

رسالة محمد

٢



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف و ژئوفیزیک

(رشته مهندسی اکتشاف معدن)

اکتشاف آبهای زیرزمینی کارستی در منطقه جنوب غربی تپال شاهرود با استفاده از مدل‌سازی با

روش عددی اجزاء محدود و معکوس‌سازی داده‌های ژئوالکتریک

دانشجو: فریدون شریفی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا عرب امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای فریدون شریفی

تحت عنوان: اکتشاف آبهای زیرزمینی کارستی در منطقه جنوب غربی تپال شاهرود با استفاده از مدل سازی با روش عددی اجزاء محدود و معکوس سازی داده های ژئوالکتریک

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

## تقدیم به:

آنان که ناتوان شدند تا به توانایی برسند ...

موهایشان سپید شد تا روسفید شوم...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجودم و روشنگر راهم باشند...

پدرم

مادرم

استادانم

## تشکر و قدردانی

راز و رمز پویای علم و کشف معانی بدیع و تجلی جلوه‌های شهودی معرفت کیمیایی است که آسمان علم به برکت سیما و سیره‌ی نورانی پیامبر گرامی اسلام صلی الله علیه و آله و صحبه و سلم، انسان در بند خاک را به معراج حضور می‌خواند.

چه خرم، علمی که از چشمه معارف سیراب شود و چه زیبا، دانشی که قبای پرنیانش به عطر و بوی گلستان محمدی معطر شود و چه معماری باشکوهی، بنایی که سنگ هویت و فرهنگ آن ریشه در مدینه‌النبی بیابد. امروز کاخ آباد علم به سروش معنوی و مفهوم پیام او بیش از پیش محتاج راهنمایی است که علاوه بر حفظ آبادانی آن، در راه اعتلای آن به فرزندان خویش محبت نمایند.

معلمی، پارچه لطیف زربافتی است با تار محبت و پود علم که پشت در کلاس او همه فرادهای روشن نشسته‌اند و طنین صدای معلم خوش‌ترین بخش رازهای زمین است که در قیامت پخش می‌شود و خشم معلم دلسوز نیز مثل رعد است، همسایه باران و سرسبزی.

بی‌تردید این پژوهش بدون راهنمایی بسیاری از سروران و دوستان گرانقدر، به نتیجه مطلوب نمی‌رسید. از این رو بر خود لازم می‌دانم تا از مساعدت‌ها و راهنمایی‌های اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر عرب‌امیری و جناب آقای دکتر کامکارروحانی که در طول انجام این پروژه همواره بنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده و راهگشای مشکلات بنده بودند و همچنین از راهنمایی‌های با ارزش آقایان دکتر تخم‌چی، دکتر کنشلو و دکتر کرمی که با ارائه نکاتی در پر بارتر نمودن این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، کمال تقدیر و امتنان را داشته و موفقیت روز افزون ایشان را از درگاه دادگر هستی بخش خواستارم.

همچنین از درگاه ایزد منان برای تمامی معلمانی که تا این لحظه راهنما و روشنگر راهم بوده‌اند و دوستانی که مرا مورد لطف خود قرار داده‌اند، آرزوی موفقیت، سعادت و بهروزی دارم.

## تعهد نامه

اینجانب فریدون شریفی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: اکتشاف آبهای زیرزمینی کارستی در منطقه جنوب غربی تپال شاهرود با استفاده از مدل‌سازی با روش عددی اجزاء محدود و معکوس-سازی داده‌های ژئوالکتریک تحت راهنمایی آقایان دکتر علیرضا عرب‌امیری و دکتر ابوالقاسم کامکارروحانی متعهد می‌شوم:

- 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 تا کنون 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 می‌باشد 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 تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. 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 نمی‌باشد.

## چکیده

با توجه به اهمیت و کیفیت بالای آب‌های کارستی در تأمین آب مورد نیاز کشور، بویژه در شهر شاهرود، در این تحقیق سعی شده است تا آب‌های کارستی در منطقه غرب شاهرود (تپال) شناسایی و مورد اکتشاف قرار گیرد. به همین منظور در این تحقیق از ترکیب نتایج روش‌های سونداژزنی قائم الکتریکی (VES) و پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه استفاده شده است. در منطقه مذکور، برداشت‌های سونداژزنی به تعداد ۱۰ سونداژ ( $S_{01}$  تا  $S_{10}$ ) با استفاده از آرایه شلومبرژه با فاصله الکترودی حداکثر ۵۰۰ متر و نیز برداشت‌های پروفیل‌زنی به تعداد ۴ پروفیل ( $P_{01}$  تا  $P_{04}$ ) با طول حداکثر ۴ کیلومتر و با استفاده از آرایه دوقطبی-دوقطبی با فاصله الکترودی ۷۵ متری و گام‌های ۸، صورت گرفت. سپس مدل‌سازی و تفسیر یک‌بعدی (1-D) سونداژها با استفاده از نمودارهای استاندارد، نمودارهای کمکی و نرم‌افزار IX1D و مدل‌سازی و تفسیر دوبعدی (2-D) پروفیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Res2DINV انجام شد. نتایج تفسیر حاکی از پتانسیل حضور زون آبدار در محل سونداژهای  $S_{02}$ ،  $S_{03}$ ،  $S_{04}$ ،  $S_{05}$  و  $S_{08}$  و همچنین در مناطقی از پروفیل‌های  $P_{01}$ ،  $P_{02}$  و  $P_{03}$  می‌باشد و نتایج تفسیر در هر دو روش انطباق و همخوانی بالایی با هم دارند. در نتیجه تفسیر داده‌های برداشت شده در هر دو روش و ترکیب نتایج حاصل، زون‌های احتمالی آبدار در منطقه شناسایی و بر اساس این نتایج، محل‌های مناسب برای حفاری، دو محل  $D_1$  و  $D_2$  که در ادامه بر روی نقشه‌های مربوطه نشان داده شده‌اند، به منظور بهره‌برداری از آب‌های کارستی معرفی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی، سونداژزنی قائم الکتریکی (VES)، پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه، کارست، آرایه شلومبرژه، آرایه دوقطبی-دوقطبی.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- فصل اول
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- تعریف کارست
۴	۳-۱- عوامل مؤثر در توسعه آبخوان‌های کارستی
۵	۱-۳-۱- لیتولوژی
۶	۲-۳-۱- وضعیت چینه‌شناسی
۶	۳-۳-۱- شرایط تکتونیکی
۷	الف- گسل
۷	ب- درزه و شکاف
۸	ج- چین خوردگی
۸	۴-۳-۱- اقلیم و آب و هوا
۸	الف- بارش
۹	ب- دما
۹	ج- فشار گاز دی‌اکسید کربن
۹	۵-۳-۱- پوشش گیاهی



