

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان: وارون سازی داده های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای
هیدروکربوری کپه داغ غربی

دانشجو: نازیلا هاشمی

اساتید راهنما:

پروفسور علی مراد زاده

دکتر علی نجاتی کلاته

اساتید مشاور:

مهندس رضا قائد رحمتی

مهندس مهرداد ایوبی

بهمن ۱۳۹۱

این پایان نامه تحت حمایت مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران تهیه

شده است.

پروردگار:

نه می توانم مویشانش را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم

و نه برای دست های پینه بسته شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم.

پس توفیقم ده که هر لحظه پاسکزارشان باشم

و ثنایه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم.

این پایان نامه را به

خانواده

و

دوستانم

تقدیم می کنم.

مَشکُر و قدردانی

مَشکُر شایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به اتمام برسانم، به امید آنکه توفیق یابم جز خدمت به خلق او نکوشم.

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوار، که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و گریانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند نهایت تقدیر و مَشکُر را دارم.

از زحمات فراوان اساتید بزرگوار و پر پایه ام آقایان پروفسور علی مرادزاده و دکتر علی نجاتی کلاته که از محضر پر فیض تدریشان، بهره بسیار بردم مَشکُر و قدردانی می نمایم. از راهنمایی های ارزنده جناب آقای مهندس قلدرحمی در سمت مشاور نهایت سپاس را دارم. از پیشنهادات سازنده داوران ارجمند، آقایان دکتر ایرج پیروز و جناب دکتر علی رضا عرب امیری سپاسگزارم. همچنین لازم می دانم از مساعدت های بی شائبه جناب آقای مهندس خوجم لی صمیمانه تقدیر نمایم، اتمام این پایان نامه بدون بھکاری و راهنمایی ایشان امکان پذیر نبود. از زحمات آقایان دکتر سلیمانی، دکتر روشندل کاهن که در انجام این پایان نامه بنده را راهنمایی نمودند، مَشکُر می نمایم. از کارشناسان مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران به ویژه آقای مهندس ایوبی به عنوان مشاور صنعتی، آقایان مهندس پیرویان، مهندس سعادت نیا، مهندس توکلی، مهندس سکرزاده و مهندس آقابابی به خاطر زحمات بی دریغشان و قرار دادن اطلاعات مورد نیاز برای انجام این پایان نامه نهایت سپاس را دارم. همچنین از دوستان عزیزم خانم نیکو، آقایان مسعودی، وثوقی فرو خوجم لی که در تمامی سختی ها، همواره حامی و پشتیبان و مایه دلگرمی من بوده اند سپاسگزارم و موفقیت در تمام مراحل زندگی را برایشان آرزو مندم.

نازیلا مَشکُری

بهرمن ۱۳۹۱

تعهد نامه

اینجانب نازیلا هاشمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک/گرایش ژئوالکتریک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "وارون سازی داده های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری کپه داغ غربی" تحت راهنمایی آقایان پروفسورعلی مراد زاده و دکتر علی نجاتی کلاته 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 بافتهای 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.

امضای دانشجو

تاریخ

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 با چشمه طبیعی می‌باشد، که در اکتشاف ساختارهای زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در دهه‌های اخیر، روش‌های الکترومغناطیسی و به طور خاص روش مگنتوتلوریک، از اهمیت ویژه‌ای در زمینه اکتشافات هیدروکربوری برخوردار هستند. این روش در مناطقی که کیفیت داده‌های لرزه پایین است، به عنوان مثال در نواحی رورانده، نواحی با توپوگرافی خشن و آشکارسازی سازندهای قرار گرفته زیر توده نمکی، در اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری اهمیت دارد.

روش مگنتوتلوریک در ناحیه کرند واقع در شمال شرق ایران، در سال ۲۰۰۸ به کار گرفته شد. هدف از انجام این تحقیق، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری و تعیین گسترش جانبی و عمق قرارگیری احتمالی سازند حاوی هیدروکربور که سازند تیرگان است، می‌باشد. سپس مدل مقاومت ویژه داده‌های مگنتوتلوریک با دیگر اطلاعات ژئوفیزیکی مانند حفاری و لرزه‌نگاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. قبل از انجام وارون‌سازی، اثر جابجایی ایستا برای داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از داده‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان تصحیح شد. با انجام مدل‌سازی یک و دو بعدی که بر روی داده‌های مگنتوتلوریک منطقه صورت گرفت، لایه‌ای بودن ساختار منطقه و چین خوردگی لایه‌ها برای پروفیل‌های شرقی و هموار بودن لایه‌ها، بدون چین خوردگی قابل ملاحظه برای پروفیل‌های غربی مشخص شد. با داشتن مدل وارون، اطلاعات زمین‌شناسی، مقطع زمانی لرزه‌نگاری، نگار مقاومت ویژه چاه و دیگر اطلاعات حفاری منطقه، محل احتمالی سازند تیرگان که سنگ مخزن اصلی این ناحیه به شمار می‌رود در محل حفر چاه کرند در عمق تقریبی ۵۷۰۰ متری از سطح زمین و در حوالی پروفیل P2 تعیین شد. گسترش جانبی این سازند در پروفیل‌های شرقی بیشتر از پروفیل‌های غربی تعیین گردید. همچنین با بررسی نقشه هم عمق مقاومت ویژه اثر گسل مراوه تپه در جنوب پروفیل‌های برداشت، مشاهده شد و احتمال وجود گسل دیگری در شمال و شمال شرق پروفیل‌ها پیش‌بینی شد.

کلمات کلیدی: مگنتوتلوریک، وارون‌سازی، ساختارهای هیدروکربوری، ناحیه کرند، سازند تیرگان.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ❖ تعیین بعد ساختارهای نفتی زیرسطحی در منطقه Oklahoma با استفاده از پارامترهای مگنتوتلوریک (پانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران)

- ❖ تعیین بعد و مدل سازی یک بعدی ساختارهای زیرسطحی در منطقه گینه نو (Papua New Guinea) با استفاده از پارامترهای مگنتوتلوریک (پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران)

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱.....	فصل اول: کلیات
۲.....	۱-۱ مقدمه
۳.....	۲-۱ سوابق به کارگیری روش MT در اکتشاف منابع هیدروکربوری
۱۰.....	۳-۱ ضرورت مطالعه
۱۱.....	۴-۱ هدف و روش انجام تحقیق
۱۲.....	۵-۱ ساختار پایان نامه
۱۳.....	فصل دوم: اصول و مبانی روش مگنتوتلوریک
۱۴.....	۱-۲ مقدمه
۱۷.....	۲-۲ بررسی اصول حاکم بر امواج مگنتوتلوریک
۱۷.....	۱-۲-۲ تئوری الکترومغناطیس
۲۲.....	۲-۲-۲ عمق پوسته
۲۲.....	۳-۲ اثر ساختارهای مختلف زمین‌شناسی روی برداشت‌های MT
۲۲.....	۱-۳-۲ ساختارهای یک بعدی
۲۳.....	۲-۳-۲ تفسیر منحنی‌های سونداژ مگنتوتلوریک
۲۳.....	۳-۳-۲ تبدیل عمق بوستیک
۲۴.....	۴-۲ ساختارهای دو بعدی
۲۶.....	۵-۲ تانسور امپدانس
۲۹.....	۱-۵-۲ محاسبه زاویه راستا
۳۲.....	۶-۲ تابع تبدیل مغناطیسی یا تیپر
۳۴.....	۷-۲ اثر جابجایی ایستا
۳۵.....	۱-۷-۲ روش‌های تصحیح جابجایی ایستا
۴۰.....	فصل سوم: خلاصه‌ای از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه
۴۱.....	۱-۳ مقدمه

۲-۳	موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه	۴۱
۳-۳	آب و هوای منطقه	۴۱
۴-۳	بررسی تحولات زمین‌شناسی کپه داغ و ساختمان کنند	۴۳
۵-۳	چینه شناسی ساختمان کنند	۴۳
۶-۳	تقسیم بندی ساختاری بخش کوهستانی کپه داغ	۴۶
۷-۳	تکتونیک و رسوب‌گذاری	۴۶
۱-۷-۳	تریاس	۴۸
۲-۷-۳	ژوراسیک پایینی	۴۸
۳-۷-۳	ژوراسیک بالایی-کرتاسه زیرین	۴۹
۴-۷-۳	کرتاسه بالایی	۴۹
۸-۳	گسل‌های موجود در منطقه	۵۰
۹-۳	وضعیت هیدروکربوری منطقه	۵۰
۱-۹-۳	سنگ مخزن	۵۱
۲-۹-۳	سنگ پوشش	۵۲
۳-۹-۳	سنگ منشاء	۵۲
فصل چهارم:	ارائه داده‌های مگنتوتلوریک، آنالیز ابعادی و تفسیر کیفی آن‌ها	۵۳
۱-۴	مقدمه	۵۴
۲-۴	موقعیت پروفیل‌های MT	۵۴
۳-۴	بررسی کمیت‌های موثر در تفسیر داده‌ها	۵۶
۱-۳-۴	منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری ρ_a	۵۶
۲-۳-۴	فاز امپدانس	۵۷
۴-۴	آنالیز ابعادی داده‌های مگنتوتلوریک	۶۱
۱-۴-۴	چولگی (اسکیو)	۶۱
۲-۴-۴	بیضی‌وارگی	۶۱
۳-۴-۴	چولگی (اسکیو) حساس به فاز	۶۲

۴-۴-۴	اندیس‌های وزنی نرمال شده (D_1, D_2, D_3)	۶۲
فصل پنجم:	مدل‌سازی یک بعدی و تفسیر کمی داده‌های مگنتوتلوریک	۷۴
۱-۵	مقدمه	۷۵
۲-۵	وارون‌سازی یک بعدی داده‌های مگنتوتلوریک کرد	۷۶
فصل ششم:	وارون‌سازی دو بعدی و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کرد	۹۰
۱-۶	مقدمه	۹۱
۲-۶	مدل‌سازی وارون دو بعدی به روش گرادیان مزدوج غیر خطی	۹۱
۳-۶	وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک کرد	۹۳
۴-۶	تفسیر مدل دو بعدی مقاومت ویژه داده‌های مگنتوتلوریک	۱۰۰
۱-۴-۶	مقایسه نتایج مدل‌سازی MT با اطلاعات زمین‌شناسی	۱۰۰
۲-۴-۶	مقایسه نتایج مدل‌سازی MT و حفاری	۱۰۶
۳-۴-۶	مقایسه نتایج مدل‌سازی MT و روش لرزه‌نگاری	۱۰۹
فصل هفتم:	نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۱۳
نتیجه‌گیری		۱۱۴
پیشنهادهات		۱۱۶
منابع		۱۱۷
پیوست الف		۱۲۴
پیوست ب		۱۴۰
پیوست ج		۱۵۱

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: مقطع عرضی زمین‌شناسی منطقه Adiyaman	۶
شکل ۲-۱: مقطع عرضی لرزه‌نگاری ناحیه همراه با انعکاس ناپیوسته	۷
شکل ۳-۱: وارون‌سازی دو بعدی داده‌های MT منطقه Adiyaman	۷
شکل ۴-۱: مدل دو بعدی مگنتوتلوریک دامنه کوه‌های راکی کانادا	۹
شکل ۱-۲: سیستم اندازه‌گیری مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی	۱۶
شکل ۲-۲: موقعیت میدان‌های الکترومغناطیسی برای یک ساختار ژئوالکتریکی دو بعدی	۲۵
شکل ۳-۲: الف- تغییر میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار در مجاورت ناهمگنی جانبی ب- تمرکز جریان الکتریکی در زون هادی ج- کاهش مقاومت ویژه ظاهری در تمام فرکانسها در ایستگاه B	۳۵
شکل ۴-۲: آرایش برداشت روش EMAP	۳۷
شکل ۵-۲: اصول اندازه‌گیری روش TEM	۳۸
شکل ۱-۳: موقعیت ساختمان‌کرد و نقشه راه‌های منطقه	۴۲
شکل ۲-۳: نقشه زمین‌شناسی ساختمان‌کرد	۴۴
شکل ۳-۳: مقطع عرضی زمین‌شناسی شماره ۵ در محدوده ساختمان‌کرد	۴۵
شکل ۴-۳: تکامل تکتونیکی و رسوب‌گذاری منطقه از تریاس به بعد	۴۸
شکل ۱-۴: موقعیت پروفیل‌ها و ایستگاه‌های برداشت شده MT همراه با محل چاه حفر شده و محل مقطع عرضی زمین‌شناسی بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه	۵۵
شکل ۲-۴: نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری برای مولفه‌های XY و YX قبل از انجام تصحیح جابجایی ایستا و منحنی حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM در چهار ایستگاه از پروفیل P1	۵۷
شکل ۳-۴: نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری تصحیح شده برای اثر جابجایی ایستا برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P1	۵۸
شکل ۴-۴: نمودارهای فاز برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P1	۵۹
شکل ۵-۴: نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز و بیضی وارگی برای ایستگاه‌های ۱۴، ۲۷، ۳۸ و ۵۲ از پروفیل P1	۶۳
شکل ۶-۴: نمودار مقادیر شاخص‌های D1، D2 و D3 برای ایستگاه‌های ۱۴، ۲۷، ۳۸ و ۵۲ از پروفیل P1	۶۳
شکل ۷-۴: نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز و بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D1، D2 و D3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۴۰ و ۶۵ از پروفیل P7	۶۴
شکل ۸-۴: نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز و بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D1، D2 و D3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۲۴ و ۳۷ از پروفیل P14	۶۴
شکل ۹-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۱۴ از پروفیل P1	۶۵
شکل ۱۰-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۲۹ از پروفیل P1	۶۶
شکل ۱۱-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P1	۶۶
شکل ۱۲-۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۲۸ از پروفیل P7	۶۷

- شکل ۴-۱۳: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۴۴ از پروفیل P7 ۶۷
- شکل ۴-۱۴: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۷۷ از پروفیل P7 ۶۸
- شکل ۴-۱۵: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۱۳ از پروفیل P14 ۶۸
- شکل ۴-۱۶: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۲۸ از پروفیل P14 ۶۹
- شکل ۴-۱۷: نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P14 ۶۹
- شکل ۴-۱۸: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P1 ۷۲
- شکل ۴-۱۹: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P7 ۷۲
- شکل ۴-۲۰: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P14 ۷۳
- شکل ۵-۱: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۱۶ از پروفیل P1 ۷۷
- شکل ۵-۲: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۲۹ از پروفیل P1 ۷۷
- شکل ۵-۳: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P1 ۷۸
- شکل ۵-۴: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۲۸ از پروفیل P7 ۷۸
- شکل ۵-۵: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۵۰ از پروفیل P7 ۷۹
- شکل ۵-۶: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۷۵ از پروفیل P7 ۷۹
- شکل ۵-۷: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۱۷ از پروفیل P14 ۸۰
- شکل ۵-۸: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۳۲ از پروفیل P14 ۸۰
- شکل ۵-۹: مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P14 ۸۱
- شکل ۵-۱۰: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P1 (مد میانگین) ۸۳
- شکل ۵-۱۱: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P7 (مد میانگین) ۸۳
- شکل ۵-۱۲: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P14 (مد میانگین) ۸۴
- شکل ۵-۱۳: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P1 (مد TE) ۸۶
- شکل ۵-۱۴: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P7 (مد TE) ۸۶
- شکل ۵-۱۵: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P14 (مد TE) ۸۷
- شکل ۵-۱۶: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P1 (مد TM) ۸۷
- شکل ۵-۱۷: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P7 (مد TM) ۸۸
- شکل ۵-۱۸: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P14 (مد TM) ۸۸
- شکل ۶-۱: نتایج مدل‌سازی وارون برای پروفیل P2 (مد TE) با مقادیر τ مختلف ۹۴
- شکل ۶-۲: تغییرات R.M.S Misfit بر حسب τ ۹۵
- شکل ۶-۳: مدل وارون دو بعدی مش‌بندی شده برای پروفیل P2 توسط الگوریتم گرادیان مزدوج غیر خطی ۹۵
- شکل ۶-۴: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P2 (مد TE) ۹۶
- شکل ۶-۵: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P1 (مد TE) ۹۷
- شکل ۶-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P7 (مد TE) ۹۷
- شکل ۶-۷: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک برای پروفیل P14 (مد TE) ۹۸
- شکل ۶-۸: شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری به دست آمده از مدل وارون دو بعدی برای پروفیل P1 ۹۸

- شکل ۹-۶: شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری به دست آمده از مدل وارون دو بعدی برای پروفیل P7..... ۹۹
- شکل ۱۰-۶: شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری به دست آمده از مدل وارون دو بعدی برای پروفیل P14..... ۹۹
- شکل ۱۱-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P2 (مد TM)..... ۱۰۲
- شکل ۱۲-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P7 (مد TM)..... ۱۰۳
- شکل ۱۳-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P14 (مد TM)..... ۱۰۳
- شکل ۱۴-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P2 (مد TE+TM)..... ۱۰۴
- شکل ۱۵-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P7 (مد TE+TM)..... ۱۰۴
- شکل ۱۶-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P14 (مد TE+TM)..... ۱۰۵
- شکل ۱۷-۶: ستون چینه شناسی چاه‌کردن و نگار مقاومت ویژه برای قسمت تحتانی چاه..... ۱۰۷
- شکل ۱۸-۶: تصویر محل چاه‌کردن روی مدل دو بعدی ژئوالکتریک پروفیل P2 داده‌های MT همراه با سر سازندهای زمین شناسی..... ۱۰۹
- شکل ۱۹-۶: مقطع زمانی لرزه‌نگاری منطبق بر پروفیل P2 مگنتوتلوریک همراه با سر سازندهای زمین شناسی حاصل از حفاری..... ۱۱۰
- شکل ۲۰-۶: نقشه‌های هم‌عمق مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی دو بعدی (برای مد TE)..... ۱۱۱

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول ۱-۳: چینه‌شناسی منطقه کرد ۴۷

جدول ۱-۶: تقسیم‌بندی سازندهای زمین‌شناسی چاه کرد ۱۰۸

فهرست اختصارات

AMT: Audio Magnetotelluric	روش مگنتوتلوریک در محدوده فرکانس شنوایی
	روش مگنتوتلوریک با چشمه کنترل شده در محدوده فرکانس شنوایی
CSAMT: Controlled Source Audio Magnetotelluric	
EDI: Electrical Data Interchange	داده‌های پردازش شده
EMAP: Electromagnetic Array Profiling	آرایش پروفیل زنی الکترومغناطیسی
MT: Magnetotelluric	روش مگنتوتلوریک
NLCG: NonLinear Conjugate Gradients	روش گرادیان مزدوج غیر خطی
RMS: Root-Mean-Square	ریشه میانگین مربعات
RRMT: Remote Reference Magnetotelluric	روش مگنتوتلوریک مبنای دور
TE: Transverse Electric	حالت الکتریکی عرضی
TEM: Transient Electromagnetic	روش سونداژ الکترومغناطیس حوزه زمان
TM: Transverse Magnetic	حالت مغناطیسی عرضی

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

روش مگنتوتلوریک^۱ (MT) یکی از روش‌های الکترومغناطیسی با چشمه طبیعی می‌باشد، که از سال ۱۹۵۰ برای اکتشاف منابع زیر سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش MT از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی برای به نقشه درآوردن تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی زمین استفاده می‌کند. بی‌نیازی این روش به منبع تغذیه جریان الکتریکی و قابلیت نفوذ به اعماق زیاد، MT را یک روش اکتشاف مقرون به صرفه می‌کند. همچنین این روش هیچ‌گونه آثار زیست محیطی مخربی در بر ندارد (Dobrin & Savit, 1988). از نقطه ضعف‌های عمده این روش، طبیعت آشفته امواج در فرکانس‌های بالا و ضعیف بودن چشمه امواج در فرکانس‌های حدود ۱ Hz و ۲ kHz می‌باشد. با بکارگیری روش مگنتوتلوریک با چشمه کنترل شده در محدوده فرکانس شنوایی^۲ (CSAMT) این مشکل حل می‌شود. نقطه ضعف دیگر روش MT مشکل جمع‌آوری داده در مناطق حاوی نوفه‌های الکتریکی می‌باشد، به منظور برطرف کردن این مشکل از روش مگنتوتلوریک مبنای دور^۳ (RRMT) استفاده می‌شود که در این روش از ایستگاه‌های مبنای دور که حاوی نوفه کمی هستند جهت اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی استفاده می‌شود (Moradzadeh, 1998). حساسیت روش مگنتوتلوریک به آنومالی‌های هادی، این روش را مخصوصاً برای اکتشاف منابع انرژی ژئوترمال مناسب می‌کند. همچنین در دهه‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی، تجهیزات، روش‌های پردازش و تفسیر، روش MT به طور گسترده‌تری در اکتشاف مواد هیدروکربنی در سراسر دنیا کاربرد دارد.

با این حال استفاده از روش MT در ایران وسعت چندانی ندارد و به چند مورد خاص محدود می‌شود. دلیل این امر نبودن امکانات، تجهیزات و تکنولوژی لازم در مرحله برداشت، پردازش و تفسیر این روش بوده است که البته در سال‌های اخیر بکارگیری این روش در حل مسائل مختلف رونق بیشتری یافته است. به عنوان نمونه در بررسی‌های زمین‌شناسی، از روش مگنتوتلوریک برای بررسی رسانایی الکتریکی لایه‌های زیر سطحی منطقه اینچه برون (واقع در شمال استان گلستان) استفاده شده است (بهروزمند و اسکویی،

^۱ Magnetotelluric

^۲ Controlled Source Audio Magnetotelluric

^۳ Remote Reference Magnetotelluric

۱۳۸۶). همچنین از این روش به منظور مشخص کردن هدایت الکتریکی پوسته با تاکید بر مکان‌یابی زون‌های گسلی موجود در اراک استفاده شده است (پاکدل و اسکویی، ۱۳۸۹). دراکتشاف منابع ژئوترمال این روش به منظور اکتشاف ناحیه‌ای حوزه زمین گرمایی سبلان در طی چندین پروژه به کار گرفته شد (Talebi et al., 2005; Kingston Morrison, 1998; خوجم لی و همکاران، ۱۳۹۱) و نیز مطالعه مخزن زمین گرمایی با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک در سال ۲۰۱۱ در ناحیه‌ای واقع در ۱۵ کیلومتری شهرستان محلات واقع در استان مرکزی صورت گرفت (محمدی و همکاران، ۱۳۹۱).

۱-۲ سوابق به کارگیری روش MT در اکتشاف منابع هیدروکربوری

با توجه به اینکه لرزه‌نگاری انعکاسی یک روش بسیار کارآمد با قدرت تفکیک بالا برای به تصویر کشیدن ساختارهای پیچیده زیر سطحی در اکتشاف هیدروکربورها است. با این حال گاهی به شدت از کیفیت داده‌های لرزه کاسته می‌شود. به عنوان مثال وجود سنگ‌های ولکانیکی و کربناته نزدیک سطح، نواحی با توپوگرافی خشن و زون‌های رورنده^۱ از کیفیت داده‌های لرزه می‌کاهد (Xiao and Unsworth, 2006). همچنین با توجه به پرهزینه بودن روش گرانی سنجی و اینکه روش مغناطیس سنجی مرز بین لایه‌ها را به خوبی نشان نمی‌دهد، استفاده از روش MT در اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

کاربرد روش مگنتوتلوریک اکتشاف ساختارهایی است که پتانسیل وجود هیدروکربور در آن‌ها زیاد است، مانند تاق‌دیس‌ها و گنبد‌های نمکی. این روش همچنین می‌تواند در بعضی شرایط به وجود مستقیم هیدروکربور دلالت کند (Unsworth, 2005; Unsworth, 2012).

در سال‌های اولیه استفاده از روش MT، به علت قدرت تفکیک پایین ذاتی این روش در مقایسه با روش لرزه‌نگاری و استفاده از آنالیز یک بعدی، این روش برای آشکارسازی ساختارها در نواحی پیچیده زمین‌شناسی مناسب نبود. از این رو از آن فقط در آشکارسازی عمق حوضه‌های رسوبی استفاده می‌شد. با

¹ Overthrust

وجود این محدودیت‌ها روش MT به موفقیت قابل توجهی در اکتشاف نفت در شوروی سابق دست یافت (Berdichevsky and Dmitriev, 2002). کاربرد روش MT در اکتشاف نفت و گاز در شوروی سابق از سال ۱۹۶۰ شروع و تا سال ۱۹۸۰ ادامه یافت در این منطقه ۱۰۰۰۰ سونداژ MT در ناحیه ای به مساحت ۳ میلیون کیلومتر مربع انجام شد و به علت هزینه پایین آن، این روش قبل از اکتشاف لرزه‌نگاری صورت گرفت. استفاده اصلی از این روش در نواحی فوق صرفاً برای مطالعات زمین‌شناسی منطقه‌ای و ارزیابی حوضه موردنظر بود و به آشکارسازی یک تصویر واضح از توپوگرافی سنگ بستر انجامید و منجر به دست دادن اطلاعات مناسب به منظور تشخیص اجزای ساختاری حوضه‌ها شد. اختلاف در تعیین عمق سنگ بستر بلورین^۱، توسط داده‌های MT و حفاری ۱۰٪ بود که نتیجه‌ای تقریباً رضایت‌بخش بود (Berdichevsky and Dmitriev, 2002). در همین دوران در سیبری غربی، MT موفق به کشف یک ساختار قابل توجه در توپوگرافی سنگ بستر شد که منجر به کشف میدان گازی اورنگوی^۲ شد که بزرگترین میدان گازی در جهان است (Berdichevsky and Dmitriev, 2002).

با توسعه سریع نرم افزار و تجهیزات و ایجاد طرح‌های تکنیکی، MT در اکتشاف هیدروکربور مفیدتر واقع شد. از اواخر ۱۹۸۰، کاربرد MT در اکتشاف نفت در کشورهای غربی افزایش یافت. کاربردها در نواحی رورانده متمرکز شد. در بسیاری از زون‌های رورانده تباین^۳ بین سرعت یا مقاومت ویژه از قرارگیری لایه‌های با لیتولوژی‌های مختلف روی هم به وجود می‌آید. این تباین سرعت می‌تواند مشکلاتی را در آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی در برداشت‌های لرزه‌نگاری ایجاد کند. نواحی رورانده به علت وجود سنگ مخزن مناسب، بلوغ گرمایی و شرایط مساعد مخزن اهداف معمول در اکتشاف نفت هستند (Picha, 1996). اما در بسیاری از این نواحی، موج بازتابش برای لایه زیر گسل تراستی^۴ از قانون اسنل دکارت^۵ تبعیت نمی‌کند، موج لرزه‌ای پخش می‌شود و این لایه قابل شناسایی نمی‌باشد. از طرفی با وجود گسل تراستی ممکن است

¹ Crystalline

² Urengoy

³ Contrast

⁴ Thrust Fault

⁵ Snell's Law

لایه نرم که احتمال وجودش در لایه‌های نزدیک سطح زیاد است را در اعماق قرار دهد و مانع از رسیدن موج لرزه‌ای به اعماق شود (لایه نرم انرژی موج لرزه‌ای را در خود نگه می‌دارد) که این مساله می‌تواند باعث کیفیت ضعیف داده‌های لرزه انعکاسی در این نواحی شود (Watts and Pince, 1998; Watts et al., 2002). علاوه بر آن در بسیاری از نواحی رورانده، سنگ‌های با سرعت بالا، در بالای سنگ‌های با سرعت پایین قرار می‌گیرند و به همین دلیل بکارگیری روش لرزه‌نگاری را محدود می‌سازد، در حالی که روش MT برای بررسی این نواحی مناسب است.

روش MT در اکتشاف نفت در کمر بند چین خورده گینه نو در سال ۱۹۸۸ به کار گرفته شد (Christopherson, 1991) جایی که ۱۰۰۰ متر توالی سنگ آهک متراکم یک سری آواری^۱ را پوشانده است و به علت سرعت بالا در سنگ آهک در کمر بند چین خورده، کیفیت داده‌های لرزه پایین است چون موج لرزه‌ای تمایل دارد در لایه با سرعت بالا سیر کند ولی به دلیل اختلاف زیاد مقاومت ویژه بین سنگ آهک ($400\text{--}200\ \Omega\cdot\text{m}$) و سری رسوبی آواری ($2/75\text{--}7/5\ \Omega\cdot\text{m}$) که در زیر قرار گرفته این ناحیه برای اکتشاف ساختارهای نفتی با روش MT مطلوب است.

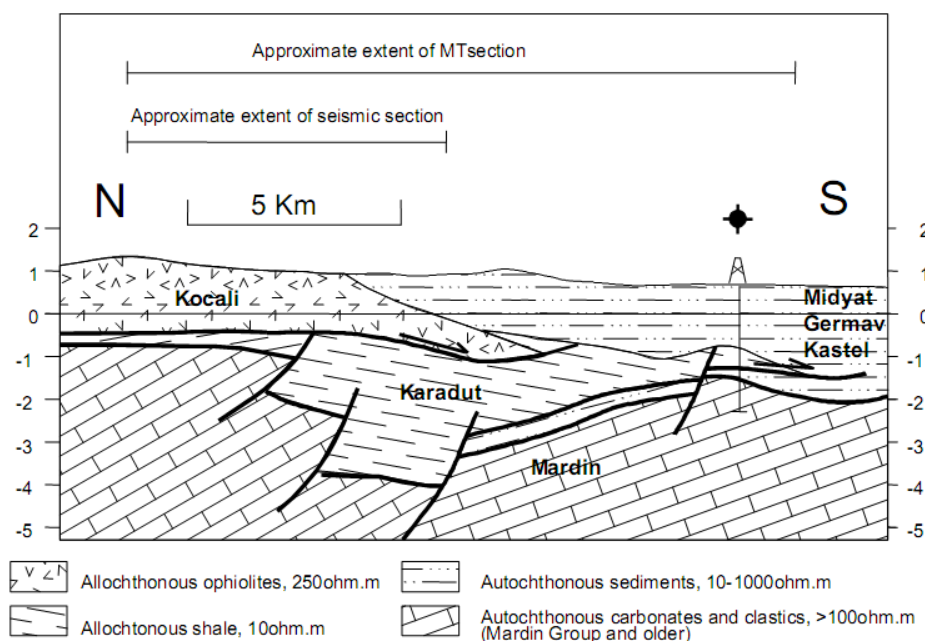
واتز و پینس در سال ۱۹۹۸ یک مورد از کاربرد MT در اکتشاف نفت در جنوب ترکیه را بیان کردند (Watts and Pince, 1998). در این ناحیه لایه‌های نسبتاً نرم (رسوبات عمیق دریا که مقاومت ویژه پایینی دارند و در کنار مجموعه‌های افیولیتی قرار دارند) بالای کربنات‌های با مقاومت ویژه بالا رورانده شده‌اند.

در این ناحیه صفحات نابرجا^۲ یک اجتماع بی‌نظم و آشفته از لیتولوژی‌های مختلف را بیان می‌کند و وجود این صفحات منجر به کیفیت پایین داده‌های لرزه‌نگاری می‌شود. شرایط تکتونیکی که باعث این موضوع می‌شود به عنوان مثال حرکت نسبی لایه‌های تغییر شکل پذیر روی یک لایه سخت‌تر است که همچنین می‌تواند سنگ‌های با اختلاف زیاد مقاومت ویژه الکتریکی را در کنار هم قرار دهد. بنابراین روش لرزه‌نگاری انعکاس‌های ناپیوسته را نشان می‌دهد ولی روش مگنتوتلوریک یک تصویر واضح از مرز بالایی

¹ Clastic

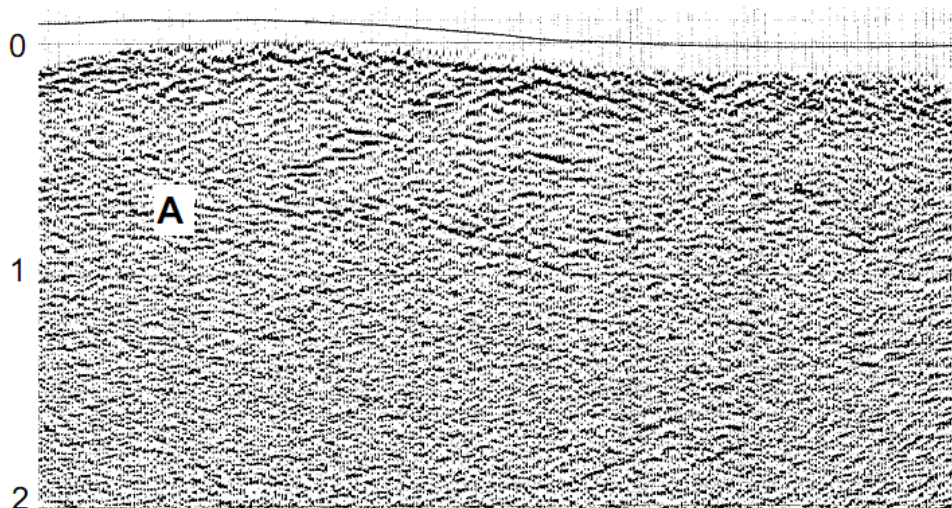
² Allochthonous

گروه ماردین می‌دهد (شکل‌های (۱-۱) تا (۳-۱)). مثال‌هایی از این مورد در خیلی مکان‌ها در طول خط تکتونیکی Alpine-Toros اتفاق می‌افتد (Beydoun, 1991). در این شرایط روش مگنتوتلوریک می‌تواند برای به نقشه در آوردن مرز بالایی کربنات‌ها به کار گرفته شود که این مرز بالایی در آلبانی، جنوب ایتالیا، یونان و جنوب ترکیه بر مخزن منطبق است و بدین ترتیب می‌توان محل مخزن را مشخص کرد.



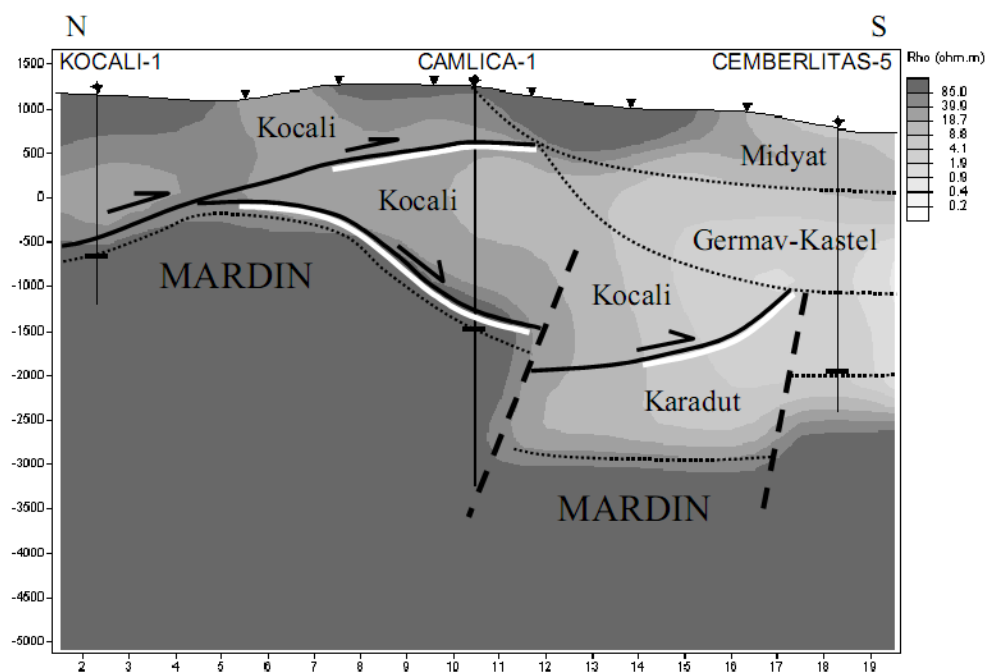
شکل ۱-۱: مقطع عرضی زمین‌شناسی منطقه Adiyaman (Watts and Pince, 1998)

چون سطح زمین شامل سنگ آهک کارستی و همچنین ترکیب ناهمگن افیولیتی است کیفیت داده‌های لرزه پایین است. از طرفی توپوگرافی خشن موجب دسترسی مشکل به منطقه می‌شود. در شکل (۲-۱)، انعکاس ناپیوسته از گروه ماردین که هدف اکتشاف است، با حرف A نشان داده می‌شود.



شکل ۱-۲: مقطع عرضی لرزه نگاری ناحیه همراه با انعکاس ناپیوسته (Watts and Pince, 1998)

پس از برداشت و پردازش داده‌های MT با استفاده از کد وارون‌سازی دوبعدی تفاضل محدود (توسعه داده شده توسط Mackie & Rodi, 1996) مدل ارائه شده در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. سه چاه در شکل مشخص شده اند خطوط سفید انعکاس‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: وارون‌سازی دوبعدی داده‌های MT (Watts and Pince, 1998)

شکل (۱-۳) نشان می‌دهد که یک انطباق خوب بین داده‌های MT و لرزه در نیمه شمالی پروفیل وجود دارد (بین چاه‌های Kocali-1 و Camlica-1). این قضیه ثابت می‌کند که در نیمه شمالی پروفیل سرعت استفاده شده در تبدیل عمق لرزه منطقی است. اما در جنوب چاه Camlica-1 چنین تطابقی وجود ندارد. اعماق تفسیری برای داده‌های MT تا مرز بالایی گروه ماردین در تطابق خوبی با چاه‌های Kocali-1 و Camlica-1 قرار دارد اما تطابق با چاه Cemberlitas-5 ضعیف است که این ممکن است به این دلیل باشد که محل چاه در انتهای پروفیل MT است و آخرین ایستگاه MT، ۲ کیلومتر از چاه و انتهای ساختار فاصله دارد از این رو وارون‌سازی کیفیت پایینی دارد.

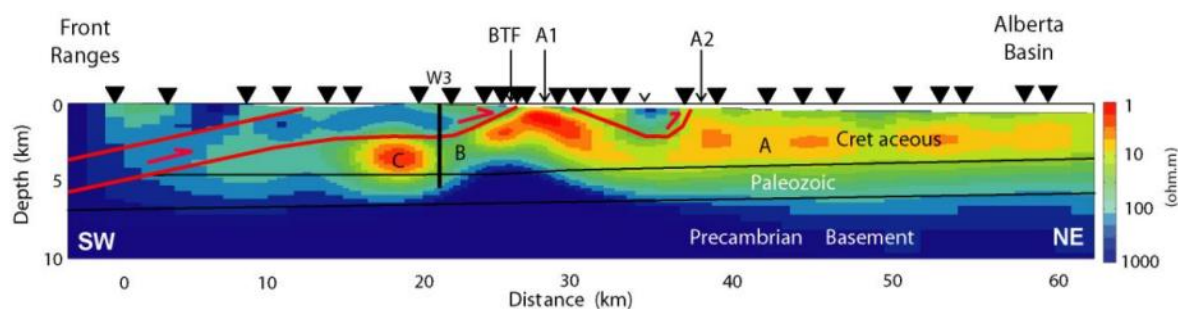
این مثال نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های مگنتوتلوریک، لرزه‌نگاری و چاه‌پیمایی به خوبی می‌تواند گروه ماردین را به تصویر بکشد و انعکاس‌های غیر پیوسته را به خوبی به واحدهای چینه‌شناسی مرتبط کند. روش MT همچنین در ناحیه مینامی-نوشیرو^۱ در ژاپن برای اکتشاف نفت مورد استفاده قرار گرفت (Matsuo and Negi, 1999). گسل‌های تراستی با تغییر سریع ضخامت لایه‌های کم مقاومت در نتیجه وارون‌سازی دو بعدی قابل شناسایی بودند. مدل مقاومت ویژه به دست آمده از وارون‌سازی دو بعدی، همچنین نشانی از وجود تاقدیس‌ها و ناودیس‌های مشهور حاصل نمود.

این روش در اکتشاف نفت سازندهایی که زیر منطقه‌ای که حاوی نمک باشد به کار گرفته می‌شود. نمک جز مواد با خاصیت پلاستیک است و بیشتر انرژی موج لرزه را که خاصیت الاستیک دارد، به خود می‌گیرد و مانع از رسیدن موج به اعماق می‌شود. بنابراین روش لرزه‌نگاری قادر به تصویر کشیدن رسوبات قرار گرفته زیر توده و یا لایه‌های نمکی نمی‌باشد. اما به علت تباین بالای مقاومت ویژه نمک ($20 \Omega.m$) با رسوبات همراهش ($1 \Omega.m$)، MT یک انتخاب مناسب برای به نقشه درآوردن بخش پایینی توده نمکی است. بعضی مطالعات MT دریایی برای به تصویر کشیدن بستر نمک گزارش شده است (Hoversten et al., 2000).

¹ Minami-noshiro

مثال دیگری از کاربرد MT در اکتشاف نفت در شمال یونان است (Watts et al., 2002) که در این منطقه کیفیت داده‌های لرزه به علت توپوگرافی خشن پایین است. جایی که تباین مقاومت ویژه بین واحد کربنات- انیدریت ($2000-200 \Omega.m$) و واحد آواری ($100-20 \Omega.m$) بالا است.

برداشت MT در سال ۲۰۰۲ به منظور بررسی قابلیت این روش برای به تصویر کشیدن ساختارهای هیدروکربوری در دامنه کوه‌های راکی^۱ کانادا انجام گرفت (Xiao, 2004). شکل (۴-۱) مدل مقاومت ویژه حاصل از داده‌های MT را همراه با اطلاعاتی از ساختارهای زیر سطحی مانند تاقدیس و ناودیس و گسل معکوس موجود در منطقه نشان می‌دهد. با توجه به تباین قابل توجه واحد کم مقاومت کرتاسه و واحد با مقاومت بالای پالئوزوئیک، مرز این دو واحد زمین شناسی با مدل MT قابل شناسایی است. از طرفی با تعیین مقاومت ویژه در اطراف تاقدیس‌ها و ناودیس منطقه و استفاده از قانون آرچی تخلخل به دست می‌آید و با توجه به این موضوع تغییرات تخلخل مرتبط با شکستگی و در نهایت نفوذپذیری، در اطراف تاقدیس‌ها و ناودیس قابل آشکارسازی است، البته این نوع محاسبه تخلخل تقریبی است اما در مراحل اولیه اکتشاف مهم است. سنگ‌های رسوبی زیر گسل تراستی معمولاً مقاومت ویژه کمتری از کربنات‌های رورانده (واحد‌های قدیمی‌تر) دارد که این مورد نیز در مدل MT منطقه قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱: مدل دو بعدی مگنتوتلوریک، تاقدیس‌ها (A1, A2)، ناودیس، واحدهای زمین شناسی و گسل تراستی (BTF) روی شکل مشخص است (Xiao, 2004).

مدل سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک انجام شده در جنوب بریتیش کلمبیا، یک ساختار رسانا که

¹ Rocky Mountain Foothills

معرف حوضه رسوبی نچاکو^۱ است و پتانسیل بالایی برای وجود مخازن نفت و گاز دارد را آشکار می‌کند. داده‌های MT همچنین چینه‌ها و گسل‌های حوضه رسوبی فوق را که ممکن است محیط مناسبی برای ایجاد حوضه نفتی باشند را به تصویر می‌کشند. از طرف دیگر داده‌های MT اطلاعاتی درباره ساختارهای چینه شناسی حوضه فوق مهیا کردند که ممکن است برای شناسایی مخزن نفت و گاز مفید باشد (Spratt and Craven, 2010).

رسوبات مزوزوئیک پتانسیل بالایی برای وجود مخزن نفت و گاز در سراسر دنیا دارد. از روش MT همراه با روش ژئوشیمیایی برای آشکارسازی ساختار گندوانا^۲ (رسوبات مزوزوئیک) در هند مرکزی در سال ۲۰۱۱ استفاده شده است. این ساختار هدف اکتشاف مخزن هیدروکربوری است و در زیر بازالت‌های دیکین^۳ که مقاومت ویژه بالایی دارند قرار دارد. بنابراین با وجود تباین مقاومت ویژه بین رسوبات مزوزوئیک و بازالت‌های دیکین روش MT یک روش مناسب برای آشکارسازی ساختار گندوانا بود. مدل‌سازی و تفسیر داده‌های MT سنگ بستر را در عمق ۵ کیلومتری از سطح زمین و رسوبات مزوزوئیک را با ضخامت ۲ تا ۳/۵ کیلومتر آشکارسازی می‌کند (Abdul Azeez, 2011).

مثال‌های بالا، توسعه روش MT در تجهیزات، برداشت داده‌ها، پردازش داده‌ها و روش‌های تفسیری برای به تصویر کشیدن ساختارها در نواحی رورانده را نشان می‌دهد. اگرچه این روش، قدرت تفکیک کمتری نسبت به روش لرزه‌نگاری دارد ولی هزینه پایین، عمق زیاد اکتشاف و اثرات محیطی کم این روش جزء مزایای آن به شمار می‌رود. در ناحیه‌ای که اکتشاف لرزه مشکل است، برداشت MT یک نقش مهم در مرحله شناسایی اکتشاف نفت دارد.

۱-۳ ضرورت مطالعه

حوضه رسوبی کپه داغ واقع در شمال و شمال شرق استان گلستان و در مناطق مرزی کشورمان

¹ Nechako

² Gondwana

³ Deccan

باکشور ترکمنستان، به دلیل در برداشتن میدان‌های گازی و موقعیت تکتونیکی از اهمیت زیادی برخوردار است، به همین دلیل این حوضه از دیرباز مورد توجه ژئوفیزیکدانان بوده است. کپه داغ غربی به دلیل گسترش رسوبات کربناته سازند تیرگان و مزدوران که سنگ مخزن اصلی این ناحیه به شمار می‌روند از اهمیت ویژه‌ای در زمینه اکتشافات هیدروکربوری برخوردار است. از جمله روش‌های ژئوفیزیکی که در این منطقه به کار گرفته شد لرزه‌نگاری انعکاسی بود و به دلیل اینکه ناحیه از رسوبات کواترنری پوشیده شده به جز یک یا دو پروفیل، کیفیت داده‌های لرزه پایین بود و استفاده از بقیه روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش گرانی سنجی و مغناطیس سنجی به جز تعیین عمق حوضه رسوبی اطلاعات دیگری به دست نداد به همین دلیل شرکت نفت استفاده از روش MT را ضروری دانست. همچنین به منظور انجام مطالعات دقیق‌تر منطقه کپه داغ، برداشت‌های زمین شناسی متعدد و حفر چندین چاه در کل منطقه صورت گرفت که چاه کردند در کپه داغ غربی در سال ۱۳۹۰ حفر شد.

با توجه به موارد ذکر شده مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران با کمک پیمانکاران چینی داده‌های MT را به شکل آرایش پروفیل زنی الکترومغناطیسی^۱ در طول چند پروفیل (در محل بیش از ۹۰۰ نقطه) در سال ۱۳۸۷ برداشت کردند و شرکت نفت تفسیر مقدماتی برای این روش ارائه داد که نتایج چندان رضایت بخش نبود و اکنون با هماهنگی شرکت نفت مدل‌سازی و تفسیر داده‌های MT در قالب پروژه صنعتی دانشجویی به عهده اینجانب قرار گرفته است.

۴-۱ هدف و روش انجام تحقیق

هدف از انجام این تحقیق پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک فوق جهت اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری و تعیین گسترش جانبی و عمق احتمالی سازند حاوی هیدروکربور که سازند تیرگان است، می‌باشد. جهت نیل به هدف، ابتدا کیفیت داده‌های برداشت شده MT در پروفیل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و اثرات گالوانیکی مرتبط با عوارض توپوگرافی و ناهمگنی‌های سطحی به کمک

¹ Electromagnetic Array Profiling (EMAP)

داده‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان^۱ (که به شکل یک در میان در محل هر یک از سونداژهای MT برداشت شده بود) در تک تک سونداژهای MT تصحیح می‌شوند سپس با استخراج داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز از مولفه‌های تانسور امپدانس، نمودارها و شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری و فاز به صورت کیفی تفسیر خواهند شد. در ادامه پس از انجام آنالیز ابعادی^۲، با بهره‌مندی از نرم افزارهای تخصصی مانند WinGLink (Geosystem, 2003) با روش‌های مختلف داده‌های MT را به شکل یک و دو بعدی مدل‌سازی نموده و با تلفیق نتایج به دست آمده به شکل نقشه‌های هم عمق و مقاطع قائم نتایج تفسیر شده و شکل و گسترش ساختارهای هیدروکربوری تعیین می‌شوند. در نهایت نتایج کار با دیگر داده‌های موجود مانند لرزه‌نگاری و حفاری مقایسه و مورد تفسیر نهایی قرار می‌گیرند.

۱-۵ ساختار پایان نامه

در فصل اول این نوشتار، تاریخچه‌ای از مطالعات انجام شده در اکتشاف ساختارهای نفتی با استفاده از روش MT همراه با ضرورت و اهداف مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل دوم مختصری از اصول و مبانی روش MT بیان می‌شود. در فصل سوم با شرح زمین شناسی منطقه، در مورد موقعیت جغرافیایی محل مورد مطالعه بحث می‌شود. در فصل چهارم با ارائه و انجام آنالیز ابعادی داده‌های MT، ساختارهای زیرسطحی منطقه از نظر مقاومت ویژه تعیین بُعد می‌شوند و با تهیه و ارائه نمودارهای مقاومت ویژه و فاز در محل سونداژها و شبه مقاطع الکتریکی برای پروفیل‌های مختلف تفسیر کیفی داده‌ها صورت می‌گیرد و سپس با انجام مدل‌سازی یک بعدی داده‌های MT در فصل پنجم تفسیر مقدماتی کمی از ساختارهای زیر سطحی صورت می‌گیرد. در فصل ششم مدل‌سازی وارون دو بعدی داده‌های MT انجام می‌شود و در نهایت مدل به دست آمده با داده‌های لرزه‌نگاری و حفاری تفسیر نهایی می‌شود. در فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات ارائه می‌شود.

¹ Transient Electromagnetic (TEM)

² Dimensionality Analysis

فصل دوم

اصول و مبانی روش مگنتوتلوریک

۲-۱ مقدمه

در روش مگنتوتلوریک با ثبت مولفه‌های عمود بر هم نوسانات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین می‌توان توزیع رسانایی الکتریکی زمین تحت مطالعه را به دست آورد. در این روش، تغییرات میدان الکترومغناطیسی طبیعی جریان‌های الکتریکی را در زمین القا می‌کنند، این جریان‌های القایی زیر سطحی میدان‌های الکترومغناطیسی ثانویه را تولید می‌کنند و میدان الکترومغناطیسی کل را در سطح زمین تغییر می‌دهد. جریان القایی در زمین به اندازه میدان الکترومغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها بستگی دارد. بنابراین با ثبت این میدان‌های الکترومغناطیسی در فرکانس‌های مختلف اطلاعات مفیدی درباره خصوصیات الکتریکی لایه‌های زیر سطحی به دست می‌دهند (Dobrin & Savit, 1988; Vozoff, 1991).

میدان الکترومغناطیس مورد استفاده در روش MT طیف وسیعی از فرکانس‌ها را در بر می‌گیرد، از فرکانس‌های بالا یا فرکانس‌های شنوایی مگنتوتلوریک^۱ برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی و ذخایر فلزات پایه استفاده می‌گردد و گستره فرکانسی مورد استفاده در اکتشاف نفت ۰/۰۰۰۵ تا ۵۰۰ هرتز می‌باشد (Orange, 1989).

چشمه امواج MT از به وجود آمدن هرگونه آشفتگی طبیعی در میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌شود. منشا میدان MT ناشی از فعالیت‌های خورشیدی، آذرخش‌ها، شفق‌های قطبی، حرکت‌های نسبی زمین، خورشید و ماه و همچنین میدان‌های ناشی از گردبادهای بزرگ می‌باشد (Telford et al., 1990; Dobrin & Savit, 1988). دو منبع اصلی سیگنال‌های الکترومغناطیسی طبیعی در اکتشاف مگنتوتلوریک استفاده می‌شود. اکثر سیگنال‌های MT در فرکانس‌های زیر ۱ Hz از نوسانات میدان مغناطیسی زمین می‌آیند که توسط تغییرات در مگنتوسفر ایجاد می‌شود مگنتوسفر یک زون متشکل از پلازما است که به طور پیوسته مورد اصابت باد خورشیدی قرار می‌گیرد. طبق قوانین القای الکترومغناطیس، تغییرات میدان

¹ Audio Magnetotelluric (AMT)

مغناطیسی زمین (تغییرات ژئومغناطیسی زمین) یک میدان الکترومغناطیس گذرا و متعاقباً جریان‌های الکتریکی را در زمین رسانا القا می‌کنند. تغییرات ژئومغناطیسی وابسته به فرایندهای فیزیکی خارج از جو زمین، خیلی سریع تغییر می‌کنند و می‌توانند یک جریان قوی داخل زمین القا کنند که به آن جریان تلوریک می‌گویند. همه تغییرات میدان ژئومغناطیسی و جریان‌های تلوریک میدان مگنتوتلوریک نامیده می‌شود.

در فرکانس‌های $1-1000\text{ Hz}$ منشاء میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی فعالیت آذرخشی الکتریکی جهانی^۱ به طور اولیه در اتمسفر تولید می‌شوند و در یونسفر که هادی موج است سیر می‌کنند. امواج ایجاد شده اسفریک^۲ نامیده می‌شود بیشتر اسفریک‌ها در بعدازظهرهای تابستانی رخ می‌دهند و با دور شدن از محل وقوع میرا می‌شوند (Zhdanov, 2009; Dobrin & Savit, 1988; Vozoff, 1991).

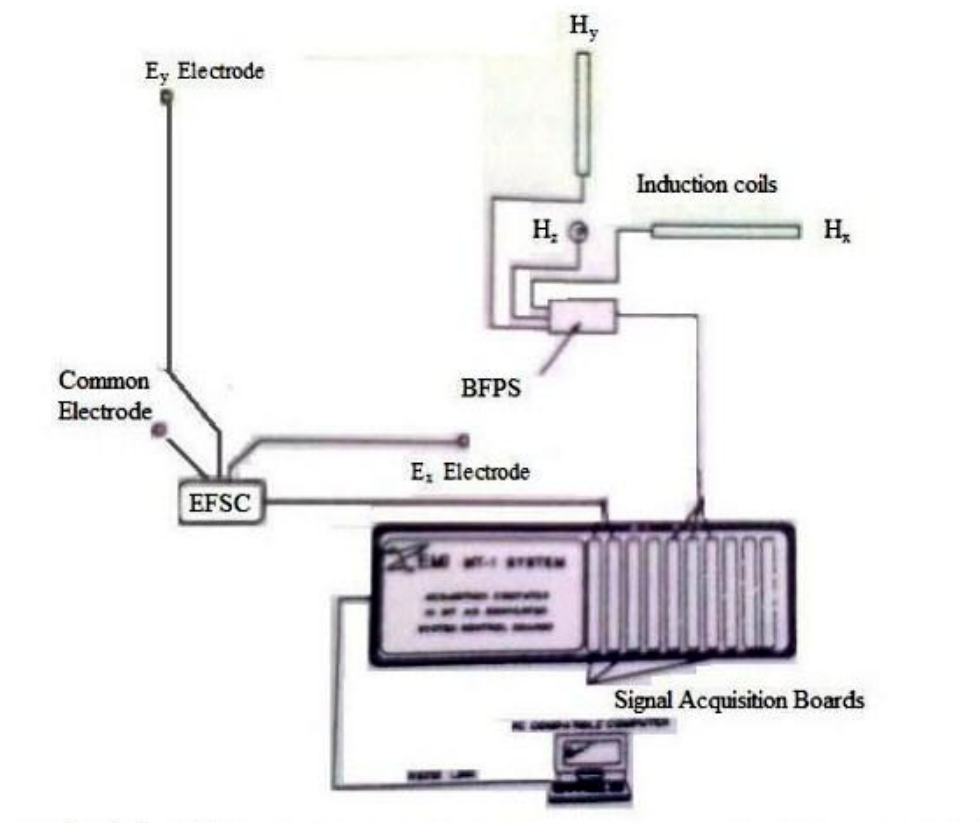
امواج ایجاد شده تقریباً بدون تضعیف، پوسته نارسانای هوا را طی کرده و به سطح زمین برخورد می‌کنند، در سطح زمین میدان‌های الکترومغناطیسی مانند امواج تخت رفتار می‌کنند بنابراین بخش زیادی از میدان‌های تابشی در سطح زمین بازتاب می‌شوند و تنها بخش کوچکی از آن به صورت امواج تخت به داخل زمین نفوذ می‌کنند و در داخل زمین و محیط‌های رسانا باعث تولید جریان‌های الکتریکی می‌گردند که این جریان‌ها به نوبه خود باعث بوجود آمدن میدان‌های مغناطیسی القایی (ثانویه) می‌شوند (Vozoff, 1991; Moradzadeh, 1998).

امروزه برای اندازه‌گیری تغییرات میدان‌های مغناطیسی بجای مگنتومتر از یک سری کویل‌های (پیچ‌های) القایی بسیار حساس و یک جفت الکتروود جهت اندازه‌گیری تغییرات میدان الکتریکی در جهات X و Y استفاده می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر می‌توان از یک کویل اضافی در جهت Z برای اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی قائم نیز استفاده نمود. مجموعه این الکتروودها و کویل‌ها به یک سری تقویت کننده‌ها و فیلترها و در نهایت به دستگاه چند کاناله دیجیتالی قابل اتصال به کامپیوتر جهت ثبت و

¹ World Wild Electric Thunderstorms Activity

² Spheric

اندازه گیری داده‌های خام سری زمانی وصل می‌شوند. شکل (۱-۲) شمایی از یک سیستم اندازه‌گیری داده‌های MT را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: سیستم اندازه‌گیری مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی (Moradzadeh, 1998)

لازم به ذکر است که تغییرات هر یک از مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی (بسته به بازه فرکانسی مورد نظر برداشت) به صورت چندین قطعه^۱ سری زمانی، در هر یک از باندهای فرکانسی ثبت می‌شوند و سپس به کمک نرم افزارهای مربوط و انجام یک سری عملیات ریاضی پیچیده مقدار این میدان‌ها در چندین فرکانس محاسبه می‌گردند.

در بسیاری از سیستم‌های امروزی، پردازش در همان زمان برداشت صورت می‌گیرد. در یک ایستگاه مولفه‌های میدان‌های مغناطیسی (H_x , H_y , H_z) و الکتریکی (E_x , E_y) ثبت می‌شوند، نسبت این میدان‌ها

¹ Segment

کمیتی مختلط^۱ از نوع امپدانس^۲ الکتریکی است. با تعیین امپدانس $Z_{\alpha\beta} = E_{\alpha}/H_{\beta}$ در یک سری از فرکانس‌ها می‌توان یک طیف فرکانسی برای امپدانس به دست آورد. در فرکانس‌های نسبتاً زیاد به علت اثر عمق پوسته^۳، امپدانس تنها اطلاعاتی از لایه‌های سطحی می‌دهد و در فرکانس‌های پایین، این اطلاعات ناشی از لایه‌های عمقی می‌باشد، بنابراین مشاهده می‌شود که روش MT در یک ایستگاه به صورت یک سونداژ عمقی الکتریکی عمل می‌کند (Kaufman and Keller, 1981). در مرحله بعد، امپدانس‌های محاسبه شده به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس بر حسب عمق تفسیر می‌شود. قبل از مدل‌سازی داده‌ها باید اثرات ناشی از ناهمگنی‌های سطحی و توپوگرافی به نوعی از داده‌ها حذف و یا تعدیل شده و پس از تعیین بُعد (آنالیز ابعادی) آن‌ها را جهت به دست آوردن اطلاعاتی از ساختارهای زیرسطحی به شیوه‌ای مناسب مدل‌سازی کرد (خوجم لی، ۱۳۹۰; Vozoff, 1991; Dobrin & Savit, 1988).

۲-۲ بررسی اصول حاکم بر امواج مگنتوتلوریک

همانطور که قبلاً اشاره شد یک موج الکترومغناطیس تخت به سطح زمین برخورد می‌کند چون مقاومت ویژه زمین خیلی کمتر از اتمسفر است بنابراین سیگنال الکترومغناطیس به صورت یک موج در هوا سیر می‌کند ولی در زمین پخش^۴ و میرا می‌شود. معادلات دیفرانسیلی اساسی که رفتار میدان‌های الکترومغناطیسی را کنترل می‌کنند از معادلات ماکسول نتیجه می‌شوند که به صورت چهار معادله بیان می‌شوند.

۱-۲-۲ تئوری الکترومغناطیس

ماکسول قوانین مربوط به الکتریسیته و مغناطیس را توسط چهار معادله زیر مطرح کرد:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \text{قانون فارادی} \quad (1-2)$$

¹ Complex

² Impedance

³ Skin Depth

⁴ Diffusive

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{قانون آمپر} \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{عدم وجود تک قطبی مغناطیسی (قانون پیوستگی شار مغناطیسی)} \quad (3-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{قانون کولمب} \quad (4-2)$$

که در معادلات بالا واحد $\mathbf{E}$ (شدت میدان الکتریکی)، $\frac{V}{m}$ ، واحد $\mathbf{B}$ (القا مغناطیسی)، $\frac{Wb}{m^2}$ یا تسلا (T)، واحد $\mathbf{H}$ (شدت میدان مغناطیسی)، $\frac{A}{m}$ ، واحد $\mathbf{J}$ (چگالی جریان الکتریکی)، $\frac{A}{m^2}$ ، واحد $\mathbf{D}$ (جریان جابجایی)، $\frac{C}{m^2}$ ، واحد ρ (چگالی حجمی بار)، $\frac{C}{m^3}$ و واحد t زمان می باشند (Telford et al., 1990).

در مناطق دارای رسانایی معین به هنگام عبور جریان، بار چندانی ذخیره نمی شود و $\rho = 0$ می شود (به جز در رساناهای الکترولیتی) بنابراین در این مناطق رابطه (2-4) به صورت زیر در می آید:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad \&$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

همچنین معادلات مربوط به یک محیط خطی که در بررسی نحوه انتشار امواج MT به کار می رود به شرح ذیل می باشد:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \text{قانون اهم} \quad (5-2)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (6-2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (7-2)$$

در معادلات فوق σ (هدایت الکتریکی یا رسانندگی) بر حسب واحد $\frac{S}{m}$ ، ϵ (گذردهی الکتریکی) بر حسب واحد $\frac{F}{m}$ و μ (نفوذ پذیری مغناطیسی) بر حسب واحد $\frac{H}{A}$ یا $\frac{Tm}{A}$ می باشد (Moradzadeh, 1998; Telford et al., 1990).

با گرفتن کرل از دو معادله اول ماکسول و با استفاده از روابط فوق و با توجه به اینکه

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad \text{و} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad \text{می باشد داریم:}$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (۸-۲)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\sigma (\nabla \times \mathbf{E}) - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{E}) = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (۹-۲)$$

چنانچه تغییرات زمانی میدان‌ها را هارمونیک $e^{i\omega t}$ در نظر بگیریم این معادلات به صورت زیر درمی‌آیند:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{E} \quad (۱۰-۲)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} - \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{H} \quad (۱۱-۲)$$

روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) را می‌توان به صورت فشرده‌تر بیان نمود:

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} + (\mu\varepsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega) \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = 0 \quad (۱۲-۲)$$

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} + K^2 \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} = 0 \quad (۱۳-۲)$$

$$K^2 = \mu\varepsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega \quad (۱۴-۲)$$

رابطه (۱۲-۲) و (۱۳-۲) معادله هلمهولتز می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود خصوصیات سنگ و

فرکانس در عدد موج (K) خلاصه می‌شود، بخش اول رابطه (۱۴-۲) مربوط به جریان‌های جابجایی و بخش

دوم مربوط به جریان‌های رسانش می‌باشد.

