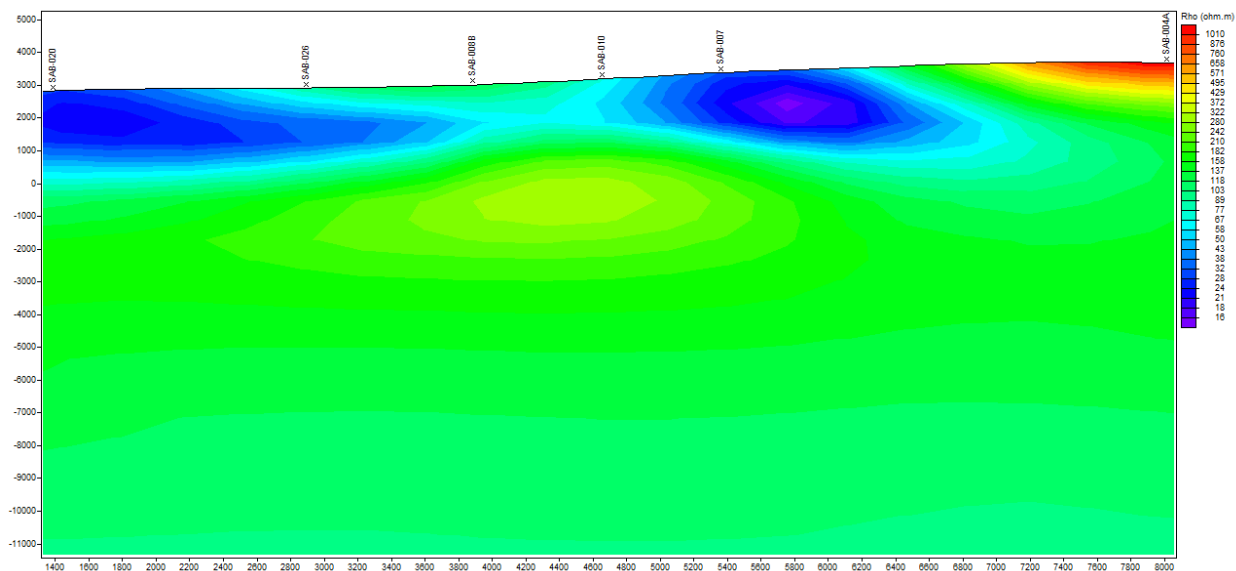
پارامتر هموارسازی = ۲۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰۰ ، ارام اس = ۴/۷۶۲

شکل ۱۱۶ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



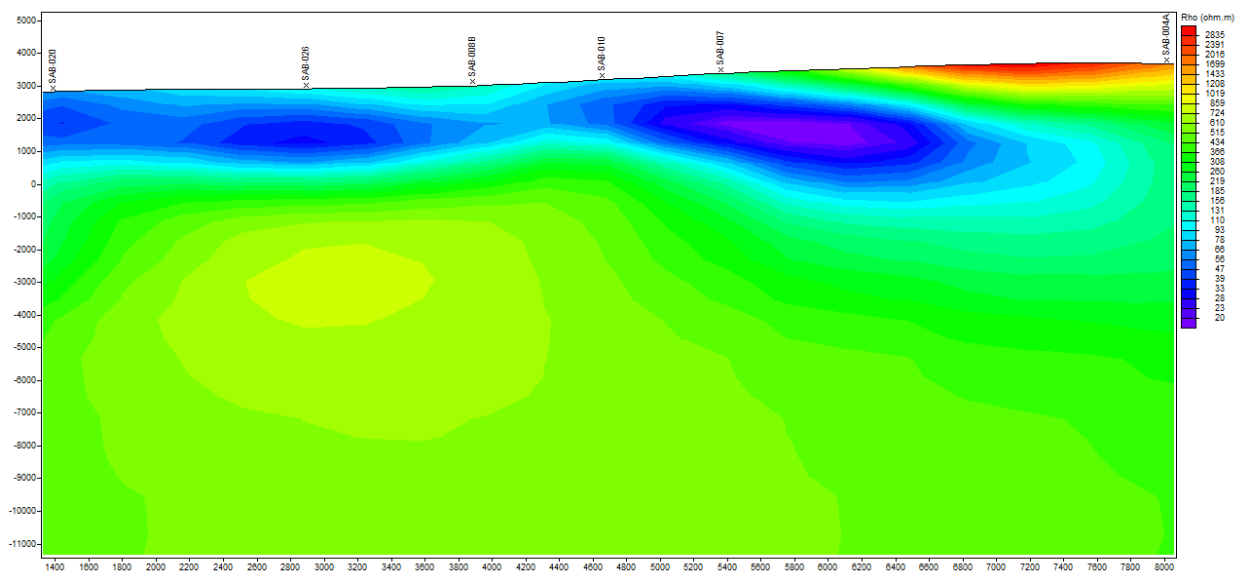
پارامتر هموارسازی = ۳ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰ ، ارام اس = ۵/۷۲۸