۱۰	۱-۳-۶- پوشش خاک
۱۱	۱-۳-۷- شیب
۱۱	۱-۳-۸- ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی
۱۱	الف- آبراهه‌ها
۱۳	ب- سایر عوارض
۱۳	۱-۴- منابع آب‌های کارستی در ایران
۱۴	۱-۵- روش‌های اکتشاف آب‌های زیرزمینی
۱۵	۱-۶- مروری بر مطالعات اکتشافی صورت گرفته بر روی کارست‌ها
۱۷	۱-۷- اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین
۱۷	۱-۷-۱- روش‌های برداشت مقاومت ویژه
۱۸	۱-۷-۲- تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی
۱۸	۱-۸- روش‌های مدل‌سازی
۲۰	۱-۹- مدل‌سازی عددی در ژئوفیزیک
۲۰	۱-۹-۱- مدل‌سازی پیشرو
۲۱	۱-۹-۲- مدل‌سازی وارون (معکوس)
۲۲	۱-۱۰- روش تحقیق
۲۲	۱-۱۱- ساختار پایان‌نامه
۲۴	۲- فصل دوم
۲۵	۲-۱- مقدمه

۲۵	۲-۲- مقاومت ویژه مواد سازنده زمین
۲۸	۳-۲- انتشار جریان در زمین همگن
۳۰	۴-۲- اثر زمین ناهمگن
۳۰	۱-۴-۲- انحراف مسیر جریان در برخورد با فصل مشترک تخت
۳۲	۲-۴-۲- اثر توپوگرافی
۳۴	۵-۲- آرایه‌های الکترودی و ضریب هندسی
۳۵	۱-۵-۲- آرایه‌های الکترودی
۳۸	۲-۵-۲- مقایسه آرایه‌های الکترودی مختلف
۴۲	۶-۲- روش‌های برداشت مقاومت ویژه الکتریکی
۴۳	۷-۲- روش سونداژزنی
۴۴	۱-۷-۲- برداشت و آماده‌سازی داده‌های صحرائی برای تفسیر
۴۵	۲-۷-۲- تفسیر داده‌های سونداژزنی
۵۴	۸-۲- روش پروفیل‌زنی
۵۴	۱-۸-۲- روش برداشت صحرائی
۵۶	۲-۸-۲- رسم شبه مقطع
۵۸	۹-۲- روش‌های مدل‌سازی عددی
۵۹	۱-۹-۲- مدل‌سازی پیشرو
۶۰	۲-۹-۲- مدل‌سازی وارون
۶۴	۳- فصل سوم

۶۵	۱-۳- موقعیت جغرافیایی و وضعیت آب و هوایی منطقه دره کال قُرنو
۶۵	۲-۳- شرایط اقلیمی منطقه برداشت
۶۷	۳-۳- وضعیت زمین‌شناسی منطقه برداشت
۶۷	۱-۳-۳- سازند لار (J1) ژوراسیک میانی - بالایی
۶۹	۲-۳-۳- سنگ‌های کرتاسه بالایی (Ku <sup>1</sup> )
۶۹	۴-۳- عملیات صحرائی و برداشت داده‌های ژئوالکتریک در محدوده دره کال قُرنو
۷۲	۵-۳- تفسیر نتایج
۷۳	۶-۳- تفسیر کیفی و کمی سونداژهای الکتریکی
۷۴	۷-۳- تفسیر کمی سونداژها و پروفیل‌های الکتریکی برداشت شده در دره کال قُرنو
۷۵	۱-۷-۳- تفسیر کمی سونداژهای الکتریکی برداشت شده در دره کال قُرنو
۱۰۱	۲-۷-۳- تفسیر کمی پروفیل‌های برداشت شده در دره کال قُرنو
۱۰۹	۳-۷-۳- مدل سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در منطقه تپال
۱۱۵	۴- فصل چهارم
۱۱۶	۱-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۱۸	۲-۴- پیشنهادات
۱۲۴	پیوست‌ها
۱۲۹	فهرست منابع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: عوامل موثر بر توسعه کارست [White, 1988]. ۵.
- شکل ۲-۱: افزایش تخلخل ثانویه در امتداد و تقاطع شکستگی‌ها، گسل‌ها ۷.
- شکل ۳-۱: عوامل مؤثر بر افزایش نفوذپذیری در کف دره‌ها [Parizek, 1976]. ۱۲
- شکل ۴-۱: نقشه توزیع سازندهای کربناته کارستی ایران [کوثر، ۱۳۷۲]. ۱۴
- شکل ۱-۲: وابستگی مقاومت‌ویژه الکتریکی به میزان شوری و دما [Mooney, 1980]. ۲۷
- شکل ۲-۲: مقاومت‌ویژه سنگ‌ها، خاک و کانی‌ها [Loke, 2004]. ۲۸
- شکل ۳-۲: شکل کلی آرایه الکترودی مورد استفاده در اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه ۲۹
- شکل ۴-۲: انحراف مسیر جریان در برخورد با فصل مشترک تخت ۳۱
- شکل ۵-۲: شیوه تشکیل تصویر الکتریکی [Telford, 1990]. ۳۱
- شکل ۶-۲: اثر یک برآمدگی دوبعدی بر روی میدان ثابت ۳۳
- شکل ۷-۲: آرایه‌های الکترودی ۳۶
- شکل ۸-۲: تأثیر تغییرات فاصله الکترودی بر روی منحنی سونداژزنی ۴۵
- شکل ۹-۲: تغییر مقاومت‌ویژه ظاهری  $\rho_a$  در مقابل فاصله الکترودی a ۴۶
- شکل ۱۰-۲: تغییرات مقاومت‌ویژه ظاهری در مقابل فاصله الکترودی a ۴۷
- شکل ۱۱-۲: پارامترهای مورد استفاده در روش تصویرهای الکتریکی ۴۸
- شکل ۱۲-۲: تفسیر مقاومت‌ویژه ظاهری دو لایه بوسیله مقایسه منحنی استاندارد. ۵۱
- شکل ۱۳-۲: روش انطباق منحنی جزئی. ۵۲
- شکل ۱۴-۲: شیوه آرایش الکترودها برای برداشت دوبعدی مقاومت‌ویژه ۵۵
- شکل ۱۵-۲: شبه مقاطع مقاومت‌ویژه ظاهری بدست آمده از برداشت‌های دوبعدی ۵۷
- شکل ۱-۳: موقعیت قرارگیری محدوده مورد مطالعه و راه دسترسی به آن ۶۶
- شکل ۲-۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه برداشت [وزیری و همکاران، ۲۰۰۱]. ۶۸