برای هوا $\sigma = 0$ ، $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (F/m)$ ، $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (Tm/A)$ است که

ε_0 گذردهی الکتریکی خلاء و μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء می‌باشد، بنابراین فاکتور $\mu\varepsilon\omega^2$ در معادله

(۱۴-۲) از مرتبه 5×10^{-9} است که دلیلی بر عدم تضعیف امواج در هوا می‌باشد (Telford et al., 1990).

در سنگ‌ها معمولاً $\varepsilon \approx 10\varepsilon_0 \approx 9 \times 10^{-11} (F/m)$ ، $\mu \approx \mu_0 \approx 1.3 \times 10^{-6} (Tm/A)$ می‌باشد، با توجه

به فرکانس‌های مورد استفاده در روش MT که معمولاً کمتر از ۳۰۰۰ هرتز از این رو مولفه جریان جابجایی

قابل اغماض بوده و معادله هلمهولتز برای سنگ‌هایی با رسانندگی پایین و همچنین برای هوا به معادله

لاپلاس تبدیل می‌شود.

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} = 0 \quad (15-2)$$

همچنین برای یک رسانای خوب، بخش حقیقی معادله (۲-۱۲) (مولفه جریان جابجایی) حذف و تنها بخش موهومی آن باقی می ماند و معادله هلمهولتز تبدیل به معادله پخش^۱ می شود.

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} - i\mu\omega\sigma \begin{bmatrix} E \\ H \end{bmatrix} = 0 \quad (16-2)$$

در هر دو مورد فوق مشاهده می شود که فاکتور مربوط به جریان های جابجایی با توجه به گستره فرکانسی موردنظر در روش MT قابل صرف نظر کردن می باشند (Telford et al., 1990).

حل معادله (۲-۱۶) بسیار مشکل می باشد مگر آن که موج قطبیده تخت در نظر گرفته شود. تخت بودن امواج در گستره فرکانسی مورد نظر MT که بیشتر از 10^{-7} Hz می باشد توسط دانشمندان بسیاری بررسی و مورد تایید قرار گرفته است (Dobrin and Savit, 1988).

چنانچه میدان الکترومغناطیسی تختی در نظر گرفته شود که در آن موج در جهت z منتشر شود، صفحه xy صفحه قطبش باشد و مولفه های میدان ها به صورت زیر فرض شوند:

$$H = H_y(z, t)$$

$$E = E_x(z, t)$$

جواب معادله (۲-۱۶) به این صورت خواهد بود:

$$A = A_0 e^{-i(kz - \omega t)} = A_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \alpha z)} \quad (17-2)$$

$$\alpha = \left(\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right)^{\frac{1}{2}}, k = (1 - i)\alpha$$

A_0 بزرگی میدان های E و H در سطح زمین می باشد. از نظر فیزیکی تنها بخش حقیقی جواب معادله مورد نظر ماست بنابراین:

¹ Diffusion

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \alpha z) \quad (۱۸-۲)$$

ملاحظه می‌شود که دامنه میدان‌های E و H به طور نمایی نسبت به عمق کاهش می‌یابد و علاوه بر آن میدان‌ها نسبت به زمان و عمق تغییرات سینوسی همراه با تغییر فاز دارند. برای چنین موج تخت قطبیده شده در صفحه xy که در جهت z در داخل زمین منتشر می‌شود با در نظر گرفتن معادلات (۲-۲)، (۲-۵)، (۲-۶) و (۲-۱۸) روابط زیر را می‌توان بدست آورد (Moradzadeh, 1998):

$$H_y = H_{y0} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \alpha z) \quad (۱۹-۲)$$

که در آن H_{y0} اندازه H_y در سطح زمین است.

$$E_x = \frac{1}{\sigma} \left(-\frac{\partial H_y}{\partial z} \right) = \sqrt{2} \left(\frac{\alpha}{\sigma} \right) H_{y0} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \alpha z + 45^\circ) \quad (۲۰-۲)$$

با تقسیم رابطه (۲-۱۹) بر (۲-۲۰) رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{E_x}{H_y} = \sqrt{2} \left(\frac{\alpha}{\sigma} \right) e^{\frac{i\pi}{4}} = \frac{i\omega\mu}{k} \quad (۲۱-۲)$$

$$Z = \left| \frac{E_x}{H_y} \right| = (\omega\mu\rho)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{i\pi}{4}} \quad (۲۲-۲)$$

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (۲۳-۲)$$

در روابط فوق Z امپدانس موج برای یک زمین همگن با مقاومت ویژه ρ نامیده می‌شود.

با استفاده از واحدهایی که در عمل برای اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی $E \left(\frac{mv}{km} \right)$ و میدان‌های مغناطیسی H (بر حسب nT یا گاما) استفاده می‌شود و همچنین با قرار دادن $\omega = 2\pi/T$ (T پریود بر حسب ثانیه) و $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (Tm/A)$ رابطه (۲-۲۳) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\rho = 0.2T|Z|^2 \quad (\text{اهم-متر}) \quad (۲۴-۲)$$

که مقاومت ویژه حقیقی یک زمین همگن ایزوتوپ را نشان می‌دهد. همچنین رابطه (۲-۲۲) نشان می‌دهد که در چنین شرایطی فاز امپدانس ۴۵ درجه است و این بدین معنی است که E_x نسبت به H_y به

اندازه ۴۵ درجه جلو افتادگی فاز دارد.

۲-۲-۲ عمق پوسته

برای بیان میزان نفوذ امواج الکترومغناطیسی به داخل زمین، فاکتوری به نام عمق پوسته تعریف می‌شود. در یک زمین همگن، عمق پوسته (δ) عمقی است که دامنه موج به $1/e$ مقدارش در سطح زمین کاهش می‌یابد. برای به دست آوردن این فاکتور، در رابطه (۲-۱۸) مقدار $Z = \frac{1}{\alpha}$ قرار داده می‌شود و پس از ساده سازی رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{1/2} = 503 \left(\frac{\rho}{f} \right)^{1/2} \quad (2-25)$$

که در آن δ عمق پوسته بر حسب متر، ρ مقاومت ویژه (بر حسب $\Omega \cdot m$) و f فرکانس میدان (بر حسب Hz) می‌باشند. از این رابطه می‌توان دریافت که امواج EM در زمین‌های مقاوم عمق نفوذ زیادی داشته و یا هنگامی که فرکانس موج بالا باشد عمق نفوذ آن‌ها در زمین‌های رسانا چندان زیاد نخواهد بود.

هنگامی که $(\omega \mu \sigma)^{1/2}$ کوچک باشد، میدان الکترومغناطیسی بدون اینکه سریع میرا شود در محیط انتشار می‌یابد بنابراین مولفه مغناطیسی میدان الکترومغناطیسی نمی‌تواند جریان قابل توجهی را در زمین القا کند. از طرفی هنگامیکه $(\omega \mu \sigma)^{1/2}$ بزرگ باشد جریان‌های سطحی بزرگ میدان مغناطیسی ثانویه بزرگی را تولید می‌کند که غیر هم فاز با میدان اولیه است به طوریکه بخشی یا کاملاً اثر میدان اولیه را از بین می‌برد. واضح است که میدان الکترومغناطیسی می‌تواند به آسانی در مواد با مقاومت ویژه زیاد نفوذ کند اما این امواج توسط مواد رسانا تضعیف می‌شوند بنابراین هر روش اکتشافی که در آن امواج الکترومغناطیسی به کار گرفته می‌شود در تفکیک پذیری اجسام رسانا موثر است و همچنین بهترین روش برای مناطقی می‌باشد که توسط سنگ‌های مقاوم پوشیده شده است (Moradzadeh, 1998).

۳-۲ اثر ساختارهای مختلف زمین‌شناسی روی برداشت‌های MT

۱-۳-۲ ساختارهای یک بعدی

ساختارهای یک بعدی شامل چند لایه همگن افقی می‌باشد که مقاومت ویژه در آن‌ها تنها با عمق تغییر می‌کند. برای چنین ساختاری تغییرات افقی میدان‌ها صفر است. در ساختارهای یک بعدی امپدانس مستقل از جهت اندازه‌گیری می‌باشد یعنی در هر فرکانس $Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}$ یا $Z_{xy} = -Z_{yx}$ ، از این رو در چنین شرایطی $\rho_{xy} = \rho_{yx} = \rho_a$ و $|\varphi_{yx} - \varphi_{xy}| = 180^\circ$ که تابعی از فرکانس است، مقاومت ویژه ظاهری زمین لایه‌ای می‌باشد (Moradzadeh, 1998).

۲-۳-۲ تفسیر منحنی‌های سونداژ مگنتوتلوریک

برای تفسیر منحنی‌های سونداژ MT روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان از آنها به روش استفاده از مجانب‌ها، وارون‌سازی^۱ و تطبیق منحنی‌ها اشاره کرد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها استفاده از سر منحنی‌های مرجع و تطبیق منحنی‌های صحرائی با سر منحنی‌ها می‌باشد. از سرمنحنی‌های مرجع و نتایج آن معمولاً جهت تخمین مدل اولیه آزمون در مدل‌سازی وارون استفاده می‌شود (Kaufman & Keller, 1981). امروزه کاربرد این روش در تفسیر داده‌های سونداژ MT چندان رایج نمی‌باشد چرا که باید تطبیق منحنی‌ها، هم برای داده‌های مقاومت ویژه و فاز صورت گیرد و نتایج در مواردی که زمین بیش از سه لایه باشد از دقت کمی برخوردار بوده و علاوه بر آن بسیار وقت‌گیر و طاقت فرسا خواهد بود. به جای آن امروزه از روش‌های مدل‌سازی عددی پیشرو^۲ و یا غالباً از مدل‌سازی وارون^۳ به روش هموار و یا پارامتری استفاده می‌شود (خوجم‌لی، ۱۳۹۰).

^۱ Inversion

^۲ Numerical Forward Modeling

^۳ Inverse Modeling

۳-۳-۲ تبدیل عمق بوستیک^۱

به منظور دستیابی تخمینی از مقاومت ویژه به صورت تابعی از عمق، بوستیک (Bostick, 1977) روشی را ارائه کرد که به دلیل وارونه سازی سریع امپدانس، دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در یک فرکانس معین عمق (z) را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد (Dobrin and Savit, 1988).

$$z = \sqrt{\frac{\rho_a(\omega)}{\omega\mu}} \quad (26-2)$$

همچنین رابطه زیر، تقریبی از مقاومت ویژه واقعی را بر حسب عمق مشخص می‌کند.

$$\rho(z) = \rho_a(\omega) \frac{1-c}{1+c} \quad (27-2)$$
$$c = \frac{d(\log \rho_a)}{d(\log \omega)}$$

c شیب منحنی مقاومت ویژه ظاهری بر حسب فرکانس در مقیاس لگاریتمی را نشان می‌دهد.

۴-۲ ساختارهای دو بعدی

یک ساختار دو بعدی ژئوالکتریکی، ساختاری است که مقاومت ویژه الکتریکی و میدان‌ها علاوه بر تغییر نسبت به عمق، در یک جهت افقی نیز به طور جانبی تغییر می‌کند. بیشتر ساختارهای زمین شناسی مانند تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها، زون‌های همبری، دایک‌ها، دره‌های ریفتی و رودخانه‌ای تقریباً به صورت ساختارهای دوبعدی هستند. در ساختارهای دو بعدی خواص الکتریکی به موازات یک جهت افقی (مثلاً x) ثابت است که به آن جهت امتداد گفته می‌شود. برای مدل دو بعدی (شکل ۲-۲)، معادلات در هم کنش امواج تخت الکترومغناطیس برای دو وضعیت (مُد^۲) بررسی می‌شود (Moradzadeh, 1998; Vozoff, 1991). وقتی مولفه میدان الکتریکی در جهت امتداد قطبیده باشد و مولفه مغناطیسی عمود بر آن باشد این مد را

¹ Bostick

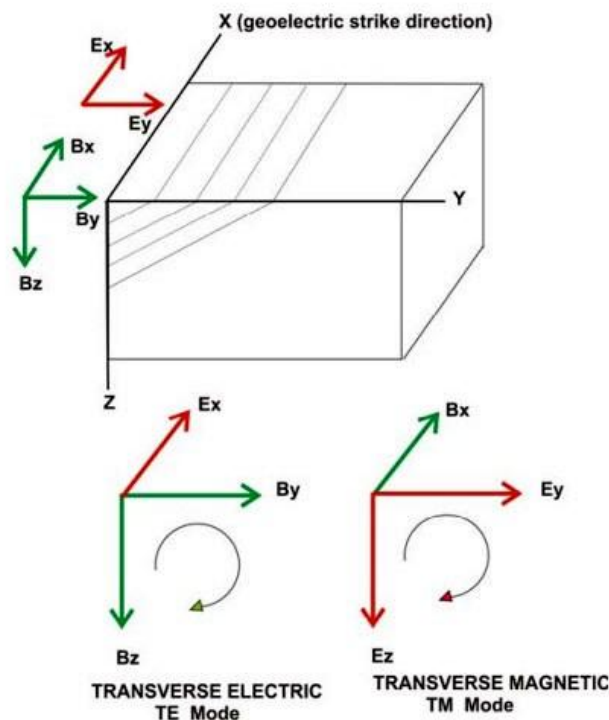
² Mode

حالت الکتریکی عرضی^۱ (TE) یا E موازی ($E_{\parallel}$) می نامند. حالت دوم موقعی است که مولفه میدان الکتریکی عمود بر امتداد باشد ($E_{\perp}$) یا زمانی که مولفه میدان مغناطیسی در جهت امتداد قطبیده باشد این مد را حالت مغناطیسی عرضی^۲ (TM) می نامند.

رفتار این دو نوع قطبش در برخورد با ناهمگنی های 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 ناهمگنی های جانبی کمتر مغشوش می شود و نسبت به این ناهمگنی های 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 ناهمگنی های 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 آنومالی های آن دارای طبیعت گالوانیکی می باشد در حالیکه مد TE ساختارها را باردار نمی کند و آنومالی های 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 آنومالی های سه بعدی نزدیک سطح تاثیر پذیرتر از مد TE می باشد (Berdichevsky et al., 1998).

¹ Transverse Electric

² Transverse Magnetic



شکل ۲-۲: موقعیت میدان‌های الکترومغناطیسی برای یک ساختار ژئوالکتریکی دو بعدی (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.

۵-۲ تانسور امپدانس^۱

همانطور که قبلاً اشاره شد در اکتشافات MT در یک زمین همگن یا لایه‌های افقی رابطه بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر فرکانس با یک امپدانس اسکالر به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$Z(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = -\frac{E_y(\omega)}{H_x(\omega)} \quad (2-28)$$

اما در یک زمین با ساختار دو بعدی و یا سه بعدی که در طبیعت نیز معمول تر است، ساختار الکتریکی زیر

¹ Impedance tensor

سطحی را نمی‌توان با امپدانس اسکالر مختلط بیان کرد. برای چنین ساختارهایی رابطه بین میدان الکتریکی و مغناطیسی در هر ایستگاه MT با یک تانسور امپدانس و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} & Z_{xz} \\ Z_{yx} & Z_{yy} & Z_{yz} \\ Z_{zx} & Z_{zy} & Z_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad (29-2)$$

در روش مگنتوتلوریک E_z جز برای فرکانس‌های بسیار بالا تقریباً صفر است. زیرا مولفه قائم میدان الکتریکی خیلی سریع میرا می‌شود. از این رو برای یک ساختار دو بعدی تانسور امپدانس به صورت زیر تعریف می‌شود (خوجم لی، ۱۳۹۰؛ Cantwell, 1960):

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (30-2)$$

که در آن:

$$\mathbf{Z}(\omega) = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (31-2)$$

$\mathbf{Z}(\omega)$ یک ماتریس مختلط است و به تانسور امپدانس هر فرکانس معروف است.

پس هر مولفه تانسور امپدانس برابر می‌شود با:

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j} \quad (i, j = x, y)$$

در زمین یک بعدی علاوه بر اینکه مولفه‌های قطر اصلی تانسور امپدانس صفر می‌باشند، اندازه مولفه‌های قطر فرعی نیز با هم برابرند، یعنی:

$$Z_{xy} = -Z_{yx}$$

در زمین دو بعدی چنانچه یکی از محورها به موازات امتداد ساختار باشد، مولفه‌های قطر اصلی صفر می‌شوند:

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0 \quad \text{و} \quad Z_{xy} \neq Z_{yx}$$

به دلیل اینکه در زمان برداشت به ندرت امتداد آنومالی الکتریکی را می‌دانیم بنابراین محورهای

برداشت در زوایای دلخواه نسبت به امتداد آنومالی قرار می‌گیرند. سپس جهت تعیین امتداد ساختار، با چرخش تانسور امپدانس سعی می‌شود که عناصر قطر اصلی تانسور امپدانس حذف شود. البته چنانچه تانسور امپدانس متقارن نباشد یا اینکه مقداری نوفه در داده‌ها موجود باشد این عناصر کاملاً حذف نمی‌شوند ولی می‌توانیم مقادیر آن‌ها را به حداقل برسانیم. برای به دست آوردن محورهای موازی و عمود بر امتداد آنومالی که به آن‌ها محورهای اصلی می‌گویند، محورهای برداشت را تحت زاویه θ به صورت ساعتگرد حول محور قائم دوران می‌دهیم (Telford et al., 1990; Kaufman and Keller, 1981).

تانسور امپدانس Z را می‌توان با یک ماتریس چرخش R به هر سیستم مختصات با زاویه θ چرخاند:

$$Z'(\theta) = RZR^T, \quad R = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (۳۲-۲)$$

R^T ترانهاده R می‌باشد.

رابطه بین عناصر تانسور امپدانس اولیه و عناصر امپدانس اصلی چرخش یافته (Z'_{yx}, Z'_{xy}) به صورت زیر می‌باشد (Eggers, 1982):

$$Z'_{xx} = Z_2 + Z_3 \sin 2\theta + Z_4 \cos 2\theta \quad (۳۳-۲) \text{ الف}$$

$$Z'_{xy} = Z_1 + Z_3 \cos 2\theta - Z_4 \sin 2\theta \quad (۳۳-۲) \text{ ب}$$

$$Z'_{yx} = -Z_1 + Z_3 \cos 2\theta - Z_4 \sin 2\theta = -Z'_{xy}(\theta + \pi/2) \quad (۳۳-۲) \text{ ج}$$

$$Z'_{yy} = -Z_2 - Z_3 \sin 2\theta - Z_4 \cos 2\theta = Z'_{xx}(\theta + \pi/2) \quad (۳۳-۲) \text{ د}$$

پارامترهای Z_4, Z_3, Z_2, Z_1 به صورت زیر تعریف می‌شوند (Kaufman and Keller, 1981):

$$Z_1 = (Z_{xy} - Z_{yx})/2 = (Z'_{xy}(\theta) - Z'_{yx}(\theta))/2 \quad (۳۴-۲) \text{ الف}$$

$$Z_2 = (Z_{xx} + Z_{yy})/2 = (Z'_{xx}(\theta) + Z'_{yy}(\theta))/2 \quad (۳۴-۲) \text{ ب}$$

$$Z_3 = (Z_{xy} + Z_{yx})/2 \quad (۳۴-۲) \text{ ج}$$

$$Z_4 = (Z_{xx} - Z_{yy})/2 \quad (۳۴-۲) \text{ د}$$

از معادلات (۳۳-۲) می‌توان چنین نتیجه گرفت که:

Z_1 و Z_2 ثابت‌های (نامتغیرهای) چرخشی^۱ هستند و به جهت محورهای اندازه‌گیری بستگی ندارند. اما پارامترهای Z_3 و Z_4 متغیرهای چرخشی هستند و به زاویه چرخش (θ) وابسته هستند. علامت پریم بیانگر این است که عناصر تانسور امپدانس چرخش یافته اند (θ : زاویه ساعتگرد می‌باشد).

زاویه چرخش θ بایستی طوری انتخاب شود که عناصر قطر اصلی تانسور Z' صفر و یا حداقل گردد.

یعنی:

$$Z'(\theta) = \begin{pmatrix} 0 & Z'_{xy} \\ Z'_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (۳۵-۲)$$

به این ترتیب عناصر غیر قطری $Z'(\theta)$ به عنوان مولفه‌های اصلی تانسور امپدانس شناخته می‌شود و با استفاده از مولفه‌های حقیقی (Re) و مجازی (Im) آن‌ها می‌توان مقاومت ویژه ظاهری (ρ) و همچنین فاز (φ) امپدانس (اختلاف فاز بین مولفه میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی) را به صورت زیر محاسبه نمود. (Kaufman and Keller, 1981).

$$\rho'_{xy} = 0.2T|Z'_{xy}|^2, \quad \varphi'_{xy} = \tan^{-1}(ImZ'_{xy}/Re(Z'_{xy})) \quad (۳۶-۲)$$

$$\rho'_{yx} = 0.2T|Z'_{yx}|^2, \quad \varphi'_{yx} = \tan^{-1}(ImZ'_{yx}/Re(Z'_{yx}))$$

۲-۵-۱ محاسبه زاویه راستا

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای تعیین امتداد ساختارهای دو بعدی یا تعیین زاویه چرخش (θ_0) که در آن تانسور امپدانس به فرم معادله (۳۵-۲) درآید، بایستی زاویه چرخش (θ_0) در هر فرکانس طوری محاسبه گردد تا رابطه زیر پیشینه گردد (Moradzadeh, 1998):

$$|Z'_{xy}(\theta_0)|^2 + |Z'_{yx}(\theta_0)|^2 \quad (۳۷-۲)$$

در چنین حالتی زاویه چرخش (θ_0) و در نتیجه تعیین امتداد الکتریکی ساختارهای زیر سطحی به

¹ Rotation Invariant

کمک رابطه زیر تعیین می‌شود (Vozoff, 1991):

$$\theta_0 = \frac{1}{4} \tan^{-1} \frac{[(Z_{xx} - Z_{yy})(Z_{xy} + Z_{yx})^* + (Z_{xx} - Z_{yy})^*(Z_{xy} + Z_{yx})]}{|Z_{xx} - Z_{yy}|^2 - |Z_{xy} + Z_{yx}|^2} \quad (38-2)$$

علامت * نشان دهنده مزدوج مختلط است. زاویه راستایی که با استفاده از رابطه (37-2) و (38-2) به دست می‌آید ۹۰ درجه ابهام دارد. در نتیجه تنها با استفاده از عناصر تانسور امپدانس نمی‌توان زاویه راستای منحصر به فردی برای ساختارهای دو بعدی به دست آورد (Telford et al., 1990; Dobrin and Savit, 1988; Vozoff, 1991). این ابهام می‌تواند با استفاده از تیپر^۱ یا دیگر اطلاعات مستقل مانند اطلاعات زمین شناسی برطرف شود.

یک روش کیفی برای تعیین امتداد ساختارهای ژئوالکتریکی، رسم نمودارهای قطبی^۲ تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف می‌باشد. این نمودارها فقط برای مولفه‌های Z_{xx} و Z_{xy} مطابق روابط (33-2) و (34-2) در چندین زاویه چرخش بین ۰ تا ۳۶۰ درجه رسم می‌شوند. برای ساختارهای ژئوالکتریکی یک بعدی نمودارهای قطبی مولفه اصلی تانسور امپدانس (Z_{xy}) در هر فرکانس به شکل دایره می‌باشند. برای ساختارهای دو و سه بعدی نمودارهای قطبی مولفه اصلی تانسور امپدانس در یک راستا کشیده شده‌اند که این راستا موازی یا عمود بر امتداد ساختار است. نمودارهای قطبی مولفه قطر اصلی تانسور امپدانس (Z_{xx}) برای ساختارهای یک بعدی صفر می‌باشند، برای ساختارهای دو و سه بعدی این مولفه مقدار غیر صفر دارد. نمودارهای قطبی (Z_{xx}) برای ساختارهای ژئوالکتریکی دو بعدی شکلی متقارن مانند یک گلبیگ دارد و اندازه‌اش کوچک است ولی هنگامی که ساختارهای ژئوالکتریکی سه بعدی در منطقه غالب باشند این نمودارهای قطبی در یک راستا امتداد دارند و اندازه‌شان قابل مقایسه با نمودارهای قطبی مولفه اصلی تانسور امپدانس می‌باشد. برای تکمیل کردن نتایج محاسبه امتداد ساختار، نمودارهای قطبی در هر فرکانس برای هر ایستگاه رسم می‌شوند (Moradzadeh, 1998).

¹ Tipper

² Polar Diagrams

با توجه به نامتغیرهای چرخشی رابطه (۲-۳۴ الف) و (۲-۳۴ ب) می‌توان پارامتر زیر را بیان کرد
(Telford et al., 1990; Vozoff, 1991).

$$S = \frac{|Z_2|}{|Z_1|} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (۲-۳۹)$$

این پارامتر را چولگی (عدم تقارن یا اسکيو)^۱ می‌نامند که نامتغیر چرخشی است. پارامتر دیگر بیضی‌وارگی^۲ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = \frac{|Z_4|}{|Z_3|} = \frac{|Z'_{xx} - Z'_{yy}|}{|Z'_{xy} + Z'_{yx}|} \quad (۲-۴۰)$$

این پارامترها می‌توانند در تعیین ابعاد^۳ ساختارهای زیر سطحی مفید باشند. به منظور ارائه مدلی با مفهوم از وضعیت ساختارهای زیرسطحی، ابعاد ژئوالکتریکی آن‌ها بایستی به روشی مناسب قبل از مدل سازی عددی تعیین گردد چرا که در غیر این صورت نتایج تفسیر انجام گرفته ممکن است سبب گمراهی بیشتر گردد. روش‌های متفاوتی برای تعیین بعد ساختارهای زیر سطحی وجود دارد اما در این تحقیق تعداد محدودی از آن‌ها که به صورت کمی در تفسیر داده‌های MT استفاده می‌شود، بررسی می‌شود.

مقدار چولگی و بیضی‌وارگی برای ساختارهای یک بعدی و دو بعدی صفر و یا نزدیک صفر می‌باشد. البته کمیت‌های فوق برای تعیین ساختار زیر سطحی خیلی قابل اعتماد نیستند برای مثال اگر داده‌ها به نوفه آلوده باشند و یا متاثر از ناهمگنی‌های الکتریکی نزدیک سطح زمین گردند این پارامترها برای ساختار دوبعدی دیگر صفر نمی‌باشند. به دلیل این مساله، پارامتر چولگی (اسکیو) حساس به فاز^۴ به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری ابعاد ساختار ناحیه‌ای پیشنهاد شد (Bahr, 1988) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{C^{\frac{1}{2}}}{|Z_1|} \quad (۲-۴۱)$$

که در آن $C = [Im(Z_3 \cdot Z_4^*)] - [Im(Z_1 \cdot Z_2^*)]$ و $*$ به مزدوج مختلط عبارت اشاره می‌کند.

¹ Skew

² Ellipticity

³ Dimensionality

⁴ Phase sensitive skew

یکی از مسائل اصلی، عدم توافق بر روی کران بالای مقدار چولگی (اسکیو) برای ساختارهای سه بعدی می‌باشد (Moradzadeh, 1998). برخی از محققین محدوده فوقانی اسکیو را برای ساختارهای دو بعدی بین ۰/۱۲ تا ۰/۲ تعریف کردند (Reddy et al., 1977; Hohmann and Ting, 1981). در حالی که دیگر دانشمندان دامنه تغییر این پارامتر را بین ۰/۰۱ تا ۰/۷۲ به واسطه اثرات اغتشاشات ناهمگنی‌های سطحی تعریف کردند (Hermance, 1982). پس به طور قطع صرفاً با استفاده از این پارامتر نمی‌توان سه بعدی بودن ساختار زیر سطحی را مشخص نمود. تجربه حاصل از مدل‌سازی داده‌های واقعی نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد مقادیر متوسط چولگی حدود ۰/۴ و یا حتی بیشتر است در حالی که سایر شواهد اشاره به ساختارهای یک و یا دو بعدی دارند (Kao & Orr, 1982). دلیل این مساله حساسیت بیش از حد این پارامترها به نوفه‌های موجود در داده‌های اندازه‌گیری شده MT است. برای رفع این مشکل اندیس‌های وزنی نرمال شده (D_1, D_2, D_3) که سهم هر یک از ساختارهای یک، دو و یا سه بعدی زمین را نشان می‌دهد معرفی شد (Kao & Orr, 1982). این شاخص‌ها نیز یک اندازه مطلق از ابعاد زمین را نمی‌دهند، اما وقتی به صورت کلی تفسیر می‌شوند ممکن است یک تخمین از توزیع متفاوت ساختارها را در زمین ارائه دهند. روابط مرتبط با این شاخص‌ها در زیر آورده شده است:

$$\begin{aligned} D_1 &= |Z_1|/\gamma \\ D_2 &= |M_1|/\gamma \\ D_3 &= |Z_2|/\gamma \\ D'_3 &= |M_2|/\gamma \end{aligned} \quad (۴۲-۲)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \gamma &= |Z_1| + |M_1| + (|Z_2| + |M_2|)/2 \\ M_1 &= [Z'_{xy}(\theta_0) + Z'_{yx}(\theta_0)]/2 \\ M_2 &= [Z'_{xx}(\theta_0) - Z'_{yy}(\theta_0)]/2 \end{aligned}$$

و θ_0 زاویه ای است که در آن $|M_1|$ به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد.

در اینجا شاخص D_3 میانگین شاخص‌های D_3 و D'_3 می‌باشد. تمامی این شاخص‌ها بین صفر و یک

تغییر می‌کنند. برای ساختارهای یک بعدی، شرایط $D_1 > D_2 > D_3$ قابل انتظار است. D_2 و D_1 رفتار عکس با هم دارند و مقادیر بزرگ D_2 و D_3 (بیشتر از ۰/۲) بیانگر این است که ساختارهای دو بعدی و سه بعدی نیز در منطقه وجود دارد (Beamish, 1986) (هنگامی که کیفیت داده‌های برداشت شده بسیار بالا باشد یعنی اینکه همدوسی^۱ چندگانه بین مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی حدود ۰/۹ یا بیشتر باشد مقادیر بیشتر از ۰/۱ برای اندیس‌های D_2 و D_3 بیانگر ساختارهای دو بعدی و سه بعدی در منطقه است ولی در باند مرده فرکانسی (۰/۱ تا ۱۰ هرتز) یعنی هنگامی که همدوسی چندگانه بین مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی بین ۰/۷ تا ۰/۹ باشد برای ساختارهای دو بعدی و سه بعدی این مقدار ۰/۱ به ۰/۲ حتی ۰/۳ نیز می‌رسد (Moradzadeh, 1998)).

۶-۲ تابع تبدیل مغناطیسی یا تیپر^۲

رابطه بین مولفه‌های قائم و افقی میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در هر فرکانس به صورت زیر بیان می‌شود (Parkinson, 1962; Sims & Bostick, 1969).

$$H_z = T_{zx}H_x + T_{zy}H_y \quad (۴۳-۲)$$

T_{zy} و T_{zx} توابع تبدیل مغناطیسی یا همان تیپر می‌باشند که توابع مختلط فرکانسی هستند. این توابع نسبت به تغییرات جانبی رسانندگی خیلی حساس می‌باشد. در یک ساختار دو بعدی که امتداد آن در جهت x می‌باشد در حالت TM مولفه قائم میدان مغناطیسی (H_z) صفر خواهد شد و در حالت TE چون $H_x = 0$ می‌باشد بنابراین رابطه (۴۳-۲) به شکل زیر ساده می‌شود (Vozoff, 1972):

$$H_z = T_{zy}H_y \quad (۴۴-۲)$$

در ساختارهای سه بعدی اندازه و جهت تیپر با چرخش ثابت می‌ماند و اندازه آن به صورت زیر تعریف می‌شود (Vozoff, 1991):

^۱ Coherency

^۲ Magnetic transfer function or Tipper

$$|T| = \left(|T_{zx}|^2 + |T_{zy}|^2 \right)^{1/2} \quad (45-2)$$

که در آن $T_{zx} = a + ib$ و $T_{zy} = c + id$ می‌باشد. جهت تیپر φ_T را با استفاده از رابطه زیر می‌توان به دست آورد:

$$\varphi_T = \frac{(a^2 + c^2) \tan^{-1}(c/a) + (b^2 + d^2) \tan^{-1}(d/b)}{|T|^2} \quad (46-2)$$

برای ساختار دو بعدی این رابطه به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\varphi_T = \tan^{-1}(T_{zy}/T_{zx}) \quad (47-2)$$

چون H_z ضعیف است مقدار تیپر کمتر از ۱ می‌باشد. از آنجایی که جهت تابع تیپر به طرف ناهمگنی‌های الکتریکی است از آن می‌توان برای تعیین جهت امتداد نیز استفاده کرد. یک روش مناسب برای تفسیر داده‌های تیپر استفاده از بردارهای القایی^۱ (بردار پارکینسون)^۲ می‌باشد. اندازه و جهت این بردارها می‌تواند از روابط (45-2) و (47-2) محاسبه گردد. به دلیل اینکه تیپر یک کمیت مختلط است پس جهت و اندازه آن، برای هر دو بخش حقیقی و موهومی آن تعریف می‌شود. جز حقیقی بردار القایی تمایل دارد که از رسانایی بالاتر به سمت رسانایی کمتر جهت گیری کند از این رو در عمل، جهت جزء حقیقی بردار القایی معکوس می‌شود تا آن‌ها به طرف آنومالی‌های هادی جهت‌گیری نمایند. جهت تیپر به طور مثبت و ساعتگرد نسبت به نصف‌النهار ژئومغناطیسی محلی، اندازه‌گیری می‌شود و مقدار آن از ۱۸۰- تا ۱۸۰ درجه تغییر می‌کند (Moradzadeh, 2003b).

۷-۲ اثر جابجایی ایستا^۳

مساله اصلی که در سونداژ 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 (۲-۳ الف)).

^۱ Induction's arrow

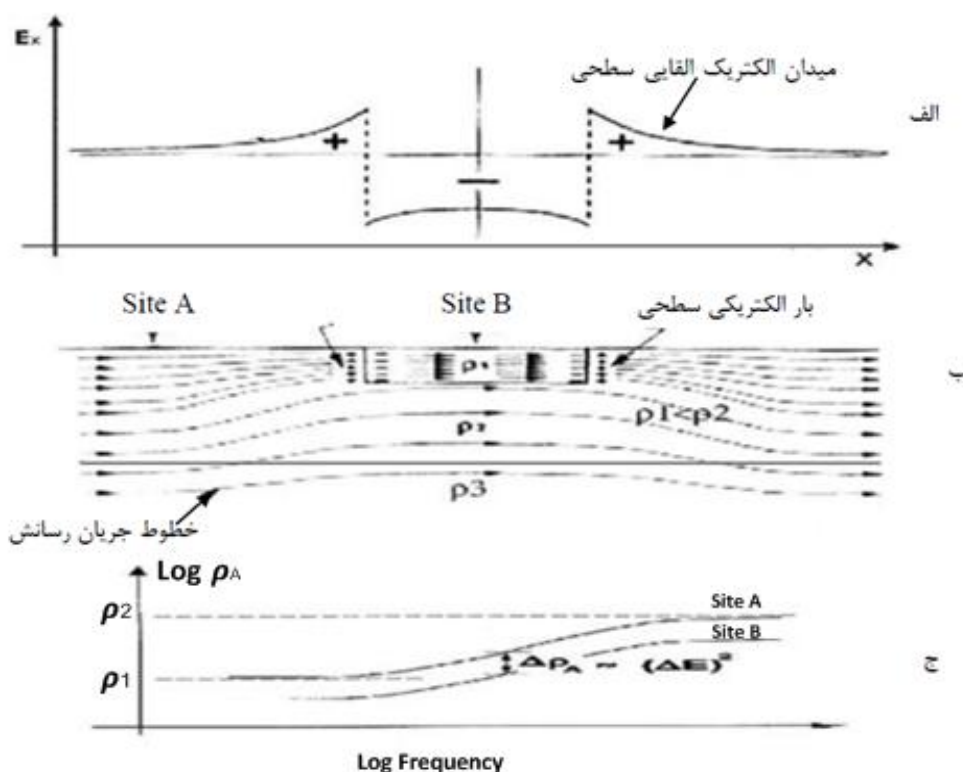
^۲ Parkinson's arrow

^۳ Static Shift

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 (۳-۲) الف)) این کاهش در میدان الکتریکی، نمودار مقاومت ویژه محاسبه شده را در محل سونداژ B نسبت به نمودار سونداژ A نیز کاهش می‌دهد. این اثر بر روی تمام فرکانس‌ها ثابت است و وقتی داده‌های سونداژ مقاومت ویژه را در مقیاس لگاریتمی کامل ترسیم می‌کنیم منحنی مقاومت ویژه مستقل از فرکانس به سمت پایین جابجا می‌شود (شکل (۳-۲) ج)) و اگر مقاومت ویژه سطحی جسم نسبت به محیط اطراف بیشتر باشد منحنی مقاومت ویژه سونداژ MT به طرف بالا جابجا می‌شود.

در شکل (۳-۲) اگر مقاومت ویژه توده سطحی (ρ_1) کمتر از مقاومت ویژه زمینه (ρ_2) باشد آنگاه منحنی سونداژ مقاومت ویژه در محل ایستگاه B به اندازه ثابت ($\Delta\rho$) نسبت به منحنی مشابه در محل سونداژ A به طور مستقل از فرکانس به سمت پایین جابجا می‌شود. اگر ($\rho_2 < \rho_1$) باشد آنگاه جابجایی منحنی مقاومت ویژه در 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, 2003a).



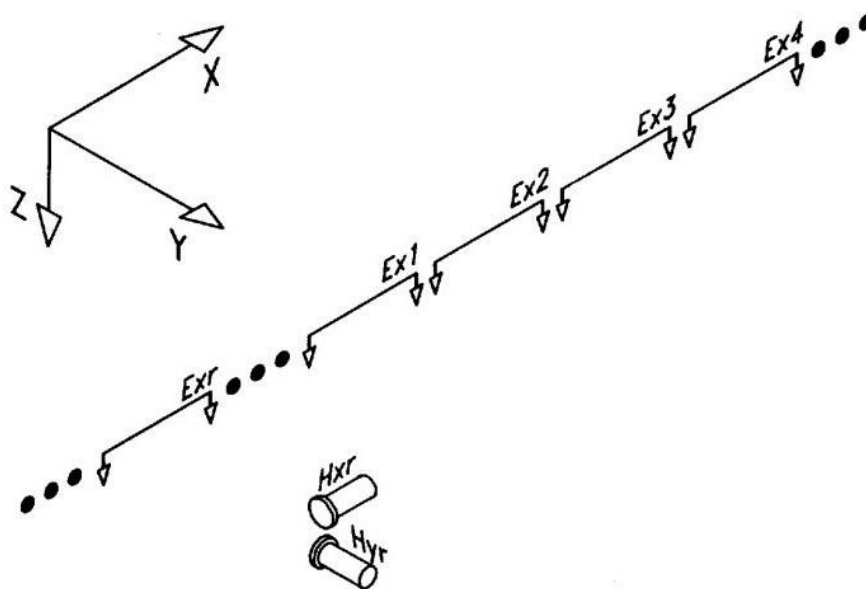
شکل ۲-۳: الف- تغییر میدان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار در مجاورت ناهمگنی جانبی ب- تمرکز جریان الکتریکی در زون هادی ج- کاهش مقاومت ویژه ظاهری در تمام فرکانس‌ها در ایستگاه B (Mradzadeh, 2003a).

۲-۷-۱ روش‌های تصحیح جابه‌جایی ایستا

در تفسیر داده‌های MT، جابه‌جایی ایستاتیکی که به علت وجود ناهمگنی‌های سطحی الکتریکی و یا به علت وجود توپوگرافی ایجاد می‌شود باید قبل از مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها حذف یا تعدیل شود. روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارند.

یکی از این روش‌ها، میانگین‌گیری فضایی از سونداژهای MT است. در این روش، مقاومت ظاهری میانگین هراستگاه و مقاومت ظاهری میانگین منطقه، برای ایستگاه‌های احاطه کننده سونداژ مورد نظر محاسبه می‌شوند. سپس منحنی مقاومت ظاهری برای هر سونداژ، با مقداری برابر با اختلاف بین مقاومت میانگین ایستگاه و مقاومت میانگین منطقه جابه‌جا می‌شود. این روش نتایج نسبتاً قابل قبول‌تری نسبت به مقاومت‌های میانگین‌گیری نشده ارائه می‌دهد (Sternberg et al., 1982).

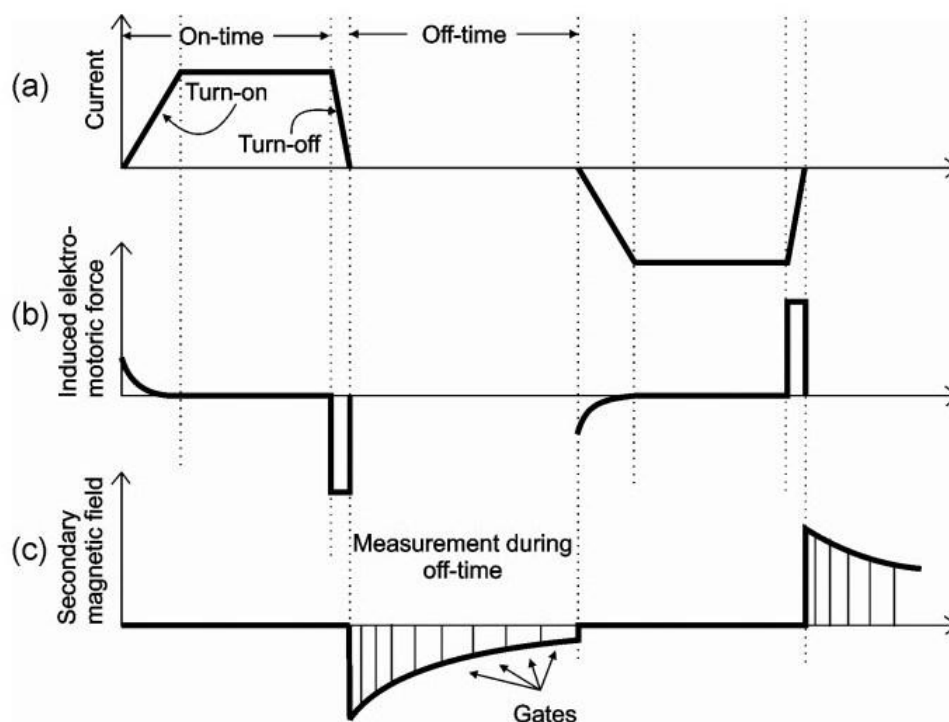
یکی از انواع روش‌های حذف اثرات جابجایی ایستا برداشت داده‌های MT با آرایش پروفیل زنی الکترومغناطیسی یا EMAP است (Bostick, 1986; Torres-Verdin, 1985). این روش در واقع یک تکنیک فیلترگیری فضایی پایین گذر است. در این روش، داده‌ها مطابق شکل (۴-۲) در انتهای دو قطبی‌های الکتریکی که در امتداد خطوط برداشت و عمود بر امتداد زمین‌شناسی مورد نظر هستند میدان الکتریکی را به صورت پیوسته اندازه می‌گیرند. به علت اینکه تغییرات میدان مغناطیسی بسیار کمتر از تغییرات میدان الکتریکی در فاصله‌های یکسان می‌باشند داده‌های میدان مغناطیسی در تعداد نقاط کمتری نسبت به میدان الکتریکی در طول پروفیل جمع‌آوری می‌شوند (Torres-verdin and Bostik, 1990). این روش به گونه قابل ملاحظه‌ای اثرات جابه‌جایی ناشی از ناهمگنی‌های سطحی سه بعدی را برطرف می‌کند. روش EMAP، تکنیک نسبتاً گرانی است و برای بررسی‌های دقیق در محدوده‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای اصلاح داده‌های MT که قبلاً برداشت شده‌اند استفاده نمی‌شود.



شکل ۴-۲: آرایش برداشت روش EMAP (Dobrin & Savit, 1988)

در جابه‌جایی استاتیکی تنها میدان الکتریکی تحت تاثیر قرار می‌گیرد و این خود مبنایی برای روش دیگر است. یعنی از تکنیکی استفاده کنیم که تنها میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند. روش سونداژ الکترومغناطیس حوزه زمان (TEM) حلقه مرکزی در این میان روش تقریباً کارآمدی است (Sternberg et al., 1988).

در روش TEM جریانی به صورت پالسی شکل (نیم مربعی، نیم سینوسی و یا رمپی شکل) و در زمانی کوتاه (چند میلی ثانیه) به درون حلقه^۱ فرستنده ارسال می‌شود و اندازه‌گیری میدان مغناطیسی القایی پس از قطع جریان (میدان اولیه) در بازه‌های زمانی مختلف توسط پیچه^۲ گیرنده صورت می‌گیرد (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵: اصول اندازه‌گیری روش TEM (a) جریان را در حلقه فرستنده نشان می‌دهد. (b) نیروی الکترومغناطیسی القایی را در زمین نشان می‌دهد. (c) میدان مغناطیسی ثانویه اندازه‌گیری شده توسط پیچه گیرنده را نشان می‌دهد (Christiansen, 2006).

داده‌های اندازه‌گیری شده (میدان مغناطیسی القایی) در پنجره‌های زمانی ثبت می‌شوند که کانال یا

^۱ Loop

^۲ Coil

گیت^۱ نامیده می‌شوند. در کانال‌های انتهایی رابطه زیر بین مولفه قائم میدان مغناطیسی، زمان و خصوصیات زمین برقرار است:

$$H_z \approx 2\mu MR^3 (\mu\sigma)^{3/2} / 4\pi R^3 \times 15\pi^{1/2} t^{3/2} = (\mu M/30)(\mu\sigma/\pi t)^{3/2} \quad (48-2)$$

R فاصله بین فرستنده و گیرنده است. و M ممان مغناطیسی دوقطبی فرستنده است که $M = IA$. پیچ‌گیرنده $\dot{H}_z = \frac{dH_z}{dt}$ را اندازه می‌گیرد بنابراین:

$$\dot{H}_z \approx \mu M (\mu\sigma)^{3/2} / 20 \pi^{3/2} t^{5/2} \quad (49-2)$$

هدف به دست آوردن مقاومت ویژه ظاهری بر حسب زمان با استفاده از ولتاژ القایی $(\frac{dH_z}{dt})$ است. همانطور که می‌دانیم رابطه بین هدایت الکتریکی و مقاومت ویژه به صورت $\sigma = 1/\rho \approx 1/\rho_a$ می‌باشد. در نتیجه رابطه مقاومت ویژه ظاهری به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\rho_a(t) \approx (\mu/\pi t)(\mu M/20\dot{H}_z t)^{2/3} \quad (50-2)$$

و با داشتن مقاومت ویژه ظاهری بر حسب زمان می‌توان برای داده‌های TEM مدل‌سازی را انجام داد. در روش TEM عمق پخش (معادل عمق پوسته در روش حوزه فرکانس است) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d = (2t/\sigma\mu)^{1/2} \quad (51-2)$$

مشاهده می‌شود در روش حوزه زمان هر چقدر زمان بیشتری بگذرد جریان القایی به عمق بیشتری داخل زمین نفوذ می‌کند و هر چقدر هدایت زمین بیشتر باشد عمق نفوذ جریان القایی داخل زمین کمتر است (Telford et al., 1990).

¹ Channel or Gate

فصل سوم

خلاصه‌ای از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۱-۳ مقدمه

در این فصل به بیان زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی حوضه رسوبی کپه داغ پرداخته می‌شود همچنین چینه‌شناسی، گسل‌های موجود در منطقه و وضعیت هیدروکربوری منطقه مورد مطالعه، بررسی می‌شود.

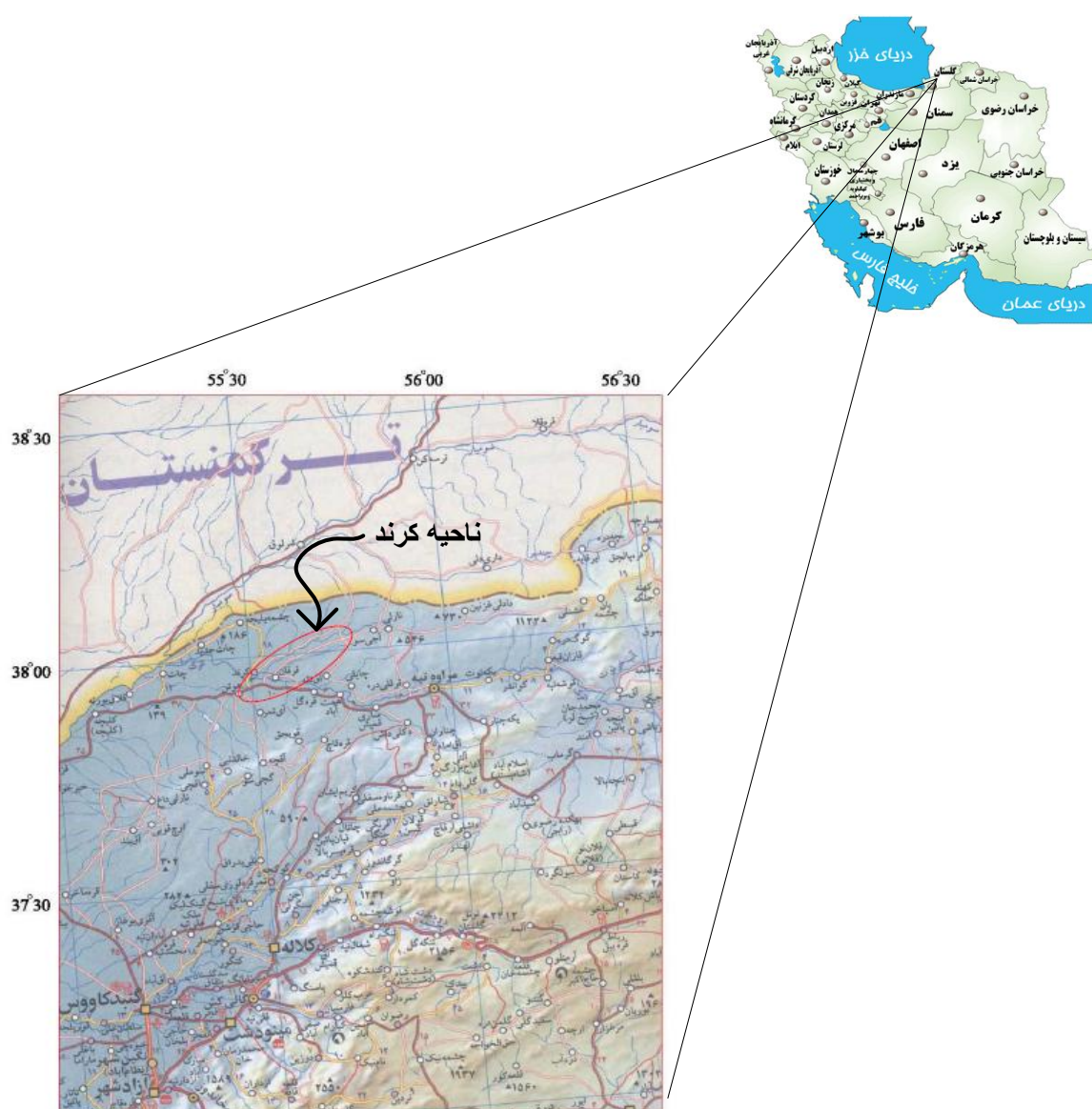
۲-۳ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه رسوبی کپه داغ کمربندی با روند شمال غرب- جنوب شرق می‌باشد که ما بین سپر توران از شمال و ایران مرکزی در جنوب قرار گرفته است. این کمر بند ارتفاعی در حدود ۳۰۰۰ متر داشته که حدود ۲۰۰۰ متر بالاتر از دشت ترکمن قرار می‌گیرد. کم عرض‌ترین و مرتفع‌ترین بخش این کمر بند در قسمت شرق و مرکزی آن قرار دارد که به سمت غرب عرض آن بیشتر شده و در عوض ارتفاع آن کمتر می‌گردد تا به سرزمین‌های کم ارتفاع حاشیه جنوب شرقی دریای خزر می‌رسد (قرابیگی و همکاران، ۱۳۸۷). منطقه مورد مطالعه ساختمان کردند می‌باشد که در شمال غربی کپه داغ قرار دارد. ساختمان کردند در بخش شرقی استان گلستان و در حدود ۹۰ کیلومتری شمال- شمال غربی شهرستان کلالة و در حدود ۳۰ کیلومتری غرب- جنوب غربی شهرستان مراوه تپه و در نزدیکی مرز ایران با ترکمنستان قرار دارد. شکل (۱-۳) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن را نشان می‌دهد.

۳-۳ آب و هوای منطقه

منطقه کپه داغ از لحاظ مورفولوژیکی شامل مناطق کوهستانی شرق و شمال، مناطق تپه ماهوری غرب و شمال غرب و مناطق دشت گرگان می‌باشد که اکثر مناطق از رسوبات بادی لس پوشیده شده است. این لس‌ها ساختارهایی ناتراکم و تحکیم نیافته هستند، به طوری که آب باران از سطوح بالاتر وارد آن می‌شود و در مناطق عمیق‌تری نزدیک به کف دره‌ها از آن‌ها خارج می‌شود. منطقه کپه داغ دارای اقلیمی معتدل (نیمه مرطوب تا نیمه خشک) تا آب و هوای معتدل خزری می‌باشد. بر اساس اطلاعات سی سال

گذشته سازمان هواشناسی کشور میزان بارندگی بین ۲۵۰ تا ۴۰۰ میلی متر در سال می باشد که بیشترین میزان بارندگی در ماه های اسفند و خرداد است و در ماه های دیگر میزان بارش متفاوت است. گرم ترین ماه های سال با متوسط حداقل دما ۲۵ درجه سانتی گراد و حداکثر دما ۳۵ درجه سانتی گراد در تیر و مرداد و سردترین ماه های سال با متوسط حداقل دما منفی ۴ درجه سانتی گراد و حداکثر ۱۰ درجه سانتی گراد در دی و بهمن ماه است (قزایی و همکاران، ۱۳۸۷).



شکل ۳-۱: موقعیت ساختمان کرد و نقشه راه های منطقه

۴-۳ بررسی تحولات زمین شناسی کپه داغ و ساختمان کنند

حوضه رسوبی کپه داغ به دلیل در برداشتن میدان های گازی و موقعیت تکتونیکی در فصل مشترک دو ابر قاره اوراسیا و گندوانا از اهمیت زیادی برخوردار است، به همین دلیل این حوضه از دیرباز مورد توجه زمین شناسان قرار گرفته است. کپه داغ غربی به دلیل گسترش رسوبات کربناته سازند تیرگان و مزدوران که سنگ مخزن اصلی این ناحیه به شمار می روند از اهمیت ویژه ای در زمینه اکتشافات هیدروکربوری برخوردار است. بخش های شمال غربی و غربی کپه داغ باختری بر پایه برداشت های زمین شناسی تحت عنوان گرابن مراوه تپه نامیده شده است، این گرابن حداقل از دوره ژوراسیک فعال بوده و عمیق شدن بلوک های آن تا ترکمنستان ادامه داشته است. به نظر می رسد با توجه به وضعیت زمین شناسی منطقه از نواحی شمالی تکل کوه (جنوب ساختمان کنند) تا شمال مراوه تپه رسوبگذاری پیوسته ای تا سنومانین بالایی بطور مداوم ادامه داشته است. بر همین اساس ضخامت رسوبات (عمدتاً سازندهای سرچشمه، سنگانه و آیتامیر) در دره سفلی رود اترک در شمال مراوه تپه بسیار زیاد است ولی از رخساره های رسوبی اطلاعات زیادی در دست نیست. با توجه به ضخامت زیاد این رسوبات در مناطق شمالی گرابن مراوه تپه انتظار می رود رسوبات مذکور از بلوغ مناسبی برای تولید هیدروکربور برخوردار باشند (قرباگیلی و همکاران، ۱۳۸۷).

۵-۳ چینه شناسی ساختمان کنند

کپه داغ غربی به صورت یک حوضه ریفتینگ حاشیه قاره در شمال شرق ایران در زمان ژوراسیک، به وجود آمده است. از خصوصیات عمده این حوضه توالی رسوبی آن است که از زمان ژوراسیک تا میوسن بدون نبود چینه شناسی قابل توجه، رسوبات با رخساره های مختلف نهشته گردیده است. نقشه زمین شناسی انجام شده در مقیاس ۱: ۱۰۰۰۰۰ در شکل (۲-۳) نشان داده شده است و همچنین مقطع عرضی زمین شناسی ناحیه که در امتداد شمال غرب- جنوب شرق قرار دارد مورد بررسی قرار می گیرد. مقطع شماره ۵ که از ساختمان های سونگی داغ، کُرد، کُرد جنوبی، حاجی داغ، کُرداغ، عرب داغ و زاو می گذرد، در شکل (۳-۳) محدوده ساختمان کنند را نشان می دهد (محل این مقطع در شکل بالایی آمده است).

همانطور که در مقطع عرضی زمین‌شناسی مشاهده می‌شود ساختار منطقه به شکل لایه‌ای و تقریباً هموار می‌باشد و چین‌خوردگی‌هایی از جمله تاقدیس و ناودیس‌کند (واقع در شرق تاقدیس‌کند) نیز مشاهده می‌شود که این چین‌خوردگی‌ها تا اعماق متوسط قابل مشاهده است همچنین شیب‌دار بودن لایه‌ها در این مقطع عرضی دیده می‌شود. محدوده پروفیل‌های MT که در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار می‌گیرند به طور حدودی، از گسل مراوه تپه (واقع در شرق تاقدیس‌کند جنوبی) تا ناودیس‌کند می‌باشند. با توجه به این مقطع عرضی ترتیب سازندهای موجود در منطقه از قدیم به جدید شامل شمشک، باش کلاته، چمن بید، مزدوران، زرد، تیرگان، سرچشمه، سنگانه، آیتامیر و آبدراز می‌باشد.

واحدهای چین‌شناسی منطقه همراه با شرح مختصر آن‌ها در جدول (۳-۱) معرفی شده‌اند.

۳-۶ تقسیم‌بندی ساختاری بخش کوهستانی کپه داغ

بطور کلی از لحاظ ساختاری کپه داغ را می‌توان به سه بخش شرقی، میانی و غربی تقسیم نمود. محدوده کپه داغ غربی از حوالی شهر بجنورد تا ابتدای دشت گرگان یعنی شهر گنبد کاووس می‌باشد. روند کمربند در این بخش بیشتر شرقی-غربی است و عرض پهنه کپه داغ در این بخش بیشتر شده است. بخش جنوبی کپه داغ غربی در خاک ایران و بخش شمالی آن در خاک کشور ترکمنستان می‌باشد. این بخش از کپه داغ تحت تاثیر تحولات پالتوتیس، نئوتیس و باز شدگی دریای خزر جنوبی بوده است بطوریکه رسوبات ژوراسیک تاکنون تحت تاثیر همین باز شدگی دریای خزر بوده‌اند (قربانگی و همکاران، ۱۳۸۷).

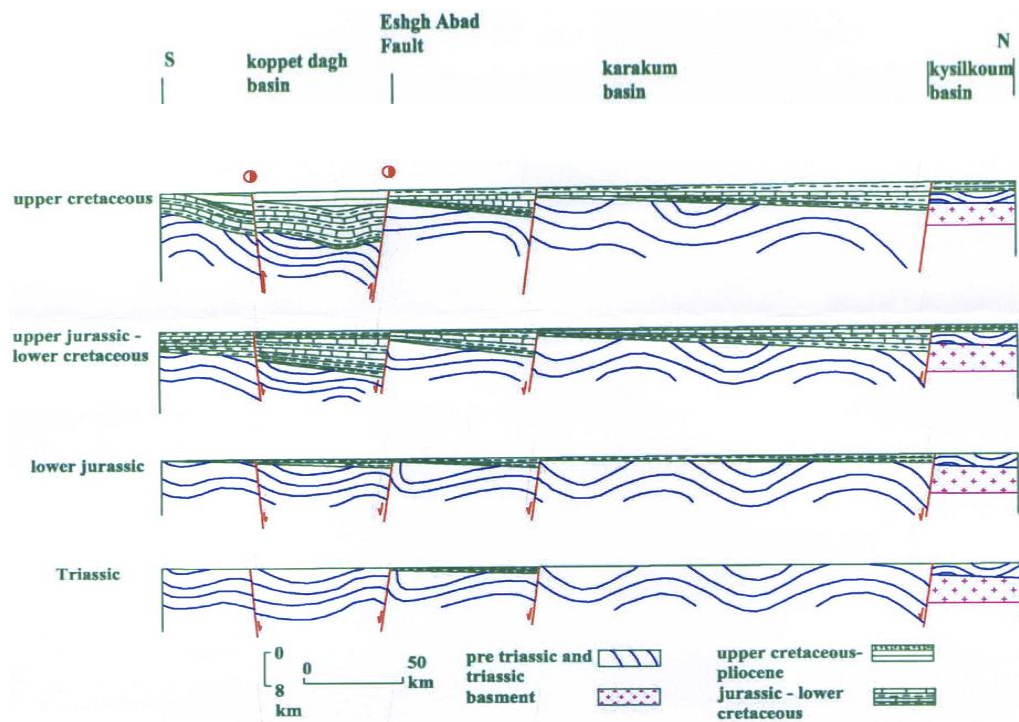
۳-۷ تکتونیک و رسوب‌گذاری

با استفاده از اطلاعات به دست آمده از نحوه شکل‌گیری حوضه و کوهزایی‌های رخ داده در این ناحیه، تکامل تکتونیکی رسوبگذاری منطقه بصورت شماتیک در شکل (۳-۴) ترسیم شده که در آن ارتباط حوضه کپه داغ با حوضه‌های شمالی (قره‌قوم و قیزل‌قوم) که جز آمودریا می‌باشند نیز در نظر گرفته شد. این شکل اتفاقات تکتونیکی در ارتباط با رسوب‌گذاری را در زمان‌های تریاس، ژوراسیک پایینی، ژوراسیک

بالایی - کرتاسه پایینی، کرتاسه بالایی نشان می‌دهد که شرح مختصر آن‌ها در زیر می‌آید.

جدول ۳-۱: چینه‌شناسی منطقه‌کند (افشار حرب، ۱۳۷۳؛ قربایگی و همکاران، ۱۳۸۷).

