

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان با نتایج تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه در منطقه دشت ساوه

نگارنده:

مصطفی خان احمدی

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علیرضا عربامیری

استاد مشاور:

مهندس احمد باقری

بهمن ماه ۱۳۹۹

شماره: ۴۶۹۴۲۵۹
تاریخ: ۹۹/۱۲/۲۸

باسمه تعالی



دانشگاه تهران
مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی خان احمدی با شماره دانشجویی ۹۶۰۵۸۹۴ رشته ژئوفیزیک گرایش ژئوالکتریک تحت عنوان ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان با نتایج تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه در منطقه دشت ساوه که در تاریخ ۹۹/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۷ ☒
 ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
 ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
 نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	مهندس احمد باقری		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد رداد	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حمید آقاجانی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی نجاتی کلاته	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی



تقدیم بہ

خانوادہ مہربان و دلسوزم

و، بچپن

اساتید بزرگوارم۔

تشکر و قدردانی

حال که به یاری پروردگار دوره کارشناسی ارشد به اتمام رسیده است بر خود لازم می‌دانم اثنان قلبی و مراتب پاس‌گزاری خود را از تمامی عزیزان و بزرگوارانی که در این پژوهش، ایجاب ریاوری نموده‌اند ابراز نمایم.

از اساتید ارجمندم، جناب دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی و جناب دکتر علیرضا عرب امیری که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را تقبل فرموده و در طول انجام این تحقیق، همواره بنده را از دانش و حمایت ایشان بهره‌مند ساخته‌اند، تشکر می‌نمایم. همچنین از مهندس احمد باقری که در تمامی مراحل انجام پایان‌نامه به عنوان مشاور، ایجاب ریاوری نموده‌اند، کمال تشکر را دارم. از عوامل سازمان آب منطقه‌ای استان مرکزی که حداقل امکان‌ها را در اختیار قرار دادند و داده‌های مورد نیاز، ایجاب را در انجام این تحقیق یاری نمودند، تقدیر و تشکر می‌نمایم. از مسئولین محترم دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک از جمله آقایان علی اکبر رجبی، حسین شاه‌حسینی نهایت قدردانی را دارم. از دوستان خوب و هم‌کلاسی‌های عزیزم و همچنین از خانم مهندس ولی‌خانی صمیمانه تشکر می‌کنم و برای بکلی آرزوی موفقیت دارم.

در پایان از خانواده بزرگوارم که در تمامی مراحل تحصیل پشتیبان بنده بوده‌اند، سپاسگزارم.

تعمدنامه

اینجانب **مصطفی خان احمدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان با نتایج تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه در منطقه دشت ساوه تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عربامیری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای 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 آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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

بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، برای رفع نیازهای روزمره، به گذشته‌های دور برمی‌گردد. امروزه با استفاده از مطالعات مقاومت‌ویژه الکتریکی که در سطح زمین انجام می‌گیرد، با هزینه‌ای نسبتاً کم و سریع، می‌توان به اطلاعات مفیدی در مورد منابع آب‌های زیرزمینی رسید. در عملیات صحرایی مربوط به این پایان‌نامه حدود ۲۰۰ سونداژ الکتریکی به‌منظور بررسی کمی و کیفی منابع آب‌های زیرزمینی در منطقه دشت ساوه در طول ۲۷ پروفیل تقریباً موازی و در امتداد شمالی- جنوبی برداشت شده‌اند؛ که تا بلندی‌های اطراف دشت گسترش پیدا کرده‌اند. تفسیر سونداژهای مقاومت‌ویژه برداشت شده ابتدا با استفاده از منحنی‌های استاندارد و به صورت یک‌بعدی با استفاده از نرم‌افزارهای **IX1D** و **IPI2WIN** و سپس به‌صورت دوبعدی با استفاده از نرم‌افزارهای **RES2DINV** و **ZONDRES2D** صورت گرفته است. از اطلاعات چاه‌های پی‌زومتر موجود در دشت مذکور برای دستیابی به تفسیر بهتر استفاده شد و در نتیجه مقاومت‌ویژه، عمق و ضخامت لایه آبدار در دشت مورد مطالعه مشخص شد. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که بخش‌های مرکزی دشت به لحاظ هیدرولوژیکی حائز اهمیت بیشتری هستند؛ زیرا عمق سطح ایستابی در این مناطق نسبتاً کم است و مقاومت‌ویژه بالاتر آب زیرزمینی در این بخش‌ها نشان‌دهنده کیفیت مناسب‌تر آب زیرزمینی، خصوصاً در مناطق نزدیک به جنوب دشت می‌باشد. هرچه به سمت شرق این دشت پیش می‌رویم، عمق سطح ایستابی کمتر می‌شود.

تعیین مشخصات کیفی آب زیرزمینی، یعنی ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آن، نشان خواهد داد که تا چه حد برای مصرف موردنظر مناسب است. ماهیت این مشخصات به‌گونه‌ای است که روی اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی آبخوان تأثیر می‌گذارند. از آن‌جا که یکی از اهداف این پژوهش تعیین ارتباط بین تغییرات هیدروژئوشیمیایی و نتایج حاصل از مدل‌سازی و تفسیر سونداژهای الکتریکی است، از روش رگرسیون خطی برای تعیین مقدار ارتباط بین اطلاعات هیدروژئوشیمیایی که شامل هدایت الکتریکی (**EC**) و کل مواد جامد حل‌شده (**TDS**) حاصل از چاه‌ها و نتایج تفسیر ۶ سونداژ مقاومت‌ویژه الکتریکی که در مجاورت این چاه‌ها قرار دارند استفاده شده است. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که با افزایش غلظت یون‌ها در آب‌های زیرزمینی، مقاومت‌ویژه لایه آبدار شدیداً کاهش می‌یابد. در بین نمودارهای ارائه شده، آن‌هایی که از منحنی نمایی برای برازش نقاط استفاده شده، ضریب همبستگی بالاتری داشت. این می‌تواند نشان‌دهنده ارتباط منحنی گونه یا غیر خطی بین پارامترهای هیدروژئوشیمیایی و مقاومت‌ویژه لایه آبدار باشد. علاوه بر داده‌های هیدروژئوشیمیایی، از پارامترهای هیدرولیکی مانند هدایت هیدرولیکی (**K**) و ضریب گذردهی یا قابلیت انتقال (**T**) سه حلقه چاه در مجاورت سه سونداژ نیز استفاده گردید؛ بین مقاومت‌ویژه لایه آبدار و هدایت هیدرولیکی رابطه همبستگی خطی تعیین گردید و همچنین بین

مقاومت ویژه لایه آبدار و ضریب قابلیت انتقال رابطه همبستگی لگاریتمی برقرار شد. علی‌رغم به‌دست آمدن نتایج همبستگی خوب بین پارامترهای هیدرولیکی و مقاومت ویژه الکتریکی، به علت کم بودن تعداد چاه‌ها و در نتیجه، کم بودن تعداد داده‌ها، روابط همبستگی به‌دست آمده از اعتبار چندان بالایی برخوردار نیستند.

کلمات کلیدی: سونداژ، مقاومت ویژه، هیدروژئوشیمیایی، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد (TDS)، هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب قابلیت انتقال (T)، دشت ساوه

فهرست مطالب

ل	فهرست اشکال
س	فهرست جداول
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ سابقه موضوع مورد مطالعه.....
۴	۱-۲-۱ روش انجام تحقیق.....
۵	۳-۱ ضرورت و هدف از این مطالعه.....
۶	۴-۱ ساختار پایان نامه.....
۹	فصل ۲: مبانی تحقیق
۱۰	۱-۲ مقدمه.....
۱۰	۲-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی.....
۱۰	۱-۲-۲ روش اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین.....
۱۲	۲-۲-۲ انواع آرایه (آرایش) های اندازه گیری مقاومت ویژه زمین.....
۱۳	۳-۲-۲ سونداژ زنی مقاومت ویژه.....
۱۵	۴-۲-۲ محاسن آرایش شلومبرژه.....
۱۶	۵-۲-۲ نحوه بررسی داده های سونداژ مقاومت ویژه.....
۱۷	۶-۲-۲ پارامترهای ژئوالکتریکی.....
۱۷	۳-۲ مقاومت ویژه الکتریکی سنگ ها.....

۲-۴ تجزیه، تحلیل و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی..... ۲۰

۲-۴-۱ مقاومت ویژه ظاهری..... ۲۰

۲-۴-۲ مدل سازی..... ۲۱

۲-۴-۳ یکتایی..... ۲۱

۲-۵ مفاهیم و اصطلاحات هیدروژئولوژی..... ۲۲

۲-۵-۱ تقسیم‌بندی سازندهای زمین‌شناسی از نظر آب‌شناسی (براساس تراوایی)..... ۲۲

۲-۵-۲ هدایت هیدرولیکی (K)..... ۲۳

۲-۶ خواص فیزیکوشیمیایی آب‌های زیرزمینی..... ۲۴

۲-۶-۱ هدایت الکتریکی (EC) آب..... ۲۴

۲-۶-۲ تعیین مقدار کل مواد جامد حل‌شده..... ۲۵

۲-۶-۳ منشأ شوری در آب‌های زیرزمینی..... ۲۶

۲-۷ روش‌های الکتریکی به‌منظور مطالعه آب‌های زیرزمینی..... ۲۶

۲-۸ ارتباط بین پارامترهای آب و مقاومت ویژه الکتریکی..... ۲۸

فصل ۳: زمین‌شناسی منطقه و عملیات صحرائی ۳۳

۳-۱ مقدمه..... ۳۴

۳-۲ مسیر دسترسی..... ۳۴

۳-۳ زمین‌شناسی منطقه..... ۳۵

۳-۳-۱ واحدهای زمین‌شناسی منطقه..... ۳۷

۳-۳-۲ گسل‌های منطقه..... ۳۹

۳-۴ عملیات صحرائی..... ۳۹

فصل ۴: مدل سازی و تفسیر یک بعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی ۴۳

۴-۱ مقدمه ۴۴

۴-۲ مدل سازی داده های مقاومت ویژه الکتریکی ۴۴

۴-۳ تفسیر کیفی سونداژهای الکتریکی ۴۵

۴-۴ تفسیر کمی سونداژهای الکتریکی ۴۵

۴-۵ مدل سازی و تفسیر سونداژهای محدوده مطالعاتی ۴۶

۴-۵-۱ مدل سازی و تفسیر یک بعدی سونداژ 49F با نرم افزار IX1D ۴۷

۴-۵-۲ مدل سازی و تفسیر یک بعدی سونداژ 323O با نرم افزار IX1D ۵۲

۴-۵-۳ مدل سازی و تفسیر یک بعدی سونداژ 49F با استفاده از نرم افزار IPI2WIN ۵۷

۴-۵-۴ مدل سازی و تفسیر یک بعدی سونداژ 323O با استفاده از نرم افزار IPI2WIN ۵۹

فصل ۵: مدل سازی و تفسیر دوبعدی سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی در دشت ۶۳

مورد مطالعه

۵-۱ مقدمه ۶۴

۵-۲ تفسیر دوبعدی داده های مقاومت ویژه به روش سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته ... ۶۴

۵-۳ مدل سازی و تفسیر دوبعدی داده های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی با نرم افزارهای

Res2Dinv و ZondRes2D ۶۵

۵-۳-۱ نتایج حاصل از مدل سازی و تفسیر پروفیل F ۶۶

۵-۳-۲ نتایج حاصل از مدل سازی و تفسیر پروفیل ZA(AB) ۶۹

۵-۳-۳ نتایج حاصل از مدل سازی و تفسیر پروفیل L(H) ۷۲

۵-۴ نتیجه گیری ۷۶

فصل ۶: تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به دست آمده از چاه‌ها	۷۹
۶-۱ مقدمه	۸۰
۶-۲ روش آماری رگرسیون	۸۰
۶-۳ تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر یک‌بعدی داده‌های سونداژ الکتریکی و پارامترهای هیدروژئوشیمیایی چاه‌های آب	۸۲
۶-۳-۱ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و EC	۸۴
۶-۳-۲ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و TDS	۸۶
۶-۴ تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر یک‌بعدی داده‌های سونداژ الکتریکی و پارامترهای هیدرولیکی چاه‌های آب	۸۸
۶-۴-۱ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و K	۸۹
۶-۴-۲ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و T	۹۰
۶-۵ نتیجه‌گیری	۹۱
فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۹۳
۷-۱ نتیجه‌گیری	۹۴
۷-۲ پیشنهادها	۹۵
مراجع	۹۷
پیوست	۱۰۲

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): نحوه اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی ۱۱
- شکل (۲-۲): آرایه‌های معمول مورد استفاده در اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و فاکتور هندسی آن‌ها ۱۳
- شکل (۳-۲): خطوط جریان و سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی برای آرایش الکترودی متقارن شلومبرژه ۱۴
- شکل (۴-۲): رابطه همبستگی بین مقاومت‌ویژه آبخوان و TDS در منطقه کراچی پاکستان ۲۹
- شکل (۵-۲): رابطه همبستگی بین مقاومت‌ویژه زمین و TDS در دلتای رود نیل ۲۹
- شکل (۶-۲): رابطه همبستگی بین TDS و مقاومت‌ویژه لایه آبدار ۳۰
- شکل (۷-۲): رابطه همبستگی بین TDS و مقاومت‌ویژه آب زیرزمینی ۳۱
- شکل (۱-۳): مسیر دسترسی به منطقه مورد مطالعه ۳۴
- شکل (۲-۳): نقشه زمین‌شناسی منطقه برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ قم و همچنین موقعیت سونداژها ۳۶
- شکل (۳-۳): موقعیت سونداژها (⊙)، پیزومترها (★) و داده‌های هیدروژئوشیمیایی (■) ۴۲
- شکل (۱-۴): مشخصات مدل اولیه (ورودی نرم‌افزار IX1D) حاصل از تفسیر سونداژ 49F توسط منحنی‌های استاندارد ۴۹
- شکل (۲-۴): مدل اولیه (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل اولیه بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 49F (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D ۵۰
- شکل (۳-۴): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک‌بعدی داده‌های سونداژ 49F، پس از اعمال یک مرحله وارون‌سازی در نرم‌افزار IX1D ۵۱
- شکل (۴-۴): مدل به‌دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 49F پس از یک مرحله وارون‌سازی (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D ۵۱
- شکل (۵-۴): مشخصات مدل اولیه (ورودی نرم‌افزار IX1D) حاصل از تفسیر سونداژ 323O توسط منحنی‌های استاندارد ۵۴

شکل (۴-۶): مدل اولیه (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل اولیه بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 3230 (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D ۵۵

شکل (۴-۷): مشخصات مدل حاصل از مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های سونداژ 3230، پس از اعمال یک مرحله وارون‌سازی در نرم‌افزار IX1D ۵۶

شکل (۴-۸): مدل به‌دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 3230 پس از یک مرحله وارون‌سازی (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D ۵۶

شکل (۴-۹): مشخصات مدل وارون حاصل از وارون‌سازی داده‌های سونداژ 49F به وسیله نرم‌افزار IPI2WIN ۵۸

شکل (۴-۱۰): مدل وارون (آبی)، منحنی حاصل از مدل وارون (قرمز) و داده‌های صحرایی حاصل از سونداژ 49F (مشکی) به وسیله نرم‌افزار IPI2WIN ۵۸

شکل (۴-۱۱): مشخصات مدل وارون حاصل از وارون‌سازی داده‌های سونداژ 3230 به وسیله نرم‌افزار IPI2WIN ۵۹

شکل (۴-۱۲): مدل وارون (آبی)، منحنی حاصل از مدل وارون (قرمز) و داده‌های صحرایی حاصل از سونداژ 3230 (مشکی) به وسیله نرم‌افزار IPI2WIN ۶۰

شکل (۵-۱): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل F که با استفاده از نرم‌افزار Res2Dinv به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است) ۶۷

شکل (۵-۲): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل F که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است) ۶۸

شکل (۵-۳): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل ZA(AB) که با استفاده از نرم‌افزار Res2Dinv به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است) ۷۰

شکل (۵-۴): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل ZA(AB) که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است) ۷۱

شکل (۵-۵): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل L(H) که با استفاده از نرم‌افزار Res2Dinv به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است) ۷۴

شکل (۵-۶): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل L(H) که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است) ۷۵

- شکل (۷-۵): مقطع لایه‌ای پروفیل $L(H)$ ۷۶
- شکل (۱-۶): نمودار تابع خطی ساده بر حسب X و Y ۸۱
- شکل (۲-۶): موقعیت سونداژها (●) و همچنین چاه‌های دارای داده‌های هیدروشیمیایی (■) و هیدرولیکی (★) نسبت به هم در منطقه مورد مطالعه ۸۳
- شکل (۳-۶): رابطه همبستگی خطی بین ρ و EC آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶) ۸۵
- شکل (۴-۶): رابطه همبستگی نمایی بین ρ و EC آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶) ۸۶
- شکل (۵-۶): رابطه همبستگی خطی بین ρ و TDS آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶) ۸۷
- شکل (۶-۶): رابطه همبستگی نمایی بین ρ و TDS آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶) ۸۸
- شکل (۷-۶): رابطه همبستگی خطی بین ρ و K آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۲-۶) ۸۹
- شکل (۸-۶): رابطه همبستگی درجه دو بین ρ و T آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۲-۶) ۹۰

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): مقاومت ویژه الکتریکی برخی از انواع آب و سنگ ۱۸
- جدول (۲-۲): مقادیر عددی تخلخل و هدایت هیدرولیکی برای انواع مختلف خاک‌ها و سنگ‌ها ۲۳
- جدول (۳-۲): مقادیر عددی مقاومت ویژه، هدایت ویژه و شوری برای انواع مختلف آب‌ها ۲۵
- جدول (۴-۲): گستره تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بعضی از رسوبات و سنگ‌های رسوبی ۲۷
- جدول (۱-۳): معرفی خطوط برداشت ۴۰
- جدول (۱-۴): داده‌های سونداژ 49F ۴۸
- جدول (۲-۴): داده‌های سونداژ 323O ۵۲
- جدول (۳-۴): مقایسه نتایج سونداژهای 49F و 323O ۶۱
- جدول (۴-۴): خطای نسبی تخمین سطح ایستابی حاصل از تفسیر ۵ سونداژ الکتریکی مجاور چاه‌های آب در دشت مورد مطالعه ۶۱
- جدول (۱-۶): اطلاعات هیدروشیمیایی چاه‌ها و سونداژهای مجاور آنها در منطقه مورد مطالعه ۸۴
- جدول (۲-۶): اطلاعات هیدرولیکی چاه‌ها و سونداژهای مجاور ۸۹

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

آب زیرزمینی آبی است که در زیر سطح زمین و زیر سطح ایستابی قرار دارد و از تونل‌ها، چاه‌ها و گالری‌های زه‌کشی استحصال می‌شود. علاوه بر این‌ها آب‌های زیرزمینی به‌طور طبیعی نیز به سطح زمین به‌صورت چشمه‌ها و... جریان می‌یابند. در گذشته، آب‌های زیرزمینی یکی از مهمترین منابع تأمین آب برای انسان بوده‌اند. با توجه به محدود و تجدیدپذیر بودن منابع آب‌های زیرزمینی، باید در بهره‌برداری از آن‌ها مدبرانه عمل کرد و از آن‌ها در مقابل آلودگی به‌وسیله آب آلوده و یا مواد آلوده‌کننده و همچنین استخراج بی‌رویه حفاظت نمود [صفوی، ۱۳۸۷].

آب زیرزمینی یکی از منابع تأمین آب شیرین مورد نیاز انسان‌ها است. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، برای مصارفی از قبیل: شرب، صنعت و کشاورزی بسیار توسعه یافته است [صدقت، ۱۳۸۷]. کشور ایران در منطقه‌ای با اقلیم خشک واقع شده، سطح قابل توجهی از آن را زمین‌های شور تشکیل می‌دهند و همچنین آب بسیاری از رودخانه‌های دائمی، فصلی و موقتی آن شور است. علاوه بر این در اکثر نقاط کشور آب زیرزمینی دارای املاح زیاد است. طبیعتاً فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی کشور، به آب شیرین شرب و قابل مصرف در صنعت و کشاورزی نیاز دارند. به توجه به این که امکان دسترسی به آب شیرین طبیعی در همه نقاط کشور به اندازه مورد نیاز وجود ندارد و در برخی از نقاط کمیاب است؛ باید از روش‌های متنوع برای اکتشاف و شناسایی نوع سفره‌ها استفاده کرد [لطیف کار و همکاران، ۱۳۹۳].

حال باید به دنبال راهی برای دستیابی به آب شرب با کیفیت مطلوب بود. حفر چاه مستلزم صرف هزینه گزافی است. بنابراین باید قبل از آن مناسب‌ترین مکان را یافت؛ تا بتوان در کمترین عمق به بالاترین میزان آب دست یافت.

در مقایسه با روش‌های حفاری و یا بسیاری از دیگر روش‌های اکتشاف آب زیرزمینی، روش مقاومت‌ویژه الکتریکی باعث کاهش قابل توجه هزینه‌ها می‌شود. این روش ضمن بررسی و اکتشاف آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ای وسیع با هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به روش حفاری، اطلاعات پیوسته و دقیقی در مقایسه با برنامه‌های حفاری فراهم می‌آورد.

روش‌های ژئوفیزیکی به‌ویژه روش مقاومت‌ویژه الکتریکی^۱، می‌تواند میزان توسعه آبخوان را مشخص کند و همچنین برای تعیین ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی در مدل‌سازی هندسه آبخوان و گسترش زیرسطحی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد [Asfahani, 2007].

۱-۲ سابقه موضوع مورد مطالعه

در بحث ارتباط بین مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی زمین و پارامترهای کیفی و هیدرولیکی آب زیرزمینی در دنیا مطالعات بسیاری انجام شده و مقالات متعددی نیز در این زمینه منتشر شده است. ازجمله این مقالات می‌توان به مقاله وایت (White, 1994) اشاره نمود؛ که توانست با تزریق نمک و روش‌های مقاومت‌ویژه سرعت و جریان آب را اندازه‌گیری و کنترل کند. همچنین تیتوف و همکاران (Titov et al, 2005) با روش‌های الکتریکی و مطالعات هیدروشیمیایی خاک‌های آلوده و آب‌های زیرزمینی آلوده به نفت را شناسایی کردند. هادلر و همکاران (Hodlur et al, 2006) توانستند با روش مقاومت‌ویژه مرز بین آب‌شور و آب‌شیرین را تعیین کنند. اتویا و همکاران (Atwia et al, 2013) توانستند با نمونه‌برداری TDS و شوری (NaCl) از آبخوان و همچنین تطبیق ارتباط بین این دو فاکتور با سونداژ مقاومت‌ویژه مرز آب‌شور و شیرین را در منطقه‌ای از کشور مصر تعیین کنند. وینسنز (Vincenz, 1968) یک رابطه همبستگی مثبت را بین مقاومت‌ویژه سطحی اندازه‌گیری شده و میزان آبدهی چاه به‌دست آورد. آنگماخ و همکاران (Ungemach et al, 1969) بین

1- Electrical Resistivity Method

ضرایب گذردهی به دست آمده از ۶ مکان اجرای آزمون پمپاژ در آبخوان راین و مقاومت عرضی به دست آمده از آن‌ها همبستگی تعیین کرد. ویرتینگتون (Worthington, 1975) یک رابطه همبستگی معکوس بین فاکتور سازندی تصحیح شده و نفوذپذیری بین دانه‌ای یک آبخوان محاسبه نمود. اسکارسا (Scarascia, 1976) از داده‌های سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی^۱، برای تخمین ضریب گذردهی در یکی از آبخوان‌های کشور ایتالیا استفاده کرد.

در ایران نیز تحقیقات پراکنده‌ای در زمینه تعیین ارتباط بین داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پارامترهای کیفی و هیدرولیکی آب زیرزمینی انجام شده است؛ که می‌توان به پایان‌نامه کارشناسی ارشد راه‌چمنی (۱۳۹۰) با عنوان تعیین ارتباط بین تغییرات هیدروشیمیایی و مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از مدل‌سازی و تفسیر سونداژهای ژئوالکتریک آب زیرزمینی در منطقه چناران و همچنین پایان‌نامه کارشناسی ارشد پورسرداری (۱۳۹۱) تحت عنوان مدل‌سازی تفسیر سونداژهای الکتریکی به منظور اکتشاف آب زیرزمینی و تعیین ارتباط بین نتایج مدل‌سازی و تفسیر پارامترهای آب در منطقه میامی جنوبی اشاره نمود.

۱-۲-۱ روش انجام تحقیق

برای تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر داده‌های مقاومت ویژه حاصل از سونداژهای الکتریکی و پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به دست آمده از چاه‌های آب، دو هدف عمده دنبال می‌شود. ابتدا تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی صحرایی برای تعیین عمق، ضخامت و مقاومت ویژه حقیقی لایه‌های موجود در زیر هر سونداژ و تعیین عمق تقریبی آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه صورت می‌گیرد. در گام بعدی به بررسی ارتباط بین نتایج تفسیر یک‌بعدی داده‌های سونداژهای الکتریکی و پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به دست آمده از

1- Electrical Resistivity Sounding

چاه‌های آب موجود در منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. با تعمیم این رابطه در کل منطقه مورد مطالعه، می‌توان با اجرای سونداژهای الکتریکی و تعیین خواص الکتریکی لایه‌های آبدار (موجود در زیر سطح زمین در محل هر سونداژ) در نقاط فاقد چاه در منطقه مورد نظر، پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را به‌طور تقریبی تخمین زد. به این ترتیب، از صرف هزینه‌های گزاف حفاری در نقاط فاقد چاه جلوگیری به عمل می‌آید. لازم به ذکر است که هر چه تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه بیشتر باشد، تخمین به‌دست آمده از این طریق، به واقعیت نزدیک‌تر است.

۱-۳ ضرورت و هدف از این مطالعه

منابع آب زیرزمینی نقش اساسی در رشد و توسعه جوامع انسانی دارد. در مطالعه این منابع از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. روش‌های مستقیم مطالعه عبارتند از: حفر چاه‌های آب به منظور تعیین کیفیت آب به‌وسیله نمونه‌برداری و آزمایش آب چاه و همچنین بررسی تغییرات سطح ایستابی. روش‌های ژئوفیزیکی به‌خصوص روش مقاومت‌ویژه الکتریکی، یکی از بهترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌های مطالعه منابع آب زیرزمینی است. برخی موارد مهم در آبخوان^۱ عبارتند از: ابعاد آبخوان که بیانگر میزان آب موجود در آبخوان می‌باشد؛ سپس کیفیت آب را می‌توان ذکر نمود. در مرحله بعد میزان تخلخل و آب‌گذری سنگ تشکیل‌دهنده آبخوان باید مورد مطالعه قرار گیرد. مطالعات مقاومت‌ویژه الکتریکی به سادگی سطح ایستابی و همچنین موقعیت سنگ‌بستر و یا در صورت وجود آب‌شور، مرز آب‌شور و شیرین را تعیین می‌کند [مشکل‌گشا و همکاران، ۱۳۹۳].

روش مقاومت‌ویژه الکتریکی از جمله روش‌های غیرمخرب و غیرتهاجمی است؛ که به کمک آن می‌توان گستره وسیعی از اطلاعات را به‌دست آورد. به کمک روش فوق، می‌توان گسترش فضایی

1- Aquifer

وضعیت آب‌های یک منطقه و مسیر عبور آن‌ها، ساختارهای مهم زمین‌شناسی، ضخامت لایه‌ها، عمق سطح آب و عمق کف سفره در نقاط مخالف را تعیین نمود. این روش به‌عنوان روشی سریع، کم‌هزینه و با کارایی بالا برای بررسی و اکتشاف آب‌های زیرزمینی در محدوده دشت ساوه پیشنهاد شده است.

با توجه به این‌که اطلاع از پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان، بررسی کیفیت آب آبخوان را ممکن می‌سازد؛ معمولاً برای اندازه‌گیری این پارامترها در منطقه موردنظر چاه حفر می‌شود، هرچند توجه به این‌که حفر چاه باعث صرف هزینه و زمان زیادی می‌شود، امروزه برای به‌دست آوردن مقادیر تقریبی پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی در نقاط فاقد چاه در منطقه می‌توان از تعیین ارتباط بین داده‌های سونداژنی مقاومت‌ویژه الکتریکی و پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به‌دست آمده از چاه‌های آب موجود و تعمیم این رابطه در کل منطقه استفاده کرد.

۴-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل هفت فصل می‌باشد. فصل اول شامل کلیات، در فصل دوم مبانی تحقیق بیان شده‌است. فصل سوم مشخصات عمومی منطقه، نحوه برداشت داده‌ها و همچنین زمین‌شناسی منطقه آورده شده‌است. بررسی و تفسیر یک‌بعدی سونداژهای الکتریکی به‌وسیله منحنی‌های استاندارد و سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای IX1D و IPI2WIN آورده شده‌است. در فصل پنجم فرایند مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی برای روی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی با نرم‌افزارهای RES2DINV و ZONDRES2D انجام شده و مقاطع آن مورد تفسیر قرار گرفته‌است. در فصل ششم به تعیین ارتباط میان نتایج تفسیر یک‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی در مجاورت چاه‌های آب با پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی به‌دست آمده از این چاه‌ها با روش رگرسیون خطی و غیرخطی

پرداخته شده است. درنهایت در فصل هفتم نتایج به دست آمده از این تحقیق ذکر شده و

پیشنهادهایی برای مطالعه و بررسی دقیق تر ارائه گردیده است.

فصل ۲: مبانی تحقیق

۲-۱ مقدمه

به‌طور کلی روش‌های الکتریکی شامل دسته بزرگی از روش‌های ژئوفیزیکی هستند که بعضی از آن‌ها با استفاده از نشانه‌ها و سیگنال‌های طبیعی و برخی دیگر با به‌کارگیری سیگنال‌ها و یا علائم منابع فعال ساخت دست بشر و یا اصطلاحاً منابع مصنوعی عمل می‌نمایند. اساس روش‌های الکتریکی بر استفاده از اندازه‌گیری تأثیرات شارش جریان در داخل زمین می‌باشد و در این راستا پدیده‌هایی که می‌توانند اندازه‌گیری شوند، عبارتند از: جریان الکتریسیته، ولتاژ الکتریکی و میدان الکترومغناطیسی حاصل از آن [حجت، ۱۳۸۲].

۲-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی

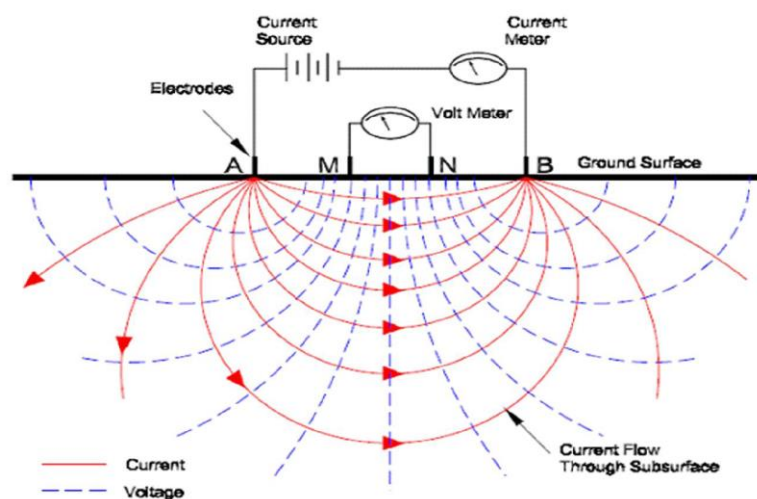
روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل قرن بیستم توسعه یافتند؛ اما از دهه ۱۹۷۰، به دلیل استفاده از رایانه برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها به‌طور گسترده‌ای در جستجوی منابع آب زیرزمینی و نیز نظارت بر انواع آلودگی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد این روش محدود به استفاده از روش جریان مستقیم (جریان متناوب بسیار کم) می‌شود [Reynolds, 2011]. روش مقاومت ویژه از سال ۱۹۶۰ میلادی به‌صورت روزمره توسط مهندسين و هیدرولوژیست‌ها برای به‌دست آوردن اطلاعات کمی آبخوان شامل: ضریب قابلیت انتقال (T)، آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی (K) استفاده شده است [Asfahani, 2007].

۲-۲-۱ روش اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین

در این روش می‌توان از طریق ارسال جریان الکتریکی مستقیم به داخل زمین و تعیین پتانسیل الکتریکی تولید شده در سطح زمین، مقاومت ویژه الکتریکی زمین را اندازه‌گیری کرد. با بهره‌گیری از

این روش‌ها، می‌توان به اطلاعاتی از خصوصیات الکتریکی زمین و در نتیجه ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه دست یافت [Corvallis, 2000].

شکل (۱-۲) به عنوان یک نمودار شماتیک اصول اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه با جریان الکتریکی مستقیم را نمایش می‌دهد. جریان الکتریکی توسط دو عدد الکترود کوتاه فلزی که الکترود جریان نامیده می‌شوند (الکترودها حدود ۳۰ سانتیمتر داخل زمین قرار گرفته‌اند)، به داخل زمین تزریق می‌شود (الکترودهای A,B). برای اندازه‌گیری ولتاژ یا پتانسیل الکتریکی تولید شده در اثر شارش جریان الکتریکی در داخل زمین از دو الکترود دیگر که الکترود پتانسیل نامیده می‌شوند (الکترودهای M,N)، استفاده می‌شود [Corvallis, 2000].



شکل (۱-۲): نحوه اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی [Corvallis, 2000].

جریان الکتریکی مستقیم، به وسیله دو الکترود جریان با فواصل الکترودی مختلف که نسبت به یک نقطه مرکزی تقارن دارند، به زمین فرستاده شده و پتانسیل الکتریکی حاصل با دو الکترود پتانسیل A و B اندازه‌گیری می‌شود. برای هر آرایش الکترودی با الکترودهای جریان A,B الکترودهای پتانسیل M,N مقاومت‌ویژه ظاهری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \frac{\Delta V}{I} \quad (1-2)$$

در این رابطه ΔV اختلاف پتانسیل الکتریکی قرائت شده (برحسب ولت)، I شدت جریان ارسالی (برحسب آمپر) و مقدار مقاومت ویژه ظاهری ρ_a (برحسب اهم متر) می باشد [Corvallis, 2000].

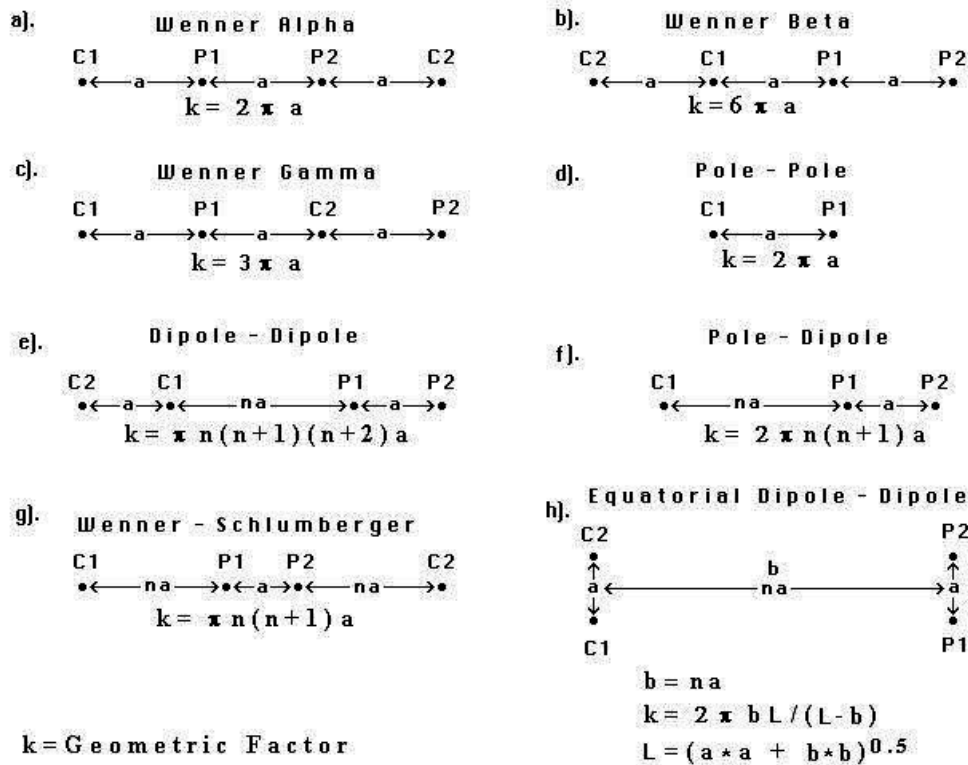
در زمین های همسانگرد و همگن، مقاومت ویژه حاصل از معادله (۱-۲)، ثابت و مستقل از فاصله الکترودی و موقعیت الکترودها در سطح زمین است. در این حالت، مقاومت ویژه به دست آمده، مقاومت ویژه واقعی یا حقیقی زمین مورد نظر می باشد. مقدار مقاومت ویژه اندازه گیری شده در صورت وجود ناهمگنی های زیرسطحی، با تغییر موقعیت الکترودها تغییر می کند. در این حالت مقادیر اندازه گیری شده، مقاومت ویژه ظاهری محسوب می شوند [Asfahani, 2007].

۲-۲-۲ انواع آرایه (آرایش) های اندازه گیری مقاومت ویژه زمین

آرایش های الکترودی به شکل های مختلفی برای برداشت مقادیر مقاومت ویژه زمین استفاده می شوند، برخی از آنها عبارتند از:

ونر (آلفا، بتا و گاما)، قطبی-قطبی، ونر-شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دو قطبی، قطبی-دوقطبی استوایی.

در شکل (۲-۲) آرایش های الکترودی، نحوه چیدمان الکترودها و همچنین فاکتور هندسی هر آرایش نمایش داده شده است [Loke, 1997, 1999, 2000].



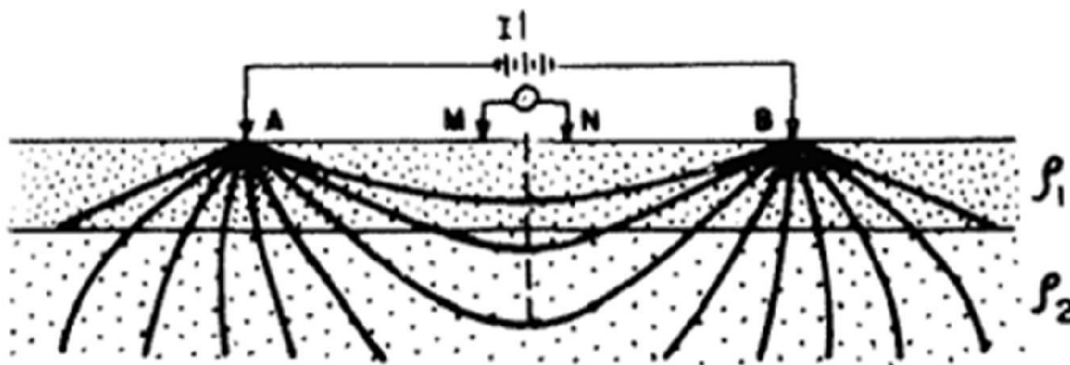
شکل (۲-۲): آرایه‌های معمول مورد استفاده در اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و فاکتور هندسی آن‌ها [Loke, 1997, 1999, 2000].

۳-۲-۲ سونداژزنی مقاومت‌ویژه

آشنایی با روش اندازه‌گیری داده‌های مقاومت‌ویژه مورد استفاده در این پایان‌نامه:

روش سونداژزنی الکتریکی شامل تزریق جریان الکتریکی به زمین توسط یک جفت الکترود جریان (الکترودهای A و B شکل (۲-۱) و در همان حال، اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل در سطح زمین به وسیله یک جفت الکترود پتانسیل (الکترودهای M و N شکل (۲-۳)) می‌باشد. در آرایش شکل (۲-۳) که آرایش متقارن شلومبرژه نامیده می‌شود، جفت الکترودهای (M, N) و (A, B) هم‌محور و نسبت به مرکز آرایش متقارن می‌باشند. در این آرایش برای تمام فاصله‌های AB باید:

$$AB \geq 5MN \quad [\text{Asfahani, 2007}]$$



شکل (۲-۳): سطوح هم‌پتانسیل الکتریکی و خطوط جریان برای آرایش الکترودی متقارن شلومبرژه [Zonge Engineering, 1994]

در آرایش شلومبرژه، مقاومت‌ویژه ظاهری ρ_a به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\rho_a = \pi \frac{a^2 - b^2}{2b} \frac{\Delta V}{I} \quad (2-2)$$

در رابطه (۲-۲) داریم: $a=AB/2$ و $b=MN/2$

فاصله نقطه مرکزی آرایش از هر کدام از الکترودهای جریان، اصطلاحاً فاصله الکترودی نامیده و با $AB/2$ نشان داده می‌شود. با افزایش فاصله الکترودی، جریان الکتریکی به عمق بیشتری از زمین نفوذ می‌کند. از تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری برای عمق‌های نفوذ مختلف، می‌توان به لایه‌بندی‌های زیرزمینی و بی‌هنجاری‌های موجود در آن‌ها پی برد و مقاومت‌ویژه واقعی آن‌ها را به دست آورد. به این ترتیب، از دیدگاه نظری می‌توان لایه‌بندی زیرسطحی را از طریق اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی در سطح زمین به دست آورد. روش فوق را سونداژزنی الکتریکی می‌نامند. روش ژئوالکتریک به مطالعه لایه‌بندی زیرسطحی بر اساس مقاومت‌ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح زمین می‌پردازد [Zonge Engineering, 1994].

با استفاده از این روش می‌توان با اندازه‌گیری‌های سطحی، تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین را ارائه داد؛ اساس این روش به این صورت است که بخشی از جریان تزریق شده به داخل زمین، به عمق مشخصی از آن نفوذ می‌کند و با افزایش فاصله الکترودی، این عمق افزایش می‌یابد. از

این رو ناهمگنی‌های عمیق موجود در داخل زمین بر روی توزیع پتانسیل الکتریکی در سطح زمین، تاثیر می‌گذرند [Corvallis, 2000].

۲-۲-۴ محاسن آرایش شلومبرژه^۱

چون حداقل برای چندین طول AB الکترودهای پتانسیل ثابت مانده و جابجا نمی‌شود؛ در نتیجه در زمان و مصرف کابل و سایر لوازم صرفه‌جویی می‌شود و به این ترتیب تأثیر تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه را به‌طور قابل ملاحظه‌ای می‌توان حذف و در نهایت حدودی اندازه‌گیری کرد. به این ترتیب بهتر می‌توان تغییرات سطحی و جانبی مقاومت‌ویژه را از تغییرات عمقی آن تفکیک نمود. به‌عنوان مثال اگر الکترودهای M و N روی قسمت‌های مقاوم و یا هادی‌تری نسبت به تشکیلات اطراف قرار گیرند؛ منحنی سونداژ الکتریکی بدون این‌که تغییر شکل بدهند، به سمت بالا یا پایین تغییر مکان می‌دهند؛ چون MN در آرایش وئر بزرگ‌تر از MN در آرایش شلومبرژه می‌باشد، اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده در این آرایش بزرگ‌تر و دقت اندازه‌گیری بیشتر می‌باشد. از معایب روش شلومبرژه این است که در این آرایش مقادیر ΔV کوچک‌تر است. بنابراین برای اندازه‌گیری دقیق در این آرایش به دستگاه‌های با حساسیت بالا احتیاج است و علاوه بر آن امکان افزایش خطا نسبت به آرایش وئر بیشتر است. در روش وئر چون نسبت فاصله الکترودهای MN نسبت به AB ثابت و برابر یک‌سوم آن است؛ محاسبه مقاومت‌ویژه ظاهری بسیار ساده می‌شود و به دلیل بزرگ‌تر بودن MN در این روش ΔV بزرگ‌تری هم به‌دست می‌آید که دقت بیشتری هم دارد. لذا برای آرایش وئر معمولاً مقادیر کمتری جریان (I) لازم است. از طرفی به علت بزرگ بودن فاصله MN اثر جریان‌های تلوریک روی مقادیر اندازه‌گیری شده با این آرایش بیشتر از آرایش شلومبرژه می‌باشد.