- شکل ۳-۳: نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه برداشت ۷۱
- شکل ۴-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S01. ۷۷
- شکل ۵-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S01 پس از دو مرحله تکرار. ۷۸
- شکل ۶-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S02 ۷۹
- شکل ۷-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S02 پس از سه مرحله تکرار. ۸۰
- شکل ۸-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S03. ۸۲
- شکل ۹-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S03 پس از هشت مرحله ۸۳
- شکل ۱۰-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S04. ۸۵
- شکل ۱۱-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S04 پس از هفت مرحله ۸۶
- شکل ۱۲-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S05. ۸۷
- شکل ۱۳-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S05 پس از ۱۱ مرحله ۸۸
- شکل ۱۴-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S06. ۹۰
- شکل ۱۵-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S06 پس از ۲ مرحله تکرار. ۹۱
- شکل ۱۶-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S07. ۹۲
- شکل ۱۷-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S07 پس از ۲۱ مرحله ۹۳
- شکل ۱۸-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S08. ۹۵
- شکل ۱۹-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S08 پس از ۹ مرحله تکرار ۹۶
- شکل ۲۰-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S09. ۹۷
- شکل ۲۱-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S09 پس از ۵ مرحله تکرار. ۹۸
- شکل ۲۲-۳: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S10. ۱۰۰
- شکل ۲۳-۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S10 پس از ۹ مرحله ۱۰۱
- شکل ۲۴-۳: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P01 و تغییرات توپوگرافی منطقه. ۱۰۲

- شکل ۳-۲۵: موقعیت چاه‌های آب موجود در منطقه و سایر نقاط اطلاعاتی ۱۰۳
- شکل ۳-۲۶: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P01 ۱۰۴
- شکل ۳-۲۷: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P01 و P02 تغییرات توپوگرافی ۱۰۵
- شکل ۳-۲۸: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P02 ۱۰۵
- شکل ۳-۲۹: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P03 و تغییرات توپوگرافی ۱۰۷
- شکل ۳-۳۰: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P03 ۱۰۷
- شکل ۳-۳۱: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P04 و تغییرات توپوگرافی ۱۰۸
- شکل ۳-۳۲: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P04 ۱۰۹
- شکل ۳-۳۳: نقشه هم‌مقاومت‌ویژه به ازای مقاومت‌ویژه ۱۴۰ اهم‌متر ۱۱۰
- شکل ۳-۳۴: نقشه هم‌مقاومت‌ویژه به ازای مقاومت‌ویژه ۲۳۰ اهم‌متر ۱۱۱
- شکل ۳-۳۵: نقشه هم‌مقاومت‌ویژه به ازای مقاومت‌ویژه ۲۷۶ اهم‌متر ۱۱۲
- شکل ۳-۳۶: نقشه هم‌مقاومت‌ویژه به ازای مقاومت‌ویژه ۳۰۰ اهم‌متر ۱۱۳
- شکل ۴-۱: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P01 ۱۱۹
- شکل ۴-۲: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل‌های P01 و P02 ۱۲۰
- شکل ۴-۳: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P03 ۱۲۱
- شکل ۴-۴: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P03 و تغییرات توپوگرافی ۱۲۲
- شکل ۴-۵: تعیین محل حفر چاه با در نظر گرفتن جهت شیب ۱۲۳
- شکل ۴-۶: محل پیشنهادی D1 و D2 برای حفر چاه آب بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱۲۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: ارزیابی آرایه‌های متداول ۴۰
- جدول ۲-۲: مقایسه آرایه‌های الکترودی ۴۰
- جدول ۳-۲: توزیع و شدت میدان‌های الکتریکی در اثر یک فصل مشترک افقی ۴۹
- جدول ۱-۳: نتایج تفسیر سونداژ S01 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۷۶
- جدول ۲-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S01 پس از دو مرحله تکرار. ۷۷
- جدول ۳-۳: نتایج تفسیر سونداژ S02 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۷۹
- جدول ۴-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S02 پس از سه مرحله تکرار. ۸۰
- جدول ۵-۳: نتایج تفسیر سونداژ S03 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۸۲
- جدول ۶-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S03 پس از هشت مرحله تکرار. ۸۳
- جدول ۷-۳: نتایج تفسیر سونداژ S04 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۸۴
- جدول ۸-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S04 پس از هفت مرحله تکرار. ۸۵
- جدول ۹-۳: نتایج تفسیر سونداژ S05 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۸۷
- جدول ۱۰-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S05 پس از ۱۱ مرحله تکرار. ۸۸
- جدول ۱۱-۳: نتایج تفسیر سونداژ S06 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۸۹
- جدول ۱۲-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S06 پس از ۲ مرحله تکرار. ۹۰
- جدول ۱۳-۳: نتایج تفسیر سونداژ S07 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۹۲
- جدول ۱۴-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S07 پس از ۲۱ مرحله تکرار. ۹۳
- جدول ۱۵-۳: نتایج تفسیر سونداژ S08 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۹۴
- جدول ۱۶-۳: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S08 پس از ۹ مرحله تکرار. ۹۵

- جدول ۳-۱۷: نتایج تفسیر سونداژ S09 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۹۷
- جدول ۳-۱۸: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S09 پس از ۵ مرحله تکرار. ۹۸
- جدول ۳-۱۹: نتایج تفسیر سونداژ S10 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای ۹۹
- جدول ۳-۲۰: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S10 پس از ۹ مرحله تکرار. ۱۰۰
- جدول ۴-۱: اطلاعات مربوط به عمق و عمق سطح آب چاه‌های موجود در منطقه ۱۱۷
- جدول ۴-۲: خلاصه نتایج تفسیر منحنی‌های سونداژزنی الکتریکی در منطقه تپال ۱۱۹