دوره‌های زمانی	سازندها	لیتولوژی واحدهای تشکیل دهنده
کرتاسه بالایی	آبدراز	شامل شیل با میان لایه‌های آهکی است.
کرتاسه پایینی	آیتامیر	در قسمت‌های زیرین ماسه سنگی و در بالا شیلی است.
	سنگانه	شیل‌های خاکستری تیره تا سبز زیتونی و بطرف بالا از شیل با میان لایه‌های سیلتستون و مارن تیره تشکیل شده است.
	سرچشمه	سازند سرچشمه شامل مارن‌های خاکستری تا خاکستری تیره در بخش‌های زیرین و لایه‌های شیل تیره و مارن با میان لایه‌های نازک آهکی در بخش فوقانی است در ساختمان‌کند میزان مارن و آهک در این سازند بیشتر از بقیه مناطق کپه داغ است.
	تیرگان	شامل یک آهک آلی - تخریبی خاکستری با لایه بندی خوب می‌باشد و از تناوب آهک‌های اوولیت دار و مارن تشکیل شده است.
	زرد	از تناوب شیل‌های آهکی و لایه‌های سیلتستون خاکستری رنگ با میان لایه‌های نازک کربناته تشکیل شده است.
ژوراسیک بالایی	مزدوران	آهک اوولیتیک، آهک‌های تخریبی، سنگ آهک چرت دار، آهک‌های میکریتی، آرژیلی و آهک زیست آواری، آهک‌های حاوی جلبک و آهک‌های دولومیتی و دولومیت
	چمن بید	آهک‌هایی با لایه بندی متوسط تا نازک و به رنگ خاکستری تا مایل به آبی با میان لایه‌های شیلی و مارنی است
ژوراسیک پایینی	باش کلاته	شامل رسوبات دانه‌ریز که معادل جانبی سازند کشف رود است.
	شمشک	شامل شیل و ماسه سنگ همراه با ذغال است.



شکل ۳-۴: تکامل تکتونیکی و رسوب گذاری منطقه از تریاس به بعد (قرابیگلی و همکاران، ۱۳۸۷)

۳-۷-۱ تریاس

بخش عمده حوضه کپه داغ غربی در زمان تریاس از آب خارج بوده و ناحیه کم کم در حال تاثیرپذیری از بازشدگی دریای خزر جنوبی است. گسل های مهم منطقه در حال شکل گیری بوده و همین وضعیت در حوضه های شمالی تر یعنی قره قوم و قیزیل قوم حاکم بوده است. گسل اصلی عشق آباد که جدا کننده کپه داغ از آمودریاست فعال بوده و حرکت امتداد لغز و نرمال داشته است.

۳-۷-۲ ژوراسیک پایینی

در زمان ژوراسیک پایینی بازشدگی دریای خزر جنوبی، کپه داغ غربی را کاملاً متاثر می کند به طوری که در انتهای ژوراسیک پایینی، کپه داغ غربی به صورت یک ریفت شروع به باز شدن می نماید. گسل های اصلی فعالیت خود را شروع نموده اند و با حرکت امتداد لغز و نرمال زمینه ایجاد ریفت را فراهم می نمایند. کم کم دریا مناطق پایین افتاده را می پوشاند و به خاطر شروع فعالیت تکتونیکی کششی در منطقه

و فرسایش شدید، رسوب گذاری در مناطق زیر آب شروع می شود. این رسوبات شامل کنگلومرای قاعده سازند شمشک می باشد که با یک دگرشیبی روی رسوبات قدیمی قرار می گیرند. در بعضی مناطق زیر این کنگلومرا، بوکسیت و لاتریت قابل مشاهده است (قرابیکلی و همکاران، ۱۳۸۷).

۳-۷-۳ ژوراسیک بالایی - کرتاسه زیرین

در این دوره زمانی سرعت بازشدگی ریفت زیاد و گسل های کنترل کننده حوضه به شدت فعال بودند به طوری که در این زمان رسوبات ضخیمی از سازند شمشک و چمن بید رسوب گذاری شده است این رسوبات به علت این همزمان با ریفتینگ ته نشین شده اند و هم فعالیت متفاوت گسل های مهم و تغییرات عمق ریفت می توانستند از لحاظ لیتولوژیکی و مقدار مواد آلی متفاوت باشند. مقدار رسوب گذاری در حوضه کپه داغ غربی بیشتر از رسوب گذاری در حوضه های شمالی تر بوده است به طوری که هر چه به سمت شمال و حوضه های شمالی تغییر مکان بدهیم رسوب گذاری نیز کمتر بوده است. فعالیت این گسل ها همچنان امتداد لغز و نرمال می باشد (شکل ۳-۴).

۳-۷-۴ کرتاسه بالایی

تا این دوره زمانی رسوب گذاری بدون وقفه همراه با باز شدن ریفت ادامه داشته تا این که منطقه تحت تاثیر فاز کوهزایی اتریشین قرار می گیرد و بعضی مناطق از آب خارج می شود. مناطق جنوبی زودتر از آب خارج می گردند و رسوب گذاری سازندهای سرچشمه، سنگانه و آیتامیر در آنجا انجام نمی گیرد و یا فرسایش آن ها را از بین می برد. بنابراین سازند آبدراز در مناطق جنوبی بر روی سازند تیرگان ته نشین شده است و در سایر مناطق با اختلاف شیب روی سازند آیتامیر رسوب گذاری شده است. بنابراین در این زمان وقفه ای در رسوب گذاری به وجود می آید و سرعت بازشدگی به صفر می رسد. گسل های مهم منطقه نیز متأثر از کوهزایی، تغییر حرکت داده و مولفه معکوس پیدا می کنند و چین خوردگی ملایمی ایجاد می شود. سپس رسوبات بعد از آبدراز موازی با این سازند در منطقه رسوب گذاری می شوند. امروز اغلب این سازندها را تنها در ناودیس ها می توان یافت (قرابیکلی و همکاران، ۱۳۸۷).

۸-۳ گسل‌های موجود در منطقه

از آنجایی که شکستگی‌ها و گسل‌ها جزء لاینفک هر رخنمون سنگی به خصوص در حوضه‌های رسوبی چین خورده می‌باشند، لذا شناسایی و مطالعه نحوه شکل‌گیری گسل‌ها به خصوص که از دیدگاه مهاجرت و تجمع هیدروکربور نیز حائز اهمیت می‌باشند، ضروری به نظر می‌رسد.

اصلی‌ترین فاز کششی که عامل ایجاد گسل‌های پی‌سنگی و قدیمی در حوضه کپه داغ گشته مربوط به دوره ژوراسیک میانی می‌باشد. تمامی گسل‌های پی‌سنگی و قدیمی که در زمان شکل‌گیری حوضه ایجاد شده‌اند و در ابتدا عملکرد نرمال داشته‌اند را همین فاز کششی شکل داده است لیکن در اثر فازهای فشارشی بعدی و کوهزایی‌ها یکسری از این گسل‌ها، عملکرد معکوس یا امتداد لغز پیدا کرده‌اند و همچنین در اثر برخورد مورب بین صفحات جدا شده یکسری گسل‌های جدید امتداد لغز و معکوس در جهت‌های دیگر نیز ایجاد گشته‌اند (قرابیگلی و همکاران، ۱۳۸۷).

اصلی‌ترین گسل موجود در ساختمان کنند، گسل مراوه تپه- راز می‌باشد که یک گسل امتداد لغز شرقی- غربی می‌باشد این گسل عمدتاً عملکرد راست‌گرد با مولفه شیب لغز از خود نشان می‌دهد که مولفه شیب لغز آن به صورت معکوس و جهت شیب صفحه گسل به سمت شمال غربی می‌باشد. محل قرار گیری این گسل در نقشه زمین‌شناسی و در جنوب شرقی ناحیه کردند مشخص است (شکل ۳-۲).

۹-۳ وضعیت هیدروکربوری منطقه

ناحیه کپه داغ را می‌توان از نظر رسوبی به دو بخش تقسیم کرد:

- ۱- نواحی غربی و شمال غربی که تحت تاثیر کشش ناشی از باز شدگی حوضه کاسپین جنوبی قرار داشته، در این نواحی رسوب گذاری ژوراسیک تا کرتاسه بالایی بصورت پیوسته و در شرایط عمیق‌تر و با ضخامت بیشتر صورت گرفته است که منطقه مورد مطالعه در این قسمت قرار می‌گیرد.

۲- نواحی شرقی که بین رسوبات ژوراسیک و کرتاسه ناپیوستگی وجود دارد، در این نواحی سازندهای مذکور در شرایط کم عمق‌تری نهشته شده و حوضه در زمان مذکور کم عمق‌تر و ضخامت آن نیز کمتر بوده است.

۳-۹-۱ سنگ مخزن

سازند مزدوران به همراه سازند تیرگان سنگ مخزن عمده منطقه کپه داغ را تشکیل می‌دهند. سازند مزدوران دارای یک بخش دولومیتی است که در چاه‌های حفاری شده شرق کپه داغ دیده می‌شود، در نواحی مرکزی و غربی کپه داغ این لایه‌های دولومیتی به ندرت توسعه دارد و این سازند عمدتاً از کربنات‌های دانه ریز با تخلخل کم تشکیل شده است. در زمان ژوراسیک بالایی با بالا رفتن سطح جهانی آب جلبک‌های سبز گسترش زیادی یافتند که منجر به گسترش رسوبات کربناته و نیز ریف‌ها به خصوص در حوضه نئوتتیس گردید، حداکثر گسترش ریف‌ها در اکسفوردین صورت گرفته است که همزمان با نهشته شدن سازند مزدوران است، بنابراین با توجه به اینکه ریف‌ها از مهم‌ترین سنگ‌های مخزنی هستند در صورت وجود در این سازند بر اهمیت مخزنی می‌افزاید. با این حال در نواحی غربی سازند مزدوران از نظر هیدروکربوری مناسب به نظر نمی‌رسد زیرا سازند زرد که سنگ پوشش مزدوران در این ناحیه است دارای حجمی از ماسه سنگ است.

از طرفی سازند تیرگان در نواحی شمال شرقی و غربی ناحیه کپه داغ از نظر رخساره شرایط مخزنی را دارد و با توجه به ضخامت زیاد رسوبات سرچشمه و سنگانه که به عنوان سنگ پوشش عمل می‌کنند بطرف شمال غربی منطقه احتمال اینکه افق‌های آهکی سازند مذکور به عنوان مخزن عمل نماید وجود دارد لذا در این مناطق سازند تیرگان از لحاظ سنگ مخزن به عنوان اولویت اول نسبت به سازند مزدوران معرفی می‌شود (Afshar, 1968).

۳-۹-۲ سنگ پوشش

در کپه داغ شرقی رسوبات رس و انیدریت و لایه‌های شیلی سازند شوريجه (این سازند معادل سازند زرد در غرب کپه داغ است) به عنوان سنگ پوشش مناسب برای سازند مزدوران عمل می‌کند، به سمت غرب و شمال غرب منطقه جایی که سازند زرد گسترش دارد با اینکه این سازند دارای بین لایه‌های شیلی می‌باشد اما با توجه به کربناته بودن آن از توانایی سنگ پوششی آن کاسته می‌شود بنابراین تنها در نقاطی که سازند زرد و بخصوص شیل‌های زیرین آن حداکثر ضخامت را دارد نواحی مساعدی از نظر وضعیت سنگ پوشش ایجاد می‌کنند که در منطقه کپه داغ غربی سازند زرد ضخامت زیادی ندارد. همچنین سازندهای سرچشمه و سنگانه به عنوان سنگ پوشش سازند تیرگان محسوب می‌شوند و از آنجائی که این سازندها به طرف نواحی شمال شرقی، شمالی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه از ضخامت قابل توجهی برخوردار هستند بنابراین در این نواحی سازند تیرگان از وضعیت احتمالی خوبی برای سنگ مخزن بودن برخوردار خواهد بود (Afshar, 1968).

۳-۹-۳ سنگ منشاء

سازندهای شمشک، باش کلاته و چمن بید با رخساره شیلی، مارنی و آهک‌های رسی جدول (۱-۳) و حدود ۲۰۰۰ متر ضخامت که در ناحیه مورد مطالعه گسترش خوبی دارند، سنگ منشا مناسبی محسوب می‌شود. با توجه به این موضوع که سازندهای شمشک، باش کلاته و چمن بید در ناحیه بصورت همزمان با بازشدگی ریفت رسوب‌گذاری شده‌اند و در بعضی مناطق محیط عمیق‌تری داشتند بنابراین از لحاظ تولید هیدروکربن در مناطق مختلف، متفاوت می‌باشند. از نظر مهاجرت هیدروکربن نیز لازم به ذکر است که تاقدیس‌های نزدیک به مناطق عمیق‌تر حوضه، امکان ذخیره هیدروکربن بیشتری می‌توانند داشته باشند و همینطور هیدروکربن تولیدی می‌توانسته به صورت افقی به سمت سازندهای زیر سطح دگرشیبی ژوراسیک، مهاجرت نماید. بنابراین ساختمان‌های زیر سطح دگرشیبی نیز می‌توانند حائز اهمیت باشند (قرابیگی و همکاران، ۱۳۸۷; Afshar, 1968).

فصل چهارم

ارائه داده‌های مگنتوتلوریک، آنالیز ابعادی
و تفسیر کیفی آن‌ها

۴-۱ مقدمه

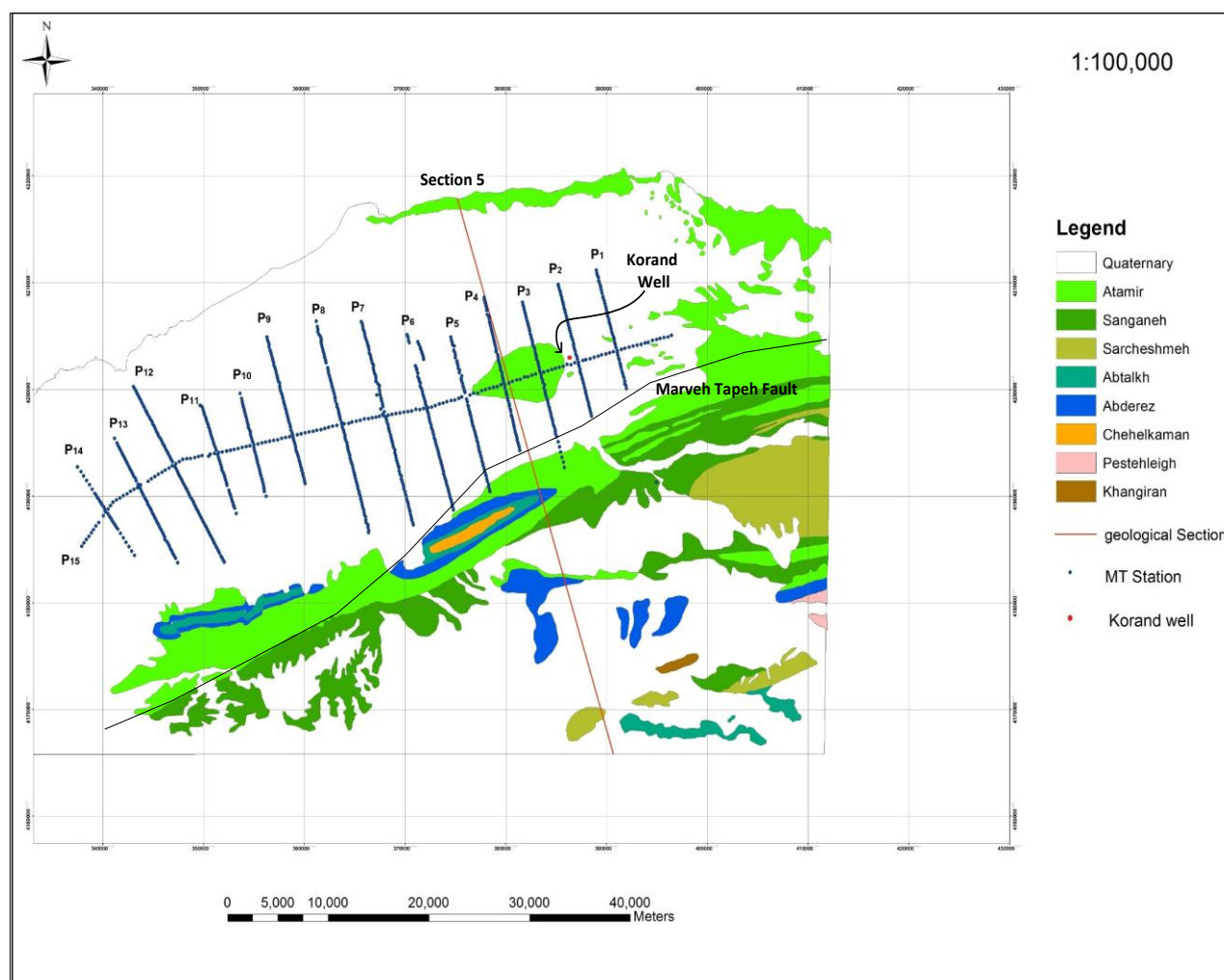
در این فصل ابتدا به ارائه داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کردند و بررسی کمیت‌های موثر در تفسیر داده‌های آن پرداخته می‌شود و پس از این مرحله مقادیر جابجایی ایستا در محل هر سونداژ MT مورد بررسی و به کمک داده‌های TEM تصحیح می‌شوند در ادامه شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری و فاز برای پروفیل‌های مختلف ارائه و به صورت کیفی تفسیر می‌شوند تا اطلاعاتی از وضعیت ساختارهای زیرسطحی حاصل شود. تعیین بُعد ساختارهای زیر سطحی منطقه قبل از انجام مدل‌سازی عددی ضروری بوده و از اینرو به کمک پارامترهای مختلف، بُعد ژئوالکتریکی ساختارهای زیر سطحی در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۲ موقعیت پروفیل‌های MT

در این پایان نامه از داده‌های EMAP ساختمان کردند (واقع در شمال غرب کپه داغ) که در پانزده پروفیل P1، P2، ... و P15 توسط شرکت چینی Team 814، در سال ۲۰۰۸ برداشت شده است، استفاده می‌شود. موقعیت پروفیل‌ها در شکل (۴-۱) روی نقشه زمین‌شناسی نمایش داده شده است.

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی (شکل ۳-۲)، محور تاقدیس و امتداد ساختارهای زمین‌شناسی منطقه تقریباً به صورت شمال شرقی - جنوب غربی است و در سطح زمین رخنمون دارد و این امتداد ساختار، دقیقاً در راستای پروفیل P15 قرار دارد. چهارده پروفیل دیگر عمود بر امتداد ساختار هستند تعداد ایستگاه‌های MT، ۹۷۵ و فاصله ایستگاه‌ها از ۲۵۰ متر تا ۳۵۰ متر متغیر است و برداشت در هر ایستگاه به صورت پنج مولفه‌ای (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) بوده است. چون نحوه برداشت داده‌ها به شکل EMAP می‌باشد بنابراین دو مولفه میدان الکتریکی در هر ایستگاه و مولفه‌های میدان مغناطیسی در نواحی کوهستانی به صورت یک در میان و در نواحی هموارتر (قسمت غربی ساختمان کردند) به شکل دو در میان و در گستره فرکانسی ۰/۰۰۰۶ Hz تا ۳۲۰ Hz برداشت شده‌اند.

داده‌هایی که به منظور اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری مورد استفاده قرار گرفته، داده‌های پردازش شده (EDI)^۱ هستند که از طریق مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران و مشاور صنعتی در اختیار اینجانب قرار گرفتند همچنین در منطقه مورد مطالعه داده‌های سونداژ TEM به شکل یک در میان در محل سونداژهای MT برداشت شده‌اند، که از آن‌ها برای تصحیح جابه‌جایی ایستا و یا بررسی مقاومت ویژه لایه‌های نزدیک سطح استفاده می‌شود.



شکل ۴-۱: موقعیت پروفیل‌ها و ایستگاه‌های برداشت شده MT همراه با محل چاه حفر شده و محل مقطع عرضی زمین‌شناسی بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه

¹ Electrical data interchange

۳-۴ بررسی کمیت‌های موثر در تفسیر داده‌ها

بعد از مرحله پردازش داده‌ها، تانسورهای طیفی برای فرکانس‌های هدف در هر ایستگاه به دست خواهد آمد که از آن‌ها برای محاسبه مولفه‌های تانسور امیدانس استفاده می‌شود. با ترکیب مولفه‌های تانسور امیدانس به صورت‌های مختلف با یکدیگر، پارامترهایی بدست می‌آید که در راستای درک صحیح از ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، کمک شایانی می‌کند.

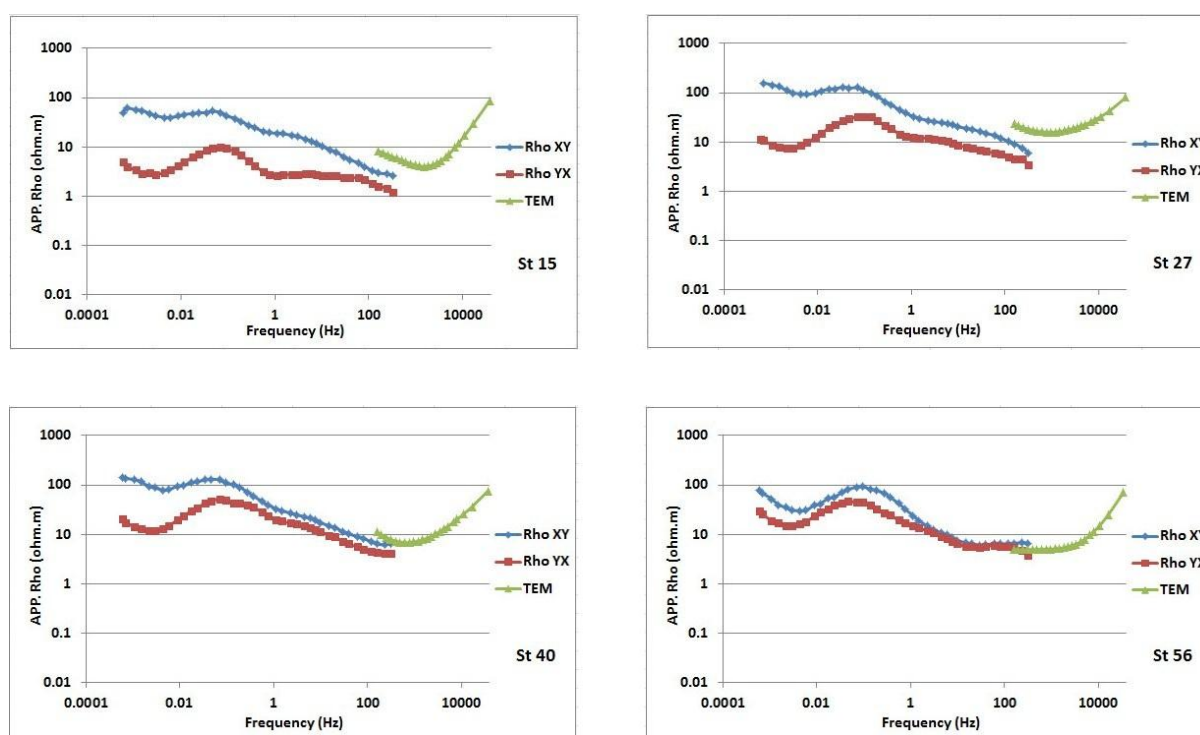
قبل از برداشت داده‌های MT، با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی امتداد ساختار منطقه مشخص بود و محورهای برداشت در امتداد ساختار و عمود بر امتداد ساختار قرار گرفتند (محور X در راستای امتداد ساختار و محور Y عمود بر امتداد ساختار قرار دارند) و با توجه نحوه برداشت در ادامه به طریقی که در فصل دوم اشاره شد با استفاده از عناصر غیر قطری (مولفه‌های اصلی) مقادیر مقاومت ویژه ظاهری و فاز در هر فرکانس و برای هر سونداژ محاسبه و نتایج حاصله به صورت نمودارهای سونداژی و شبه مقطع ارائه می‌شوند.

۱-۳-۴ منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری (ρ_a)

همانطور که قبلاً گفته شد مقاومت ویژه ظاهری می‌تواند به طور مستقیم برای هر یک از مولفه‌های تانسور امیدانس از رابطه $\rho_{a_{ij}} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{ij}|^2$ محاسبه شود. این کمیت اساسی‌ترین پارامتر در تفسیر داده‌های MT می‌باشد که از روی مولفه‌های اصلی تانسور امیدانس در فرکانس‌های مورد نظر قابل محاسبه است. در شکل (۲-۴) منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری در دو مولفه XY و YX قبل از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا همراه با منحنی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM برای چهار ایستگاه پروفیل P1 به صورت نمونه نشان داده شده است. با جابه‌جا کردن منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری XY و YX به سمت منحنی حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM، در فرکانس‌های بالا می‌توان جابه‌جایی ایستا را تصحیح نمود.

همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود بعد از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا منحنی‌های

مقاومت ویژه ظاهری XY و YX در فرکانس‌های بالا بر هم منطبق می‌باشند که دلالت بر وجود ساختار یک بعدی در اعماق کم دارد ولی در فرکانس‌های پایین تطابق چندانی بین منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری XY و YX وجود ندارد. در نتیجه نمی‌توان انتظار محیط یک بعدی در اعماق منطقه مورد مطالعه را داشت. در بعضی از فرکانس‌ها اندازه خطا بالاست این می‌تواند به دلیل وجود نوفه‌های الکترومغناطیسی در منطقه برداشت داده‌ها باشد. برای دور بودن از اثرات این فرکانس‌ها، داده‌های فرکانس مورد نظر در هر ایستگاه را باید غیر فعال^۱ کرد.



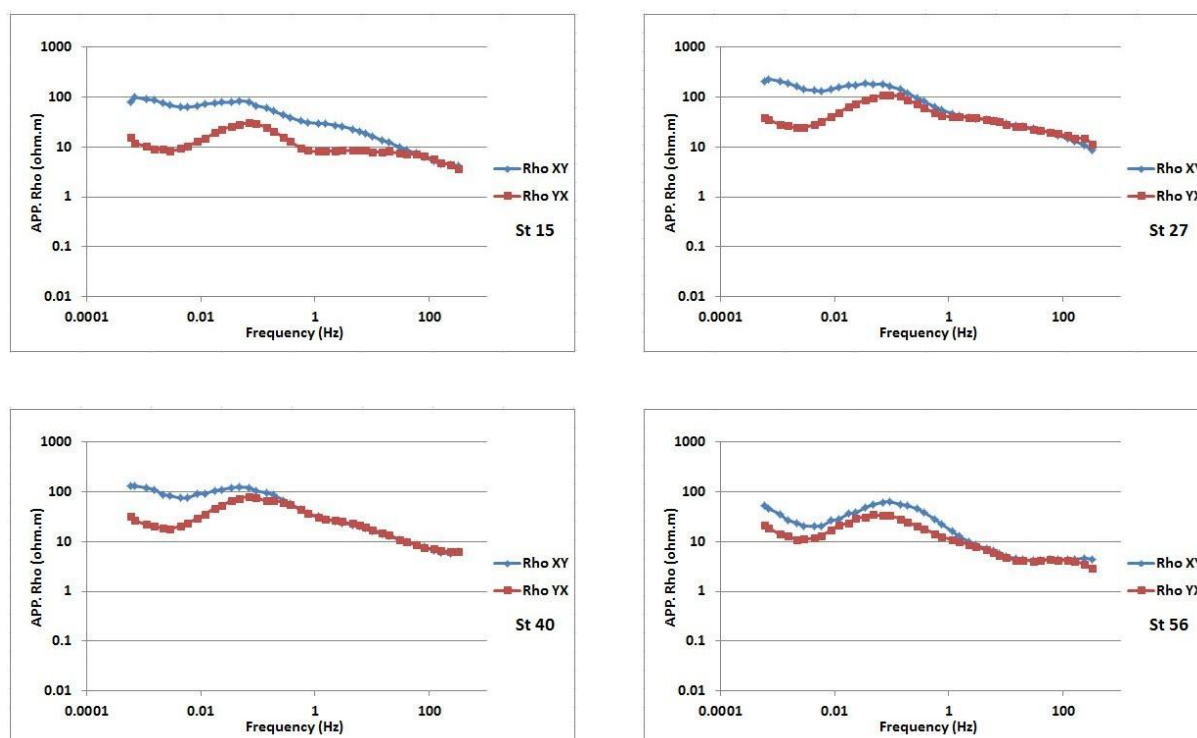
شکل ۴-۲: نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری برای مولفه‌های XY و YX قبل از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا و منحنی حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM در چهار ایستگاه از پروفیل P1.

۴-۳-۲ فاز امپدانس

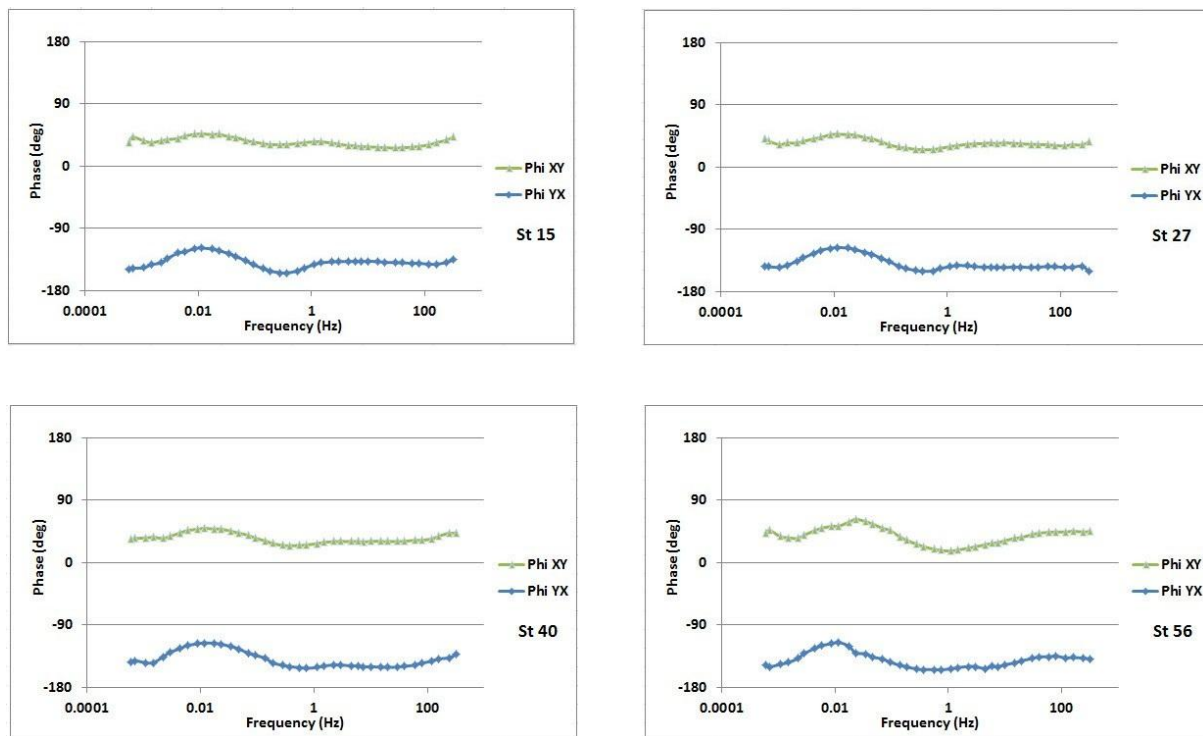
با توجه به اینکه هر یک از مولفه‌های تانسور امپدانس اعداد مختلطی می‌باشند، پس می‌توان مقدار فاز هر یک از این اعداد مختلط را محاسبه کرد و مقدار این فاز را به صورت نمودارهایی بر حسب فرکانس برای

¹ Mask

مولفه‌های مختلف تانسور امپدانس نشان داد. مقدار فاز تحت تاثیر ناهمگنی‌های سطحی قرار نمی‌گیرد. در واقع وجود کمیت فاز یکی از مزیت‌های روش MT به روش‌های جریان مستقیم ژئوالکتریکی می‌باشد که باعث می‌شود در مورد ساختارهای زیرسطحی و توزیع مقاومت ویژه در آن‌ها اطلاعات بیشتری به دست آورد. شکل (۴-۴) منحنی‌های فاز XY و YX مربوط به چهار ایستگاه پروفیل P1 را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳: نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری تصحیح شده برای اثر جابجایی ایستا برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P1.



شکل ۴-۴: نمودارهای فاز برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P1.

در سونداژ ۱۵ و ۲۷ از پروفیل P1 (شکل ۴-۲) برای تصحیح اثر جابجایی ایستا، هر دو مولفه XY و YX مقاومت ویژه ظاهری به سمت بالا جابجا شده‌اند. همانطور که در فصل دوم اشاره شد اگر مقاومت ویژه توده سطحی کمتر از مقاومت ویژه زمینه باشد منحنی سونداژ مقاومت ویژه در محل توده سطحی (ناهمگنی سطحی) به اندازه ثابت $\Delta\rho$ نسبت به منحنی مشابه در محل زمینه به طور مستقل از فرکانس به سمت پایین جابجا می‌شود و در نتیجه به منظور تصحیح اثر جابجایی ایستا باید منحنی مقاومت ویژه به سمت بالا جابجا شود (به سمت منحنی‌های مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM). در سونداژ ۴۰ این پروفیل مولفه XY مقاومت ویژه ظاهری بر منحنی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM منطبق است یعنی این مولفه تحت تاثیر جابجایی ایستا قرار نمی‌گیرد ولی مولفه YX مقاومت ویژه ظاهری به سمت بالا جابجا شده است. در نهایت اینکه در سونداژ ۵۶ از این پروفیل هر دو مولفه XY و YX مقاومت ویژه ظاهری به سمت پایین جابجا شده‌اند به این معنی که مقاومت ویژه توده سطحی بیشتر از مقاومت ویژه زمینه است پس منحنی سونداژ مقاومت ویژه در محل توده سطحی (ناهمگنی سطحی) به اندازه ثابت $\Delta\rho$ نسبت به

منحنی مشابه در محل زمینه به طور مستقل از فرکانس به سمت بالا جابجا شده است و در نتیجه به منظور تصحیح اثر جابجایی ایستا باید منحنی مقاومت ویژه به سمت پایین جابجا شود (به سمت منحنی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی داده های TEM). مقدار تصحیح جابجایی ایستا برای این چهار سونداژ ناچیز بود از طرفی منحنی های فاز XY و YX در هر چهار سونداژ کاملاً بر منحنی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی داده های TEM منطبق بودند که این قضیه به این دلیل است که منحنی های فاز تحت تاثیر جابجایی ایستا قرار نمی گیرند.

منحنی های مقاومت ویژه ظاهری در دو مولفه XY و YX قبل از انجام تصحیح جابه جایی ایستا همراه با منحنی های مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی داده های TEM و منحنی های مقاومت ویژه ظاهری در دو مولفه XY و YX بعد از انجام تصحیح جابه جایی ایستا همچنین منحنی های فاز XY و YX برای چهار ایستگاه پروفیل های P7 و P14 در پیوست (الف) (شکل های الف-۱ تا الف-۶) به صورت نمونه آورده شده است. به منظور تصحیح اثر جابجایی ایستا برای پروفیل P7، منحنی های مقاومت ویژه ظاهری مولفه XY ایستگاه های ۲۰ و ۸۰ به سمت پایین و منحنی های مقاومت ویژه ظاهری مولفه YX این دو ایستگاه به سمت بالا جابجا شده اند. منحنی های مقاومت ویژه ظاهری در دو مولفه XY و YX ایستگاه ۴۰ به منحنی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی داده های TEM منطبق می باشند یعنی اینکه جابجایی ایستا بر روی این ایستگاه اثر ندارد. منحنی مقاومت ویژه ظاهری مولفه XY ایستگاه ۶۵ به سمت بالا و منحنی مقاومت ویژه ظاهری مولفه YX این ایستگاه به سمت پایین جابجا شده است. به منظور تصحیح اثر جابجایی ایستا برای پروفیل P14 منحنی های مقاومت ویژه ظاهری مولفه XY ایستگاه های ۱۳ و ۳۷ به سمت پایین و منحنی های مقاومت ویژه ظاهری مولفه YX این دو ایستگاه به سمت بالا جابجا شده اند. منحنی های مقاومت ویژه ظاهری هر دو مولفه XY و YX ایستگاه های ۲۴ و ۵۱ به سمت بالا جابجا شده اند.

۴-۴ آنالیز ابعادی داده‌های مگنتوتلوریک

۱-۴-۴ چولگی (اسکیو)

این کمیت یک پارامتر نامتغیر چرخشی می‌باشد (رابطه ۲-۳۹) و در صورتی که برابر صفر و یا نزدیک صفر باشد می‌تواند بر غیر سه بعدی بودن ساختارهای منطقه دلالت داشته باشد. اما اگر مقدار آن از $0/3$ تجاوز کند باید محدوده مورد نظر به صورت سه بعدی بررسی شوند. شکل (۴-۵) نمودار مقادیر چولگی مربوط به چهار ایستگاه پروفیل P1 و شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) نمودارهای مقادیر چولگی مربوط دو ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14 داده‌های MT ساختمان کنند را نشان می‌دهند. نمودارهای داده‌های چولگی مربوط به بقیه پروفیل‌های P13، P2،... در پیوست (الف) (شکل‌های الف-۷ تا الف-۱۷) آورده شده است. همانگونه که در همه این شکل‌ها مشاهده می‌شود مقدار چولگی در هر ایستگاه برای همه پریودها مقداری پایین و کمتر از $0/3$ است، که غیر سه بعدی بودن ساختار منطقه را نشان می‌دهد البته همانطور که در فصل دوم اشاره شد، عدم توافق بر روی کران بالای مقدار چولگی (اسکیو) برای ساختارهای سه بعدی وجود دارد (Moradzadeh, 1998).

۲-۴-۴ بیضی وارگی

این کمیت نیز نامتغیر چرخشی می‌باشد (رابطه ۲-۴۰) و همانند چولگی برای مدل‌های یک بعدی و دو بعدی مقداری برابر صفر و یا نزدیک صفر دارد. شکل (۴-۵) نمودار داده‌های بیضی وارگی را برای چهار ایستگاه پروفیل P1 و شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) نمودارهای مقادیر بیضی وارگی مربوط به دو ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14 داده‌های MT ساختمان کنند را نشان می‌دهند. نمودارهای داده‌های بیضی وارگی مربوط به بقیه پروفیل‌های P13، P2،... در پیوست (الف) (شکل‌های الف-۷ تا الف-۱۷) آورده شده است. با توجه به تمامی این شکل‌ها مشاهده می‌شود که بیضی وارگی در پریودهای پایین (کمتر از ۱ ثانیه)، کمتر از $0/3$ می‌باشد که غیر سه بعدی بودن ساختار منطقه را نشان می‌دهد ولی در پریودهای بالا (بیشتر از ۱ ثانیه) مقدار این کمیت از $0/3$ تجاوز می‌کند که می‌تواند به سه بعدی بودن ساختارهای منطقه دلالت کند و

یا به علت آلودگی بعضی از داده‌ها به نوفه باشد.

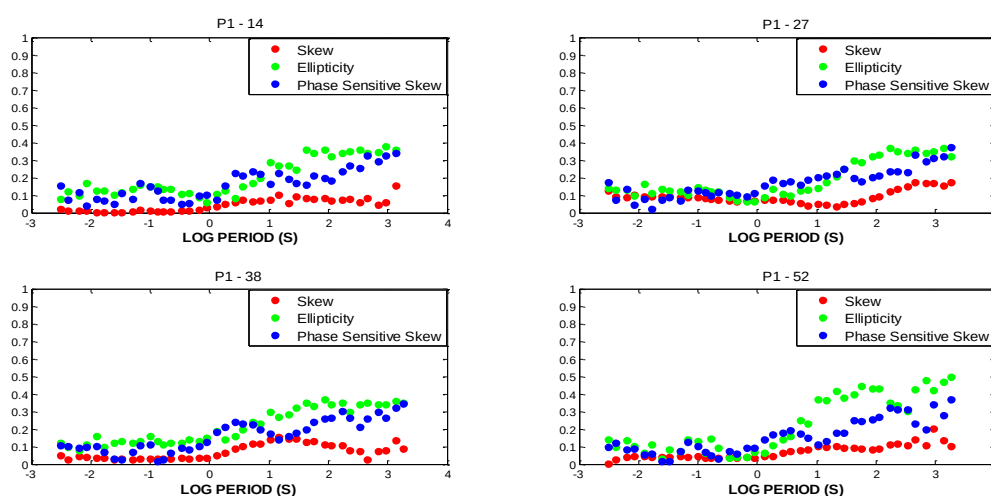
۳-۴-۴ چولگی (اسکیو) حساس به فاز

کمیت‌های چولگی و بیضی وارگی برای تعیین بعد ساختارهای زیر سطحی خیلی قابل اعتماد نیستند برای مثال اگر داده‌ها به نوفه آلوده باشند و یا متأثر از ناهمگنی‌های الکتریکی نزدیک سطح گردند این پارامترها برای ساختار دو بعدی دیگر صفر نمی‌باشند. به همین دلیل، کمیت چولگی حساس به فاز (رابطه ۴۱-۲) به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری ابعاد ساختار ناحیه‌ای معرفی می‌شود. شکل (۵-۴) نمودار چولگی حساس به فاز را برای چهار ایستگاه پروفیل P1 و شکل‌های (۷-۴) و (۸-۴) نمودارهای مقادیر چولگی حساس به فاز مربوط دو ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14 داده‌های MT ساختمان کنند را نشان می‌دهند. نمودارهای داده‌های چولگی حساس به فاز مربوط به بقیه پروفیل‌های P13، P2، در پیوست (الف) (شکل‌های الف-۷ تا الف-۱۷) آورده شده است. در همه ایستگاه‌های مذکور مقدار داده‌های چولگی حساس به فاز در اکثر پریودها کمتر از $0/3$ می‌باشد یعنی اینکه ساختار زیر سطحی غالباً دو بعدی است.

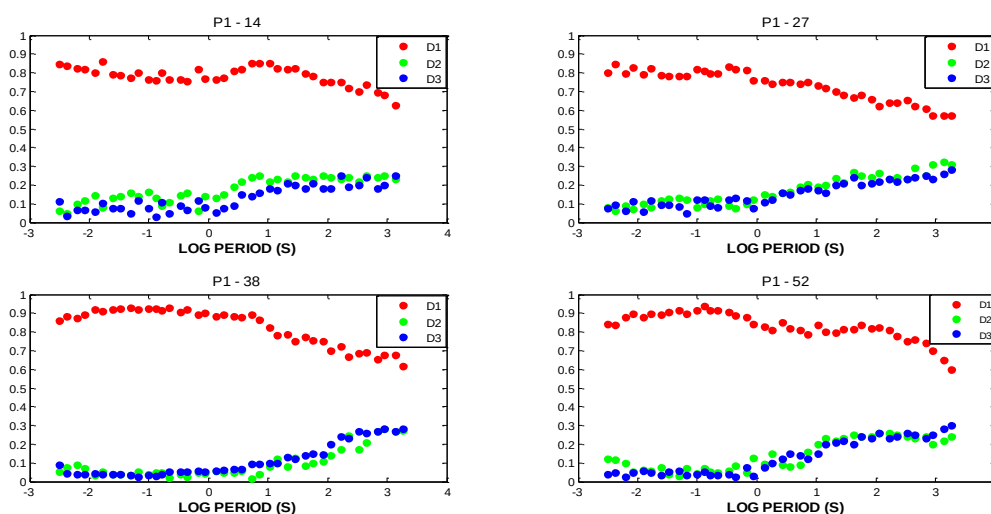
۴-۴-۴ اندیس‌های وزنی نرمال شده (D_1, D_2, D_3)

همانطور که در فصل دوم اشاره شد این پارامترها سهم هر یک از ساختارهای یک، دو و یا سه بعدی زمین را نشان می‌دهد (رابطه ۴۲-۲). برای ساختارهای یک بعدی، شرایط $D_1 > D_2 > D_3$ وجود دارد. اندیس‌های D_1 و D_2 رفتار عکس با هم دارند و مقادیر بزرگ D_2 و D_3 (بیشتر از $0/2$) بیانگر این است که ساختارهای دو بعدی و سه بعدی نیز در منطقه وجود دارد. شکل (۶-۴) مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 را برای چهار ایستگاه پروفیل P1 و شکل‌های (۷-۴) و (۸-۴) نمودارهای مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 مربوط به دو ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14 داده‌های MT ساختمان کنند را نشان می‌دهند. نمودارهای مقادیر داده‌های شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 مربوط به بقیه پروفیل‌های P13، P2، در پیوست (الف) آورده شده است. همانطور که در شکل‌های (۵-۴)، (۶-۴)، (۷-۴)، (۸-۴) و شکل‌های پیوست (الف) (شکل‌های الف-۷ تا الف-۱۷) دیده می‌شود مقادیر چولگی، چولگی حساس به فاز و بیضی وارگی در پریودهای پایین

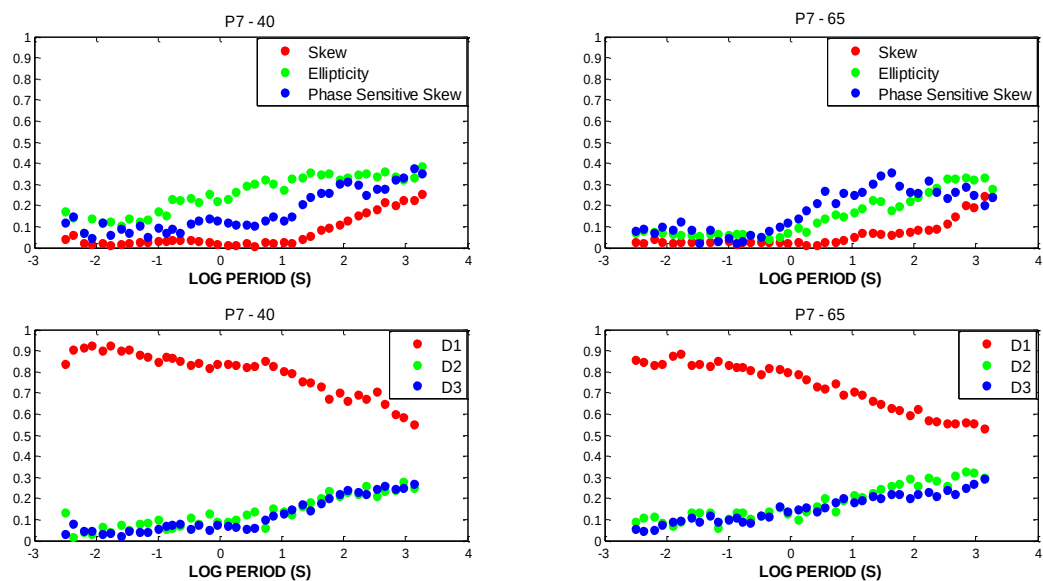
(کمتر از ۱ ثانیه) کمتر از 0.3 و $D_1 > D_2 > D_3$ می‌باشد که می‌تواند دلیلی بر یک بعدی بودن ساختار منطقه مورد مطالعه در این بازه فرکانسی باشد. در پریودهای بالا (تقریباً بیشتر از ۱ ثانیه) مقدار بیضی وارگی از 0.3 تجاوز پیدا می‌کند همچنین مقدار D_2 و D_3 بیشتر از 0.2 می‌باشد که ظاهراً بیانگر دو و سه بعدی بودن ساختار در اعماق زیاد است اما مقدار چولگی حساس به فاز در اکثر پریودها زیر 0.3 می‌باشد. با در نظر گرفتن این موارد در پریودهای پایین (کمتر از ۱ ثانیه) ساختار یک بعدی و در اعماق زیاد غالباً دو بعدی تشخیص داده شده‌اند.



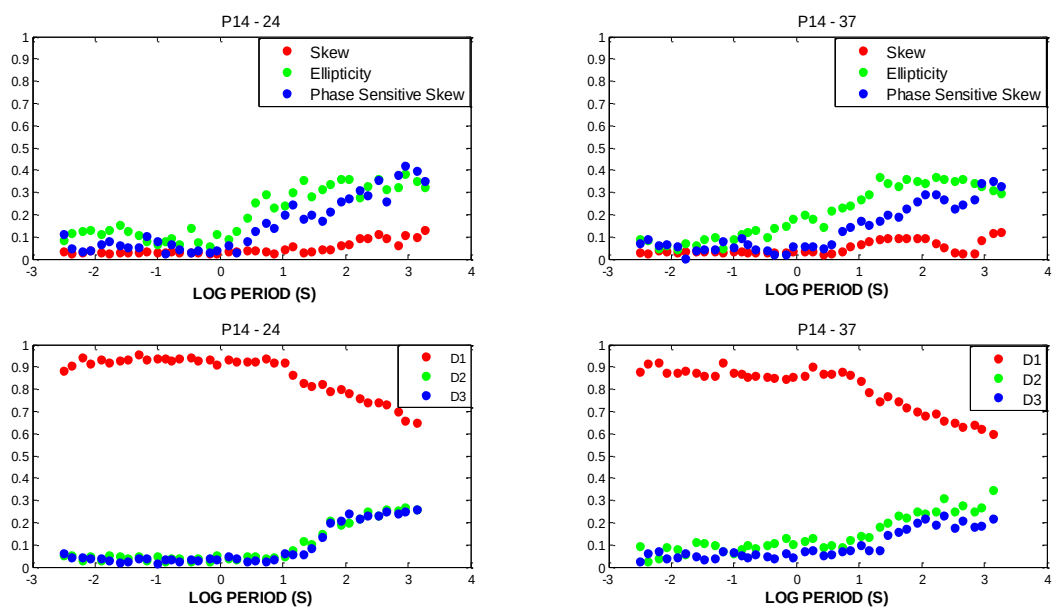
شکل ۴-۵: نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز و بیضی وارگی برای ایستگاه‌های ۱۴، ۲۷، ۳۸ و ۵۲ از پروفیل P1



شکل ۴-۶: نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 برای ایستگاه‌های ۱۴، ۲۷، ۳۸ و ۵۲ از پروفیل P1

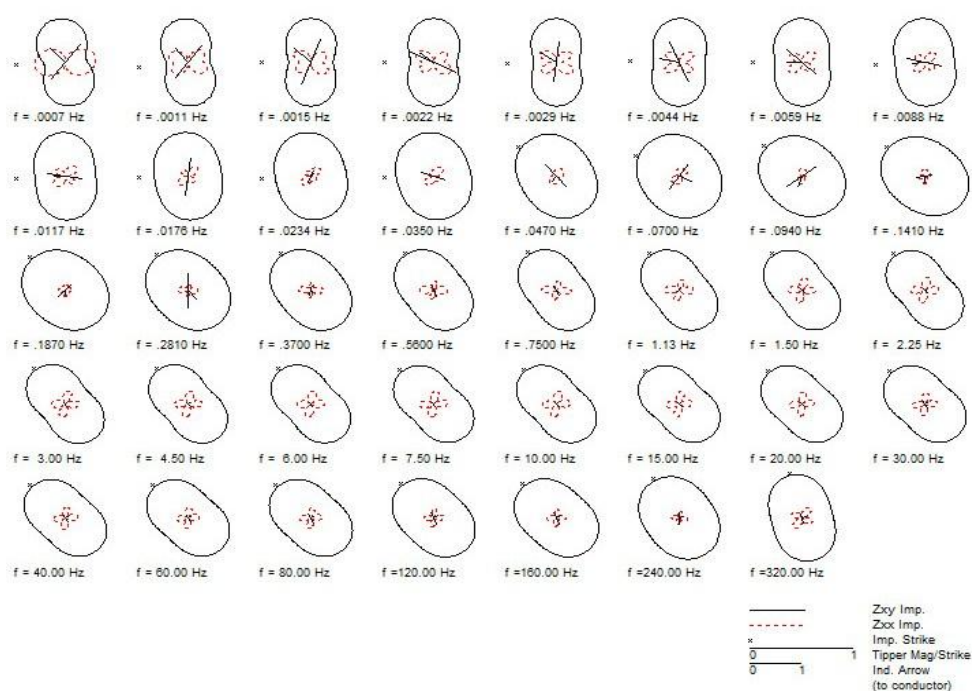


شکل ۴-۷: نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز و بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۴۰ و ۶۵ از پروفیل P7.

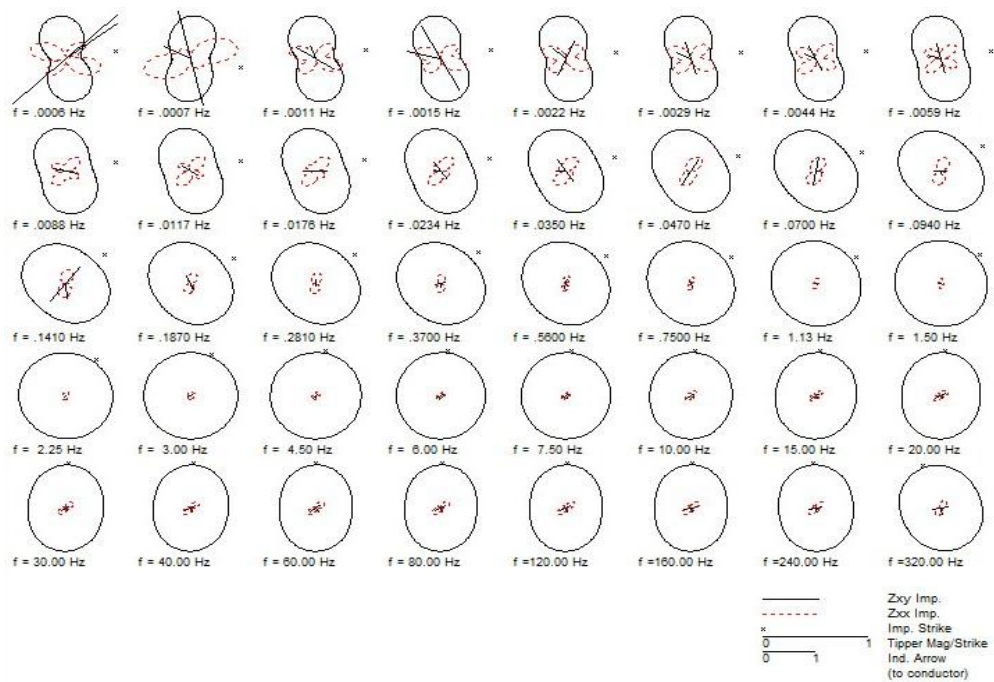


شکل ۴-۸: نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز و بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۲۴ و ۳۷ از پروفیل P14.

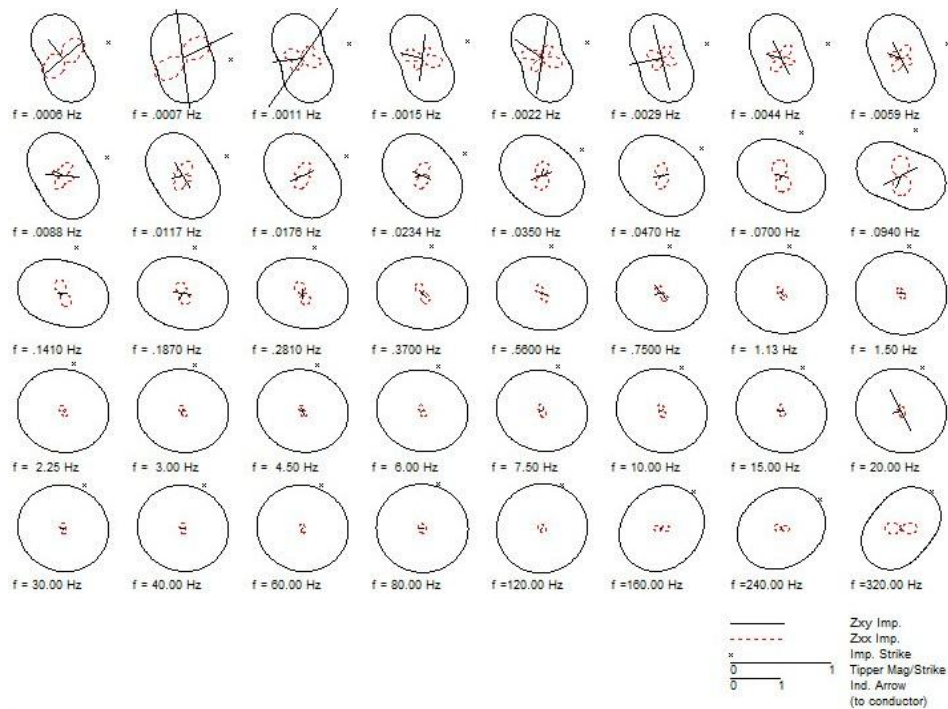
شکل‌های (۹-۴)، (۱۰-۴) و (۱۱-۴) نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژهای ۱۴، ۲۹ و ۴۵ از پروفیل P1، شکل‌های (۱۲-۴)، (۱۳-۴) و (۱۴-۴) نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژهای ۲۸، ۴۴ و ۷۷ از پروفیل P7 و شکل‌های (۱۵-۴)، (۱۶-۴) و (۱۷-۴) نمودارهای قطبی تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژهای ۱۳، ۲۸ و ۴۵ از پروفیل P14 را نشان می‌دهند.