شکل ۱۱۷ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل B



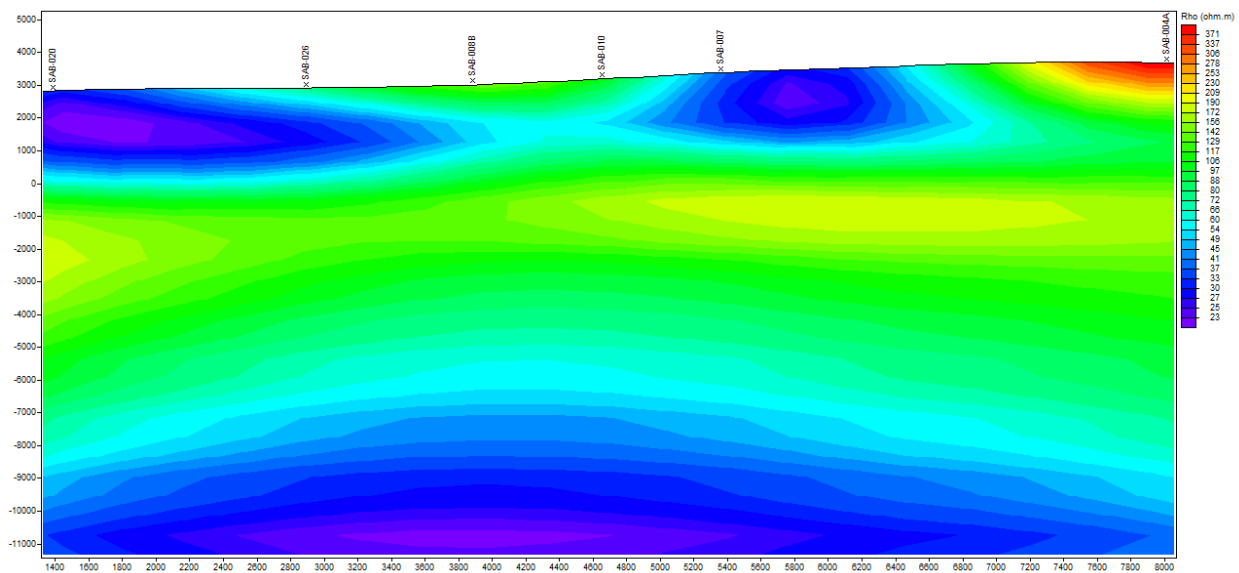
پارامتر هموارسازی= ۳ ، مقاومت ویژه مش= ۱۰۰ ، آرام اس= ۴/۶۶۱

شکل ۱۱۸ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



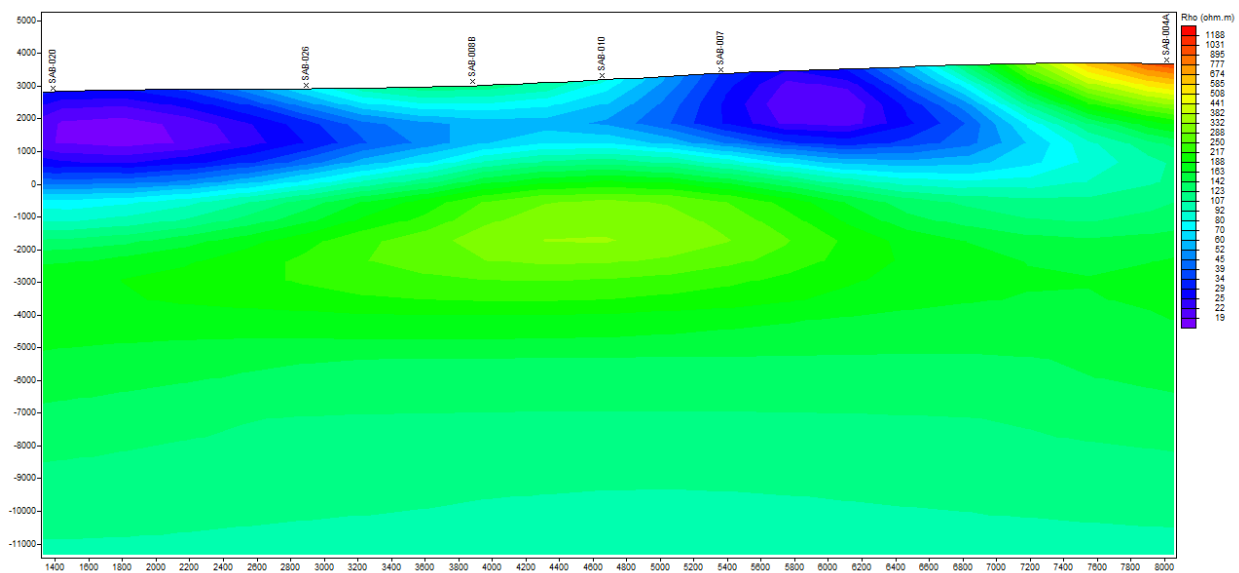
پارامتر هموارسازی= ۳ ، مقاومت ویژه مش= ۱۰۰۰ ، آرام اس= ۴/۷۴۹