## ۱- فصل اول

### کلیات

دسترسی به منابع آب شیرین یکی از نیازهای اساسی بشر و زیر بنای توسعه اقتصادی (مصارف صنعتی و کشاورزی) است. آب از بدو پیدایش حیات، نقش اساسی در ادامه زندگی و طبیعتاً در موجودیت انسان ایفا کرده است. نقش آب در پیدایش و رشد حیات در نظریه‌های علمی نیز مدت‌ها مورد توجه دانشمندان قرار گرفته و امروزه همه در آن اتفاق نظر دارند. آب همچنین بشر را به ایجاد شاهکارهای فوق‌العاده مهندسی سوق داده است و ساخت آبراه‌های سنتی در دوران اوج قدرت امپراتوری روم و ایران، ساخت سدهای کوچک، حمام‌های عمومی، چاه‌ها و قنوت باقی‌مانده و لوله-کشی‌های سفالین مصداقی از این شاهکارها می‌باشند. در طول تاریخ آب عامل مهمی در شکل دادن به روش زندگی بشر، تکنولوژی، زبان و فرهنگ بوده است.

خداوند متعال در آیات متعدد از قرآن کریم به بیان اهمیت این ماده حیاتی پرداخته است. در ۳۳ آیه از قرآن کریم، خداوند می‌فرماید: "بعد از خلقت آسمان‌ها و زمین آب را فرو فرستادیم تا زمین مرده را زنده نماید." و آب را مایه حیات و منشأ تمامی گیاهان و حیوانات و مایه هستی معرفی می‌فرماید [www.irsen.org].

مطمئن‌ترین روش تأمین آب مورد نیاز بهره‌گیری از آب‌های زیرزمینی است و این آب‌ها معمولاً در تماس با لایه‌های زمین‌شناسی دربرگیرنده به طور طبیعی در مقابل آلودگی محافظت می‌شوند. امروزه با در نظر گرفتن رشد جمعیت و توسعه روز افزون شهرها، گرم شدن کره زمین، کم شدن آب رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، آلودگی در مقیاس وسیع و افت شدید سطح ایستابی در دشت‌ها، توجه متخصصین به تأمین آب از منابع کارستی و سنگ‌های سخت معطوف شده است [خدایی، ۱۳۸۰]. آبخوان‌های کارستی که عمدتاً متشکل از سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) هستند، بخش مهمی از سفره‌های آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند؛ که به کمک آن آب مورد نیاز ۲۵٪ از جمعیت جهان تأمین می‌گردد [Ford and Williams, 2007].

با توجه به اینکه رخساره‌های کارستی تقریباً ۱۲ درصد سطح پوسته قاره‌ای زمین [Ford and Williams, 2007] و بیش از ۱۱ درصد سطح کشور ایران [افراسیابیان، ۱۹۹۸] را تشکیل می‌دهند؛ لذا اکتشاف و بهره‌برداری از منابع آب موجود در این آبخوان‌ها به لحاظ نیاز مبرم تأمین آب شرب شهرها و کیفیت مطلوب این منابع، در مقایسه با منابع آب آبرفت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در کشور ما، بدلیل روند رو به افزایش نیاز به آب، امری اجتناب‌ناپذیر است.

در حوضه‌های کارستی یا سنگ‌های سخت که هدایت هیدرولیکی و تخلخل اولیه پائینی دارند، وجود آب زیرزمینی قابل استحصال به میزان تخلخل ثانویه که وابسته به سیستم‌های درزه و شکاف، شکستگی‌ها و مجاری انحلالی می‌باشد؛ محدود می‌گردد. افزایش تخلخل ثانویه در امتداد و تقاطع آثار شکست و خطواره‌ها، امتداد درزه‌ها، گسل‌ها، سطوح بین لایه‌ای و غیره صورت می‌گیرد [خدایی، ۱۳۸۰].

به‌دلیل وجود تباین مقاومت‌ویژه الکتریکی بین زون خردشده یا کارستی و سنگ بستر آن، روش مقاومت‌ویژه الکتریکی، ابزار مناسبی برای شناسایی زون‌های کارستی محسوب می‌شود [Nguyen et al., 2007; Skinner and Heinson, 2004].

تحقیق حاضر با استفاده از کاوش‌های ژئوفیزیکی با روش مقاومت‌ویژه الکتریکی به منظور شناسایی زون‌های آبدار در دره کال قُرنو واقع در کوه‌های آهکی تپال- در این منطقه تحت تأثیر سیستم چین-خوردگی و عملکرد شدید گسل‌ها در منطقه، توسعه خرد شدگی و تخلخل ثانویه را به‌دنبال داشته و شرایط مساعدی را برای تشکیل آبخوان‌های کارستی فراهم نموده است- که در غرب تا شمال‌غرب شاهرود قرار گرفته ، انجام شده است.

## ۱-۲- تعریف کارست

کارست عبارت است از یک منطقه با شکل ظاهری خاص که دارای سیستم زهکشی قوی آب زیرزمینی بوده و ناشی از انحلال سنگ‌های با قابلیت انحلال بالا در آب‌های طبیعی است. علاوه بر

اهمیت سازندهای کارستی در ذخیره‌سازی و تأمین منابع آب؛ این سنگ‌ها، در ذخیره‌سازی کانی‌ها، نفت و گاز نیز نقش مهمی را ایفا می‌کنند [مینویی، ۱۳۸۸]. عوارض کارستی به دلیل اهمیتی که در ذخیره‌سازی منابع مورد نیاز بشر دارند و نیز بررسی مسائل ژئوتکنیکی و نظارت بر مسائل زیست-محیطی مورد توجه علوم مختلف می‌باشند. وایت<sup>۱</sup> (۱۹۸۸) تعریف زیر را برای کارست ارائه نموده است:

کارست به پهنه‌هایی اطلاق می‌شود که در سنگ‌های با قابلیت انحلال بالا پدید آمده‌اند. در واقع این پدیده مجموعه‌ای از فرآیندهای زمین‌شناسی است که آب مهمترین عامل در تشکیل آنها می‌باشد. اثر انحلالی آب در مناطق کارستی موجب می‌شود تا اشکال ژئومورفولوژیکی منحصر به پهنه‌های کارستی در نواحی با سنگ‌های انحلال‌پذیر به وجود آید و سیستم زهکشی زیرزمینی گسترش یابد [نیک-پیمان، ۱۳۸۸].