1- Schlumberger

در آرایش شلومبرژه روش‌های تفسیر به صورت گسترده‌تری پیشرفت داشته است. یکی از مزایای آرایش شلومبرژه این است که می‌توان در یک طول ثابت AB مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی را برای دو طول MN اندازه‌گیری کرد. این اندازه‌گیری با دو مقدار کوچک و بزرگ MN در مطالعات سونداژ الکتریکی حائز اهمیت بسیار است. چون از این طریق می‌توان به اثر تغییرات مقاومت‌ویژه جانبی سطحی منطقه مورد مطالعه پی برد و آن‌ها را از تغییرات مقاومت‌ویژه جانبی در عمق تفکیک نمود [حجت، ۱۳۸۲].

۵-۲-۲ نحوه بررسی داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه

اطلاعات و نکات ثبت شده در سونداژزنی مقاومت‌ویژه الکتریکی:

متغیر مستقل: فاصله الکترودی^۱، متغیر وابسته: مقاومت‌ویژه ظاهری (ρ_a) ^۲، اطلاعات کمکی: نوع آرایش الکترودی، آزمون خط برداشت، موقعیت مرکز الکتروود [Ginzburg, 1976].

زمان لازم برای محاسبه و رسم مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری در هنگام جابجا کردن الکترودهای فواصل دور وجود دارد. معمولاً تأخیرهای کوتاه برای ارائه داده‌ها بسیار بهتر از تحویل سریع نتایج غیرقابل تفسیر می‌باشد.

می‌توان از منحنی‌های استاندارد دو لایه‌ای و کاغذهای شفاف، برای تفسیر ساده‌ی داده‌های مقاومت ویژه استفاده کرد. انجام انطباق جزءبه‌جزء منحنی‌ها^۳ بهترین راه برای انجام تفسیر درست و به‌دست آوردن نتایج قابل اطمینان، می‌باشد. به این منظور، از منحنی‌های کمکی برای تعیین محل‌های مناسب مبدأ منحنی‌های استاندارد دو لایه‌ای که به قسمت‌های بعدی منحنی صحرائی منطبق می‌گردد، استفاده می‌شود. روش انطباق جزءبه‌جزء منحنی‌ها، روش اصلی تفسیر تا سال ۱۹۸۰

1- Spacing

2- Apparent Resistivity

3- Partical Curve Matching

بوده است. پس برنامه‌های کامپیوتری امکان تهیه نتایج قابل اعتمادتری را با استفاده از مدل ژئوالکتریکی به دست آمده از روش انطباق جزء به جزء منحنی‌ها فراهم آورده است [Mooney, 1980].

۲-۲-۶ پارامترهای ژئوالکتریکی

بین مقطع زمین‌شناسی منطقه با مقطع مقاومت‌ویژه آن تفاوت وجود دارد. ممکن است مرز بین لایه‌های مختلف زمین‌شناسی با مرز لایه‌های ژئوالکتریک منطبق باشد و یا نباشد. برای مثال، زمانی که شوری آب زیرزمینی در یک نوع سنگ و یا رسوب معین (که از نظر لیتولوژیکی همگن می‌باشد) با عمق تغییر کند، چندلایه ژئوالکتریک ممکن است در داخل آن قابل تشخیص باشند. عکس این حالت زمانی است که چند لایه با لیتولوژی و یا سن متفاوت (هر دو حالت)، ممکن است مقاومت‌ویژه یکسانی داشته باشند و تشکیل یک لایه ژئوالکتریک را بدهند. بنابراین یک لایه ژئوالکتریک با دو پارامتر اساسی که یکی مقاومت‌ویژه ظاهری (ρ_a) و دیگری ضخامت (h) است؛ قابل توصیف می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱].

۲-۳ مقاومت‌ویژه الکتریکی سنگ‌ها

محلول‌های موجود در خلل و فرج سنگ‌ها و بین دانه‌ها در بیشتر سنگ‌ها وظیفه هدایت جریان الکتریکی به عهده دارند. پس تخلخل و نفوذپذیری، آب موجود در سنگ‌ها و میزان شوری یا ترکیب املاح آب تاثیر مستقیمی بر مقاومت‌ویژه الکتریکی دارد. از این رو سهم هدایت الکتریکی در کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها و ماتریکس آن‌ها کمتر است؛ اما در اعماق زیاد، هدایت الکتریکی بیشتر توسط دانه‌ها و ماتریکس سنگ صورت می‌گیرد، چون در اثر افزایش فشار لیتواستاتیک تمامی خلل و فرج سنگ‌ها بسته شده است.

در جدول (۲-۱) مقاومت‌ویژه برخی از انواع سنگ‌ها و آب آورده شده است.

جدول (۱-۲): مقاومت ویژه الکتریکی برخی از انواع سنگ و آب [Corvallis, 2000].

مقاومت ویژه الکتریکی ($\Omega\cdot m$)	نوع آب یا سنگ
۰-۲	آب دریا
۳-۱۰	آب سفره های آبرفتی
۵۰-۱۰۰	آب چشمه طبیعی
۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	شن و ماسه خشک
۵۰-۵۰۰	شن و ماسه اشباع از آب شیرین
۰/۵-۵	شن و ماسه اشباع از آب شور
۲-۲۰	خاک رس
۲۰-۱۰۰	مارن
۳۰۰-۱۰۰۰۰	آهک
۵۰-۳۰۰	ماسه سنگ آرژلیتی
۳۰۰-۱۰۰۰۰	ماسه سنگ-کوارتزیت
۲۰-۱۰۰۰۰	سیتريت-توف های آتشفشانی
۳۰۰-۱۰۰۰۰	گدازه های آتشفشانی
۰/۵-۵	شیست گرافیتی
۱۰۰-۳۰۰	شیست آرژلیتی یا تخریب شده

از آن چه گفته شد می توان دریافت که مقاومت ویژه در سازندها، گستره وسیعی دارند و این نه تنها از یک سازند به سازند دیگر، بلکه حتی در یک نهشته خاص نیز صدق می کند و به خصوص در مورد مواد غیرمتراکم نزدیک به سطح زمین نیز صادق است. مثلاً ماسه می تواند تغییراتی در تخلخل و درجه اشباع نشان دهد که ممکن است سبب شود مقاومت ویژه آن در فاصله خیلی کوتاهی به طور قابل توجه تغییر کند. بنابراین هیچ گونه همبستگی دقیقی بین سنگ شناسی و مقاومت ویژه وجود ندارد. با وجود این و در حات کلی، ترتیب زیاد شدن مقاومت ویژه در سنگ های اشباع از آب به این صورت است: رس، ماسه و شن، سنگ آهک و سنگ های بلورین.

سازندهایی که حاوی آب بدون املاح (آب شیرین) باشند، مقاومت‌ویژه تقریباً بالایی از خود نشان می‌دهند؛ مثل شن و یا ماسه حاوی آب.

ارتباط بین آب سازند و مقاومت‌ویژه آن خطی نیست. برای مثال ممکن است مقاومت‌ویژه به مقدار خیلی کمی افزایش یابد؛ وقتی که درجه اشباع آب از اشباع کامل تا اشباع ۴۰ یا ۶۰ درصد کاهش یابد. اما برای اشباع ۴۰ درصد به پایین مقاومت‌ویژه خیلی سریع‌تر افزایش پیدا می‌کند. مسئله دیگر حضور کانی‌های رسی می‌باشد که تمایل دارند مقاومت‌ویژه را کاهش دهند و این به سه دلیل است:

(۱) کانی‌های رسی با آب ترکیب می‌شوند و آب زیادی را در خود جای می‌دهند.

(۲) کانی‌های رسی می‌توانند کاتیون‌ها (یون‌های مثبت) را در سطح خود جذب کنند.

(۳) کانی‌های رسی تمایل دارند به حالت یون‌های آزاد برسند و یونیزه شوند (سهمی در عرضه یون‌های آزاد داشته باشند).

به‌طور کلی سنگ‌های رسوبی مقاومت‌ویژه متوسط یا پایینی از خود نشان می‌دهند و سنگ‌های آذرین و دگرگونی مقاومت‌ویژه بالایی دارند؛ نواحی آبدار مقاومت‌ویژه کمتر، نواحی خشک مقاومت‌ویژه بالا و نواحی خیلی خشک مقاومت‌ویژه خیلی بالا دارند.

آب شیرین مقاومت‌ویژه حدود ۱ تا ۱۰۰ اهم‌متر، آب باران بین ۳۰ تا ۱۰۰۰ اهم‌متر و یخ

^۵ ۱۰ تا ^۸ ۱۰ اهم‌متر دارند مقاومت‌ویژه رسوبات سفت شده بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ اهم‌متر و رسوبات سفت

نشده بین ۱ تا ۱۰۰ اهم‌متر است [Mooney, 1980].

۴-۲ تجزیه، تحلیل و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی

۴-۲-۱ مقاومت‌ویژه ظاهری

مقادیر قرائت شده توسط دستگاه‌ها (جریان و ولتاژ) یا نسبت ولتاژ به جریان که همان مقاومت الکتریکی می‌باشد، معمولاً به مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری تبدیل می‌شوند. مقاومت‌ویژه ظاهری در واقع مقاومت‌ویژه نیم‌فضای همگنی است؛ که پاسخ دستگاهی مشاهده شده را به ازای فواصل الکتروودی معین، نشان می‌دهد. مقاومت‌ویژه ظاهری، یک میانگین وزنی از مقاومت‌ویژه خاک‌ها و سنگ‌های محدوده عمقی تحت بررسی می‌باشد. برای داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه، یک نمودار که دارای دو محور لگاریتمی شامل مقاومت‌ویژه ظاهری به ازای فاصله الکتروودی است، ترسیم می‌گردد؛ که اصطلاحاً منحنی سونداژ الکتریکی نامیده می‌شود [Asfahani, 2007].

در نهایت مقطع عرضی مقاومت‌ویژه که مقاومت‌ویژه و ضخامت لایه‌ها را شامل می‌شود، نتیجه نهایی برداشت‌های مقاومت‌ویژه با جریان مستقیم است. در صورت دسترسی به اطلاعات چاه‌پیمایی یا مدل زمین‌شناسی منطقه، می‌توان برای تشخیص حد اطمینان اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی از ترکیب مدل زمین‌شناسی و مقطع مقاومت‌ویژه استفاده کرد. یک مقطع مقاومت‌ویژه دوبعدی می‌تواند یک مقطع عرضی دوبعدی به هم‌پیوسته و یکپارچه باشد و یا این که از ترکیب یک سری سونداژهای الکتریکی یک‌بعدی ایجاد شود. نحوه به‌دست آوردن پارامترها و نوع پردازش صورت گرفته بر داده‌ها بر روی نوع مقطع مقاومت‌ویژه تولید شده، تاثیر می‌گذارد [Asfahani, 2007].

۲-۴-۲ مدل سازی^۱

تفسیر کمی بر روی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی معمولاً از طریق فرآیند مدل‌سازی صورت می‌گیرد؛ برای انجام مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها، ابتدا یک مدل آزمون از زمین به همراه مقادیر مقاومت‌ویژه آن در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر تئوری مقاومت‌ویژه ظاهری آن مدل محاسبه می‌شود. در مرحله بعد این پاسخ تئوری با داده‌های مشاهده شده، مقایسه می‌گردد و اختلافات پاسخ مدل با داده‌های صحرایی بررسی می‌شود. سپس مدل زمینی آزمون، آن‌قدر اصلاح می‌شود؛ که بیشترین برازش^۲ با داده‌های مشاهده شده ایجاد شود و در نهایت آخرین مدل آزمون اصلاح شده که پاسخ آن برازش قابل قبولی با داده‌های مشاهده‌ای دارد به‌عنوان مدل نهایی که نتیجه تفسیر است، در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که این فرآیند تکرار به‌صورت خودکار انجام شود، اصطلاحاً وارون سازی شامل مراحل تکرار^۳ نامیده می‌شود [Asfahani, 2007].

۲-۴-۳ یکتایی^۴

مدل‌های وارون مقاومت‌ویژه الکتریکی معمولاً یکتا نیستند. تعداد زیادی از مدل‌های زمینی می‌توانند داده‌های مشاهده‌ای یا نمودارهای سونداژ مشابهی را تولید کنند. معمولاً روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، مقاومت عرضی^۵ یا رسانایی^۶ لایه یا واحد چینه‌شناسی را مدنظر قرار می‌دهند؛ که هر دو عامل، تابعی از مقاومت‌ویژه و ضخامت لایه‌ها می‌باشند. بنابراین لایه‌های ضخیم با مقاومت‌ویژه کم و لایه‌های نازک با مقاومت‌ویژه زیاد، ممکن است پاسخ مشابهی را تولید کنند. این

1- Modelling

2- Fitting

3- Iterative Inversion

4- Uniqueness

5- Transverse Resistance

6- Horizontal Conductance

پدیده اصطلاحاً اصل هم‌ارزی^۱ نامیده می‌شود. ایجاد قیدهایی بر روی مدل‌های مذکور، می‌تواند تفسیر را ساده‌تر نماید [Asfahani, 2007].

۲-۵ مفاهیم و اصطلاحات هیدروژئولوژی

برای یافتن محلی مناسب برای حفر چاه باید یک سری پارامترهای مهم را بررسی نمود؛ مانند تخلخل. اگر سفره آب نزدیک سطح زمین بوده ولی تخلخل آن پایین باشد مناسب نیست چون حجم ذخیره آب پایینی دارد و همچنین هدایت هیدرولیکی که عامل مهم آبدهی چاه می‌باشد و باید از یک حد نرمال بالاتر باشد. لذا می‌بایست با روش‌های ژئوالکتریک این پارامترها را که بستگی به جنس لایه‌های زیرین دارد، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

توضیحات مختصری برای درک بهتر مطالب موجود در مورد برخی از مفاهیم هیدروژئولوژی ارائه می‌گردد:

۲-۵-۱ تقسیم‌بندی سازندهای زمین‌شناسی از نظر آب‌شناسی (براساس تراوایی)

الف) آبخوان یا سفره آب: سازندهایی هستند که تراوایی بالا و قابلیت ذخیره و انتقال آب را دارند مانند سنگ آهک و ماسه‌سنگ.

ب) اکیتراد^۲ (سفره نیمه‌تراوا): مقدار انتقال آب آن‌ها کمتر است و نیمه‌تراوا هستند اما قابلیت ذخیره آب را دارند. مانند ماسه‌های رسی که به‌عنوان یک منبع ذخیره آب در بالای آبخوان از آن‌ها یاد می‌شود.

1- Principle of Equivalence

2- Aquitard

ج) سفره ناتراوا: سازندهایی که اگر چه حاوی مقداری آب هستند؛ اما آبدهی بسیار ناچیزی دارند. مثل رس که در بسیاری از حوضه‌های رسوبی سنگ کف به حساب می‌آید.

د) مناطق بی‌آب یا آب‌گریز: فاقد آب هستند و قابلیت انتقال آب را ندارند. مانند: توده سنگ از جنس آذرین غیرهوازده [مدنی، ۱۳۸۶].

۲-۵-۲ هدایت هیدرولیکی (K)^۱

هدایت هیدرولیکی (K) عبارت است از مقدار جریان به واحد سطح مقطع تحت تأثیر شیب. این کمیت دارای واحد سرعت بوده و معمولاً در عمل برحسب متر بر روز (گاهی سانتی‌متر بر ثانیه یا متر بر دقیقه یا واحدهای دیگر سرعت) بیان می‌شود [Domenico & Schwartz, 1998].

مقادیر عددی هدایت هیدرولیکی و تخلخل برای انواع مختلف سنگ‌ها و خاک‌ها در جدول (۲-۲) آمده است [Domenico & Schwartz, 1998].

جدول (۲-۲): مقادیر عددی هدایت هیدرولیکی و تخلخل برای انواع مختلف سنگ‌ها و خاک‌ها [Domenico & Schwartz, 1998].

لیتولوژی	تخلخل (%)	هدایت هیدرولیکی (cm/s)
گراول	۲۵-۴۰	$10^{-2} - 10^2$
ماسه	۲۵-۵۰	$10^{-4} - 1$
سیلت	۳۵-۵۰	$10^{-7} - 10^{-3}$
رس	۴۰-۷۰	$10^{-10} - 10^{-7}$
رسوبات یخچالی	۱۰-۲۰	$10^{-10} - 10^{-4}$
بازالت‌های شکسته شده	۵-۵۰	$10^{-5} - 1$
سنگ آهک کارستی	۵-۵۰	$10^{-4} - 10$
ماسه‌سنگ	۵-۳۰	$10^{-8} - 10^{-4}$

1- Hydraulic Conductivity (K)

سنگ آهک و دولومیت	۰-۲۰	$۱۰^{-۷} - ۱۰^{-۴}$
شیل	۰-۱۰	$۱۰^{-۱۱} - ۱۰^{-۷}$
سنگ‌های بلورین شکسته شده	۰-۱۰	$۱۰^{-۷} - ۱۰^{-۲}$
سنگ‌های بلورین متراکم	۰-۵	$۱۰^{-۱۲} - ۱۰^{-۸}$

۲-۶ خواص فیزیکوشیمیایی آب‌های زیرزمینی

۲-۶-۱ هدایت الکتریکی (EC)^۱ آب

مواد تجزیه شده به‌صورت یونی در آب قادرند در اثر پتانسیل الکتریکی حرکت کنند. بنابراین با وارد کردن جریان الکتریکی به محلول می‌توان مقدار هدایت الکتریکی آن را اندازه‌گیری نمود. توانایی محلول برای هدایت جریان، تابعی از غلظت یون‌ها و مقدار حرکت در آن تحت تأثیر پتانسیل ایجاد شده می‌باشد. هدایت الکتریکی دارای واحد زیمنس بر متر (S/m) و در عمل معمولاً میکرو زیمنس (میکرو موس) بر سانتیمتر ($\mu\text{S/cm}$) می‌باشد. هدایت الکتریکی ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین پارامتر شیمیایی قابل اندازه‌گیری آب است.

درجه حرارت بر روی مقدار هدایت الکتریکی آب تأثیر می‌گذارد و با افزایش درجه حرارت هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. بنابراین باید در اندازه‌گیری‌های هدایت الکتریکی درجه حرارت در نظر گرفته‌شود. رابطه بین غلظت یونی و هدایت الکتریکی برای محلول رقیق به‌صورت خطی است، وقتی که مقدار غلظت یون‌ها نسبت به واحد حجم محلول افزایش یابد.

علاوه بر این، انواع مختلفی از یون‌های باردار و ترکیبات غیرباردار در آب‌های طبیعی موجود است که با تعیین هدایت الکتریکی می‌توان غلظت یونی و یا کل مواد حل‌شده (TDS)^۱ در آب را تخمین

1- Electrical Conductivity (EC)

زد. در حالت کلی هدایت الکتریکی متناسب با کل مواد جامد حل شده (TDS) است که واحد آن میلی گرم بر لیتر بیان می شود. طبق رابطه (۱-۲):

$$TDS = K_e \times EC \quad (1-2)$$

در این رابطه EC برحسب زیمنس بر سانتیمتر در ۲۵ درجه سانتی گراد، TDS برحسب میلی گرم بر لیتر و K_e فاکتور تبدیل و معمولاً بین ۰/۵۵ تا ۰/۸ است که باید برای هر منطقه عملیاتی مشخص گردد [صدقت، ۱۳۸۷].

۲-۶-۲ تعیین مقدار کل مواد جامد حل شده

برای تعیین مقدار TDS در آبهای زیرزمینی مقدار مواد جامد باقیمانده از تبخیر حجم معینی نمونه که از صافی عبور داده شده را اندازه گیری می کنند. مواد جامد باقیمانده از تبخیر را معمولاً مقدار زیادی کانی و مقدار کمی مواد آلی تشکیل می دهند. تعیین مقدار TDS ساده ترین روش برای تقسیم بندی آب از نظر کیفی است. برای مثال اگر مقدار TDS آبی بیش از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر باشد، برای آشامیدن مناسب نیست [صدقت، ۱۳۸۷]. میزان شوری، مقاومت ویژه و هدایت الکتریکی برخی از انواع آبها در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول (۳-۲): مقادیر عددی هدایت ویژه، شوری و مقاومت ویژه برای انواع مختلف آبها [Bernard, 2003]

نوع آب	مقاومت ویژه الکتریکی ($\Omega.m$)	هدایت الکتریکی ($\mu s/cm$)	شوری ($\mu g/lit$)
خیلی شیرین	۲۰۰	۵۰	۳۵
شیرین	۲۰	۵۰۰	۳۵۰
شور	۱۰	۱۰۰۰	۷۰۰
خیلی شور	۰/۳	۳۰۰۰۰	۲۱۰۰۰

۲-۶-۳ منشأ شوری در آب‌های زیرزمینی

واکنش آب‌های زیرزمینی با موادی که از کنار آن‌ها جریان می‌یابند و یا در داخل خود دارند، باعث شوری آب می‌شود. منابع مختلفی که باعث شوری این آب‌ها می‌شوند عبارت‌اند از [باقری، ۱۳۸۶]:

شوری حاصل از انحلال سفره، آب‌های برگشتی کشاورزی و فعالیت‌های انسانی، شوری در ارتباط با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و توسعه شهری.

۲-۷ روش‌های الکتریکی به منظور مطالعه آب‌های زیرزمینی

آب‌های زیرزمینی به خاطر نمک‌ها و یون‌های محلولی که دارند، از نظر یونی رسانا می‌باشند، در نتیجه اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه زمین، امکان تشخیص حضور آب‌های زیرزمینی را با در نظر گرفتن موارد زیر فراهم می‌سازد:

الف) سنگ سخت فاقد تخلخل و شکستگی و یا ماسه‌سنگ خشک فاقد آب یا رس، مقاومت‌ویژه خیلی بالایی دارد، که می‌تواند تا چندین ده هزار اهم‌متر باشد.

ب) مقاومت‌ویژه سنگ متخلخل یا شکسته شده حاوی آب آزاد، به مقدار مقاومت‌ویژه آب محتوی و تخلخل سنگ بستگی دارد و مقدار مقاومت‌ویژه آن از چندین ده تا چندین هزار اهم‌متر می‌تواند متغیر باشد.

ج) لایه رسی ناتراوا، اگر حاوی آب محصور باشد، مقاومت‌ویژه پایینی دارد؛ معمولاً از چند اهم‌متر تا چندین ده اهم‌متر.

د) کانسارهایی مثل آهن، سولفیدها و غیره به علت هدایت الکتریکی بالا، مقادیر مقاومت‌ویژه پایینی دارند. این مقاومت‌ویژه معمولاً کمتر یا خیلی کمتر از یک اهم‌متر می‌باشد [Bernard, 2003].

روش‌های مقاومت‌ویژه برای به نقشه درآوردن تغییرات جانبی و تشخیص کنتاکت‌ها (مانند گسل‌ها و دایک‌ها) و رخساره‌های قائم یا زون‌های شکسته شده در روش پروفیل‌زنی و هم برای تشخیص عمق افق‌های مقاومت‌ویژه (مثلاً عمق لایه‌های زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی) در روش سونداژزنی (مثلاً سونداژزنی شلومبرژه) کاربرد دارند. [Seaton & Burbey, 2002].

در جدول (۲-۴) گستره تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی بعضی از رسوبات و سنگ‌های رسوبی آمده است.

جدول (۲-۴): گستره تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی بعضی از رسوبات و سنگ‌های رسوبی [Mooney, 1980].

نوع سنگ یا مواد	گستره تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی ($\Omega.m$)
شیل‌های مستحکم	$20-2 \times 10^3$
آرژیلیت‌ها	$10-8 \times 10^2$
کنگلومراها	$2 \times 10^3-10^4$
ماسه‌سنگ‌ها	$1-6/4 \times 10^8$
سنگ‌های آهکی	50×10^7
دولومیت‌ها	$3/5 \times 10^2-5 \times 10^3$
رس‌های مرطوب نامستحکم	۲۰
مارن	۳-۷۰
رس‌ها	۱-۱۰۰
آبرفت‌ها و ماسه‌ها	۱۰-۸۰۰
ماسه‌های حاوی نفت	۴-۸۰۰

ویژگی‌های خاک‌ها و سنگ‌ها که مورد توجه زمین‌شناسان، آب‌شناسان و مهندسين ژئوتکنیک می‌باشند با مقاومت‌ویژه الکتریکی ارتباط دارند. سایر پارامترهای زمین‌شناسی تاثیر گذار بر روی مقاومت‌ویژه الکتریکی عبارت‌اند از [Mooney, 1980]:

محتوای رس، رسانندگی یا هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی، تخلخل خاک یا مجموعه سازند و درجه اشباع آب.

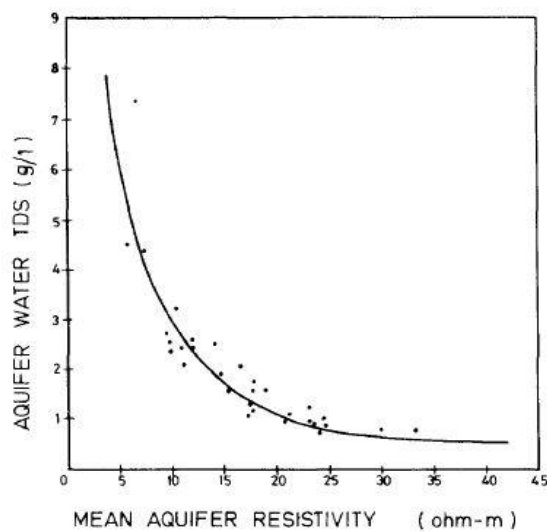
۲-۸ ارتباط بین پارامترهای آب و مقاومت‌ویژه الکتریکی

در مورد ارتباط بین پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی از یک طرف و نتایج تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی مطالعات بسیاری انجام‌شده که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در سال ۱۹۸۶ یوان گو (Guoa, 1986) بین TDS حاصل از آنالیز شیمیایی ۳۲ چاه آب در منطقه کراچی پاکستان و مقاومت‌ویژه به‌دست آمده برای آبخوان رابطه همبستگی تعیین نمود. او مطابق شکل (۲-۴) یک منحنی را بر داده‌های TDS در مقابل مقاومت‌ویژه با ضریب همبستگی ۰/۹۳۶ برازش داد و نهایتاً رابطه (۲-۲) را بین مقاومت‌ویژه آبخوان و TDS به‌دست آورد.

$$TDS = \frac{43.5}{R^{1.2}} \quad (2-2)$$

که در آن R مقاومت‌ویژه آبخوان می‌باشد.

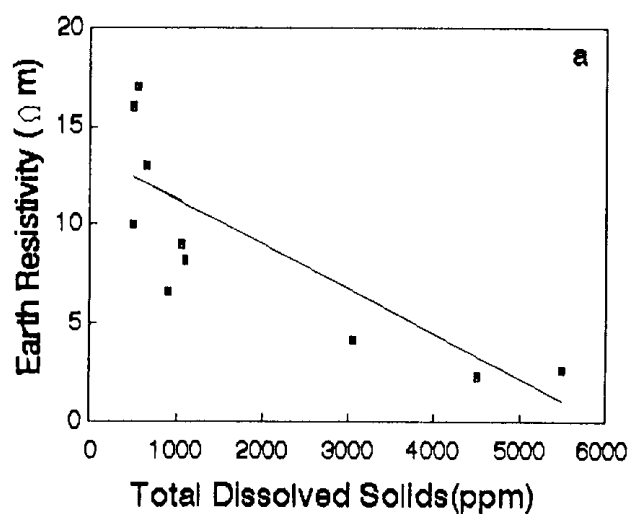


شکل (۲-۴): رابطه همبستگی بین مقاومت ویژه آبخوان و TDS در منطقه کراچی پاکستان
[Guoa, 1986]

در سال ۱۹۹۷ عبدالعظیم و همکارانش (Abdel-Azim et al, 1997) بین TDS به دست آمده برای آب زیرزمینی در منطقه دلتای رود نیل در کشور مصر و مقاومت ویژه آبخوان رابطه همبستگی تعیین نمودند (۲-۳). شکل (۲-۵) همبستگی منفی تعیین شده در این تحقیق را نشان می دهد.

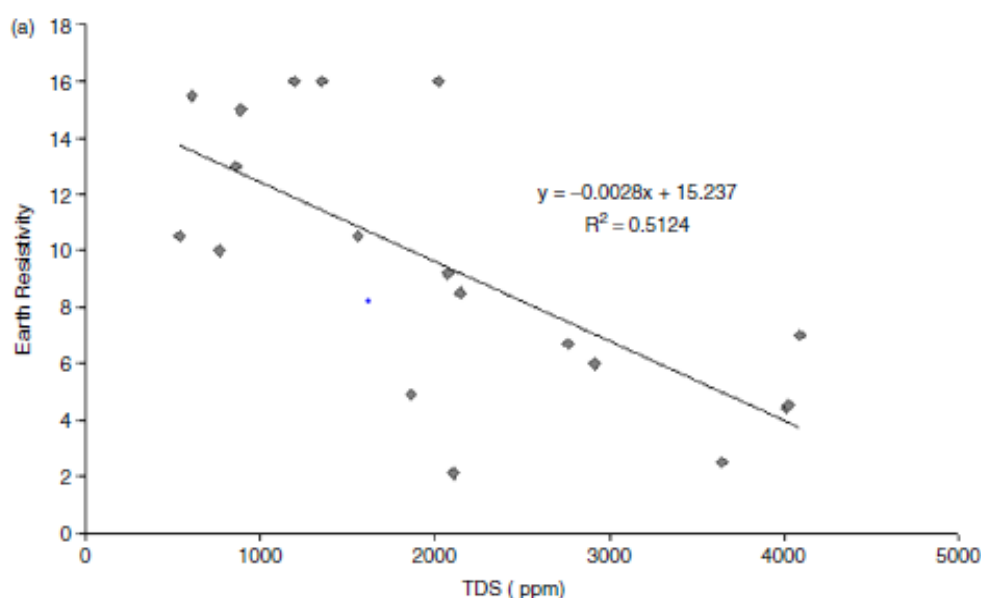
$$\rho_e = -0.0023TDS + 13.1 \quad (2-3)$$

که در آن ρ_e مقاومت ویژه آبخوان می باشد.

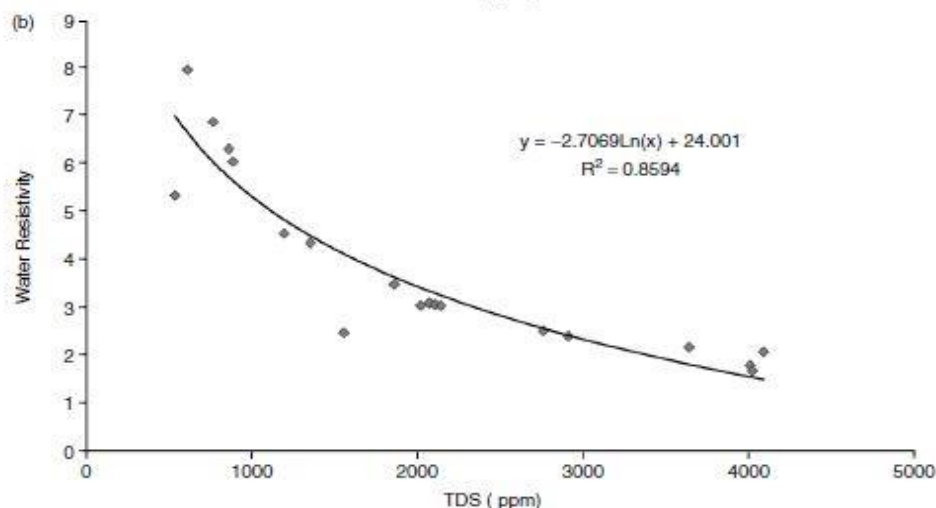


شکل (۲-۵): رابطه همبستگی بین مقاومت ویژه زمین و TDS در دلتای رود نیل
[Abdel-Azim et al 1997]

در سال ۲۰۰۷ نیز اسفهان‌ی (Asfahani, 2007) بین مقادیر TDS به‌دست آمده برای آب زیرزمینی در دره خان‌اصر در شمال سوریه و داده‌های مقاومت‌ویژه اندازه‌گیری شده رابطه همبستگی تعیین کرد. روابط و ضرایب همبستگی در شکل‌های زیر نشان داده شده است. در نمودار نشان داده شده در شکل (۶-۲) که یک همبستگی با ضریب همبستگی پایین بین TDS و مقاومت‌ویژه لایه آبدار به‌دست آمده است. در نمودار نشان داده شده در شکل (۷-۲) همبستگی بین TDS و مقاومت‌ویژه آب زیرزمینی را نمایش می‌دهد. منحنی لگاریتمی که در این نمودار برای تعیین ارتباط رگرسیون استفاده شده انطباق خوبی با نقاط داده‌ها دارد و ضریب همبستگی نسبتاً بالا نیز مؤید همین نکته می‌باشد.



شکل (۶-۲): رابطه همبستگی بین TDS و مقاومت‌ویژه لایه آبدار [Asfahani, 2007].



شکل (۲-۷): رابطه همبستگی بین TDS و مقاومت ویژه آب زیرزمینی [Asfahani, 2007].

در ایران نیز برای تعیین رابطه همبستگی بین داده‌های سونداژ الکتریکی و پارامترهای هیدرولوژیکی، تلاش‌های زیادی صورت گرفته است که به عنوان مثال می‌توان به مقاله نخعی (۱۳۸۲) اشاره کرد. وی در این مقاله، با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و روابط تجربی، میزان تخلخل و آبدهی ویژه را در آبخوان دشت شور (واقع در ۸۰ کیلومتری جنوب غرب زاهدان) تخمین زده است. در این تحقیق، تعداد ۲۰۷ سونداژ الکتریکی قائم با آرایش الکترودی شلومبرژه در دشت شور برداشت گردیده و پس از تصحیح، داده‌های صحرائی به کمک نرم‌افزارهای مختلف و با در نظر گرفتن اطلاعات لاگ چاه‌های گمانه موجود در منطقه، پردازش و تفسیر شده و مقاومت ویژه حقیقی و ضخامت لایه‌های زیرسطحی مختلف مشخص شد. محدوده آبخوان در دشت تعیین گردیده است. در این تحقیق، مقاطع ژئوالکتریک و نقشه‌های هم‌عمق و هم‌مقاومت لایه آبدار و سنگ کف ترسیم و با توجه به نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی، جهت حرکت آب و نیز ورودی‌ها و خروجی‌های دشت تعیین گردیده است (نخعی، ۱۳۸۲). محبی (۱۳۸۸) و شاهزیدی (۱۳۸۹) نیز بین داده‌های TDS و EC به دست آمده برای سه چاه موجود در منطقه دوغ استان گلستان و مقادیر مقاومت ویژه به دست آمده برای آب زیرزمینی رابطه همبستگی تعیین نمودند. در این مطالعات ابتدا مقاومت ویژه آب زیرزمینی با استفاده

از نتایج سونداژهای الکتریکی تعیین گردیده و سپس از روش آماری رگرسیون برای تعیین میزان همبستگی استفاده شده است.

فصل ۳: زمین شناسی منطقه و عملیات صحرائی

۱-۳ مقدمه

منطقه مورد بررسی از نظر تقسیمات کشوری در استان‌های مرکزی و قم قرار دارد و همچنین از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی در حاشیه شمال غربی واحد زون ایران مرکزی واقع است. محدوده مطالعاتی در قسمت بالایی برگه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ قم با وسعتی در حدود ۲۰۰۰ کیلومترمربع و در محدوده‌ای به مختصات جغرافیایی $۵۰^{\circ}۱۰'$ الی $۵۵^{\circ}۵۰'$ شرقی و $۳۴^{\circ}۴۵'$ الی ۳۵° شمالی قرار گرفته است.

۲-۳ مسیر دسترسی

دشت ساوه، در مسیر ساوه به سلفچگان واقع شده است؛ که از شمال به شهرستان ساوه، از جنوب غرب به شهرستان تفرش واقع در استان مرکزی و از جنوب شرق به شهرستان قم واقع در استان قم محدود می‌شود. بزرگراه ساوه - سلفچگان از مهم‌ترین مسیرهای ارتباطی منطقه می‌باشد و علاوه بر آن مسیرهای فرعی و خاکی برای دسترسی به روستاهای منطقه وجود دارد. علاوه بر این، راه‌آهن سراسری تهران - اهواز نیز از محدوده مطالعاتی عبور می‌کند (شکل (۱-۳)).

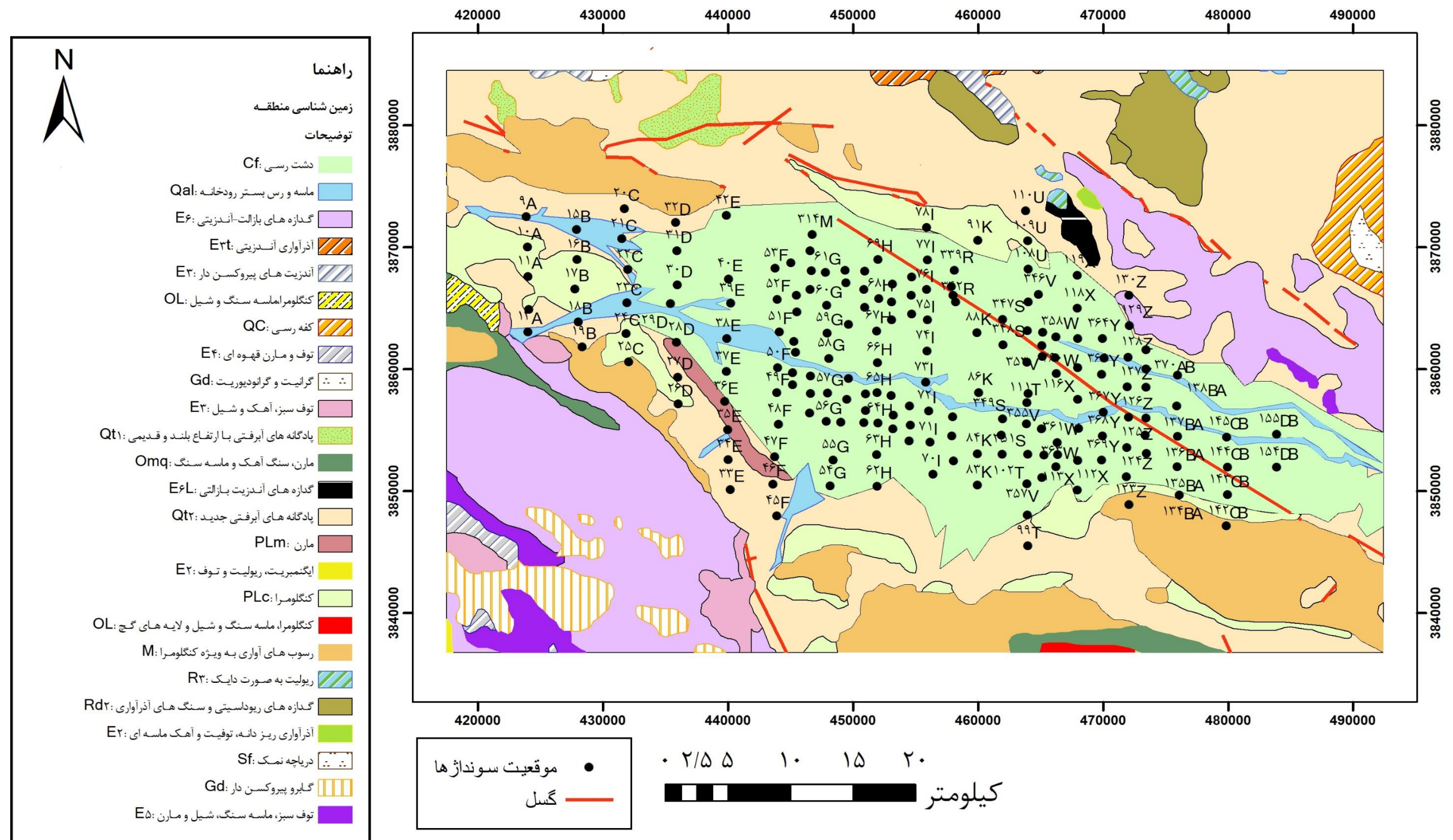


شکل (۱-۳): مسیر دسترسی به منطقه مورد مطالعه [نقشه راه‌های ایران].

۳-۳ زمین‌شناسی منطقه

دشت ساوه در پایاب زیر حوضه آبریز رودخانه قره‌چای واقع است. غالب پهنه دشت را کفه‌های رسی و ریزدانه پوشش می‌دهند. در مبادی رودخانه‌ها و مسیل‌های ورودی دشت رسوبات مخروط‌افکنه‌ای و در عمق، آبرفت‌های دانه متوسط رسوب‌گذاری شده است.

منطقه مورد بررسی در حاشیه شمال غربی واحد زون ایران مرکزی واقع است و به‌عنوان جزئی از حوضه آبریز دریاچه نمک و زیر حوضه قره‌چای قرار دارد و از رودهای مهم منطقه می‌توان رودخانه قره‌چای و مزلقان را نام برد. این منطقه از طرف جنوب غرب تحت تأثیر نیروهای فشارشی کوهزایی آلپین زاگرس و از طرف شمال و شمال غرب تحت تأثیر نیروهای فشارشی کوهزایی البرز (عمدتاً فاز پاسادنین) قرار گرفته و تعیین سنگ کف از جنس کنگلومرای پلیوسن و به‌خصوص تشکیلات تبخیری میوسن نتایج حاصل از حفاری‌های انجام شده می‌باشد [سازمان آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۲].



شکل (۲-۳): نقشه زمین شناسی منطقه برگرفته از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ قم [سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۰] و همچنین موقعیت سونداژها.

۳-۳-۱ واحدهای زمین‌شناسی منطقه

۱- واحد Qal (کواترنری) نهشته‌های آبرفتی جوان که در بستر رودخانه‌ها جای دارند.

۲- واحد Qc (کواترنری): پهنه‌های رسی و سیلتی عهد حاضر.

۳- واحد Qt2 (کواترنری): پادگانه‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های جوان دشت است. این ته‌نشست‌ها دربرگیرنده مواد آواری سخت نشده و یا کمی سخت شده می‌باشند که از فرسایش واحدهای سنگی قدیمی‌تر به وجود آمده‌اند.

۴- واحد Cf: دشت رسی به همراه آبرفت‌های جوان.

۵- واحد Plm (پلیوسن): این واحد شامل سنگ‌آهک روشن رنگ - مارن و به‌احتمال کنگلومرا است.

۶- واحد Plc (پلیوسن): بعد از دوره میوسن فاز کوهزایی پاسادنین حادث می‌شود و متعاقب آن ضمن عقب‌نشینی کامل دریای قم از دشت‌های ساوه و شرق نوبران روی چین‌خوردگی‌های سازند تبخیری میوسن سازند آواری پلیوسن و پلیستوسن (سازند هزار دره) رسوب‌گذاری شده است این سازند که در دشت ساوه تپه‌ماهورهای بزرگی از آن (ارتفاعات چشمه ماری، آسیابک شمال طراز ناهید و ...) رخنمون دارند از کنگلومرا با خمیره رسی و لایه‌هایی از رس همراهند و آخرین فشارهای تکتونیکی پایان دوران سوم را نیز طی کرده‌اند.