شکل ۱۱۹ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



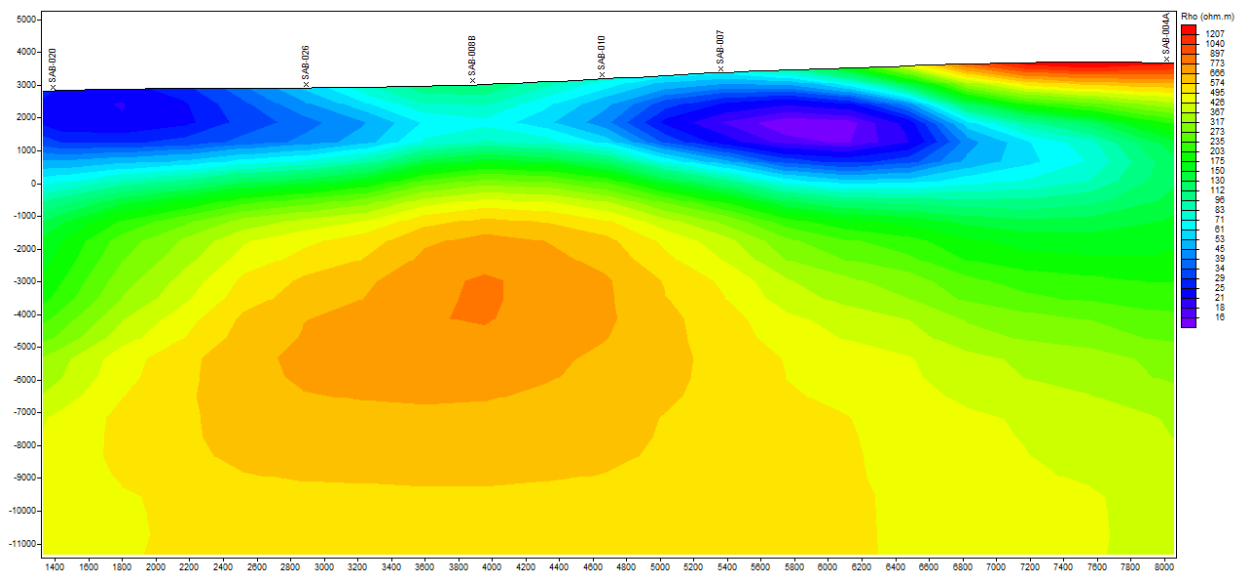
پارامتر هموارسازی=۱۰ ، مقاومت ویژه مش=۱۰ ، ار ام اس = $5/83$