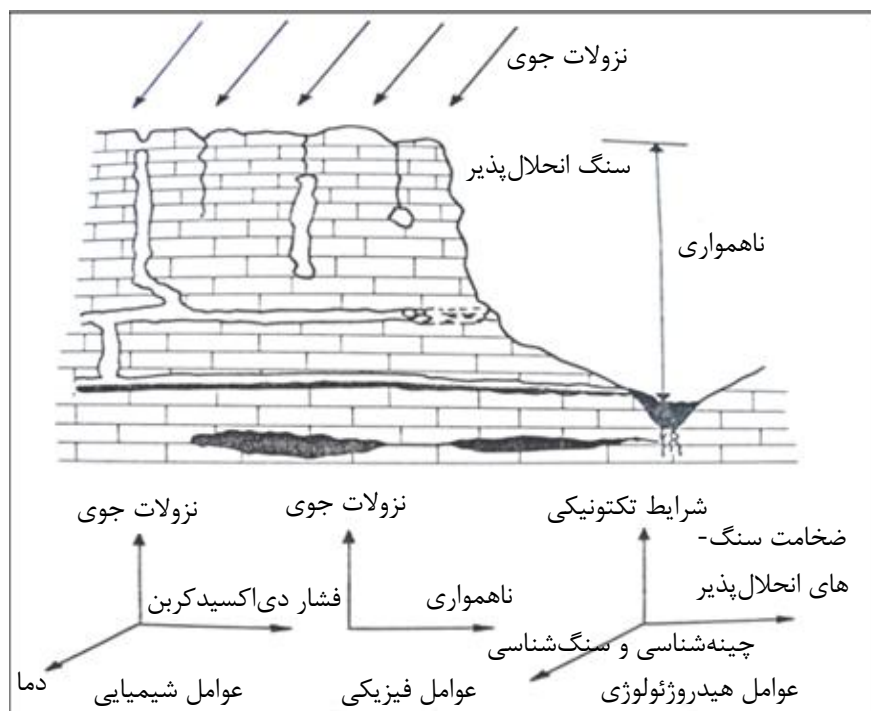
از نظر زمین‌شناسی، کارست یک فرآیند دیاژنتیک است که با انحلال و انتقال کربنات کلسیم در آب-های اتمسفری همراه است و از نظر کانی‌شناسی، رخساره‌های کارستی عمدتاً از کلسیت کم‌مینیم تشکیل می‌شوند [نیک‌پیمان، ۱۳۸۸].

### ۱-۳- عوامل مؤثر در توسعه آبخوان‌های کارستی

یکی از مؤثرترین پارامترها در توسعه کارست فرآیندهای شیمیایی است و این مهم از طریق انحلال سنگ‌های کربناته صورت می‌گیرد. عوامل زیادی در امر توسعه کارست دخالت دارند (شکل ۱-۱) که وجود یا عدم وجود یک عامل می‌تواند در تشدید یا تضعیف عوامل دیگر مؤثر باشد. به عبارت دیگر توسعه کارست، برآیند تأثیر همه عوامل در کنار یکدیگر می‌باشد. توسعه آبخوان‌های کارستی به عوامل زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، آب و هوا و بیولوژیک بستگی دارد. رابطه تنگاتنگی بین عوامل کنترل‌کننده با یکدیگر و با فرآیندهای شیمیایی و مکانیکی وجود دارد.

---

<sup>1</sup> White



شکل ۱-۱: عوامل موثر بر توسعه کارست [White, 1988].

با توجه به شکل ۱-۱، عوامل مختلفی بر توسعه کارست مؤثرند، که در زیر به توضیح آنها می پردازیم:

### ۱-۳-۱- لیتولوژی

توسعه کارست در هر سازندی و با هر توالی چینه شناسی امکان پذیر نیست. لیتولوژی مهمترین عامل کنترل کننده کارستی شدن تحت شرایط اقلیمی و تکتونیکی حاکم بر منطقه است. با توجه به تعریف کارست، انحلال پذیری از شروط اصلی تشکیل و توسعه این پدیده است که وابسته به ترکیب سنگ می باشد. در سازندهای کارستی هر چه درجه خلوص سنگ کربناته بالاتر باشد، امکان پیشرفت پدیده کارست در آن بیشتر است و هر چه میزان ناخالصی سنگ کربناته (عمدتاً به صورت مواد رسی) بیشتر باشد، میزان انحلال کمتر و در نتیجه توسعه درزه و شکاف کمتر است. بر عکس هرگاه میزان ناخالصی (مواد رسی) کم باشد، حلالیت و در نتیجه توسعه درز و شکاف وسیع تر خواهد بود. یکی از پارامترهای مهم در سازندهای کربناته نسبت میزان  $CaO$  به  $MgO$  در آنها است. به این ترتیب که هرچه این

نسبت بیشتر باشد، قابلیت انحلال سنگ زیادتر می‌شود. به همین دلیل تحت شرایط یکسان در سنگ آهک نسبت به دولومیت، کارستی شدن توسعه بیشتری دارد [White, 1988].

### ۱-۳-۲- وضعیت چینه‌شناسی

چینه‌شناسی بیانگر ضخامت، خواص سنگ‌شناسی لایه‌ها، موقعیت یک لایه نسبت به لایه‌های زیرین و بالایی و جایگاه آن در ستون چینه‌شناسی منطقه می‌باشد. ضخامت سنگ‌های کربناته در واقع محدوده گسترش سیستم کارست را مشخص می‌کند. در صورتی که سازندهای کربناته ضخامت و گسترش قابل توجهی داشته باشند، امکان افزایش آبخوان کارستی افزایش می‌یابد و چنانچه لایه‌بندی افقی باشد، ممکن است عملکرد آنها نسبت به نفوذ آب خنثی باشد. اما اگر سطوح لایه‌بندی شیب‌دار باشند، میزان خلل و فرج و شکاف‌های ایجاد شده بیشتر می‌شود و شرایط نفوذ<sup>۱</sup> بهتر می‌شود [خدری، ۱۳۹۰؛ شگری، ۱۳۹۰].