۷- واحد M (میوسن): شامل نهشته‌های سازند قرمز بالایی دو رخساره چین‌شناسی متفاوت نشان می‌دهند.

الف: بخش عمده از رسوب‌های آواری به‌ویژه کنگلومرا با قطعات کم‌وبیش درشت.

ب: رسوب‌های کولابی یا آواری دانه‌ریز شامل رسوب‌های رسی، مارنی تبخیری همراه با ماسه‌سنگ.

عدسی‌ها و لایه‌های گچی درون این واحد به صورت مشخص شده است.

۸- واحد E6 (اوسن): در این واحد نقش فعالیت‌های ماگمایی چشمگیر است. ضخامت این واحد در منطقه چاهک، قاهان به حدود ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ متر می‌رسد. این واحد شامل:

- گدازه‌ها بازالتی آندزیتی با بافت پرفیریتیک و زمینه میکرولیتی و درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز

- آندزیت - بازالت با بافت پرفیریتیک تا مگا پرفیریتیک با فنوکریستال‌های پلاژیوکلاز - رگه‌های سیلیسی با ضخامت ۱ تا ۱۰ سانتی‌متر برخی از آن‌ها را بریده‌اند.

- بازالتی آندزیت کلریتی و کربناتی به رنگ خاکستری تیره مایل به سبز با ضخامت حدود ۸۰ متر

- گدازه آندزیتی - بازالتی پرفیریتیک با فرسایش نرم و رنگ روشن‌تر و ضخامت حدود ۱۲۰ متر که رگه‌هایی از کلسیت آن‌ها را قطع کرده است.

- تناوب گدازه‌های آفانیتیک و پرفیریتیک آندزیتی - بازالتی به حالت توده‌ای تا ضخیم لایه این واحد به ۵ زیر واحد تقسیم گردیده است (شکل (۳-۲)) [سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۰].

نوع مواد آبرفتی و ضخامت آبرفت: رسوبات آبرفتی دشت متشکل از شن و ماسه و قشرهای ضخیم و گاه نازک رس و مارن است. عمق این رسوبات از ۲۵ تا ۳۵۰ متر در نقاط مختلف دشت متغیر بوده و در بسیاری موارد بالاآمدگی سنگ کف موجب کاهش ضخامت آبرفت شده است. ضخامت سفره آب زیرزمینی در رسوبات مذکور از ۲۰ متر در حاشیه دشت تا ۲۵۰ متر در بخش مرکزی آن با توجه به لایه‌های محدوده کننده رسی که باعث تفکیک لایه‌های آبدار شده است تغییر می‌کند.

جنس سنگ کف: با بررسی نتایج حفاری چاه‌های اکتشافی و مشاهده‌ای، سنگ کف در دشت ساوه شامل کنگلومرای سری آواری هزار دره (پلیوسن)، ماسه‌سنگ‌های میوسن و رس‌های تبخیری است [سازمان آب منطقه‌ای مرکزی، ۱۳۹۲].

۳-۲-۳ گسل‌های منطقه

گسل‌های منطقه عمدتاً از دو روند شرقی- غربی و شمال غربی - جنوب شرقی پیروی می‌کنند. گسل ساوه که در محدوده مطالعاتی قرار دارد؛ طول گسلش ان بیش از ۱۵۰ کیلومتر است و از غرب شاخه‌های گسل آوج آغاز و به جنوب شرق حوض سلطان می‌پیوندد. روند گسل تراستی ساوه شمال غربی - جنوب شرقی بوده و دشت ساوه را به دو بخش تقسیم نموده است گسل ساوه ظاهراً دارای جابه‌جایی شیب‌لغز از نوع معکوس اصلی است [حیدریان و همکاران، ۱۳۹۰].

۳-۴ عملیات صحرائی

مطالعات ژئوفیزیکی دشت ساوه بر اساس قراردادی بین شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی و موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران واگذار گردیده است. این مطالعات به منظور بررسی و تعیین ضخامت لایه آبدار و همچنین بررسی عمق سنگ کف از طریق سنجش مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است.

عملیات صحرائی برداشت داده‌ها شامل حدود ۲۰۰ سونداژ الکتریکی در امتداد ۲۷ خط برداشت، با آرایه الکترودی شلومبرژه و با طول فرستنده جریان الکتریکی (AB/2) ۴۶۴ تا ۱۰۰۰ متر در امتداد شمالی - جنوبی انجام شده است (جدول (۳-۱)). از آن جایی که منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی نسبتاً ملایمی می‌باشد، فضای لازم جهت گسترش الکترودهای جریان برای تمام سونداژها امکان‌پذیر بوده است.

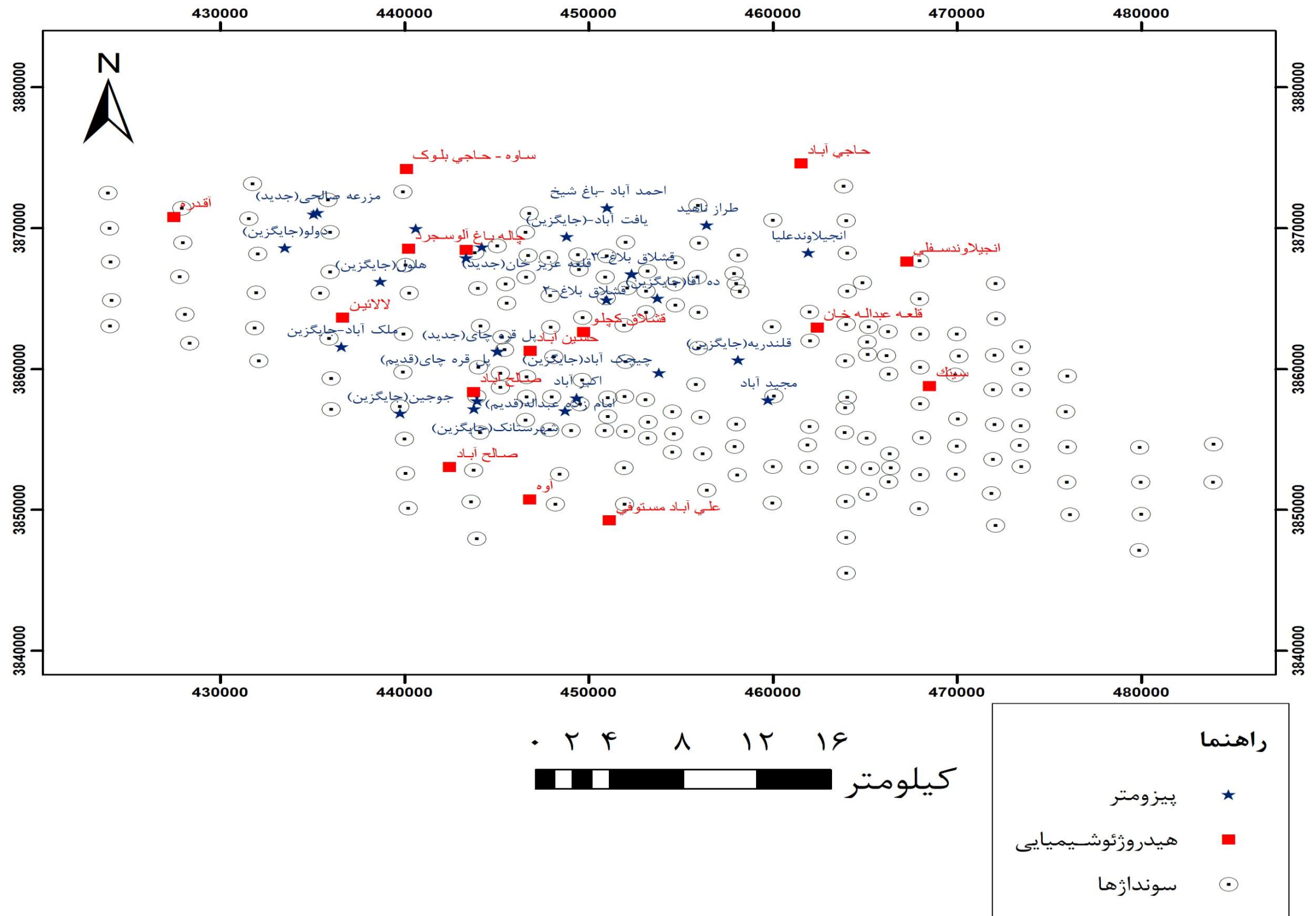
جدول (۳-۱): معرفی خطوط برداشت [سازمان آب منطقه ای مرکزی، ۱۳۸۸].

نام پروفیل	امتداد پروفیل ها	تعداد سونداژها	فاصله تقریبی سونداژها	طول پروفیل
A	N-S	۵	۲۷۱۷-۱۸۲۵	۹۴۳۸
B	N-S	۵	۲۷۰۸-۲۰۵۷	۹۶۰۷
C	N-S	۶	۲۷۴۳-۲۳۵۱	۱۲۵۷۹
D	N-S	۷	۳۲۴۳-۲۲۱۳	۱۴۹۰۱
E	N-S	۹	۵۲۱۰-۱۹۹۷	۲۲۴۷۶
F	N-S	۹	۲۹۴۴-۲۰۶۸	۲۰۳۱۴
G(L)	N-S	۷	۲۴۳۹-۸۷۲	۱۰۰۲۳
H(M)	N-S	۶	۷۰۹۱-۱۳۳۵	۱۴۶۵۵
I(G)	N-S	۸	۲۸۴۸-۲۰۹۷	۱۷۵۳۶
J(N)	N-S	۶	۴۴۴۰-۱۰۳۲	۱۲۴۸۱
K(O)	N-S	۶	۷۱۰۳-۱۰۰۴	۱۲۴۰۷
L(H)	N-S	۸	۳۲۲۸-۲۴۷۱	۱۸۶۱۴
M(P)	N-S	۶	۶۲۱۴-۱۱۲۶	۱۱۸۷۲
N(Q)	N-S	۶	۷۵۵۴-۱۳۱۵	۱۳۴۶۱
O(I)	N-S	۹	۲۵۷۵-۲۳۵۸	۲۰۲۳۳
P (R)	N-S	۷	۹۴۱۲-۵۹۹	۱۵۶۳۱
Q(K)	N-S	۵	۷۵۷۲-۲۵۸۳	۲۰۰۸۴
R(S)	N-S	۵	۶۰۶۷-۱۳۲۹	۱۱۰۴۷
S(T)	N-S	۱۳	۲۵۷۱-۷۶۵	۲۷۴۸۸
T(V)	N-S	۷	۵۹۴۷-۸۶۳	۱۵۰۳۴
U(W)	N-S	۶	۵۶۵۶-۹۷۹	۱۰۶۴۷
V(X)	N-S	۸	۲۵۹۲-۲۳۷۵	۱۷۶۱۹
W(Y)	N-S	۶	۳۱۲۰-۱۳۴۷	۹۹۵۱

۱۷۶۱۵	۲۵۹۵-۲۲۸۴	۸	N-S	X(Z)
۸۵۱۵	۲۵۴۴-۱۴۰۰	۶	N-S	ZA(AB)
۹۸۴۶	۲۵۲۵-۲۳۲۲	۵	N-S	ZB(BA)
۷۲۹۹	۲۵۶۳-۲۴۷۵	۴	N-S	ZC(CB)

علاوه بر داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه، اطلاعات هیدروژئوشیمیایی و همچنین اطلاعات چاه‌های پیزومتری^۱ منطقه نیز در دسترس است (شکل (۳-۳))؛ که در فصول بعدی از آن‌ها استفاده می‌شود.

1- Piezometer



فصل ۴: مدل سازی و تفسیر یک بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

۴-۱ مقدمه

بعد از برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری (pa) فرایند مدل‌سازی اعم از مدل‌سازی پیشرو و مدل‌سازی وارون بر روی آن‌ها اعمال می‌شود تا به مرحله تفسیر برسند. تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی به دو صورت کیفی و کمی انجام می‌شود. در این فصل به مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری با استفاده از نرم‌افزارهای IX1D و IPI2WIN و سپس تفسیر مدل‌ها می‌پردازیم.

۴-۲ مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی

روش‌های ژئوفیزیکی مبتنی بر مطالعه زمینه‌های مختلف فیزیکی است که منشأ انتشار آن‌ها به صورت طبیعی و از طریق زمین است. مهم‌ترین میدان‌های ژئوفیزیکی عبارت‌اند از: میدان‌های گرانشی، مغناطیسی، الکترومغناطیسی و امواج لرزه‌ای. مقادیر مشاهده شده این میدان‌ها، به خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها بستگی دارد. تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی شامل مقایسه داده‌های ژئوفیزیکی محاسبه‌ای مدل‌های مختلف زمین‌شناسی با داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد. مدل‌سازی عددی داده‌های ژئوفیزیکی برای به‌دست آوردن پارامترهای مدل از روی مدل اولیه مدل‌سازی پیشرو نامیده می‌شود. نتایج مدل‌سازی پیشرو، امکان تخمین داده‌های ژئوفیزیکی را برای ساختارهای خاص زمین‌شناسی میسر می‌کند [Tarantola, 2005].

هدف نهایی مطالعه ژئوفیزیکی تعیین ساختارهای زمین‌شناسی از طریق داده‌های ژئوفیزیکی است. این عمل بسیار دشوار و دلیل آن ساختار پیچیده داخلی زمین است. برای حل این مشکل معمولاً ساختارهای زمین‌شناسی را به صورت مدل‌های نسبتاً ساده در نظر می‌گیرند و سعی می‌کنند پارامترهای مدل را از داده‌ها تعیین کنند. این روش مدل‌سازی وارون یا معکوس نامیده می‌شود [Tarantola, 2005]. موفقیت در تفسیر مقاطع ژئوفیزیکی به توانایی ما در تخمین ساختارهای واقعی زمین‌شناسی توسط مدل‌های نزدیک به واقعیت بستگی دارد.

۴-۳ تفسیر کیفی سونداژهای الکتریکی

برای تفسیر کیفی سونداژ الکتریکی نتایج حاصل از سونداژ را که در آن مقاومت ویژه ظاهری (ρ_a) تابعی از فاصله الکترودی ($AB/2$ در آرایش الکترودی شلومبرژه) است؛ بر روی کاغذ شفاف رسم می‌کنیم. در حالت کلی، آنچه در تفسیر کیفی یک منحنی سونداژ الکتریکی مورد توجه قرار می‌گیرد، نقاط ماکزیمم و مینیمم بر روی این منحنی است. وجود هر ماکزیمم یا مینیمم برای طبقات افقی می‌تواند معرف وجود یک لایه با مقاومت ویژه متفاوت باشد. البته باید در نظر داشت که این قاعده، کلی نیست و برای آنکه یک لایه بتواند خود را بر روی منحنی نشان دهد، باید دارای ضخامت کافی و تباین مقاومت ویژه مناسب با لایه‌های مجاورش باشد. نکته قابل توجه، شناخت منحنی‌های سونداژ الکتریکی برای حالت‌های مختلف است. برای افراد باتجربه، تغییر شیب منحنی، قسمت‌های بالارونده و پایین‌رونده و مسائلی از این قبیل می‌تواند شامل اطلاعات کیفی در رابطه با تغییرات مقاومت ویژه در یک منطقه باشد [Mooney, 1980].

۴-۴ تفسیر کمی سونداژهای الکتریکی

مجموعه وسیعی از منحنی‌های استاندارد (آباک‌ها) برای زمین‌های افقی دو تا چهار لایه‌ای تهیه شده‌اند. این منحنی‌ها به صورت گروه‌هایی طبقه‌بندی شده‌اند و در نتیجه می‌توان به راحتی، منحنی‌های استاندارد را که مشابه منحنی سونداژ الکتریکی به دست آمده می‌باشند، مشخص نمود و مشخصات لایه‌های مربوط به سونداژ مذکور را تعیین کرد. برای این که یک منحنی سونداژ الکتریکی، منحصرأً مربوط به طبقات افقی باشد، باید شرایط زیر برای آن صادق باشد [Mooney, 1980]:

(۱) شیب قسمت بالارونده منحنی نباید از ۴۵ درجه بیشتر باشد.

(۲) شعاع انحنای منحنی در نزدیکی نقطه ماکزیمم آن نباید از حد معینی کوچک‌تر باشد (این

مقدار تقریباً برابر با نسبت ۲ در مقیاس لگاریتمی انتخاب شده است).

در خصوص شیب قسمت پایین‌رونده منحنی سونداژ الکتریکی و شعاع انحنای آن در نزدیکی نقطه مینیمم، محدودیت‌هایی مانند قسمت‌های بالا و حتی شدیدتر وجود دارد.

بعد از مشخص شدن این‌که منحنی سونداژ الکتریکی مربوط به طبقات افقی می‌باشد، تعیین مشخصات لایه سطحی به‌سادگی امکان‌پذیر است. برای این کار می‌توان از منحنی‌های استاندارد (برای دولایه) استفاده نمود. بجانب منحنی برای مقادیر اندک فاصله الکترودی، مشخص‌کننده مقاومت‌ویژه لایه اول است؛ اما برای تعیین مشخصات این لایه، منحنی آن لایه بر منحنی استاندارد کمکی فرعی مربوطه منطبق می‌گردد.

تقاطع محورهای افقی و قائم منحنی استاندارد را روی کاغذ لگاریتمی که منحنی سونداژ الکتریکی روی آن رسم شده با علامت (+) مشخص نموده و مختصات این نقطه به‌دست می‌آید. طول این نقطه معادل ضخامت و عرض آن معادل مقاومت‌ویژه لایه اول می‌باشد.

برای تعیین مشخصات لایه‌های دیگر از منحنی‌های کمکی استفاده می‌کنیم و با ادامه کار انطباق منحنی‌ها، ضخامت و مقاومت‌ویژه هر یک از لایه‌ها را به‌دست می‌آوریم. در نتیجه این کار مدلی با پارامترهای زیر به‌دست خواهد آمد:

۱- تعداد لایه‌ها

۲- مقاومت‌ویژه هر لایه

۳- عمق یا ضخامت هر لایه

۴-۵ مدل‌سازی و تفسیر سونداژهای محدوده مطالعاتی

در تفسیر یک‌بعدی داده‌های برداشت شده محدوده مورد مطالعه، منحنی‌های استاندارد و نرم‌افزارهای رایانه‌ای مانند IX1D و IPI2WIN برای تعیین ضخامت لایه‌ها، مقادیر مقاومت‌ویژه واقعی

مورد استفاده قرار گرفتند. تفسیر منحنی‌های سونداژ الکتریکی ابتدا با استفاده از سر منحنی‌های استاندارد اصلی دولایه‌ای و منحنی‌های استاندارد کمکی با روش دستی و سپس با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای، انجام شد. نهایتاً نتایج نزدیک‌تر به واقعیت با مقایسه اطلاعات موجود از منطقه و نتایج به‌دست آمده در نظر گرفته شدند. با توجه به تعداد بالای سونداژها فقط برخی از آن‌ها در پایان‌نامه آورده شده و نتایج دیگر سونداژها در بخش پیوست ارائه می‌گردد.

۴-۵-۱ مدل‌سازی و تفسیر یک‌بعدی سونداژ 49F با نرم‌افزار IX1D

نرم‌افزار IX1D نرم‌افزار مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی است و برای مدل‌سازی نیازمند مدل اولیه است. فرایند انجام مدل‌سازی و تفسیر یک‌بعدی این‌گونه است که ابتدا داده‌های سونداژ 49F (جدول (۴-۱)) که حاصل از برداشت‌های صحرایی با روش مقاومت‌ویژه الکتریکی (مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری برحسب فاصله الکترودی در آرایش شلومبرژه) است را به‌صورت منحنی بر روی کاغذ شفاف لگاریتمی رسم می‌کنیم. سپس با استفاده از منحنی‌های استاندارد اصلی و فرعی مدل اولیه حاصل از روش انطباق منحنی‌ها را به‌دست می‌آوریم.

جدول (۴-۱): داده‌های سونداژ 49F

ردیف	AB/2	MN	ρ_a	ردیف	AB/2	MN	ρ_a
۱	۱	۰/۳	۵۶/۱۸۵	۱۶	۴۶/۴	۳	۱۳/۱۲۳
۲	۱/۴۷	۰/۳	۳۰/۶۱۲	۱۷	۴۶/۴	۱۰	۱۱/۴۱۵
۳	۲/۱۵	۰/۳	۲۳/۸۰۵	۱۸	۶۸/۱	۱۰	۱۳/۵۷۹
۴	۳/۱۶	۰/۳	۱۵/۹۹۳	۱۹	۶۸/۱	۳۰	۱۳/۵۸
۵	۳/۱۶	۱	۱۷/۶۳۴	۲۰	۱۰۰	۱۰	۱۸/۰۴۵
۶	۴/۶۴	۰/۳	۱۲/۷۴۲	۲۱	۱۰۰	۳۰	۱۷/۱۱۷
۷	۴/۶۴	۱	۱۳/۶۰۷	۲۲	۱۴۷	۳۰	۱۹/۳۲۷
۸	۶/۸۱	۱	۱۱/۸۸۹	۲۳	۲۱۵	۳۰	۲۱/۶۱۴
۹	۱۰	۱	۱۰/۹۲۶	۲۴	۳۱۶	۳۰	۲۱/۲۳۱
۱۰	۱۰	۳	۹/۷۶۰	۲۵	۴۶۴	۳۰	۲۰/۴۴۹
۱۱	۱۴/۷	۱	۱۲/۳۰۸	۲۶	۴۶۴	۱۰۰	۲۱/۵۹۸
۱۲	۱۴/۷	۳	۱۰/۹۲۹	۲۷	۶۸۱	۳۰	۲۰/۳۳۲
۱۳	۲۱/۵	۳	۱۱/۳۲	۲۸	۶۸۱	۱۰۰	۱۹/۴۵۷
۱۴	۳۱/۶	۳	۱۱/۹۸۳	۲۹	۱۰۰۰	۳۰	۲۲/۷۲۸
۱۵	۳۱/۶	۱۰	۱۰/۴۲۹	۳۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۱/۴۳۱

پس از تعیین مدل اولیه شامل مقاومت‌ویژه واقعی و ضخامت لایه‌ها به‌وسیله منحنی‌های

استاندارد، مدل مذکور را به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار IX1D وارد می‌کنیم (شکل (۴-۱)).

Resistivity Model

Surface Elevation: Fitting Error:

☒ Use Depth Instead of Thickness Units:

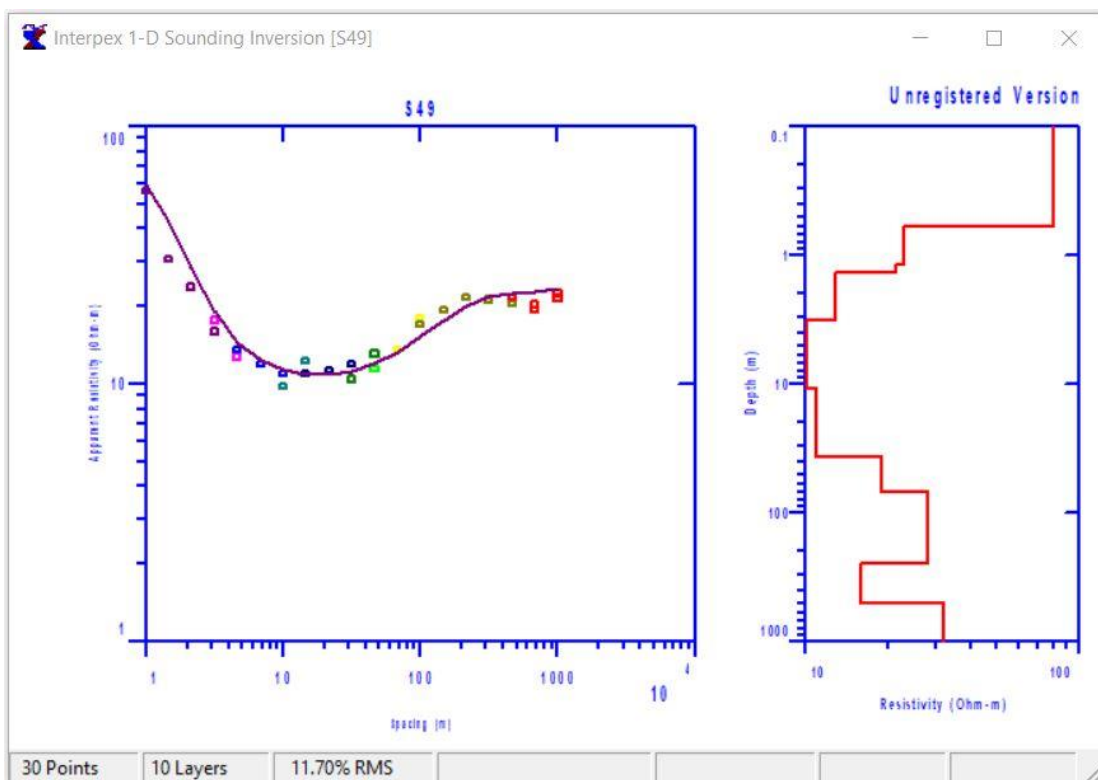
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	80.000	☐	0.60000	0.60000	-999.60	☐
2	23.000	☐	0.58000	1.1800	-1000.2	☐
3	21.500	☐	0.17000	1.3500	-1000.3	☐
4	13.000	☐	1.8500	3.2000	-1002.2	☐
5	10.200	☐	7.8000	11.000	-1010.0	☐
6	11.000	☐	26.000	37.000	-1036.0	☐
7	19.000	☐	32.000	69.000	-1068.0	☐
8	28.000	☐	181.00	250.00	-1249.0	☐
9	16.000	☐	250.00	500.00	-1499.0	☐
10	32.000	☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Column Math:

شکل (۴-۱): مشخصات مدل اولیه (ورودی نرم افزار IX1D) حاصل از تفسیر سونداژ 49F توسط منحنی‌های استاندارد.

نتایج مدل اولیه حاصل از تفسیر به وسیله منحنی‌های استاندارد پس از یک مرحله اعمال مدل سازی پیشرو در نرم افزار IX1D خطای جزر میانگین مربعات (RMS)^۱ آن به مقدار ۱۱/۷ درصد رسیده است که نشان می‌دهد منحنی حاصل از مدل برازش نسبتاً قابل قبولی با داده‌های سونداژ صحرایی برداشت شده دارد (شکل (۴-۲)).

1- Root Mean Square (RMS) Error



شکل (۴-۲): مدل اولیه (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل اولیه بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 49F (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D

پس از اعمال یک مرحله مدل‌سازی وارون، خطای RMS به مقدار ۶/۵ درصد رسیده که با توجه به اطلاعات جانبی مقدار مناسبی است (شکل (۴-۳) و شکل (۴-۴))؛ با تکرار یک مرحله دیگر وارون سازی منحنی مدل از نظر ریاضی با داده‌های سونداژ صحرایی برازش بیشتری میابد و RMS کمتر می‌شود، ولی این عمل مدل را از واقعیت زمین‌شناسی دور می‌سازد.

Resistivity Model

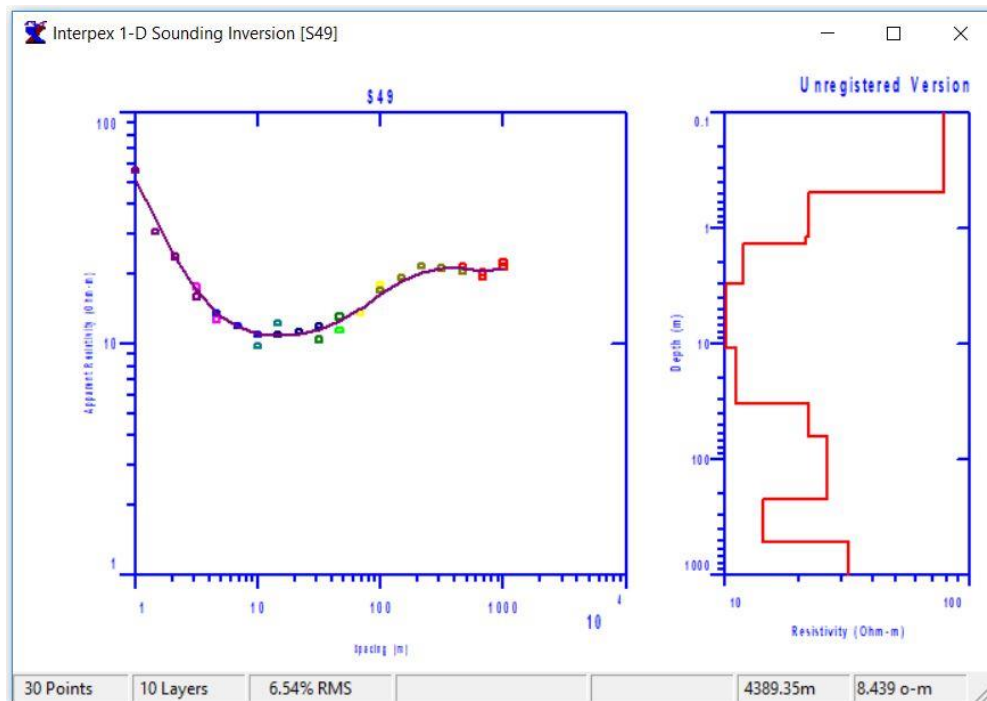
Surface Elevation: -999.00 Fitting Error: 6.5424

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: [meters]

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	78.157	☐	0.49812	0.49812	-999.50	☐
2	21.967	☐	0.68177	1.1799	-1000.2	☐
3	21.491	☐	0.16889	1.3488	-1000.3	☐
4	11.957	☐	1.7112	3.0600	-1002.1	☐
5	10.231	☐	7.9010	10.961	-1010.0	☐
6	11.226	☐	22.184	33.145	-1032.1	☐
7	21.910	☐	30.535	63.680	-1062.7	☐
8	26.061	☐	158.72	222.40	-1221.4	☐
9	14.481	☐	292.21	514.60	-1513.6	☐
10	32.091	☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Multiply By More Iterations

شکل (۴-۳): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده های سونداژ 49F، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۴-۴): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده های سونداژ صحرایی 49F پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

با توجه به نتایج وارون‌سازی حاصل از تفسیر سونداژ 49F، مدل ژئوالکتریکی حاصل یک زمین ۱۰ لایه‌ای است که لایه آخر با ضخامت بی‌نهایت فرض می‌شود؛ به کمک اطلاعات چاه امامزاده عبدالله (قدیم) که در فاصله ۲۸۸ متری این سونداژ قرار دارد و همچنین سطح ایستابی در این چاه که در عمق ۶۹ متری از سطح زمین قرار دارد لایه هشتم از عمق ۶۳/۶ متری و با مقاومت‌ویژه ۲۶ اهم- متری و همچنین ضخامت ۱۵۸ متری لایه آبدار را نشان می‌دهد (شکل (۳-۴)). با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی، مقاومت‌ویژه نسبتاً بالا در سطح ناشی از آبرفت‌های دانه‌درشت است که با افزایش عمق مقدار رس آن افزایش می‌یابد و باعث کاهش مقاومت‌ویژه می‌شود. لایه نهم که از عمق ۲۲۲ متری آغاز می‌شود (شکل (۳-۴))؛ با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و چاه مجاور این سونداژ، سنگ کف از جنس کنگلومرا معرفی می‌شود.

۴-۵-۲ مدل‌سازی و تفسیر یک‌بعدی سونداژ 3230 با نرم‌افزار IX1D

طبق روال ابتدا داده‌های سونداژ 3230 (جدول (۲-۴)) حاصل از برداشت‌های صحرائی با روش مقاومت‌ویژه الکتریکی و با آرایش الکترودی شلومبرژه را به‌صورت منحنی بر روی کاغذ شفاف لگاریتمی رسم می‌کنیم. سپس با استفاده از منحنی‌های استاندارد اصلی و فرعی مدل اولیه را به‌دست می‌آوریم.

جدول (۲-۴): داده‌های سونداژ 3230.

ردیف	AB/2	MN	ρ_a	ردیف	AB/2	MN	ρ_a
۱	۱	۰/۳	۶,۳۶۱۲	۱۶	۴۶/۴	۳	۵,۵۴۶۸
۲	۱/۴۷	۰/۳	۶,۸۴۷۸	۱۷	۴۶/۴	۱۰	۵,۶۳۵
۳	۲/۱۵	۰/۳	۵,۷۳۹۴	۱۸	۶۸/۱	۱۰	۵,۵۲۷۶
۴	۳/۱۶	۰/۳	۵,۱۸۹۲	۱۹	۶۸/۱	۳۰	۵,۱۹۵۹
۵	۳/۱۶	۱	۵,۷۰۳۲	۲۰	۱۰۰	۱۰	۵,۷۱۷۱

۶	۴/۶۴	۰/۳	۴,۹۷۱		۲۱	۱۰۰	۳۰	۵,۲۳۱
۷	۴/۶۴	۱	۵,۴۷۶۸		۲۲	۱۴۷	۳۰	۶,۷۷۵۱
۸	۶/۸۱	۱	۵,۹۱۴۲		۲۳	۲۱۵	۳۰	۷,۷۳۵۹
۹	۱۰	۱	۵,۹۸۵۱		۲۴	۳۱۶	۳۰	۸,۹۸۱۶
۱۰	۱۰	۳	۵,۰۳۵۷		۲۵	۴۶۴	۳۰	۸,۷۸۰۸
۱۱	۱۴/۷	۱	۶,۱۲۹۷		۲۶	۴۶۴	۱۰۰	۹,۲۴۰۸
۱۲	۱۴/۷	۳	۵,۱۳۹۳		۲۷	۶۸۱	۳۰	۸,۴۰۸۸
۱۳	۲۱/۵	۳	۵,۱۱۲۲		۲۸	۶۸۱	۱۰۰	۹,۱۴۹۲
۱۴	۳۱/۶	۳	۵,۲۷۴		۲۹	۱۰۰۰	۳۰	۸,۱۱۳۶
۱۵	۳۱/۶	۱۰	۵,۴۲۷۴		۳۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۹,۰۱۲

به وسیله منحنی‌های استاندارد مدل اولیه ای را که شامل مقاومت ویژه واقعی و ضخامت لایه‌ها

است را به عنوان ورودی به نرم افزار IX1D وارد می کنیم (شکل (۴-۵)).

Resistivity Model

Surface Elevation: 952.00 Fitting Error: 13.877

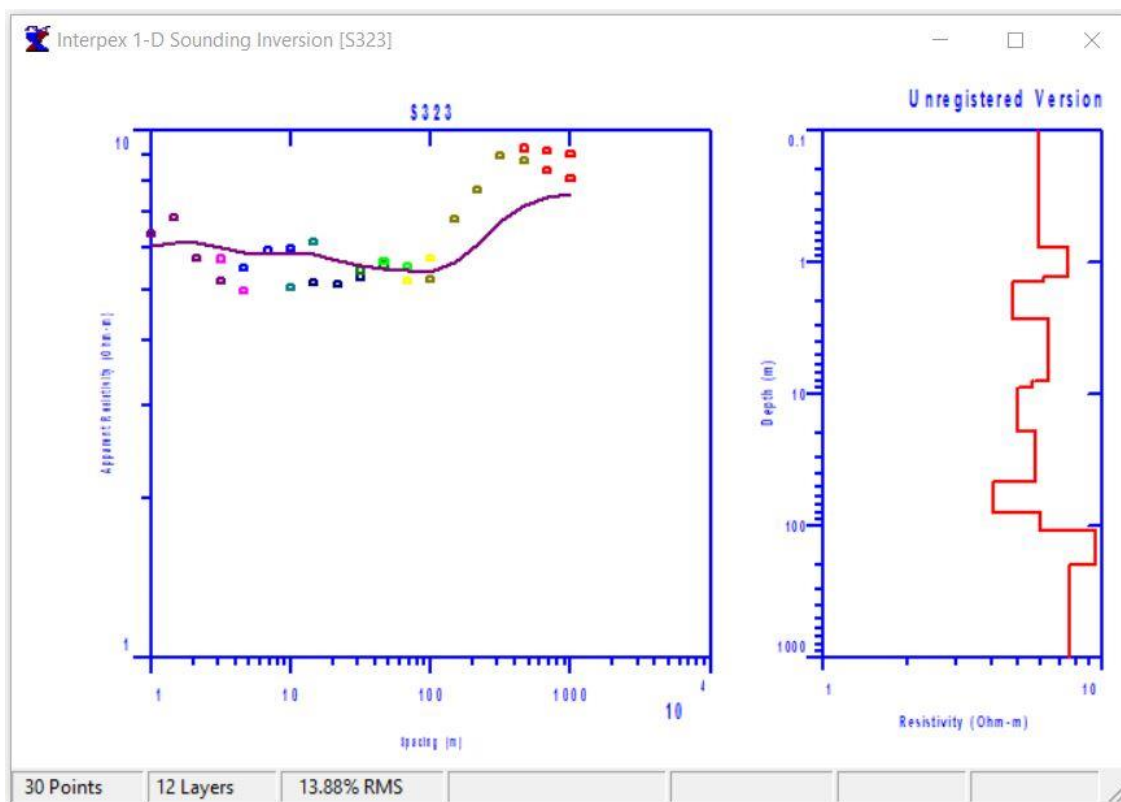
☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	5.9000	☐	0.77000	0.77000	951.23	☐
2	7.5000	☐	0.51000	1.2800	950.72	☐
3	6.2000	☐	0.14000	1.4200	950.58	☐
4	4.8000	☐	1.2800	2.7000	949.30	☐
5	6.4000	☐	5.3000	8.0000	944.00	☐
6	5.6000	☐	1.0000	9.0000	943.00	☐
7	5.0000	☐	10.000	19.000	933.00	☐
8	5.8000	☐	27.000	46.000	906.00	☐
9	4.1000	☐	34.000	80.000	872.00	☐
10	6.0000	☐	28.000	108.00	844.00	☐
11	9.5000	☐	92.000	200.00	752.00	☐
12	7.6000	☐				☐

 Column Math:

شکل (۴-۵): مشخصات مدل اولیه (ورودی نرم افزار IX1D) حاصل از تفسیر سونداژ 3230 توسط منحنی‌های استاندارد.

پس از اعمال یک مرحله مدل سازی پیشرو در نرم افزار IX1D بر روی مدل اولیه حاصل از تفسیر به وسیله منحنی‌های استاندارد اصلی و فرعی خطای RMS آن به مقدار ۱۳/۸ درصد رسیده است که منحنی حاصل از مدل، برازش نسبتاً قابل قبولی با داده‌های سونداژ صحرایی برداشت شده دارد (شکل (۴-۶)).



شکل (۴-۶): مدل اولیه (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل اولیه بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 3230 (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D.

خطای RMS با اعمال یک مرحله مدل‌سازی وارون سونداژ 3230 به مقدار ۶ درصد رسیده که با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی مقدار مناسبی است (شکل (۴-۸))؛ با تکرار یک مرحله دیگر وارون سازی منحنی مدل از نظر ریاضی با داده‌ها برازش بیشتری می‌یابد و خطای RMS آن کمتر می‌شود، ولی این عمل مدل را از واقعیت زمین‌شناسی دور می‌سازد.

Resistivity Model

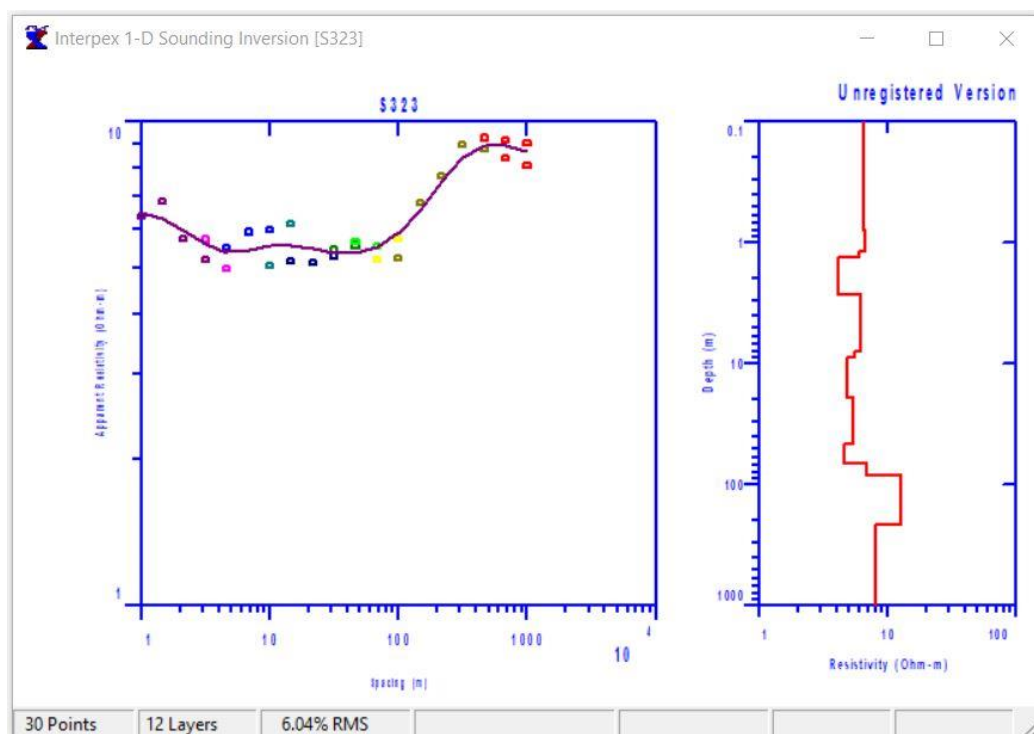
Surface Elevation: 952.00 Fitting Error: 6.0400

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	5.5757	☐	0.49806	0.79492	951.21	☐
2	6.6138	☐	0.40771	1.2026	950.80	☐
3	5.9953	☐	0.10968	1.3123	950.69	☐
4	4.1979	☐	1.4235	2.7358	949.26	☐
5	6.2408	☐	5.1779	7.9138	944.09	☐
6	5.5471	☐	1.0096	8.9233	943.08	☐
7	4.8729	☐	10.108	19.032	932.97	☐
8	5.4378	☐	27.494	46.526	905.47	☐
9	4.6693	☐	20.725	67.251	884.75	☐
10	6.8939	☐	18.019	85.269	866.73	☐
11	12.639	☐	129.91	215.18	736.82	☐
12	8.1183	☐				☐

 Column Math:

شکل (۴-۷): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده های سونداژ 3230، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۴-۸): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده های سونداژ صحرایی 3230 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

مدل ژئوالکتریکی حاصل از نتایج مدل سازی وارون سونداژ 3230، یک زمین ۱۲ لایه است که لایه آخر با ضخامت بی نهایت فرض می شود. با بهره گیری از اطلاعات چاه قورخ تپه (جایگزین) که در فاصله ۱۲۱ متری این سونداژ قرار دارد و همچنین سطح ایستابی در این چاه که در عمق ۳۶ متری از سطح زمین است؛ لایه نهم از عمق ۴۶ متری با مقاومت ویژه ۴/۶ اهم متری و با ضخامت حدود ۴۰ متری لایه آبدار را نمایش می دهند (شکل (۴-۷)). با استفاده از اطلاعات زمین شناسی مقاومت ویژه نسبتاً پایین در سطح و در ادامه تا عمق حدود ۱۰۰ متر ناشی از وجود درصد رس بالا درون آبرفت است. لایه یازدهم که از عمق ۸۵ متری آغاز می شود، سنگ کف از جنس کنگلومرا است.