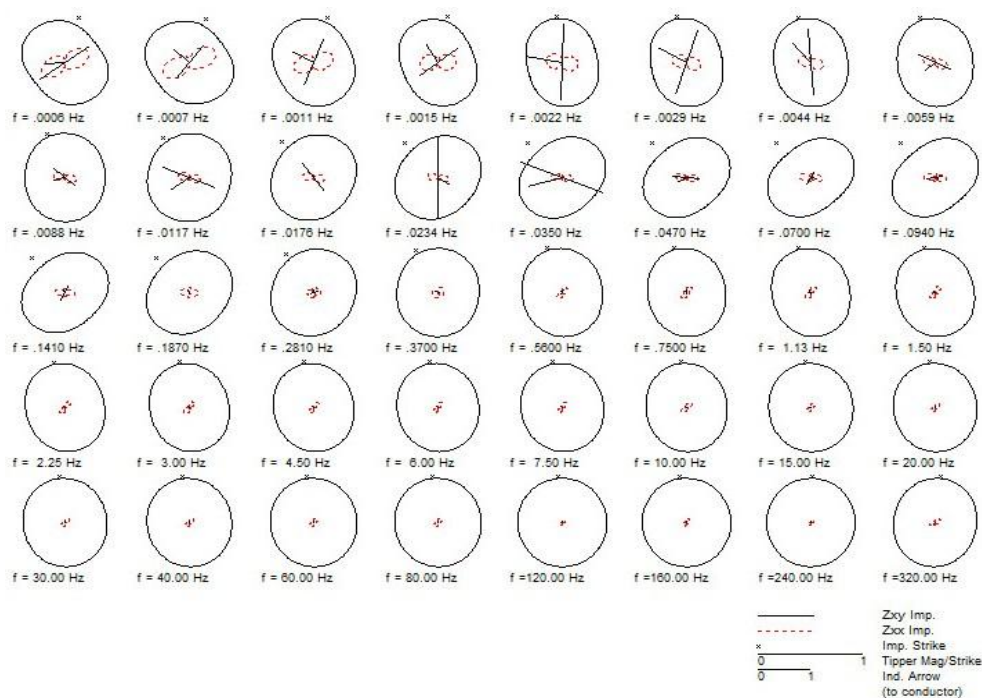
شکل ۹-۴: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۱۴ از پروفیل P1



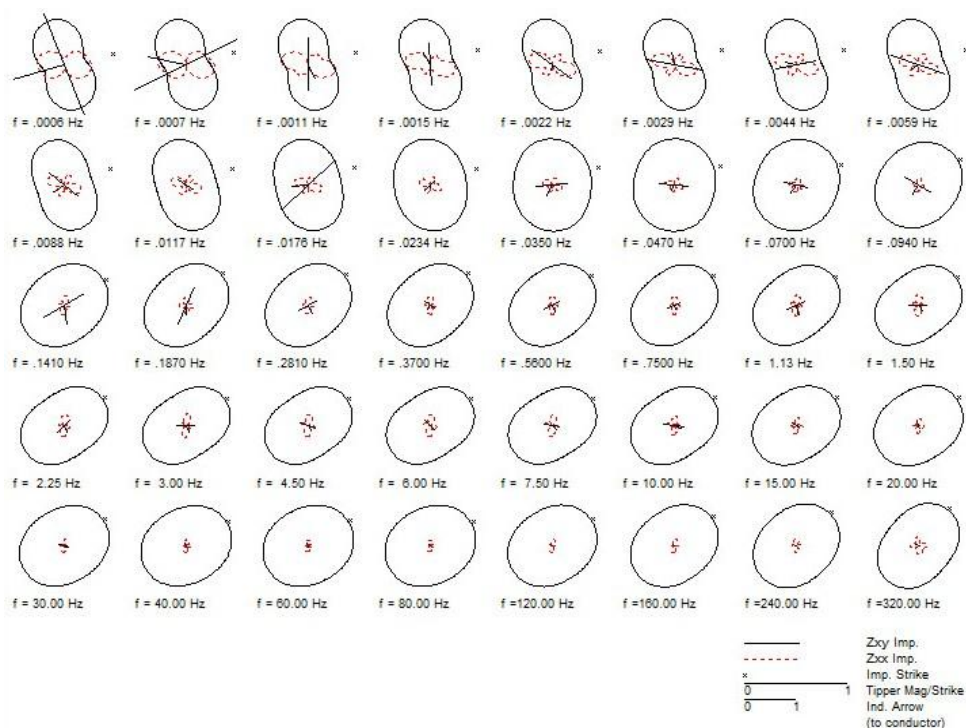
شکل ۴-۱: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۲۹ از پروفیل P1



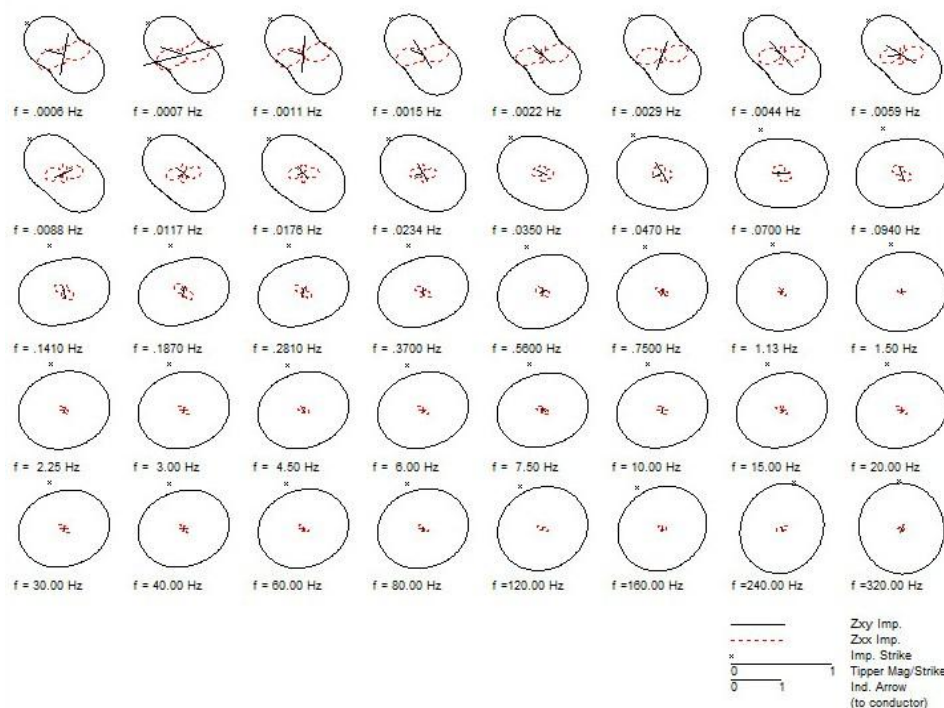
شکل ۴-۱۱: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P1



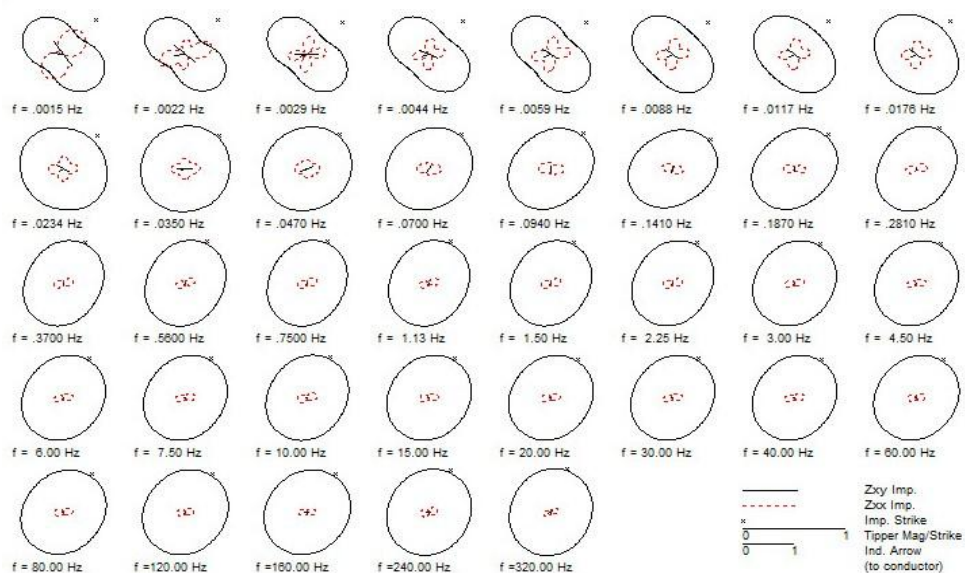
شکل ۴-۱۲: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۲۸ از پروفیل P7



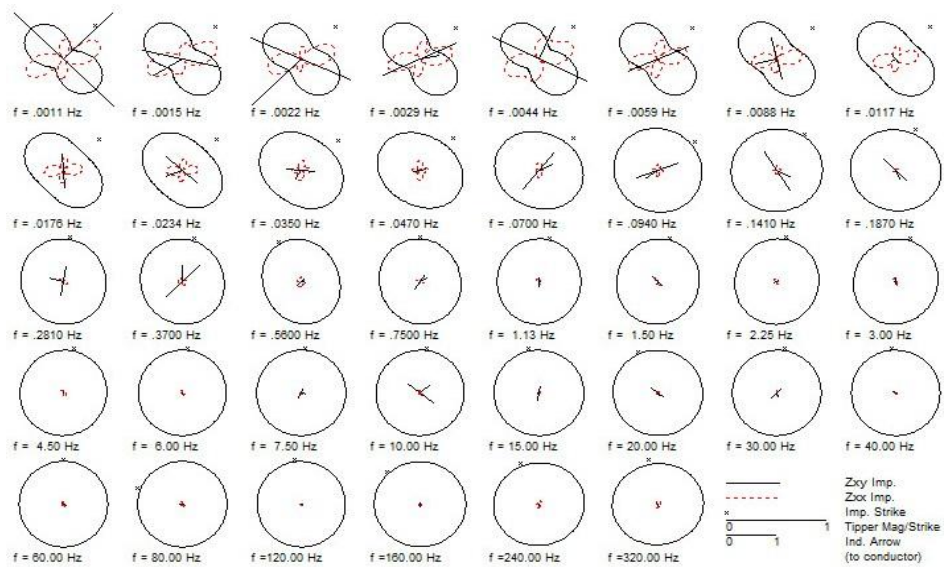
شکل ۴-۱۳: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۴۴ از پروفیل P7



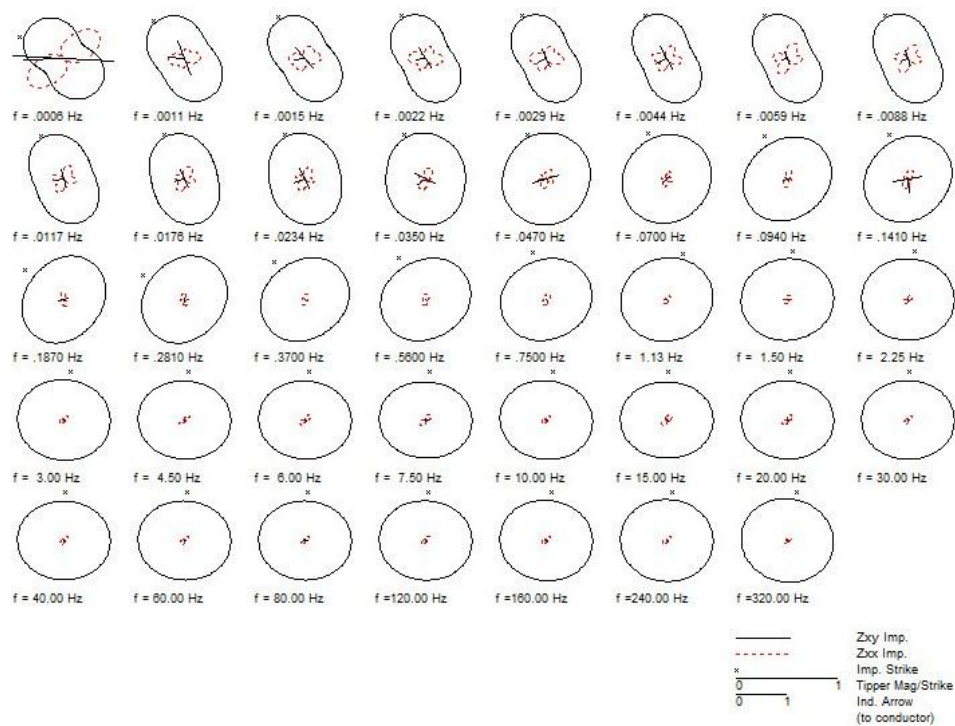
شکل ۴-۱۴: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۷۷ از پروفیل P7



شکل ۴-۱۵: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۱۳ از پروفیل P14



شکل ۴-۱۶: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۲۸ از پروفیل P14



شکل ۴-۱۷: نمودارهای قطبی‌های تانسور امپدانس در فرکانس‌های مختلف برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P14

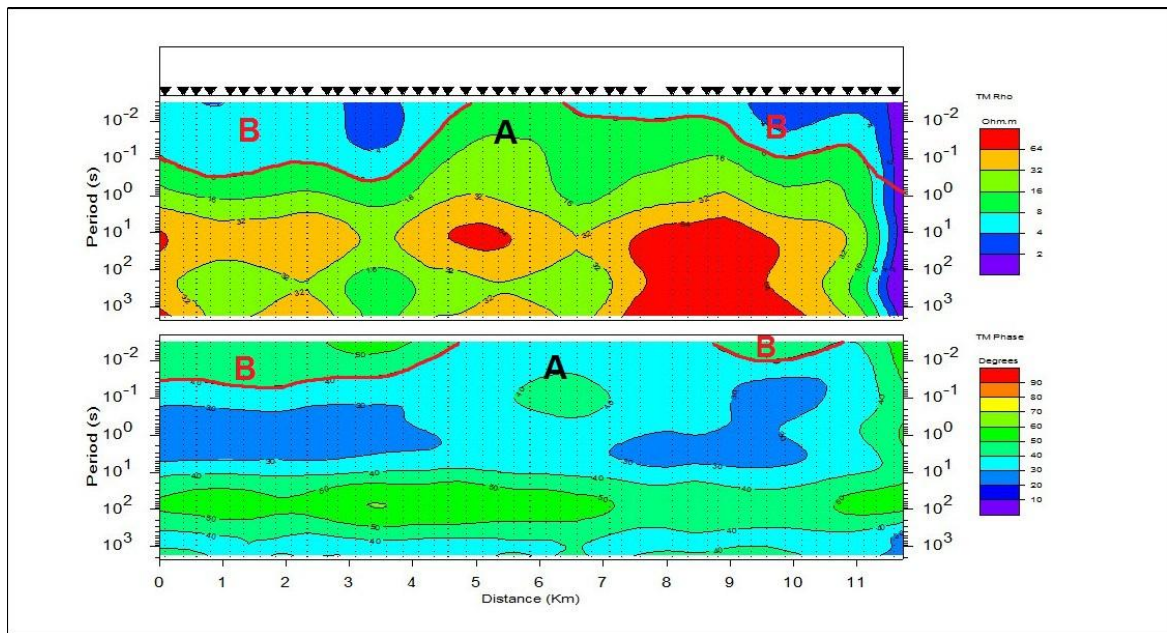
همانطور که در فصل دوم گفته شد مولفه xy تانسور امپدانس برای ساختارهای یک بعدی به شکل دایره و برای ساختارهای دو و سه بعدی در یک امتداد کشیده شده است. مولفه xx تانسور امپدانس برای ساختارهای یک بعدی صفر، ساختارهای دو بعدی به شکل یک گلبند متقارن و برای ساختارهای سه بعدی در یک امتداد کشیده شده است که اندازه‌اش قابل مقایسه با مولفه xy تانسور امپدانس است.

در سونداژ ۱۴ از پروفیل P1 (شکل ۴-۹) در سطح زمین ساختار تقریباً دو بعدی است ولی در اعماق زیاد چون مولفه xy در یک امتداد کشیده شده است و مولفه xx به شکل یک گلبند متقارن است و اندازه کوچکی دارد ساختار دوبعدی است. در سونداژ ۲۹ پروفیل P1 (شکل ۴-۱۰) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۰/۱۴ هرتز ساختار یک بعدی، از فرکانس ۰/۱۴ تا ۰/۰۰۱۱ هرتز ساختار دوبعدی و در فرکانس‌های پایین‌تر ساختار سه بعدی می‌باشد. در سونداژ ۴۵ پروفیل P1 (شکل ۴-۱۱) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۰/۱۴ هرتز ساختار یک بعدی و در فرکانس‌های کمتر از ۰/۱۴ هرتز ساختار دو بعدی است. در سونداژ ۲۸ پروفیل P7 (شکل ۴-۱۲) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۰/۱۸ هرتز ساختار یک بعدی و در فرکانس‌های پایین‌تر از ۰/۱۸ هرتز ساختار دو بعدی می‌باشد. در سونداژ ۴۴ پروفیل P7 (شکل ۴-۱۳) در سطح زمین ساختار تقریباً یک بعدی و در اعماق دو بعدی است. در سونداژ ۷۷ پروفیل P7 (شکل ۴-۱۴) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۱/۱۳ هرتز ساختار یک بعدی و در اعماق دو بعدی است. در سونداژ ۱۳ پروفیل P14 (شکل ۴-۱۵) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۰/۰۷ هرتز ساختار یک بعدی و در اعماق ساختار دو بعدی می‌باشد. در سونداژ ۲۸ پروفیل P14 (شکل ۴-۱۶) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۰/۱۴ هرتز ساختار یک بعدی، از فرکانس ۰/۱۴ تا ۰/۰۰۵۹ هرتز ساختار دو بعدی و در فرکانس‌های بیشتر ساختار سه بعدی است. در سونداژ ۴۵ پروفیل P14 (شکل ۴-۱۷) از سطح زمین تا فرکانس تقریبی ۰/۰۴ هرتز ساختار یک بعدی و در اعماق ساختار دو بعدی می‌باشد. با توجه به تمام این تفاسیر با استفاده از بردارهای قطبی تانسور امپدانس می‌توان نتیجه گرفت کلاً در اعماق کم ساختارهای زیرسطحی منطقه یک بعدی و در اعماق زیاد ساختارهای زیرسطحی منطقه غالباً دو بعدی می‌باشند.

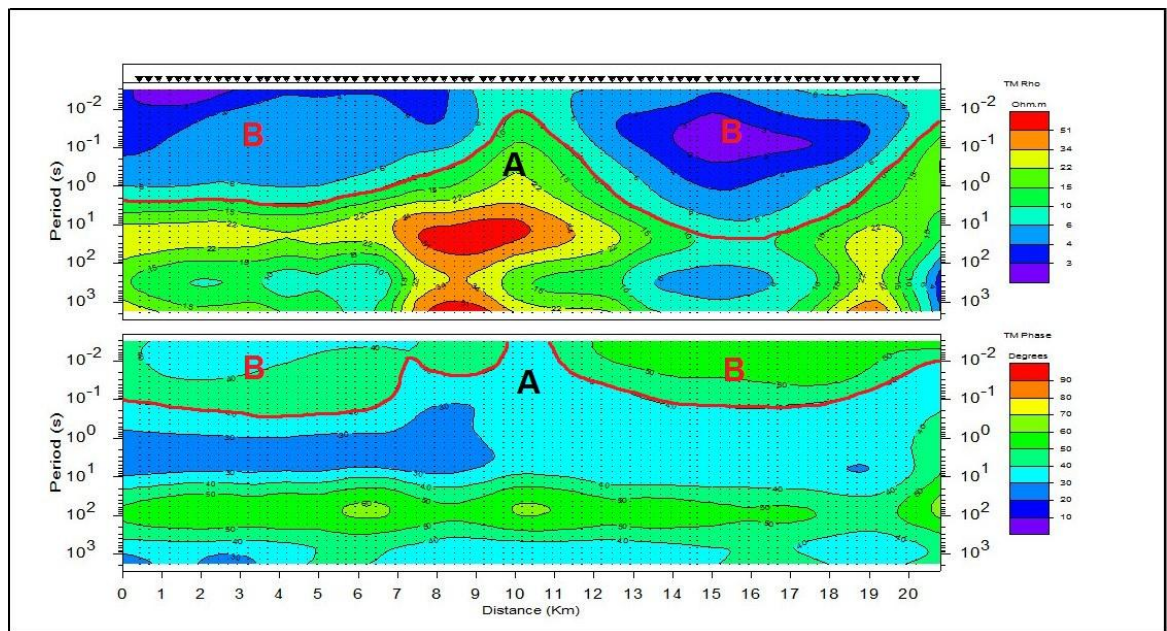
با توجه به دو بعدی بودن ساختارهای زیر سطحی منطقه در اعماق زیاد، دو مد TE و TM تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه پروفیل‌های برداشت داده‌های MT عمود بر امتداد ساختار هستند و با در نظر

گرفتن رابطه $Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j}$ ($i, j = x, y$) مولفه Z_{xy} بیانگر مد TM و مولفه Z_{yx} بیانگر مد TE می‌باشند.

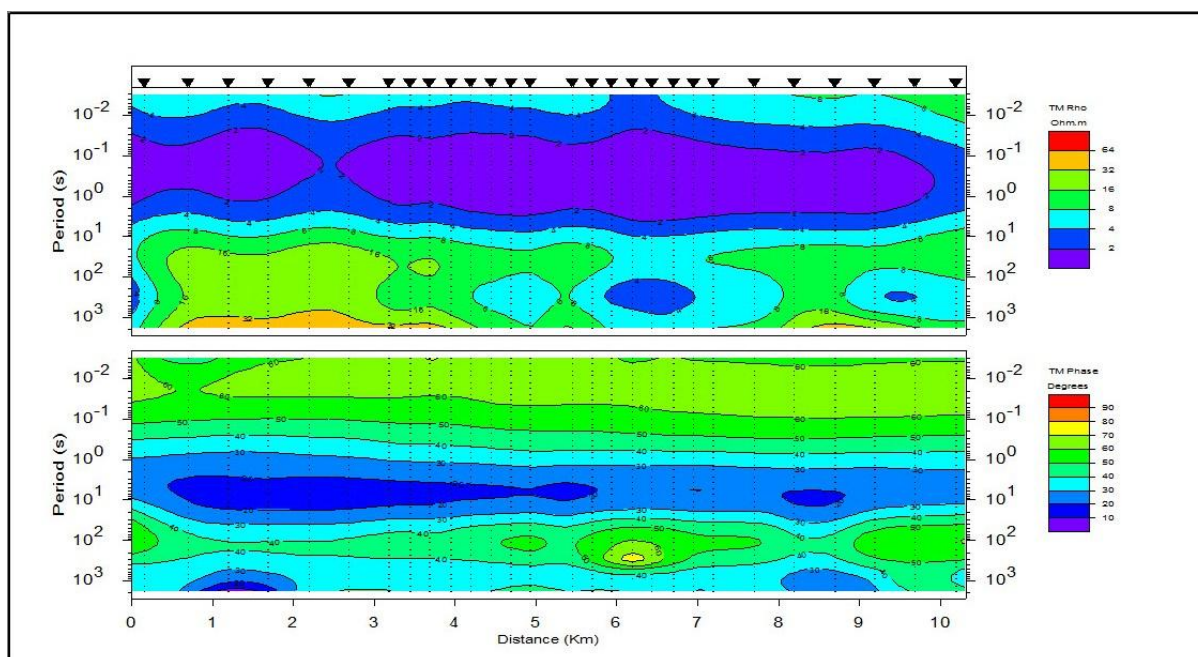
شکل‌های (۴-۱۸)، (۴-۱۹) و (۴-۲۰) شبه مقاطع داده‌های مقاومت ویژه و فاز را بر حسب پریود برای قطبش TM، قبل از انجام تصحیح جابجایی ایستا در طول پروفیل P1، P7 و P14 نشان می‌دهد. شبه مقاطع مقاومت ویژه در این شکل‌ها تقریباً توسط مقاطع فاز حمایت می‌شوند و جایی که مقاومت ویژه پایین باشد مقدار فاز بالا است. همچنین در شبه مقطع مقاومت ویژه بر حسب پریود در طول پروفیل، سری‌های نواری عمودی موازی با محور پریود نیز مشاهده نمی‌شود بنابراین اثر جابه‌جایی استاتیکی روی داده‌ها کم است. شبه مقطع TM به دلیل تاثیر پذیری بالا از ناهمگنی‌های سطحی در اینجا آورده شده است. در پریودهای پایین تا متوسط که معادل اعماق کم تا متوسط می‌باشد ساختار لایه‌ای و چین خوردگی، قابل مشاهده می‌باشد که با تنها مقطع عرضی زمین شناسی ناحیه که تقریباً بر پروفیل P4 منطبق است، مطابقت دارد. چین خوردگی‌های به شکل تاقدیس و ناودیس با نماد A و B مشخص شده‌اند (که معادل تاقدیس و ناودیس کردند در مقطع عرضی زمین‌شناسی می‌باشند) و این چین خوردگی‌ها در پریودهای متوسط (معادل اعماق متوسط) نیز مشاهده می‌شود. شبه مقاطع مقاومت ویژه و فاز برای بقیه پروفیل‌های P13, ..., P2 در پیوست (الف) و در شکل‌های (الف-۱۸) تا (الف-۲۸) آورده شده است.



شکل ۴-۱۸: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P1



شکل ۴-۱۹: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P7



شکل ۴-۲۰: شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P14

با نگاهی به شکل‌های (۴-۱۸)، (۴-۱۹) و (۴-۲۰) و شکل‌های الف-۱۸ تا الف-۲۸ از پیوست (الف) چین خوردگی‌ها در پروفیل‌های P1 تا P8 به روشنی مشخص است اما از پروفیل P9 تا P14 ساختار کاملاً لایه‌ای، هموار و بدون چین خوردگی قابل ملاحظه‌ای می‌باشد و در همه شبه مقاطع در پریودهای بالا (اعماق زیاد) مقاومت ویژه بیشتر از اعماق کم و متوسط می‌باشد که دلیل این قضیه وجود لایه‌های با مقاومت ویژه زیاد در اعماق زیاد می‌باشد. در فصل‌های بعدی با انجام مدل‌سازی وضعیت ساختارهای منطقه به صورت کمی‌تر بررسی می‌شوند.

فصل پنجم

مدل سازی یک بعدی و تفسیر کمی

داده‌های مگنتوتلوریک

۵-۱ مقدمه

با توجه به مطالب فصل قبل، آنالیز ابعادی و شبه مقاطع قائم تفسیر شده برای پروفیل‌های مختلف نشان‌دهنده این هستند که ساختار منطقه از سطح تا اعماق متوسط یک بعدی است و علاوه بر آن تجربه نشان داده است که حتی با انجام مدل‌سازی یک بعدی داده‌های $\rho_{average}$ (ρ_{inv}) می‌توان اطلاعات کمی خوبی از ساختارهای منطقه حاصل نمود (Park and Livelybrooks, 1989).

بعد از اینکه اثر جابه‌جایی ایستا برای داده‌های سونداژ MT هر ایستگاه، به کمک داده‌های سونداژ TEM تصحیح شدند، با توجه به نتایج آنالیز ابعادی باید به صورت یک یا دو بعدی مورد مدل‌سازی قرار گیرند تا اطلاعاتی از توزیع مقادیر مقاومت ویژه و هندسه ساختارهای زیر سطحی به دست آید. هدف از وارون‌سازی داده‌های سونداژ MT، به دست آوردن پارامترهای مدل (مقاومت ویژه الکتریکی و ضخامت هر لایه)، با توجه به داده‌های مشاهده‌ای (مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری زمین و فاز امپدانس بر حسب فرکانس) می‌باشد. بدین ترتیب که با استفاده از مجموعه‌ای از روابط ریاضی مستقیماً از روی مقادیر داده‌های تجربی یا مشاهده‌ای، پارامترهای مدل، به گونه‌ای برآورد می‌شوند که برازش مناسبی با داده‌های مشاهده‌ای داشته باشند. برای مدل‌سازی معکوس داده‌های مگنتوتلوریک از نرم افزار WinGLink استفاده شد. این نرم افزار برای مدل‌سازی داده‌های متنوع ژئوفیزیکی از جمله گرانی سنجی، مغناطیس و روش‌های الکترومغناطیسی قابل استفاده است (قندی، ۱۳۸۶؛ خوجم لی، ۱۳۹۰).

تیخانوف (۱۹۶۵) نشان داد که تحت شرایط ایده‌آل و داشتن داده‌های نامتناهی و بدون نوفه، استخراج مدل یکتا از داده‌های MT امکان پذیر است. روش مگنتوتلوریک همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی جز مسائل فروبرآورد^۱ است یعنی اینکه تعداد مجهولات (که در اینجا همان پارامترهای مدل (M) هستند) از تعداد داده‌های مساله (N) بیشتر است (Meju, 1994) بنابراین مدل‌سازی اطلاعات کافی راجع به یکتایی پارامترهای مدل ارائه نمی‌دهد (N اندازه‌گیری در یک تجربه مشخص به عنوان داده، با برداری مانند d با

¹ Underdetermined Problem

طول N مشخص می‌شود و پارامترهای مدل نیز مولفه‌های بردار m با طول M هستند). این مساله وقتی اتفاق می‌افتد که چندین حل با یک خطای پیش بینی شده داده شده باشند. بنابراین با داشتن داده‌های واقعی MT، که شامل نوفه می‌باشند و آرون‌سازی داده‌های MT غیر یکتا است و مدل‌های ژئوالکتریکی نامحدودی را نتیجه می‌دهد. عدم یکتایی جواب در مسائل و آرون به دلیل عدم یکتایی ذاتی مساله را می‌توان با اعمال برخی قیود و استفاده از اطلاعات اولیه^۱ به حداقل رساند.

۲-۵ و آرون سازی یک بعدی داده‌های مگنتوتلوریک کرد

الگوریتم مورد استفاده در و آرون‌سازی یک بعدی داده‌های MT ساختمان کرد، الگوریتم و آرون‌سازی هموار اوکام است (Constable, et al., 1987) که با نرم افزار WinGLink انجام می‌شود. در پیوست (ب) مطالبی مختصر، در مورد چگونگی مدل‌سازی با این روش آمده است.

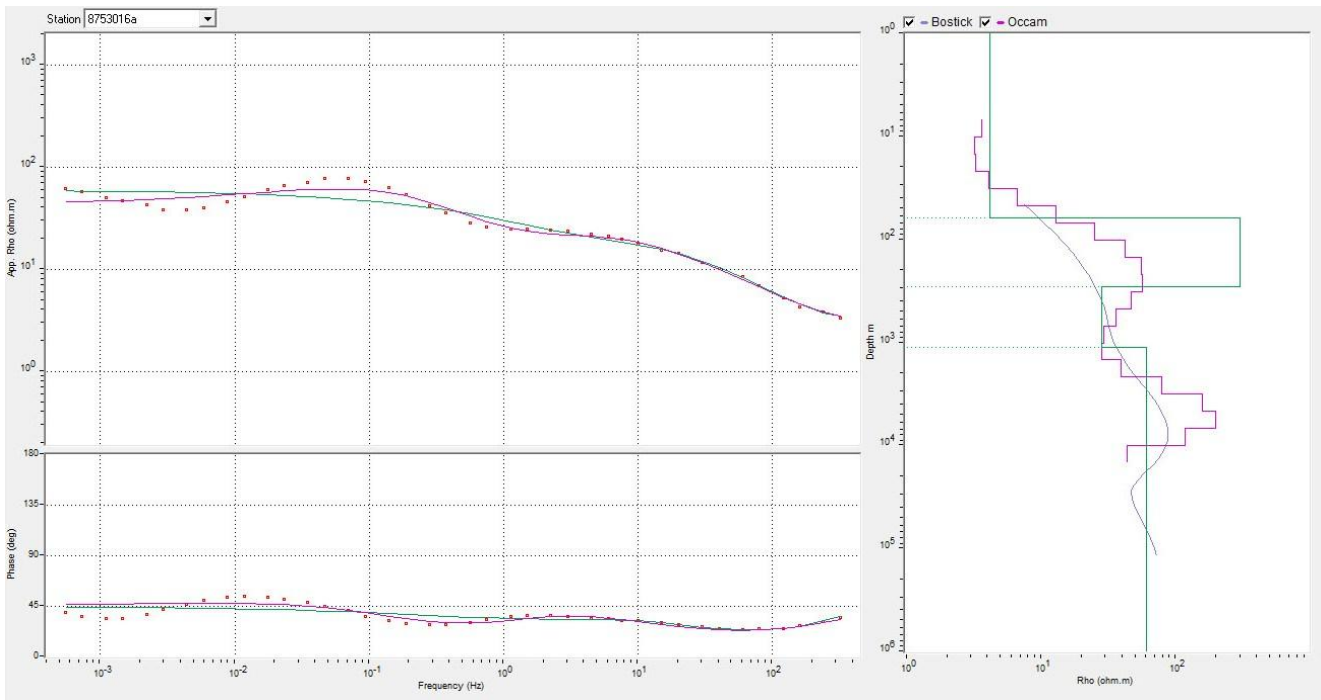
همانطور که قبلاً اشاره شد مد TM از ناهمگنی‌های سطحی و توپوگرافی بیشتر تاثیر می‌پذیرد و از این مد برای نشان دادن عوارض سطحی استفاده می‌شود. از طرفی مد TE ساختارهای عمیق با مقاومت ویژه زیاد را بهتر نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر به منظور مدل‌سازی یک بعدی داده‌های مقاومت ویژه و فاز و برای استفاده از قابلیت هر دو مد برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی، از پارامتر نامتغیر چرخشی $Z_{average}$ که بر مبنای میانگین‌گیری هندسی از این دو مد می‌باشد استفاده می‌شود (Park and Livelybrooks, 1989):

$$Z_{average} = \sqrt{(-Z_{xy}Z_{yx})} \quad (۱-۵)$$

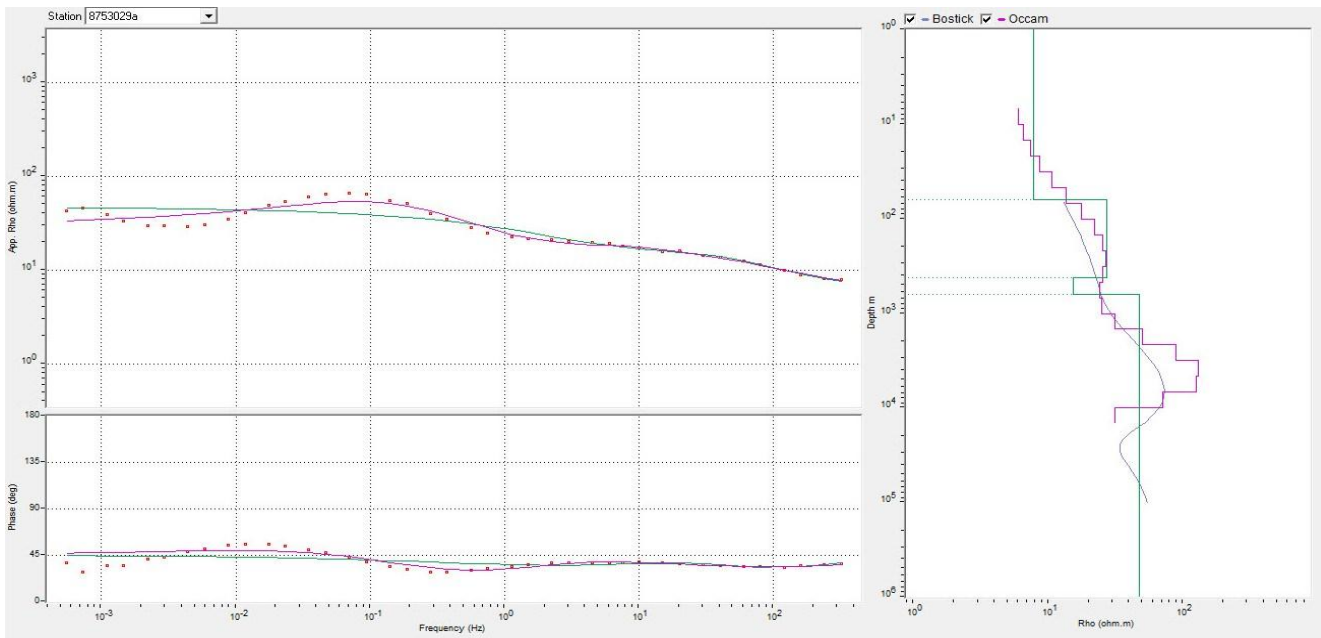
شکل‌های (۱-۵)، (۲-۵) و (۳-۵) مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین، مدل‌سازی پارامتری و تبدیل عمق پوستیک برای سه سونداژ پروفیل P1 را همراه با داده‌های مشاهده‌ای مقاومت ویژه و فاز و پاسخ حاصل از مدل‌سازی‌های پارامتری و اوکام نشان می‌دهند. شکل‌های (۴-۵)، (۵-۵) و (۶-۵) همه این پارامترها را برای سه سونداژ پروفیل P7 و شکل‌های (۷-۵)، (۸-۵) و (۹-۵) همه این پارامترها را

¹ Priori Information

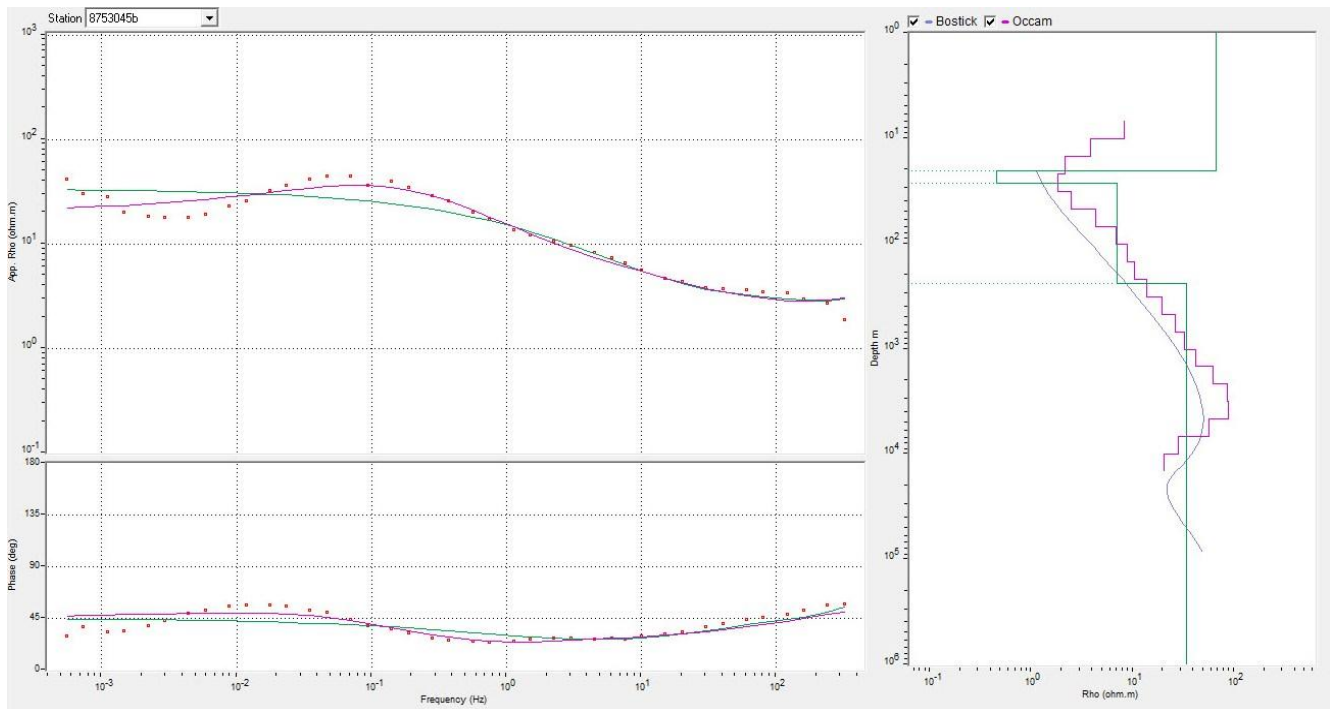
برای سه سونداژ پروفیل P14 نشان می دهند.



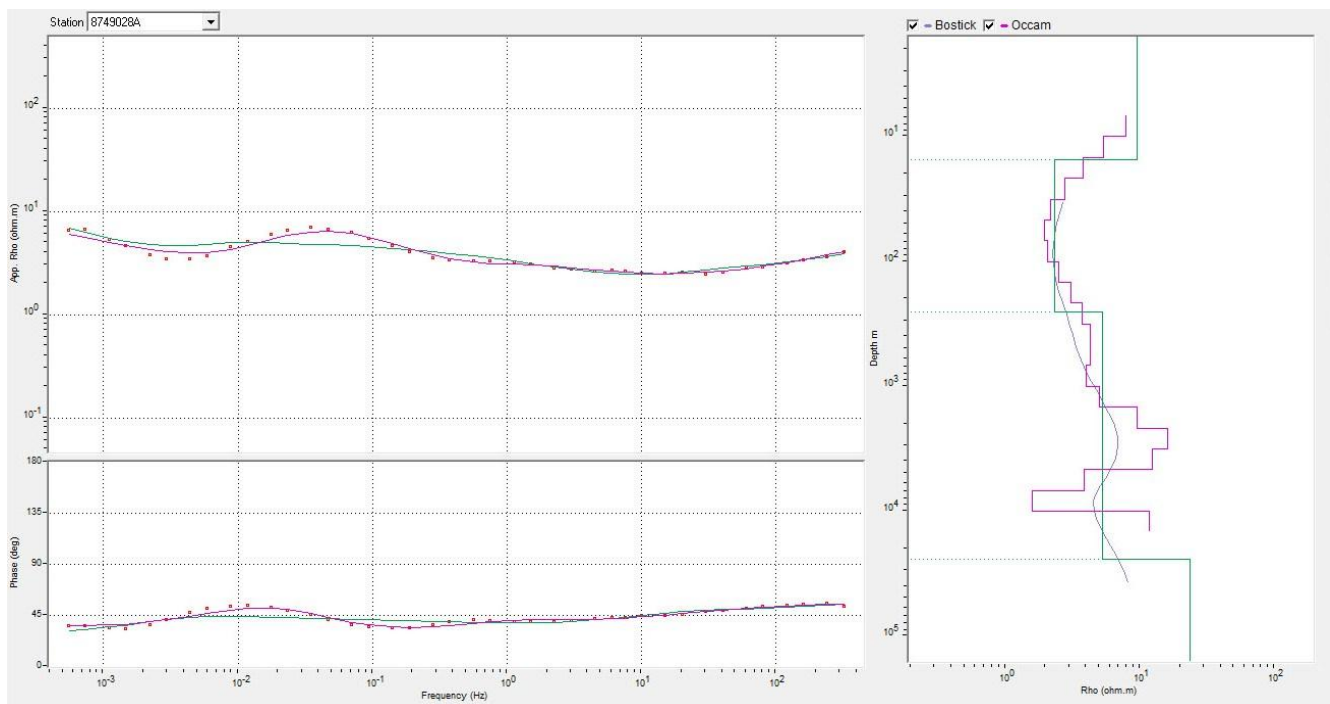
شکل ۵-۱: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۱۶ از پروفیل P1 آورده شده اند.



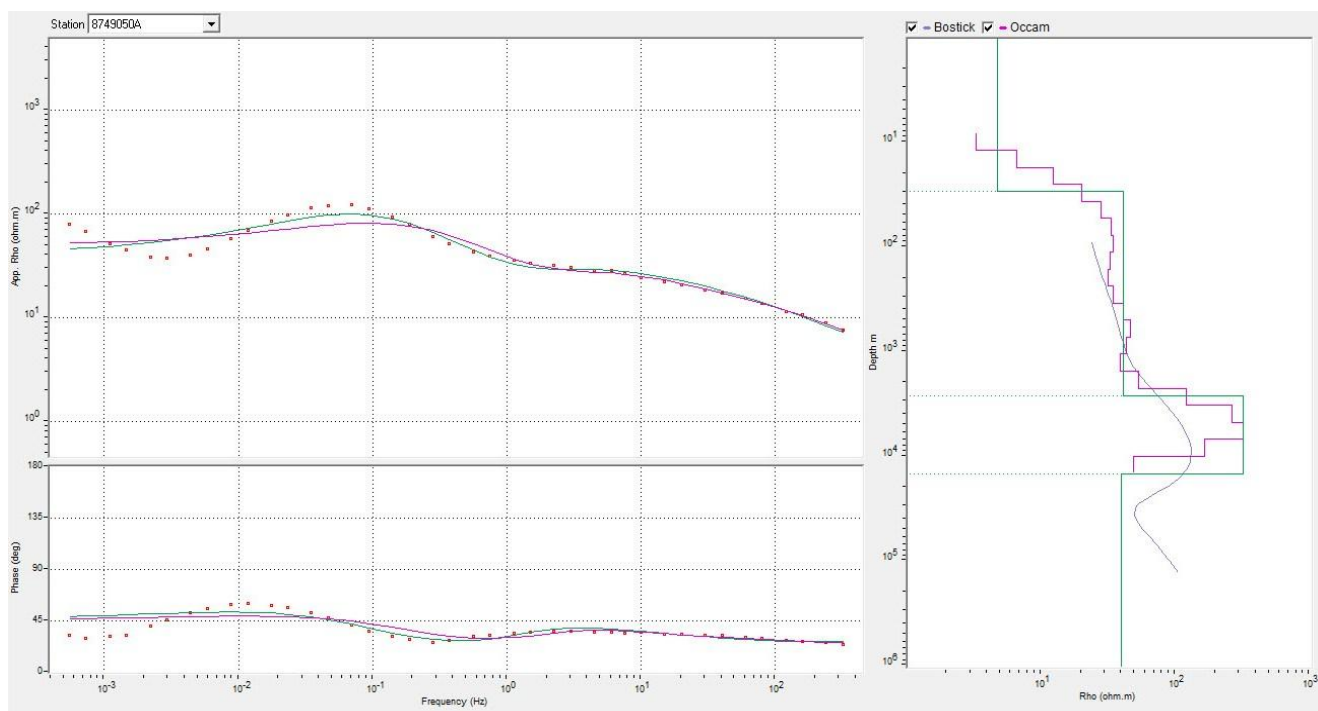
شکل ۵-۲: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۲۹ از پروفیل P1 آورده شده اند.



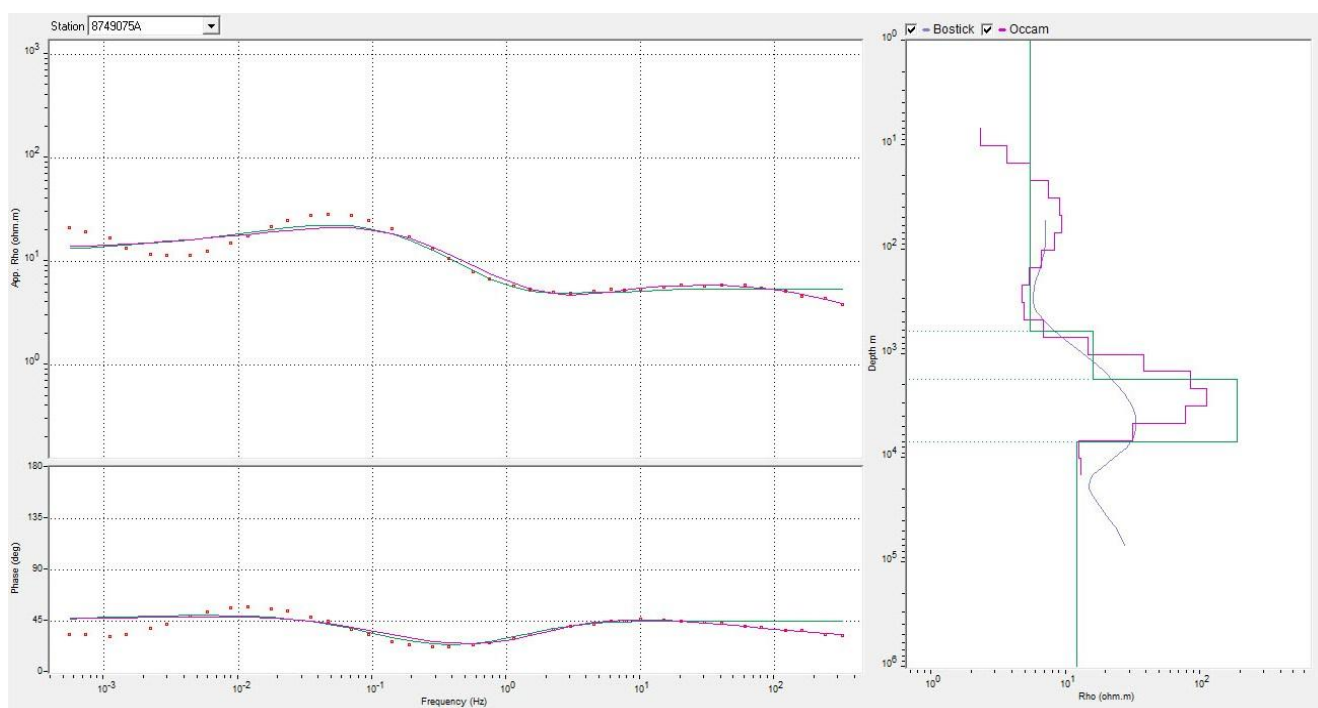
شکل ۳-۵: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P1 آورده شده اند.



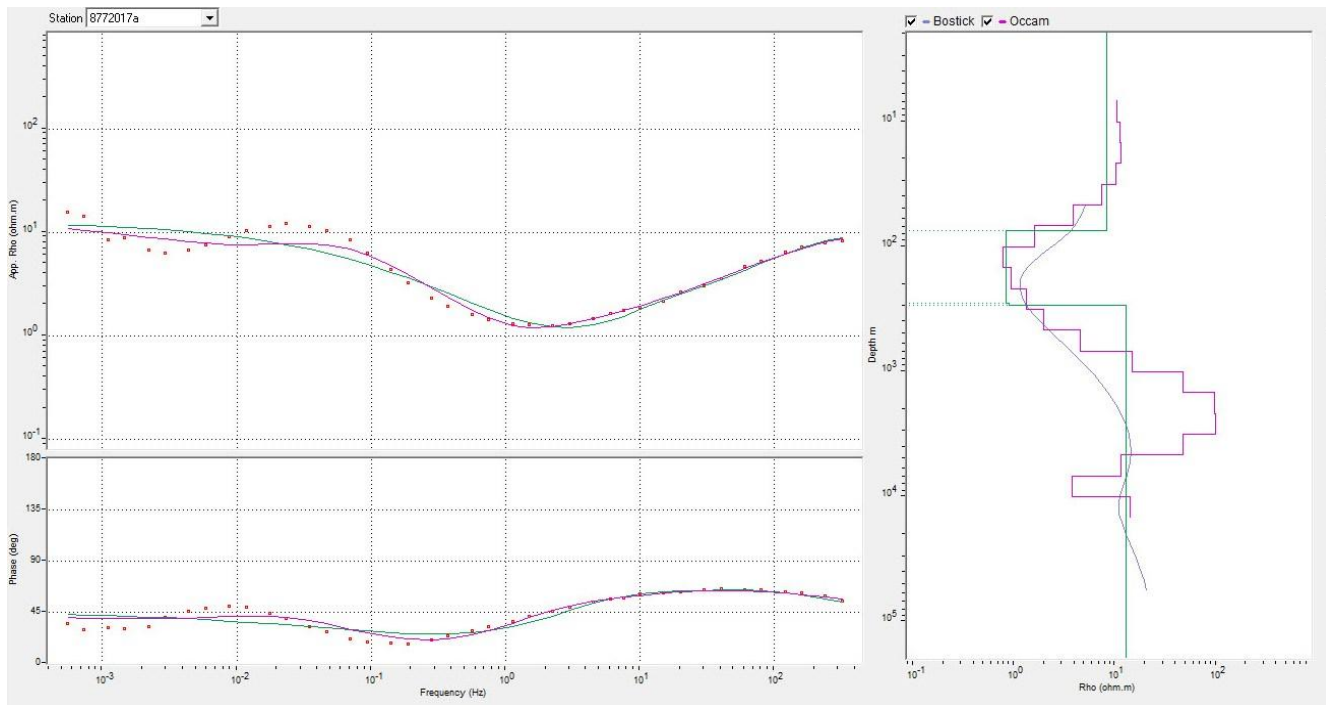
شکل ۴-۵: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۲۸ از پروفیل P7 آورده شده اند.



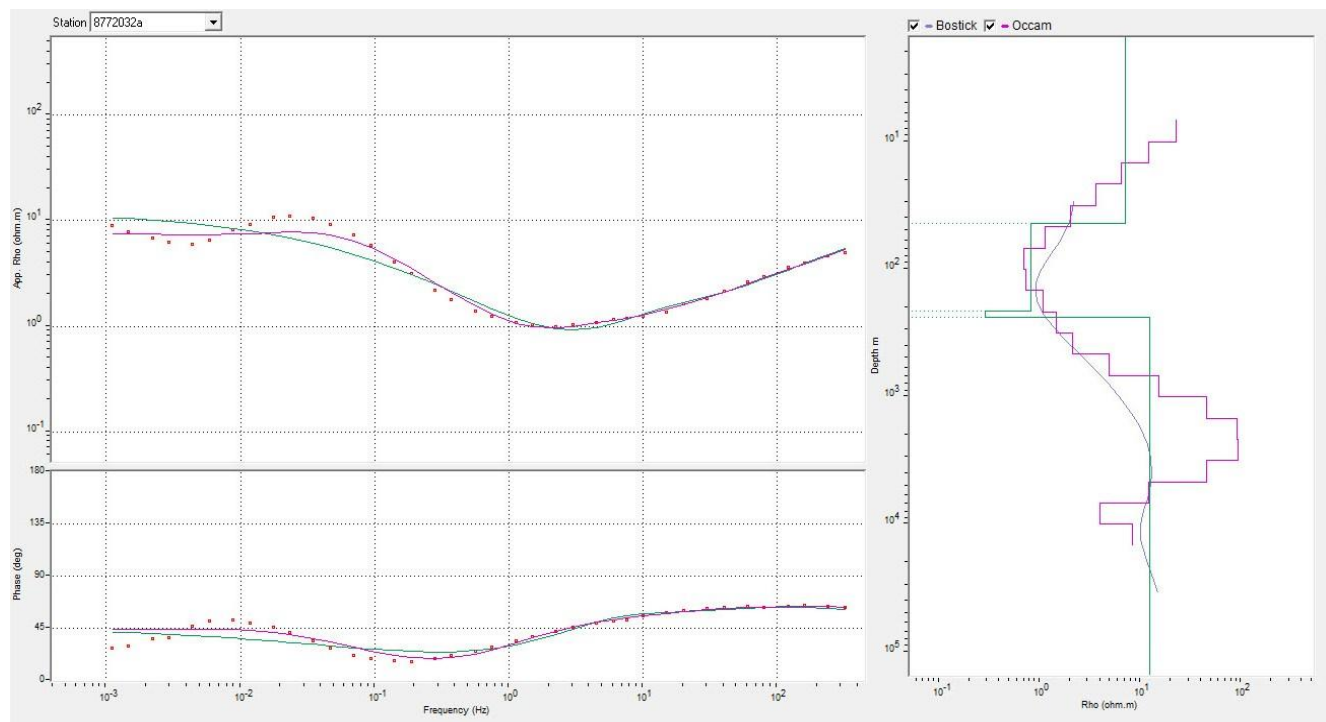
شکل ۵-۵: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۵۰ از پروفیل P7 آورده شده اند.



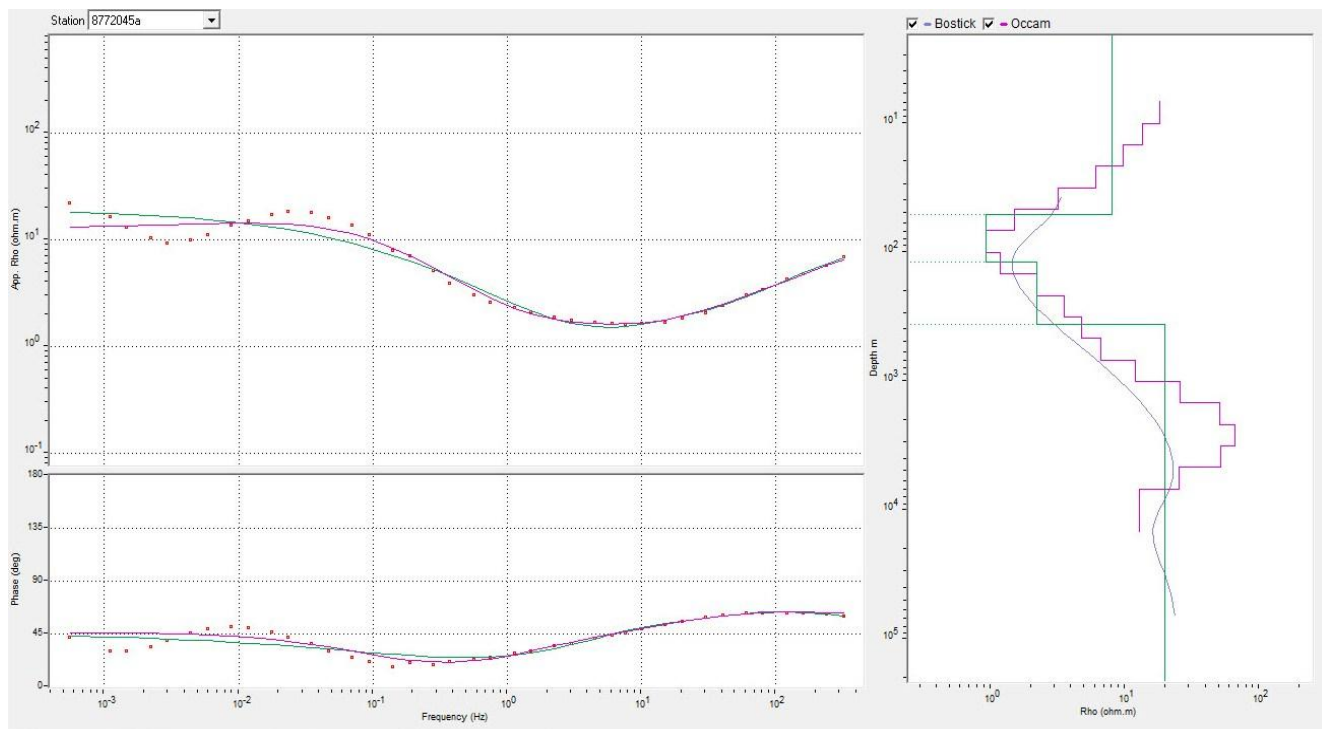
شکل ۵-۶: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۷۵ از پروفیل P7 آورده شده اند.



شکل ۵-۷: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۱۷ از پروفیل P14 آورده شده اند.



شکل ۵-۸: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۳۲ از پروفیل P14 آورده شده اند.

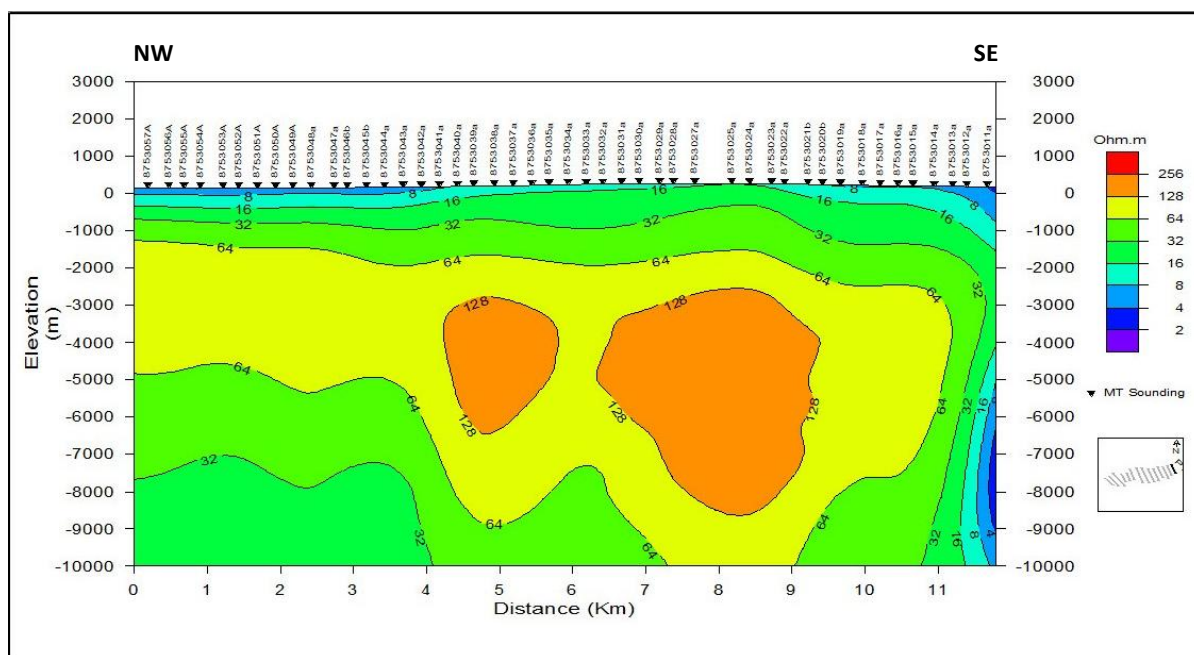


شکل ۵-۹: مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین (خط بنفش)، مدل سازی پارامتری (خط سبز) و تبدیل عمق بوستیک (خط آبی) در سمت چپ، داده های مشاهده ای مقاومت ویژه و فاز (نقاط قرمز)، نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام (خط بنفش) و نتایج مدل سازی پارامتری (خط سبز) در سمت راست برای سونداژ ۴۵ از پروفیل P14 آورده شده اند.

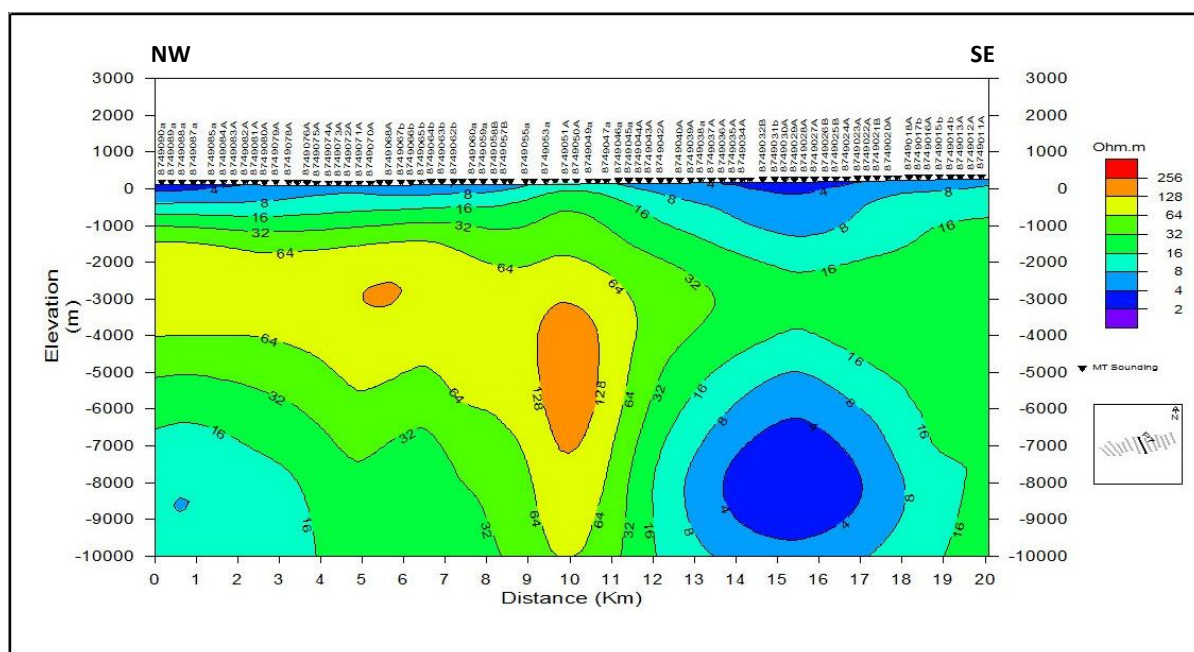
در همه این شکل ها تطابق خوبی بین داده های مشاهده ای مقاومت ویژه ظاهری و فاز و نتایج حاصل از مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین و نتایج حاصل از مدل سازی پارامتری وجود دارد که این، دقت در انجام مدل سازی های اوکام و پارامتری را نشان می دهد ولی این تطابق در فرکانس های بالاتر از ۱ هرتز (اعماق کم) بیشتر از فرکانس های کمتر از ۱ هرتز (اعماق زیاد) است که این به دلیل دو بعدی بودن ساختارهای ژئوالکتریکی زیرسطحی منطقه در فرکانس های کمتر از ۱ هرتز می باشد. در سونداژ ۱۶ پروفیل P1 از سطح زمین تا عمق تقریبی ۳۰۰ متر افزایش مقاومت، از عمق ۳۰۰ متری تا ۱۵۰۰ متری کاهش جزئی مقاومت و از عمق ۱۵۰۰ متری تا عمق تقریبی ۱۰۰۰۰ متری افزایش مقاومت ویژه قابل مشاهده است. در سونداژ ۲۹ از پروفیل P1 از سطح زمین تا عمق تقریبی ۳۰۰ متر افزایش مقاومت، از عمق ۳۰۰ متری تا ۱۵۰۰ متری مقاومت ویژه ثابت و از عمق ۱۵۰۰ متری تا عمق تقریبی ۱۰۰۰۰ متری افزایش مقاومت قابل مشاهده است. در سونداژ ۴۵ از پروفیل P1 افزایش مقاومت ویژه را با افزایش عمق شاهد

هستیم پس به طور کلی روند تقریبی افزایش مقاومت ویژه با عمق برای این سه سونداژ از پروفیل P1 نتیجه می‌شود. با توجه به سازند سطحی منطقه که رسوبات بادی لس می‌باشند و جدول (۳-۱) سازندهای منطقه تا عمق تقریبی ۸۰۰ متری سازندهای آبدراز و آیتامیر می‌باشند که عمدتاً از شیل و ماسه سنگ تشکیل شده‌اند. تا عمق تقریبی ۲۰۰۰ متری سازند سنگانه گسترش دارد که این سازند شامل شیل، سیلتستون و مارن می‌باشد که مقاومت ویژه بالاتری نسبت به لایه‌های بالایی دارد. از عمق ۲۰۰۰ متر به پایین‌تر نیز سازندها شامل سرچشمه، تیرگان، زرد و ... می‌باشند که سازند سرچشمه عمدتاً شامل مارن و شیل با میان لایه‌های آهکی، و دیگر سازندها آهکی می‌باشند. بنابراین با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی افزایش مقاومت ویژه با عمق قابل توجیه است. در سونداژ ۲۸ از پروفیل P7 برای لایه‌های خیلی سطحی کاهش جزئی در مقاومت و در اعماق زیاد افزایش کلی در مقاومت ویژه را به جز در عمق ۷۰۰۰ متری شاهد هستیم (این کاهش در مقاومت در عمق تقریبی ۷۰۰۰ متری شاید به دلیل گسترده نبودن سازند حاوی آهک در محل این سونداژ باشد) در سونداژهای ۵۰ و ۷۵ از پروفیل P7 افزایش کلی مقاومت ویژه دیده می‌شود. برای سونداژ ۱۷، ۳۲ و ۴۵ از پروفیل P14 کاهش جزئی مقاومت ویژه در لایه‌های سطحی، افزایش مقاومت ویژه از عمق تقریبی ۱۰۰ متری تا ۳۰۰۰ متری و کاهش جزئی مقاومت ویژه از عمق ۳۰۰۰ متری تا ۱۰۰۰۰ متری وجود دارد که این کاهش در مقاومت در اعماق شاید به دلیل گسترده نبودن سازند حاوی آهک در محل این سونداژ باشد.

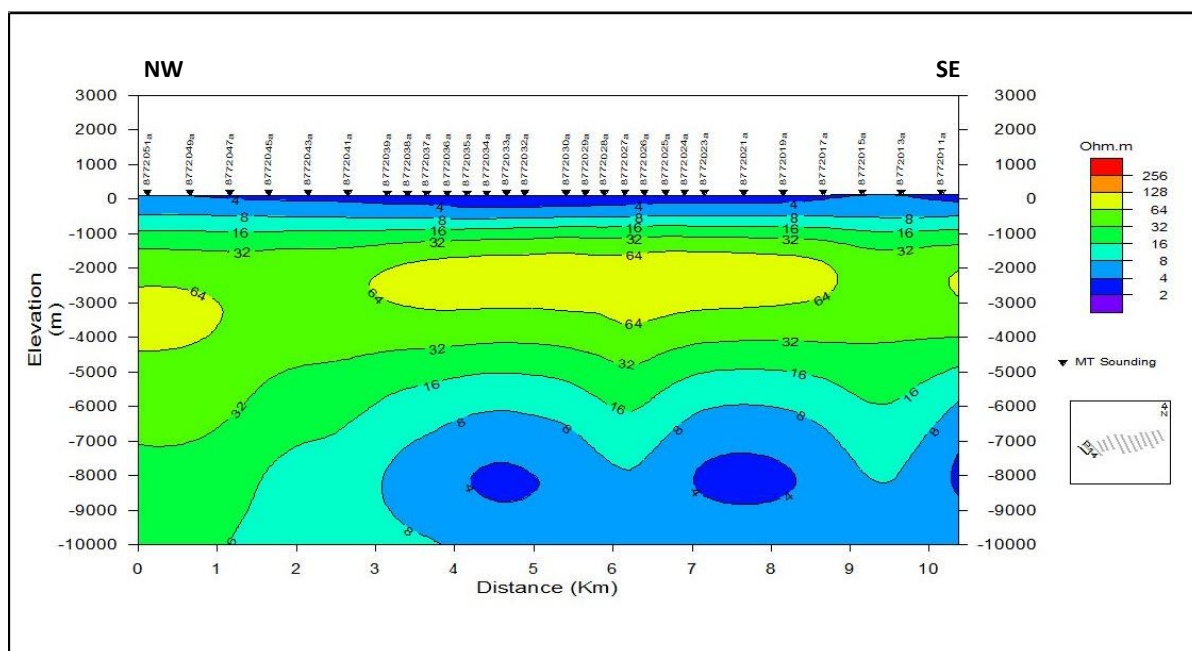
در شکل‌های (۵-۱۰)، (۵-۱۱) و (۵-۱۲) نتایج مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای ۳ پروفیل P1، P7 و P14 همچنین نتایج مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای بقیه پروفیل‌های P13، ...، P2 در پیوست (ب) آورده شده است.