### ۱-۳-۳- شرایط تکتونیکی

شکستگی‌ها عامل اصلی گسترش تخلخل ثانویه، نفوذپذیری و توسعه کارست در سنگ‌های سخت محسوب می‌شوند. زیرا آنها بافت اولیه و دست نخورده سنگ را برهم زده و مناطقی خردشده را ایجاد می‌کنند؛ که در مراحل بعدی امکان نفوذ آب و گسترش انحلالی<sup>۲</sup> مجاری زیرزمینی را فراهم می‌نماید (شکل ۱-۲). اغلب شکستگی‌ها در اثر نیروهای تکتونیکی ایجاد می‌شوند، ولی گاهی هم هوازدگی و تخریب مکانیکی عامل ایجاد این شکستگی‌ها هستند [مینویی، ۱۳۸۸]. از نظر ساختاری و ایجاد درزه و شکاف، وجود سنگ‌های کربناته، چین‌خوردگی، گسل، شیب لایه باعث ایجاد سیستم درز و شکاف-های متفاوتی می‌گردد [خدری، ۱۳۹۰]. در اینجا تأثیر گسل، چین‌خوردگی و درزه و شکاف در شکل-گیری کارست بررسی می‌شود.

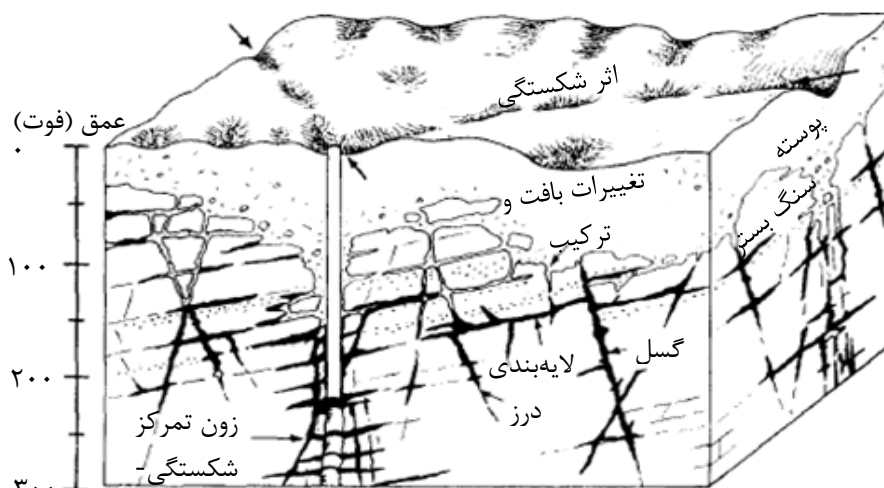
<sup>۱</sup> Infiltration condition

<sup>۲</sup> Solution wideing

## الف- گسل

نقش گسل در کنترل و انتقال آب زیرزمینی، بسته به شرایط گسل و وضعیت منطقه می‌تواند خنثی، مثبت و یا منفی باشد. گسل‌ها با ایجاد درز و شکاف و فرآیند برشی نمودن، افزایش خردشدگی، تخلخل ثانویه (شکل ۱-۲) و یا معبر انتقال آب به زون کارستی، می‌توانند دارای نقش مثبت باشند. در حالی که می‌توانند با جابجایی یک لایه ناتراوا و سد نمودن لایه تراوا مانع حرکت و انتقال آب گردند و یا پرشدگی شکاف گسل‌ها با مواد ناتراوای متراکم مانند کلسیت، کوارتز یا رس در توسعه کارست نقش منفی دارد و ممکن است یک زون کارستی با وجود داشتن شرایط لازم، به دلیل فرار آب از طریق گسل پتانسیل مناسبی نداشته باشد [خدری، ۱۳۹۰].

گسل‌هایی که ساز و کار کششی دارند قابلیت بیشتری برای هدایت آب دارند و برعکس گسل‌های دارای ساز و کار فشارشی مسیرهای مناسبی برای جریان و انتقال آب زیرزمینی نیستند [White, 1988].



شکل ۱-۲: افزایش تخلخل ثانویه در امتداد و تقاطع شکستگی‌ها، گسل‌ها و سطوح لایه‌بندی

[Lattman and Parezek, 1964]

## ب- درزه و شکاف

وجود درزه و شکاف یکی از مهمترین عوامل ایجاد تخلخل و فضای لازم برای جریان آب زیرزمینی در

سنگ‌های سخت می‌باشد. درزه‌ها با ایجاد سطوح ضعیف در پیکره سنگ آهک امکان انحلال را در امتداد این سطوح افزایش می‌دهند و به این ترتیب مجاری نفوذ آب‌های سطحی به داخل زمین فراهم می‌شود. شکستگی‌های دارای عمق نفوذ زیاد، ارتباط هیدرولیکی مناسبی با لایه‌های مستعد کارستی- شدن که رخنمون ندارند را فراهم می‌کنند [White, 1988].

هر چه تراکم درزه‌ها و میزان بازشدگی آنها بیشتر باشد، مقدار آب نفوذی به داخل سازند و توسعه کارست بیشتر خواهد بود. مؤثرترین سیستم شکستگی در گسترش شبکه‌های کارستی، گروهی هستند که در اثر نیروهای کششی تشکیل شده‌اند. این شکستگی‌ها کمترین مقاومت را در برابر جریان آب دارند [مینویی، ۱۳۸۸]. بنابراین درزه‌های کششی به دلیل بازشدگی زیاد دارای درجه اهمیت بالاتری نسبت به سایر انواع درزه‌ها هستند.

### ج- چین خوردگی

چین خوردگی‌ها در اثر اعمال فشارهای تکتونیکی بر پوسته زمین حاصل می‌شوند؛ که با ایجاد تغییر در توالی چینه‌شناسی، بالا آمدن و ارتفاع گرفتن سازندهای مختلف، ایجاد انواع شکستگی‌ها در دامنه‌ها، محور و یا محل پلانژها باعث پیدایش و یا عدم پیدایش پدیده کارست و آبخوان‌های کارستی می‌گردند. چین خوردگی و بالا آمدگی در سنگ‌ها نیز باعث ایجاد ارتفاع و افزایش شیب هیدرولیکی می‌گردد [White, 1988].