۴-۵-۳ مدل سازی و تفسیر یک بعدی سونداژ 49F با استفاده از

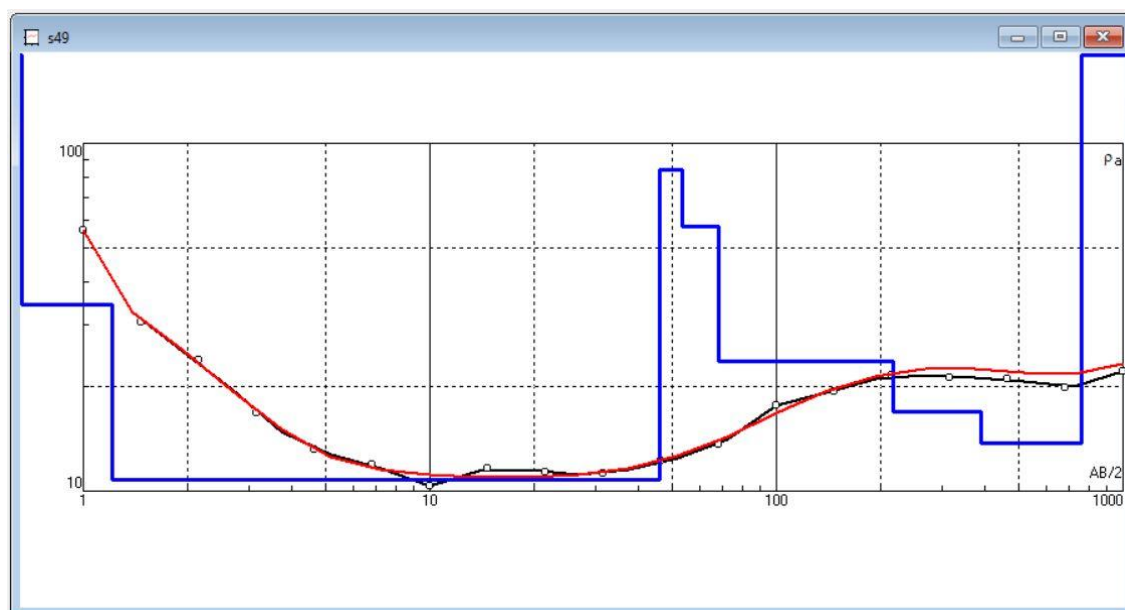
نرم افزار IPI2WIN

نرم افزار IPI2WIN در واقع نرم افزار مدل سازی وارون یک بعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی است که فقط نمایش دوبعدی دارد، علاوه بر این، برخلاف نرم افزار IX1D برای مدل سازی نیازمند مدل اولیه نیست.

برای مدل سازی ابتدا مقادیر مقاومت ویژه را برحسب فاصله الکترودی ($AB/2$) و فاصله بین الکترودهای پتانسیل (MN) وارد این نرم افزار می کنیم و سپس مدل سازی را انجام می دهیم. شکل (۴-۹) نتایج مدل سازی وارون داده های سونداژ 49F به وسیله نرم افزار IPI2WIN را نشان می دهد.

Error = 3.75%				
N	ρ	h	d	Alt
1	1355	0.199	0.199	-0.1989
2	34.2	1.01	1.21	-1.209
3	10.8	44.7	45.9	-45.92
4	83.9	7.43	53.4	-53.36
5	57.8	14.6	67.9	-67.93
6	23.7	149	217	-217.2
7	16.9	172	389	-389.3
8	13.7	371	760	-759.8
9	260			

شکل (۴-۹): مشخصات مدل وارون حاصل از وارون‌سازی داده‌های سونداژ 49F به وسیله نرم‌افزار IPI2WIN



شکل (۴-۱۰): مدل وارون (آبی)، منحنی حاصل از مدل وارون (قرمز) و داده‌های صحرائی حاصل از سونداژ 49F (مشکی) به وسیله نرم‌افزار IPI2WIN

مدل وارون حاصل از مدل‌سازی به وسیله این نرم‌افزار یک مدل ژئوالکتریکی ۹ لایه‌ای را نشان می‌دهد که لایه آخر با ضخامت بی‌نهایت فرض می‌شود. منحنی حاصل از مدل‌سازی برازش مناسبی با

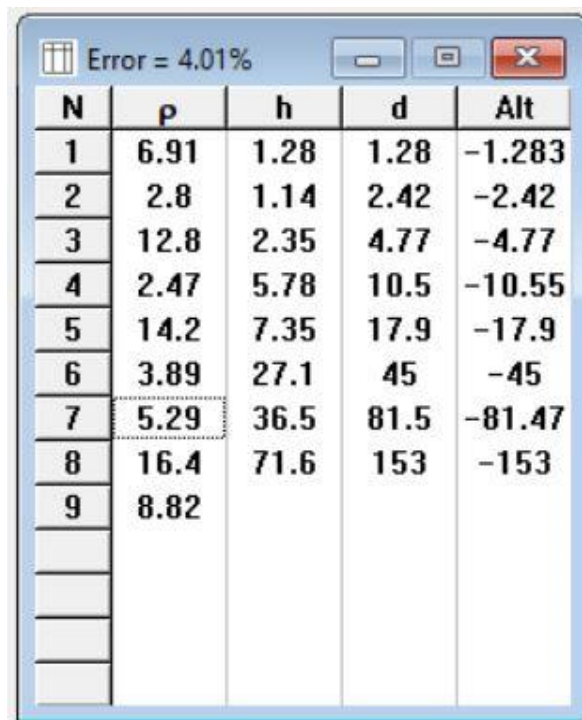
منحنی داده‌های صحرایی دارد و خطای RMS آن به ۳/۷۵ درصد رسیده است. نتایج مدل‌سازی وارون حاصل از این نرم‌افزار تطابق نسبتاً خوبی با نتایج حاصل از وارون‌سازی به‌وسیله نرم‌افزار IX1D دارد. در نهایت لایه ششم که از عمق ۶۷/۹ آغاز می‌شود، ضخامتی در حدود ۱۵۰ متر دارد و مقاومت‌ویژه آن ۲۳/۷ اهم‌متر است، لایه آبدار معرفی می‌شود (شکل (۴-۹)).

۴-۵-۴ مدل‌سازی و تفسیر یک‌بعدی سونداژ 3230 با استفاده از

IPI2WIN نرم‌افزار

طبق روال مقادیر مقاومت‌ویژه، $(AB/2)$ و (MN) وارد نرم‌افزار کرده و فرایند مدل‌سازی را آغاز

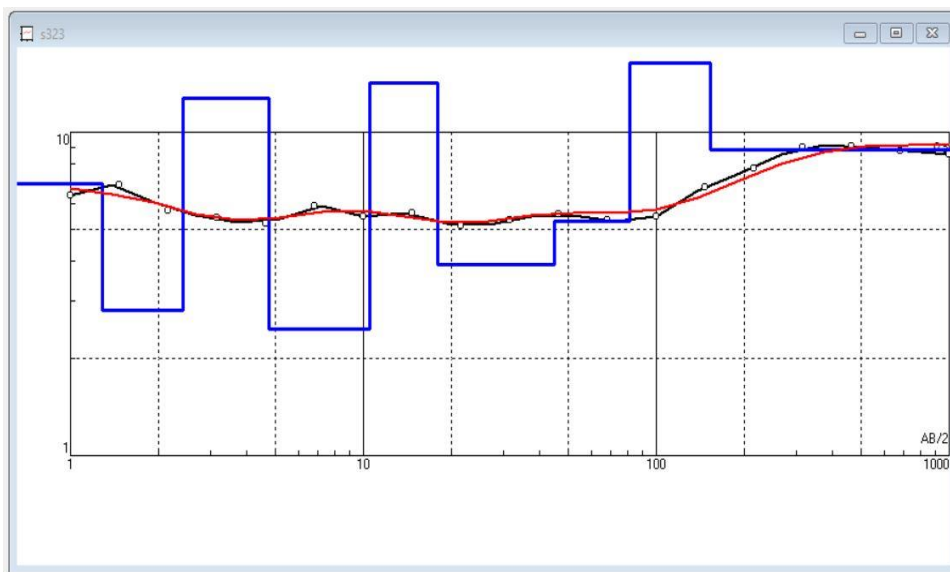
می‌کنیم.



N	p	h	d	Alt
1	6.91	1.28	1.28	-1.283
2	2.8	1.14	2.42	-2.42
3	12.8	2.35	4.77	-4.77
4	2.47	5.78	10.5	-10.55
5	14.2	7.35	17.9	-17.9
6	3.89	27.1	45	-45
7	5.29	36.5	81.5	-81.47
8	16.4	71.6	153	-153
9	8.82			

شکل (۴-۱۱): مشخصات مدل وارون حاصل از وارون‌سازی داده‌های سونداژ 3230 به‌وسیله نرم‌افزار

IPI2WIN



شکل (۴-۱۲): مدل وارون (آبی)، منحنی حاصل از مدل وارون (قرمز) و داده‌های صحرایی حاصل از سونداژ 3230 (مشکی) به وسیله نرم افزار IPI2WIN.

پس از انجام فرایند مدل سازی، مدل ژئوالکتریکی حاصل از مدل سازی وارون بر روی داده‌های سونداژ 3230 به وسیله این نرم افزار یک زمین ۹ لایه‌ای را نشان می‌دهد، که ضخامت لایه آخر بی نهایت فرض می‌شود. منحنی داده‌های صحرایی با منحنی حاصل از مدل سازی برازش مناسبی دارد و خطای RMS آن به ۴ درصد رسیده است. نتایج مدل سازی وارون حاصل از این نرم افزار تطابق نسبتاً خوبی با نتایج حاصل از وارون سازی به وسیله نرم افزار IX1D دارد. لایه هفتم که از عمق ۴۵ متری آغاز می‌شود، ضخامتی در حدود ۳۶/۵ متر دارد و مقاومت ویژه آن در حدود ۵/۲ اهم متر است، لایه آبدار معرفی می‌شود (شکل (۴-۱۱)).

حال به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از دو نرم افزار IX1D و IPI2WIN برای سونداژهای 49F و 3230 می‌پردازیم که نتایج این مقایسه در جدول (۴-۳) نشان داده شده است.

جدول (۳-۴): مقایسه نتایج سونداژهای 49F و 323O.

سونداژ 323O						سونداژ 49F					
نرم افزار IPI2WIN			نرم افزار IX1D			نرم افزار IPI2WIN			نرم افزار IX1D		
خطای (RMS): ۴ درصد			خطای (RMS): ۶ درصد			خطای (RMS): ۳/۷ درصد			خطای (RMS): ۶/۵ درصد		
مشخصات لایه آبدار			مشخصات لایه آبدار			مشخصات لایه آبدار			مشخصات لایه آبدار		
عمق (D)	مقاومت ویژه (ρ)	ضخامت (T)	عمق (D)	مقاومت ویژه (ρ)	ضخامت (T)	عمق (D)	مقاومت ویژه (ρ)	ضخامت (T)	عمق (D)	مقاومت ویژه (ρ)	ضخامت (T)
۳۶/۵	۵/۲	۴۵	۴۰	۴/۶	۴۶	۱۵۰	۲۳/۷	۶۷/۹	۱۵۸	۲۶	۶۳/۶

نتایج هر دو نرم افزار برای هر دو سونداژ قابل قبول است؛ اما با توجه به این که نرم افزار IX1D برخلاف نرم افزار IPI2WIN مدل اولیه حاصل از تفسیر سونداژها به وسیله منحنی های استاندارد را دریافت می کند، پس نتایج آن قابل اعتمادتر است (جدول (۳-۴)).

جدول (۴-۴) خطای نسبی بین نتایج تفسیر سطح ایستابی در سونداژهای 49F، 53F، 86K، 305L و 319N با سطح ایستابی واقعی اندازه گیری شده در چاه های پیژومتر نزدیک این سونداژها را نشان می دهد. همان طور که در جدول مشاهده می شود، با توجه به فاصله بین هر سونداژ با چاه مجاورش، نتایج تخمین سطح ایستابی حاصل از تفسیر هر یک از سونداژهای مذکور مقدار خطای نسبی قابل قبولی (کمتر از ۱۰ درصد) را نشان می دهد.

جدول (۴-۴): خطای نسبی تخمین سطح ایستابی حاصل از تفسیر ۵ سونداژ الکتریکی مجاور چاه های آب در دشت مورد مطالعه.

سونداژ	نام چاه	فاصله بین سونداژ و چاه (برحسب متر)	عمق سطح ایستابی تفسیر (برحسب متر)	عمق سطح ایستابی چاه (برحسب متر)	خطای نسبی (درصد)
49F	امامزاده عبدالله (قدیم)	۲۸۸	۶۳/۶	۶۹/۵	۸/۵
53F	قلعه عزیزخان (قدیم)	۵۶۳	۶۱/۳	۵۶/۲	۹
86K	مجید آباد	۳۹۹	۱۸	۱۷/۹	۰/۵
305L	قره چای (جدید)	۳۸۹	۵۴	۵۸/۹	۸/۳
319N	اکبر آباد	۴۸۳	۳۲/۲	۳۱/۹	۰/۹

فصل ۵: مدل سازی و تفسیر دوبعدی سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی در دشت مورد مطالعه

۵-۱ مقدمه

یکی از محدودیت‌های روش سونداژزنی مقاومت‌ویژه، عدم پاسخ مناسب آن به تغییرات افقی مقاومت‌ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین است. با مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌توان تصویر دقیق‌تری را از تغییرات آن، هم در امتداد قائم و هم در امتداد افقی، در طول خط برداشت به دست آورد. در بیشتر مواقع، خصوصاً در هنگام بررسی ساختارهای طویل زمین‌شناسی، این روش مدل‌سازی، روشی مناسب و منطقی می‌باشد [حجت، ۱۳۸۲].

۵-۲ تفسیر دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه به روش سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته

روش سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته^۱ که به صورت مختصر به روش CVES معروف است، از تعدادی سونداژ الکتریکی تشکیل شده که در طول یک پروفیل خطی برداشت شده‌اند و در نتیجه می‌توانند به صورت دوبعدی نیز تفسیر شوند [Molano et al, 1990]. در این روش، هدف اولیه بررسی زمین به صورت یک‌بعدی است و برداشت در آن بیشتر با آرایه شلومبرژه انجام می‌شود. با برداشت خطی چندین سونداژ امکان تفسیر دوبعدی میسر خواهد شد. به دلیل حساسیت کم آرایه شلومبرژه به تغییرات جانبی، بهتر است مدل‌سازی به وسیله این آرایه را یک مدل‌سازی ۱/۵ بعدی دانست. از آنجا که آرایه شلومبرژه در نشان دادن تغییرات هموار مقاومت‌ویژه، قوی‌تر از دیگر آرایه‌ها است، روش برداشت CVES در زمین‌هایی با تغییرات عمقی هموار نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد [Muiuane & Pedersen, 1999].

1- Continous Vertical Electrical Sounding (CVES)

۵-۳ مدل سازی و تفسیر دوبعدی داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه

الکتریکی با نرم‌افزارهای Res2Dinv و ZondRes2D

نرم‌افزار Res2Dinv یک برنامه رایانه‌ای است که به کمک آن می‌توان مدل‌سازی وارون دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و قطبش القایی (IP)^۱ برداشت شده با آرایه‌های مختلف الکترودی از جمله آرایه شلومبرژه انجام داد و مقاطع دوبعدی مقاومت‌ویژه در طول هر خط برداشت را تهیه کرد. این نرم‌افزار نیاز به مدل اولیه ندارد و پس از وارد کردن داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی به نرم‌افزار Res2Dinv، نرم‌افزار به‌طور خودکار یک مدل دوبعدی مقاومت‌ویژه الکتریکی برحسب عمق با استفاده از روش بهینه‌سازی کمترین مربعات غیرخطی را ایجاد می‌کند. نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی نشان داده شده در این پایان‌نامه با ۵ مرحله تکرار انجام شده است. با توجه به تعداد بالای خطوط برداشت فقط تعدادی آن‌ها در این پایان‌نامه ارائه می‌شود.

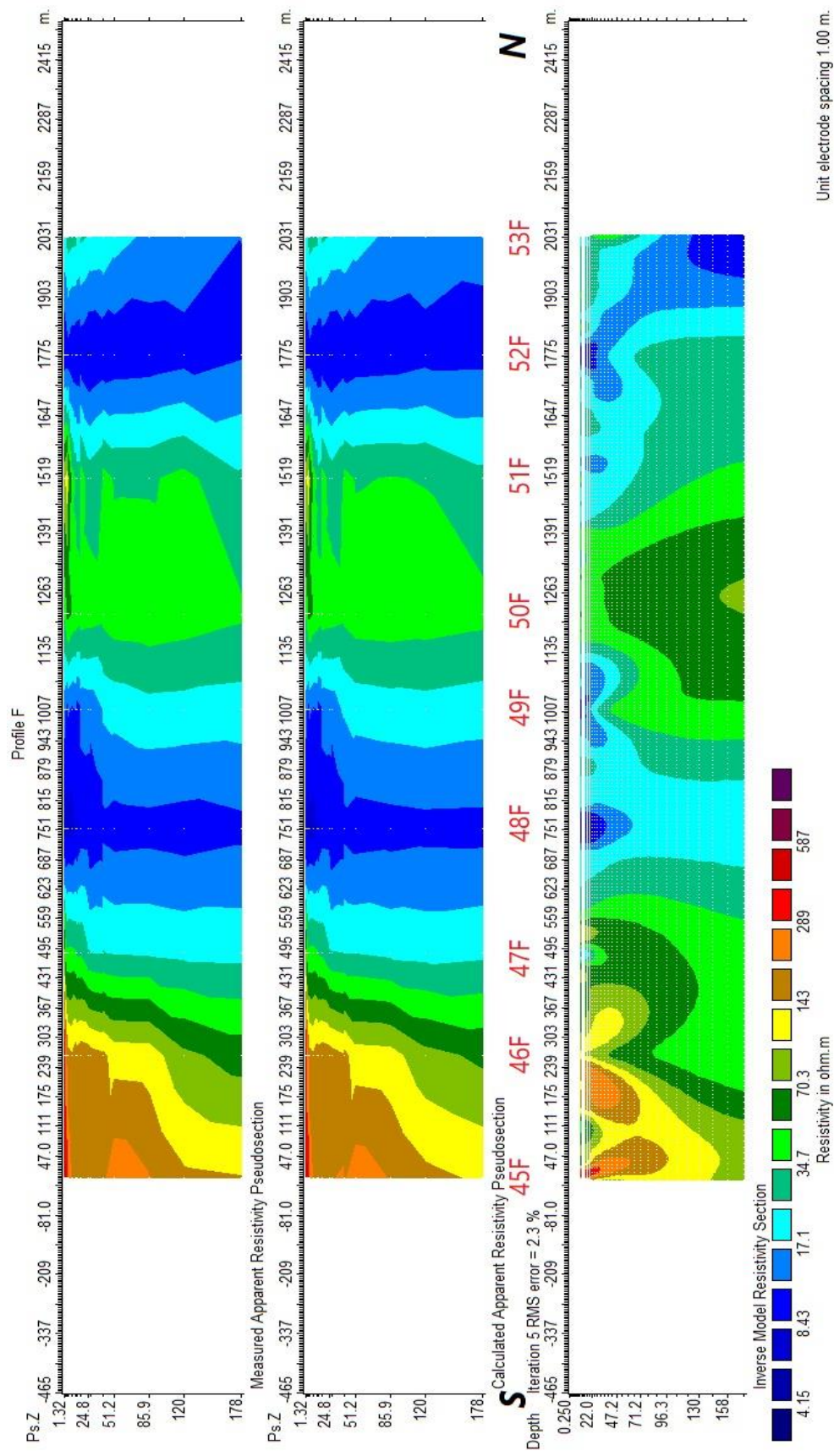
نرم‌افزار ZondRes2D یک برنامه رایانه‌ای برای مدل‌سازی ۱/۵ بعدی داده‌های برداشت‌شده با استفاده از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و قطبش القایی (IP) می‌باشد. در این نرم‌افزار روش اجزاء محدود به‌عنوان یک ابزار ریاضی برای حل مسائل مستقیم (پیشرو) استفاده می‌شود. همچنین روش حداقل مربعات با قید منظم سازی برای حل مسائل معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش امکان دستیابی به مقادیر مقاومت‌ویژه و توزیع پتانسیل هموارتر را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار از تمامی آرایه‌ها پشتیبانی می‌کند و قابلیت ویرایش و حذف داده‌ها به‌آسانی وجود دارد. استفاده از آن بسیار ساده است و قابلیت بسیار بالایی در نمایش مقاطع حاصل، به‌منظور ارزیابی بیشتر جهت تفسیر بهتر و دقیق‌تر را دارا می‌باشد. [Kaminsky, 2010].

1- Induced Polarization (IP)

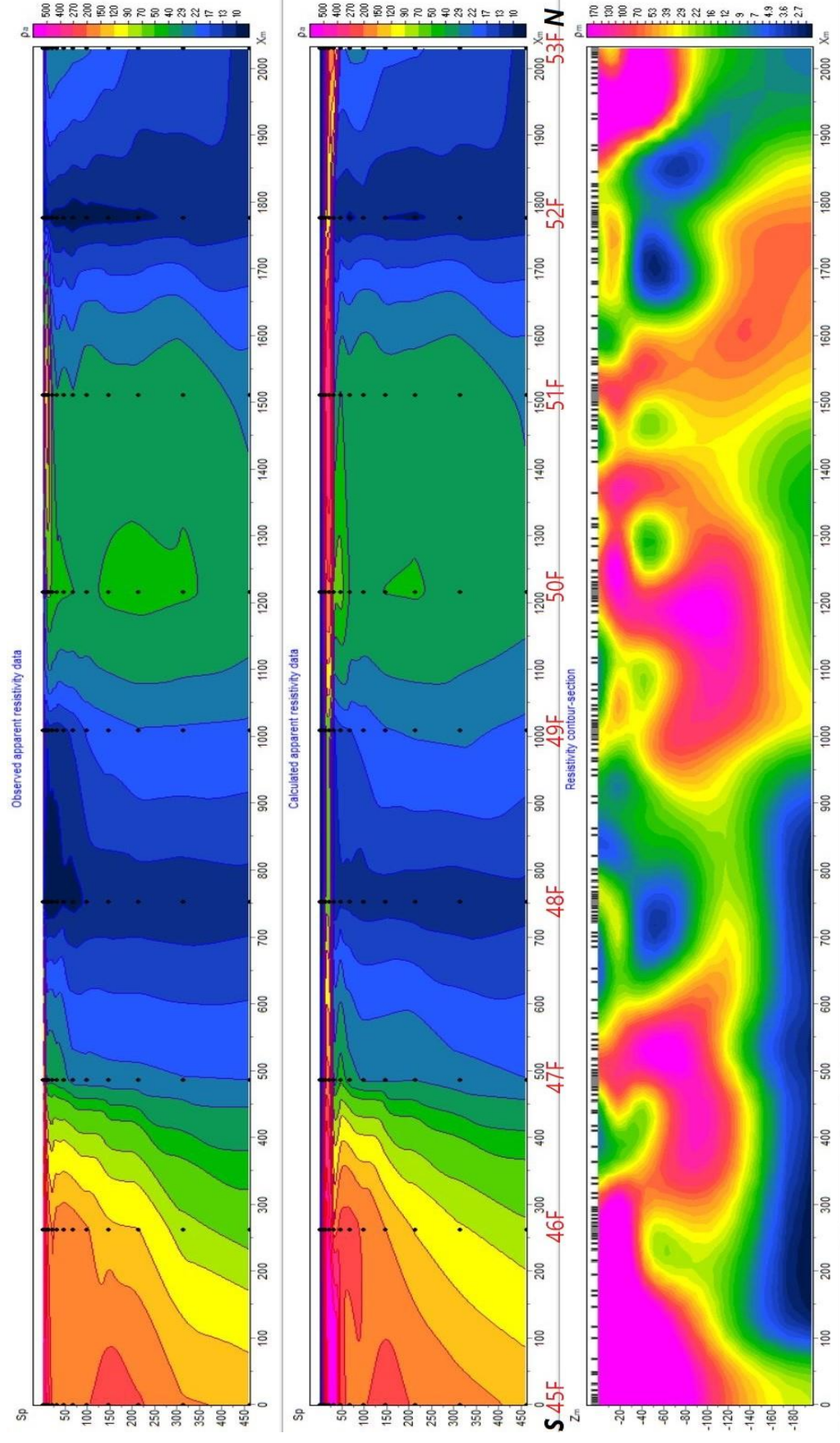
۵-۳-۱ نتایج حاصل از مدل سازی و تفسیر پروفیل F

شکل (۵-۱) مقاطع حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه ظاهری ۹ سونداژ الکتریکی در یک خط برداشت به طول ۲۰۳۱۴ متر را که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده، نشان می دهد. در این شکل، به ترتیب از بالا به پایین شبه مقطع مقادیر اندازه گیری شده، شبه مقطع مقادیر محاسبه ای و در نهایت مقطع حاصل از مدل سازی وارون را نشان می دهد. خط برداشت به صورت شمالی-جنوبی بوده و قسمت راست تصویر شمال را نمایش می دهد. در قسمت جنوبی خط برداشت و در محدوده بین سونداژهای 45F و 46F مقاومت ویژه لایه آبدار به دلیل وجود پادگانه های آبرفتی جدید و ذرات دانه درشت، نسبتاً بالا و بین ۱۳۰ تا ۱۸۰ اهم متر است و همچنین سطح ایستابی در محل این سونداژها به ترتیب در عمق ۳۷ و ۶۸ متری قرار دارد. در محل سونداژهای 47F، 48F و 49F با عمق سطح ایستابی به ترتیب ۳۷، ۵۰ و ۶۷ متر و همچنین در محل سونداژهای 51F، 52F و 53F با عمق سطح ایستابی به ترتیب ۳۵، ۵۲ و ۶۱ متر، مقاومت ویژه لایه آبدار به طور محسوسی کاهش می یابد و به مقدار ۲۰ تا ۲۵ اهم متر می رسد؛ که ناشی از رسوبات دانه ریز و افزایش درصد رس است. در محدوده پیرامون سونداژ 50F به دلیل وجود رسوبات دانه درشت بستر رودخانه ای مقاومت ویژه افزایش می یابد.

شکل (۵-۲) مقطع حاصل از مدل سازی داده های خط برداشت پروفیل F در نرم افزار ZondRes2D را نشان می دهد (مقطع زیرین). همان طور که ملاحظه می شود هم خوانی خوبی بین این مقطع با مقطع حاصل از مدل سازی به وسیله نرم افزار Res2Dinv دیده می شود. به دلیل عمق مدل سازی بیشتر، در محدوده سونداژهای 45F تا 49F و در عمق حدود ۱۴۰ متری احتمال وجود آبخوان محصور وجود دارد.



شکل (۵-۱): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل F که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).

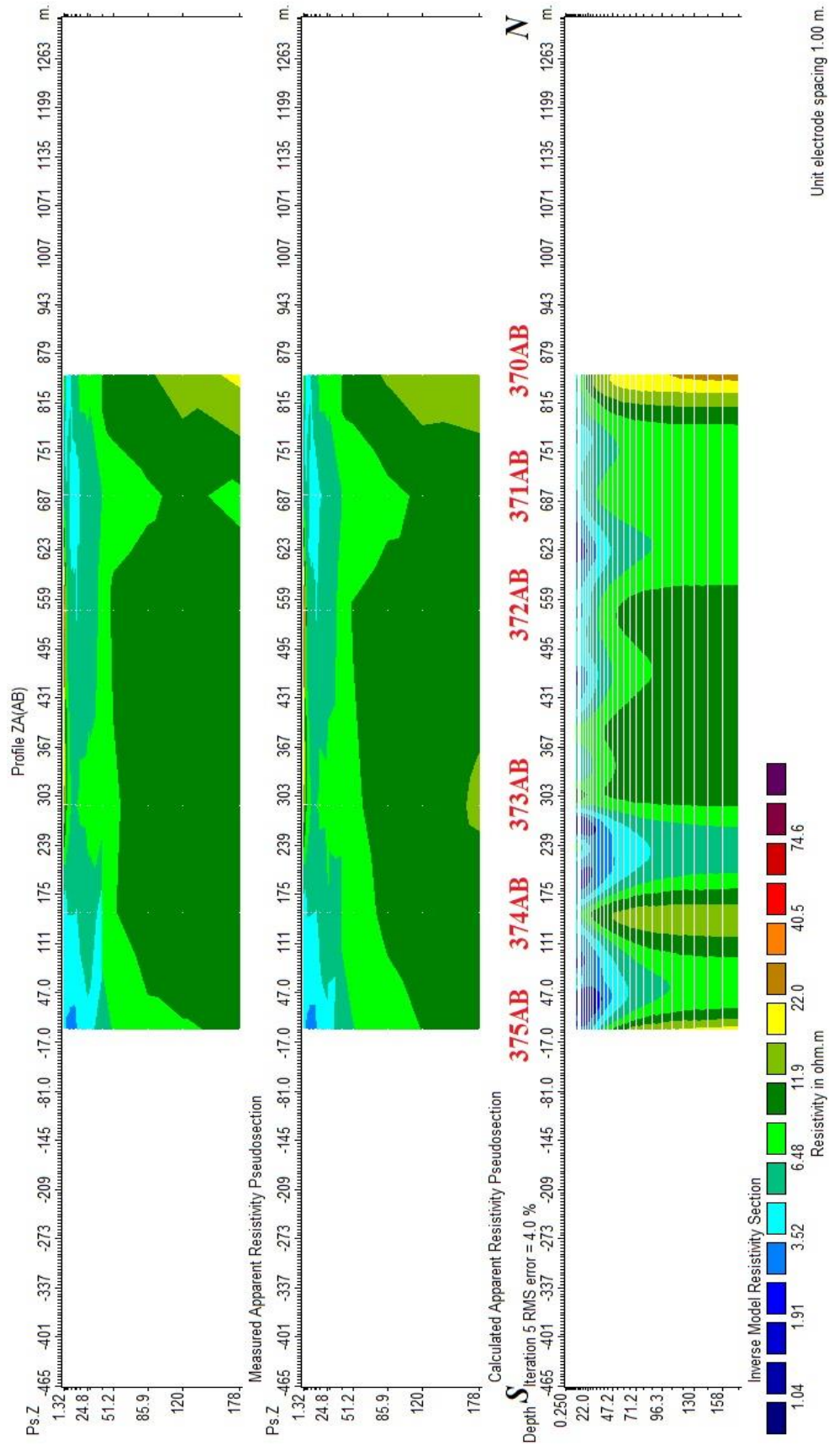


شکل (۵-۲): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل F که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی برابر مقادیر در شکل است).

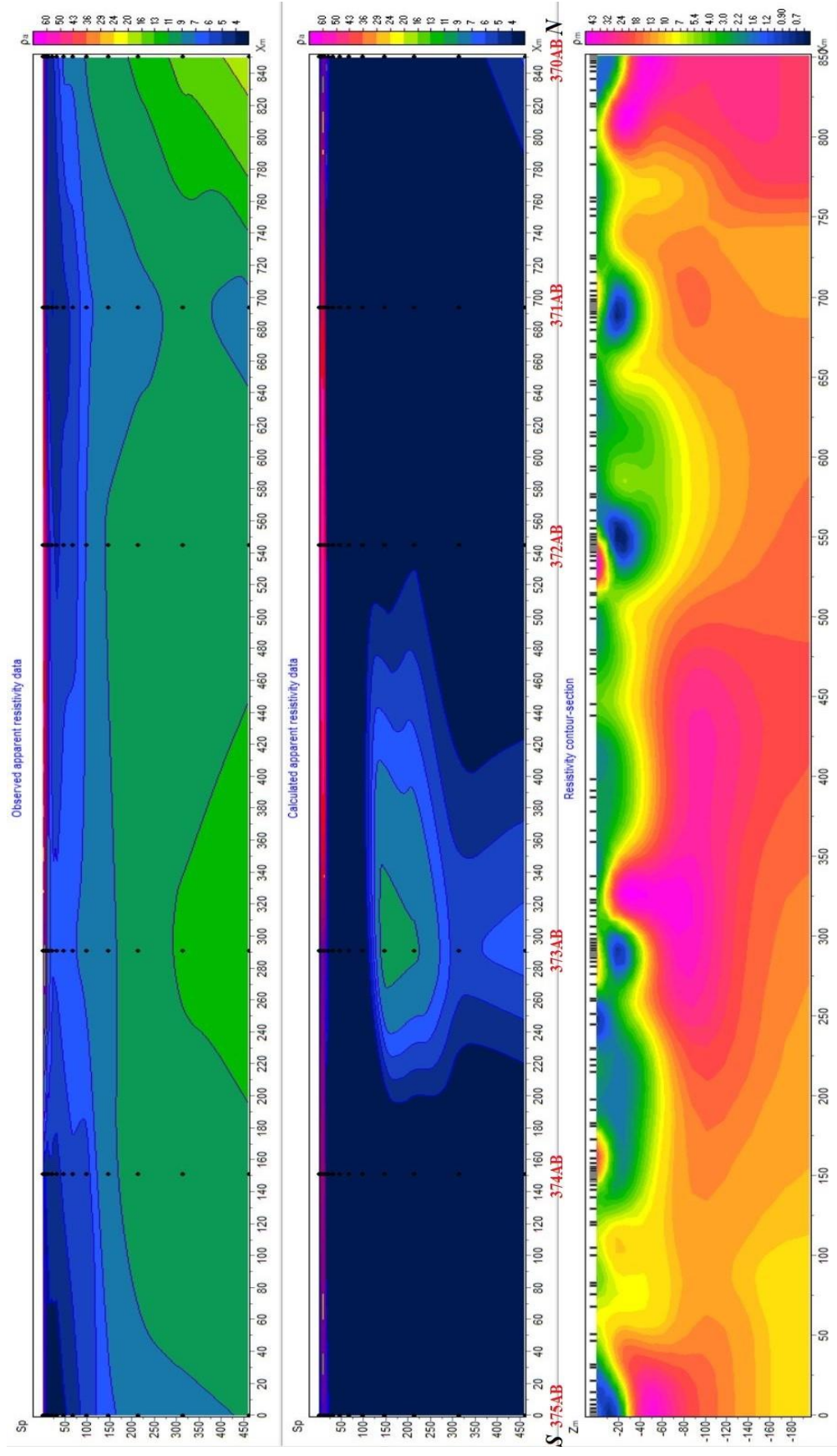
۵-۳-۲ نتایج حاصل از مدل سازی و تفسیر پروفیل ZA(AB)

شکل (۵-۳) مقاطع حاصل از وارون سازی داده های مقاومت ویژه ظاهری ۶ سونداژ الکتریکی در یک خط برداشت به طول ۸۵۱۵ متر را در نرم افزار Res2Dinv نشان می دهد، در این شکل مقطع حاصل از مدل سازی وارون مقطع زیرین است. خط برداشت به صورت شمالی - جنوبی بوده و قسمت راست تصویر شمال را نمایش می دهد. عمق سطح ایستابی تغییرات نسبتاً اندکی را در طول خط برداشت داشته و از جنوب به سمت شمال به ترتیب، در محل سونداژ 375AB لایه آبدار در عمق ۲۸ متری با مقاومت ویژه ۴ اهم متر، در محل سونداژ 374AB لایه آبدار در عمق ۱۶ متری با مقاومت ویژه ۴ اهم متر، در محل سونداژ 373AB لایه آبدار در عمق ۴۸ متری با مقاومت ویژه ۴ اهم متر، در محل سونداژ 372AB لایه آبدار در عمق ۳۲ متری با مقاومت ویژه ۴ اهم متر، در محل سونداژ 371AB لایه آبدار در عمق ۴۳ متری با مقاومت ویژه ۷ اهم متر و در نهایت در محل سونداژ 370AB لایه آبدار در عمق ۳۰ متری با مقاومت ویژه ۷ اهم متر دیده می شود. این پروفیل به طور کامل در دشت رسی واقع شده است. به جز در محدوده ۳۲۰۰ تا ۳۷۰۰ متری که ذرات دانه درشت بستر رودخانه را تشکیل می دهد، در سایر نقاط تغییرات ساختاری محسوسی مشاهده نمی شود و فقط در سطح زمین مقدار رس بیشتر است.

پس از مدل سازی داده های خط برداشت پروفیل AB در نرم افزار ZondRes2D، نتایج حاصل از مدل سازی این نرم افزار همخوانی خوبی با مقطع حاصل از مدل سازی با نرم افزار Res2Dinv دارد. مقطع حاصل از مدل سازی به وسیله نرم افزار ZondRes2D، محدوده بستر رودخانه را با مقاومت ویژه نسبتاً بالاتر به خوبی نمایش می دهد و آبخوان با مقاومت ویژه میانگین ۷ اهم متر قابل مشاهده است (شکل (۵-۴)).



شکل (۵-۳): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل ZA(AB) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



شکل (۴-۵): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل ZA(AB) که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).

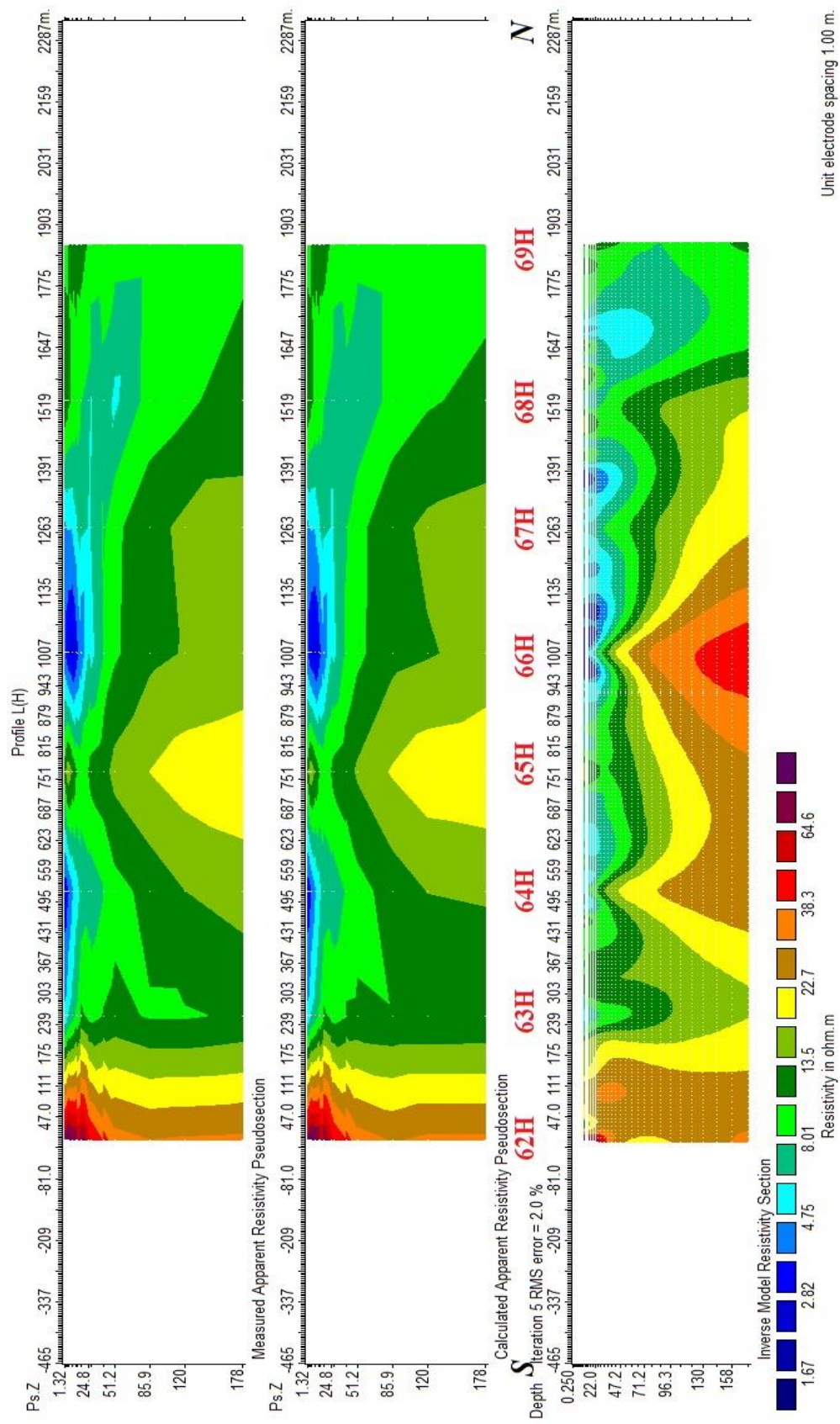
۵-۳-۳ نتایج حاصل از مدل سازی و تفسیر پروفیل $L(H)$

شکل (۵-۵) مقاطع حاصل از وارون سازی داده های مقاومت ویژه ظاهری ۸ سونداژ الکتریکی در یک خط برداشت به طول ۱۸۶۱۴ متر را که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده، نشان می دهد. خط برداشت جهت شمالی - جنوبی دارد و قسمت راست تصویر شمال را نمایش می دهد. مقطع حاصل از مدل سازی وارون در قسمت زیرین شکل قرار دارد. با توجه به شکل، عمق سطح ایستابی تغییرات نسبتاً اندکی را در طول خط برداشت داشته و از جنوب به سمت شمال به ترتیب، در محل سونداژ $62L(H)$ لایه آبدار در عمق ۲۰ متری با مقاومت ویژه ۶۶ اهم متر، در محل سونداژ $63L(H)$ لایه آبدار در عمق ۲۲ متری با مقاومت ویژه ۱۲ اهم متر، در محل سونداژ $64L(H)$ لایه آبدار در عمق ۱۹ متری با مقاومت ویژه ۹ اهم متر، در محل سونداژ $65L(H)$ لایه آبدار در عمق ۴۱ متری با مقاومت ویژه ۱۲ اهم متر، در محل سونداژ $66L(H)$ لایه آبدار در عمق ۲۲ متری با مقاومت ویژه ۵ اهم متر، در محل سونداژ $67L(H)$ لایه آبدار در عمق ۳۱ متری با مقاومت ویژه ۷ اهم متر، در محل سونداژ $68L(H)$ لایه آبدار در عمق ۲۳ متری با مقاومت ویژه ۶ اهم متر و در نهایت در محل سونداژ $69L(H)$ لایه آبدار در عمق ۲۴ متری با مقاومت ویژه ۷ اهم متر دیده می شود. در ۱۰۰۰ متری ابتدایی خط برداشت پادگانه - های آبرفتی جدید مشاهده می شود که احتمالاً در اعماق بیشتر گسترش جانبی داشته و به محدوده مرکزی خط برداشت منتهی می شود. در حدفاصل بین ۸۵۰۰ الی ۹۰۰۰ متری از ابتدای خط برداشت رسوبات دانه درشت بستر رودخانه ای وجود دارد و همچنین در سایر نقاط درصد بالایی از رس در سطح، با مقاومت ویژه میانگین ۳ اهم متر مشاهده می شود.