شکل ۵-۱: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P1 (مد میانگین)



شکل ۵-۱۱: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P7 (مد میانگین)



شکل ۵-۱۲: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P14 (مد میانگین)

با توجه به نتایج مدل سازی یک بعدی شکل های (۵-۱۰)، (۵-۱۱) و (۵-۱۲) و شکل های پیوست (ب) (شکل های ب-۱ تا ب-۱۱) مشخص است ساختار لایه ای و چین خوردگی، در سطح در پروفیل های P1 تا P8 قابل مشاهده است (این چین خوردگی که شامل تاقدیس و ناودیس کنند می باشد تا اعماق متوسط دیده می شود) که با نتایج مطالعات زمین شناسی منطقه (فصل سوم) مطابقت دارد. ولی در پروفیل های P9 تا P14 ساختار لایه ای و هموار و بدون چین خوردگی قابل ملاحظه است.

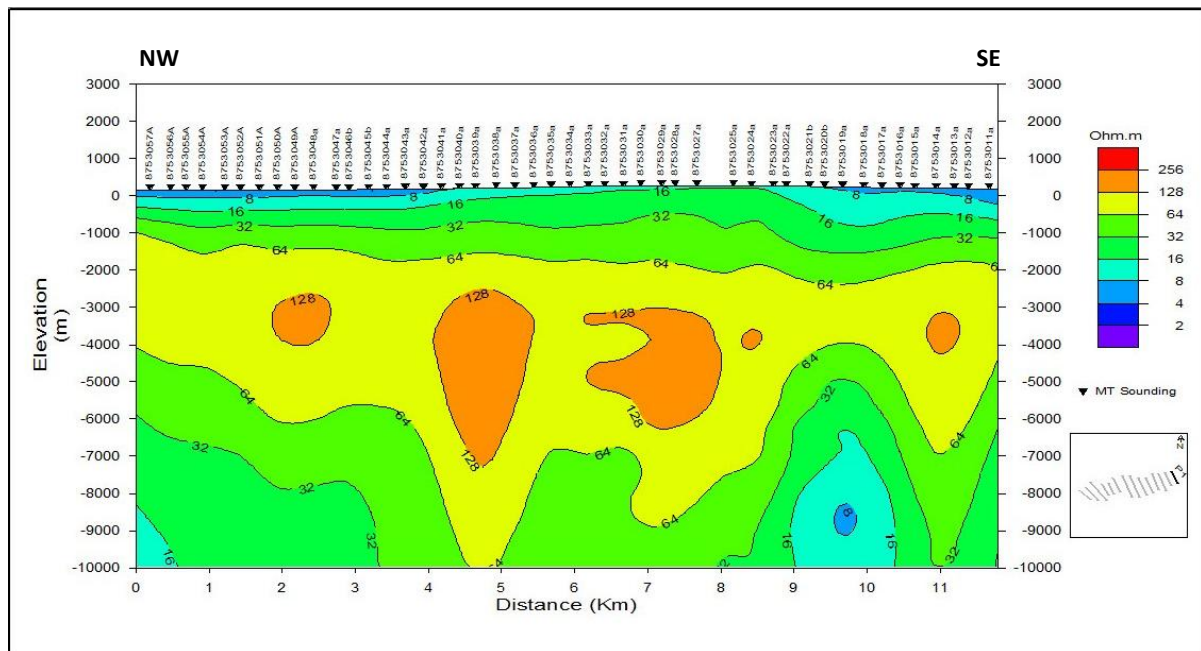
در شکل (۵-۱۰) برای پروفیل P1 روند کلی افزایش مقاومت ویژه را با افزایش عمق شاهد هستیم که این مورد با توجه به اطلاعات زمین شناسی تایید می شود ولی در وسط پروفیل و در اعماق متوسط تا اعماق زیاد لایه با مقاومت ویژه زیاد دیده می شود که این لایه در سمت راست و چپ پروفیل وجود ندارد که دلیل این مساله احتمالاً گسترده نبودن سازند با مقاومت ویژه بیشتر در کل پروفیل است. بدون انجام مدل سازی دو بعدی در مورد اینکه کدام سازند در کل پروفیل گسترده نیست نمی توان قضاوت کرد. همچنین در سمت راست پروفیل تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه دیده می شود که شاید به دلیل وجود گسل مراوه تپه باشد.

در شکل (۵-۱۱) برای پروفیل P7 مشابه پروفیل P1، لایه با مقاومت ویژه زیاد در اعماق متوسط تا اعماق زیاد در کل پروفیل گسترش ندارد همچنین تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه احتمالاً به دلیل وجود گسل مراوه تپه است. توده‌های با مقاومت ویژه بسیار پایین در این پروفیل در اعماق بیشتر از ۶۰۰۰ متری از سطح زمین مشاهده می‌شود که دلیل این قضیه می‌تواند دو و یا سه بعدی بودن ساختارهای ژئوالکتریکی زیرسطحی باشد که مدل‌سازی یک بعدی برای آشکارسازی این ساختارها مناسب نیست.

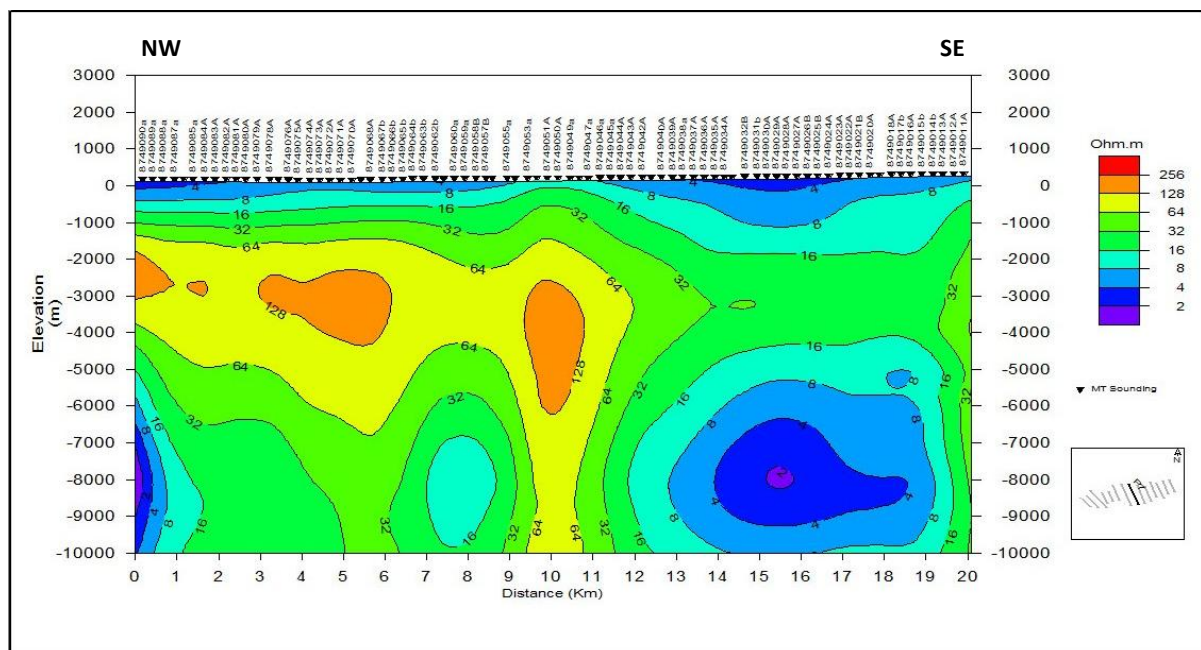
در شکل (۵-۱۲) برای پروفیل P14 ساختار تقریباً لایه‌ای و هموار است و وجود مقاومت ویژه پایین در اعماق زیاد می‌تواند به دو و یا سه بعدی بودن ساختارهای ژئوالکتریکی زیرسطحی دلالت داشته باشد که مدل‌سازی یک بعدی برای آشکارسازی این ساختارها مناسب نیست. با توجه به شکل‌های (۵-۱۰)، (۵-۱۱) و (۵-۱۲) و شکل‌های (ب-۱) تا (ب-۱۱) اثر وجود گسل مراوه تپه تقریباً در همه پروفیل‌ها (با تغییر ناگهانی مقاومت ویژه) وجود دارد. در پروفیل‌های P1 تا P8 گسترش لایه‌های با مقاومت ویژه زیاد در کل پروفیل وجود ندارد ولی در پروفیل‌های P9 تا P14 ساختار زیرسطحی منطقه هموارتر و لایه‌ای است. در مورد وجود سازندها در هر عمق نمی‌توان با انجام مدل‌سازی یک بعدی اظهار نظر کرد و باید مدل‌سازی دو بعدی انجام شود.

شکل‌های (۵-۱۳)، (۵-۱۴) و (۵-۱۵) نتایج مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد TE برای پروفیل‌های P1، P7 و P14 و شکل‌های (۵-۱۶)، (۵-۱۷) و (۵-۱۸) نتایج مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد TM برای پروفیل‌های P1، P7 و P14 آورده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد مد TE ساختارهای با مقاومت ویژه زیاد و عمیق را بهتر نشان می‌دهد. در شکل‌های (۵-۱۳)، (۵-۱۴) و (۵-۱۵) نتایج تقریباً مشابه نتایج مد میانگین می‌باشد با این تفاوت که در شکل‌های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) اثر گسلی با مولفه معکوس در شمال غربی پروفیل‌ها مشخص است. همانطور که قبلاً اشاره شد مد TM ساختارهای سطحی و ناهمگنی‌های جانبی را بهتر نشان می‌دهد در شکل‌های (۵-۱۶)، (۵-۱۷) و (۵-۱۸) نیز نتایج تقریباً مشابه نتایج مد میانگین می‌باشد. اثر گسل مراوه تپه در جنوب شرقی پروفیل P1، و اثر گسل معکوس

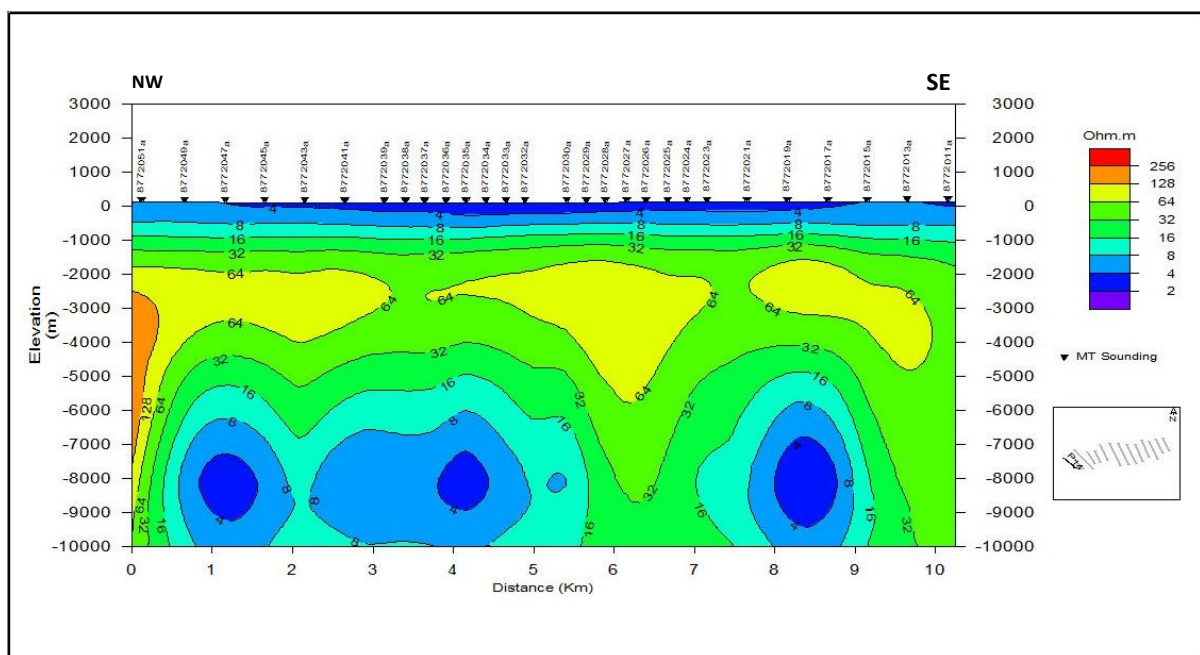
دیگری در شمال غربی پروفیل P7 و P14 مشاهده می‌شود.



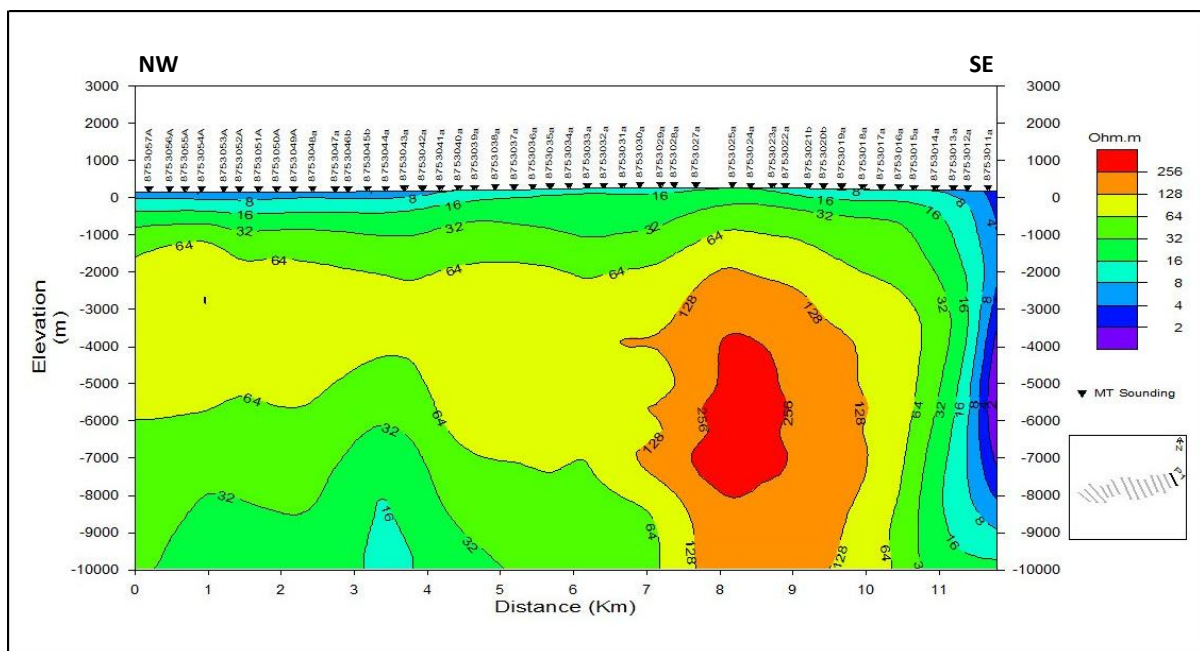
شکل ۵-۱۳: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P1 (مد TE)



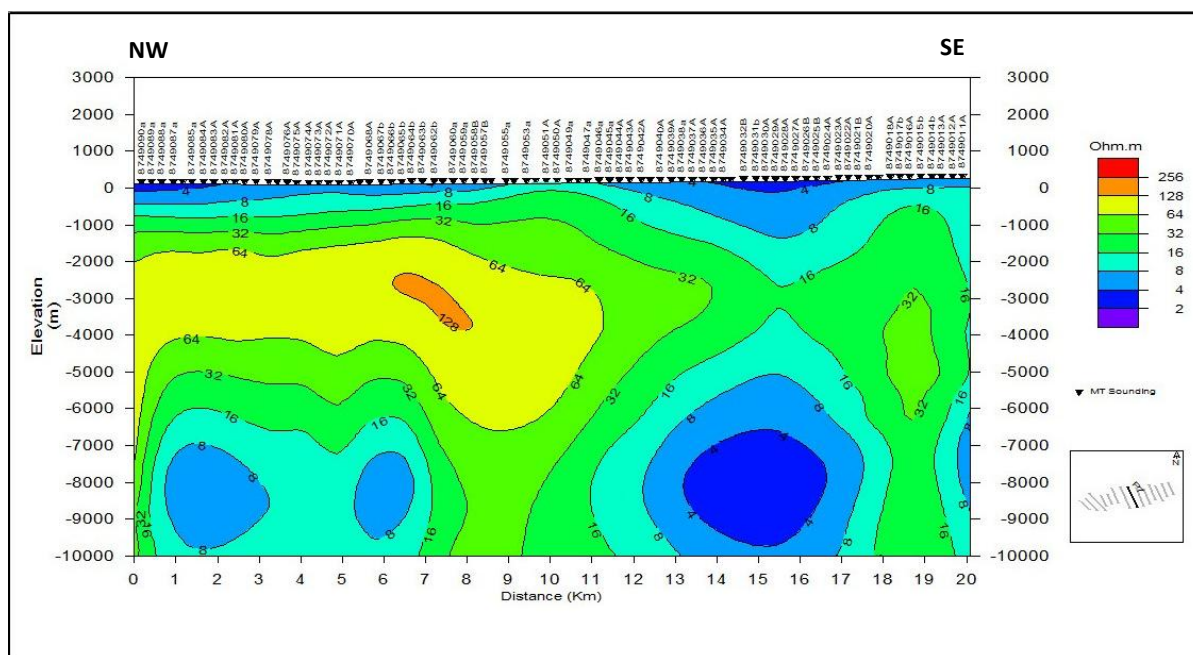
شکل ۵-۱۴: نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P7 (مد TE)



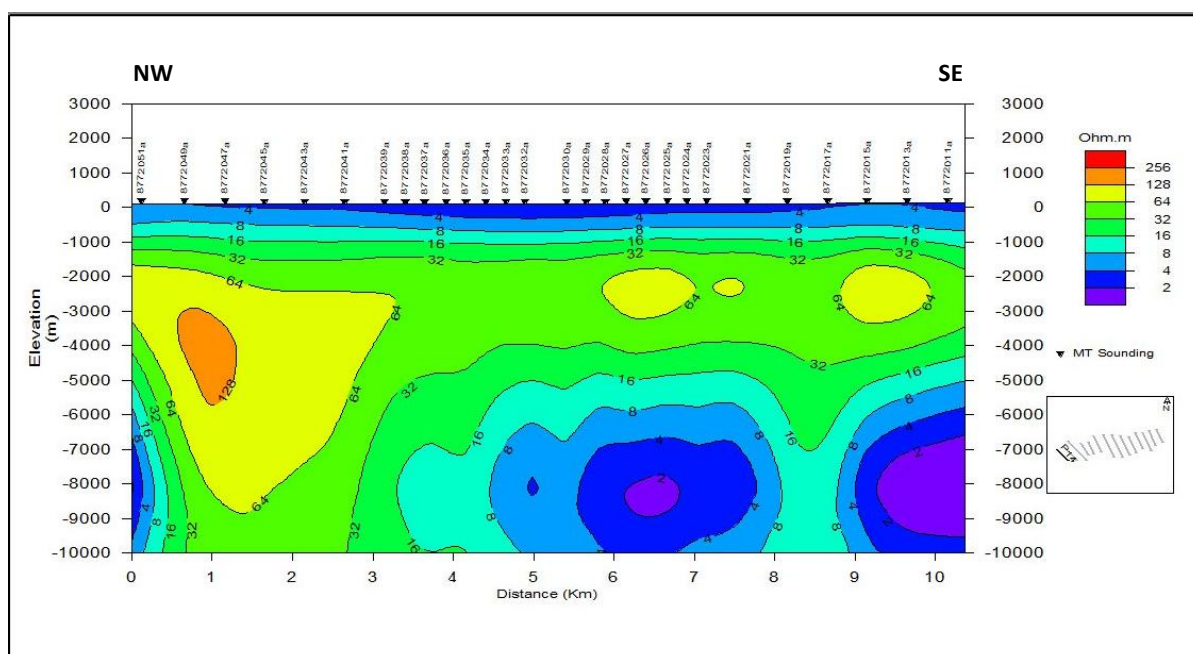
شکل ۵-۱۵: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P14 (مد TE)



شکل ۵-۱۶: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P1 (مد TM)



شکل ۵-۱۷: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P7 (مد TM)



شکل ۵-۱۸: نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P14 (مد TM)

همانطور که قبلاً اشاره شد آنالیز ابعادی، ساختار زیرسطحی منطقه را در اعماق کم یک بعدی، و در اعماق زیاد تقریباً دو بعدی، نشان می‌دهد بنابراین مدل‌سازی یک بعدی اطلاعات عمقی محدودی از ساختارهای زیر سطحی را نتیجه می‌دهد و نمی‌تواند نتایج را به خوبی نشان دهد اما می‌توان یک تفسیر مقدماتی از نتایج مدل‌سازی یک بعدی به دست آورد و برای به دست آوردن نتیجه‌گیری و تفسیر بهتر از ساختارهای زیر سطحی انجام مدل‌سازی دو بعدی ضروری می‌باشد.

فصل ششم

وارون سازی دو بعدی و تفسیر داده‌های
مگنتوتلوریک ساختمان کردند

۶-۱ مقدمه

در فصل‌های قبل، داده‌های مگنتوتلوریک کپه داغ غربی در ساختمان کنند ارائه شدند و آنالیز ابعادی، دو بعدی بودن ساختارهای زیرسطحی منطقه را نشان داد. برای دستیابی به تفسیری کامل از داده‌های MT، وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز در حوزه فرکانس و تبدیل به مدل مقاومت ویژه الکتریکی دو بعدی ضروری می‌باشد. از این رو در این فصل با بهره‌گیری از نتایج مدل‌سازی‌های یک بعدی صورت گرفته و سایر اطلاعات موجود سعی خواهد شد تا داده‌های مقاومت ویژه و فاز مربوط به سونداژهای هر پروفیل به صورت دو بعدی مدل‌سازی شده و بدین وسیله و با تهیه مقاطع و نقشه‌های مربوط، اطلاعات جامع‌تری از وضعیت قرارگیری، گسترش جانبی و عمقی ساختارهای زیر سطحی حاصل شود. در ادامه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی به همراه داده‌های لرزه‌نگاری و حفاری مورد ارزیابی و تفسیر قرار می‌گیرند.

۶-۲ مدل سازی وارون دو بعدی به روش گرادیان مزدوج غیر خطی^۱

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

$$\Psi = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \tau m^T L^T L m \quad (۱-۶)$$

در این معادله d بردار داده‌های مشاهده‌ای، F عملگر مدل‌سازی 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 است را بازی می‌کند. ماتریس L یک عملگر ساده خطی می‌باشد. τ پارامتر منظم‌سازی می‌باشد که عددی

^۱ Nonlinear Conjugate gradients (NLCG)

مثبت است. در معادله (۶-۱) جمله اول در طرف راست بیانگر عدم برازش داده^۱ و جمله دوم هموار بودن مدل و نزدیک بودن آن به مدل اولیه را بیان می‌کند و در نهایت همواری^۲ مدل وارون می‌تواند توسط تغییر در پارامتر منظم سازی τ کنترل شود.

در این مطالعه برای مدل سازی وارون دو بعدی داده‌های MT از نرم افزار WinGLink استفاده می‌شود که در آن از الگوریتم وارون سازی دو بعدی رودی و مکی (۲۰۰۱) استفاده می‌شود این الگوریتم از روش گرادیان مزدوج غیر خطی برای کمینه سازی تابع هدف Ψ در معادله (۶-۱) استفاده می‌کند.

برازش داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه و فاز مگنتوتلوریک (ρ^{data} و φ^{data}) با پاسخ محاسبه شده از مدل وارون (ρ^{resp} و φ^{resp}) می‌تواند با استفاده از ریشه میانگین مربعات^۳ (RMS) مورد ارزیابی قرار گیرد. اگر داده‌های 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 می‌شود (Xiao, 2004):

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

که در آن e^r و e^p به ترتیب خطای استاندارد (خطای کف^۴) داده‌های اندازه‌گیری 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 داده‌های MT ندارد و همچنین نوفه^۵ موجود در داده‌ها بزرگتر از خطای پیش‌بینی شده است و یا اینکه اثرات سه بعدی ناهمگنی‌های سطحی داده‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. اگر مقدار RMS خیلی کوچکتر از خطای استاندارد مقاومت ویژه یا فاز یا هر دو باشد بدین معنی

¹ Data misfit

² Smoothness

³ Root-Mean-Square (RMS) misfit

⁴ Error floor

⁵ Noise

می‌باشد که خطای مدل‌سازی خیلی زیاد است و مدل وارون به دست آمده غیر هموار^۱ است.

۳-۶ وارون سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک کرد

با توجه به دو بعدی بودن ساختارهای زیر سطحی منطقه مورد مطالعه، بعد از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا، داده‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز سوندازهای MT با روش وارون سازی گرادیان مزدوج غیر خطی به کمک نرم افزار WinGLink به مدل ژئوالکتریکی دو بعدی تبدیل شده‌اند. در این روش مدل‌سازی، شبکه^۲ پارامترهای مدل و محاسبات پیشرو اختلاف محدود^۳ یک شبکه نسبتاً ریز (۲۴۹۶ پارامتر برای پروفیل P2 که پروفیل اصلی منطقه است) تعریف شده است. مدل اولیه برای شروع وارون‌سازی، یک نیم فضا با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم متر انتخاب شده است. بیشترین اختلاف توپوگرافی در طول پروفیل مورد نظر در حدود ۳۰۰ متر است بنابراین به منظور انجام تصحیح توپوگرافی این پارامتر در مدل‌سازی منظور شده است. داده‌های ورودی مقاومت ویژه ظاهری و فاز برای مد TE در گستره فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰۰ Hz هستند یعنی در ۴ دهه فرکانسی و در هر دهه ۶ فرکانس منظور می‌شود، خطای کف برای مقاومت ویژه ظاهری در وارون‌سازی ۱۰ درصد و برای فاز ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه مد TE ساختارهای عمیق و مقاوم را بهتر نشان می‌دهد از این مد برای آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی استفاده می‌شود. اجراهای^۴ مختلف برای تنظیمات پارامترهای وارون‌سازی و مقادیر مختلف پارامتر منظم‌سازی^۵ ($\tau = 1$ تا $\tau = 100$) انجام شد باید توجه کرد که شرط توقف وارون‌سازی دویعدی، ثابت شدن عدم برازش خطا (RMS) و به دست آمدن هموارترین مدل می‌باشد. شکل (۱-۶) نتایج مدل‌سازی وارون به ازای مقادیر مختلف τ ، برای پروفیل P2 (مد TE) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود، با افزایش τ ، مقدار R.M.S Misfit نیز افزایش می‌یابد.

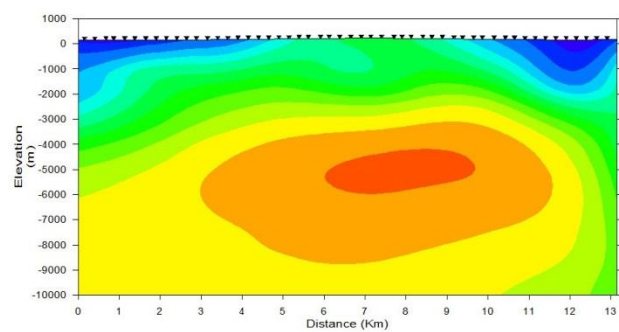
¹ Rough

² Mesh

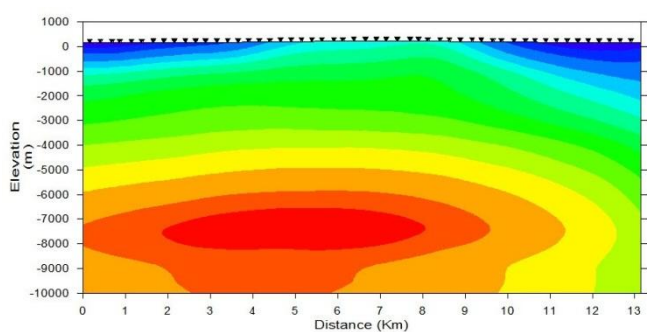
³ Finite Difference

⁴ Run

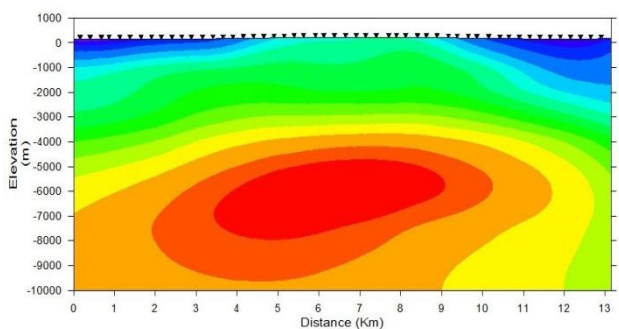
⁵ Regularization Parameter



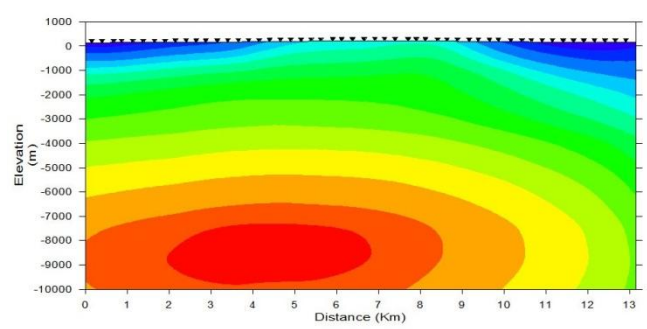
$\tau = 1$



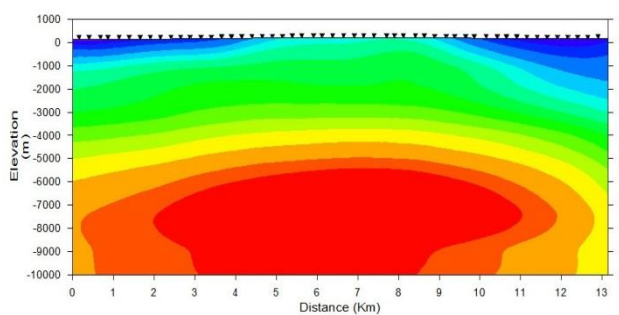
$\tau = 50$



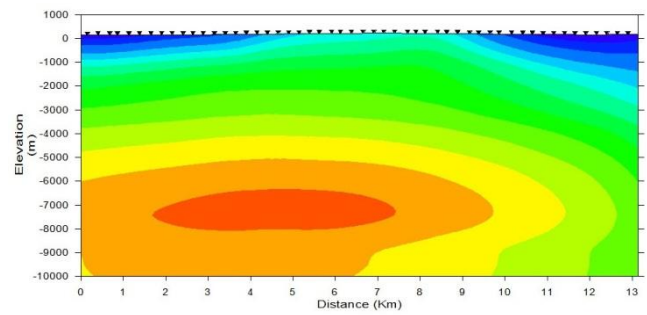
$\tau = 10$



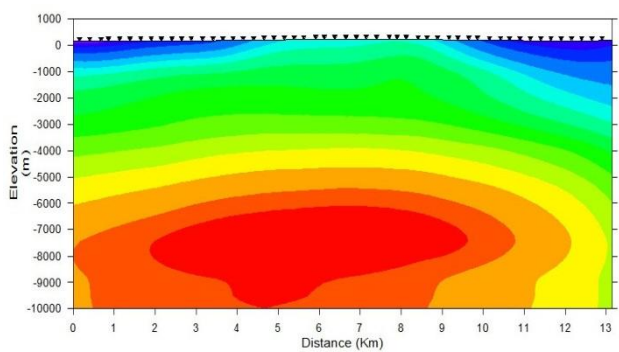
$\tau = 70$



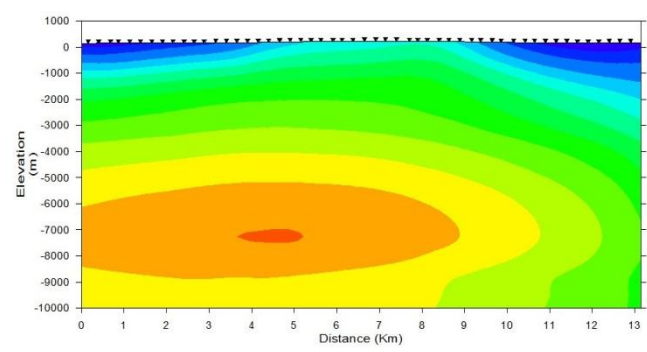
$\tau = 20$



$\tau = 80$

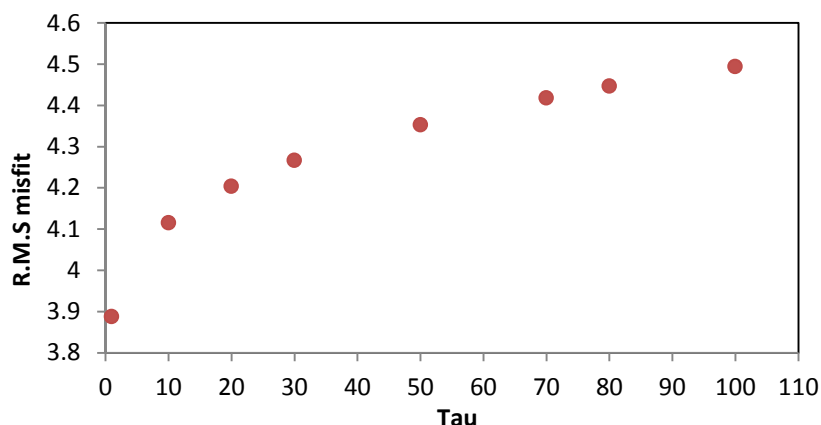


$\tau = 30$



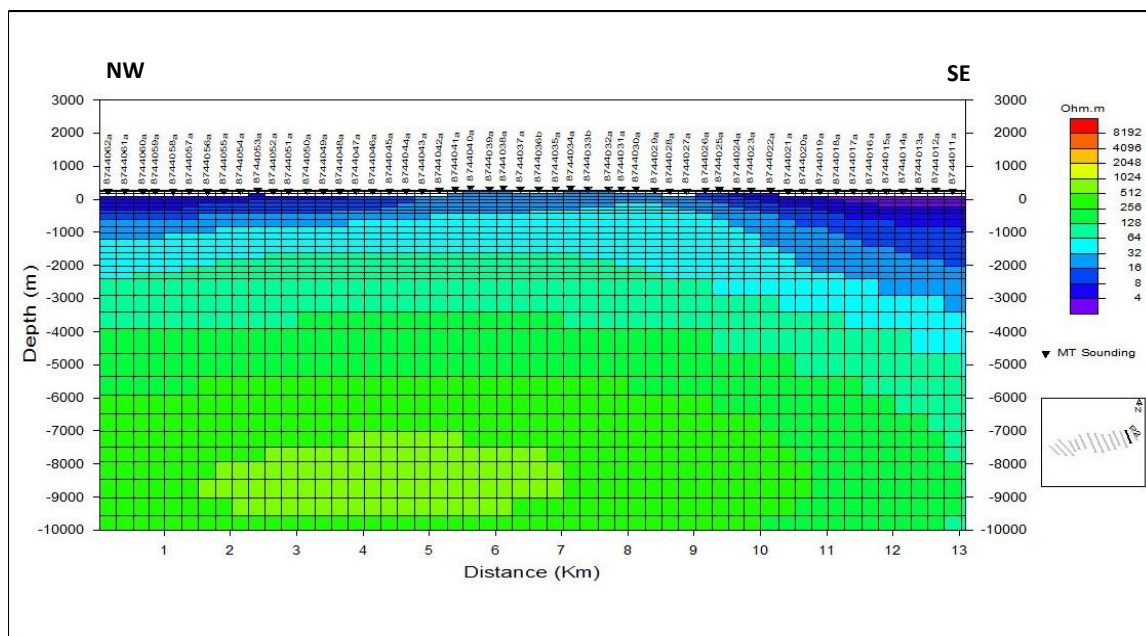
$\tau = 100$

شکل ۶-۱: نتایج مدل سازی وارون برای پروفیل P2 (مد TE) با مقادیر τ مختلف



شکل ۳-۶: تغییرات R.M.S Misfit بر حسب τ

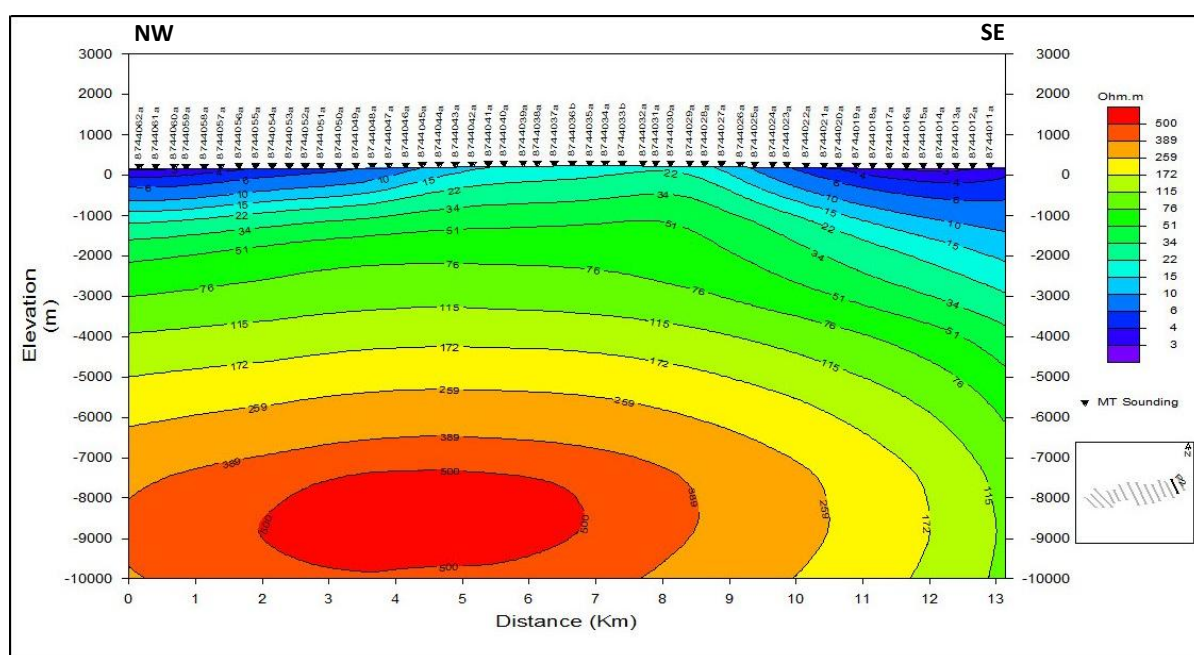
بعد از انجام وارون‌سازی‌های متعدد، نتیجه یک اجرا بهتر از دیگر اجراها بود که در آن $\tau = 70$ (پارامتر هموارسازی یا پارامتر منظم‌سازی) بوده است که در تکرار^۱ ۳۰ به همگرایی مناسب رسیده است در این اجرا مدل وارون به دست آمده هموارترین مدل بود. برای نمونه مدل وارون دو بعدی مش‌بندی شده برای پروفیل P2، که پروفیل اصلی منطقه می‌باشد، در شکل (۳-۶) آورده شده است.



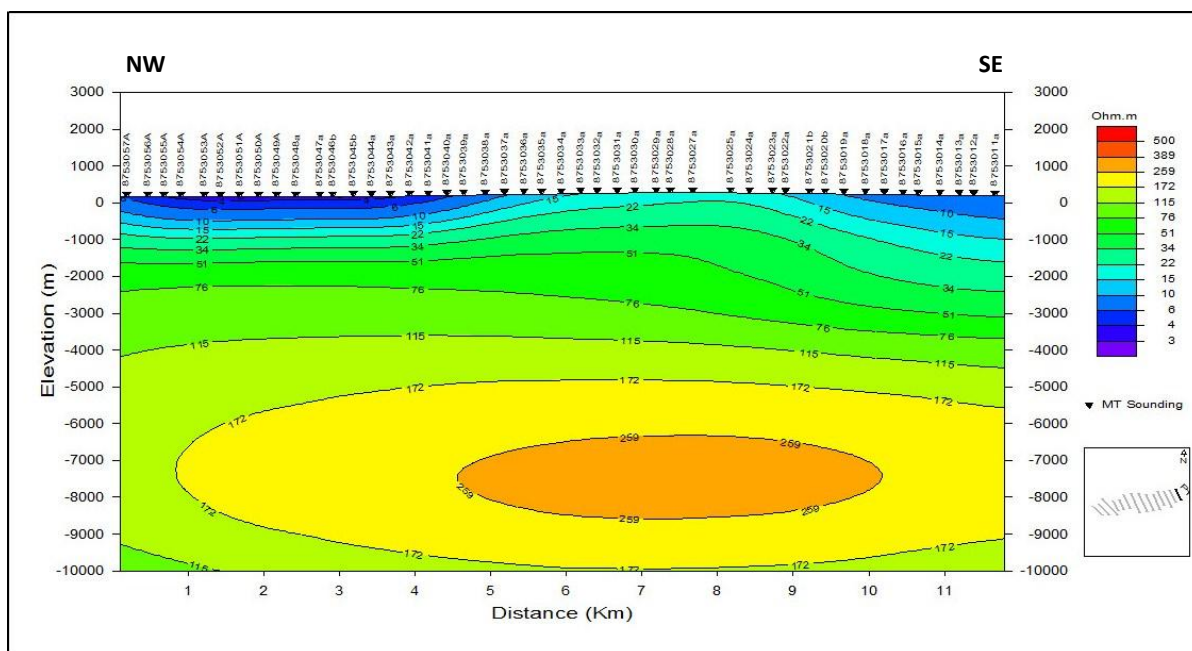
شکل ۳-۶: مدل وارون دو بعدی مش‌بندی شده برای پروفیل P2 توسط الگوریتم گرادیان مزدوج غیر خطی

¹ Iteration

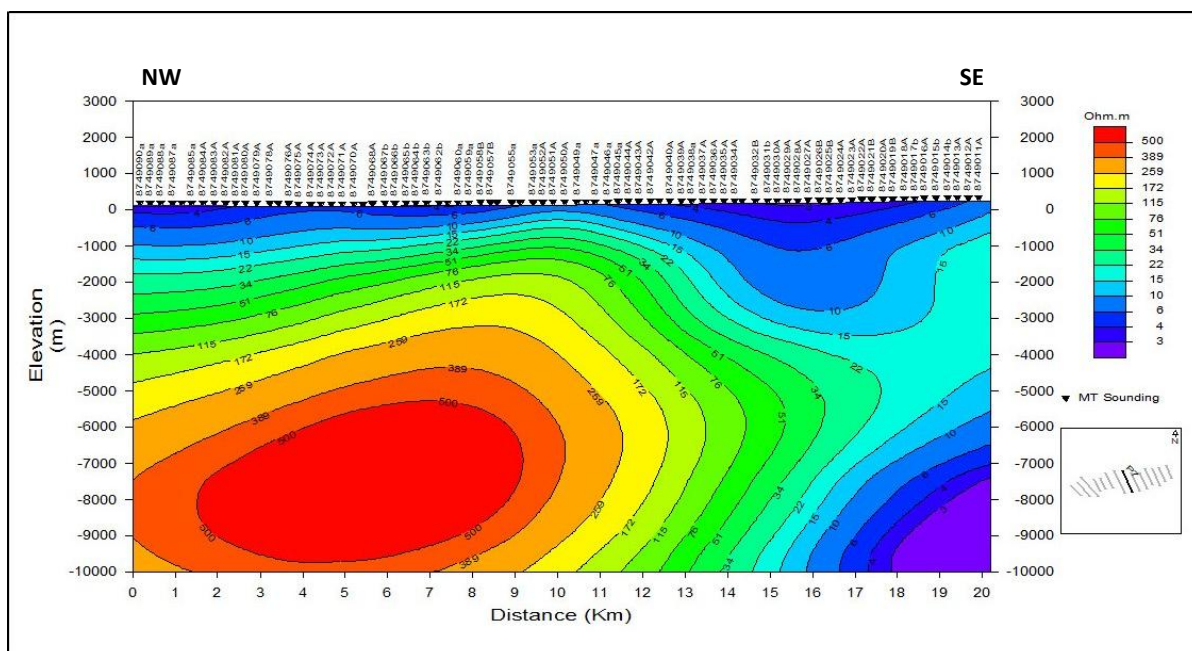
مدل‌سازی داده‌های تک تک پروفیل‌ها برای مد TE صورت گرفته و مقطع ژئوالکتریک مربوط به آن‌ها تهیه شده است که در اینجا نتایج مدل‌سازی دو بعدی برای پروفیل‌های P1، P2، P7 و P14 در شکل‌های (۴-۶)، (۵-۶)، (۶-۶) و (۷-۶) آورده شده است و نتایج مدل‌سازی دو بعدی برای بقیه پروفیل‌های P3 تا P13 در پیوست (ج) ارائه می‌شود. در شکل‌های (۸-۶)، (۹-۶) و (۱۰-۶) شبه مقاطع داده‌های اندازه‌گیری شده (مقاومت ویژه ظاهری و فاز) همراه با شبه مقاطع پاسخ مدل دو بعدی وارون برای نمونه برای سه پروفیل P1، P7 و P14 آورده شده است.



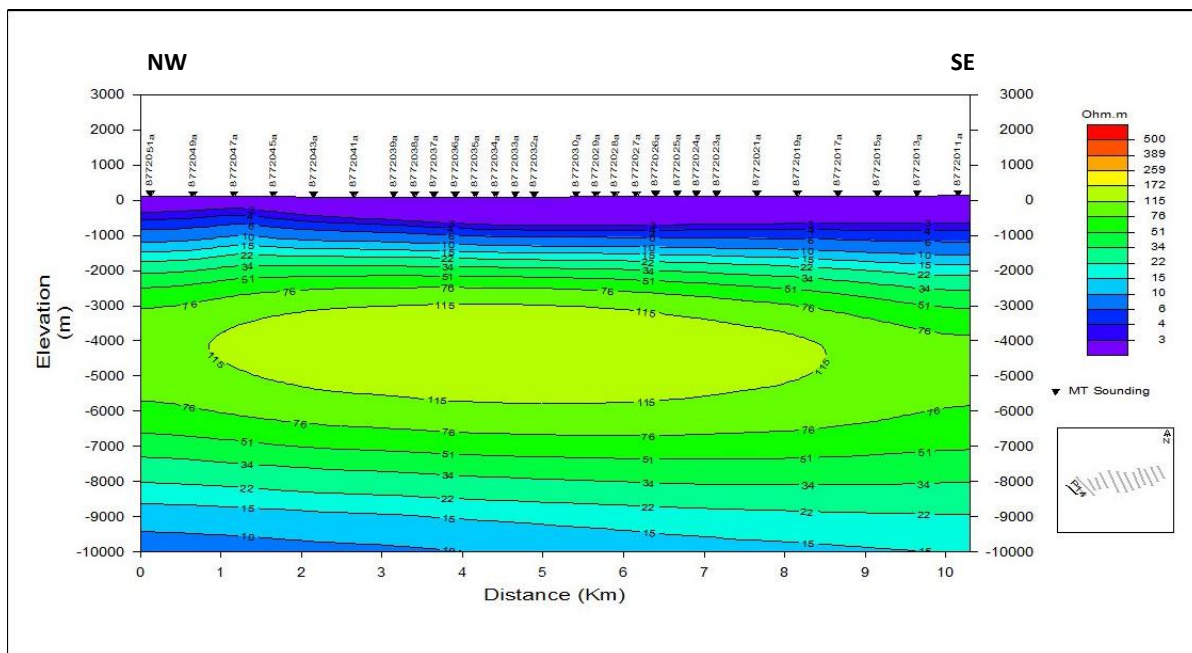
شکل ۴-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کنند برای پروفیل P2 (مد TE)



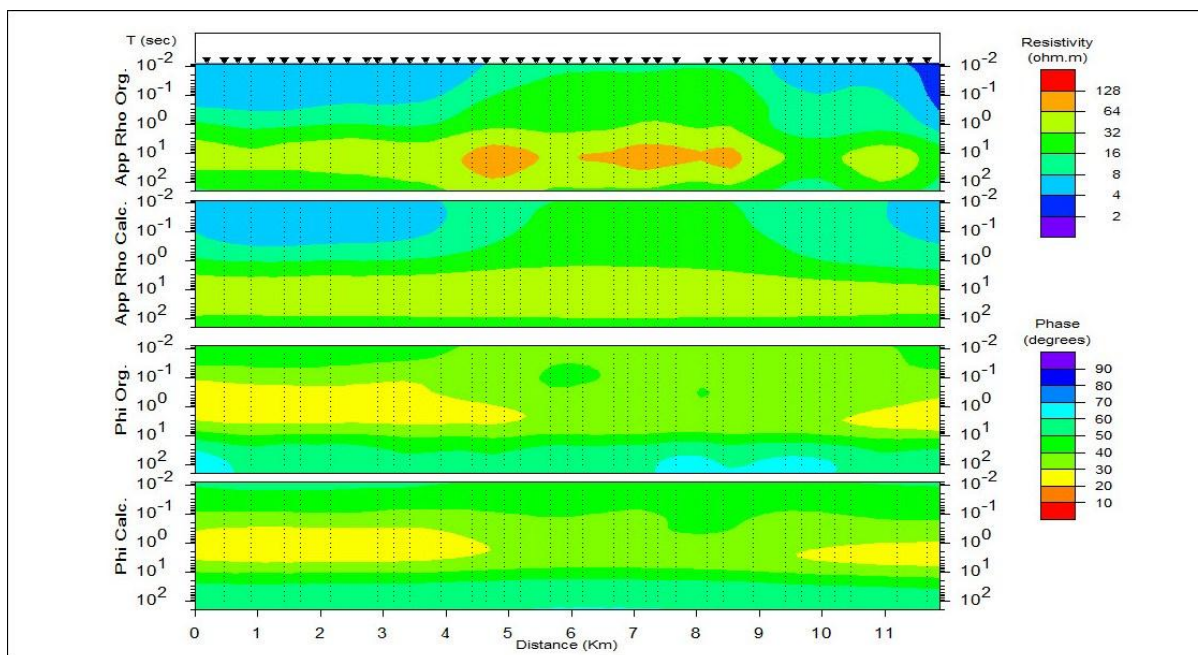
شکل ۵-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P1 (مد TE)



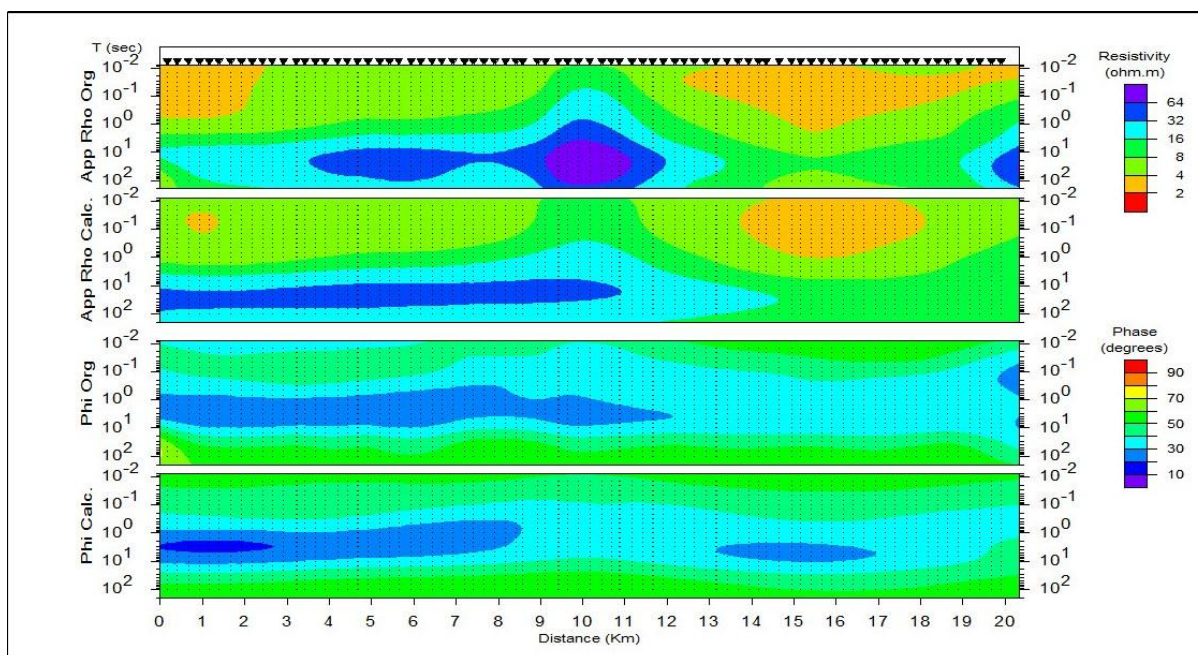
شکل ۶-۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P7 (مد TE)



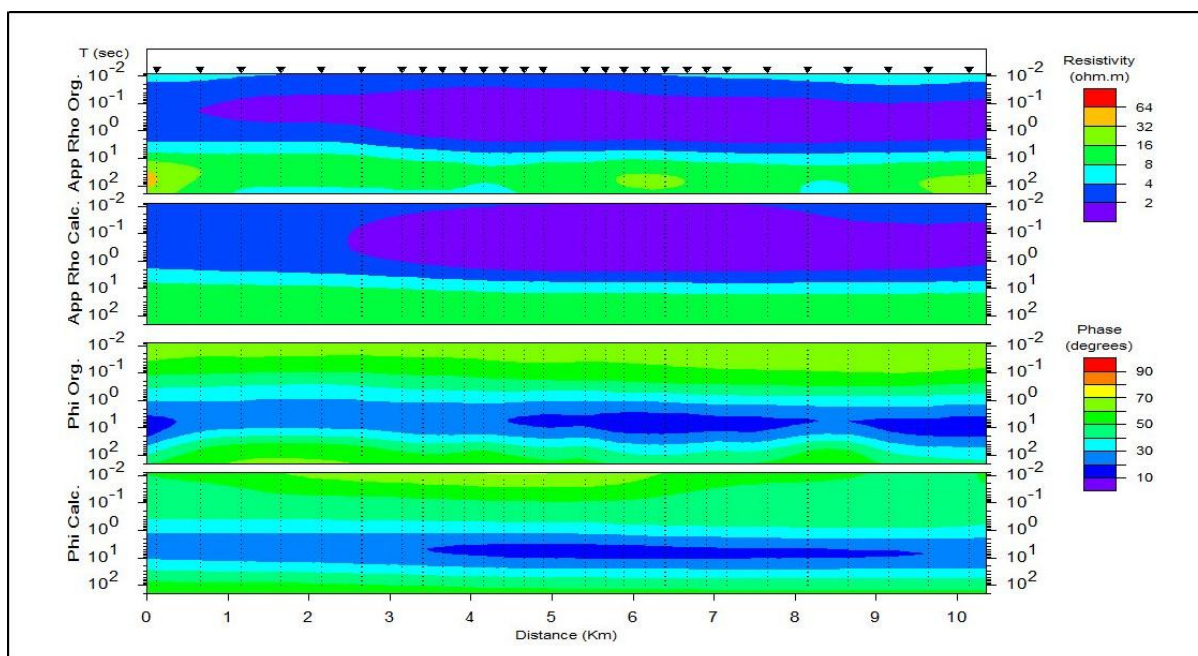
شکل ۶-۷: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک برای پروفیل P14 (مد TE)



شکل ۶-۸: شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری به دست آمده از مدل وارون دو بعدی مد TE برای پروفیل P1 (دو مقطع بالایی به ترتیب نشان دهنده شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری برای داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل و دو مقطع پایینی به ترتیب نشان دهنده شبه مقاطع فاز ظاهری برای داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل هستند).



شکل ۶-۹: شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری به دست آمده از مدل وارون دو بعدی مد TE برای پروفیل P7 (دو مقطع بالایی به ترتیب نشان دهنده شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری برای داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل و دو مقطع پایینی به ترتیب نشان دهنده شبه مقاطع فاز ظاهری برای داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل هستند).



شکل ۶-۱۰: شبه مقاطع داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری به دست آمده از مدل وارون دو بعدی مد TE برای پروفیل P14 (دو مقطع بالایی به ترتیب نشان دهنده شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری برای داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل و دو مقطع پایینی به ترتیب نشان دهنده شبه مقاطع فاز ظاهری برای داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل هستند).

با توجه به شکل‌های (۶-۸)، (۶-۹) و (۶-۱۰) مطابقت بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های تئوری محاسبه شده به دست آمده از مدل وارون دو بعدی برای مقاومت ویژه ظاهری و فاز مشاهده می‌شود (مقدار خطای مدل‌سازی برای پروفیل P1، ۴/۳۱، برای پروفیل P7، ۵/۴۵، برای پروفیل P14، ۴/۲ می‌باشد) که این مساله دقت در انجام مدل‌سازی دو بعدی وارون را نشان می‌دهد.

۴-۶ تفسیر مدل دو بعدی مقاومت ویژه داده‌های مگنتوتلوریک

در این بخش تفسیر زمین‌شناسی مدل وارون دو بعدی MT ارائه می‌شود و نشان داده می‌شود که این مدل وارون تا چه حدی با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و دیگر اطلاعات ژئوفیزیکی مانند لرزه‌نگاری و حفاری مطابقت دارد. از طرفی با توجه به اینکه سازند تیرگان یکی از افق‌های مخزنی ناحیه به شمار می‌رود شناسایی محل احتمالی این سازند نیز مد نظر قرار می‌گیرد.

۱-۴-۶ مقایسه نتایج مدل‌سازی MT با اطلاعات زمین‌شناسی

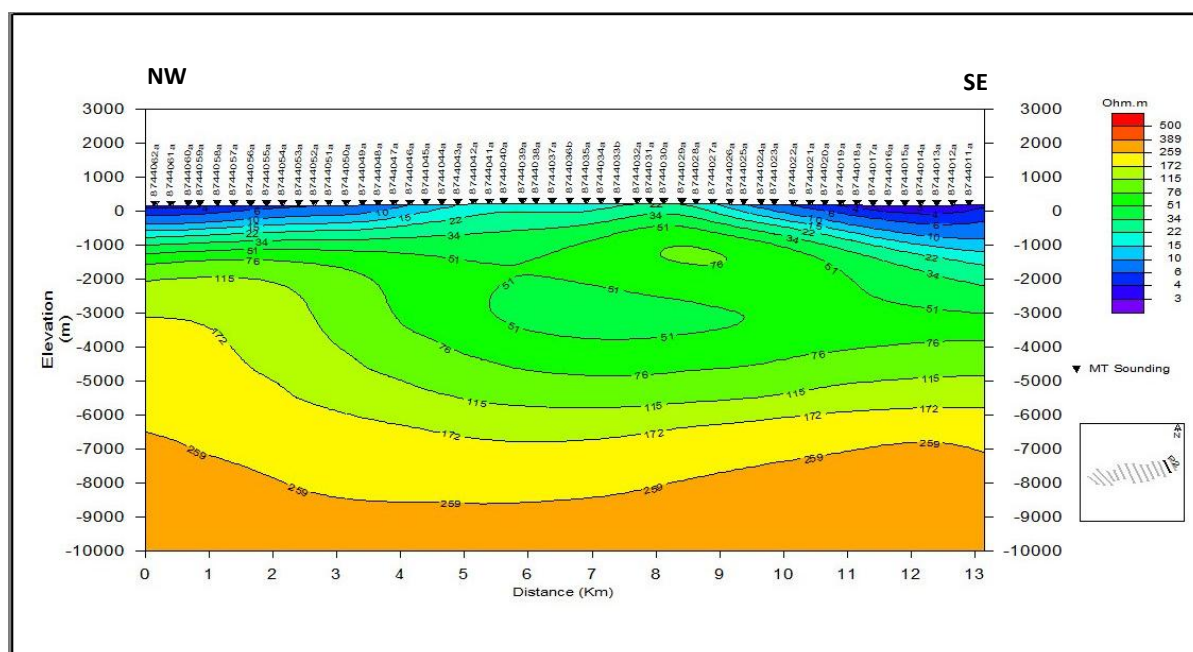
شکل (۱-۴) در فصل چهارم نقشه زمین‌شناسی سطحی ناحیه همراه با موقعیت پروفیل‌های MT را با محل چاه کردند که در نزدیکی پروفیل P2 قرار دارد نمایش می‌دهد. همچنین شکل (۳-۳) در فصل سوم مقطع عرضی زمین‌شناسی که از نزدیکی پروفیل P4 مگنتوتلوریک عبور می‌کند را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۴-۶)، (۵-۶)، (۶-۶) و (۶-۷) و شکل‌های پیوست (ج) (شکل‌های ج-۱ تا ج-۱۰) در پروفیل‌های P1 تا P8 ساختار لایه‌ای و چین خوردگی تقریباً در مرکز پروفیل‌ها از سطح تا اعماق متوسط مشاهده می‌شود (در پروفیل‌های P1 و P2 این چین‌خوردگی‌ها تا عمق تقریبی ۱۵۰۰ متر، در پروفیل‌های P3 و P4 تا عمق تقریبی ۳۰۰۰ متر، در پروفیل‌های P5 و P6 تا عمق تقریبی ۴۰۰۰ متر و در پروفیل‌های P7 و P8 تا عمق تقریبی ۶۰۰۰ متر مشاهده می‌شود) که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی این چین‌خوردگی‌ها معرف تاقدیس و ناودیس کردند در کپه داغ غربی می‌باشند اما از پروفیل‌های P9 تا P14 ساختار لایه‌ای و هموار و بدون چین‌خوردگی قابل ملاحظه است که این مورد نتایج شبه مقطع مقاومت ویژه و فاز و همچنین مدل یک بعدی اوکام را نیز تا حد زیادی تایید می‌کند.