### ۱-۳-۴- اقلیم و آب و هوا

پارامترهای اقلیمی به طور عمده شامل بارش، دما و فشار گاز CO<sub>2</sub> می‌باشد؛ که در ادامه تشریح می‌گردند.

### الف- بارش

بارش یکی از مهمترین عواملی است که به طور مستقیم و غیرمستقیم در پتانسیل آب‌های کارستی یک سازند مستعد برای ذخیره آب، تأثیرگذار است. مقدار و نوع بارش‌های جوی بسته به اقلیم و ارتفاع



منطقه متفاوت است. هر چه حجم و مقدار بارش در ناحیه‌ای بیشتر باشد (در شرایط یکسان)، مقدار آب نفوذی به درون آبخوان کارستی بیشتر بوده و در نتیجه دبی خروجی از این آبخوان افزایش می‌یابد. نوع نزولات و شدت آن نیز در نرخ نفوذ مؤثر است. به این ترتیب که بارش‌های سیل‌آسا و ناگهانی، حجم زیادی رواناب تولید می‌کنند و در مقایسه با بارش‌های تدریجی و یا بارش برف که فرصت بیشتری برای نفوذ دارند، دارای اهمیت کمتری هستند [خدری، ۱۳۹۰؛ شگری، ۱۳۹۰].

#### ب- دما

عامل درجه حرارت دارای نقش دوگانه در توسعه کارست است. با افزایش درجه حرارت میزان گاز کربنیک محلول در آب کاهش یافته و میزان انحلال آهک نیز کم می‌شود. از طرف دیگر درجه حرارت فعالیت موجودات ذره‌بینی که مواد آلی موجود در درزه و شکاف سنگ‌های آهکی را تجزیه می‌کنند، افزایش می‌دهد. تأثیر دیگر دما بر روی تبخیر است. تبخیر به طور غیرمستقیم آب نفوذی به داخل زمین را کاهش می‌دهد [Bogli, 1980; white, 1898].

#### ج- فشار گاز دی‌اکسید کربن

با افزایش فشار  $CO_2$ ، انحلال آهک بیشتر شده و در نتیجه توسعه کارست افزایش می‌یابد. افزایش میزان گازهای با خاصیت اسیدی در جو مانند دی‌اکسید کربن، باران‌های اسیدی با خاصیت خوردگی بیشتر را تشکیل می‌دهد و نرخ انحلال سطحی درزه‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین میزان گاز کربنیک موجود در خلل و فرج خاک‌ها در حین نفوذ آب که خود به عوامل پیچیده دیگری همچون پوشش گیاهی، مواد آلی خاک و وجود باکتری‌های هوازی تجزیه‌کننده آنها در پیکره خاک بستگی دارد، نقش زیادی در ادامه انحلال دیواره‌ها و افزایش پدیده نفوذ دارد [خدری، ۱۳۹۰].

#### ۱-۳-۵- پوشش گیاهی

پوشش گیاهی نیز یکی از عواملی است که می‌تواند به طور مستقیم بر توسعه کارست مؤثر باشد.

گیاهان چندین تأثیر مثبت و یک تأثیر منفی در جذب آب و نفوذ دادن آن در زمین و نهایتاً در توسعه کارست دارند. عمدتاً تأثیرات مثبت آنها ناشی از داشتن ریشه‌های نفوذ کننده در خاک و سنگ و ایجاد یک فضای نفوذپذیر در کنار آنها، افزایش  $CO_2$  در اطراف ریشه‌ها و بالا بردن اسیدیته آب که لازمه انحلال سنگ‌های کربناته است، ایجاد مانع در مقابل تولید رواناب و جلوگیری از فشرده‌شدن سطح خاک و در نتیجه جلوگیری از کاهش نفوذ، ایجاد سایه و جلوگیری از تابش مستقیم خورشید بر خاک و کاهش تبخیر از سطح خاک می‌باشد [شکری، ۱۳۹۰].

پوشش گیاهی و به ویژه درختان انبوه، یک اثر منفی در جذب آب توسط خاک نیز دارد، چون مانع از رسیدن قسمتی و یا در مواردی تمامی نزولات جوی به زمین می‌گردد. یعنی بدون آنکه بخشی از آب به زمین برسد و در زمین نفوذ کند و یا از سطح زمین قابل جمع‌آوری باشد، از همان سطح برگ‌ها و شاخه‌ها و تنه درختان تبخیر شده و مجدداً به جو بر می‌گردد [خدری، ۱۳۹۰].

### ۱-۳-۶- پوشش خاک<sup>۱</sup>

در مناطق کارستی در شرایطی که سطح آهک توسط خاک پوشیده شده باشد، نرخ نفوذ آب به درون آهک توسط این خاک کنترل می‌شود و در غیر این صورت قابلیت انتقال آهک در جهت عمودی نرخ نفوذ را کنترل می‌کند [Williams, 1983].

سه خصوصیت خاک که شامل جنس، ضخامت و بافت موجود در خاک است، در پدیده نفوذ مؤثرند. خاک‌های ماسه‌ای نسبت به خاک‌های رسی - سیلتی در نفوذ تأثیر بیشتری دارند. خاک‌های دانه درشت نسبت به خاک‌های دانه‌ریز در نفوذ آب مؤثرتر هستند. وجود لایه ضخیم خاک باعث ذخیره حجم بیشتری آب شده و از تولید رواناب و هدر رفتن آب جلوگیری می‌کند [خدری، ۱۳۹۰].

نوع خاک از ترکیب و اسیدیته آب نیز مهم‌تر است. چون ترکیب شیمیایی آب متناسب با نوع خاک، مدت زمان برخورد و ... تغییر کرده و می‌تواند باعث تسریع در انحلال و توسعه کارست گردد. در ضمن

<sup>۱</sup> Soil cover

خاک‌های رسی با پر نمودن درز و شکاف‌های بزرگ موجب کاهش نفوذپذیری و انتقال آب به اعماق می‌شوند. اهمیت خاک از جنبه فراهم نمودن امکان رویش گیاهان نیز قابل بررسی است [آخدری، ۱۳۹۰].