شکل ۱۲۰ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



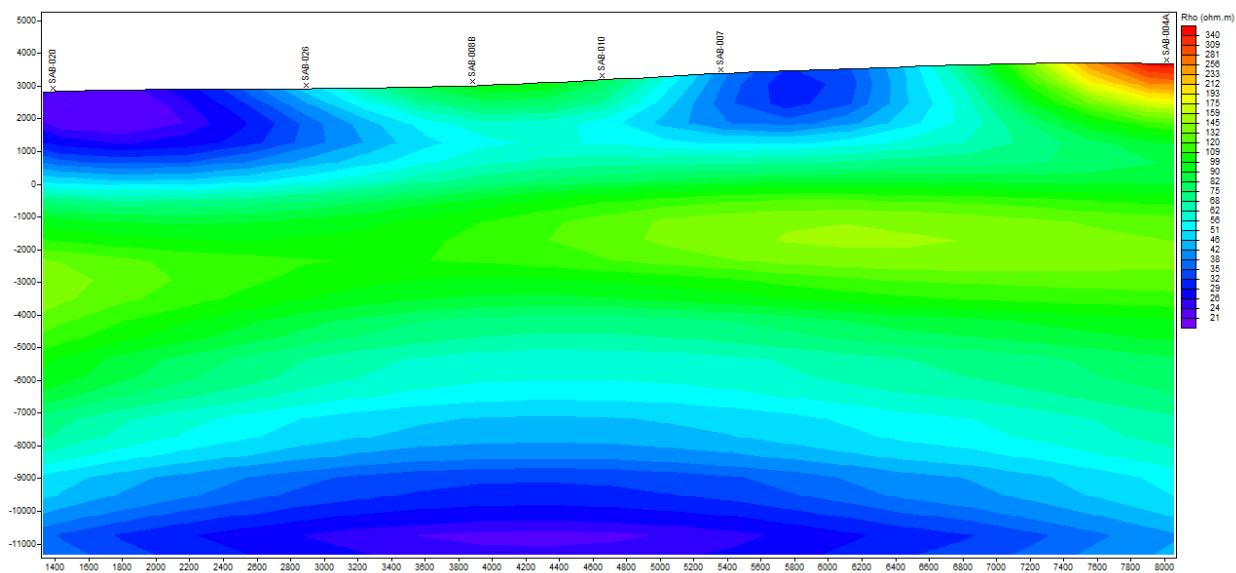
پارامتر هموارسازی=۱۰ ، مقاومت ویژه مش=۱۰۰ ، ار ام اس = $4/938$

شکل ۱۲۱ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



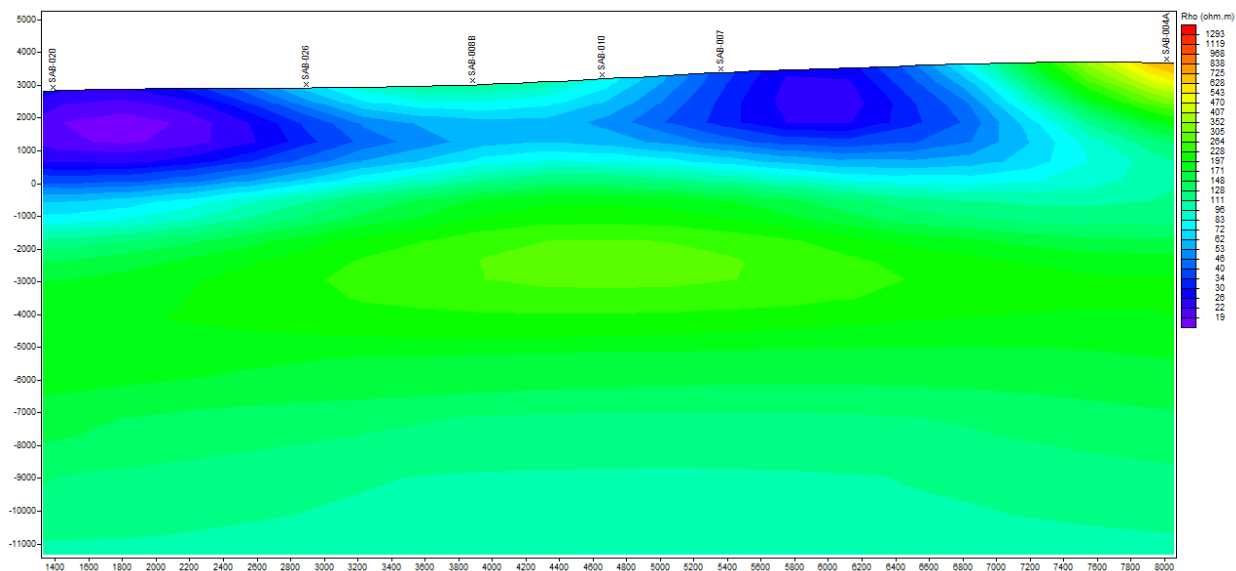
پارامتر هموارسازی = ۱۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰۰ ، آر ام اس = ۴/۹۱۸