تقریباً در همه پروفیل‌ها روند عمومی افزایش مقاومت ویژه با افزایش عمق را از سطح زمین تا اعماق زیاد شاهدیم. با توجه با جدول (۳-۱) در فصل سوم این مساله به این صورت تفسیر می‌شود که سازندهای آبدراز، آیتامیر و سنگانه عمدتاً از شیل، مارن، سیلتستون و ماسه سنگ هستند و سازند سرچشمه از شیل، مارن با میان لایه‌های نازک آهکی تشکیل شده است پس سازند سرچشمه مقاومت ویژه بالاتری نسبت به سازندهای آبدراز، آیتامیر و سنگانه دارد از طرفی سازند تیرگان که عمدتاً شامل آهک و مقدار کمی مارن است مقاومت ویژه بالاتری نسبت به سازند سرچشمه دارد. سازند زرد شامل آهک و سیلتستون و سازند مزدوران شامل آهک و آهک‌های دولومیتی هستند که بیشتر بودن مقاومت ویژه این لایه‌ها نسبت با لایه‌های بالاتر توجیه می‌شود.

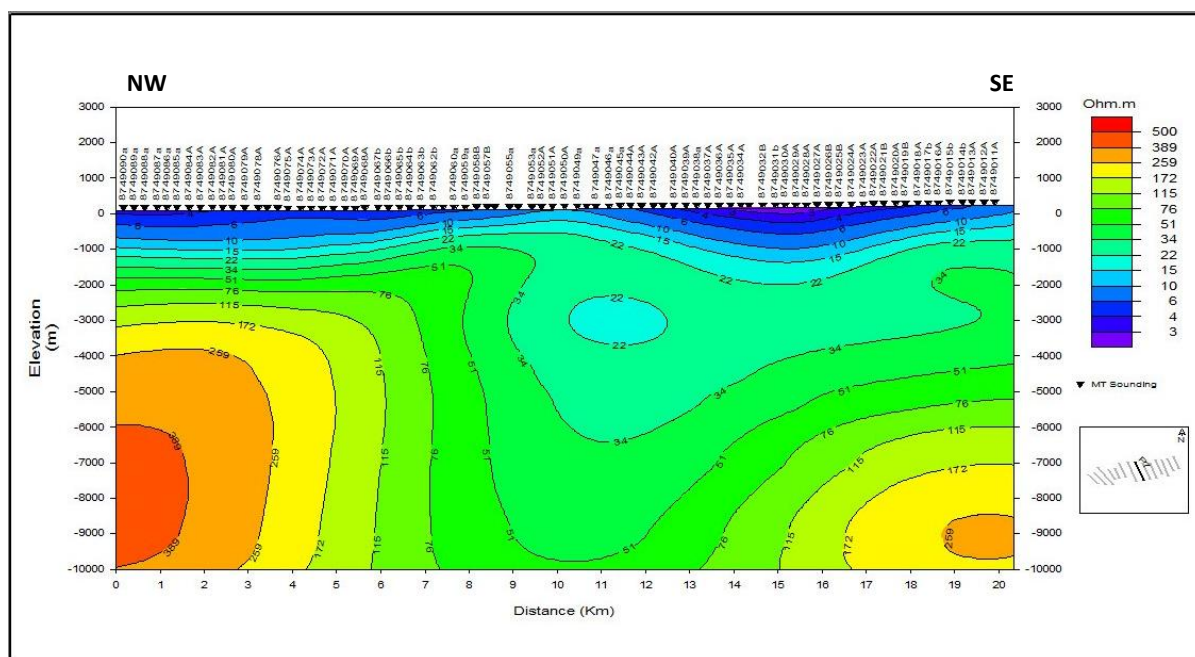
همچنین ضخامت زیاد لایه‌های با مقاومت ویژه کم که احتمالاً شامل سازندهای آبدراز، آیتامیر، سنگانه و سرچشمه است تقریباً در همه پروفیل‌ها در کل طول پروفیل دیده می‌شود همانطور که در فصل سوم اشاره شد سنگ پوشش سازند تیرگان سازندهای سنگانه و سرچشمه به دلیل ضخامت زیاد این دو سازند می‌باشد (لایه‌های کم مقاومت در پروفیل P1 تا عمق تقریبی ۶۵۰۰ متری، در پروفیل P2 تا عمق تقریبی ۵۷۰۰ متری، در پروفیل‌های P3، P4، P5، P6، P14 تا عمقی که مدل‌سازی انجام شده و ۱۰۰۰۰ متر می‌باشد، در پروفیل P7 تا عمق تقریبی ۳۵۰۰ متری، در پروفیل P8 تا عمق تقریبی ۳۵۰۰ متری، در پروفیل P9 تا عمق تقریبی ۲۷۰۰ متری، در پروفیل P10 تا عمق تقریبی ۳۰۰۰ متری، در پروفیل P11 تا عمق تقریبی ۳۵۰۰ متری، در پروفیل P12 تا عمق تقریبی ۲۵۰۰ متری و در پروفیل P13 تا عمق تقریبی ۳۰۰۰ متری وجود دارند. با این حال تقریباً در همه پروفیل‌ها در اعماق متوسط تا اعماق زیاد در جنوب شرقی و شمال غربی پروفیل‌ها (سمت راست و سمت چپ کلیه پروفیل‌ها) قرارگیری لایه‌های با مقاومت ویژه بیشتر بر روی لایه‌های با مقاومت ویژه کمتر وجود دارد. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و شکل (۳-۲)، گسل مراوه تپه که یک گسل امتداد لغز با مولفه معکوس می‌باشد و گسترش عمقی زیادی دارد و در نزدیکی پروفیل‌های MT و در قسمت جنوبی کلیه پروفیل‌ها قرار دارد بنابراین احتمالاً قرارگیری لایه‌های با مقاومت ویژه بیشتر در جنوب شرقی کلیه پروفیل‌ها بر روی لایه‌های با مقاومت ویژه کمتر به دلیل وجود

گسل مراوه تپه می باشد. در گزارش های زمین شناسی منطقه، گسل معکوس دیگری در شمال غربی کلیه پروفیل ها وجود ندارد ولی ما احتمال وجود گسل عمقی دیگری با مولفه معکوس را در شمال غربی کلیه پروفیل ها (سمت چپ پروفیل ها) و تا عمقی که مدل سازی انجام شده و این عمق ۱۰۰۰۰ متر می باشد پیش بینی می کنیم.

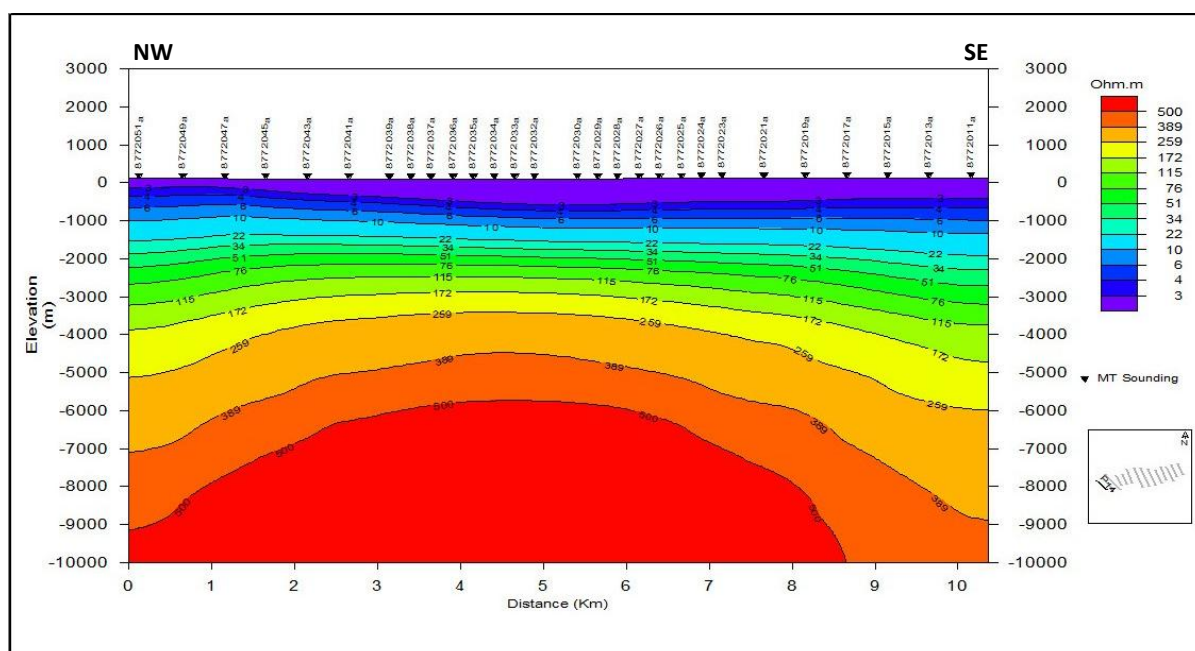
شکل های (۶-۱۱)، (۶-۱۲) و (۶-۱۳) نتایج مدل سازی دو بعدی برای پروفیل های P2، P7 و P14 را برای مد TM نشان می دهد. همانطور که قبلاً اشاره شد مد TM ساختارهای نزدیک سطح و ناهمگنی های جانبی را به خوبی آشکار سازی می کند. شکل های (۶-۱۴)، (۶-۱۵) و (۶-۱۶) نتایج مدل سازی دو بعدی برای پروفیل های P2، P7 و P14 را برای تلفیق دو مد TE و TM (TE+TM) نشان می دهند.



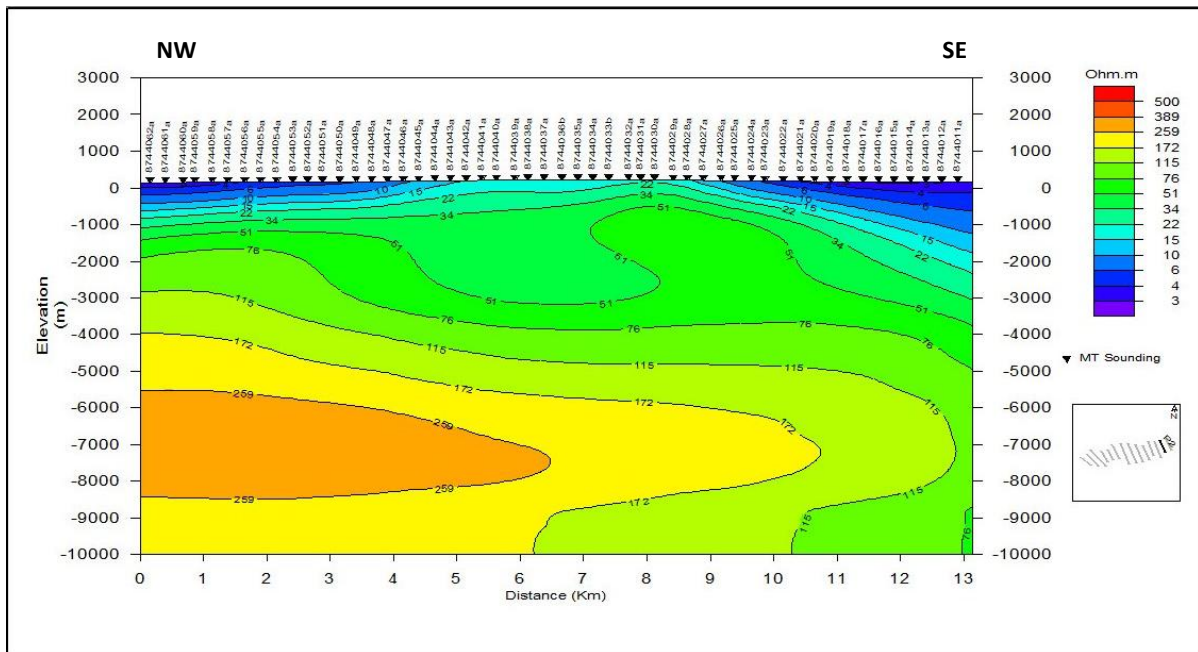
شکل ۶-۱۱: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده های مگنتوتلوریک ساختمان کنند برای پروفیل P2 (مد TM)



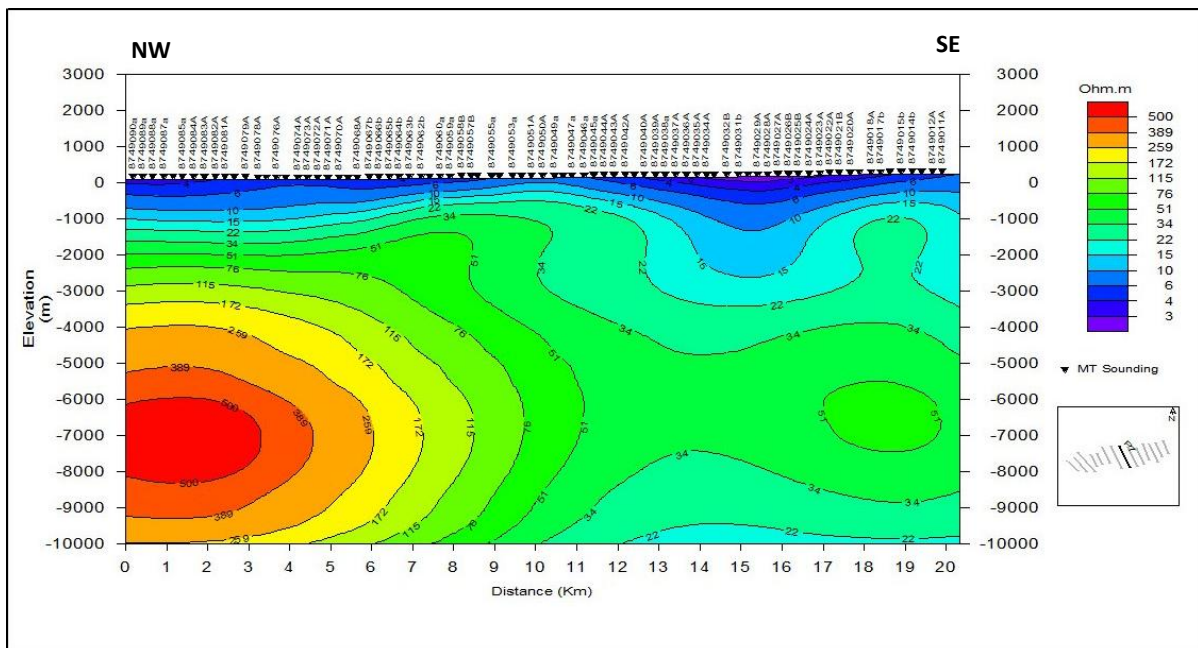
شکل ۶-۱۲: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتولوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P7 (مد TM)



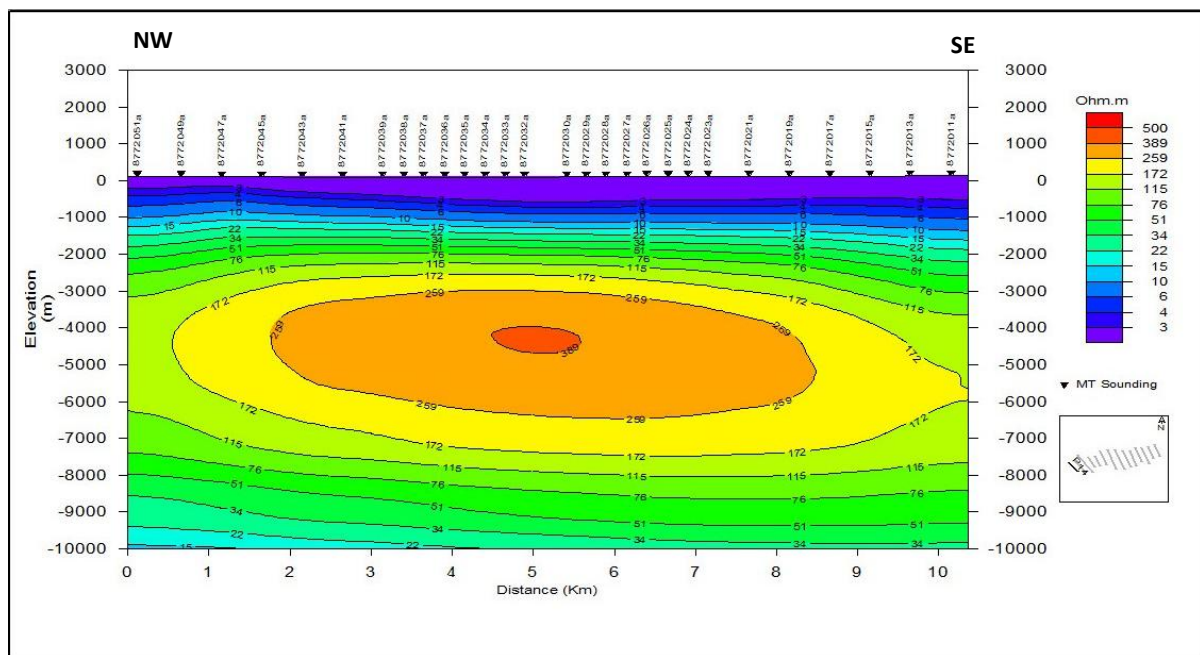
شکل ۶-۱۳: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌راند برای پروفیل P14 (مد TM)



شکل ۶-۱۴: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P2 (TE+TM)



شکل ۶-۱۵: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P7 (TE+TM)



شکل ۶-۱۶: نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P14 (TE+TM)

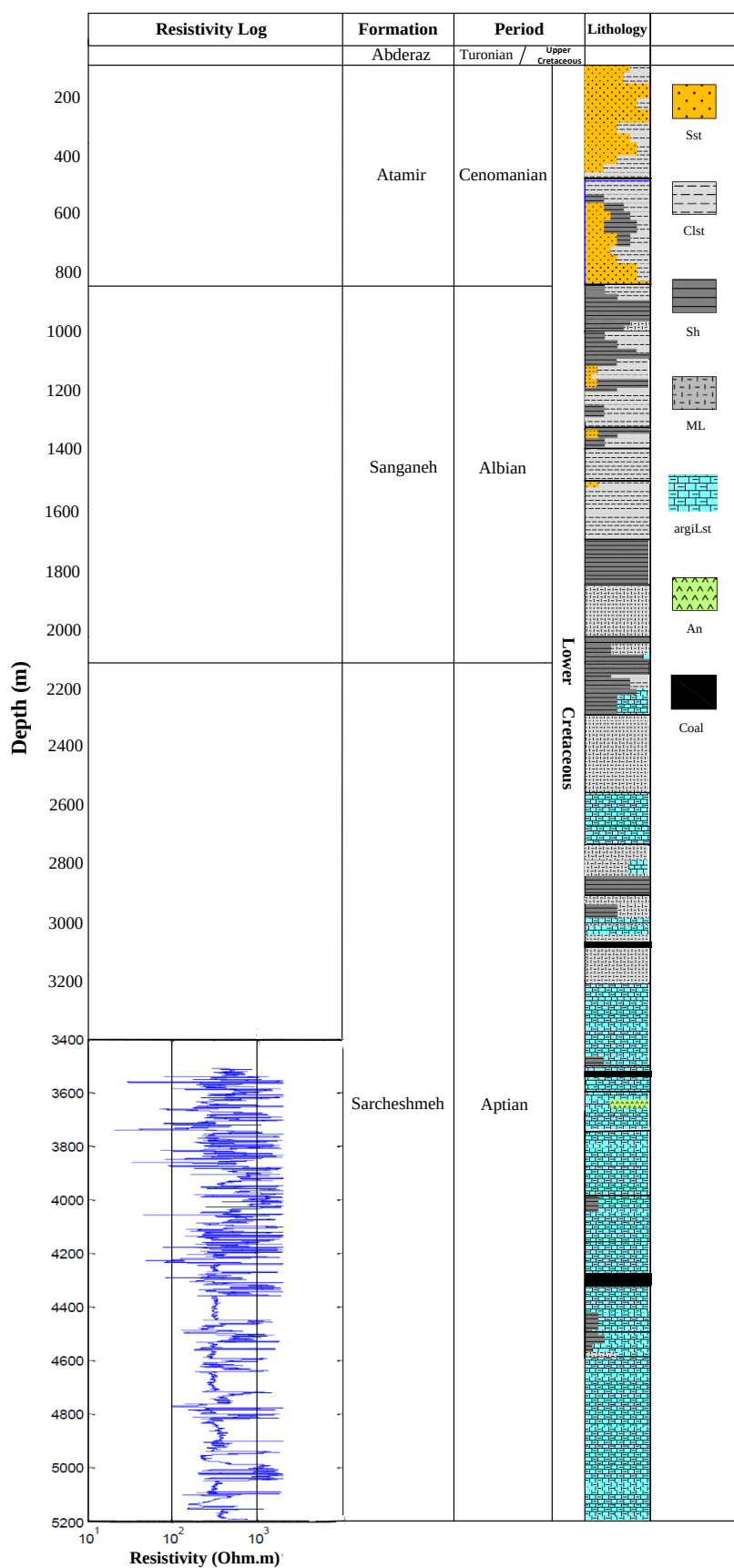
با توجه به شکل‌های (۶-۱۱)، (۶-۱۲) و (۶-۱۳) در پروفیل P2 چین خوردگی لایه‌ها به خوبی مد قابل مشاهده نیست و اثر گسل‌ها مشخص نمی‌باشد، در پروفیل P7 چین خوردگی لایه‌ها به خوبی مد TE مشخص نمی‌باشد ولی اثر گسل‌ها تا حدی قابل مشاهده است و در پروفیل P14 افزایش مقاومت ویژه با عمق را شاهدیم ولی اثر گسل‌ها مشخص نمی‌باشد. دلیل آشکار نشدن اثر گسل‌ها در پروفیل‌ها به این دلیل می‌باشد که مد TM ساختارهای عمیق را به خوبی آشکار سازی نمی‌کند و هر دو گسل موجود در منطقه گسترش عمقی زیادی دارند. با توجه به شکل‌های (۶-۱۴)، (۶-۱۵) و (۶-۱۶) در پروفیل P2 چین خوردگی لایه‌ها به خوبی مد TE قابل مشاهده نیست ولی اثر گسل مراوه تپه به خوبی مشخص می‌باشد، در پروفیل P7 چین خوردگی لایه‌ها به خوبی مد TE مشخص نمی‌باشد ولی اثر گسل‌ها تا حدی قابل مشاهده است و در پروفیل P14 اثر گسل تا حدی مشخص است. با توجه به این تفاسیر مد TE برای آشکار سازی ساختارهای زیرسطحی بهتر از مد TM و TE+TM می‌باشد.

۲-۴-۶ مقایسه نتایج مدل سازی MT و حفاری

شکل (۱۷-۶) ستون چینه شناسی چاه کردند و نگار مقاومت ویژه^۱ این چاه را از عمق ۳۵۰۰ متر تا ۵۲۰۰ متر نشان می دهد. محل قرارگیری چاه کردند تقریباً در فاصله یک کیلومتری سمت راست پروفیل P2 و در ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد.

همانطوری که شکل (۱۷-۶) نشان می دهد مقاومت ویژه در عمق تقریبی ۴۲۰۰ متر تا ۵۲۰۰ متر حدود ۳۰۰ اهم- متر است که این میزان ویژه مقاومت با مقاومت ویژه حاصل از نتایج مدل سازی داده های MT پروفیل P2 در همین عمق در محل سونداژ ۳۴ تقریباً تطابق دارد. البته تغییرات مقاومت ویژه در مدل MT پروفیل P2 هموارتر از تغییرات مقاومت در نگار مقاومت ویژه است.

¹ Resistivity Log



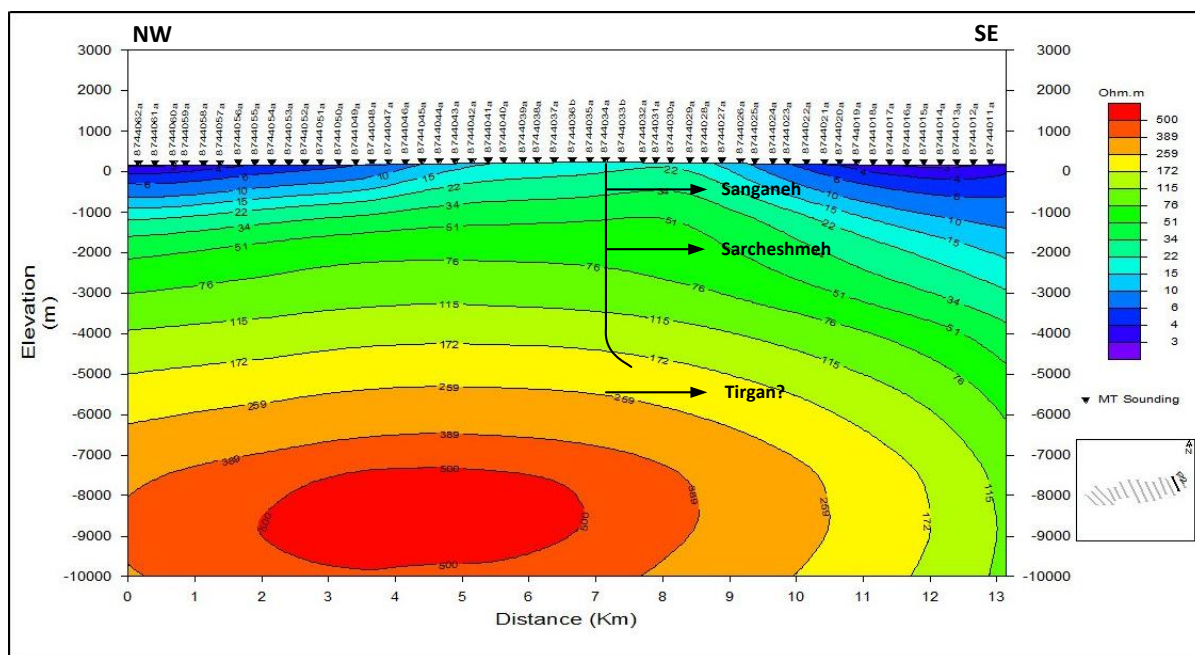
شکل ۶-۱۷: ستون چینه شناسی چاه کرد و نگار مقاومت ویژه برای قسمت تحتانی چاه

تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی در محل چاه کردند بعد از انجام حفاری در جدول زیر می‌آید.

جدول ۶-۱: تقسیم‌بندی سازندهای زمین‌شناسی چاه کردند (داده‌ها عمق هر سرسازند را نشان می‌دهد).

ارتفاع (m)	عمق حفاری (m)	سازندها	دوره‌های زمانی
۱۹۲	۸	آبدراز	کرتاسه بالایی
۱۵۵	۴۵	آیتامیر	کرتاسه پایینی
-۶۳۶	۸۳۶	سنگانه	
-۱۹۰۰	۲۱۰۰	سرچشمه	
؟	؟	تیرگان	
		زرد	
		مزدوران	ژوراسیک بالایی
		چمن بید	
		باش کلاته	ژوراسیک پایینی
		شمشک	

با توجه به جدول بالا حفاری انجام شده عمق سرسازند آبدراز را ۸ متر، آیتامیر ۴۵ متر، سنگانه ۸۳۶ متر و سرچشمه را ۲۱۰۰ متر مورد اکتشاف قرار داده است. در شکل (۶-۱۸) تصویر سر سازند هر ساختار زمین‌شناسی از داده‌های حفاری روی مقطع دو بعدی مدل وارون MT پروفیل P2 مشخص شده است که با لایه‌های ژئوالکتریک مشخص شده در مدل MT مطابقت خوبی دارد بنابراین می‌توان با توجه به مدل ژئوالکتریک محل احتمالی سازند تیرگان را پیش‌بینی نمود. اطلاعات حاصل از چاه کردند عمق سر سازند سرچشمه را ۲۱۰۰ متر نشان می‌دهد ولی مدل MT عمق این سر سازند را ۲۵۰۰ متر نشان می‌دهد که این اختلاف احتمالاً به دلیل فاصله تقریبی یک کیلومتری است که بین چاه و پروفیل P2 وجود دارد همچنین احتمالاً وجود گسل مراوه تپه باعث جابه‌جایی سازند سرچشمه در فاصله بین چاه و پروفیل P2 شده است.



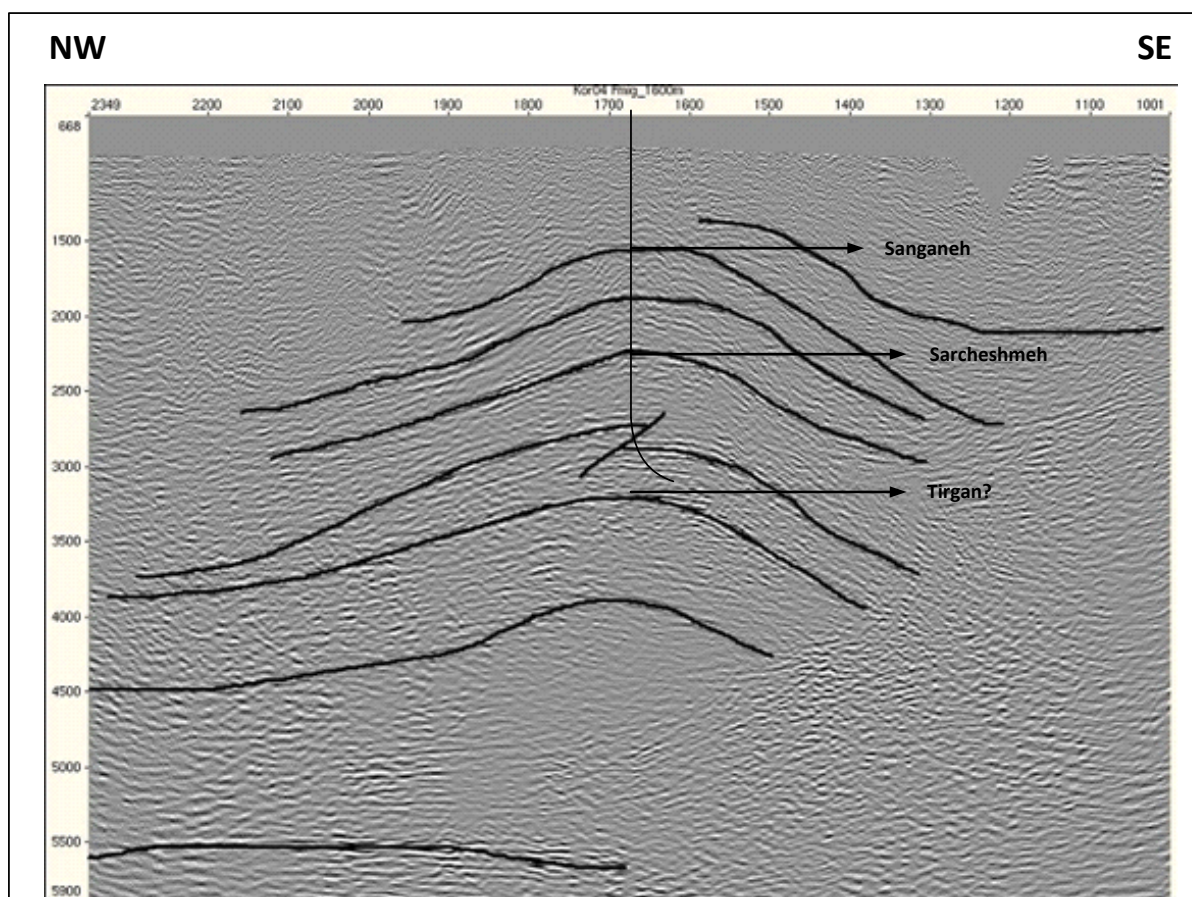
شکل ۶-۱۸: تصویر محل چاه کرد روی مدل دو بعدی ژئوالکتریک پروفیل P2 داده‌های MT همراه با سر سازندهای زمین شناسی

حفاری چاه کردند، تا عمق ۵۲۰۰ متر انجام شده ولی نتوانسته است سازند تیرگان را که هدف اصلی اکتشاف این چاه بوده است شناسایی کند. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و اینکه سازند تیرگان آهکی می‌باشد در مقایسه با سازند سرچشمه که عمدتاً شیل و مارن می‌باشد، مقاومت ویژه بالاتری دارد بنابراین سرسازند تیرگان بر اساس نتایج مدل‌سازی‌های دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک در حوالی پروفیل P2 احتمالاً در عمق ۵۷۰۰ متری قرار دارد.

۶-۴-۳ مقایسه نتایج مدل‌سازی MT و روش لرزه‌نگاری

شکل (۶-۱۹) مقطع زمانی لرزه‌نگاری، که محل این مقطع دقیقاً منطبق بر پروفیل P2، مگنتوتلوریک می‌باشد را نشان می‌دهد. این مقطع لرزه‌ای لایه‌ای بودن و چین‌خوردگی این لایه‌ها که بیانگر تاقدیس و ناودیس کردند می‌باشند، همچنین بیشتر بودن شیب لایه‌ها را در جنوب شرق پروفیل نسبت به شمال غرب آن نشان می‌دهد که این موارد با مدل وارون MT در شکل (۶-۴) تطابق دارد، با این حال در سمت جنوب شرق مقطع لرزه هیچ اطلاعاتی در عمق قابل نتیجه‌گیری نیست. در شکل (۶-۴) قرارگرفتن لایه‌های با

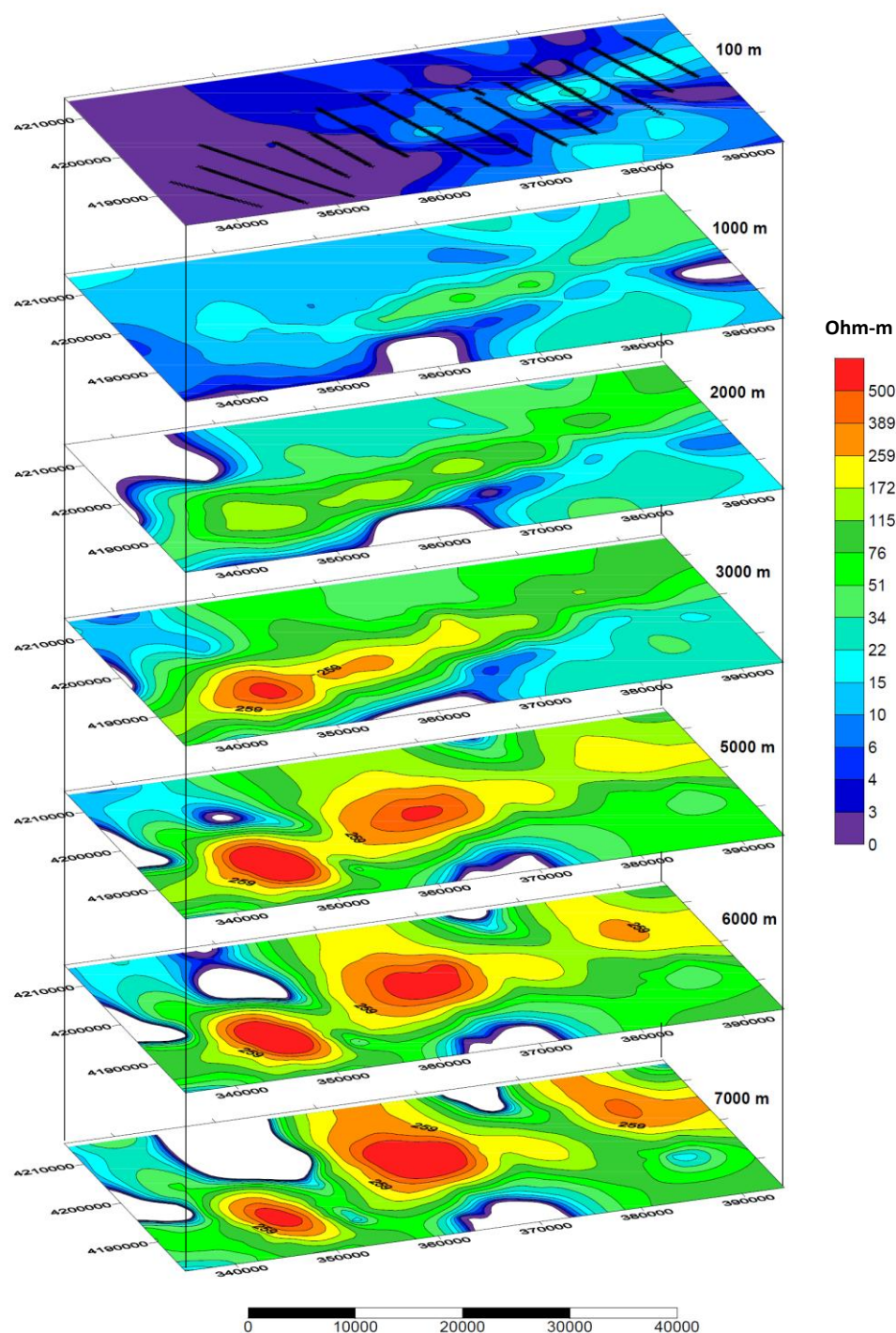
مقاومت ویژه بالا در بالای لایه‌های با مقاومت ویژه پایین (از سونداژ ۱۱ تا ۳۲ پروفیل P2 در عمق تقریبی ۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ متری از سطح زمین) بیانگر وجود گسل معکوس می‌باشد، همانطور که قبلاً اشاره شد گسل مراوه تپه که یک گسل امتداد لغز با مولفه معکوس می‌باشد و گسترش عمقی زیادی دارد، در نزدیکی پروفیل‌های MT (جنوب شرقی کلیه پروفیل‌ها) قرار گرفته است. بنابراین احتمالاً به دلیل وجود این گسل است که بخشی از مقطع لرزه‌ای کیفیت پایینی دارد. ولی وجود این گسل با روش MT قابل شناسایی می‌باشد. در شکل (۶-۱۹) محل‌سازندهای زمین‌شناسی حاصل از حفاری بر روی پروفیل لرزه‌نگاری مشخص شده‌اند. با توجه به اینکه مقطع عمقی لرزه‌نگاری این پروفیل در دسترس نبود نمی‌توان اطلاعات چندانی راجع به ضخامت و مقاومت ویژه لایه‌ها از روی این پروفیل به دست آورد با این حال ضخامت زیاد سازندهای سنگانه و سرچشمه روی این پروفیل مشخص است.



شکل ۶-۱۹: مقطع زمانی لرزه‌نگاری منطبق بر پروفیل P2 مگنتوتلوریک همراه با سر سازندهای زمین‌شناسی حاصل از حفاری

در شکل (۶-۲۰) نقشه‌های هم‌عمق مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی دو بعدی در افق‌های مختلف

ترسیم شده است. پروفیل‌های برداشت MT بر روی نقشه با عمق ۱۰۰ متر مشخص شده‌اند.



شکل ۶-۲۰: نقشه‌های هم‌عمق مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی دو بعدی (برای مد TE)

با توجه به شکل بالا گسترش جانبی سازند تیرگان (که با رنگ قرمز و مقاومت ویژه ۲۵۹ اهم-متر مشخص می‌باشد) در منطقه بدین صورت می‌باشد که در پروفیل‌های غربی سازند تیرگان در عمق تقریبی ۳۰۰۰ متری، در پروفیل‌های مرکزی در عمق تقریبی ۴۰۰۰ متری و در پروفیل‌های شرقی این سازند در عمق تقریبی ۶۰۰۰ متری ظاهر می‌شود. تغییرات مقاومت ویژه از مقادیر بالا به مقادیر پایین در قسمت جنوب شرقی پروفیل‌ها در نقشه با عمق ۱۰۰۰ متر و در شمال غربی پروفیل‌ها در نقشه با عمق ۲۰۰۰ متر به احتمال زیاد نشان از وجود گسل در منطقه می‌باشد. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی وجود گسل مراره تپه در قسمت جنوب شرقی پروفیل‌ها تایید می‌شود و وجود گسلی عمقی در شمال غرب قابل پیش‌بینی است. با توجه به شکل‌های (۴-۶)، (۵-۶)، (۶-۶) و (۷-۶) و شکل‌های پیوست (ج) (شکل‌های ج-۱ تا ج-۱۰) و شکل (۶-۲۰)، در پروفیل‌های P2، P7، P8، P12 و P13 لایه‌های با مقاومت ویژه بیشتر از مقاومت ویژه سازند تیرگان (۲۵۹ اهم-متر) نیز قابل مشاهده است. با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و جدول (۳-۱) در فصل سوم سازند زرد عمدتاً از شیل‌های آهکی با میان لایه‌های نازک کربناته و سازند مزدوران عمدتاً شامل آهک‌های تخریبی و آهک‌های دولومیتی و دولومیت تشکیل شده‌اند بنابراین وجود لایه‌های با مقاومت ویژه بیشتر از مقاومت ویژه سازند تیرگان احتمالاً به دلیل وجود سازندهای زرد و مزدوران در منطقه می‌باشد که عمق قرارگیری این سازندها در پروفیل P2 بیشتر از ۷۰۰۰ متر، در پروفیل P7 و P8 بیشتر از ۴۷۰۰ متر، در پروفیل P12 بیشتر از ۳۰۰۰ متر و در پروفیل P13 بیشتر از ۳۵۰۰ متر می‌باشد.

فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

نتیجه‌گیری

اهم نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر بشرح زیر می‌باشد:

- ❖ نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با بکارگیری داده‌های سونداژ زنی TEM می‌توان به خوبی اثر جابجایی ایستا را روی داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده در ناحیه کردند تصحیح کرد.
- ❖ بررسی شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری و فاز پروفیل‌های مختلف ارائه شده، نشان می‌دهد که اثر جابجایی ایستا بر روی داده‌های مگنتوتلوریک ناحیه، کم بوده و اثر آنها با استفاده از داده‌های TEM اصلاح شدند. همچنین چین خوردگی منطقه که مربوط به تاقدیس و ناودیس کردند هستند از سطح زمین تا پریودهای متوسط به خوبی بر روی این شبه مقاطع قابل مشاهده می‌باشند.
- ❖ آنالیز ابعادی ساختارهای ژئوالکتریکی زیر سطحی منطقه با استفاده از پارامترهای چولگی (اسکیو)، بیضی‌وارگی، چولگی حساس به فاز، اندیس‌های وزنی نرمال شده و بردارهای قطبی، مورد بررسی قرار گرفت و بدین وسیله ساختارهای زیر سطحی منطقه در اعماق کم تا اعماق متوسط یک بعدی، و در اعماق زیاد دو بعدی تشخیص داده شدند.
- ❖ با توجه به یک بعدی بودن ساختارهای زیر سطحی منطقه در اعماق کم، وارون سازی یک بعدی هموار اوکام برای مد میانگین برای داده‌های مگنتوتلوریک منطقه انجام شد. مدل‌های یک بعدی پروفیل‌های شرقی، ساختار زمین شناسی منطقه را لایه‌ای و با چین خوردگی قابل ملاحظه، و پروفیل‌های غربی منطقه را لایه‌ای، هموار و بدون چین خوردگی قابل توجه به تصویر کشیدند. افزایش مقاومت ویژه با افزایش عمق در همه پروفیل‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مطابقت دارد همچنین اثر گسل مراوه تپه در جنوب و جنوب شرق پروفیل‌های مگنتوتلوریک بر روی مدل وارون مشخص است.
- ❖ آنالیز ابعادی دو بعدی بودن ساختارهای زیر سطحی منطقه در اعماق زیاد را نشان می‌دهد. بدین ترتیب برای تفسیر دقیق‌تر، وارون سازی دو بعدی به روش گرادیان مزدوج غیر خطی برای

پروفیل‌های مگنتوتلوریک انجام شد. با توجه به نتایج بدست آمده، وارون سازی دو بعدی در پروفیل‌های P1 تا P8 ساختارهای زیر سطحی لایه‌ای و چین خوردگی از سطح تا اعماق متوسط قابل مشاهده است ولی در پروفیل‌های P9 تا P14 ساختارها لایه‌ای، هموار و بدون چین خوردگی قابل توجه می‌باشند. روند عمومی افزایش مقاومت ویژه با عمق در همه پروفیل‌ها مشاهده می‌شود. همچنین اثر گسل مراوه تپه در جنوب پروفیل‌های برداشت با قرارگیری لایه‌های با مقاومت ویژه بالا بر روی لایه‌های با مقاومت ویژه پایین مشاهده می‌شود و به همین دلیل قرارگیری لایه‌های با مقاومت ویژه بالا بر روی لایه‌های با مقاومت ویژه پایین، و تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه، وجود گسل دیگری در شمال و شمال غرب منطقه پیش بینی می‌شود (در مقاطع قائم حاصل از مدل سازی دو بعدی برای مد TE، شکل‌های (۴-۶) تا (۷-۶)، شکل‌های پیوست ج (شکل‌های ج-۱ تا ج-۱۰) و نقشه‌های هم عمق مقاومت ویژه (شکل ۶-۲۰)).

❖ حفاری انجام شده در محل چاه کردند تا عمق ۵۲۰۰ متری از سطح زمین، نتوانسته سازند تیرگان را که سنگ مخزن اصلی می‌باشد مورد اکتشاف قرار دهد ولی وارون سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک عمق احتمالی قرار گیری این سازند را در محل چاه حفاری شده، ۵۷۰۰ متری سطح زمین در حوالی پروفیل P2 که چاه کردند با فاصله یک کیلومتری سمت راست این پروفیل قرار دارد پیش بینی کرد.

❖ با توجه به نقشه‌های مقاومت ویژه تهیه شده در عمق‌های مختلف، گسترش جانبی سازند تیرگان برای پروفیل‌های غربی در عمق تقریبی ۳۰۰۰ متری از سطح زمین، برای پروفیل‌های مرکزی در عمق تقریبی ۴۰۰۰ متری از سطح زمین و در پروفیل‌های شرقی در عمق تقریبی ۶۰۰۰ متری از سطح زمین مشخص گردید.

پیشنهادهات

❖ با توجه به نتایج مدل سازی داده های مگنتوتلوریک، به منظور اکتشاف سازند تیرگان، حفاری بیشتر از عمق ۵۲۰۰ متری در محل چاه کردند پیشنهاد می شود، علاوه بر آن انجام حفاری دو حلقه چاه دیگر تا عمقی که سازند تیرگان را قطع کند، در بخش های مرکزی (در عمق تقریبی ۴۰۰۰ متری از سطح زمین) و غربی منطقه (در عمق تقریبی ۳۰۰۰ متری از سطح زمین) پیشنهاد می شود.

❖ انجام مدل سازی دو بعدی داده های MT همراه با نتایج حفاری هایی که صورت خواهد گرفت برای بررسی های تکمیلی تر، ضروری است.

منابع

- افشار حرب. ع، (۱۳۷۳). "چینه شناسی ناحیه کپه داغ"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بهروزمند. ا.ع، اسکوئی، ب. (۱۳۸۶) "تفسیر یک بعدی داده‌های مگنتوتلوریک منطقه اینچه برون". **مجله فیزیک زمین و فضا**، دوره ۳۳، شماره ۲، صفحه ۵۵-۶۷.
- پاکدل ن، اسکویی ب. (۱۳۸۹) "مطالعه مگنتوتلوریک در امتداد یک پروفیل با جهت شمال شرقی-جنوب غربی در استان مرکزی، ایران". **فصلنامه زمین**، سال پنجم، شماره ۳.
- خوجم لی، ا. (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "ارائه مدل مفهومی منابع زمین گرمایی مشکین‌شهر با استفاده از نتایج مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک و تلفیق آن با داده‌های هیدروژئوشیمی، زمین‌شناسی و حفاری". دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- خوجم لی ا، مرادزاده ع، دولتی ارده‌جانی ف، پرخیال س، (۱۳۹۱) "مدل‌سازی معکوس یک بعدی و دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک منطقه زمین گرمایی مشکین شهر" پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ص ۱۴۵-۱۴۹، تهران.
- قرابیگی غ، شبان ع، آریافر ب، رشیدی م، آقابابایی ع و بیک ف، (۱۳۸۷) "گزارش زمین‌شناسی (GR 2156) (شرکت ملی نفت ایران، واحد مدیریت اکتشاف) با عنوان: تحلیل ساختاری کپه داغ باختری و اولویت‌بندی ساختمان‌ها".
- قندی، ر. (۱۳۸۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد: "ارائه روشی برای کاهش اثرات ناهمگنی‌های سطحی روی داده‌های مگنتوتلوریک و مدل‌سازی داده‌های آن". دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- محمدی ب، اسکویی ب، و میرزایی م، (۱۳۹۱) "مطالعه مخزن زمین گرمایی منطقه محلات استان مرکزی با استفاده از برگردان یک بعدی و دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک". شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.
- Afshar, A. (1968). "Geology of west KOPEH-DAGH. (GR:287(1621)).
- Abdul Azeez, K. K., Satish Kumar, T., Basava, S., Harinarayana, T. and Dayal A.M. (2011). " Hydrocarbon prospects across Narmada-Tapti rift in Deccan trap, central India: Inferences from integrated interpretation of magnetotelluric and geochemical prospecting studies ". **Marine and Petroleum Geology**. V. 28, Issue 5, pp. 1073-1082.

- Bahr, K. (1988). "Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion". **Geophysics**. V. 62, pp. 119-127.
- Beamish, D. (1986). "Geoelectric structural dimensions from Magnetotelluric data: Methods of estimation, old and new". **Geophysics**. V. 51, pp. 1298-1309.
- Berdichevsky, M. and Dmitriev, V. (2002). "Magnetotelluric in the context of the theory of ill posed problems", In: Keller, G.V. (Ed.), *Magnetotelluric in exploration for oil and gas*. **SEG**.
- Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I. and Pozdnjakova, E. E. (1998). "On two dimensional interpretation of magnetotelluric soundings". **Geophys. J. Int.** V. 133, pp. 585-606.
- Beydoun, Z. R. (1991), "Arabian plate hydrocarbon geology and potential – a plate tectonic approach". **AAPG Studies in Geology** 33.
- Bostik, F. X. (1977). "A simple almost exact method of MT analysis". Workshop on electrical method in geothermal Exploration. U.S. Geol. Surv., Contract No. 14080001-8-359.
- Bostick, F. X. (1986). "Electromagnetic array profiling (EMAP)". Fifty sixth Ann. Mtg. Society of exploration geophysics (SEG). Expanded Abstracts. 60-61.
- Cantwell, T., (1960), PhD. Thesis, "Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signals". MIT university.
- Cantwell, T. and Madden, T. R. (1960). "Preliminary report on crustal magnetotelluric measurements". **Geophys. Res.** V. 65, No. 12, pp. 4202-4205.
- Christiansen, A. V., Auken, E. and Sorensen, K. (2006). "*The transient electromagnetic method*". **Springer Berlin Heidelberg**. pp. 179-225.
- Christopherson, K. R. (1991). "Applications of magnetotelluric to petroleum exploration in Papua New Guinea: A model for frontier areas". **The Leading Edge**. V. 10, pp. 21-27

- Constable, S. C., Parker, R. L. and Constable, C. G. (1987). "Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data". **Geophysics**. V. 52, No. 3, pp. 289-300.
- Dobrin, M. D. and Savit, C. H. (1988). "*Introduction to geophysical prospecting*". (4th ed.). New York, McGraw-Hill. 868 p.
- Eggers, D. E. (1982). "An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor". **Geophysics**. V. 47, pp. 1204-1214.
- Geosystem SRL., 2003, A guide to using WinGLink, ver.2. 1. 1.
- Hermance, J. F. (1982). "the asymptotic response of three-dimensional basin effects to magnetotelluric field at long period: The effects of current channeling". **Geophysics**. V. 47, pp. 1562-1573.
- Hohmann, G. W. and Ting, S. C. (1981). "Integral equation modeling of three-dimensional magnetotelluric response". **Geophysics**. V. 46, pp. 182-197.
- Hoversten, G. M., Constable. S. C. and Morrison, H. F. (2000). "Marine magnetotellurics for Base-of-salt mapping: Gulf of Mexico field test at the Gemini structure". **Geophysics**. V.65, No. 5, pp. 1476-1488.
- Kafman, A. A. and Keller, G. V. (1981). "The magnetotelluric sounding method". **Elsevier**. pp. 595.
- Kao, D. and Orr, D. (1982). "Magnetotelluric studies in the Market Weighton area of eastern England". **Geophysics. J. R. astr. Soc.** V. 70, pp. 323-337.
- Kingston Morrison. (1998). "Sabalan geothermal project: Review of existing data Report No.#2505-RPT-GE-003, Revision 0, Internal report prepared for SUNA.
- Mackie, R. L. and Rodi, W. (1996). " A nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion: paper presented at Fall Meeting of the American Geophysical

Union, San Francisco, California.

- Matsuo, K. and Negi, T. (1999). "Oil exploration in difficult Minami-Noshiro area-Park two: magnetotelluric survey". **The Leading Edge Exploration**.
- Meju, M. A. (1994). "*Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice*". SEG Book.
- Moradzadeh, A. (1998). "Electrical imaging of the Adelaide geosyncline using magnetotelluric (MT)". Ph.D thesis, Flinders university of south Australia. pp. 334.
- Moradzadeh, A. (2003a). "Static shift appraisal and its correction in Magnetotelluric (MT) survey". 21st Geoscience Conference and Exposition. Tehran.
- Moradzadeh, A. (2003b). "Using of tipper function to map subsurface conductivity structures in Magnetotelluric (MT) surveys". 21st Geoscience Conference and Exposition. Tehran.
- Moradzadeh, A. and Chamalaun, F. H. (2005). "Investigation modeling of TE and TM modes data in magnetotelluric survey using Rapid Relaxation Inversion (RRI) method". **Journal of science and technology, Shahrood university of technology**. No. 6-7.
- Orange, A. S. (1989). "Magnetotelluric exploration for hydrocarbons". **IEEE**. V. 77, No. 2, pp. 287-317.
- Park, S. K. And Livelybrooks D. W. (1989). "Quantitative interpretation of rotationally invariant parameters in magnetotellurics". **Geophysics**. V. 54, No. 11, pp. 1483-1490.
- Parkinson, W.D. (1962). "The influence of continents and oceans on geomagnetic variation". **Geophys. J. R. astr. Soc.** V. 6, pp. 441- 449.
- Picha, F. J. (1996). "Exploration for hydrocarbon under thrust belts-a challenging new frontier in the Carpathians". **AAPG Bulletin**. V. 80, No. 10, pp. 1547-1564.

- Reddy, I. K., Rankin, D. and Phillips, R. J. (1977). "Three-dimensional modeling in magnetotelluric and magnetic variational sounding". **Geophys. J. R. Astr. Soc.** V. 51, pp. 313-325.
- Rodi, W. and Mackie, R.L. (2001). "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D Magnetotelluric inversion". **Geophysics**. V. 66, pp. 174-187.
- Sims, W.E. and Bostick, F.X.J. (1969). "Methods of magnetotelluric analysis. Univ. of Texas, Austin EGRL Tech. No. 58.
- Spratt, J. and Craven, J. (2010). "Magnetotelluric imaging of the Nechako Basin, British Columbia". **Geological Survey of Canada, Current Research 2010-3**. pp. 9.
- Sternberg, B. K., Buller, P. L., Kisabeth, J. L. and E., M. (1982). "Electrical methods for hydrocarbon exploration II. Magnetotelluric method". **Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas III**, Dallas. pp 202-230.
- Sternberg, B.K., Washburne, J.C. and Pellerin, L. (1988). "Correction for the static shift in magnetotelluric using transient electromagnetic sounding". **Geophysics** V. 53, No. 11. pp. 1459-1468.
- 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.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. (1990). "*Applied Geophysics*". **Cambridge University Press**. pp. 770.
- Tikhonov, A. N. (1965). "Mathematical basis of the theory of magnetotelluric soundings". **USSR Comput. Math. Phys.** V. 5, p. 207.
- Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Y. (1977). "Solutions of ill-posed problems". **Published by V. H. Winston and Sons**. pp. 258.

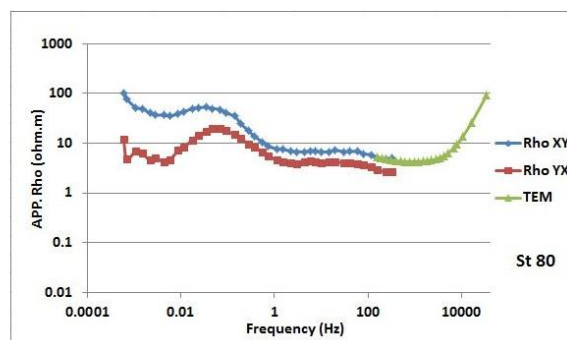
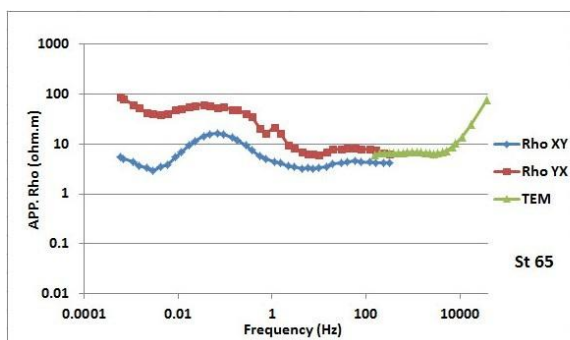
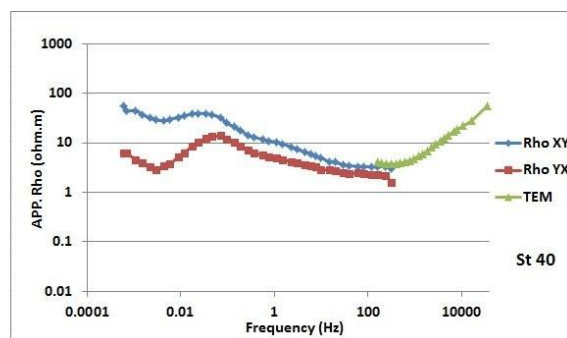
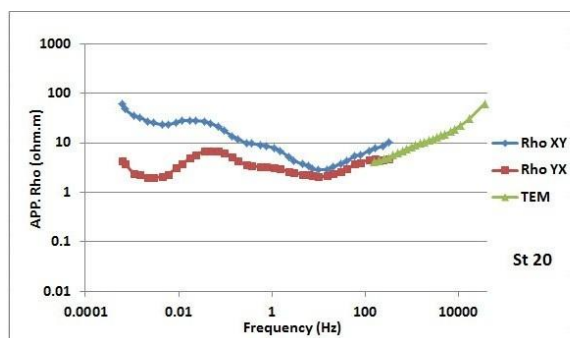
- Torres-Verdin, C. (1985). "Implications of the born approximation for the MT problem in three-dimensional environments". MS thesis, University of Texas Austin.
- Torres-Verdin, C. and Bostick, F. X. Jr. (1990). "Properties of EMAP in Two-Dimensional Environments". 60th Annual International SEG Meeting. San Francisco.
- Unsworth, M. (2005). "New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods". **CSEG recorder**. pp. 34-38.
- Unsworth, M. (2012). "Applications of magnetotelluric exploration". **Geophysics**. pp. 424.
- Vozoff, K. (1972). "The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins". **Geophysics**. V.36, pp. 98-141.
- Vozoff, K. (1991). "The magnetotelluric method, In: Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic Methods in applied Geophysics". **SEG**. Tulsa, Okla, pp. 641-712.
- Wang, L. J. (1994). M.S. Thesis. "Magnetotelluric investigation of the Flinders Range Geomagnetic Anomaly". School of earth science, Australia.
- Watts, M. D., Alexandros, S., Eleni, K. and Mackie, R. (2002). "Magnetotelluric applied to sub-thrust petroleum exploration in Northern Greece". **Work package report to European Commission Research Directorate-General**.
- Watts, M. D, and Pince, A. (1998). "Petroleum exploration in overthrust area using magnetotelluric and seismic data". **SEG** expanded abstract, New Orleans.
- Xiao, W. (2004). "Magnetotelluric exploration in the Rocky Mountain Foothills". MS thesis, university of Alberta, Edmonton, Canada. pp. 66.
- Xiao, W. and Unsworth, M. (2006). "Structural imaging in the Rocky Mountain Foothills

(Alberta) using magnetotelluric exploration". **AAPG Bulletin.**, V.90, No.3, pp. 321-333.

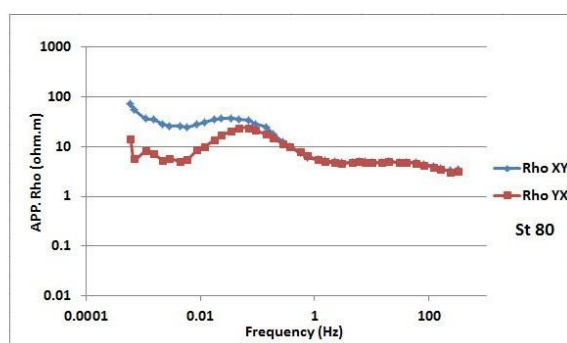
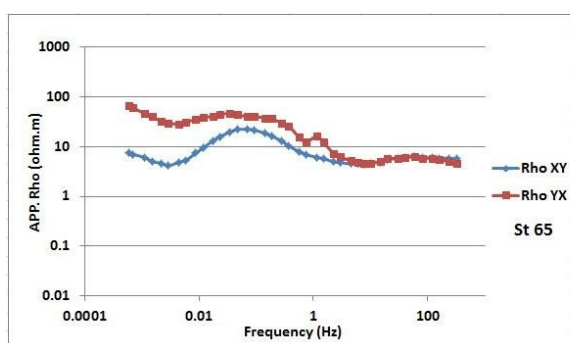
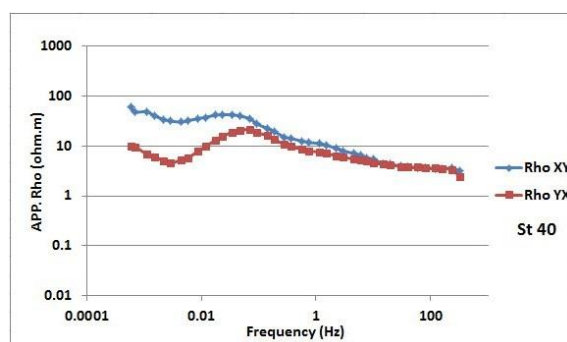
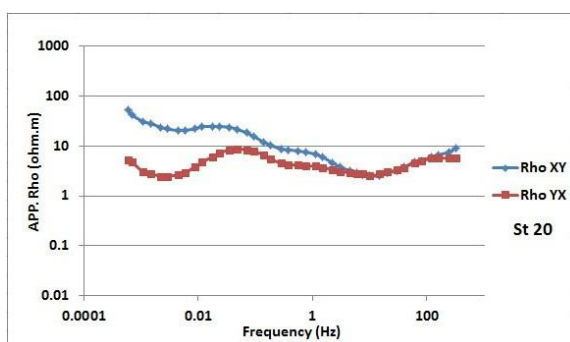
- Zhdanov, M.S. (2009). "*Geophysical electromagnetic theory and methods*". **Elsevier.** Utah, 546 p.