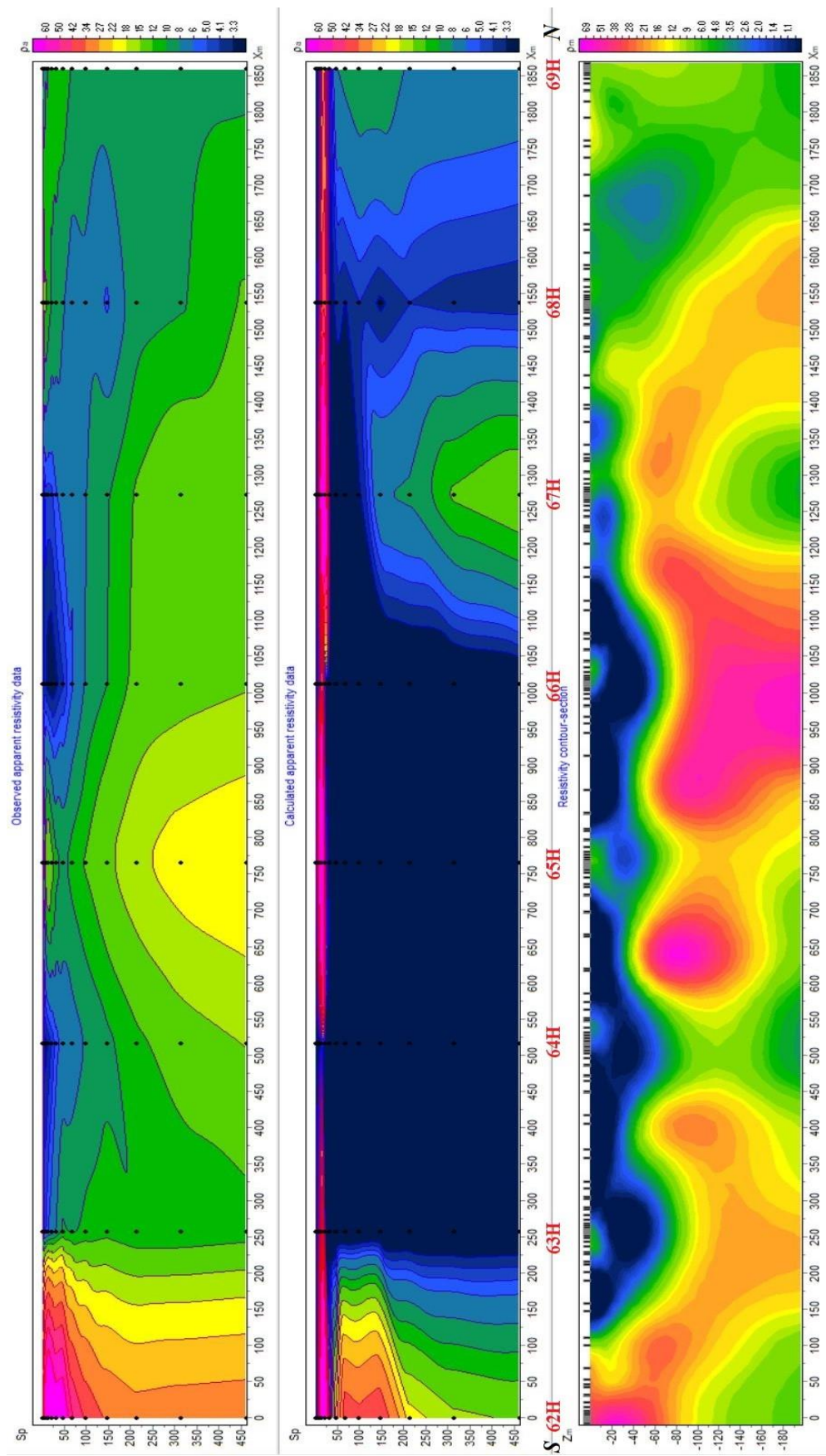
شکل (۵-۶) نتایج حاصل از مدل سازی داده های خط برداشت پروفیل $L(H)$ به وسیله نرم افزار ZondRes2D را نشان می دهد؛ همان طور که ملاحظه می شود ارتباط خوبی بین این مقطع با مقطع حاصل از مدل سازی وارون با نرم افزار Res2Dinv وجود دارد. همان طور که در شکل مشخص است،

مقاومت ویژه نسبتاً پایین در سطح نشان‌دهنده درصد بالای رس در اکثر نقاط خط برداشت است.

آبخوان با مقاومت ویژه میانگین ۱۰ میلی‌اهم قابل مشاهده است.

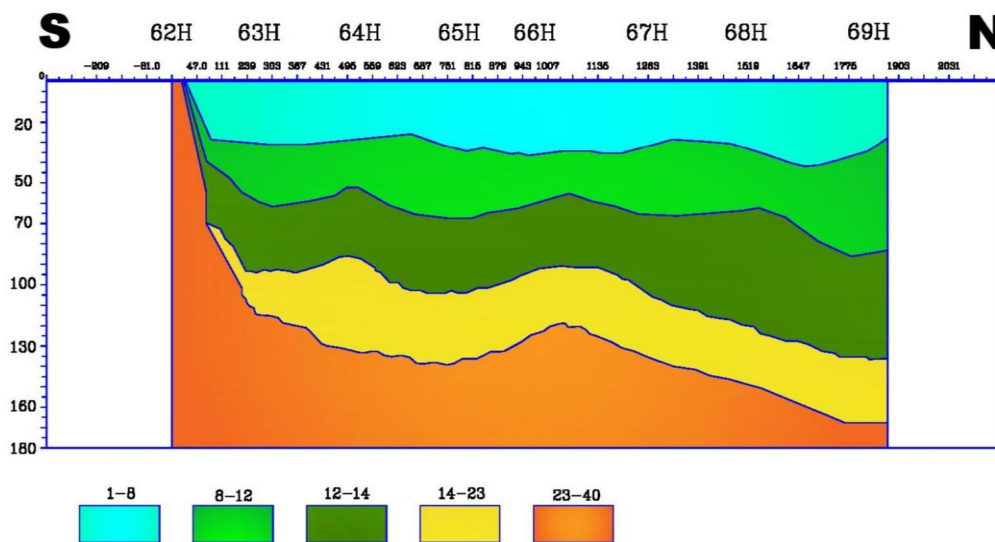


شکل (۵-۵): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل L(H) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



شکل (۵-۶): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $L(H)$ که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقدار در شکل است).

پروفیل $L(H)$ به صورت لایه‌ای هم مورد بررسی قرار گرفت که لایه آبدار در اکثر نقاط پروفیل در عمق حدود ۲۰ متری از سطح زمین با مقاومت ویژه حدود ۷ تا ۸ اهم‌متر در شکل (۷-۵) قابل مشاهده است. لایه سطحی با مقاومت ویژه حدود ۱ تا ۶ اهم‌متر به عنوان لایه کم‌مقاومت شناخته می‌شود و دلیل آن وجود درصد نسبتاً قابل توجهی رس است. در سمت چپ تصویر (قسمت جنوبی خط برداشت) پادگانه‌های آبرفتی جدید با مقاومت ویژه حدود ۳۰ تا ۳۵ اهم‌متری قابل مشاهده است که احتمالاً در عمق تا مناطق مرکزی دشت هم گسترش داشته است (شکل (۷-۵)).



شکل (۷-۵): مقطع لایه‌ای پروفیل $L(H)$

۴-۵ نتیجه‌گیری

بیشتر سونداژها در آبرفت برداشت شده‌اند، هر چه از اطراف به سمت شرق دشت پیش می‌رویم، مقاومت ویژه کاهش می‌یابد و دلیل این امر افزایش درصد رس می‌باشد. علاوه بر این‌ها در بیشتر سونداژها در فواصل الکتروودی بالا مقاومت ویژه بسیار پایین است و احتمال حضور سنگ‌بستر رسی وجود دارد. مقاومت ویژه در سونداژهایی که در بستر رودخانه قره‌چای برداشت شده‌اند، بالاست و دلیل

آن ذرات دانه درشت آبرفتی است. هر چه از غرب به سمت شرق دشت پیش می‌رویم عمق سطح ایستابی کاهش می‌یابد.

فصل ۷ : تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر داده‌های
مقاومت ویژه الکتریکی و پارامترهای هیدرولوژیکی
و هیدروژئوشیمیایی به دست آمده از چاه‌ها

۶-۱ مقدمه

در فصل‌های قبل، نتایج تفسیر یک‌بعدی و دوبعدی داده‌های مقاومت‌ویژه حاصل از سونداژهای الکتریکی برداشت شده در منطقه دشت ساوه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. حرکت یون‌های آب موجود در سنگ‌ها و خاک‌ها در بیشتر کاربردهای مهندسی و هیدروژئولوژی عامل اصلی هدایت الکتریکی و کاهش مقاومت‌ویژه مواد زیر سطح زمین است. کمیت‌های هیدروشیمیایی آب زیرزمینی را می‌توان با کمیت‌هایی مثل هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد حل‌شده (TDS) و غلظت هر یک از یون‌ها در آب زیرزمینی، به‌طور جداگانه نشان داد.

در بسیاری از پژوهش‌های آماری می‌توان همبستگی بین چند متغیر مرتبط به هم را تعیین نمود تا پیش‌بینی یک یا چند متغیر برحسب سایرین ممکن شود. در این بین رگرسیون خطی بیشترین کاربرد را دارد. از آن‌جا که یکی از اهداف این پژوهش تعیین ارتباط بین تغییرات هیدروژئولوژیکی و مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی و تفسیر سونداژهای الکتریکی آب زیرزمینی است، از روش رگرسیون خطی برای این منظور استفاده شده است.

۶-۲ روش آماری رگرسیون^۱

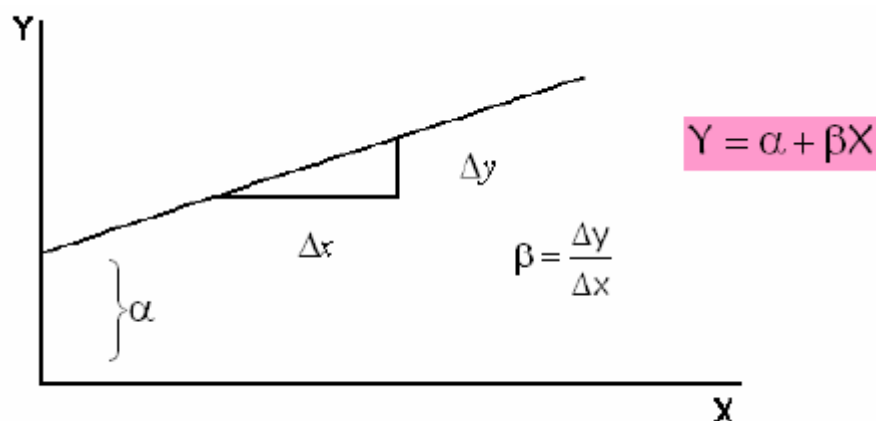
رگرسیون شاخه‌ای از علم آمار است که استفاده از آن به نحو وسیعی در اکثر زمینه‌های علمی معمول شده است. هنگامی که با مطالعه یک جامعه آماری ارتباطی بین صفات متغیر آن جامعه دیده می‌شود می‌توان میزان همبستگی^۲ بین این صفات را با روش رگرسیون تعیین نمود. در این روش ابتدا فرض شود رابطه بین دو متغیر دارای فرم خاصی است. یکی از معمول‌ترین فرم‌ها، تابع خطی ساده است (۶-۱).

1- Regression

2- Correlation

$$Y = aX + b \quad (1-6)$$

در رابطه فوق مقادیر a و b ثابت هستند. ضریب b که عرض از مبدأ نامیده می‌شود، مقدار Y را به ازای X مساوی صفر نشان می‌دهد. ضریب a که نمایانگر شیب خط است میزان تغییرات Y را به ازای یک واحد تغییر در X مشخص می‌کند (شکل (1-6)) [برگرفته از www.iranresearches.ir].



شکل (1-6): نمودار تابع خطی ساده بر حسب X و Y .

آمارگیران بهترین برازش را آن‌چنان خطی تعریف می‌کنند که مجموعه مربعات خطا، کمترین مقدار ممکن را داشته باشد. خطا عبارت است از فاصله عمودی بین مقدار واقعی مشاهده شده و مقداری که برای آن از خط برازش داده شده به دست می‌آید. مقدار خطا را با حرف e نمایش می‌دهند. برای هر مجموعه‌ای از مشاهدات آماری، خطوط مختلف دارای مجموعه مربعات خطای متفاوتی خواهند بود. بهترین خط برازش داده شده آن‌چنان خطی است که در آن $\sum_{i=1}^n e_i^2$ دارای کمترین مقدار باشد. این خط به نام خط حداقل مربعات نامیده می‌شود و a و b مربوط به آن از روابط زیر به دست می‌آید [برگرفته از www.blog.faradars.org].

$$a = \frac{(N\sum XY - (\sum X)(\sum Y))}{(N\sum X^2 - (\sum X)^2)} \quad (2-6)$$

$$b = \frac{(\Sigma Y - b(\Sigma X))}{N} \quad (3-6)$$

در این روابط N تعداد متغیرها، ΣXY مجموع حاصل ضرب مقادیر دو متغیر، ΣX جمع مقادیر متغیر اول، ΣY جمع مقادیر متغیر دوم و ΣX و ΣY جمع مربعات مقادیر متغیر اول می‌باشند.

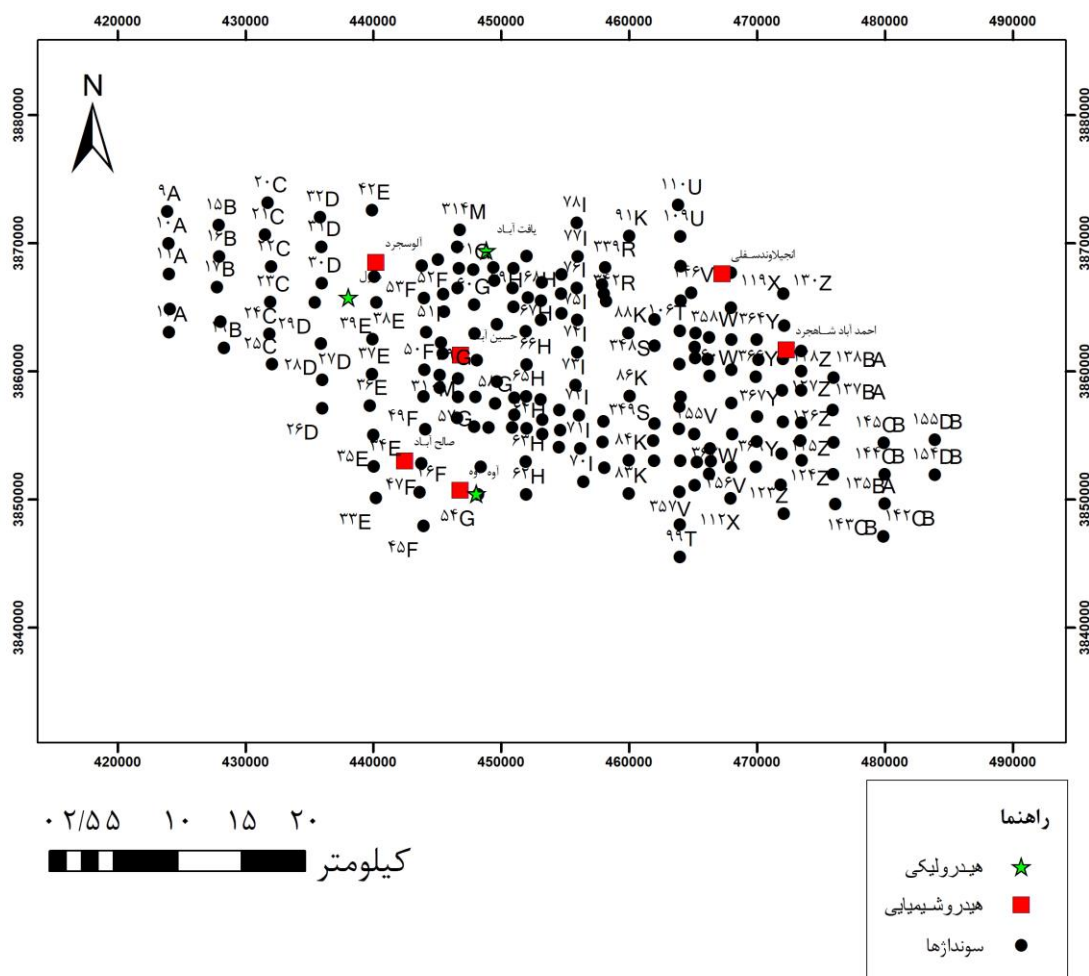
مقدار ضریب همبستگی بین دو متغیر X و Y از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R = \frac{\Sigma(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\Sigma(X - \bar{X})^2 \Sigma(Y - \bar{Y})^2}} \quad (4-6)$$

هرچه مقدار ضریب همبستگی فوق بیشتر باشد روند تغییرات دو متغیر X و Y شباهت بیشتری دارند [برگرفته از www.meracalculator.com].

۳-۶ تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر یک بعدی داده‌های سونداژ الکتریکی و پارامترهای هیدروشیمیایی چاه‌های آب

به‌طور کلی مقاومت ویژه زمین تابعی از متغیرهای مختلف می‌باشد و بستگی به خواص فیزیکی (مانند تخلخل، نفوذپذیری، اشباع‌شدگی، محتوای رس و ...) و همچنین خواص شیمیایی (مانند شوری و یون‌های موجود و ...) مواد زیر سطح زمین دارد. در این قسمت از داده‌های هیدروشیمیایی چاه‌های آبی که در مجاورت سونداژهای الکتریکی وجود دارند، برای تعیین رابطه همبستگی استفاده می‌شود. هرچه تعداد این چاه‌ها در منطقه مطالعاتی بیشتر باشد رابطه به دست آمده به واقعیت نزدیک‌تر است. تعداد ۶ حلقه چاه که داده‌های هیدروشیمیایی آن‌ها موجود است، در نزدیکی بعضی از سونداژهای الکتریکی مشخص شدند. در شکل (۲-۶) موقعیت چاه‌ها (با علامت ■) که مقادیر EC، TDS و آنیون‌های آن‌ها تعیین شده و همچنین سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده (با علامت ●) در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل (۶-۲): موقعیت سونداژها (●) و همچنین چاه‌های دارای داده‌های هیدروشیمیایی (■) و هیدرولیکی (★) نسبت به هم در منطقه مورد مطالعه.

اطلاعات هیدروشیمیایی اندازه‌گیری شده از چاه‌های مذکور شامل نتایج تجزیه شیمیایی آب (غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها) و پارامترهای مهمی از قبیل EC و TDS می‌باشند. در جدول (۶-۱) برخی از اطلاعات چاه‌ها، سونداژهای نزدیک آن‌ها و نیز فاصله سونداژها از چاه‌های مجاور خود نشان داده شده است. این اطلاعات برای تعیین ارتباط بین آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

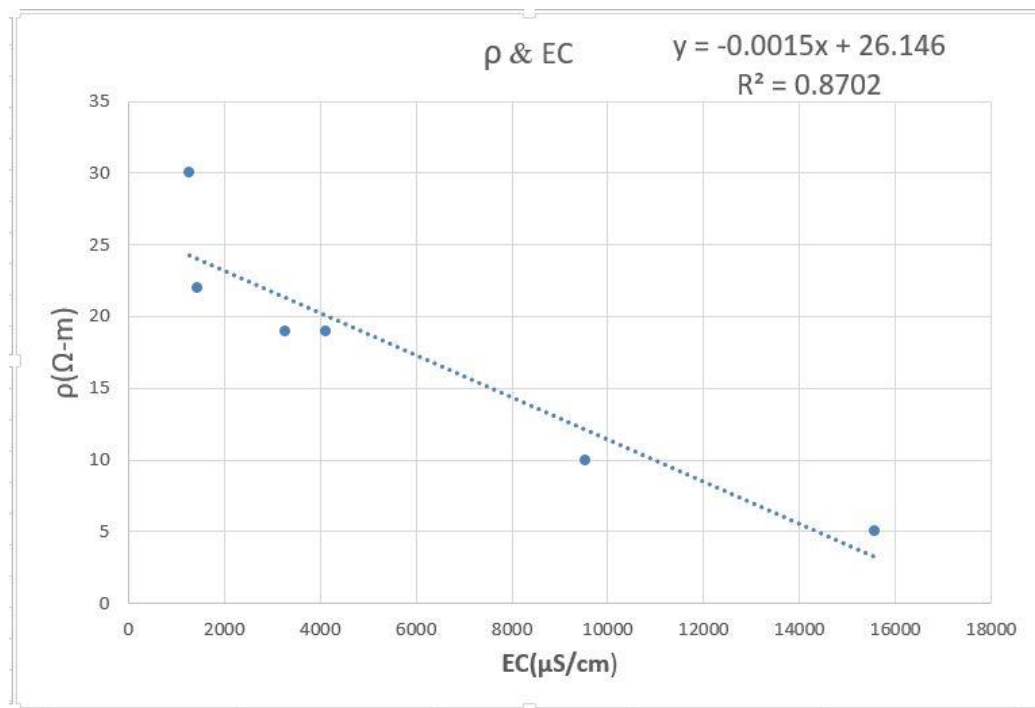
جدول (۱-۶): اطلاعات هیدروشیمیایی چاه‌ها و سونداژهای مجاور آن‌ها در منطقه مورد مطالعه.

نام چاه	TDS (mg/lit)	EC (μ S/cm)	مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ)	نام سونداژ	فاصله تا چاه (m)
آوه	۸۲۰	۱۲۷۸	۳۰	54G	۱۴۳۹
صالح آباد	۸۹۰	۱۴۴۱	۲۲	47F	۱۳۲۷
حسین آباد	۱۹۲۰	۳۲۸۰	۱۹	58G	۱۳۳۱
آلوسجرد	۲۷۰۰	۴۱۳۰	۱۹	40E	۱۱۶۱
انجیل‌وند سفلی	۶۶۶۰	۹۵۴۰	۱۰	119X	۶۹۴
احمدآباد شاهجرد	۱۰۹۰۰	۱۵۵۷۰	۵	128Z	۷۷۱

۱-۳-۶ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و EC

بالا بودن هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی نشان دهنده غلظت زیاد یون‌های آزاد در آن می‌باشد که در نتیجه مقاومت ویژه زیرسطحی کاهش می‌یابد. لایه‌هایی که آب موجود در آن‌ها شیرین است (یعنی فاقد یون‌های آزاد یا املاح بوده یا مقدار آن‌ها در آب کم است)، حتی اگر اشباع از آب باشند، مقاومت ویژه بالایی را نشان می‌دهند [Mooney, 1980]. هدایت الکتریکی می‌تواند یک تخمین کاملاً دقیق از غلظت یونی و یا کل مواد جامد حل شده (TDS) باشد.

در این قسمت سعی بر این است که بین مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) حاصل از تفسیر سونداژها در مجاورت چاه‌های آب موجود در منطقه مورد مطالعه و EC به دست آمده از آب چاه‌ها، رابطه خطی تعیین شود. برای تعیین رابطه خطی، از روش آماری رگرسیون استفاده شده است. شکل (۳-۶)، رابطه خطی بین مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) حاصل از تفسیر سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶) و EC آب چاه‌های مجاور این سونداژها را نشان می‌دهد.



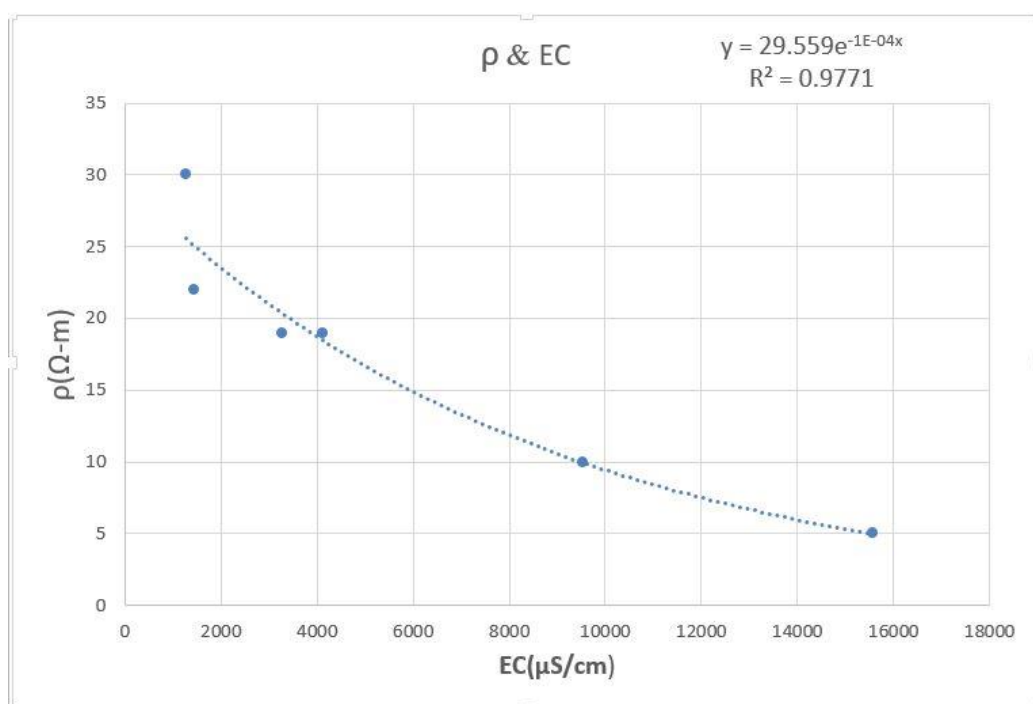
شکل (۳-۶): رابطه همبستگی خطی بین ρ و EC آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶).

همان‌طور که در شکل (۳-۶) دیده می‌شود ضریب همبستگی رابطه خطی فوق، ۰/۸۷ است که نشان‌دهنده همبستگی خوبی بین مقادیر ρ و EC می‌باشد. این رابطه نشان دهنده افزایش مقاومت ویژه لایه آبدار با کاهش هدایت الکتریکی آب زیرزمینی است (رابطه (۵-۶)) و رابطه معکوسی که بین این دو کمیت وجود دارد را به خوبی مشخص می‌کند.

$$\rho = -0.00015EC + 26.146 \quad (۵-۶)$$

با توجه و دقت در شکل (۳-۶) درمی‌یابیم که اگر به جای خط راست از یک منحنی برای برازش بین نقاط استفاده شود، می‌تواند انطباق بیشتری نشان دهد. پیش از این یوان‌گو (۱۹۸۶) و اسفهانی (۲۰۰۷، a) برای برقراری ارتباط همبستگی بین داده‌ها از منحنی استفاده نموده‌اند (فصل ۲). منحنی‌های مختلفی برای برازش داده‌ها استفاده گردید که نهایتاً منحنی نمایی، ضریب همبستگی بیشتری بین مقادیر EC و ρ نشان داد، ضریب همبستگی ۰/۹۷۷ در شکل (۴-۶) نشان‌دهنده همین موضوع می‌باشد. معادله نمایی این منحنی نشان می‌دهد که مقدار مقاومت ویژه لایه آبدار با افزایش

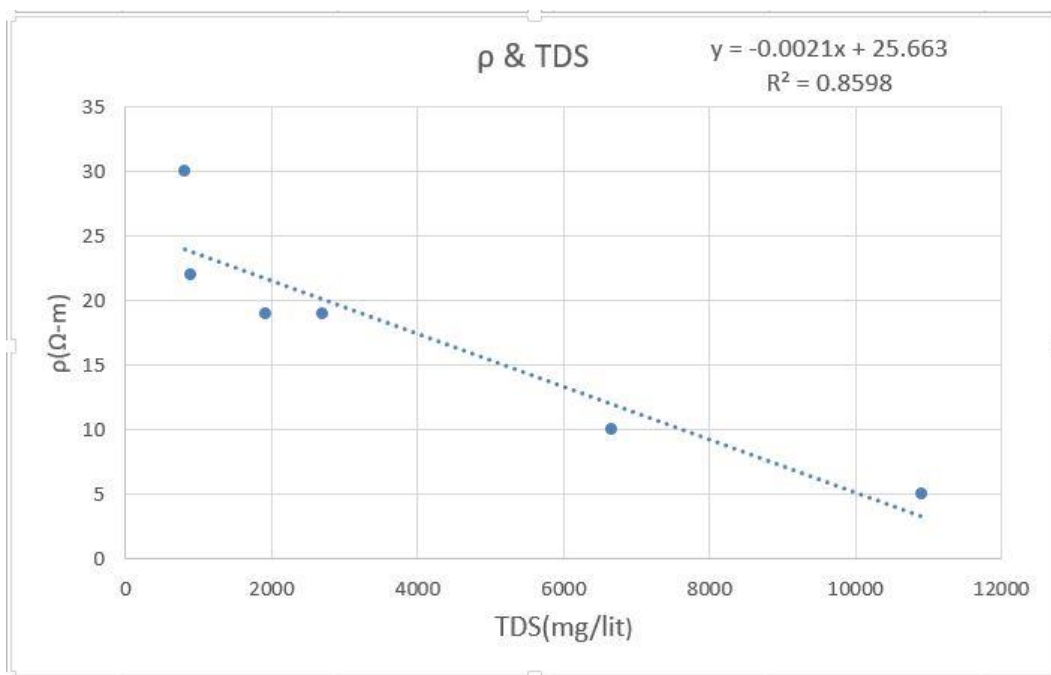
EC آب، کاهش می‌یابد. شیب زیاد منحنی در قسمت‌هایی که EC کم است، حاکی از تأثیرپذیری زیاد مقاومت‌ویژه از تغییرات EC در این محدوده می‌باشد. تأثیرپذیری مقاومت‌ویژه از تغییرات EC در مقادیر زیاد آن کاهش می‌یابد (با توجه به شیب کم منحنی در این قسمت‌ها). رابطه‌ی نمایی و ضریب همبستگی به‌دست آمده بین مقادیر EC آب چاه‌های مجاور سونداژهای الکتریکی ذکر شده در جدول (۱-۶) و مقاومت‌ویژه لایه آبدار (ρ) در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل (۴-۶): رابطه همبستگی نمایی بین ρ و EC آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۱-۶).

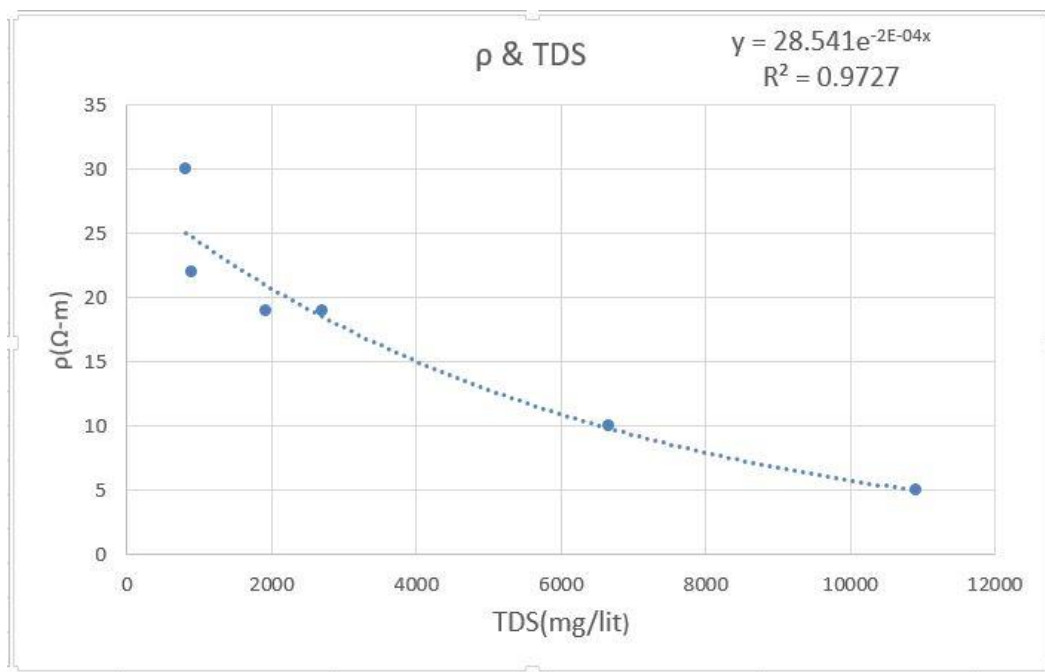
۲-۳-۶ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت‌ویژه لایه آبدار (ρ) و TDS

در نمودار شکل (۵-۶) رابطه رگرسیون خطی ساده بین مقادیر مقاومت‌ویژه لایه آبدار (ρ) در محل سونداژ الکتریکی و کل مواد جامد حل‌شده (TDS) آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور نشان داده شده است. ضریب همبستگی ۰/۸۵۹ بین این دو مقدار نشان‌دهنده ارتباط خوب این دو کمیت با یکدیگر می‌باشد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش TDS مقاومت‌ویژه لایه آبدار کاهش می‌یابد.



شکل (۶-۵): رابطه همبستگی خطی بین ρ و TDS آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۶-۱).

همان‌طور که در مورد رابطه ρ و EC در بخش قبل گفته شد، اگر به‌جای خط راست از یک منحنی برای برازش بین نقاط استفاده شود، می‌توان انطباق و همبستگی بیشتری بین ρ و TDS به‌دست آورد. از بین منحنی‌های مختلفی که برای برازش داده‌ها استفاده گردید منحنی نمایی ضریب همبستگی بیشتری بین مقادیر ρ و TDS نشان می‌دهد. ضریب همبستگی ۰/۹۷۲ در شکل (۶-۶) نشان‌دهنده همین موضوع می‌باشد. معادله تابع نمایی این منحنی نشان می‌دهد که مقدار مقاومت‌ویژه لایه آبدار با افزایش TDS، کاهش می‌یابد. شیب زیاد منحنی در قسمت‌هایی که TDS کم است، حاکی از تأثیرپذیری زیاد مقاومت‌ویژه از تغییرات TDS در این محدوده می‌باشد. تأثیرپذیری مقاومت‌ویژه از تغییرات TDS در مقادیر زیاد آن کاهش می‌یابد (با توجه به شیب کم منحنی در این قسمت‌ها).



شکل (۶-۶): رابطه همبستگی نمایی بین ρ و TDS آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۶-۱).

۴-۶ تعیین ارتباط بین نتایج تفسیر یک‌بعدی داده‌های سونداژ الکتریکی و پارامترهای هیدرولیکی چاه‌های آب

به‌طور کلی مقاومت‌ویژه زمین تابعی از متغیرهای مختلف می‌باشد و بستگی به خواص فیزیکی (مانند تخلخل، تراوایی، اشباع‌شدگی، محتوای رس و ...) و همچنین خواص شیمیایی (مانند شوری و یون‌های موجود و ...) مواد زیر سطح زمین دارد. در این قسمت از داده‌های هیدرولیکی از قبیل هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب قابلیت انتقال (T) چاه‌های آبی که در مجاورت سونداژهای الکتریکی وجود دارند، برای تعیین رابطه همبستگی با مقاومت‌ویژه لایه آبدار (ρ) استفاده می‌شود. هرچه تعداد این چاه‌ها در منطقه مطالعاتی بیشتر باشد رابطه به‌دست آمده به واقعیت نزدیک‌تر است. اطلاعات تعداد ۳ حلقه چاه که داده‌های هیدرولیکی آن‌ها موجود است به همراه سونداژهای الکتریکی برداشت شده در نزدیکی آن‌ها و نیز فاصله سونداژها از چاه‌های مجاور خود در جدول (۶-۲) مشخص شده است.

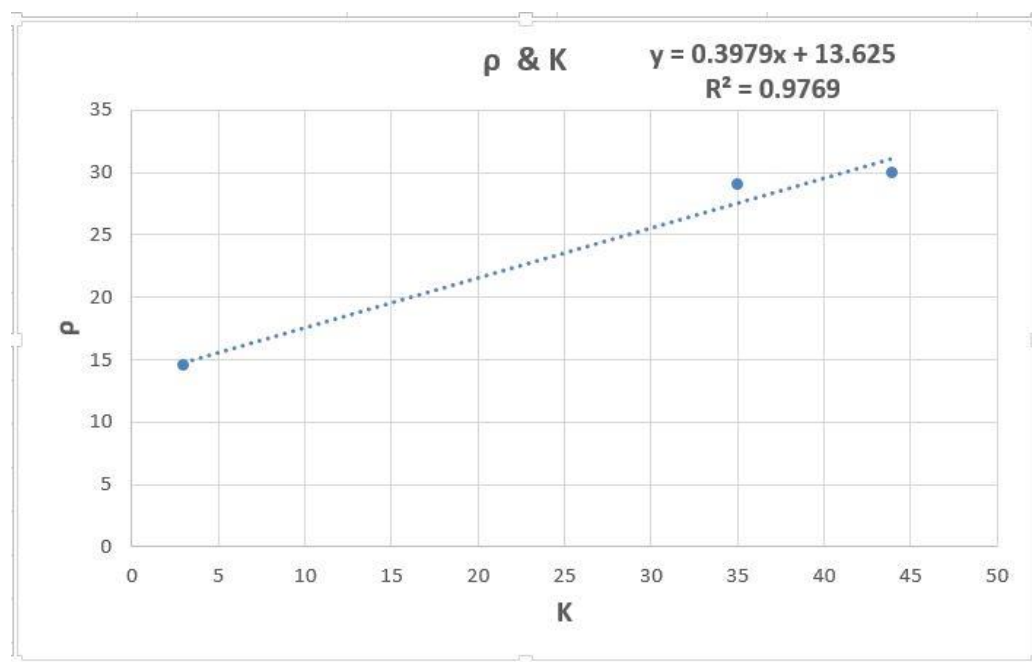
1- Transmissivity coefficient (T)

جدول (۶-۲): اطلاعات هیدرولیکی چاه‌ها و سونداژهای مجاور.

نام چاه	T(m/day)	K(m/day)	مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ)	نام سونداژ	ضخامت آبخوان	فاصله تا چاه (m)
یافت آباد	۴۸۸	۳	۱۴/۵	315N	۱۵۸	۱۴۴۷
آوه	۱۵۵۰	۴۴	۳۰	54G	۳۵	۱۳۴
هلول	۵۱۹۵	۳۵	۲۹	39E	۱۴۵	۲۲۰۶

۶-۴-۱ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و K

در این قسمت سعی بر این است که بین مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) حاصل از تفسیر سونداژها در مجاورت چاه‌های آب موجود در منطقه مورد مطالعه و هدایت هیدرولیکی (K) به دست آمده از چاه‌ها، رابطه مناسبی مانند رابطه خطی تعیین شود. برای تعیین این رابطه، از روش آماری رگرسیون استفاده شده است. رابطه خطی بین K و مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و همچنین ضریب همبستگی بین آن‌ها در شکل (۶-۷) قابل مشاهده است.

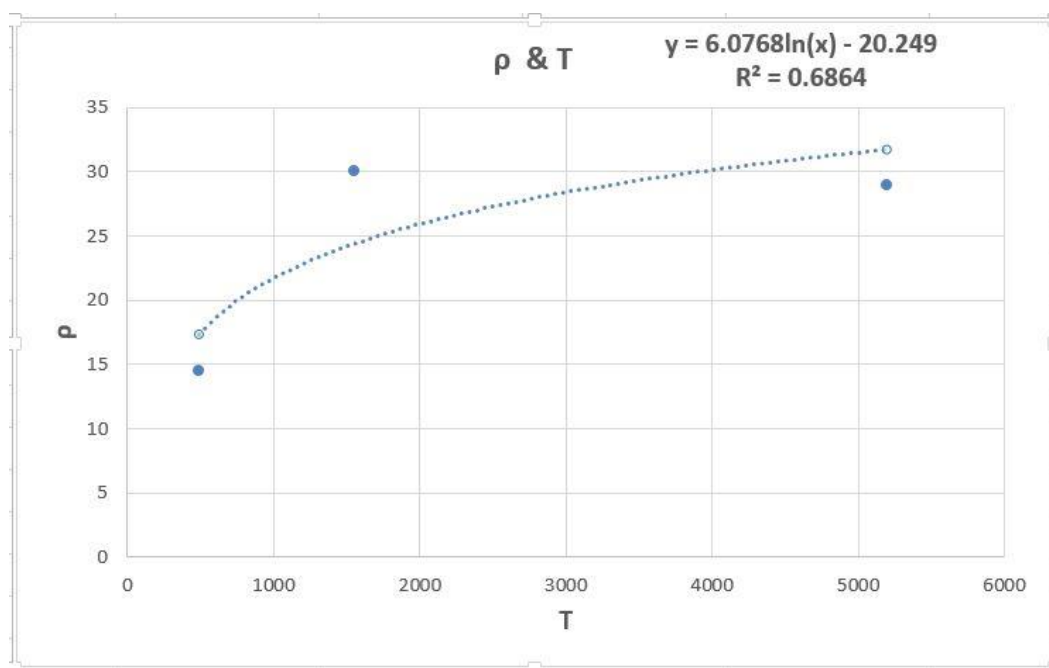


شکل (۶-۷): رابطه همبستگی خطی بین ρ و K آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۶-۲).

توابع مختلفی برای برازش داده‌ها بین ρ و K استفاده گردید که نهایتاً تابع خطی، ضریب همبستگی بیشتری بین مقادیر ρ و K نشان داد. با توجه به ضریب همبستگی ۰/۹۷ حاصل از تابع خطی و با استفاده از رابطه به‌دست آمده می‌توان هدایت هیدرولیکی را در محدوده مورد نظر تخمین زد. با وجود این، به علت کم بودن تعداد چاه‌ها و در نتیجه، کم بودن تعداد داده‌ها، روابط همبستگی به‌دست آمده از اعتبار چندان بالایی برخوردار نیستند.

۲-۴-۶ تعیین ارتباط بین مقادیر مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و T

همانند K ، بین مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) حاصل از تفسیر سونداژها در مجاورت چاه‌های آب موجود در منطقه مورد مطالعه و ضریب قابلیت انتقال (T) به‌دست‌آمده از چاه‌ها، رابطه‌ای تعیین گردید. برای تعیین این رابطه، از روش آماری رگرسیون استفاده شده است. رابطه لگاریتمی بین T و مقاومت ویژه لایه آبدار (ρ) و همچنین ضریب همبستگی بین آن‌ها در شکل (۸-۶) نشان داده شده است.



شکل (۸-۶): رابطه همبستگی درجه دو بین T و ρ آب چاه‌های مجاور سونداژهای مذکور در جدول (۲-۶).

پس از برازش منحنی‌های مختلف بر روی داده‌های ρ و T نهایتاً منحنی لگاریتمی، ضریب همبستگی بیشتری بین مقادیر ρ و T نشان داد. با توجه به نتایج به‌دست آمده و همچنین ضریب همبستگی $0/68$ حاصل از تابع لگاریتمی، می‌توان با استفاده از رابطه تابع لگاریتمی ضریب قابلیت انتقال را در محدوده مورد نظر تخمین زد. با وجود این، به علت کم بودن تعداد چاه‌ها و در نتیجه، کم بودن تعداد داده‌ها، روابط همبستگی به‌دست آمده از اعتبار چندان بالایی برخوردار نیستند.

۶-۵ نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش‌های قبلی گفته شد، تحرک یون‌های موجود در آب زیرزمینی عامل اصلی هدایت الکتریکی و کاهش مقاومت‌ویژه در مواد زیر سطح زمین است. روابط همبستگی که در این فصل بین داده‌های هیدروشیمیایی و هیدرولیکی چاه‌های منطقه و مقادیر مقاومت‌ویژه لایه آبدار حاصل از تفسیر سونداژهای مجاور چاه‌ها تعیین شد، از ضریب همبستگی نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشند. البته باید خاطرنشان کرد که عوامل بسیاری بر مقاومت‌ویژه لایه آبدار مؤثرند که بررسی همه آن‌ها به‌طور هم‌زمان بسیار مشکل است. برای چنین بررسی‌های جامعی نیاز به اطلاعات مختلفی از قبیل تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی در منطقه می‌باشد. نهایتاً چون پارامترهای ذکر شده از منطقه مورد مطالعه در دسترس نبود از بررسی‌های جامع‌تر و تعیین دقیق نقش همه عوامل صرف‌نظر شد. در بین نمودارهای ارائه شده برای داده‌های هیدروشیمیایی، همبستگی بالاتر در نمودارهایی که از منحنی نمایی برای برازش نقاط استفاده شده، می‌تواند نشان دهنده ارتباط منحنی گونه بین پارامترهای هیدروشیمیایی و مقاومت‌ویژه لایه آبدار باشد. موضوع دیگری که از این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت این است که تأثیرپذیری مقاومت‌ویژه از تغییرات هیدروشیمیایی در مقادیر زیاد آن کاهش می‌یابد (با توجه به شیب کم منحنی در این قسمت‌ها). بین مقاومت‌ویژه لایه آبدار و هدایت هیدرولیکی رابطه همبستگی خطی تعیین گردید و همچنین بین مقاومت‌ویژه لایه آبدار و ضریب قابلیت انتقال رابطه همبستگی لگاریتمی برقرار شد. علی‌رغم به‌دست آمدن نتایج همبستگی خوب بین پارامترهای

هیدرولیکی و مقاومت ویژه الکتریکی، به علت کم بودن تعداد چاه‌ها و در نتیجه، کم بودن تعداد داده‌ها، روابط همبستگی به دست آمده از اعتبار چندان بالایی برخوردار نیستند.