شکل ۱۲۲ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



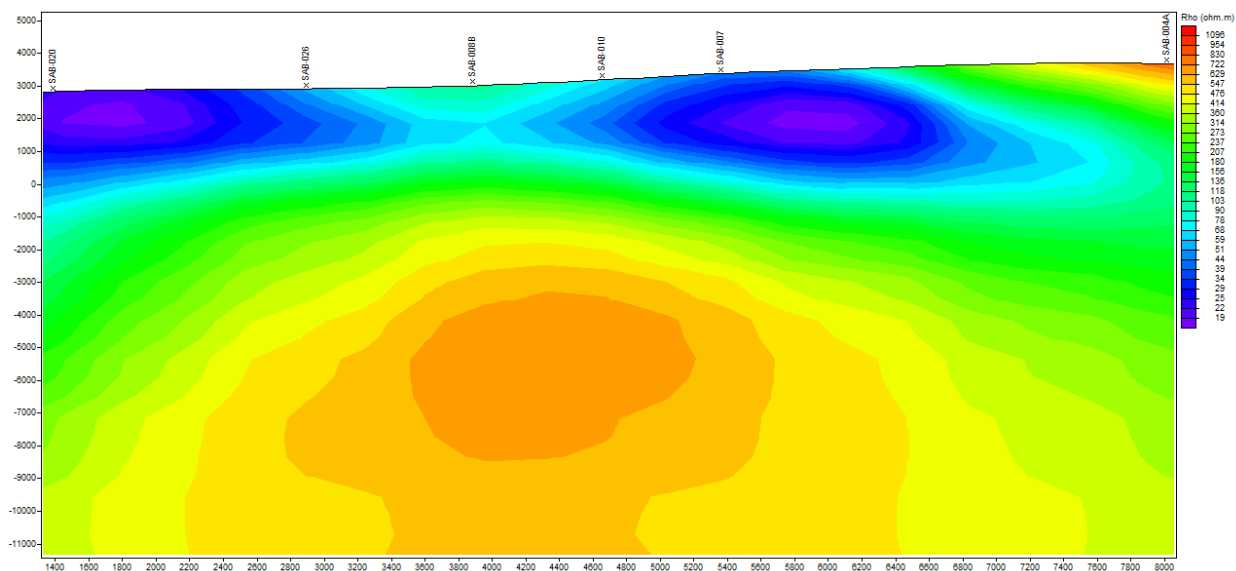
پارامتر هموارسازی = ۲۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰ ، آر ام اس = ۶/۰۳۱

شکل ۱۲۳ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



پارامتر هموارسازی = ۲۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰ ، ار ام اس = ۵/۱۵۷

شکل ۱۲۴ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C



پارامتر هموارسازی = ۲۰ ، مقاومت ویژه مش = ۱۰۰۰ ، ار ام اس = ۵/۰۶۵

شکل ۱۲۵ پ: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک در امتداد پروفیل C

Abstract

Magneto telluric method is one of the electromagnetic methods in frequency domain . it uses natural electromagnetic fields to study the structure of subsurface resistivity structures . due to the fact that geothermal resources produce large changes in the subsurface resistivity , the objectives of organic ideas are for the non - surface resistivity method . due to numerous hot water sources , the sabalan area has been extensively studied by various physical geo - sources for the discovery and modeling of geothermal resources . hydrostatic alteration leads to changes in the physical properties (electrical resistivity . gravity, wave velocity of the medium can be observed that these abnormal or non - normative changes can be detected by different geophysical methods including both magnetic and electromagnetic methods such as magnetic and electromagnetic methods , gravity , magnetic and tomography methods . in particular , Magneto telluric (MT) methods play an important role in the imaging of geo - thermal resources . in this study, the response of the 24 magneto telluric station process was carried out by Philippines company experts Energy Development Corporation in 2007 using the Phoenix MTU-5 A device of 0.0005 to 380 A from the Moeil valley located in the west and southwest of the removal mountain range. also in this study, how to change the special resistivity of the different layers of the earth under ground surface to the depth of a few kilometers and the arrival of geothermal sources and the state of the geology of these areas. one dimensional modeling using Occam and Bostick method and 2 D modeling has been done using the non - linear gradient method. inverse 3D modeling is done using modeling WSINV3DMT algorithm. the results obtained from 3D inversion indicate that the conductor continue to be from a depth of 800-1200 m to 2500 meters, which is actually the thermal storage reservoir. the region has fractures and faults in accordance with the geological map that the fluid has continued on the fracture boundary.

Key words: Magnetotelluric, 3D inversion modelling, WSINV3DMT, Occam method, nonlinear conjugate gradient method.



Shahrood University of Technology

MSt thesis in Geophysics

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics

Subject

**Using Occam method for 3D inversion of Magnetotelluric data in order to
explore geothermal structure location of Northwest of Iran**

Prepared By

Fatemeh Firoozi

Supervisors

Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani

Advisor

Mohammad Filbandi Kashkouli

October 2020