پیوست الف

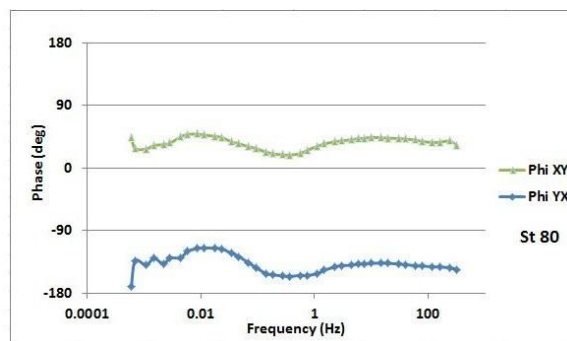
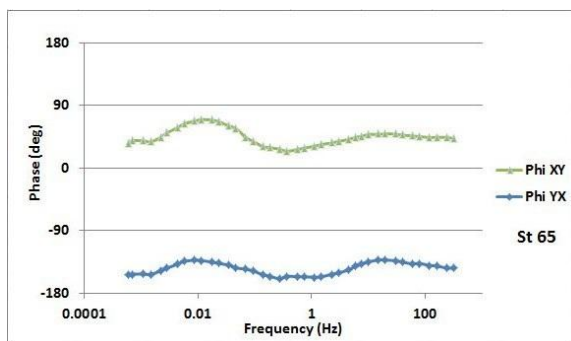
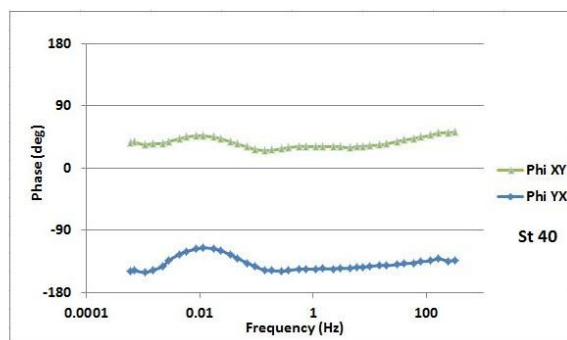
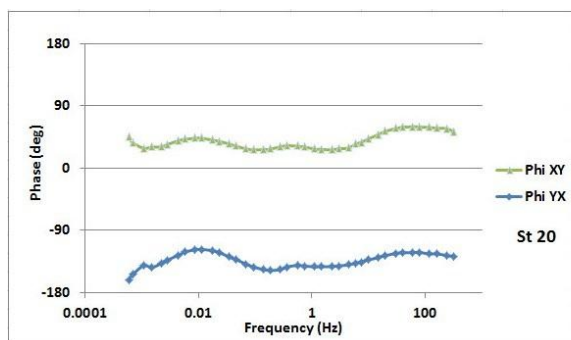
در این پیوست نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری برای مولفه‌های XY و YX قبل از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا و منحنی‌های حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM در چهار ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14، نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری تصحیح شده برای اثر جابه‌جایی ایستا برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14، نمودارهای فاز برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل‌های P7 و P14، نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 برای دو ایستگاه از پروفیل‌های P2، P3، P4، P5، P6، P8، P9، P10، P11، P12، P13، شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه و فاز قطبش TM، در طول پروفیل‌های P2، P3، P4، P5، P6، P8، P9، P10، P11، P12، P13 آورده شده است.



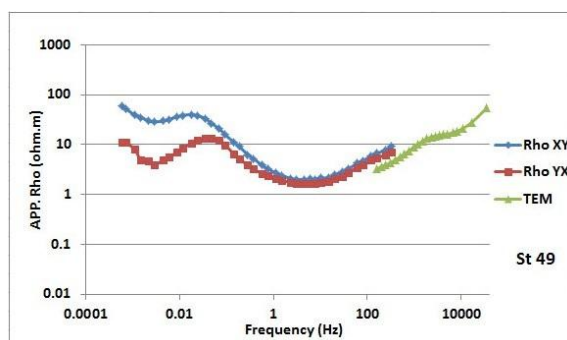
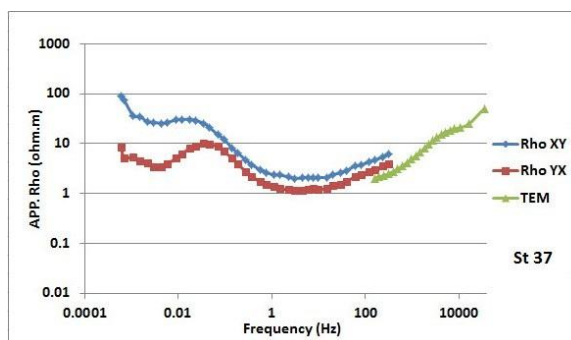
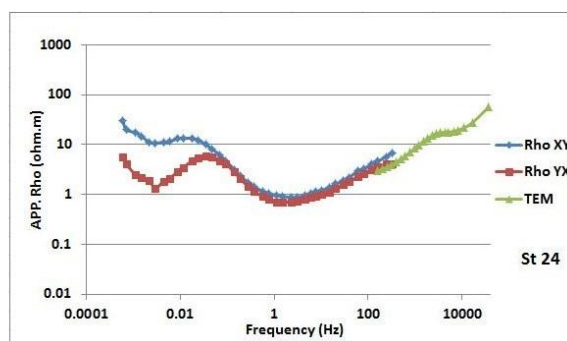
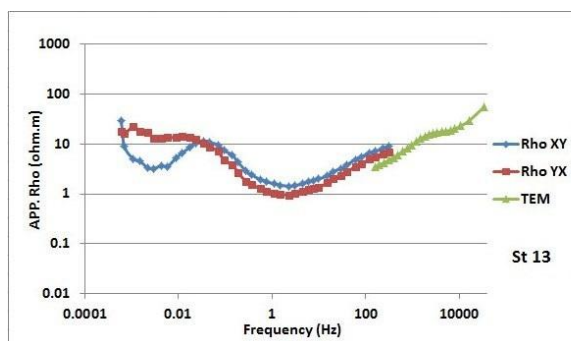
شکل الف - ۱- نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری برای مولفه‌های XY و YX قبل از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا و منحنی حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM در چهار ایستگاه از پروفیل P7.



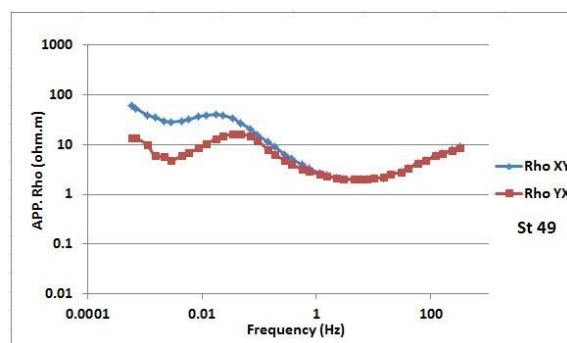
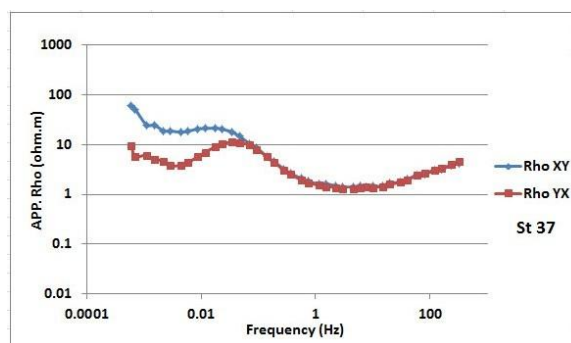
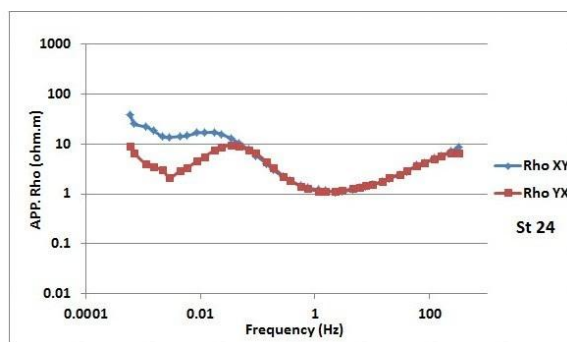
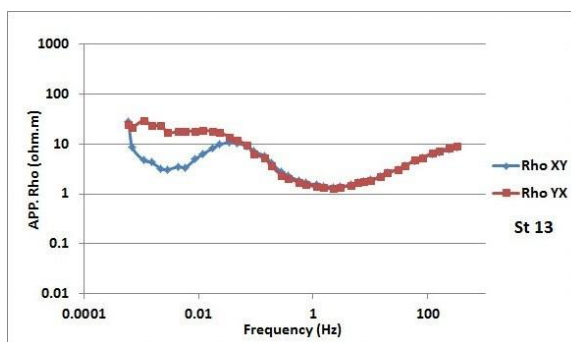
شکل الف - ۲- نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری تصحیح شده برای اثر جابه‌جایی ایستا برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P7.



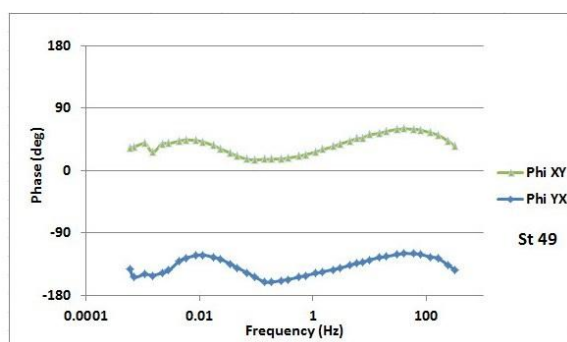
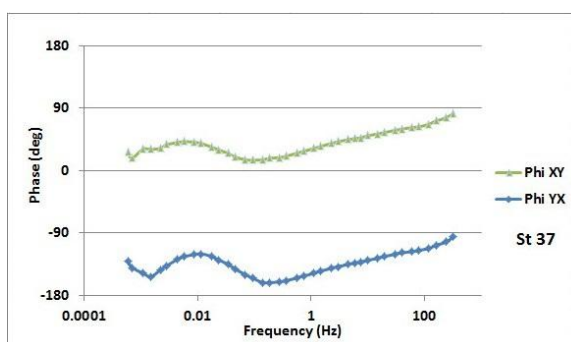
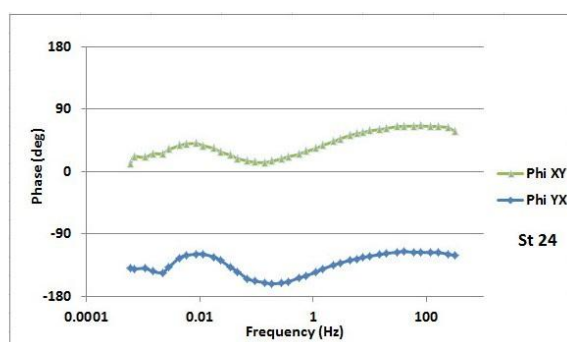
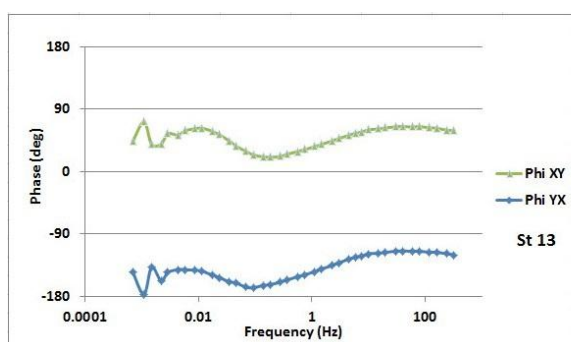
شکل الف - ۳- نمودارهای فاز برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P7.



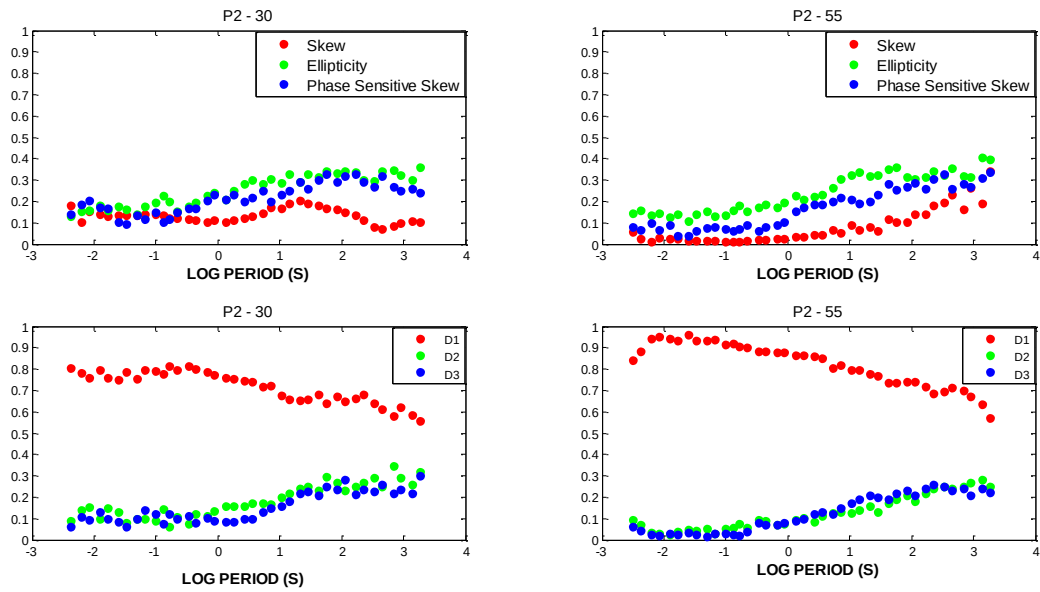
شکل الف - ۴- نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری برای مولفه‌های XY و YX قبل از انجام تصحیح جابه‌جایی ایستا و منحنی حاصل از مدل‌سازی داده‌های TEM در چهار ایستگاه از پروفیل P14.



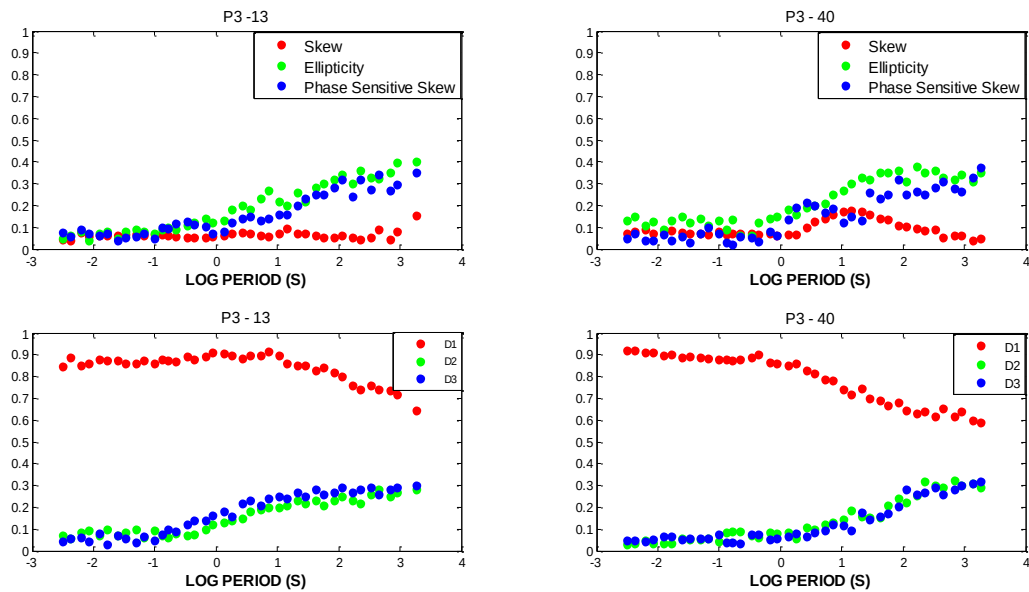
شکل الف - ۵- نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری تصحیح شده برای اثر جابجایی ایستا برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P14.



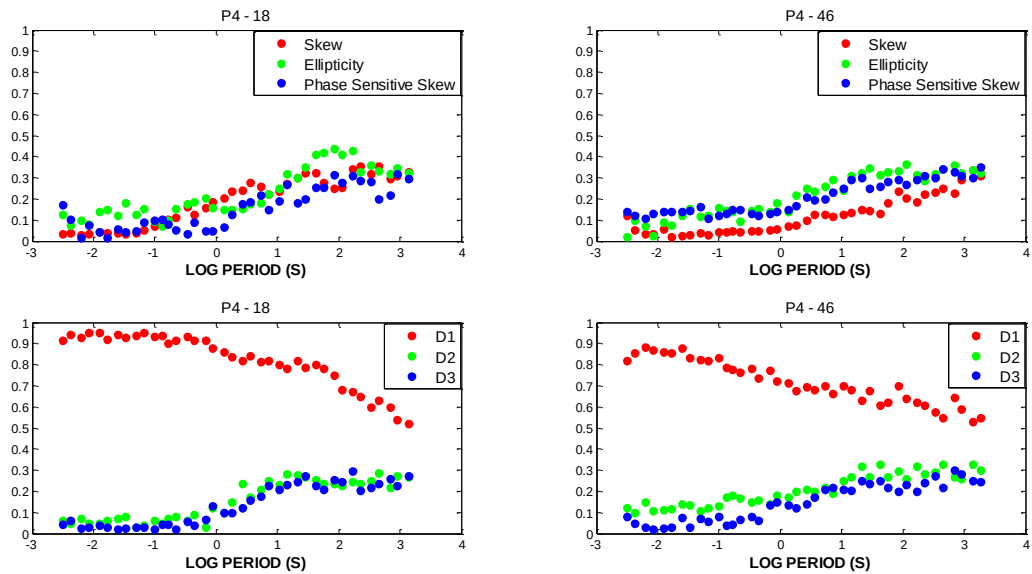
شکل الف - ۶- نمودارهای فاز برای مولفه‌های XY و YX در چهار ایستگاه از پروفیل P14.



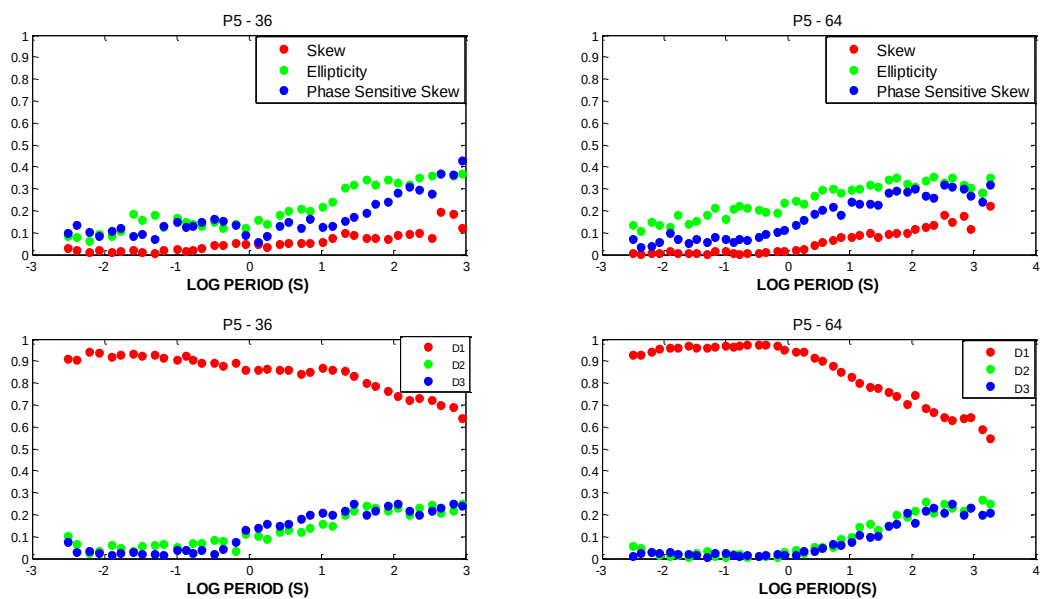
شکل الف - ۷- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۳۰ و ۵۵ از پروفیل P2



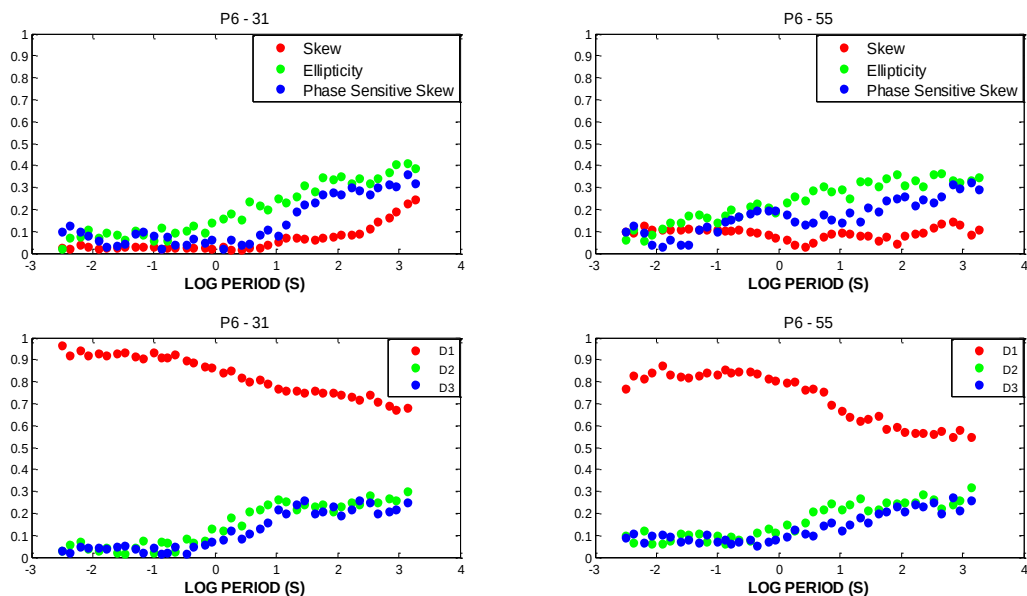
شکل الف - ۸- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۱۳ و ۴۰ از پروفیل P3



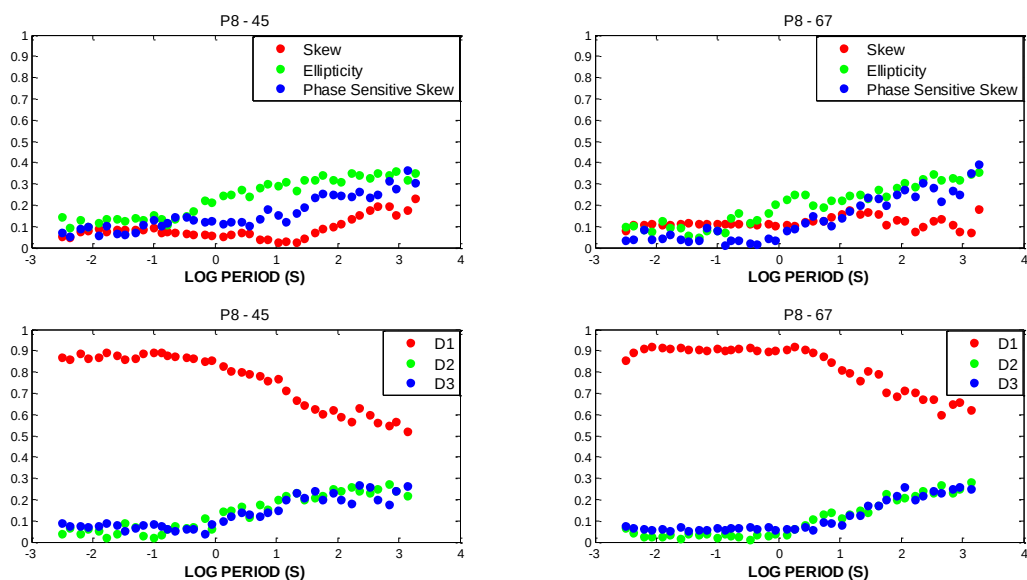
شکل الف - ۹- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه های ۱۸ و ۴۶ از پروفیل P4



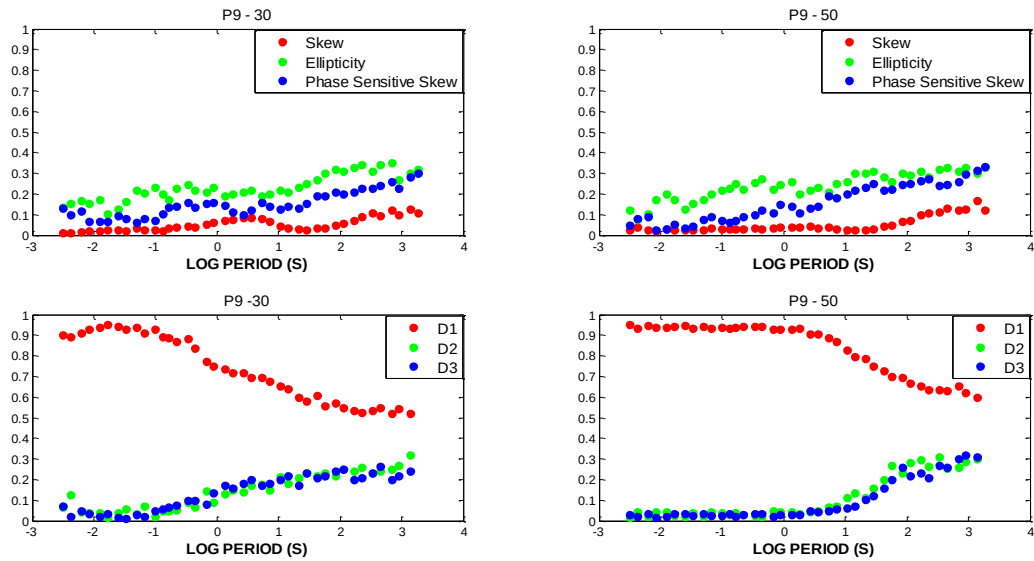
شکل الف - ۱۰- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه های ۳۶ و ۶۴ از پروفیل P5



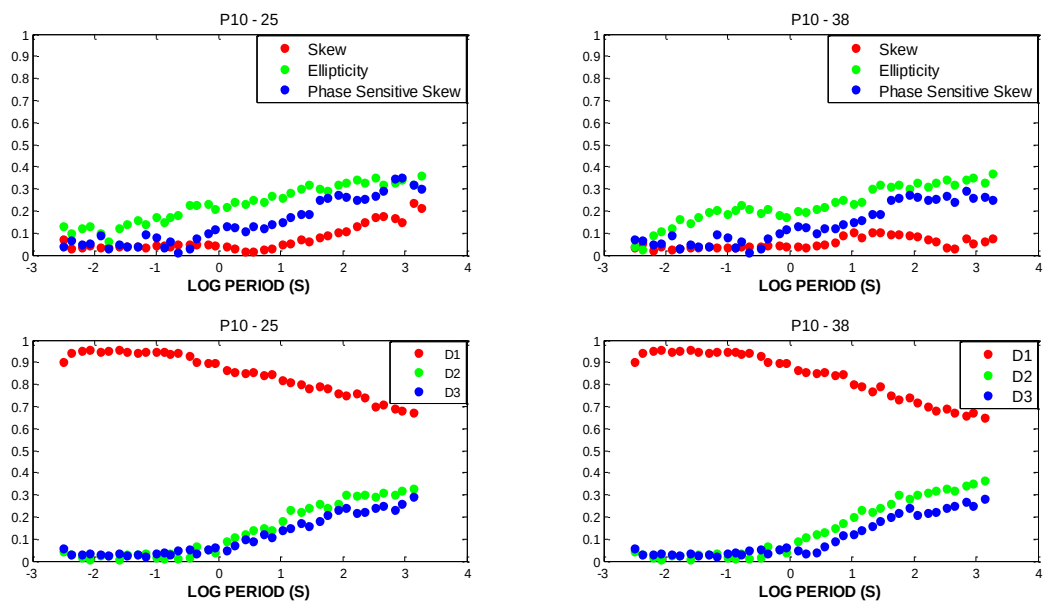
شکل الف - ۱۱- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۳۱ و ۵۵ از پروفیل P6



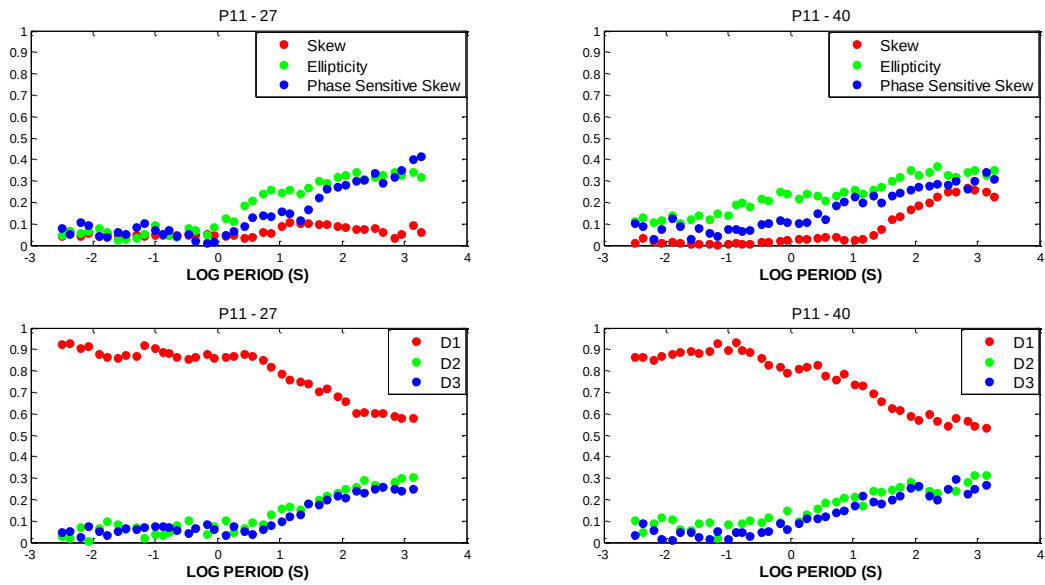
شکل الف - ۱۲- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۴۵ و ۶۷ از پروفیل P8



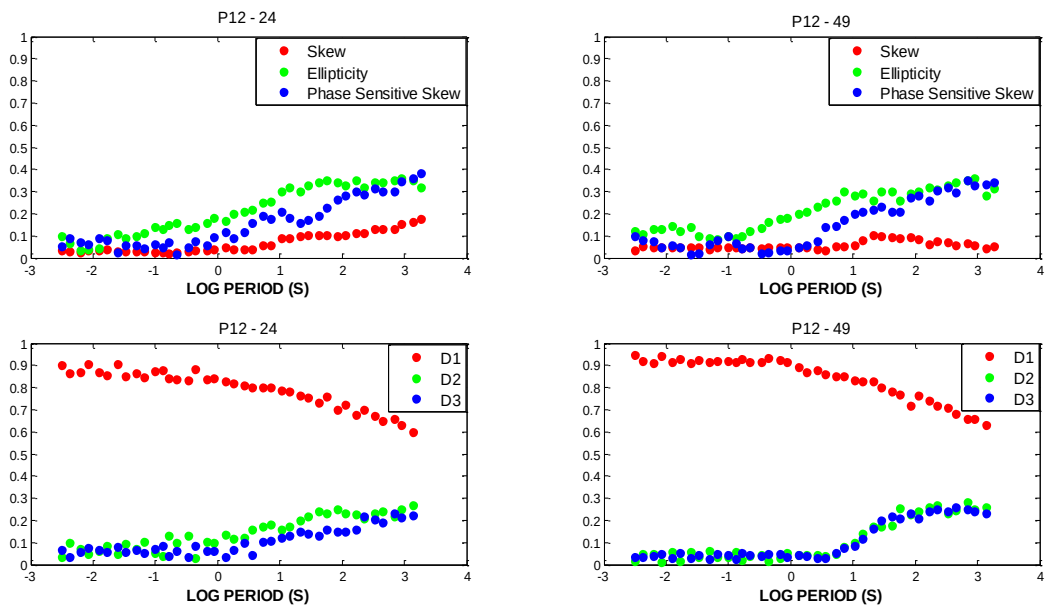
شکل الف - ۱۳ - نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۳۰ و ۵۰ از پروفیل P9



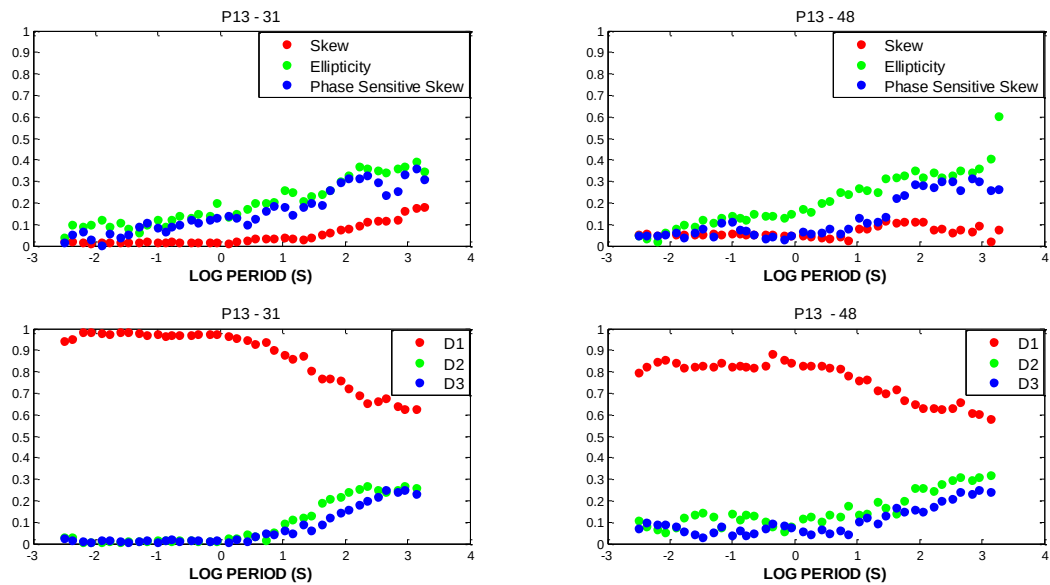
شکل الف - ۱۴ - نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۲۵ و ۳۸ از پروفیل P10



شکل الف - ۱۵- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۲۷ و ۴۰ از پروفیل P11

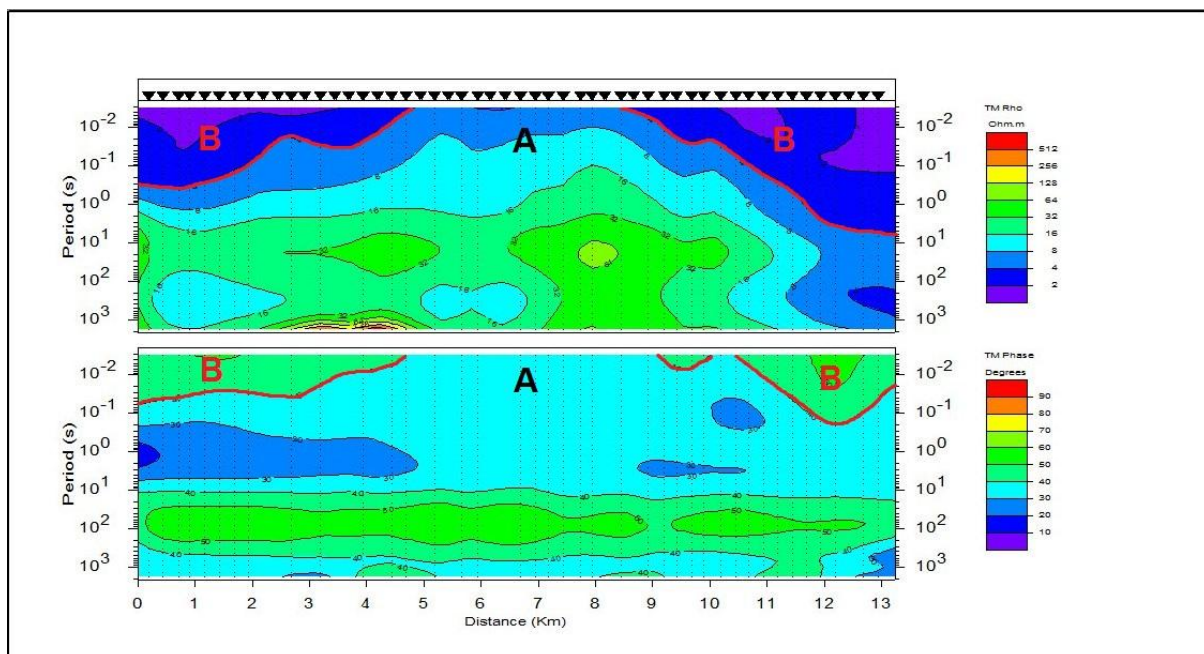


شکل الف - ۱۶- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 ، D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۲۴ و ۴۹ از پروفیل P12

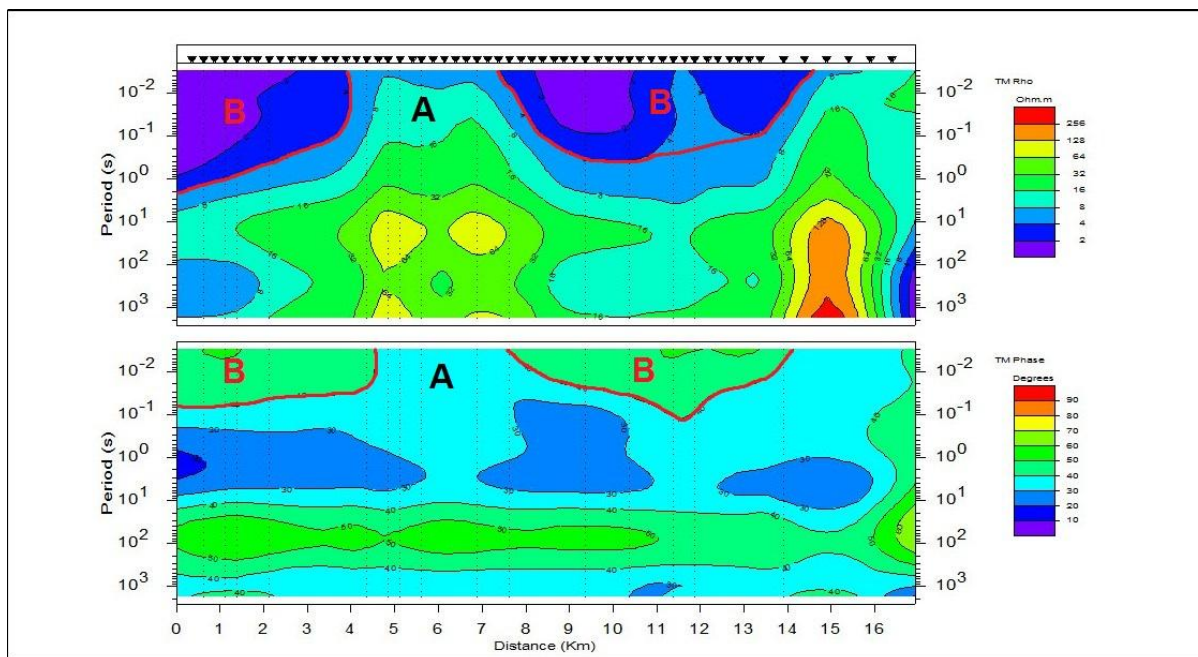


شکل الف - ۱۷- نمودار مقادیر چولگی، چولگی (اسکیو) حساس به فاز، بیضی وارگی (بالا) و نمودار مقادیر شاخص‌های D_1 .

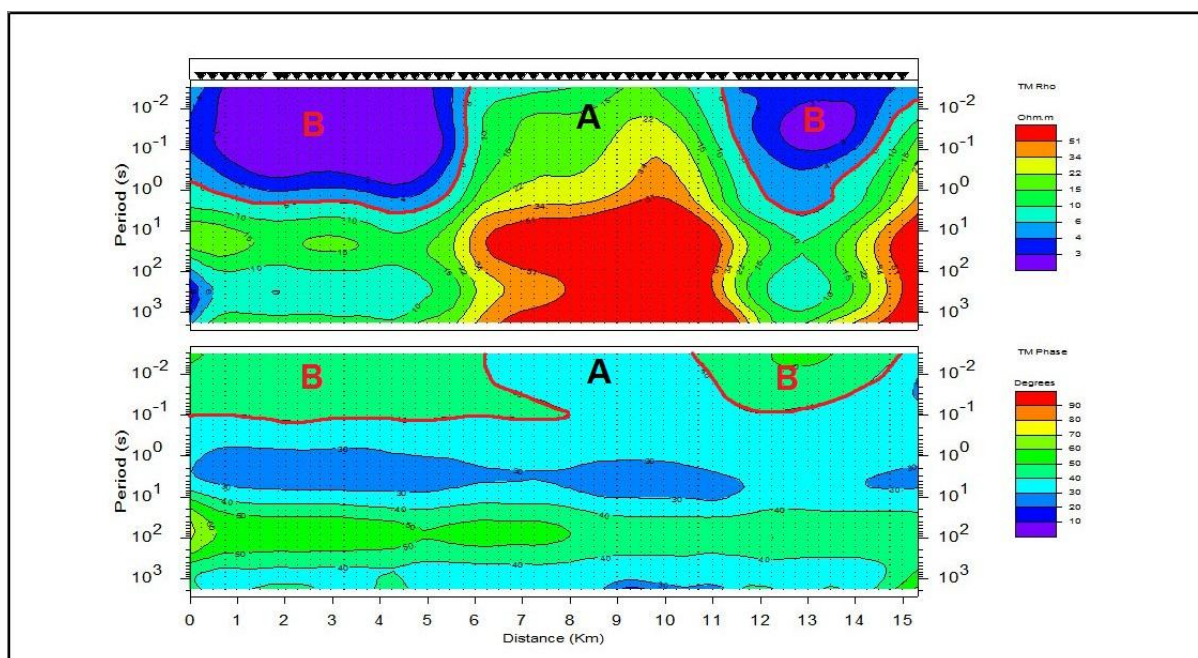
D_2 و D_3 (پایین) برای ایستگاه‌های ۳۱ و ۴۸ از پروفیل P13.



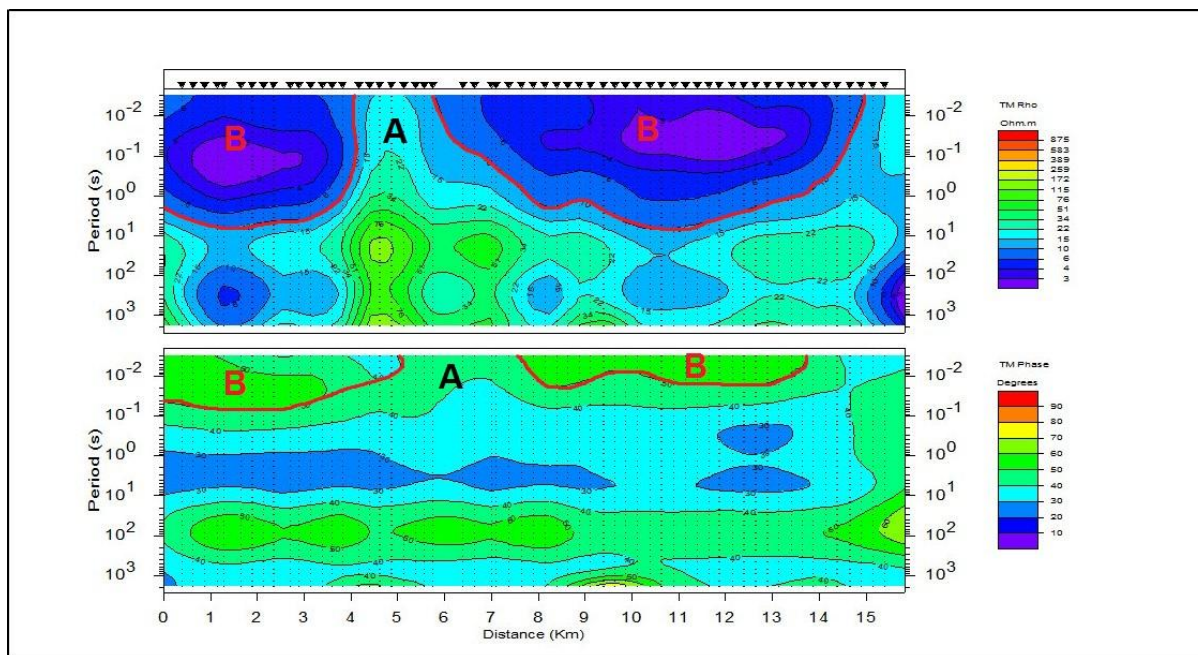
شکل الف-۱۸- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P2



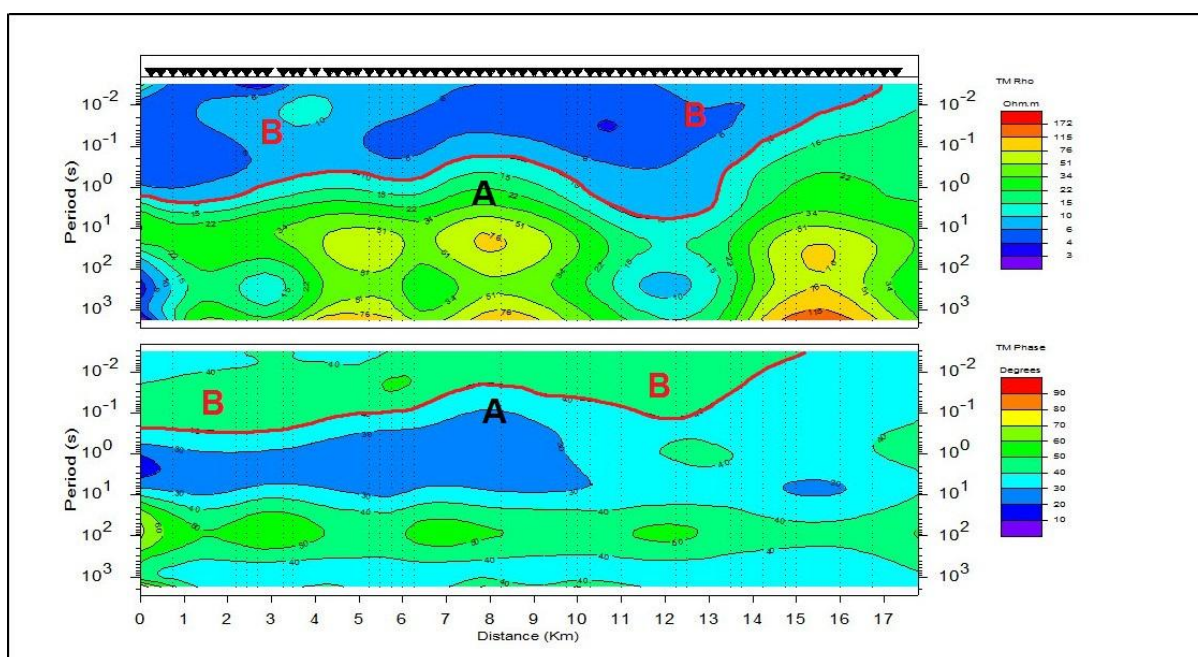
شکل الف-۱۹- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P3



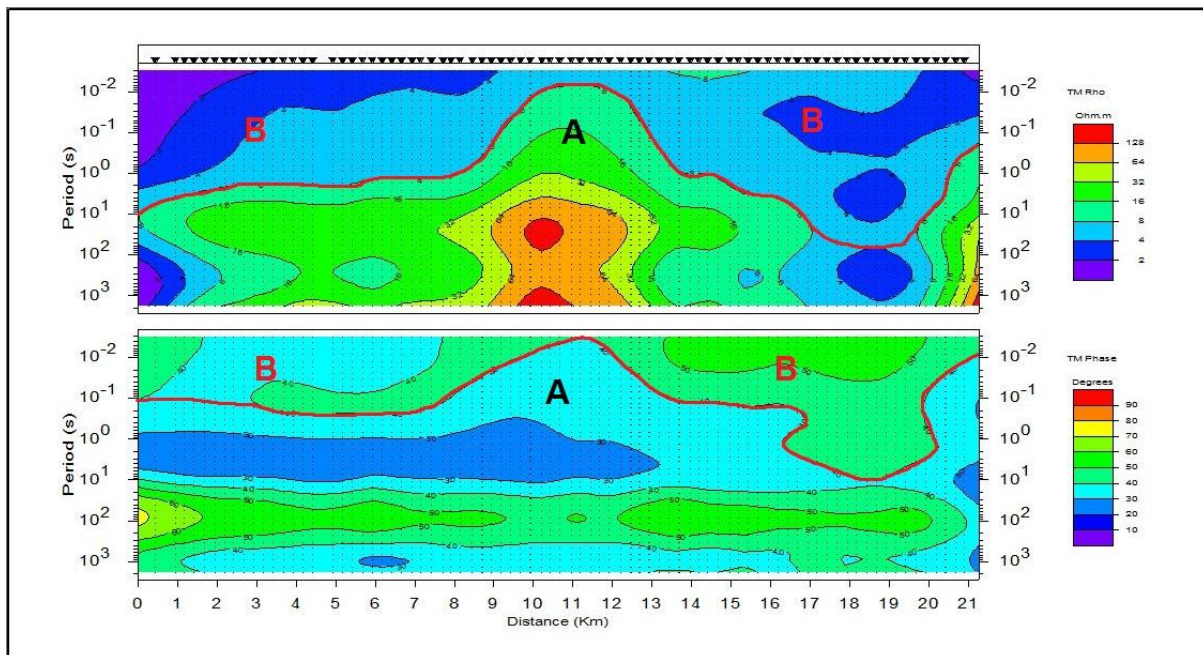
شکل الف-۲۰- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P4



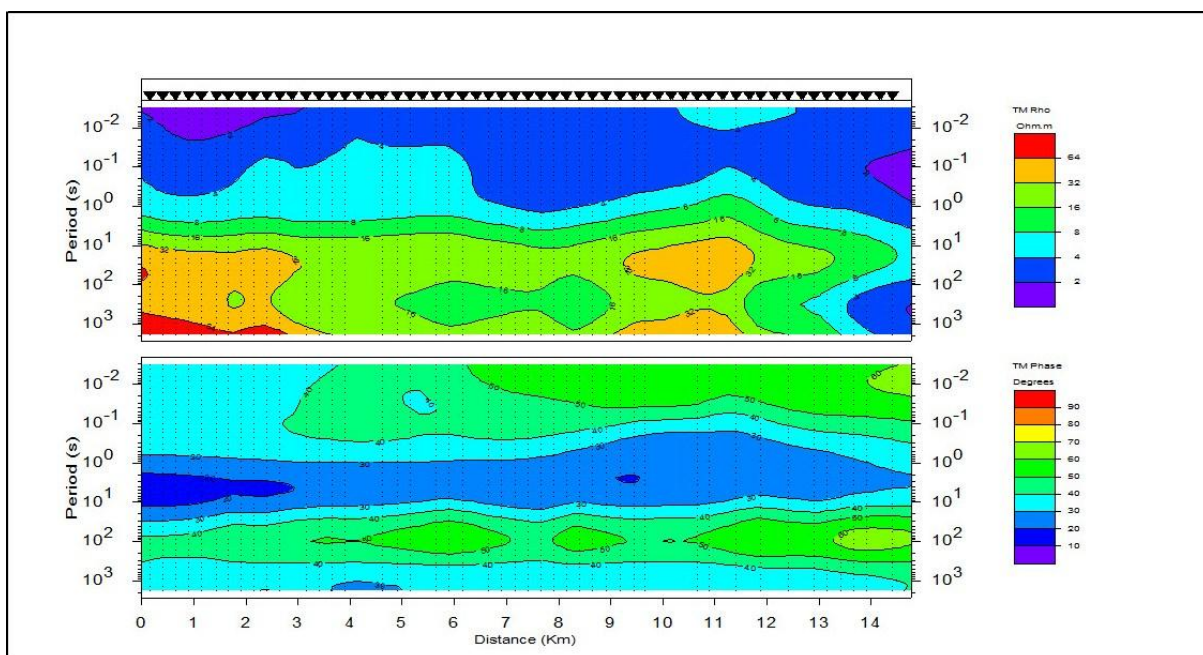
شکل الف-۲۱- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P5



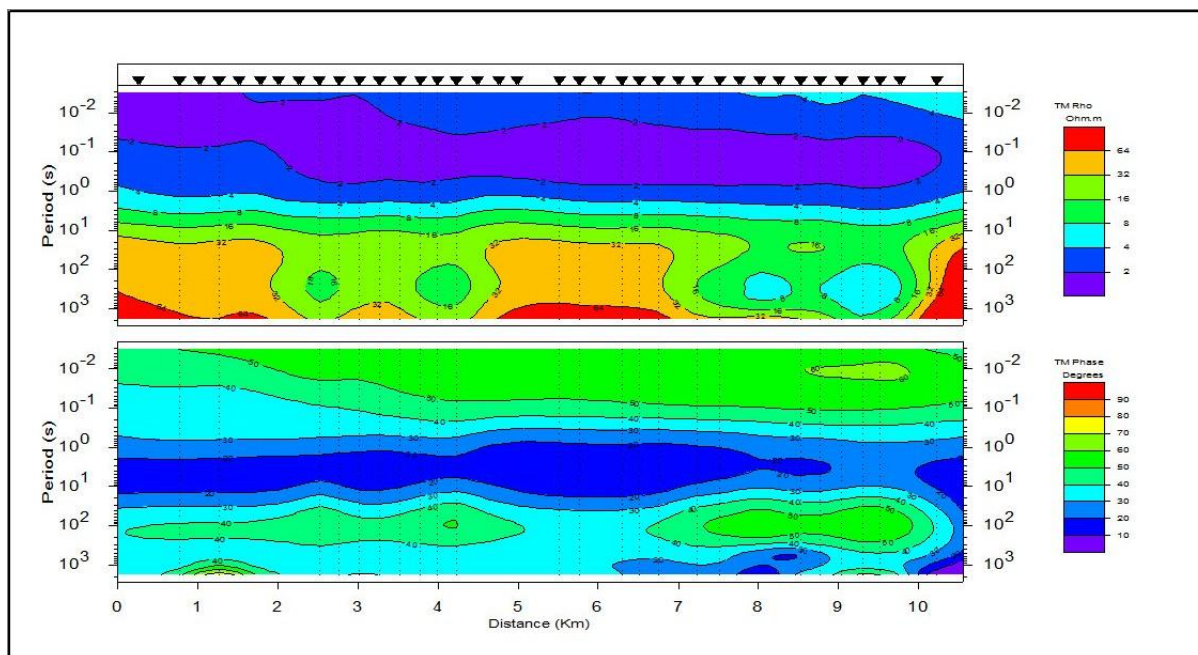
شکل الف-۲۲- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P6



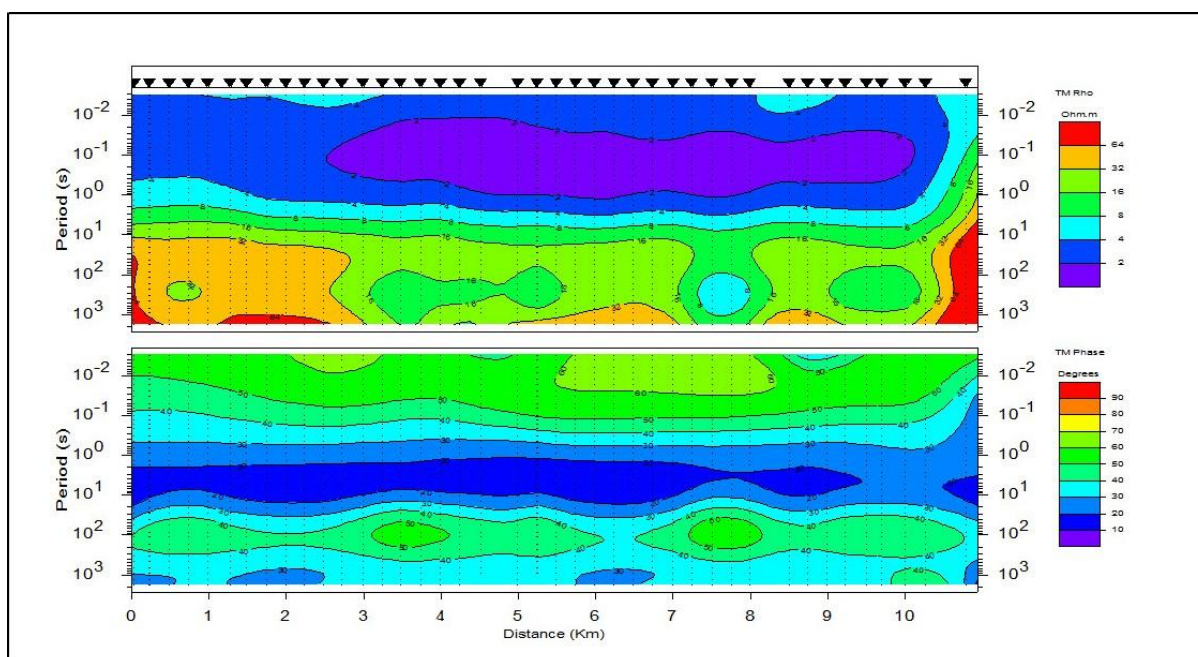
شکل الف-۲۳- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P8



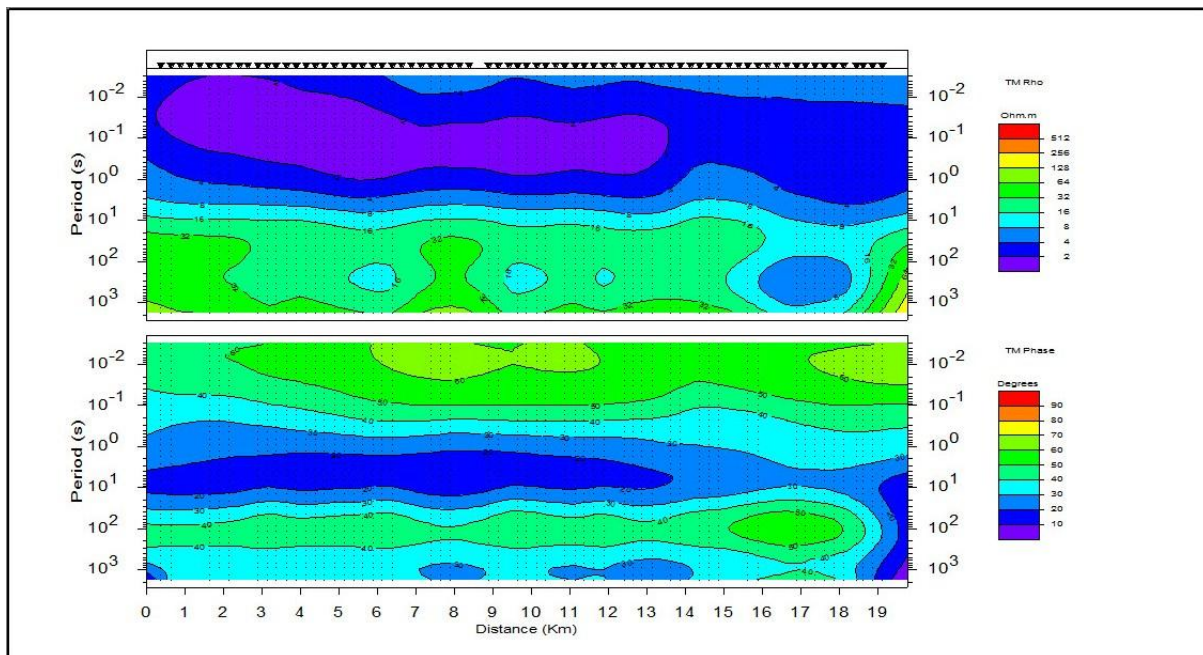
شکل الف-۲۴- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P9



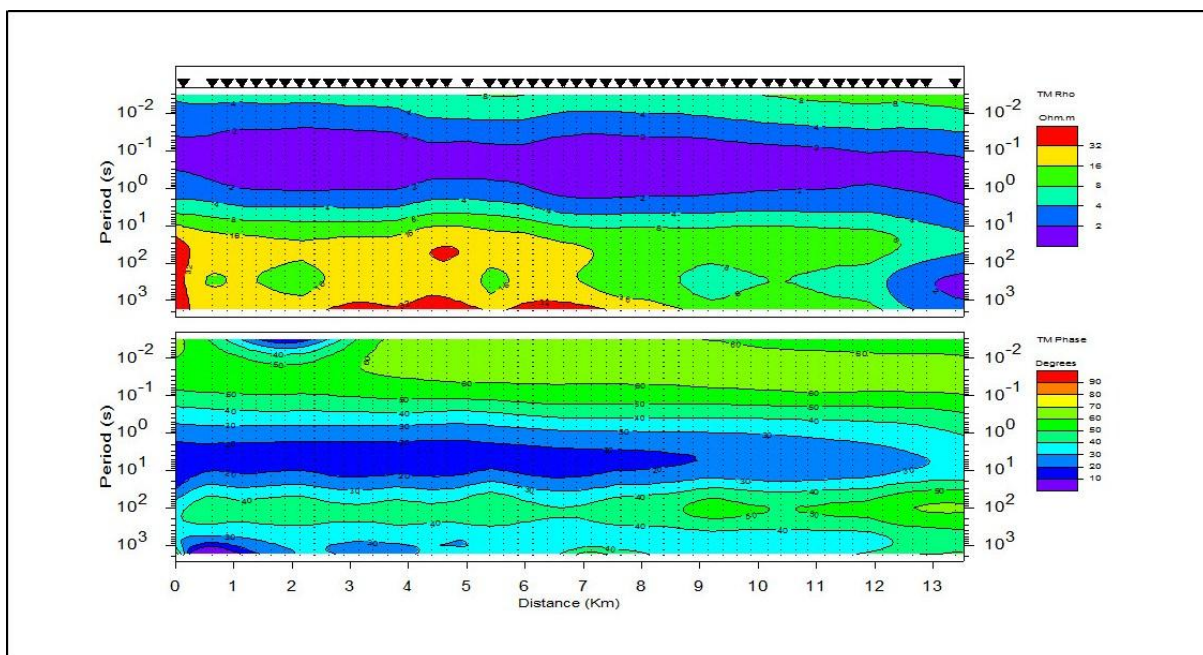
شکل الف-۲۵- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P10



شکل الف-۲۶- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P11



شکل الف-۲۷- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P12



شکل الف-۲۸- شبه مقاطع مربوط به داده‌های مقاومت ویژه (بالا) و فاز (پایین) قطبش TM، در طول پروفیل P13

پیوست ب

در این بخش مختصری راجع به روش وارون سازی یک بعدی هموار اوکام توضیح داده شده است و در ادامه نتایج مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل های P2, P3, P4, P5, P6, P8, P9, P10, P11, P12, P13 (مد میانگین) آورده شده است.

توضیحی کوتاه در مورد روش وارون سازی یک بعدی هموار اوکام

الگوریتمی که مدل نهایی حاصل از وارون سازی یک بعدی اوکام را نتیجه می دهد باید پایدار باشد و سرعت همگرایی بالایی داشته باشد این هدف با تعریف ناهمواری به دو صورت زیر حاصل می شود (Wang, 1994):

$$R_1 = \int (dm(z)/dz)^2 dz \quad (\text{ب-۱})$$

$$R_2 = \int (d^2m(z)/dz^2)^2 dz \quad (\text{ب-۲})$$

R_1 و R_2 پارامترهای ناهمواری مدل می باشند و $m(z)$ می تواند مقاومت ویژه یا لگاریتم آن باشد و z بیانگر عمق است. استراتژی موردنظر پیدا کردن راه حلی است که در آن ناهمواری مدل کمترین مقدار را داشته باشد.