فصل ۷ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۷-۱ نتیجه‌گیری

از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان نتایج زیر را ذکر کرد:

۱- نتیجه تفسیر سونداژهای مقاومت‌ویژه الکتریکی برداشت شده در دشت ساوه حاکی از آن است که عمق سطح ایستابی و ضخامت آبخوان در بخش‌های شرقی دشت کم است. از طرفی مقاومت‌ویژه لایه آبدار در این مناطق پایین و دلیل آن وجود درصد قابل توجهی رس است.

۲- در محل سونداژهای الکتریکی برداشت شده در بستر رودخانه قره‌چای، به دلیل درصد پایین رس و دانه‌درشت بودن ذرات آبرفت، مقاومت‌ویژه بالاست.

۳- مقاومت‌ویژه بالا در بخش‌های جنوبی خطوط برداشت C، D، E و F به دلیل وجود پادگانه‌های آبرفتی جدید در این مناطق است.

۴- تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه برداشت شده با چند نرم‌افزار به کاهش خطاهای احتمالی و همچنین اعتبار بخشیدن به نتایج تفسیر کمک بسیاری نموده است.

۵- در مورد ارتباط بین داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی حاصل از تفسیر سونداژهای الکتریکی برداشت شده و اطلاعات هیدروشیمیایی به‌دست آمده از چاه‌های مجاور این سونداژها مورد بررسی قرار گرفت و سعی در تعیین یک رابطه مناسب بین نتایج به‌دست آمده از تفسیر یک‌بعدی سونداژها با پارامترهای ۶ چاه مجاور این سونداژهای صورت گرفت. اطلاعات هیدروشیمیایی شامل هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد جامد محلول (TDS) بوده است. بین نتایج تفسیر سونداژها و این کمیت‌های هیدروشیمیایی به‌وسیله ابزار رگرسیون خطی با استفاده از نرم‌افزار Excel ارتباط تعیین شد. ضرایب همبستگی بالای ۰/۸۵ در تابع خطی نشان‌دهنده رابطه نسبتاً خوب بین کمیت‌ها است. تعیین رابطه با استفاده از منحنی‌های نمایی با ضریب همبستگی بالای ۰/۹ برازش بهتری نسبت به تابع خطی نشان می‌دهد. بین مقاومت‌ویژه لایه آبدار و هدایت هیدرولیکی رابطه همبستگی خطی

تعیین گردید و همچنین بین مقاومت ویژه لایه آبدار و ضریب قابلیت انتقال رابطه همبستگی لگاریتمی برقرار شد. علی‌رغم به‌دست آمدن نتایج همبستگی خوب بین پارامترهای هیدرولیکی و مقاومت ویژه الکتریکی، به علت کم بودن تعداد چاه‌ها و در نتیجه، کم بودن تعداد داده‌ها، روابط همبستگی به‌دست آمده از اعتبار چندان بالایی برخوردار نیستند.

۶- افزایش غلظت مواد محلول در آب رابطه مستقیمی با کاهش مقاومت ویژه دارد (نمودار شکل‌های ۳-۶ تا ۶-۶).

۷- تأثیر مقادیر پایین پارامترهای هیدروشیمیایی بر مقاومت ویژه لایه آبدار بیشتر است (شیب زیاد منحنی به‌دست آمده در این قسمت‌ها) و تأثیرپذیری مقاومت ویژه از تغییرات این داده‌ها در مقادیر زیاد آن‌ها کاهش می‌یابد (شیب کم منحنی به‌دست آمده در این قسمت‌ها).

۸- کیفیت آب در بخش‌های مرکزی، غربی و جنوبی دشت با میانگین TDS برابر ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، مناسب‌تر است.

۹- مقاومت ویژه زمین تابعی از متغیرها و عوامل تأثیرگذار مختلف است که دانستن ارتباط این عوامل با مقاومت ویژه، اهمیت بسیار بالای در اکتشاف مواد زیر سطح زمین (علی‌الخصوص آب زیرزمینی) به کمک روش مقاومت ویژه الکتریکی دارد. با استفاده از روابط همبستگی به‌دست آمده در این پایان‌نامه می‌توان کیفیت آب زیرزمینی در منطقه را تا حد قابل قبولی تخمین زد.

۲-۷ پیشنهادها

برای بررسی دقیق‌تر این تحقیق باید نقش عوامل مختلف مؤثر بر مقاومت ویژه بررسی شود. مثلاً می‌توان به کمک روش قطبش القایی (IP) حضور رس در لایه‌های مختلف زیرسطحی منطقه مورد مطالعه را تعیین نمود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود از روش قطبش القایی (IP) برای بررسی و تعیین رس و همچنین مقدار آن در زیر سطح زمین و مخصوصاً لایه آبدار استفاده کرد. با مشخص نمودن

ارتباط بین تمام عوامل مؤثر بر کیفیت و کمیت آب زیرزمینی می‌توان به نتایج کامل‌تر از منابع آب زیرزمینی دست‌یافت.

مناسب‌ترین محدوده از نظر کمی و کیفی برای حفر چاه، به دلیل ضخامت بیشتر آبخوان و همچنین درصد مواد محلول کمتر نسبت به مناطق دیگر دشت، محدوده مرکزی و جنوبی دشت است.

مراجع

- ۱- امامی، م، ه، (۱۳۷۰)، "نقشه زمین‌شناسی چهارگوش قم، ۱:۲۵۰۰۰۰" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- ۲- باقری، ص، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه ارشد: "بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی سفره آب زیرزمینی دشت سراب" دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، صص ۷ و ۸.
- ۳- پور سرداری، ب، (۱۳۹۱)، "مدل‌سازی و تفسیر سونداژهای الکتریکی به منظور اکتشاف آب زیر زمینی و ایجاد ارتباط بین نتایج مدل‌سازی و تفسیر با پارامترهای آب در منطقه میامی جنوبی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ۴- حجت، آ، (۱۳۸۲)، پایان‌نامه ارشد: "مطالعات ژئوالکتریک جهت بررسی آب‌های زیرزمینی و ساختارهای زمین‌شناسی در محدوده آنومالی شماره ۳ معدن سنگ‌آهن گل‌گهر" دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، صص ۳۶-۴۰.
- ۵- حیدریان، ز، حافظی مقدس، ن، ندایی گیلارلو، س و ابراهیمی، ف، (۱۳۹۰)، "اثر سد الغدير ساوه بر روی کمیت منابع آب زیر زمینی دشت ساوه" هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شاهرود.
- ۶- راه چمنی، م، (۱۳۹۰)، "تعیین ارتباط بین تغییرات هیدرووشیمیایی و مقاومت‌ویژه حاصل از مدل‌سازی و تفسیر سونداژهای ژئوالکتریک آب زیرزمینی در منطقه چناران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- ۷- شاهزیدی ا، (۱۳۸۹)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی و تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی و تعیین ارتباط نتایج با پارامترهای کیفی در منطقه خرمالو استان گلستان" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ۸- سازمان آب منطقه ای مرکزی، (۱۳۸۸)، "برداشت ۲۰۰ سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه دشت ساوه".
- ۹- سازمان آب منطقه ای مرکزی، (۱۳۹۲)، "گزارش بررسی آب زیرزمینی در منطقه دشت ساوه".
- ۱۰- صداقت، م، (۱۳۸۷)، "زمین و منابع آب (آبهای زیرزمینی)" جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه پیام نور، صص ۷-۲۰.
- ۱۱- صفوی، ح، (۱۳۸۷)، "هیدرولوژی مهندسی" انتشارات ارکان دانش
- ۱۲- کلاگری ع. ا، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی" جلد اول، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز، صص ۱۸۰.
- ۱۳- لطیف کار، م، کامکار روحانی، ا، عرب امیری، ع. ل، پرنیان خوی، ح، (۱۳۹۳)، "اکتشاف سفره آب زیرزمینی و ارزیابی کیفیت آن، با استفاده از روش سونداژ قائم الکتریک، یک مطالعه موردی"، همایش ملی زمین شناسی و اکتشاف منابع، شیراز.
- ۱۴- مشکل گشا، م، رحمانیان م، کریمی، م، (۱۳۹۳)، "مطالعه روش ژئوالکتریک در ارزیابی میزان آب زیرزمینی نزدیک دریا" همایش ملی راهکارهای پیش روی بحران آب در ایران و خاورمیانه، شیراز.
- ۱۵- مرادزاده ع، قوامی ریایی، ر، (۱۳۸۶)، "چاه پیمایی برای مهندسین" جلد اول، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، صص ۱۸-۲۲.

- ۱۶- محبی گوراب پسی، ر، (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد: "مدل سازی و تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی و تعیین ارتباط نتایج با پارامترهای هیدرولوژیکی در منطقه دوغ استان گلستان" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ۱۷- مدنی، ح.، (۱۳۸۶). "آبکشی و آبرسانی در معادن". تهران: جلد اول، چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک).
- ۱۸- نخعی، م، لشکری پور، غ، (۱۳۸۲)، "تخمین تخلخل و آبدهی ویژه در آبخوان دشت شور با استفاده از داده های مقاومت ویژه و روابط تجربی" نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم تهران، جلد ۳، شماره ۱، صص ۱۹۱-۲۰۰.
- 19- Tarantola, A. (2005). **Inverse problem theory and methods for model parameter estimation.** *Society for Industrial and Applied Mathematics.*
- 20- Asfahani, J. (2007 a). **Electrical earth resistivity surveying for delineating the characteristics of ground water in a semi-arid region in the Khanasser Valley, northern Syria.** *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(8), 1085-1097.
- 21- Asfahani, J. (2007 b). **Neogene aquifer properties specified through the interpretation of electrical sounding data, Salamiyeh region, central Syria.** *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(21), 2934-2943.
- 22- Atwia, M. G., Abu-Heleika, M. M., & El-Horiny, M. M. (2013). **Hydrogeochemical and vertical electrical soundings for groundwater investigations, Burg El-Arab area, Northwestern Coast of Egypt.** *Journal of African Earth Sciences*, 80, 8-20.
- 23- Bernard, J. (2003). **Short note on the principles of geophysical methods for groundwater investigations.** *Terraplus.Com.*
- 24- Corvallis, O. R; (2000), **D.C. Resistivity methods**, *Northwest Geophysical associates, Inc.*

- 25-Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). **Physical and chemical hydrogeology** (Vol. 506). New York: Wiley.

- 26-Ebraheem, A. A. M., Senosy, M. M., & Dahab, K. A. (1997). **Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating ground-water contamination due to salt-water intrusion in the northern part of the Nile Delta, Egypt.** *Ground water*, 35(2), 216.

- 27-El_Hameed, A. G. A., El-Shayeb, H. M., El-Araby, N. A., & Hegab, M. G. (2017). **Integrated geoelectrical and hydrogeological studies on Wadi Qena, Egypt.** *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(1), 218-229.

- 28-Ginzburg, A., & Levanon, A. (1976). **DETERMINATION OF A SALT-WATER INTERFACE BY ELECTRIC RESISTIVITY DEPTH SOUNDINGS/Détermination d'un interface d'eau salée à l'aide des mesures verticales de résistivité électrique.** *Hydrological Sciences Journal*, 21(4), 561-568.

- 29-Guo, Y. A. (1986). **Estimation of TDS in sand aquifer water through resistivity log.** *Groundwater* 24(5), 598-600.

- 30-Hodlur, G. K., Dhakate, R., & Andrade, R. (2006). **Correlation of vertical electrical sounding and borehole-log data for delineation of saltwater and freshwater aquifers.** *Geophysics*, 71(1), G11-G20.

- 31-Kaminsky, A. E. (2010). **ZondRes2D. Software for two-dimensional interpretation of DC re-sistivity and IP data.** Zond Geophysical Software, Saint-Petersburg (Russia).

- 32-Loke, M. H. (1999). **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.** *A practical guide to*, 2.
- 33-Milsom, J. (1989). **Field Geophysics.** Geological Society of London Handbook.

- 34-Molano, C. E., Salamanca, M., & Van Overmeeren, R. A. (1990). **NUMERICAL MODELLING OF STANDARD AND CONTINUOUS VERTICAL ELECTRICAL SOUNDINGS 1.** *Geophysical prospecting*, 38(7), 705-718.

- 35-Mooney, H. M. (1980). **Handbook of Engineering Geophysics, Vol. 2. Electrical Resistivity.** Bison Instruments. Inc., Minneapolis, Minnesota.

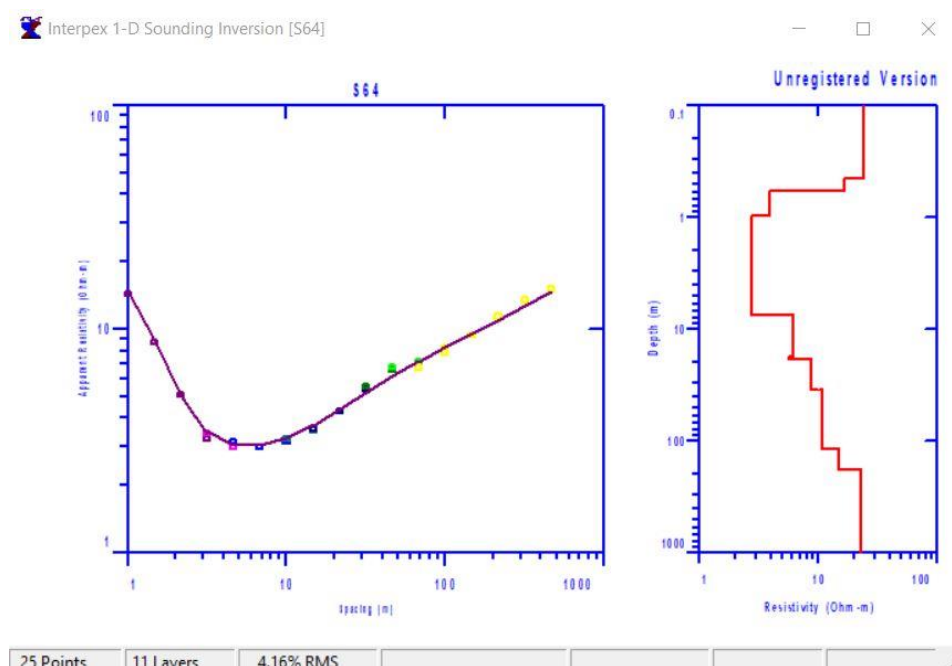
- 36- Muiuane, E. A., & Pedersen, L. B. (1999). **Automatic 1D interpretation of DC resistivity sounding data.** *Journal of applied geophysics*, 42(1), 35-45.
- 37- Reynolds, J. M. (2011). **An introduction to applied and environmental geophysics.** *John Wiley & Sons*.
- 38- Seaton, W. J., & Burbey, T. J. (2002). **Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane.** *Journal of Applied Geophysics*, 51(1), 21-41.
- 39- Scarascia, S. (1976). **Contribution of geophysical methods to the management of water resources.** *Geoexploration*, 14(3-4), 265-266.
- 40- Titov, K. V., Levitski, A., Konosavski, P. K., Tarasov, A. V., Ilyin, Y. T., & Bues, M. A. (2005). **Combined application of surface geoelectrical methods for groundwater flow modeling: a case history.** *Geophysics*, 70(5), H21-H31.
- 41- Ungemach, P., Mostaghimi, F., & Duprat, A. (1969). **Essais de determination du coefficient d'emmagasinement en nappe libre application a la nappe alluviale du Rhin.** *Hydrological Sciences Journal*, 14(2), 169-190.
- 42- Vincenz, S. A. (1968). **Resistivity investigations of limestone aquifers in Jamaica.** *Geophysics*, 33(6), 980-994.
- 43- White, P. A. (1994). **Electrode arrays for measuring groundwater flow direction and velocity.** *Geophysics*, 59(2), 192-201.
- 44- Worthington, P. F. (1975). **Quantitative geophysical investigations of granular aquifers.** *Geophysical surveys*, 2(3), 313-366.
- 45- Zonge Engineering and Research Organization, (1994). **The application of Surface Electrical Geophysics to groundwater problems,** *Electrical GeophysicsSeminar notes*. pp. 2-15.
- 46- www.faradars.org
- 47- www.meracalculator.com

پوست

۱- نمونه‌هایی از مدل‌سازی یک‌بعدی سونداژهای مقاومت‌ویژه الکتریکی

به اختصار نمودار حاصل از مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و پارامترهای

مدل ۲۰ سونداژ مقاومت‌ویژه الکتریکی به وسیله نرم‌افزار IX1D، آورده شده است.



شکل (۸-۱): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 64 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

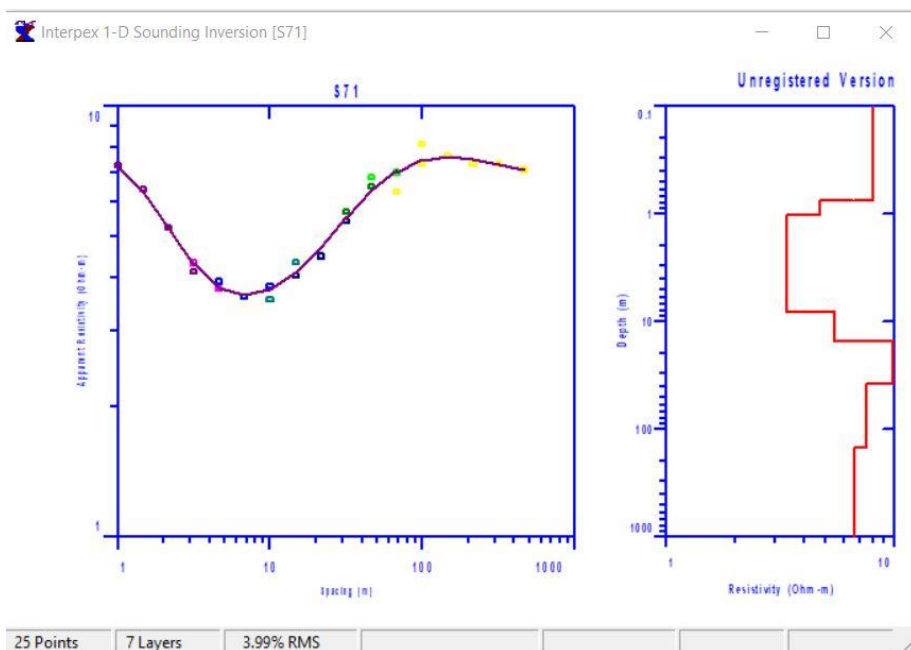
Surface Elevation: 1010.0 Fitting Error: 4.1621

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	24.105	☐	0.52765	0.45044	1009.5	☐
2	16.423	☐	0.13208	0.58252	1009.4	☐
3	3.9510	☐	0.39532	0.97784	1009.0	☐
4	2.7334	☐	6.5721	7.5499	1002.5	☐
5	6.1777	☐	9.8825	17.432	992.57	☐
6	5.6760	☐	1.4481	18.880	991.12	☐
7	8.7986	☐	16.413	35.294	974.71	☐
8	10.820	☐	61.518	96.812	913.19	☐
9	10.839	☐	22.937	119.75	890.25	☐
10	14.689	☐	61.782	181.53	828.47	☐
11	22.761	☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۲): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 64، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۳): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 71 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

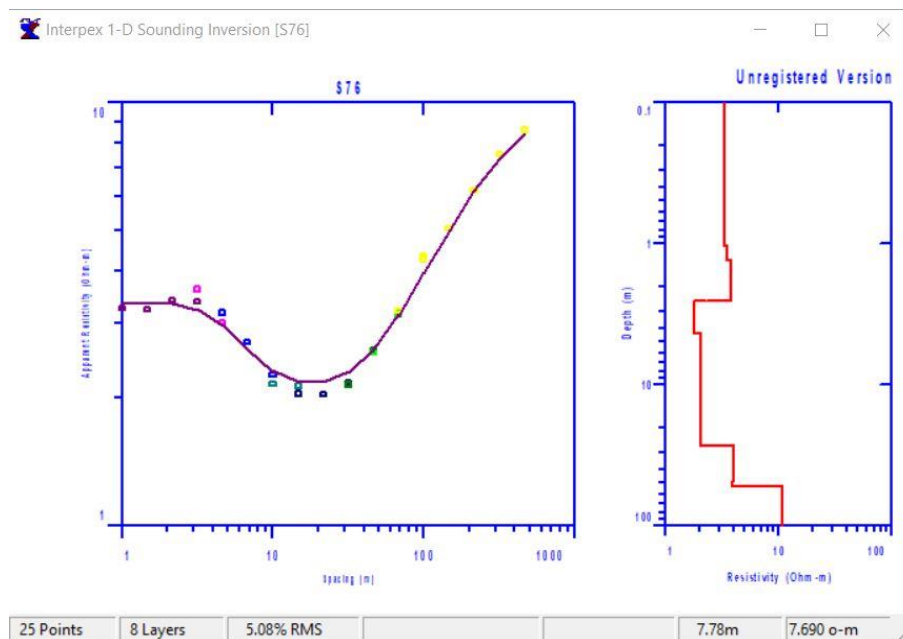
Surface Elevation: 1030.0 Fitting Error: 3.9921

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	8.0471	☐	0.67395	0.75769	1029.2	☐
2	4.7056	☐	0.27258	1.0303	1029.0	☐
3	3.3526	☐	7.2723	8.3026	1021.7	☐
4	5.4746	☐	7.1882	15.491	1014.5	☐
5	9.8597	☐	22.916	38.407	991.59	☐
6	7.5540	☐	111.12	149.53	880.47	☐
7	6.6945	☐				☐
8		☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۴): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 71، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۵): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 76 پس از یک مرحله وارون‌سازی (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D.

Resistivity Model

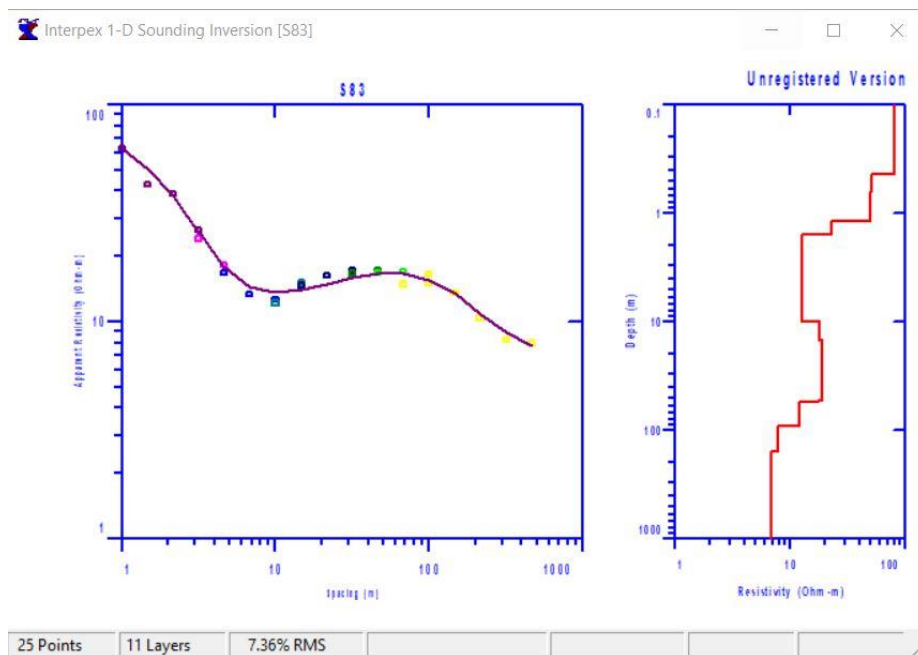
Surface Elevation: 980.00 Fitting Error: 5.0824

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	3.3478	☐	0.75769	1.0363	978.96	☐
2	3.5574	☐	0.28394	1.3203	978.68	☐
3	3.8213	☐	1.2230	2.5433	977.46	☐
4	1.7964	☐	1.7997	4.3430	975.66	☐
5	2.0493	☐	23.012	27.355	952.65	☐
6	4.0181	☐	21.022	48.377	931.62	☐
7	3.9584	☐	4.5182	52.895	927.10	☐
8	10.920	☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۶): مشخصات مدل حاصل از مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های سونداژ 76، پس از اعمال یک مرحله وارون‌سازی در نرم‌افزار IX1D.



شکل (۷-۸): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 83 پس از یک مرحله وارون‌سازی (سمت چپ) در نرم‌افزار IX1D.

Resistivity Model

Surface Elevation: 946.00 Fitting Error: 7.3574

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

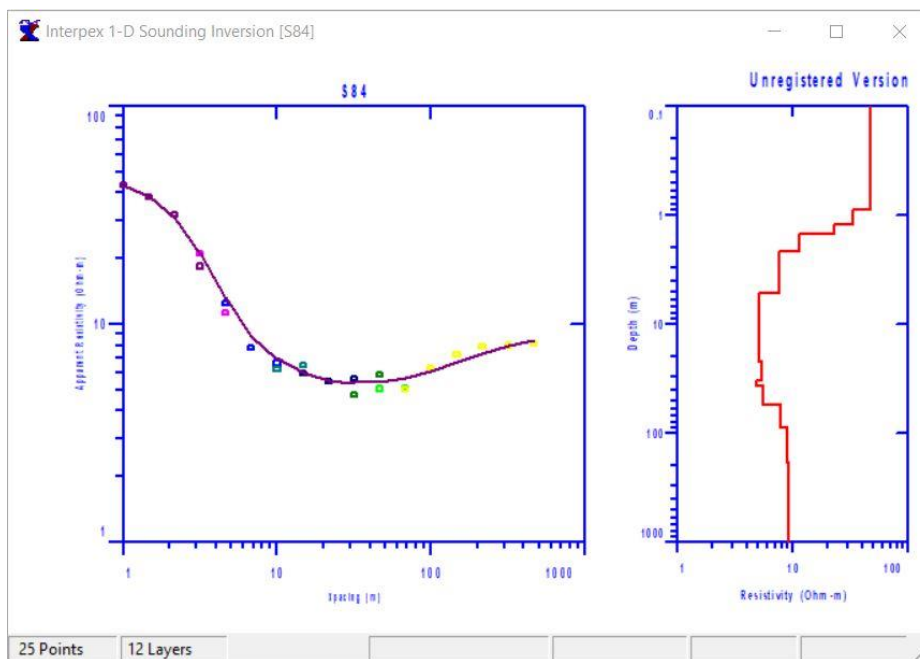
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	79.894		0.53998	0.43317	945.57	
2	51.526		0.19232	0.62549	945.37	
3	49.837		0.54688	1.1724	944.83	
4	22.570		0.39014	1.5625	944.44	
5	12.535		8.5377	10.100	935.90	
6	18.090		4.7462	14.846	931.15	
7	19.011		39.061	53.907	892.09	
8	17.500		0.87555	54.782	891.22	
9	12.153		38.171	92.953	853.05	
10	7.8118		62.493	155.45	790.55	
11	6.8221					
12						

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward

Delete Cell Delete Row Add To One Iteration

OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۸): مشخصات مدل حاصل از مدل‌سازی یک‌بعدی داده‌های سونداژ 83، پس از اعمال یک مرحله وارون‌سازی در نرم‌افزار IX1D.



شکل (۸-۹): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده های سونداژ صحرائی 84 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

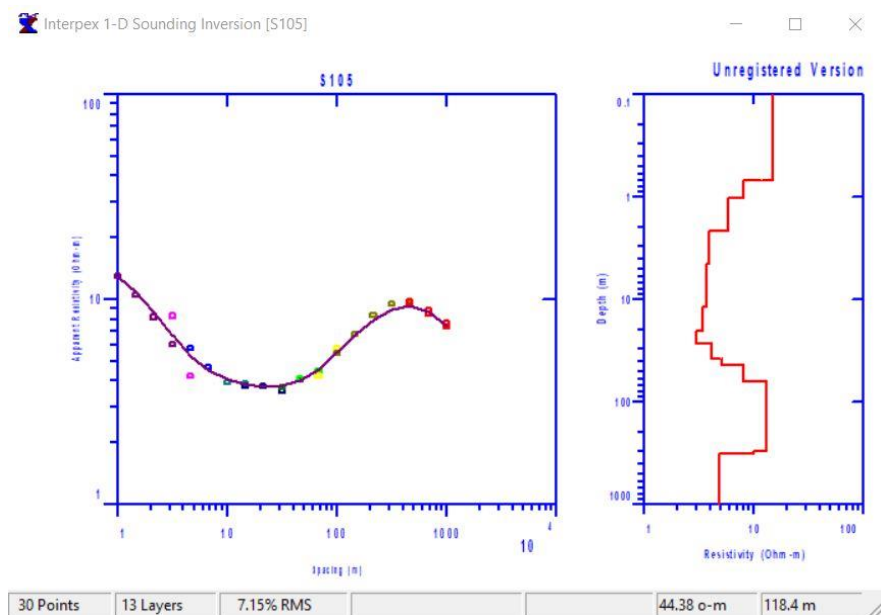
Surface Elevation: 950.00 Fitting Error: 8.1555

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	46.490	☐	0.43317	0.90002	949.10	☐
2	33.534	☐	0.30377	1.2038	948.80	☐
3	22.621	☐	0.26538	1.4692	948.53	☐
4	11.260	☐	0.65839	2.1276	947.87	☐
5	7.5958	☐	3.1406	5.2681	944.73	☐
6	5.0977	☐	16.672	21.940	928.06	☐
7	5.4529	☐	10.805	32.745	917.25	☐
8	4.7915	☐	4.5145	37.260	912.74	☐
9	5.4641	☐	17.969	55.229	894.77	☐
10	7.7704	☐	34.471	89.700	860.30	☐
11	8.9601	☐	98.479	188.18	761.82	☐
12	9.2065	☐				☐

Column Math:

شکل (۸-۱۰): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده های سونداژ 84، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۱۱): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 105 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

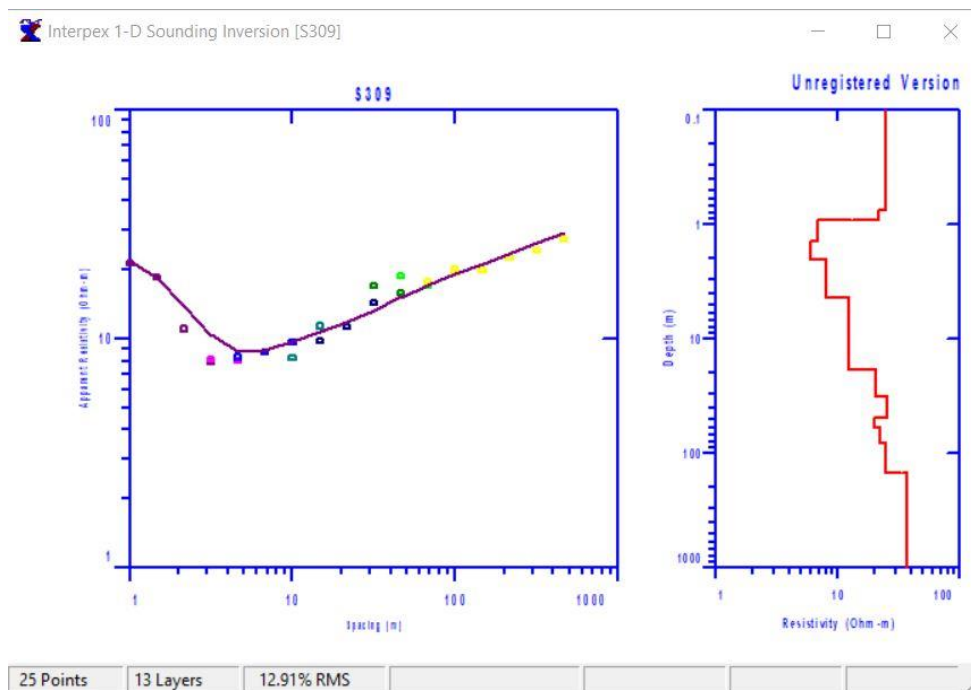
Surface Elevation: 951.00 Fitting Error: 7.1485

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	14.794	☐	0.82001	0.70001	950.30	☐
2	8.0071	☐	0.33362	1.0336	949.97	☐
3	5.8136	☐	1.0963	2.1299	948.87	☐
4	3.9412	☐	2.4077	4.5376	946.46	☐
5	3.7445	☐	7.2509	11.789	939.21	☐
6	3.4260	☐	8.7175	20.506	930.49	☐
7	3.0012	☐	6.5655	27.072	923.93	☐
8	4.1538	☐	10.576	37.648	913.35	☐
9	5.0864	☐	6.7979	44.446	906.55	☐
10	8.0031	☐	19.026	63.472	887.53	☐
11	13.040	☐	242.09	305.56	645.44	☐
12	9.8469	☐	11.306	316.87	634.13	☐

Column Math:

شکل (۸-۱۲): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 105، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۱۳): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 309 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

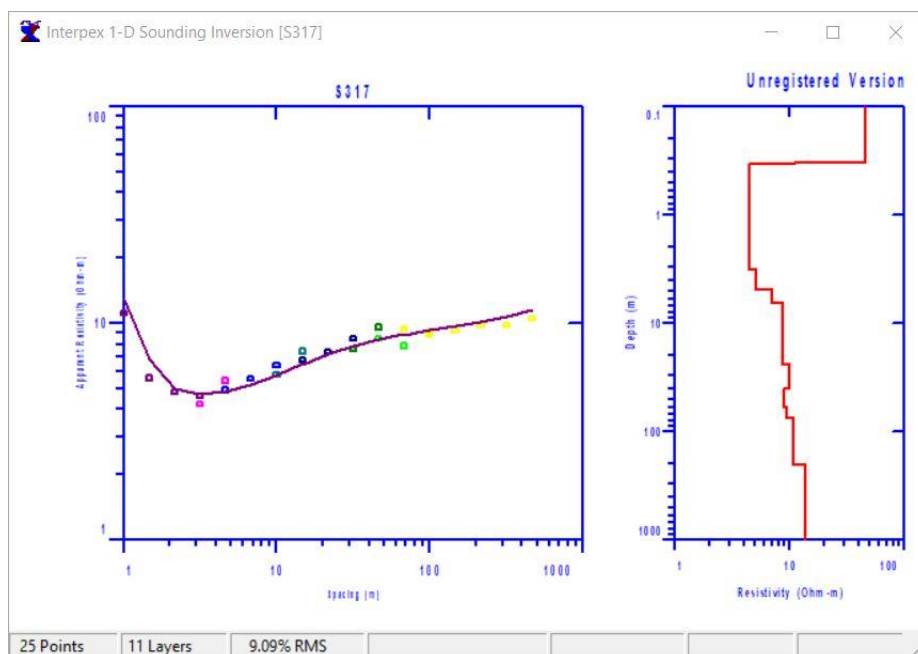
Surface Elevation: 900.00 Fitting Error: 12.909

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	24.590	☐	0.0000	0.74274	899.26	☐
2	21.725	☐	0.18549	0.92822	899.07	☐
3	9.9573	☐	0.23193E-	0.93054	899.07	☐
4	6.8319	☐	0.45654	1.3871	898.61	☐
5	5.9597	☐	0.64655	2.0336	897.97	☐
6	7.9634	☐	2.3885	4.4222	895.58	☐
7	12.378	☐	14.203	18.625	881.37	☐
8	20.317	☐	13.240	31.865	868.13	☐
9	25.130	☐	17.156	49.021	850.98	☐
10	20.000	☐	11.005	60.026	839.97	☐
11	21.951	☐	23.091	83.116	816.88	☐
12	24.812	☐	67.688	150.80	749.20	☐

Column Math:

شکل (۸-۱۴): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 309، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۱۵): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ 317 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

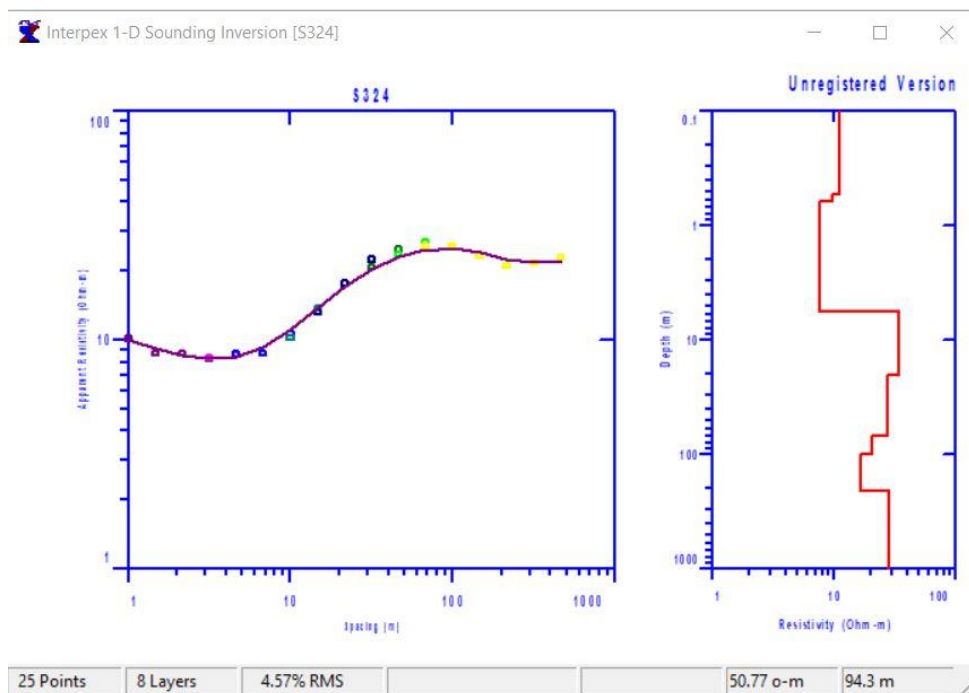
Surface Elevation: 953.00 Fitting Error: 9.0899

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	45.524	☐	0.78406	0.33295	952.67	☐
2	10.990	☐	0.33569E-	0.33630	952.66	☐
3	4.4188	☐	2.8428	3.1791	949.82	☐
4	5.1172	☐	1.7358	4.9149	948.09	☐
5	7.0925	☐	1.6290	6.5439	946.46	☐
6	8.7779	☐	17.453	23.997	929.00	☐
7	9.9661	☐	15.933	39.931	913.07	☐
8	8.9275	☐	20.149	60.080	892.92	☐
9	9.4471	☐	15.213	75.293	877.71	☐
10	10.722	☐	125.64	200.94	752.06	☐
11	13.562	☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۱۶): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 317، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۱۷): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 324 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

Surface Elevation: 940.00 Fitting Error: 4.5665

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

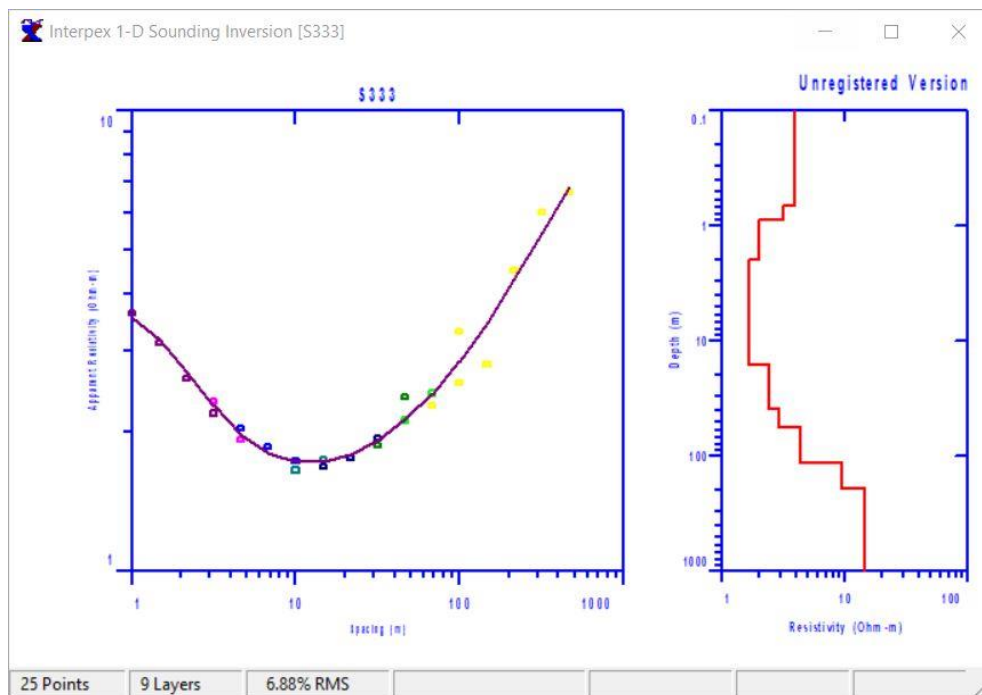
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	11.043	☐	0.33295	0.52765	939.47	☐
2	9.6354	☐	0.89294E-	0.61694	939.38	☐
3	7.6385	☐	5.0638	5.6808	934.32	☐
4	33.790	☐	14.951	20.632	919.37	☐
5	27.190	☐	49.214	69.846	870.15	☐
6	20.392	☐	28.822	98.667	841.33	☐
7	16.416	☐	108.63	207.29	732.71	☐
8	28.067	☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward

Delete Cell Delete Row Add To One Iteration

OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۱۸): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 324، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۱۹): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 333 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

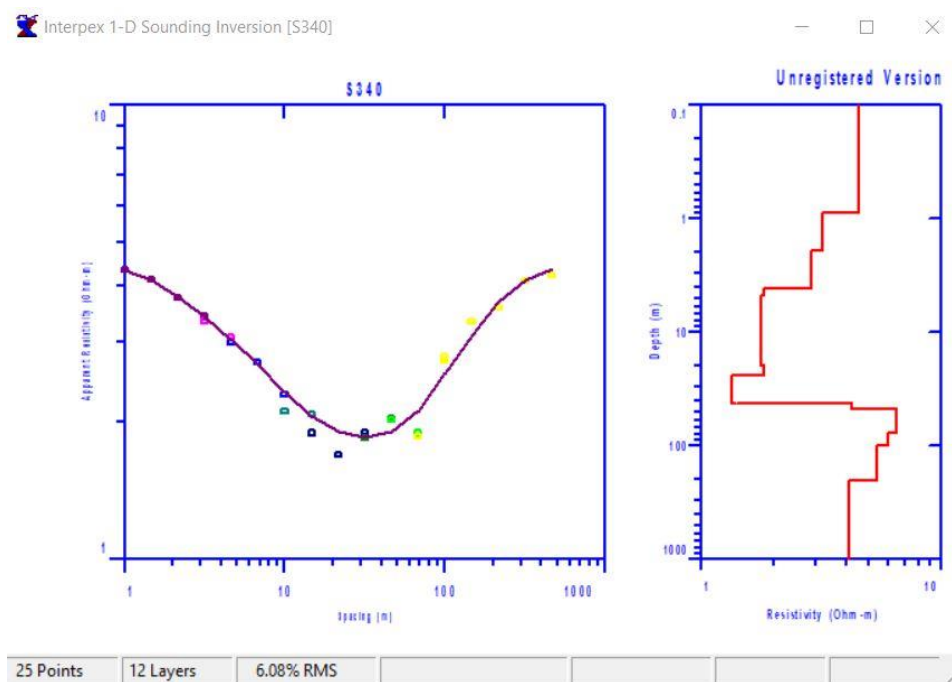
Surface Elevation: 994.00 Fitting Error: 6.8815

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	3.8858	☐	0.45044	0.67395	993.33	☐
2	3.1780	☐	0.21997	0.89392	993.11	☐
3	2.0258	☐	1.0924	1.9863	992.01	☐
4	1.6395	☐	14.229	16.215	977.78	☐
5	2.4107	☐	22.925	39.140	954.86	☐
6	2.8758	☐	16.713	55.854	938.15	☐
7	4.3225	☐	58.360	114.21	879.79	☐
8	9.4130	☐	78.166	192.38	801.62	☐
9	14.301	☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Column Math:

شکل (۸-۲۰): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 333، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۲۱): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 340 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

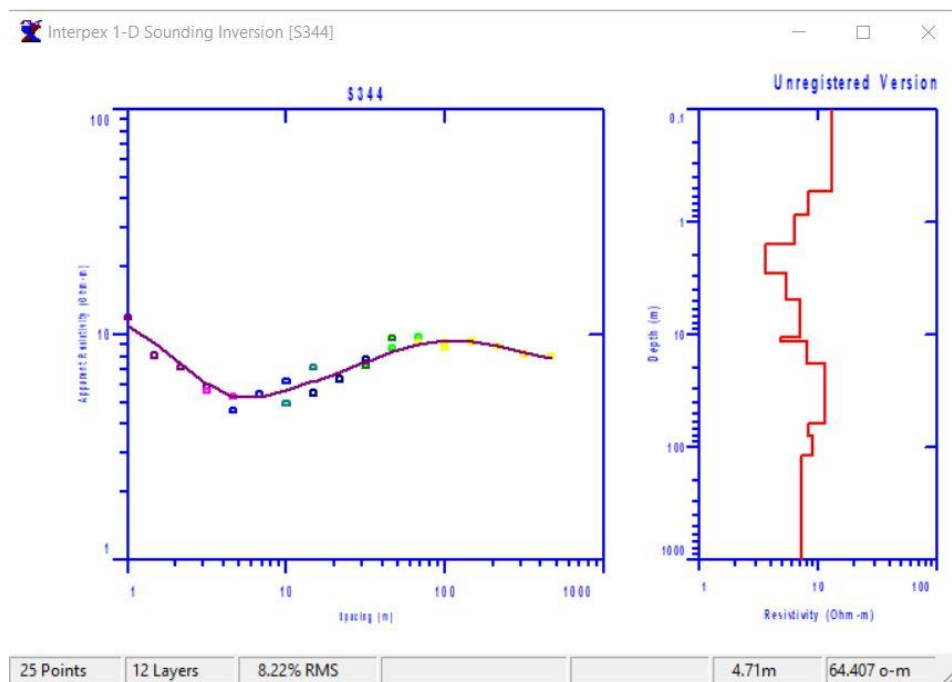
Surface Elevation: 1000.0 Fitting Error: 6.0794

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	4.5039	☐	1.0363	0.90002	999.10	☐
2	3.2070	☐	1.0419	1.9420	998.06	☐
3	2.8812	☐	2.1950	4.1370	995.86	☐
4	1.8303	☐	0.67596	4.8129	995.19	☐
5	1.7778	☐	14.966	19.779	980.22	☐
6	1.8324	☐	4.5107	24.289	975.71	☐
7	1.3493	☐	18.731	43.021	956.98	☐
8	4.2173	☐	4.2672	47.288	952.71	☐
9	6.5136	☐	29.992	77.280	922.72	☐
10	5.9605	☐	22.600	99.880	900.12	☐
11	5.3652	☐	102.75	202.63	797.37	☐
12	4.0965	☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۲۲): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 340، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۲۳): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 344 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

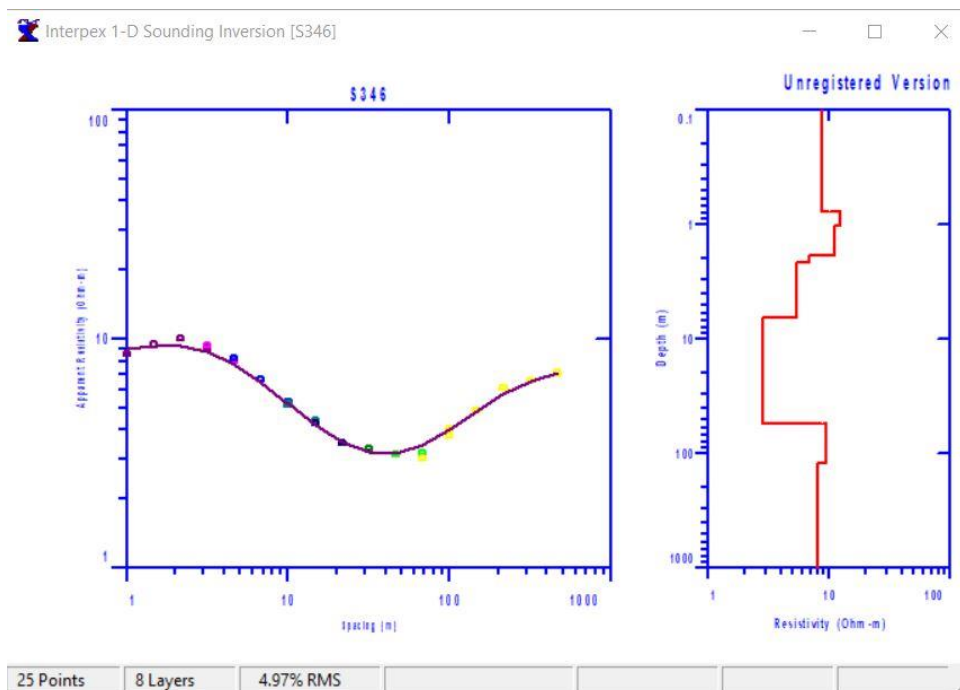
Surface Elevation: 941.00 Fitting Error: 8.2228

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	13.074	☐	0.90002	0.53998	940.46	☐
2	8.3172	☐	0.33002	0.87000	940.13	☐
3	6.3339	☐	0.71002	1.5800	939.42	☐
4	3.5656	☐	1.3200	2.9000	938.10	☐
5	5.4566	☐	2.0000	4.9000	936.10	☐
6	7.0016	☐	5.7400	10.640	930.36	☐
7	4.8850	☐	0.94000	11.580	929.42	☐
8	8.0649	☐	6.6100	18.190	922.81	☐
9	11.272	☐	43.180	61.370	879.63	☐
10	8.1902	☐	17.540	78.910	862.09	☐
11	8.9704	☐	38.420	117.33	823.67	☐
12	7.2662	☐				☐

Column Math:

شکل (۸-۲۴): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 344، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۲۵): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 346 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

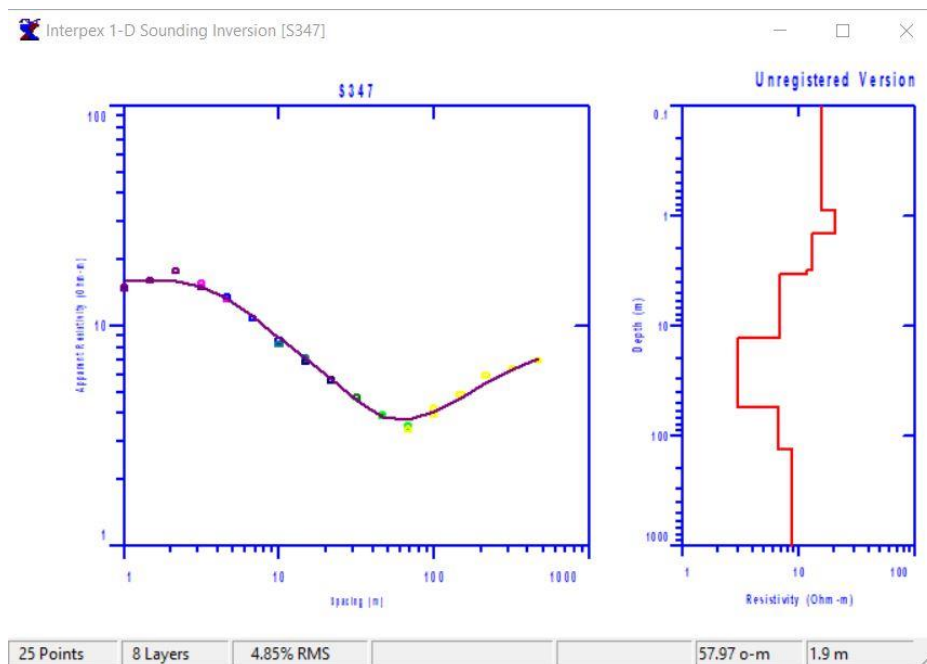
Surface Elevation: 955.00 Fitting Error: 4.9658

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	8.7995	☐	0.70001	0.77094	954.23	☐
2	12.188	☐	0.27069	1.0416	953.96	☐
3	10.995	☐	0.82129	1.8629	953.14	☐
4	6.7902	☐	0.28058	2.1435	952.86	☐
5	5.4366	☐	4.3609	6.5044	948.50	☐
6	2.8376	☐	47.883	54.387	900.61	☐
7	9.3287	☐	66.489	120.88	834.12	☐
8	8.0379	☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Column Math:

شکل (۸-۲۶): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 346، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۲۷): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ 347 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

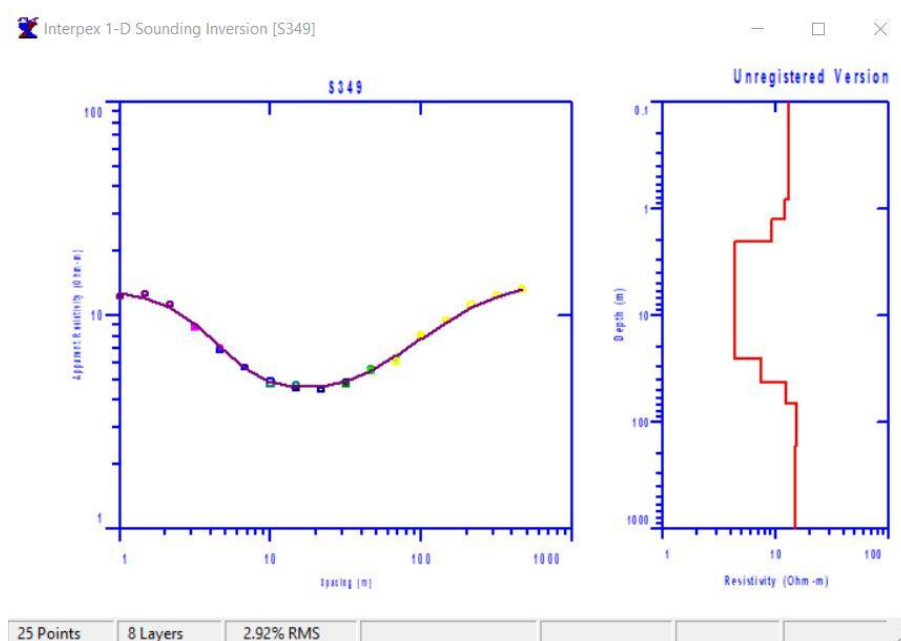
Surface Elevation: 953.00 Fitting Error: 4.8493

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	15.672	☐	0.90002	0.88879	952.11	☐
2	20.386	☐	0.57123	1.4600	951.54	☐
3	13.138	☐	1.6372	3.0972	949.90	☐
4	11.848	☐	0.33356	3.4308	949.57	☐
5	6.8845	☐	9.3906	12.821	940.18	☐
6	3.0053	☐	42.692	55.513	897.49	☐
7	6.5978	☐	78.924	134.44	818.56	☐
8	8.7741	☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۲۸): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 347، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۲۹): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ 349 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

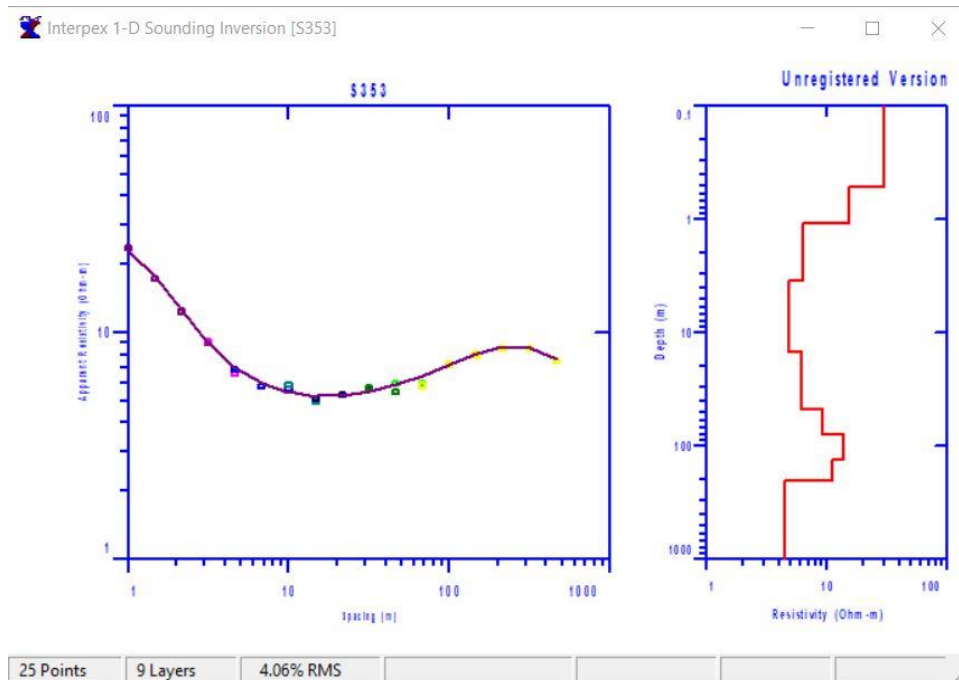
Surface Elevation: 971.00 Fitting Error: 2.9198

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	13.096	☐	0.88879	0.82001	970.18	☐
2	11.986	☐	0.44397	1.2640	969.74	☐
3	9.2788	☐	0.74554	2.0095	968.99	☐
4	4.3399	☐	23.312	25.321	945.68	☐
5	7.3840	☐	16.742	42.063	928.94	☐
6	12.457	☐	24.628	66.691	904.31	☐
7	15.217	☐	101.70	168.39	802.61	☐
8	14.800	☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۳۰): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 349، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۳۱): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 353 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

Surface Elevation: 951.00 Fitting Error: 4.0560

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

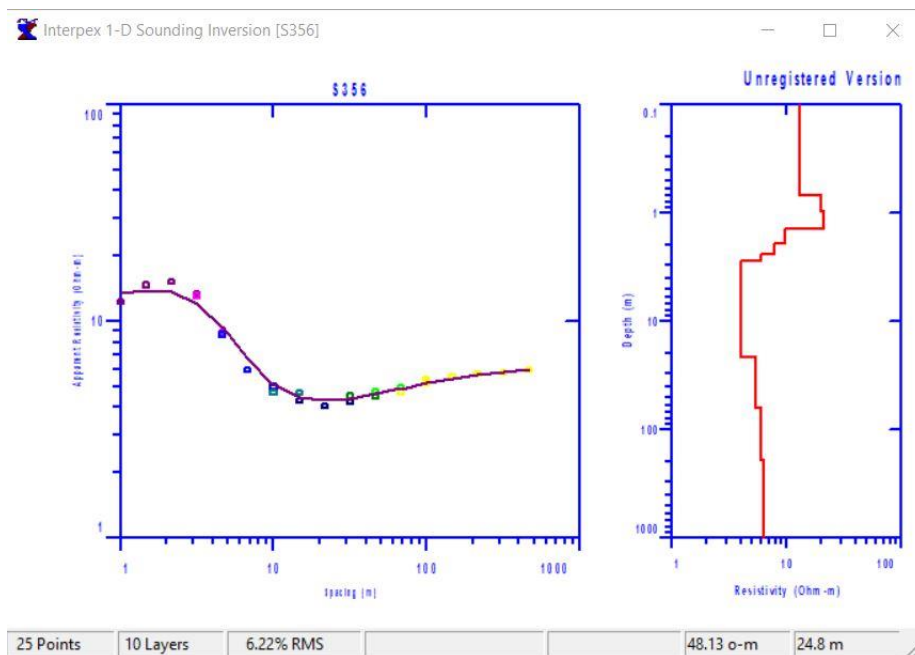
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	29.564	☐	0.77094	0.52209	950.48	☐
2	15.227	☐	0.55212	1.0742	949.93	☐
3	6.3433	☐	2.3855	3.4597	947.54	☐
4	4.8243	☐	11.459	14.919	936.08	☐
5	6.1988	☐	32.799	47.717	903.28	☐
6	9.3030	☐	31.025	78.742	872.26	☐
7	13.831	☐	54.042	132.78	818.22	☐
8	10.947	☐	68.062	200.85	750.15	☐
9	4.4403	☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward

Delete Cell Delete Row Add To One Iteration

OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۳۲): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 353، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۳۳): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 356 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

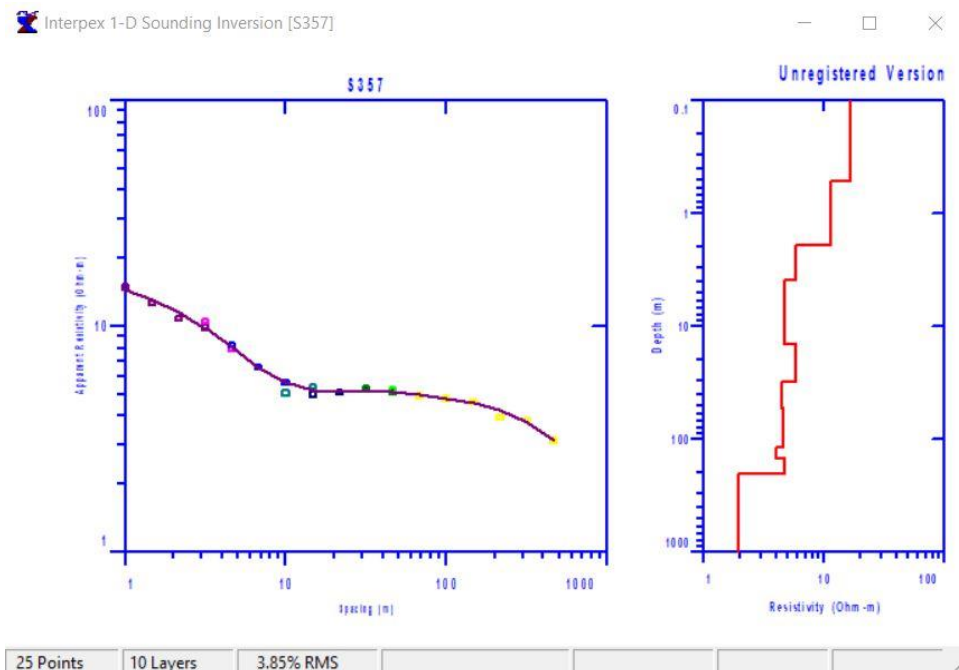
Surface Elevation: 970.00 Fitting Error: 6.2241

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	12.862	☐	0.52209	0.69977	969.30	☐
2	19.761	☐	0.28064	0.98041	969.02	☐
3	21.054	☐	0.41132	1.3917	968.61	☐
4	9.7543	☐	0.51410	1.9058	968.09	☐
5	7.7317	☐	0.50879	2.4146	967.59	☐
6	5.9935	☐	0.33234	2.7469	967.25	☐
7	4.0508	☐	18.978	21.725	948.28	☐
8	5.4133	☐	42.348	64.073	905.93	☐
9	5.9259	☐	126.35	190.43	779.57	☐
10	6.2843	☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۳۴): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 356، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۳۵): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرایی 357 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

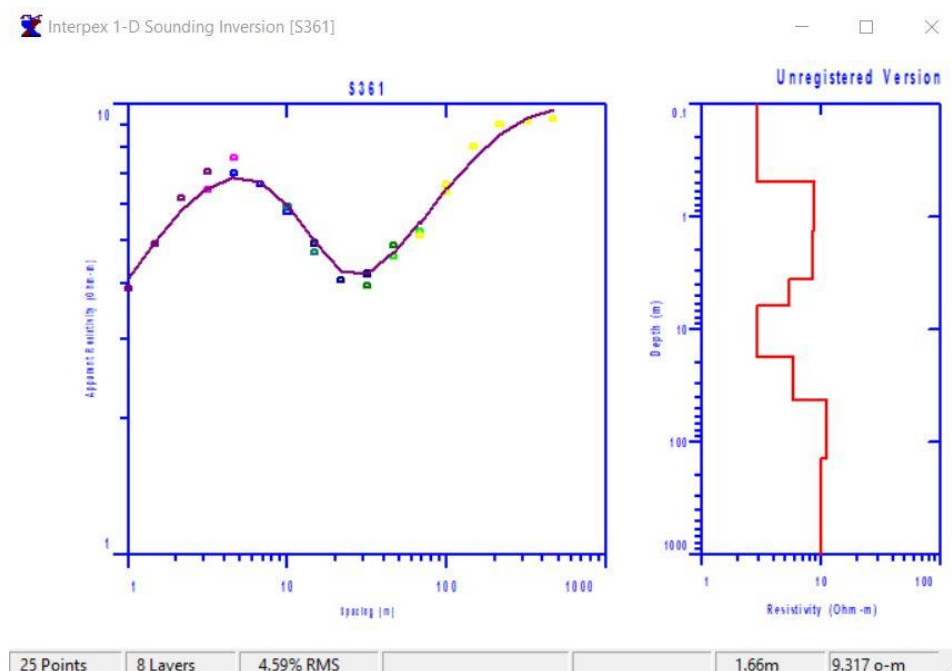
Surface Elevation: 980.00 Fitting Error: 3.8491

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	16.621	☐	0.69977	0.51935	979.48	☐
2	11.298	☐	1.4071	1.9265	978.07	☐
3	5.7969	☐	2.0389	3.9653	976.03	☐
4	4.7139	☐	10.457	14.422	965.58	☐
5	5.7967	☐	16.584	31.006	948.99	☐
6	4.4102	☐	22.437	53.444	926.56	☐
7	4.6408	☐	64.789	118.23	861.77	☐
8	3.9771	☐	31.083	149.32	830.68	☐
9	4.6611	☐	52.744	202.06	777.94	☐
10	1.9562	☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

شکل (۸-۳۶): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 357، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۳۷): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 361 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

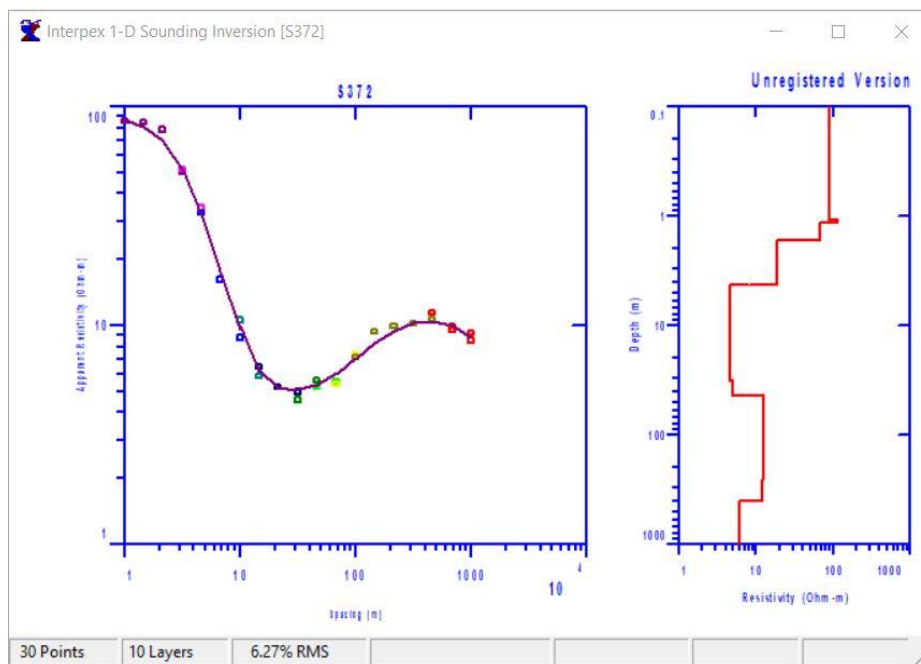
Surface Elevation: 971.00 Fitting Error: 4.5947

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	2.9283	☐	0.51935	0.48615	970.51	☐
2	8.6603	☐	0.83154	1.3177	969.68	☐
3	8.5947	☐	2.3022	3.6199	967.38	☐
4	5.3623	☐	2.5768	6.1967	964.80	☐
5	2.8956	☐	11.441	17.638	953.36	☐
6	5.7836	☐	24.783	42.421	928.58	☐
7	11.120	☐	98.199	140.62	830.38	☐
8	10.064	☐				☐
9		☐				☐
10		☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Column Math:

شکل (۸-۳۸): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 361، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.



شکل (۸-۳۹): مدل به دست آمده (سمت راست) و برازش منحنی حاصل از مدل بر روی داده‌های سونداژ صحرائی 372 پس از یک مرحله وارون سازی (سمت چپ) در نرم افزار IX1D.

Resistivity Model

Surface Elevation: 901.00 Fitting Error: 6.2693

☒ Use Depth Instead of Thickness Units: (meters)

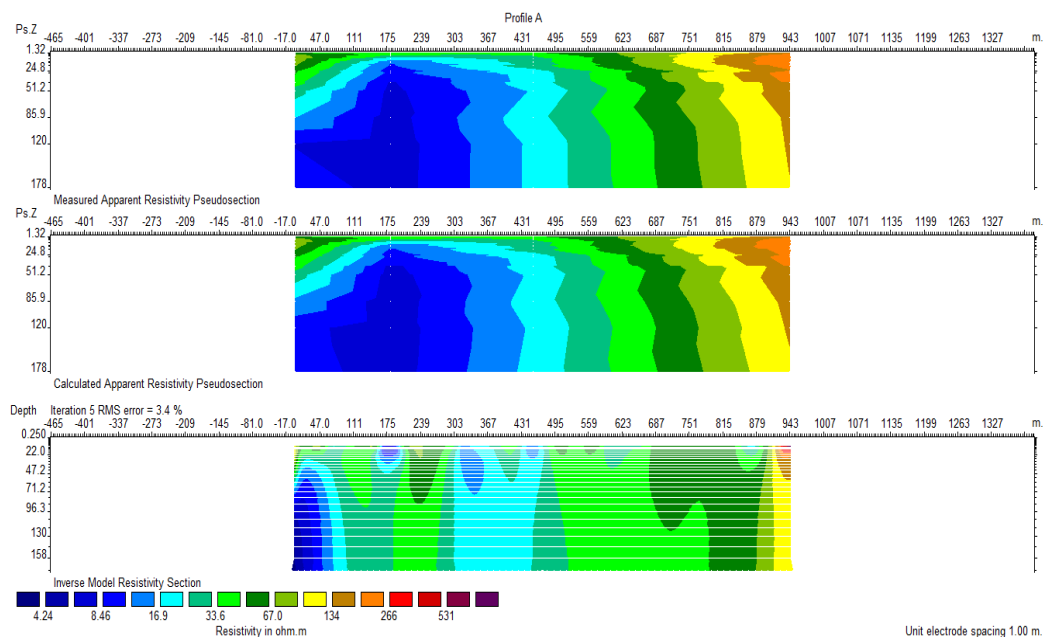
#	Rho	Fix?	Thick	Depth	Elev	Fix?
1	90.576	☐	0.48615	1.1000	899.90	☐
2	112.32	☐	0.45715E-	1.1457	899.85	☐
3	67.741	☐	0.53625	1.6819	899.32	☐
4	18.845	☐	2.6242	4.3062	896.69	☐
5	4.6729	☐	27.982	32.288	868.71	☐
6	4.9891	☐	11.457	43.745	857.26	☐
7	12.464	☐	78.501	122.25	778.75	☐
8	12.265	☐	136.45	258.70	642.30	☐
9	12.151	☐	141.28	399.98	501.02	☐
10	5.9531	☐				☐
11		☐				☐
12		☐				☐

Insert Cell Insert Row Column Math: Forward
 Delete Cell Delete Row Add To One Iteration
 OK Cancel Multiply By More Iterations

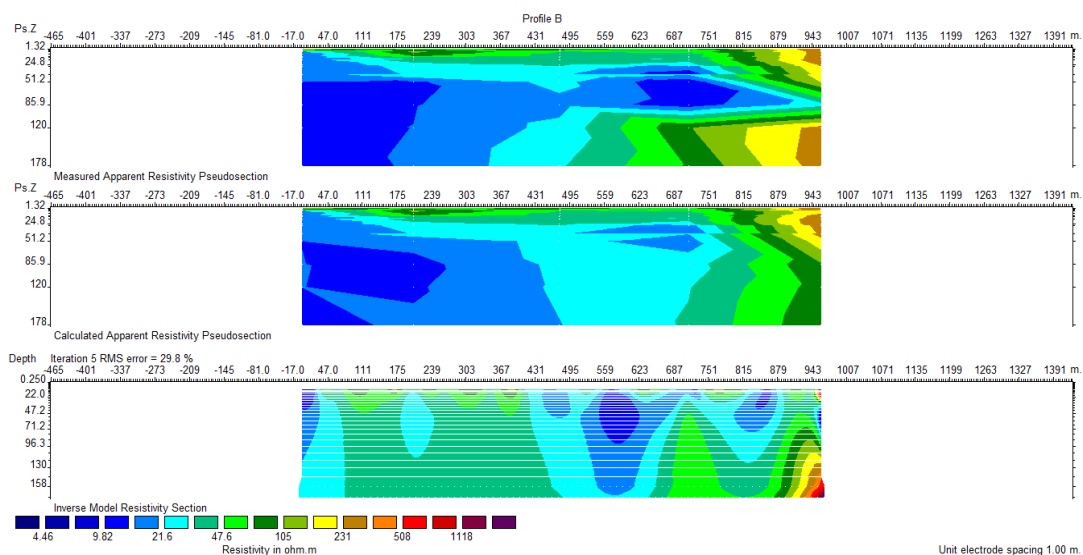
شکل (۸-۴۰): مشخصات مدل حاصل از مدل سازی یک بعدی داده‌های سونداژ 372، پس از اعمال یک مرحله وارون سازی در نرم افزار IX1D.

۲- مقاطع مدل سازی دوبعدی سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی

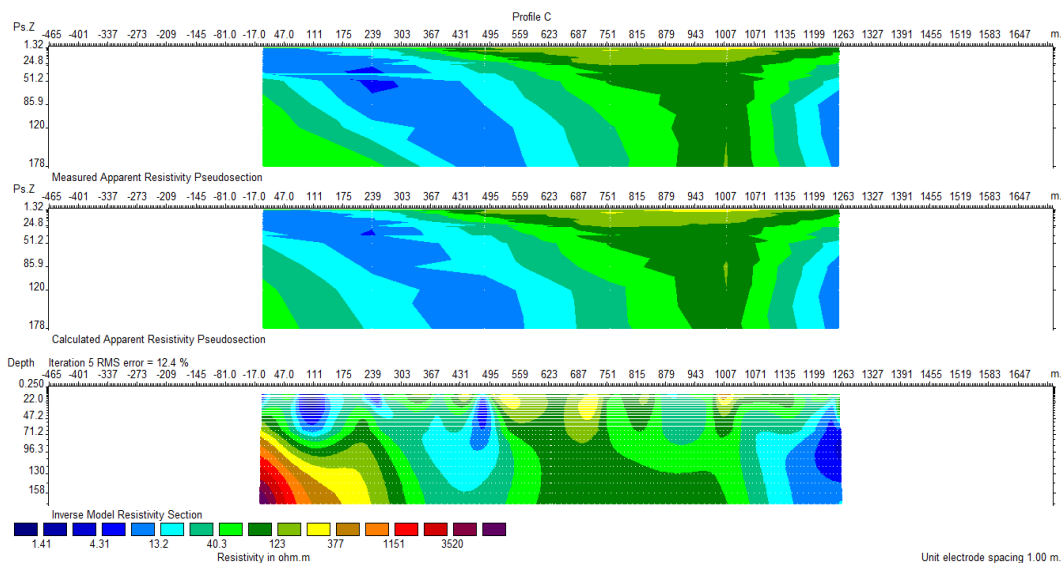
به اختصار تعدادی از مقاطع حاصل از مدل سازی دوبعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی به وسیله نرم افزارهای Res2Dinv و ZondRes2D، به ترتیب آورده شده است.



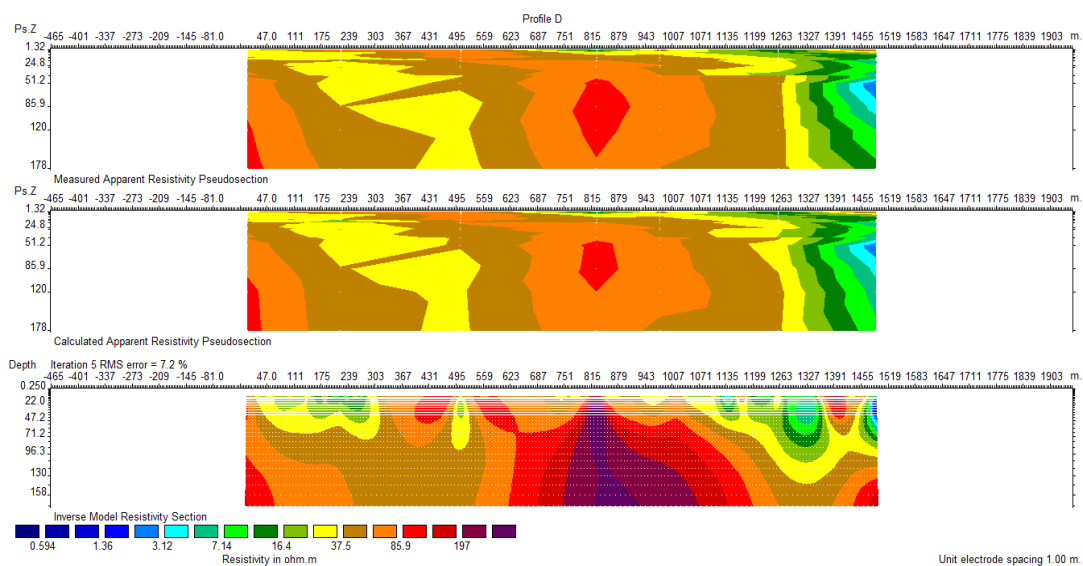
شکل (۸-۴۱): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل A که با استفاده از نرم افزار **Res2Dinv** به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



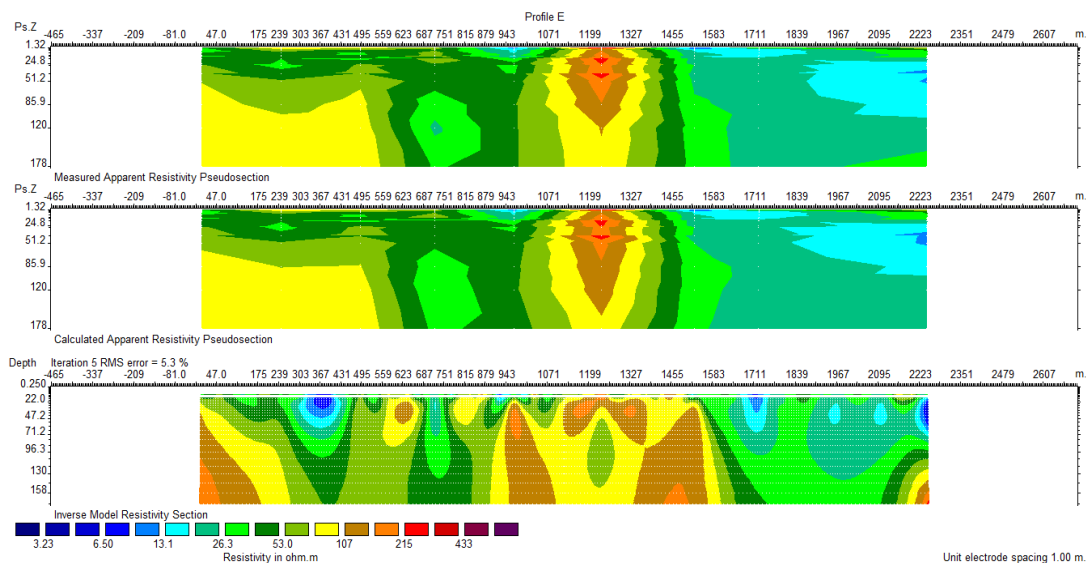
شکل (۸-۴۲): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل B که با استفاده از نرم افزار **Res2Dinv** به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



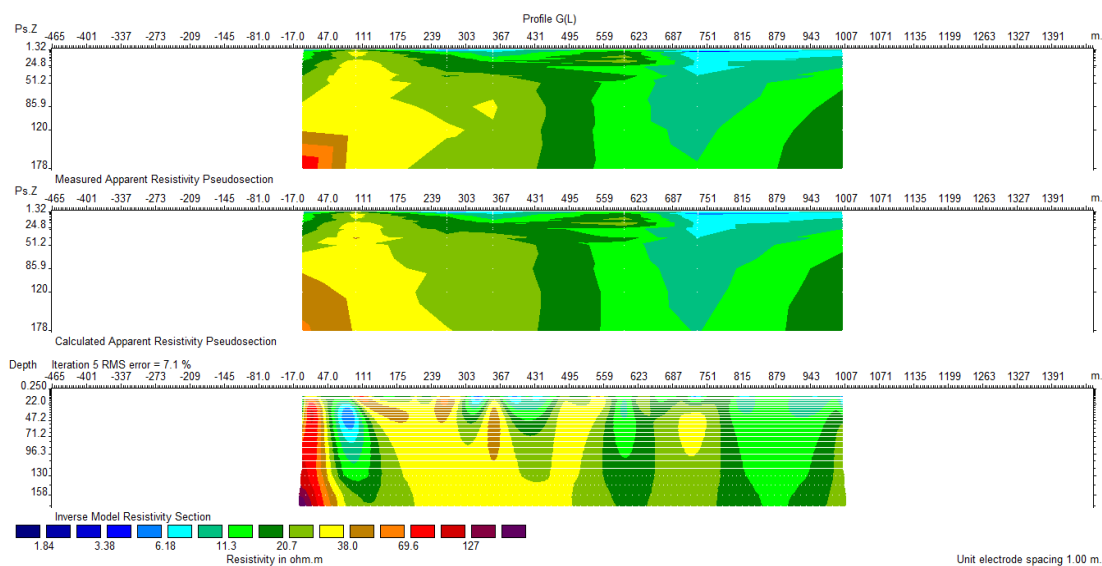
شکل (۸-۴۳): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل C که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



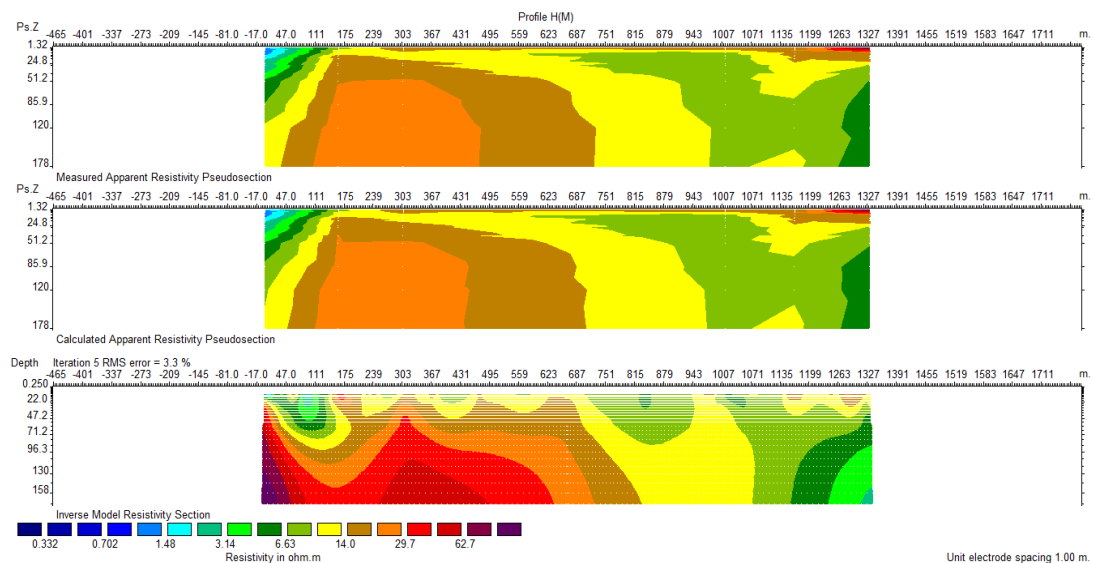
شکل (۸-۴۴): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل D که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



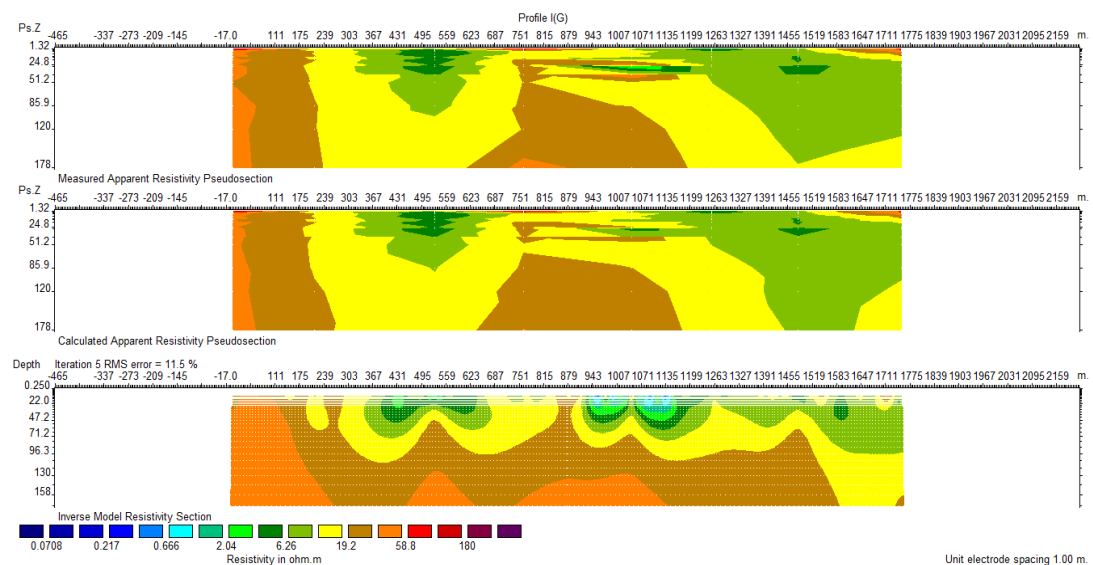
شکل (۸-۴۵): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل E که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