برای توصیف یک سیستم ژئوفیزیکی اغلب توزیع پیوسته پارامترهای فیزیکی زمین را به صورت یک مجموعه متناهی از پارامترها بیان می کنند این امر به دلیل سهولت در محاسبات رایانه ای و عدم امکان ثبت تمامی مشاهدات تجربی برای سیستم فیزیکی به صورت پیوسته است:

$$m(z) = m_i \quad z_{i-1} < z < z_i \quad i = 1, 2, \dots, N$$

بنابراین پارامترهای ناهمواری به صورت زیر تعریف می شوند:

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (m(z)_i - m(z)_{i-1})^2 \quad (\text{ب-۳})$$

$$R_2 = \sum_{i=2}^{N-1} (m(z)_{i-1} - 2m_i + m(z)_{i+1})^2 \quad (\text{ب-۴})$$

اگر M داده مشاهده‌ای $d_1, \dots, \dots, d_m$ داشته باشیم، این داده‌ها می‌تواند مقاومت ویژه ظاهری و فاز در فرکانس‌های مختلف باشند، که خطای مربوط به هر کدام σ_j است، با استفاده از معیار حداقل مربعات وزنی می‌توان مهم‌ترین تطابق بین پارامترهای مدل $(F_j(m))$ و مقادیر داده‌های واقعی d_j را با معیار زیر به دست آورد:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^M (d_j - F_j(m))^2 / \sigma_j^2 \quad (\text{ب-۵})$$

$$RMS = \sqrt{\chi^2 / M} \quad (\text{ب-۶})$$

χ^2 خطای کای اسکور^۱ نامیده می‌شود. با تعریف یک مقدار کای اسکور مطلوب (χ_*^2) عمل کمینه سازی تابع هدف زیرین، برای به دست آوردن یک مدل هموار یک بعدی صورت می‌گیرد.

$$\mu = R_1 + \mu^{-1}(\chi^2 - \chi_*^2) \quad (\text{ب-۷})$$

که در آن μ^{-1} ضریب تکثیر لاگرانژ^۲ می‌باشد. عمل مدل سازی با خطی نمودن و کمینه سازی تابع μ با یک مدل اولیه صورت می‌گیرد (Moradzadeh & Chamalaun, 2005).

حال با داشتن داده‌های d_i باید پارامترهای مدل m_i را پیدا کنیم که منجر به پارامترهای ناهمواری شوند که حداکثر امکان کوچک‌اند تا آنجا که χ^2 به مقدار قابل قبولی برسد، این یک مساله غیرخطی است و به علت غیرخطی بودن هیچ ضمانتی وجود ندارد که هر پارامتر m_i قادر باشد χ^2 را به اندازه کافی کوچک کند. در یک مساله گسسته خطی، هدف کمینه کردن R_1 است با توجه به این شرط که χ^2 تابع عدم برازش^۳ در معادله (ب-۷) برابر χ_*^2 شود.

برای یک مساله غیرخطی داریم:

$$R_1 = \|\partial m\|^2 \quad (\text{ب-۸})$$

^۱ Chi Squared

^۲ Lagrange Multiplier Formulation

^۳ Misfit

∂ یک ماتریس $N \times N$ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\partial = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots \\ 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ب-۹})$$

که R_1 باید کمینه شود و تابع عدم برازش داده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\chi^2 = \|Wd - WF[M]\|^2 \quad (\text{ب-۱۰})$$

W یک ماتریس $M \times M$ است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W = \text{diag}\{1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_M\} \quad (\text{ب-۱۱})$$

هدف کمینه سازی تابع هدف U است که برای این منظور از روش ضرائب لاگرانژ استفاده می‌شود.

$$U = \|\partial m\|^2 + \mu^{-1}\{\|Wd - WF[m]\|^2 - \chi_*^2\} \quad (\text{ب-۱۲})$$

جمله اول معادله بالا ناهموازی و جمله دوم تابع عدم برازش است که با ضریب لاگرانژ وزن دار شده است. برای هر مقدار μ تابع U ثابت است وقتی گرادیان U بر حسب m صفر باشد ($\nabla_m U = 0$). با انجام محاسبات جبری:

$$\mu^{-1}(WJ)^T WJm - \mu^{-1}(WJ)^T Wd + \partial^T \partial m = 0 \quad (\text{ب-۱۳})$$

ماتریس J ، $M \times N$ است و ماتریس ژاکوبین یا ماتریس گرادیان است.

$$J = \nabla_m F \quad (\text{ب-۱۴})$$

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i[m]}{\partial m_j} \quad (\text{ب-۱۵})$$

حال مساله کمینه تولید شده توسط خطی سازی را برای یک مدل خاص امتحان می‌کنیم. اکثر حل‌ها برای سیستم‌های غیر خطی به یک حدس اولیه برای رسیدن به پاسخ نیاز دارند. در اینجا m_1 را یک مدل اولیه در نظر می‌گیریم اگر F در m_1 مشتق پذیر باشد می‌توان نوشت:

$$F[m_1 + \Delta] = F[m_1] + J_1 \Delta + \varepsilon \quad (\text{ب-۱۶})$$

که $J_1 = J[m_1]$ و F را با صرف نظر از جمله باقیمانده ε تقریب می‌زنیم، با تعریف Δ به صورت زیر:

$$\Delta = m_2 - m_1 \quad (\text{ب-۱۷})$$

اگر این عبارت تقریبی در معادله (ب-۱۶) جایگزین شود و مساله خطی بر حسب m_2 نوشته شود، داریم:

$$U = \|\partial m_2\|^2 + \mu^{-1} \{ \|W(d - F[m_1] + J_1 m_1) - WJ_1 m_2\|^2 - \chi_*^2 \} \quad (\text{ب-۱۸})$$

در جمله دوم عبارت داخل پرانتز از جنس داده برداری است که آن را d_1 می‌نامیم، m_2 را تعریف کردیم به عنوان مدلی که U را تحت این تقریب کمینه می‌کند بنابراین با داشتن مدل تئوری خطی به صورت زیر:

$$m = [\mu \partial^T \partial + (WG)^T WG]^{-1} (WG)^T Wd \quad (\text{ب-۱۹})$$

می‌توان به مدل تئوری غیر خطی رسید:

$$m_2 = [\mu \partial^T \partial + (WJ_1)^T WJ_1]^{-1} (WJ_1)^T Wd_1 \quad (\text{ب-۲۰})$$

الگوی تکرار به این صورت است که با انتخاب مدلی به عنوان مدل اولیه، مدل بعدی به دست خواهد آمد. با داشتن مدل در مرحله تکرار K ام داریم:

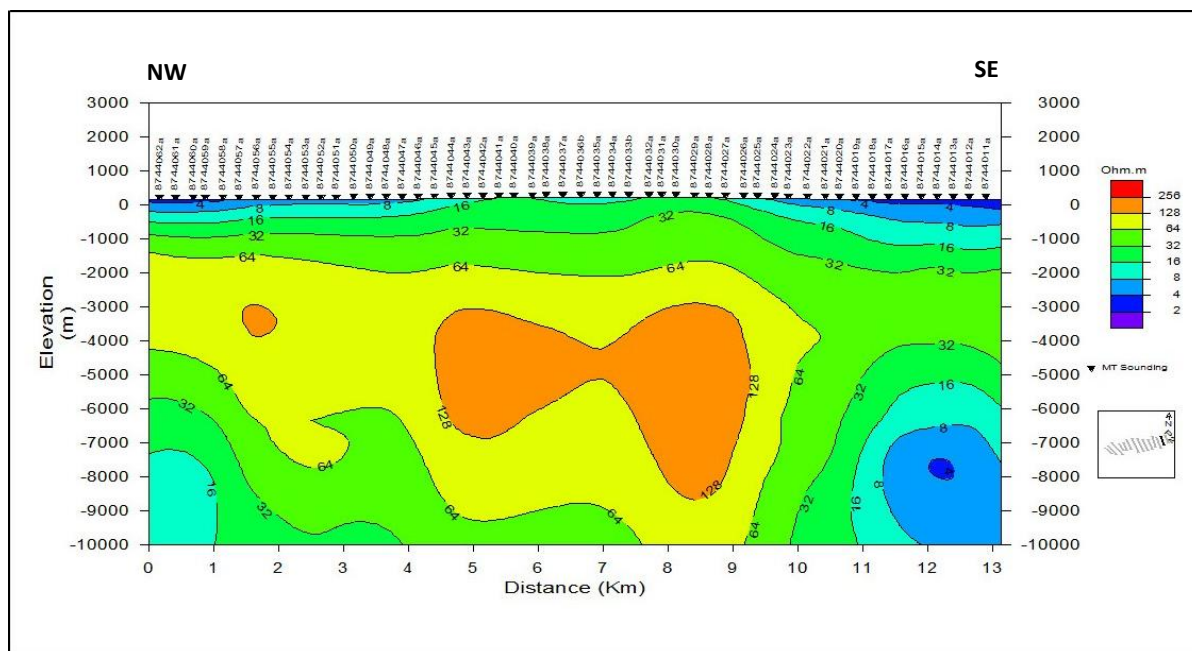
$$m_{k+1}(\mu) = [\mu \partial^T \partial + (WJ_k)^T WJ_k]^{-1} (WJ_k)^T Wd_k \quad (\text{ب-۲۱})$$

مقدار تابع عدم برازش با داشتن ضریب لاگرانژ برای مدل $K+1$ ام از رابطه زیر به دست می‌آید:

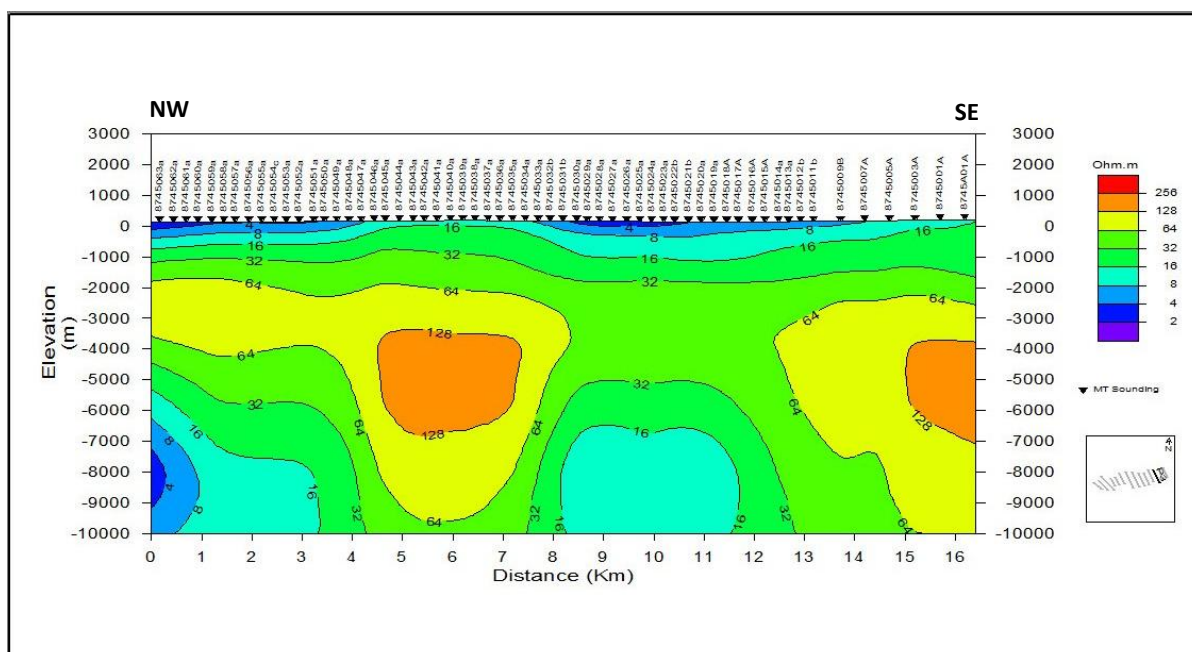
$$\chi_{k+1}(\mu) = \|Wd - WF[m_{k+1}(\mu)]\| \quad (\text{ب-۲۲})$$

در مراحل اولیه محاسبات کار اصلی کاهش تابع عدم برازش است، چون معمولاً حدس اولیه متفاوت از مدل مورد نظر است و به ازای هر مقدار از μ که انتخاب شود $\chi_k(\mu)$ بزرگتر از χ_* است. یک روش کاهش تابع عدم برازش انتخاب μ به گونه‌ای است که $\chi_k(\mu)$ کمینه شود البته هیچ ضمانتی وجود ندارد که مدل با χ_k کمینه بهتر از m_k به داده‌ها منطبق شود با این حال این الگوی تکرار رضایت بخش است. بعد از چندین

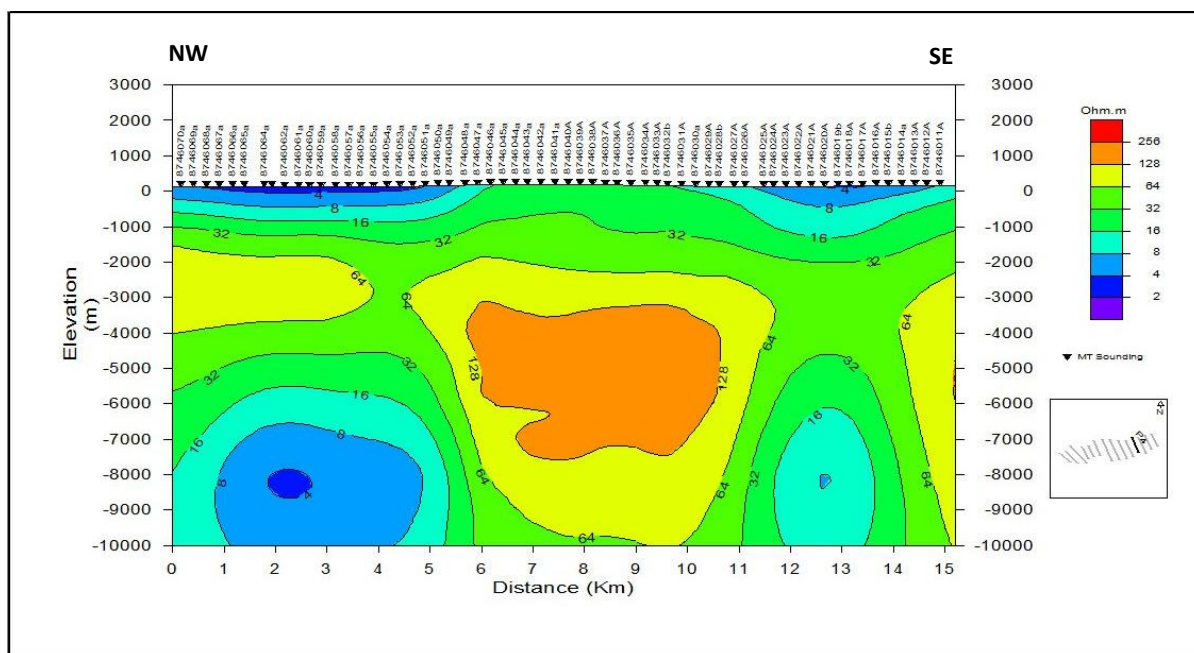
مرحله تکرار μ می‌تواند به گونه‌ای انتخاب شود که χ_k دقیقاً به χ_* منطبق باشد. در حقیقت ممکن است بیش‌تر از یک مقدار برای μ وجود داشته باشد که این شرط را برآورده کند، در این صورت آن μ را انتخاب می‌کنیم که ناهمواری را به کمترین مقدار ممکن برساند (Constable, et al., 1987).



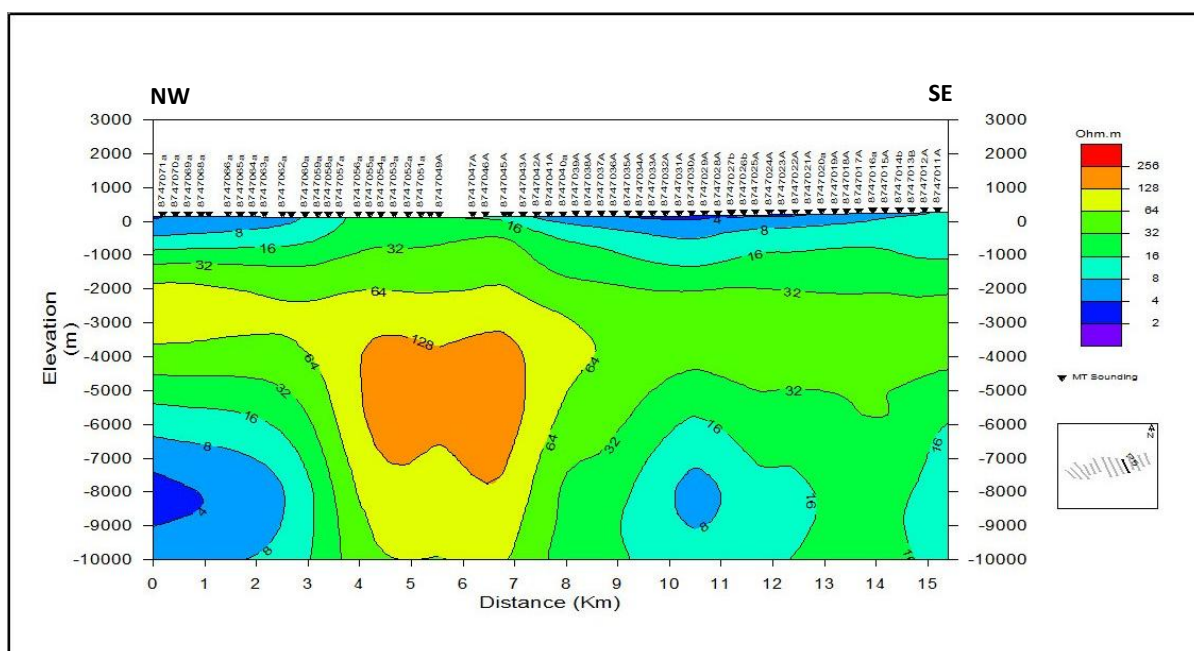
شکل ب-۱- نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P2 (مد میانگین)



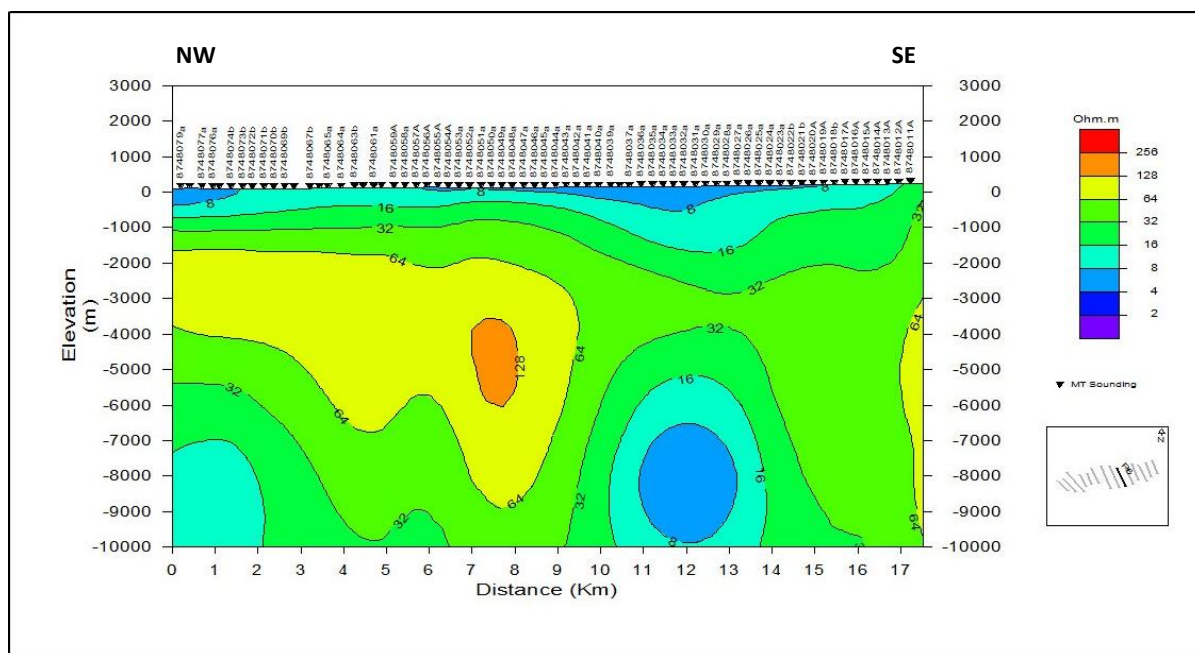
شکل ب-۲- نتیجه مدل‌سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P3 (مد میانگین)



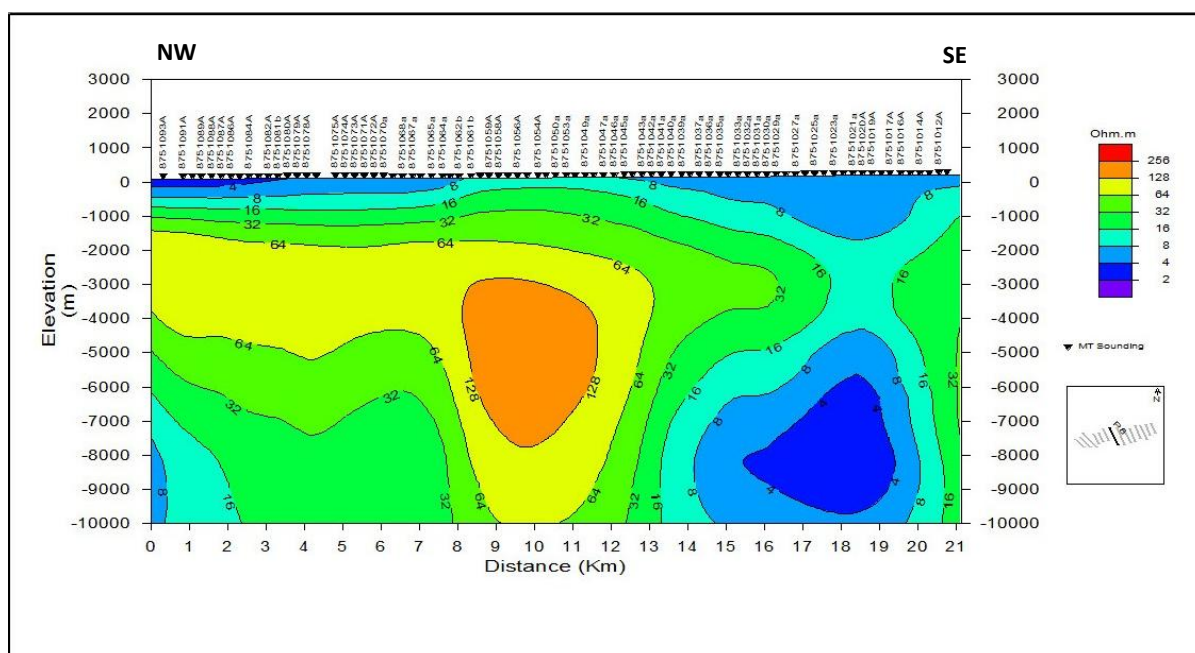
شکل ب-۳- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P4 (مد میانگین)



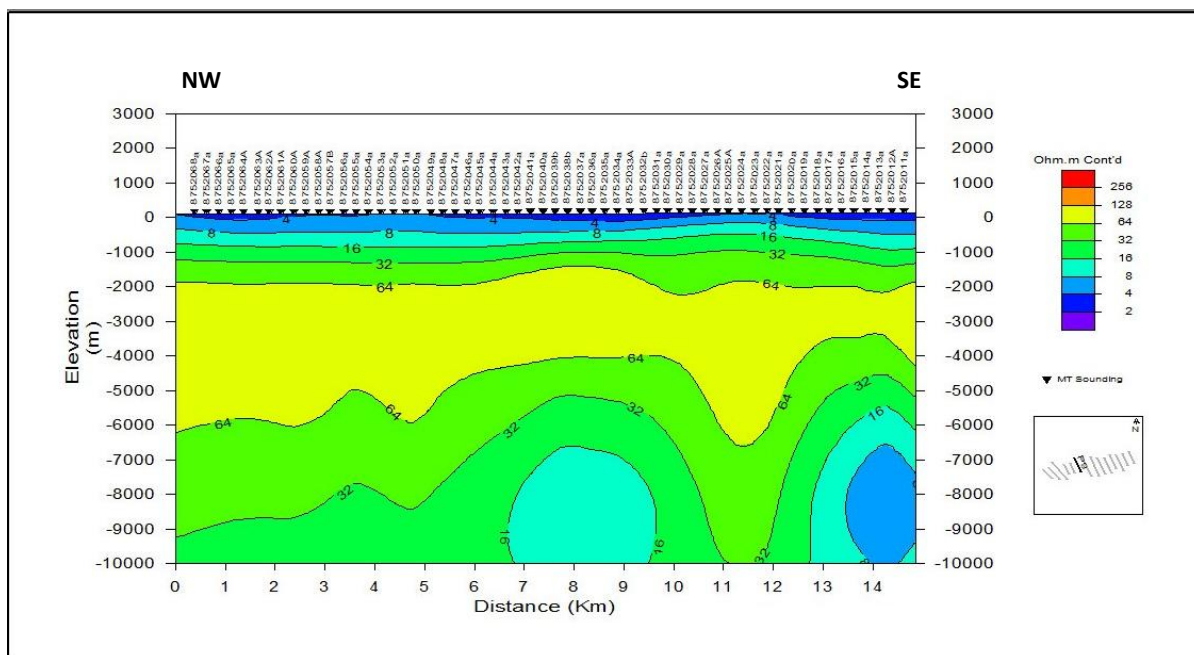
شکل ب-۴- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P5 (مد میانگین)



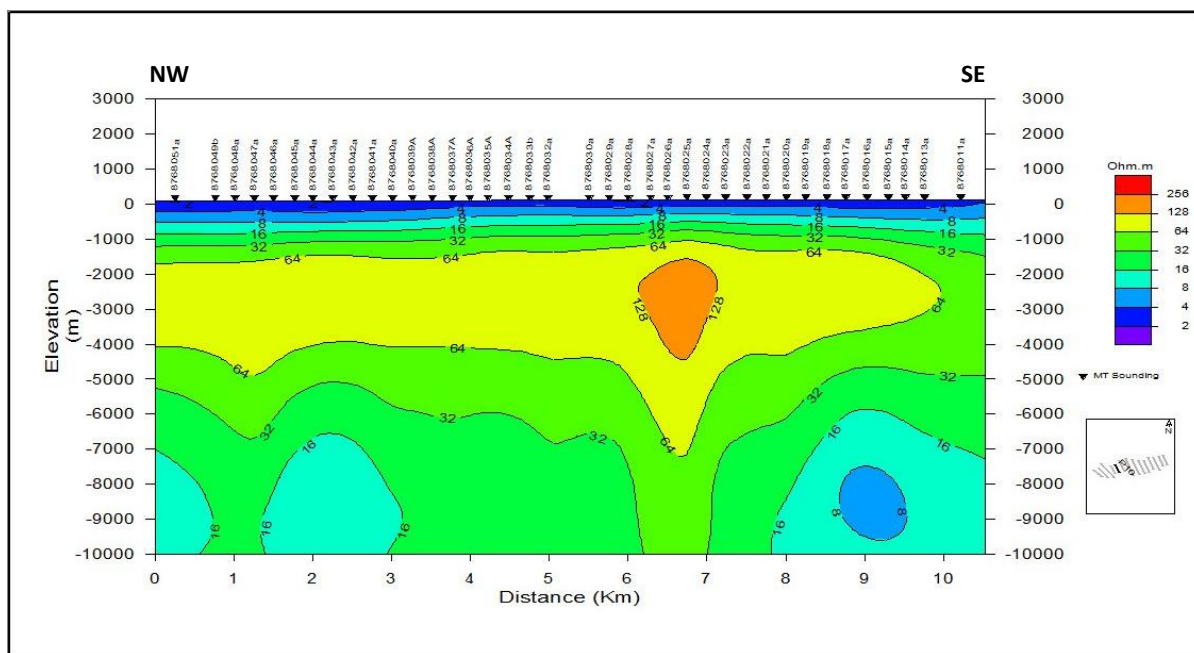
شکل ب-۵- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P6 (مد میانگین)



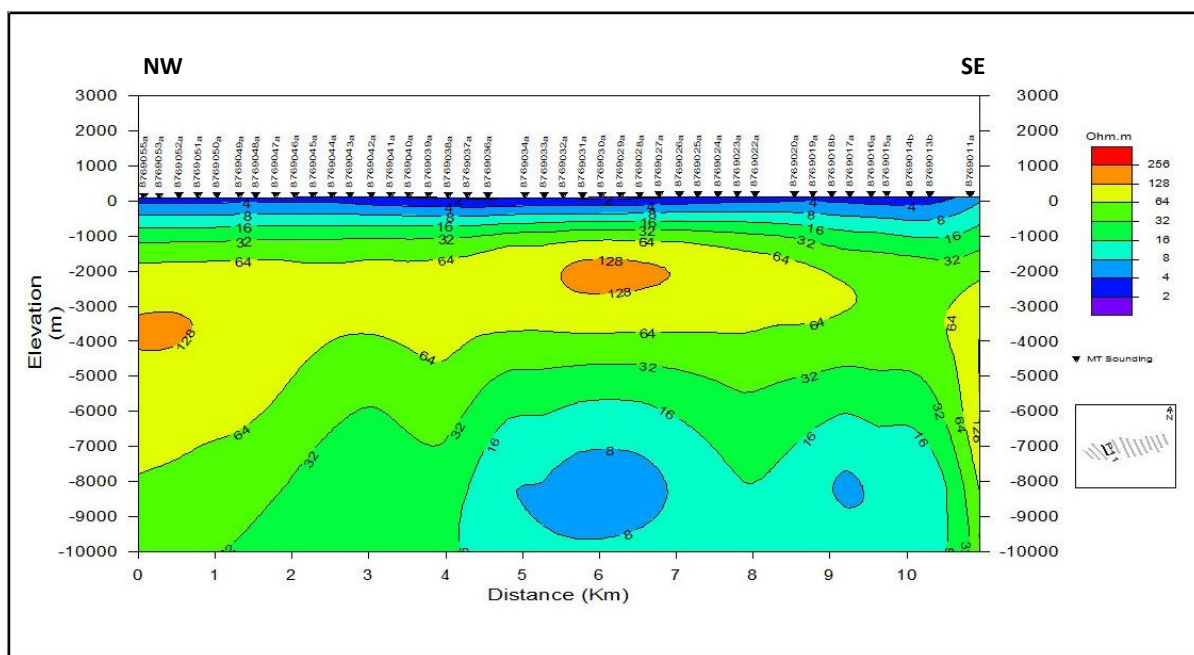
شکل ب-۶- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P8 (مد میانگین)



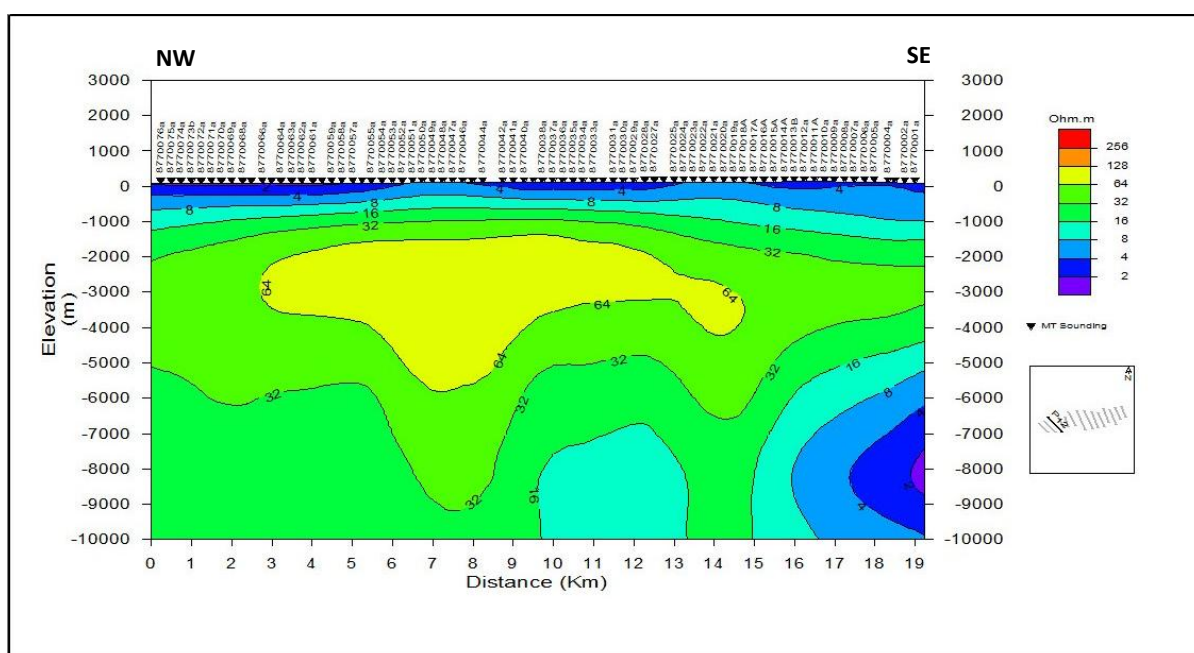
شکل ب-۷- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P9 (مد میانگین)



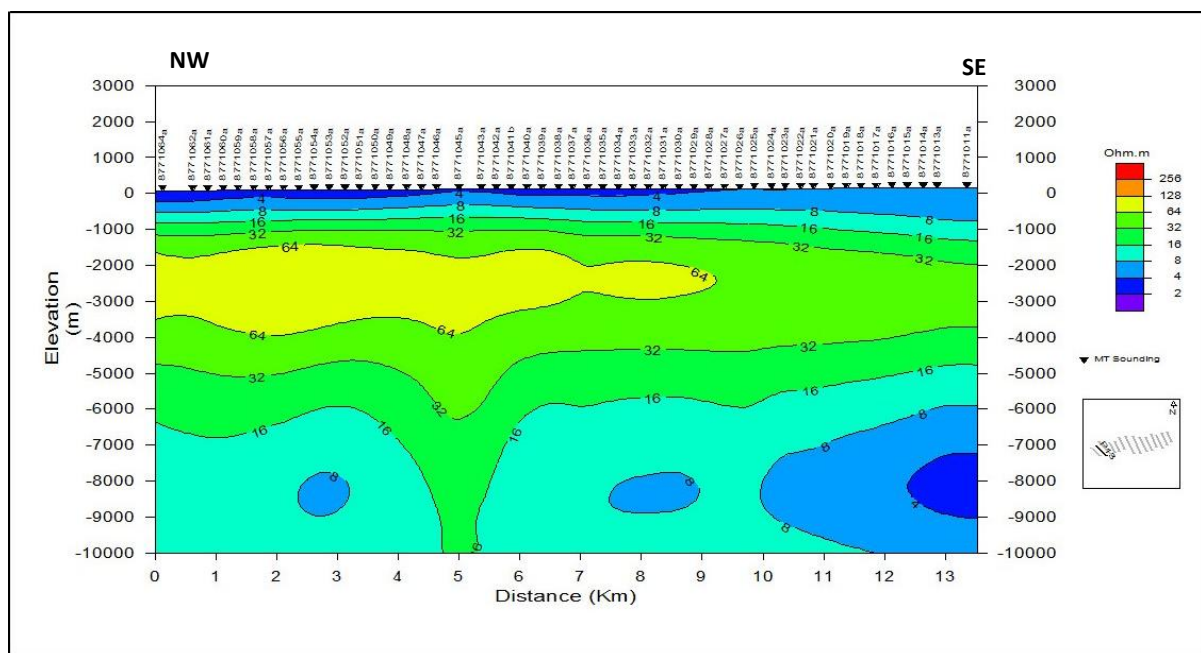
شکل ب-۸- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P10 (مد میانگین)



شکل ب-۹- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P11 (مد میانگین)



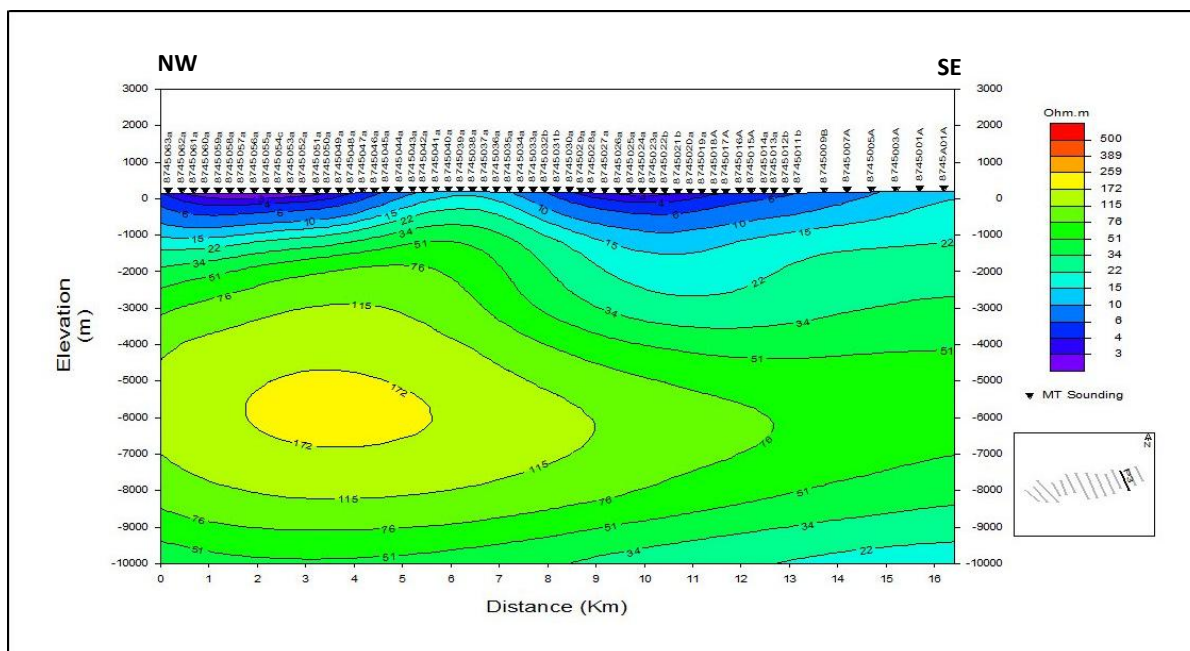
شکل ب-۱۰- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P12 (مد میانگین)



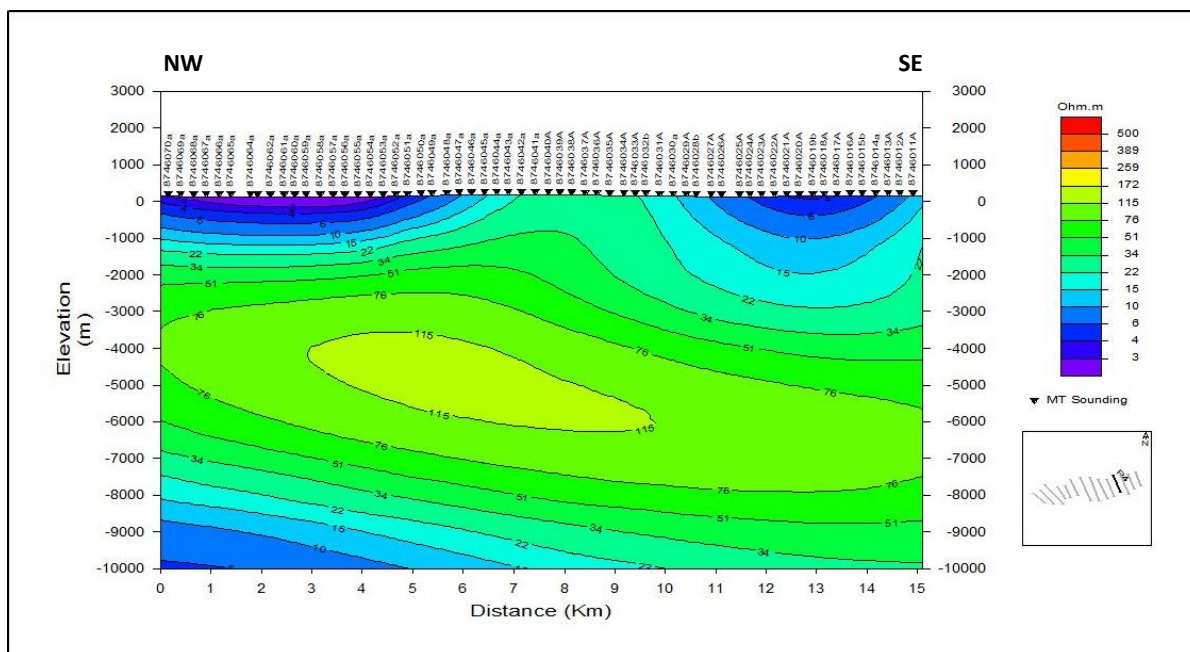
شکل ب-۱۱- نتیجه مدل سازی یک بعدی هموار اوکام برای پروفیل P13 (مد میانگین)

پیوست ج

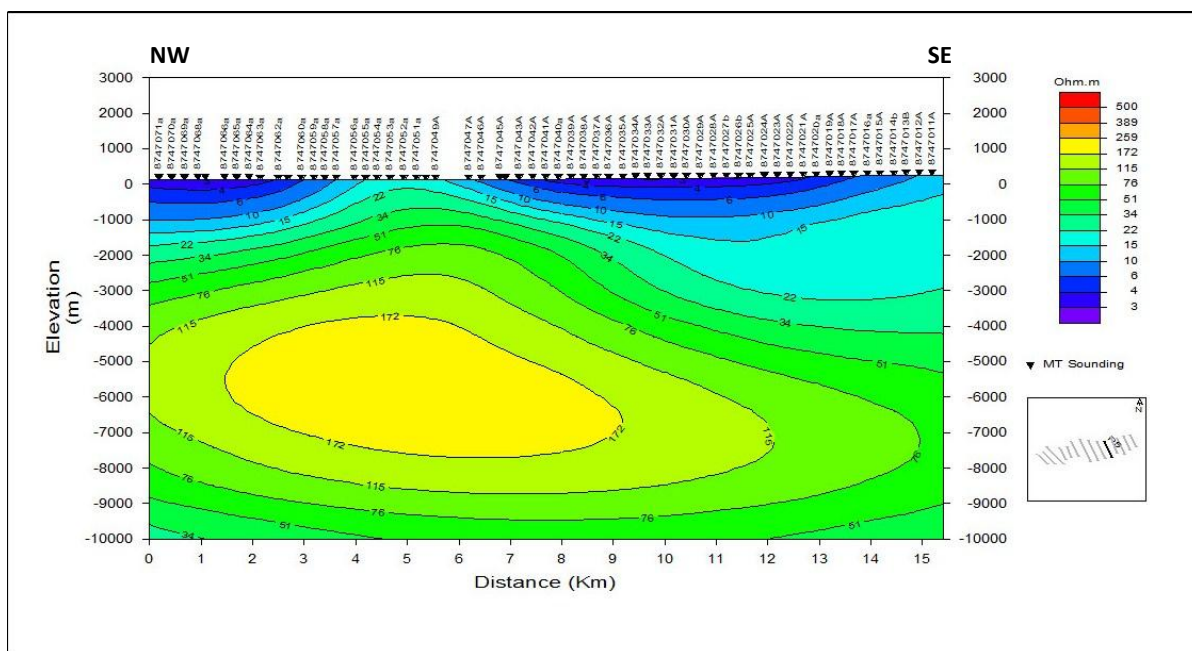
در این بخش نتایج مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل‌های P2، P3، P4، P5، P6، P8، P9، P10، P11، P12، P13 آورده شده است.



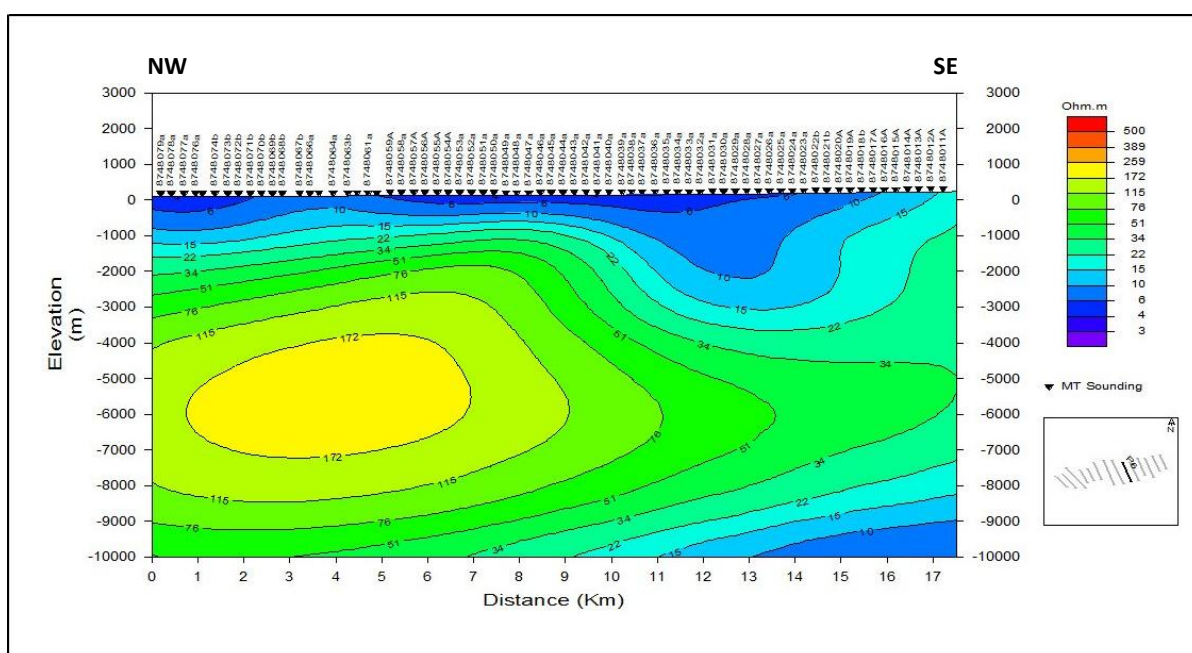
شکل ج-۱- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P3 (مد TE)



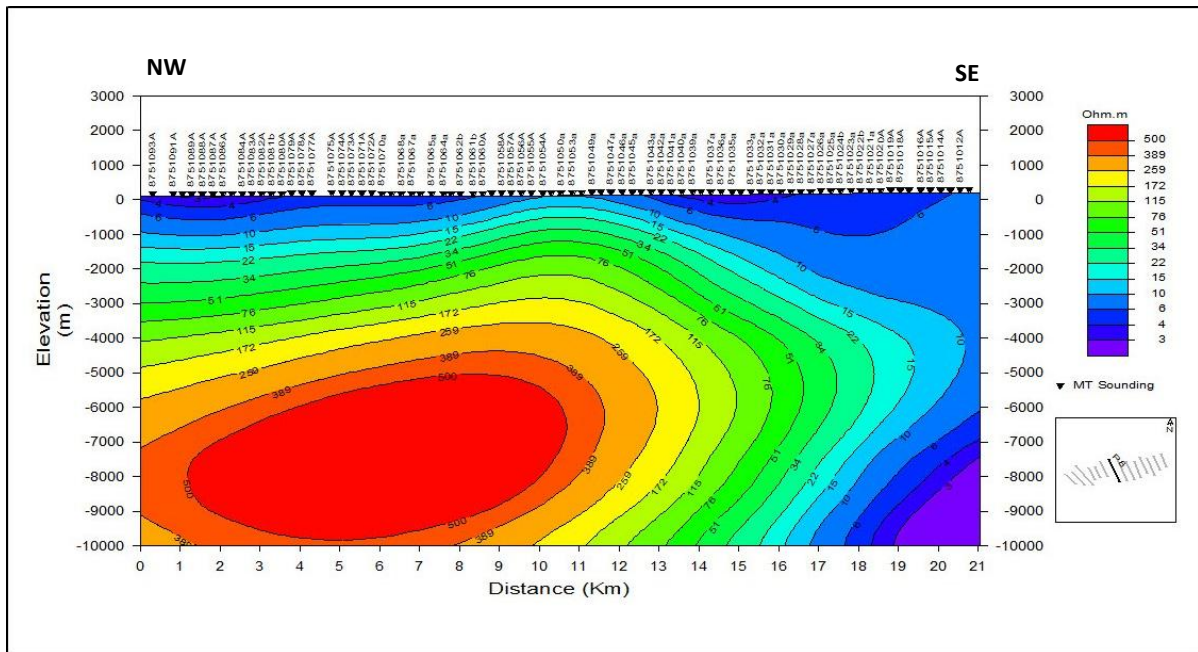
شکل ج-۲- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کنند برای پروفیل P4 (مد TE)



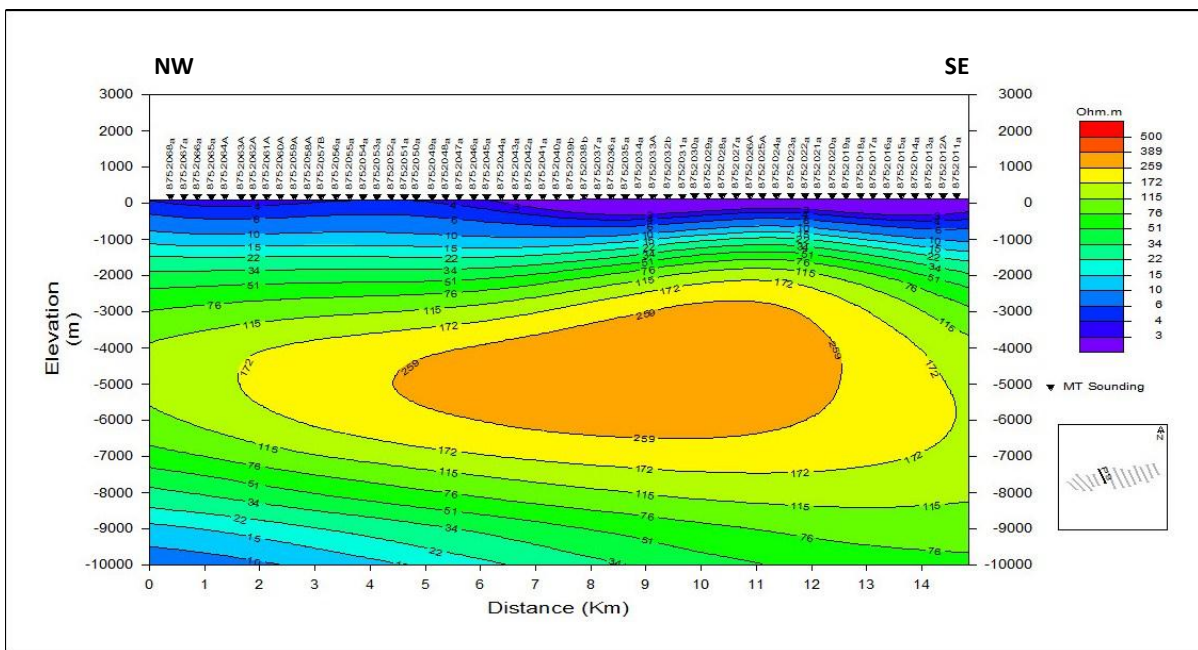
شکل ج-۳- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کرد برای پروفیل P5 (مد TE)



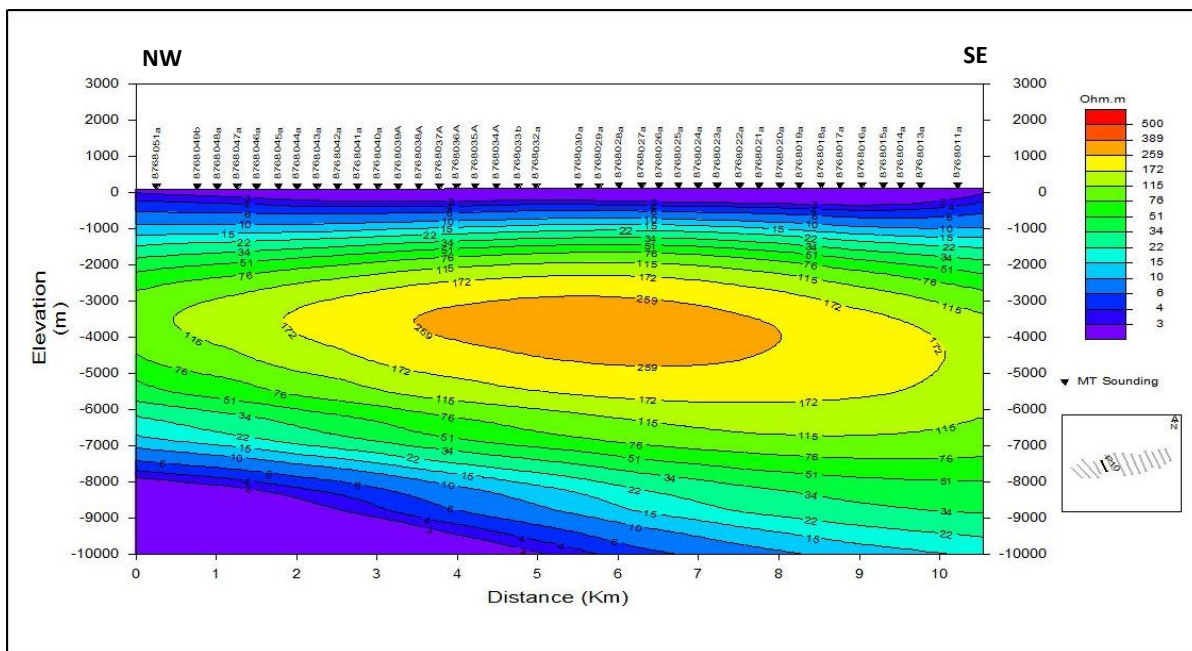
شکل ج-۴- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کرد برای پروفیل P6 (مد TE)



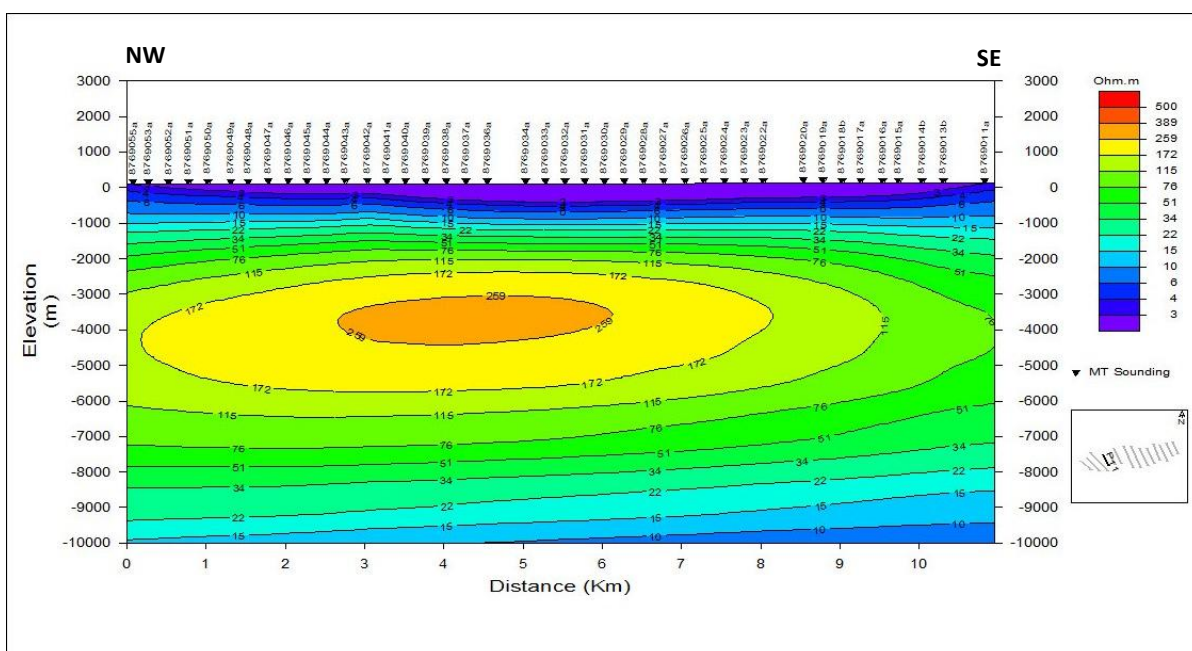
شکل ج-۵- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P8 (مد TE)



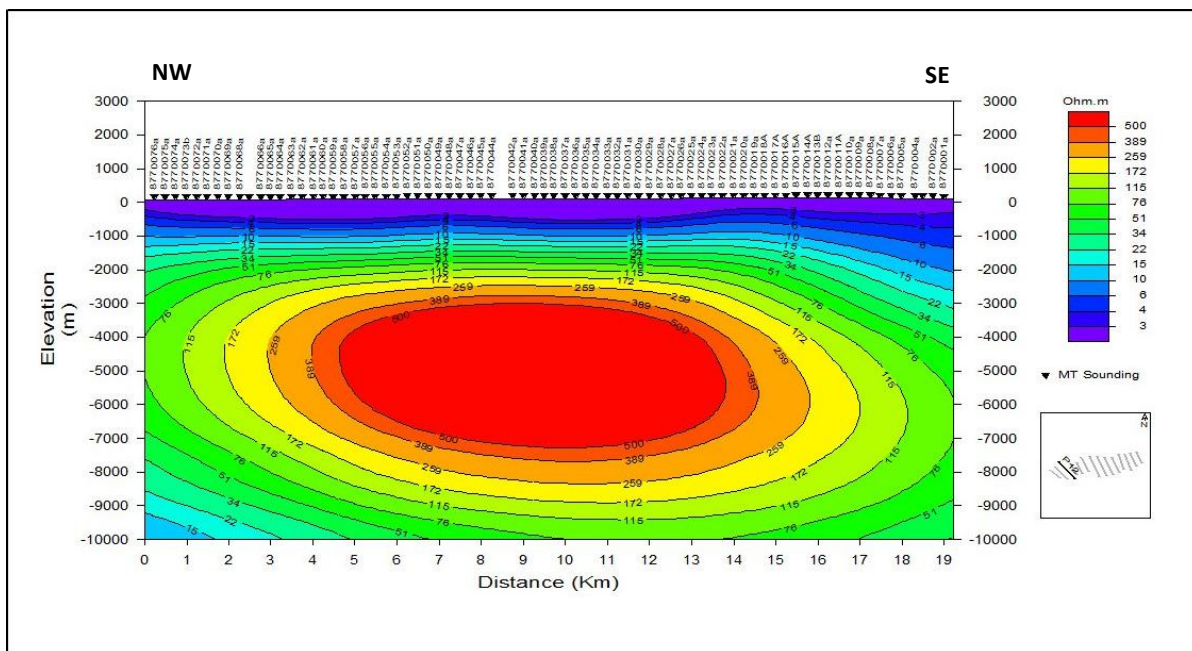
شکل ج-۶- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P9 (مد TE)



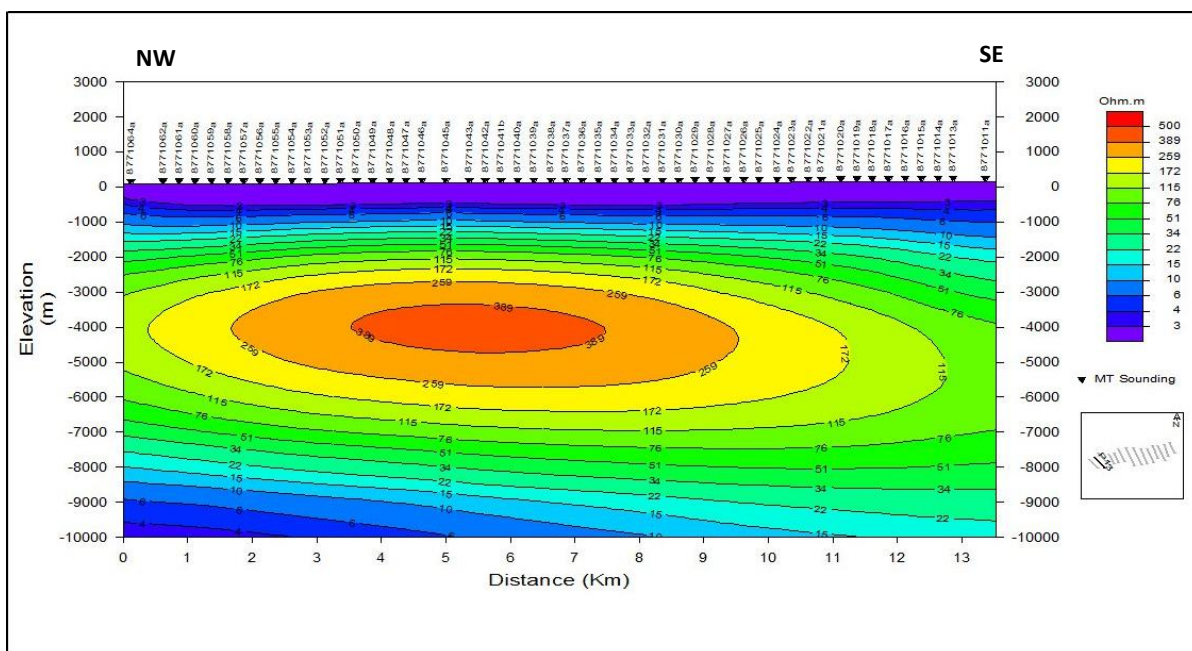
شکل ج-۷- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P10 (مد TE)



شکل ج-۸- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان‌کردن برای پروفیل P11 (مد TE)



شکل ج-۹- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کردن برای پروفیل P12 (مد TE)



شکل ج-۱۰- نتیجه مدل وارون دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک ساختمان کردن برای پروفیل P13 (مد TE)

Abstract

Magnetotelluric (MT) method is one of the electromagnetic (EM) methods with natural source that are used for exploration subsurface structures. In the last decade, electromagnetic methods and MT specially have become more widely used in hydrocarbon exploration. It has been used in overthrust zones, in area with rough topography and in sub-salt imaging that the seismic data have poor quality.

Magnetotelluric exploration was applied in Korand area, at Northeast of Iran in 2008. The aim of this research are modeling and interpretation of magnetotelluric data to detect the hydrocarbon structures and determining the lateral extension and top of Tirgan formation constitute the main reservoir rocks of this area. Then the resistivity model of magnetotelluric data is evaluated with well-log data and a seismic time section.

Also static shifts in the MT data were removed using Transient Electromagnetic (TEM) data before MT data inversion. The one and two-dimensional inversion models imaged the layered and folding structure for Eastern Profiles and smooth structure without significant folding for Western Profiles. The results of 2-D inversion model, geology information, seismic data and resistivity log were determined the roof of resistive layer which is the top of Tirgan formation that is located at the depth of 5700 meter near the P2 profile and lateral extension of this formation in Eastern Profiles is more than the Western Profiles. Also with studying of depth map, the affect of Marveh Tapeh fault in the South of the Profiles and the other fault in the North and Northeast of the Profiles was significant.

Keywords: Magnetotelluric, Inversion, Hydrocarbon structures, Korand area, Tirgan formation.



Shahrood University Of Technology

Faculty Of Mining, Petroleum and Geophysics

This thesis submitted in part fulfillment of the degree of Master in Geophysics

Inversion Of Magnetotellurics Data For Exploration Of Hydrocarbon Structures In West Kopeh Dagh Area

By:

Nazila Hashemi

Supervisors:

Prof. A. Moradzadeh

Dr. A. Nejati Kalateh

Advisors:

Eng. R. Ghaedrahmati

Eng. M. Aiobi

February 2013