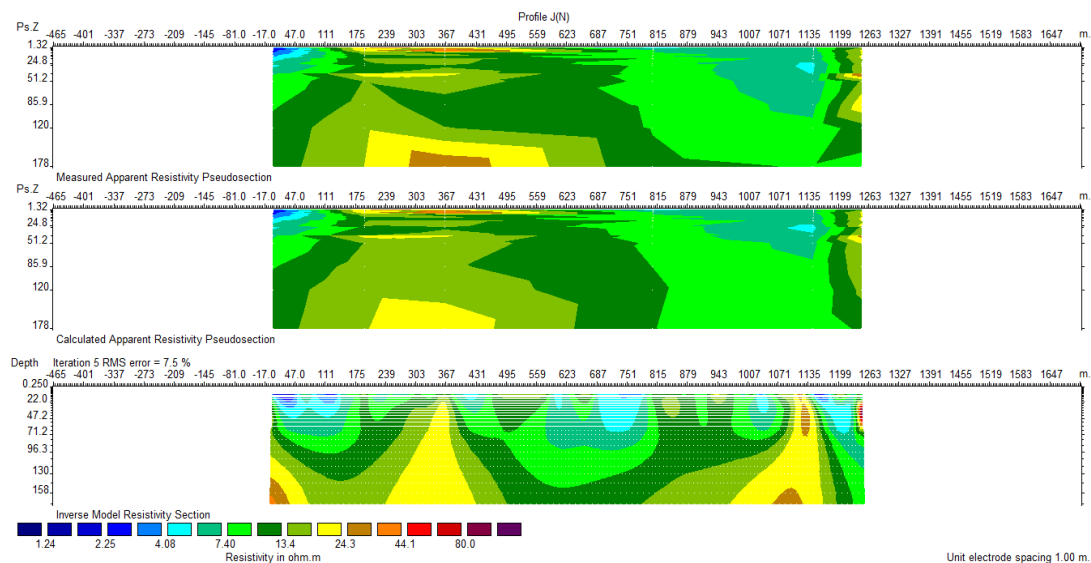
شکل (۸-۴۶): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل G(L) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



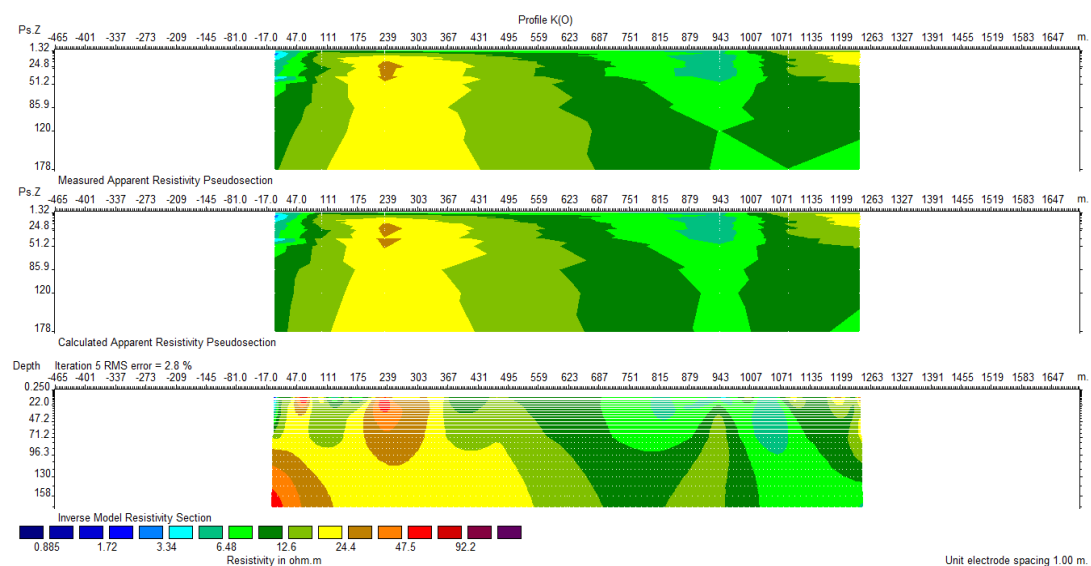
شکل (۸-۴۷): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $H(M)$ که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



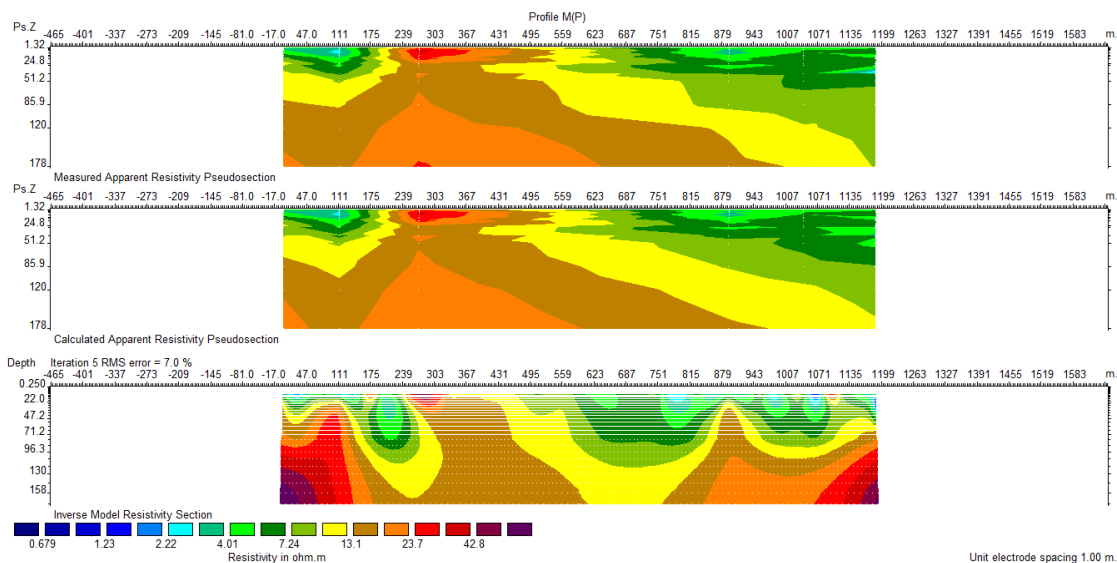
شکل (۸-۴۸): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $I(G)$ که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



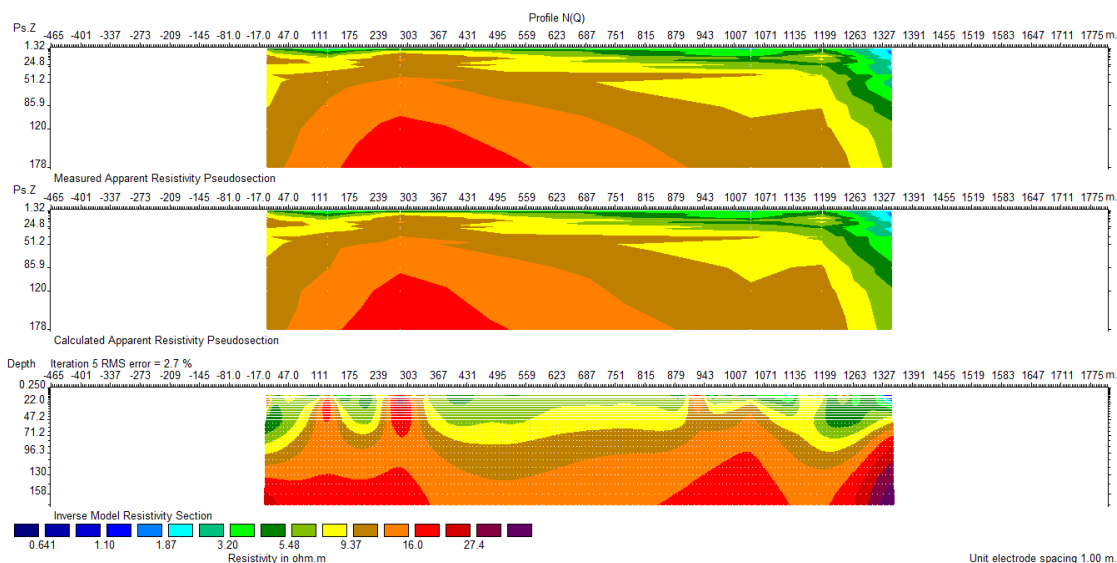
شکل (۸-۴۹): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل J(N) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



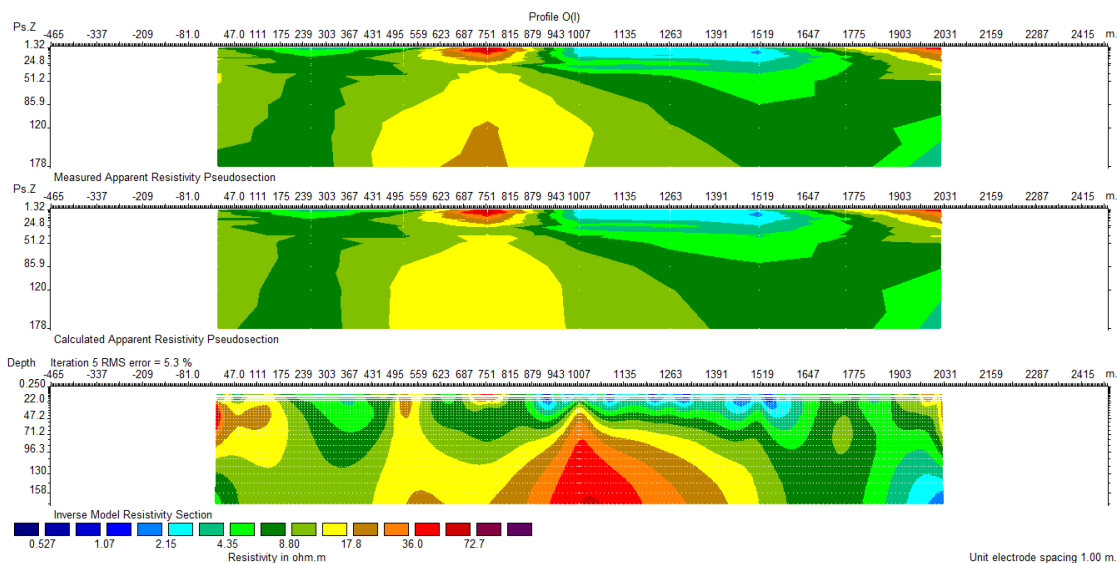
شکل (۸-۵۰): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل K(O) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



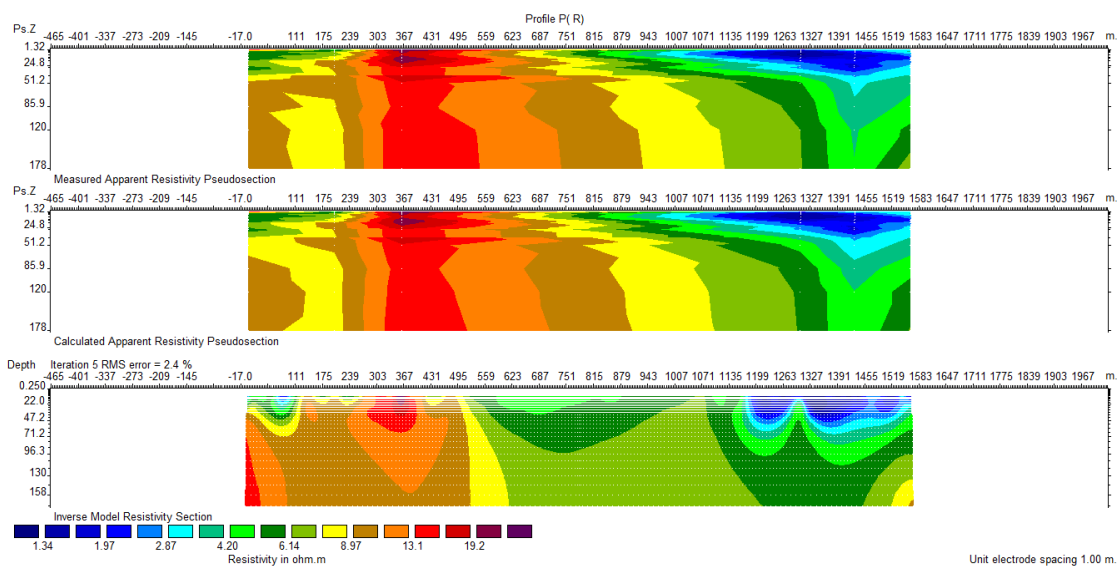
شکل (۸-۵۱): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $M(P)$ که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



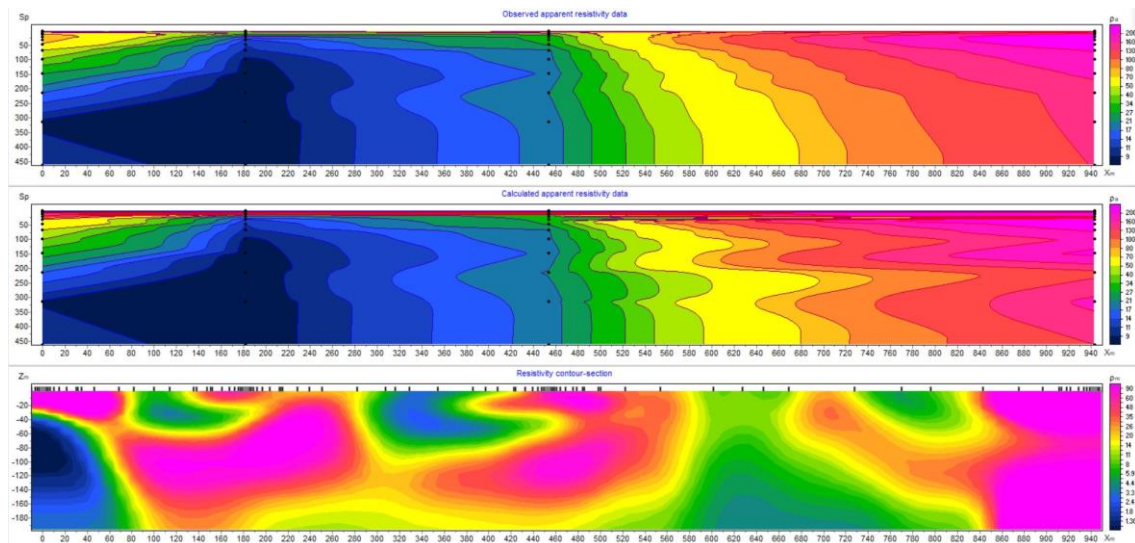
شکل (۸-۵۲): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $N(Q)$ که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



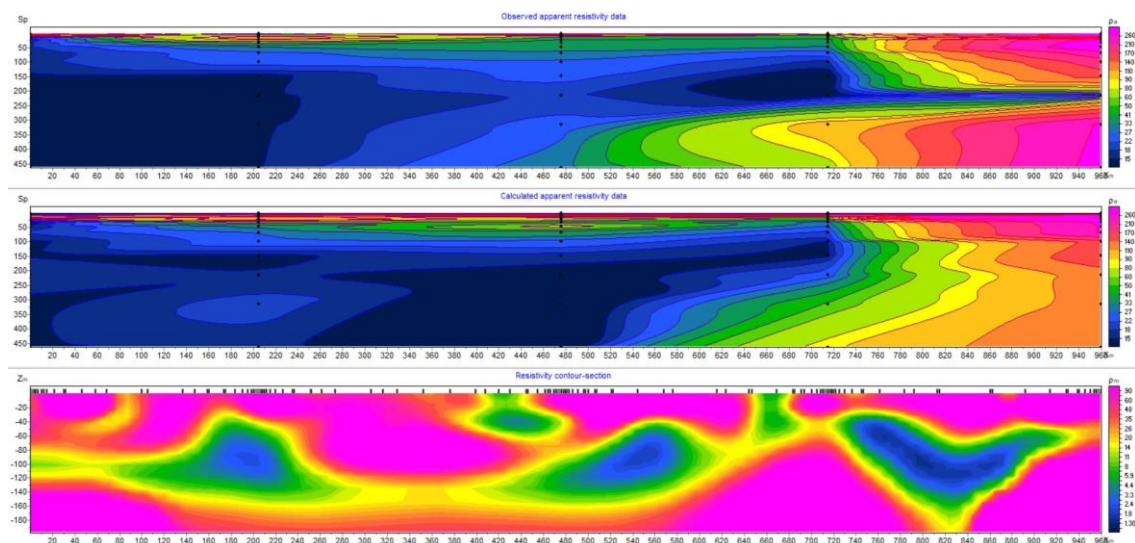
شکل (۸-۵۳): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل O(I) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



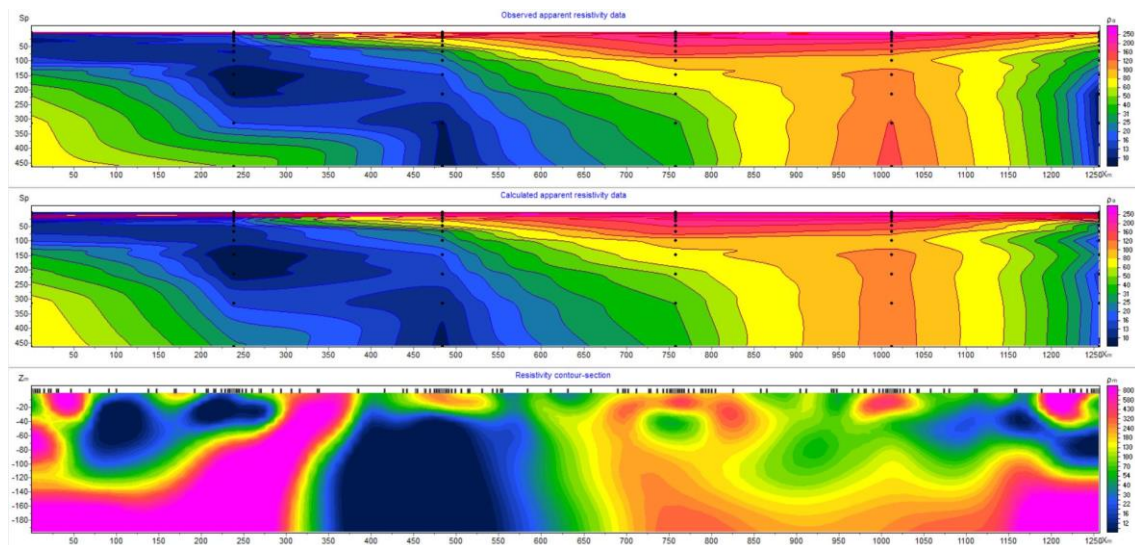
شکل (۸-۵۴): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل P(R) که با استفاده از نرم افزار Res2Dinv به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



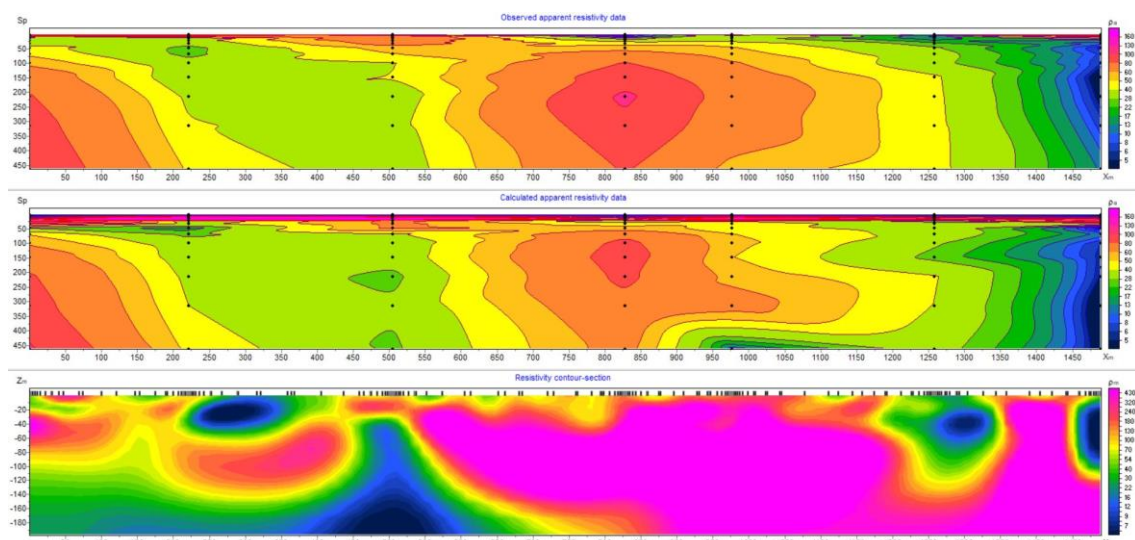
شکل (۸-۵۵): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل A که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به- دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



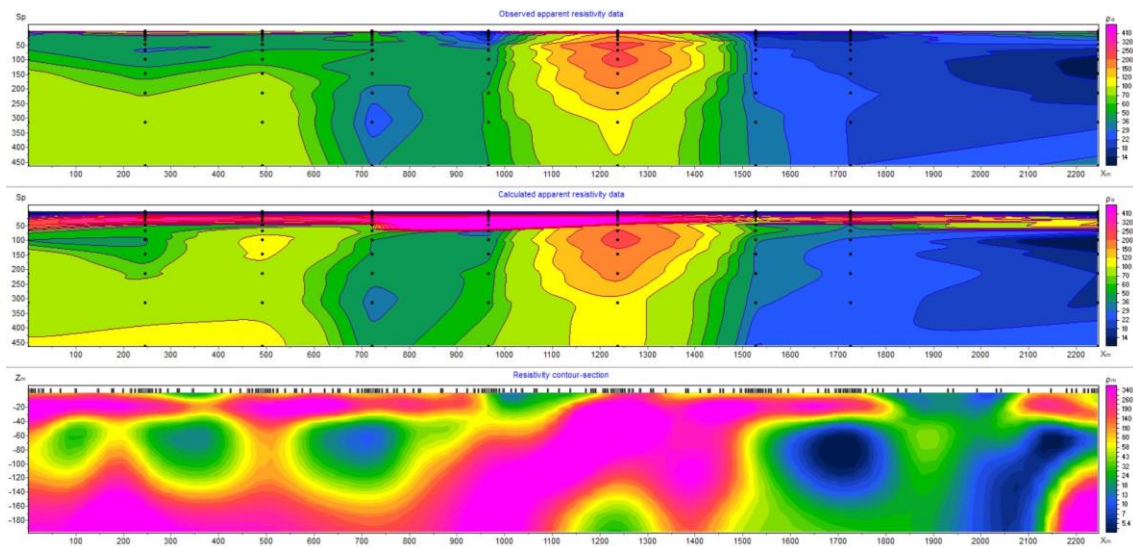
شکل (۸-۵۶): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل B که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به- دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



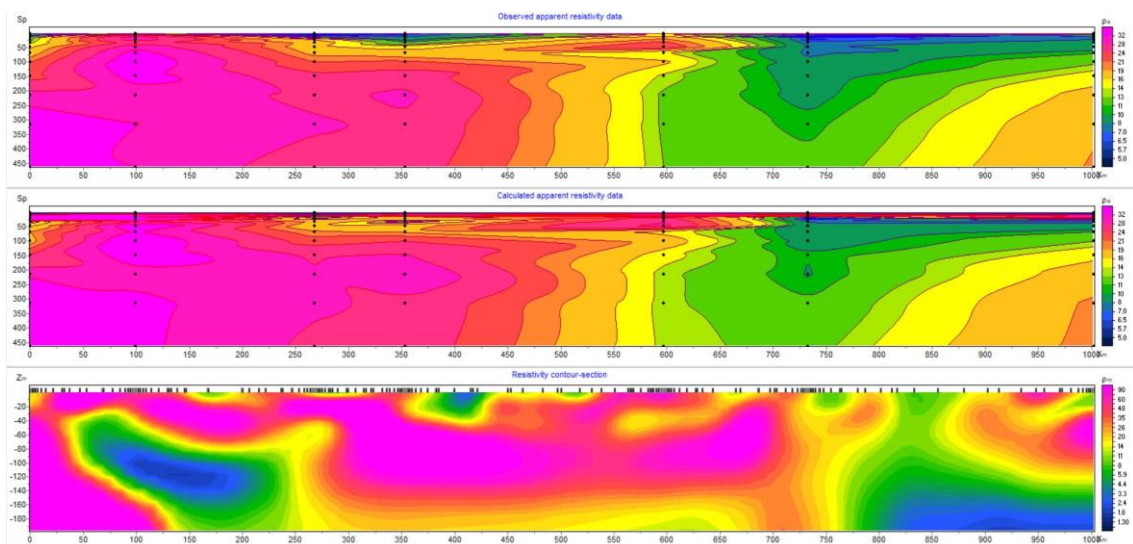
شکل (۸-۵۷): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل C که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به- دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



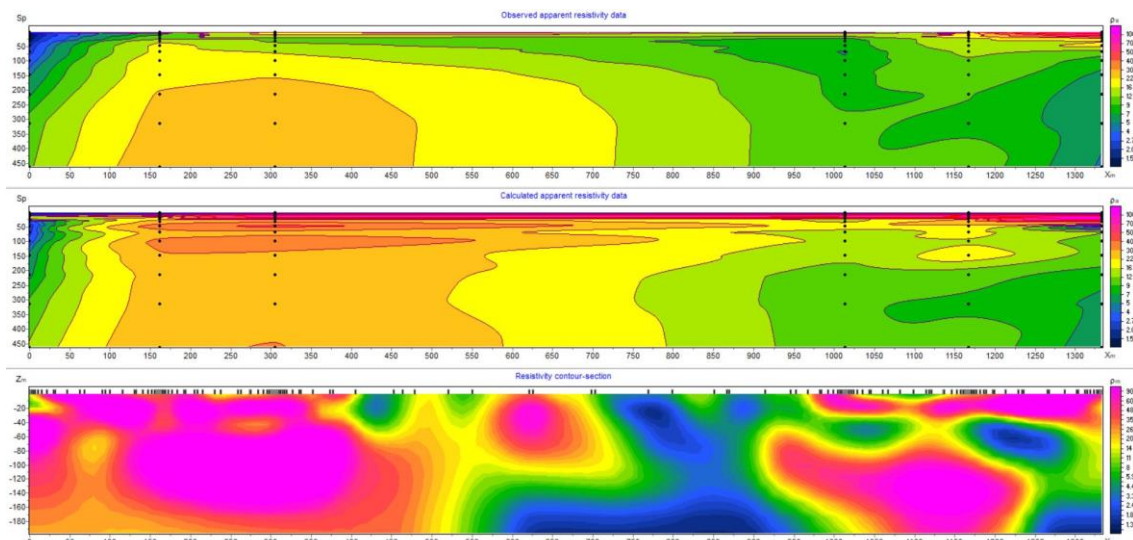
شکل (۸-۵۸): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل D که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به- دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



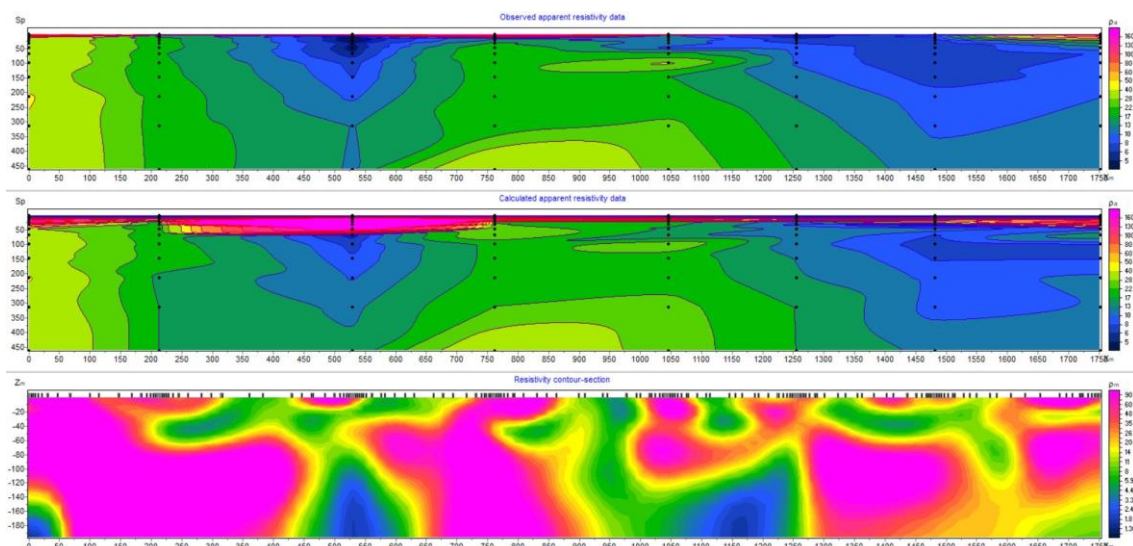
شکل (۸-۵۹): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل E که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به- دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



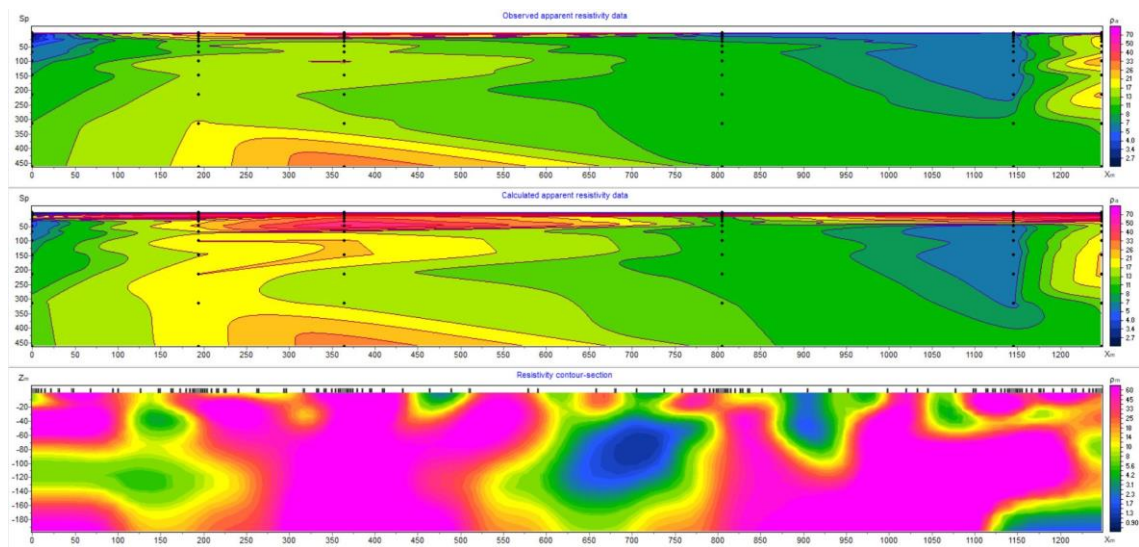
شکل (۸-۶۰): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل G(L) که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به- دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



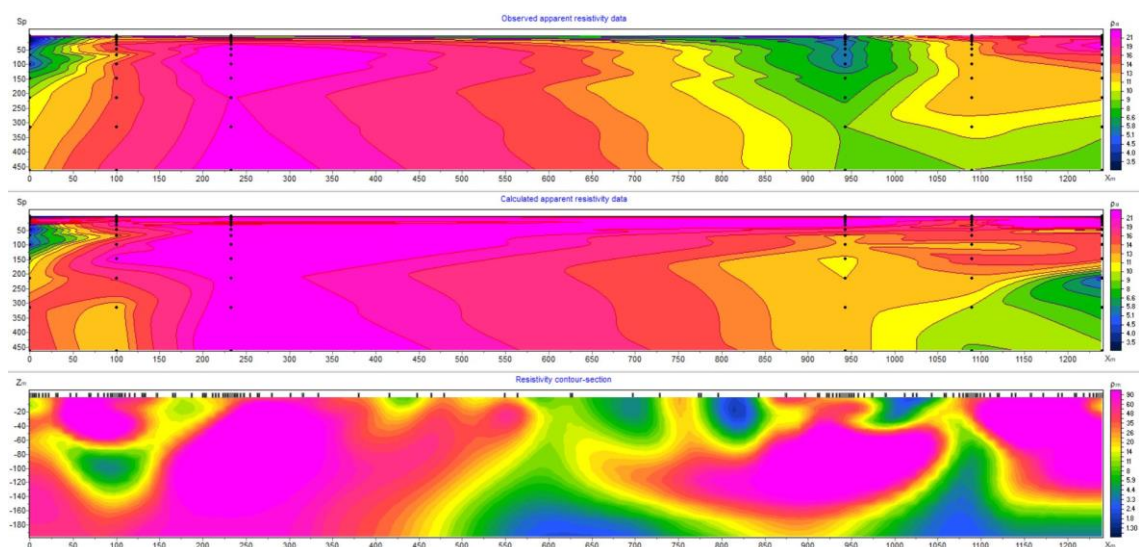
شکل (۸-۶۱): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل $H(M)$ که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



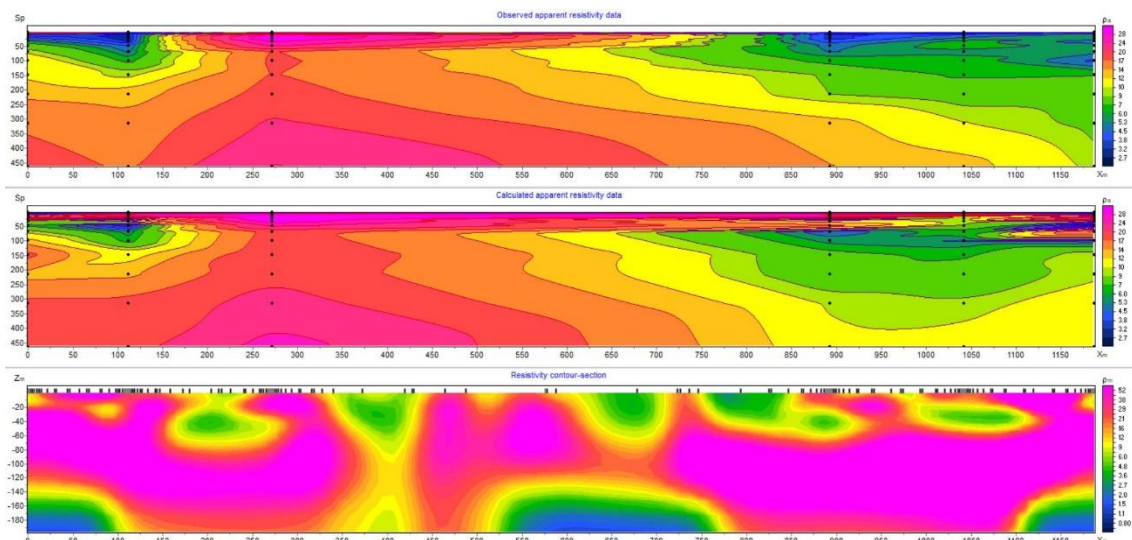
شکل (۸-۶۲): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل $I(G)$ که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



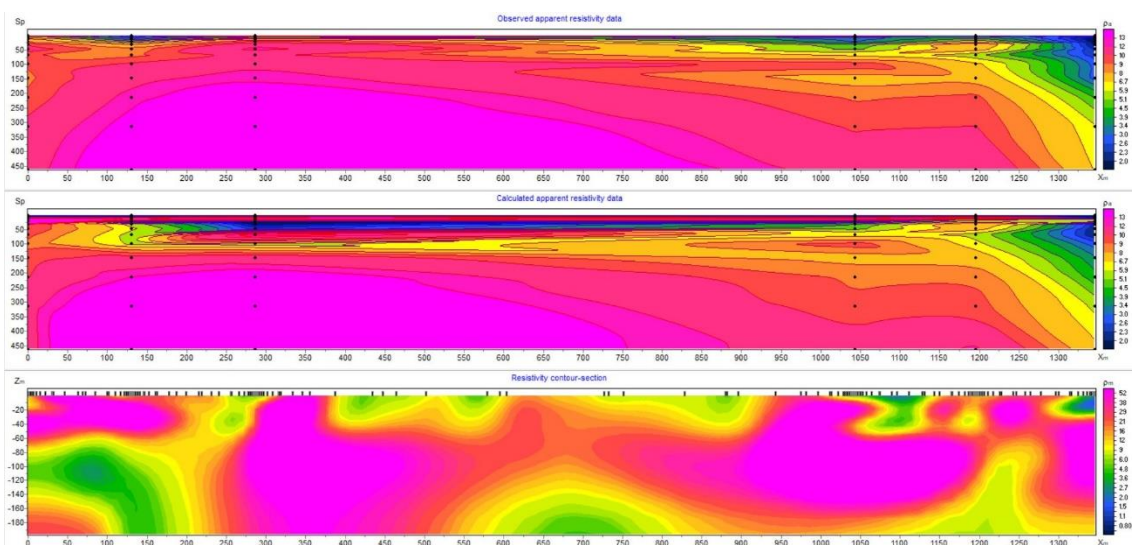
شکل (۸-۶۳): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $J(N)$ که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



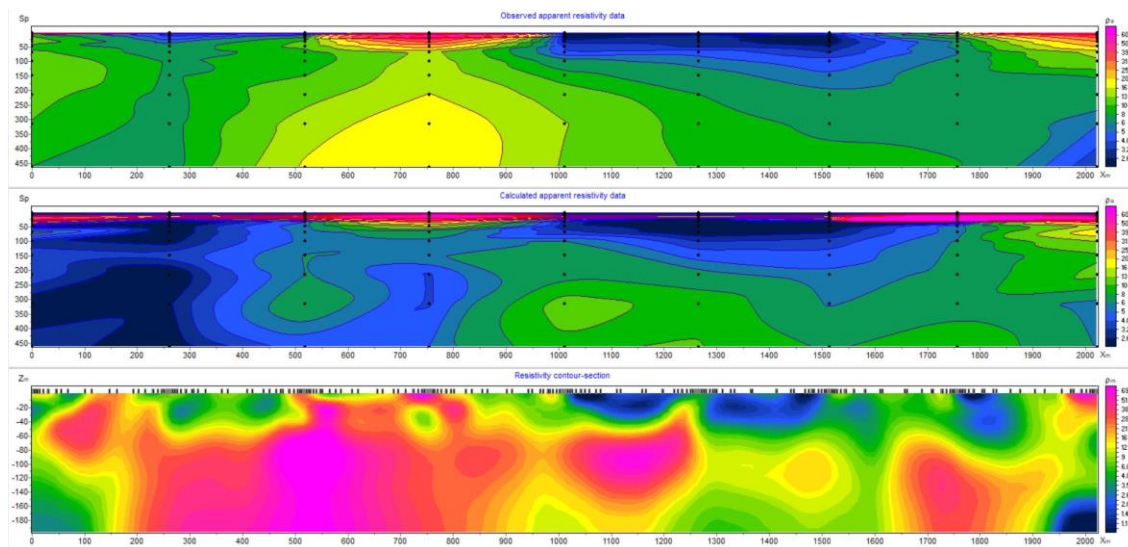
شکل (۸-۶۴): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $K(O)$ که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل بر حسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



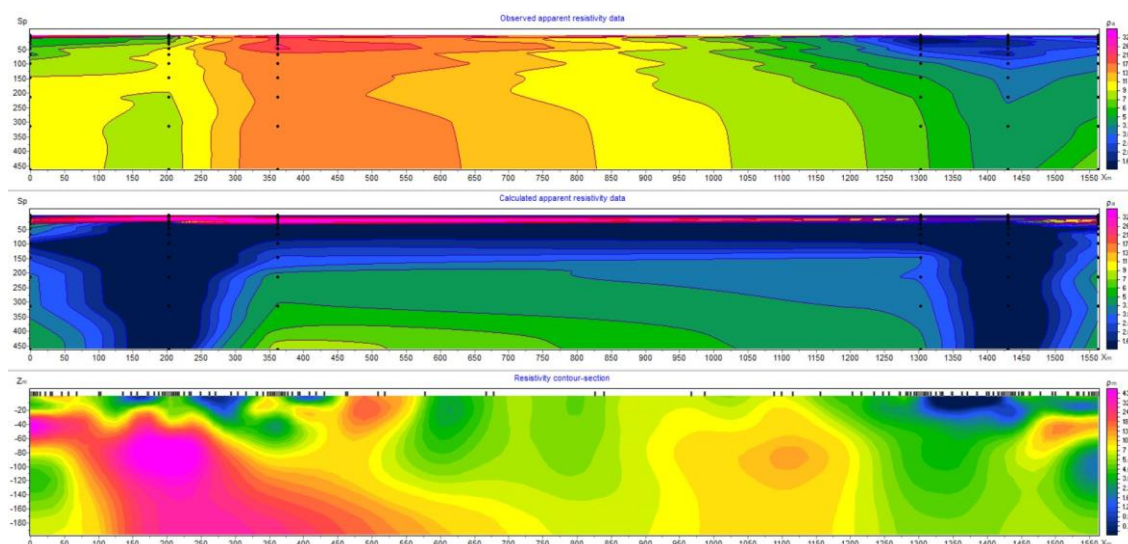
شکل (۸-۶۵): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $M(P)$ که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



شکل (۸-۶۶): مقطع حاصل از مدل سازی وارون پروفیل $N(Q)$ که با استفاده از نرم افزار ZondRes2D به دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



شکل (۸-۶۷): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل $O(I)$ که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به-دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).



شکل (۸-۶۸): مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون پروفیل $P(R)$ که با استفاده از نرم‌افزار ZondRes2D به‌دست آمده است (فواصل برحسب متر و فاصله واقعی ۱۰ برابر مقادیر در شکل است).

Abstract

Exploitation of groundwater to fulfill the water daily needs goes back to very far past times. Today, using electrical resistivity studies performed on the ground, surface at a relatively low cost and fast, useful information can be obtained about groundwater resources. For this thesis, sounding data acquisition from about 200 electrical Sounding locations along 27 parallel survey lines having north-south direction were made in order to quantitatively and qualitatively investigate groundwater resources in the Saveh plain area. The survey lines were spread to the heights around the plain. Interpretation of the acquired resistivity sounding data was made, first, in one-dimensional form using master curves and **IX1D** and **IP12WIN** software programs, and then, in two-dimensional form using **RES2DINV** and **ZONDRES2D** software packages. The information of the piezometer wells existing in the mentioned plain was used for better interpretation, and consequently, the resistivity, depth and thickness of the aquifer in the study plain were determined. The studies showed that the central parts of the plain were more important hydrologically because the water level depth in these parts is relatively shallow and the higher groundwater layer resistivity in these parts indicates better water quality, especially in the areas close to the south of the plain. As we move forward to the east of the plain, the depth of the water table decreases.

Determination of groundwater quality characteristics such as its chemical, physical and biological properties, will show how suitable it is for the intended consumption. The nature of these characteristics is such that they affect the electrical resistivity measurements of the aquifer. Since one of the objectives of this study is to determine the relationships between hydrogeochemical changes and the results of modeling and interpretation of electrical sounding data. Linear regression method is used to determine the relationship between hydrogeochemical information, which includes electrical conductivity (**EC**) and total dissolved solids (**TDS**) of the wells, and the results of the interpretation of 6 electrical resistivity sounding locations adjacent to these wells. Studies have shown that with increasing the concentration of ions in groundwater, the resistivity of the water-bearing layer dramatically decreases. Among the provided diagrams showing these relationships, those that use exponential curves to fit the data, had higher correlation coefficients. This can indicate the curve-like or nonlinear correlation between the hydrogeochemical parameters and the resistivity of the water-bearing layer. In addition to hydrogeochemical data, hydraulic parameters such as hydraulic conductivity (**K**) and transmissivity coefficient (**T**) of 3 wells adjacent to the 3 resistivity sounding locations were also used. A linear relationship was made between the resistivity of water-bearing layer (**ρ**) and (**K**), and also, a logarithmic correlation was established between (**ρ**) and (**T**). Despite obtaining a relatively good correlation between hydraulic parameters and electrical resistivity, due to the small number of wells, and therefore, the lack of data, the validity of the results is not very high.

Keywords: Resistivity sounding, Hydrogeochemical, Electrical conductivity (**EC**), Total dissolved solids (**TDS**), Hydraulic conductivity (**K**), Transmissivity coefficient (**T**), Saveh plain



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Exploratory geophysics

Relationship between hydrological and hydrogeochemical parameters of aquifer with interpretation results of vertical electrical sounding in Saveh plain area

By:

Mostafa Khan Ahmadi

Supervisor:

Dr. Abolghasem Kamkar Rouhani

Dr. Alireza Arab-Amiri

Advisor:

Ahmad Bagheri

Feb, 2021