### ۱-۳-۷- شیب

توپوگرافی سطح زمین با ایجاد تغییرات دما، میزان بارش، نوع پوشش گیاهی و نیز تبخیر نسبت به ارتفاع و همچنین با ایجاد شیب‌های مختلف و تأثیر آن بر میزان رواناب تولید شده در میزان نفوذپذیری و نهایتاً توسعه کارست حوضه مؤثر است. در مناطق دارای شیب زیاد، امکان باقی ماندن خاک با ضخامت زیاد و همچنین رویش گیاه فراهم نیست؛ بنابراین آب باران سریع جاری می‌شود و فرصت نفوذ به داخل زمین را نخواهد داشت. هر چه منطقه‌ای مرتفع‌تر باشد، آب و هوا سردتر و بارش‌های متعدد و با مقدار بیشتر رخ می‌دهد. ولی به علت سرد بودن، رشد گیاهان انبوه و دارای ریشه‌های عمیق محدود و حتی غیرممکن می‌شود؛ که این مسئله موجب کم‌رنگ شدن نقش گیاهان و کاهش تبخیر و تعرق می‌گردد [شکری، ۱۳۹۰].

### ۱-۳-۸- ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی

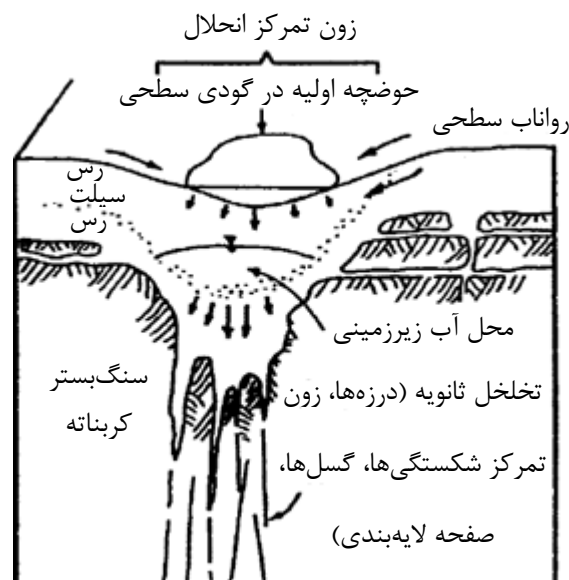
به طور کلی عوارض زمین‌شناسی هر یک دارای خصوصیات ژئومورفولوژیکی منحصر به همان عارضه هستند. در آبخوان‌های کارستی هم انتظار می‌رود که اشکال مختلف دیده شود که حضور آنها در پهنه کارستی بیانگر توسعه کارست در آن منطقه می‌باشد، ولی عدم مشاهده آنها در حوضه دلیل بر فقدان کارستی شدن نخواهد بود [مینویی، ۱۳۸۸]. این ویژگی‌ها یا عوارض ژئومورفولوژیکی شامل آبراهه‌ها و سایر عوارض می‌باشند که در ادامه تشریح خواهند شد.

#### الف- آبراهه‌ها

آبراهه‌ها در مناطق پرشیب تشکیل می‌شوند و با ایجاد رواناب تا حدودی در نفوذ آب نقش دارند. بخش قابل توجهی از طول دره‌ها (بین ۶۰ تا ۸۰ درصد) بخصوص دره‌های فرعی، در مناطق کربناته

توسط تمرکز عمل انحلال و هوازگی در راستای مسیر شکستگی‌ها کنترل می‌شوند و چاه‌هایی که در کف دره‌ها حفر شده باشند، نسبت به چاه‌هایی که در همان نوع لیتولوژی، در نقاط مرتفع مجاور دره حفر شده باشند، با سنگ‌های به مراتب دارای تخلخل و هوازگی شدیدتر برخورد خواهند نمود [Parizek, 1976].

گذشته از فراوانی زون‌های درزه و شکاف در کف دره‌ها، عوامل دیگری نیز در افزایش نفوذپذیری و تخلخل و در نتیجه افزایش توان آبدهی چاه‌ها در کف دره‌ها مؤثرند. لذا نمی‌توان آبدهی بالای چاه‌ها در کف دره‌ها را تنها ناشی از وجود زون‌های درزه و شکاف‌دار دانست (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳: عوامل مؤثر بر افزایش نفوذپذیری در کف دره‌ها [Parizek, 1976].

عوامل غیرساختمانی دیگری مثل هوازگی تفریقی<sup>۱</sup> و تمرکز آب‌های جاری در راستای دره‌ها نیز در توسعه نفوذپذیری در کف دره‌ها مؤثرند. پدیده هوازگی تفریقی در راستای شکستگی‌ها و صفحات بین لایه‌ای منجر به تشکیل گودال در سطح زمین شده و این امر خود سبب تمرکز آب‌های سطحی و آب بارندگی، نفوذ و در نتیجه افزایش انحلال سنگ بستر می‌گردد [Parizek, 1976].

<sup>۱</sup> Differential weathering

## ب- سایر عوارض

تنوع اشکال انحلالی کارست سطحی در سازندهای کربناته حاکی از انحلال پذیری خوب این سازندها می باشد. بنابراین گسترش این پدیده ها در منطقه می تواند نشان دهنده توسعه پدیده کارست در عمق باشند. چنانچه در ناحیه ای به اشکال مختلف و فراوان کارست سطحی برخورد کنیم، به طور صریح می توان اظهار داشت که سنگ های در برگیرنده این پدیده ها از قابلیت انحلال بالایی برخوردارند و چنانچه ریزش های جوی منطقه قابل توجه باشند؛ می توان وجود محیط یا محیط های مناسب جهت نفوذ و ذخیره آب های زیرزمینی را انتظار داشت. انواع پدیده های کارست سطحی قابل مشاهده در سازندهای سخت عبارتند از: کارن<sup>۱</sup>، گرایک<sup>۲</sup>، غار<sup>۳</sup>، حفره<sup>۴</sup> و ...

حفره ها به طور چشم گیری در نفوذ پذیری مؤثرند. زمانی که تعداد زیادی حفره با دهانه های وسیع وجود داشته باشند؛ کمک قابل توجهی به نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی می کنند. چون حجم بالایی از آب را قبل از تبخیر و یا جاری شدن و هدر رفتن دریافت نموده و به درون زمین انتقال می دهند [عبادیان، ۱۳۸۱].

## ۴-۱- منابع آب های کارستی در ایران

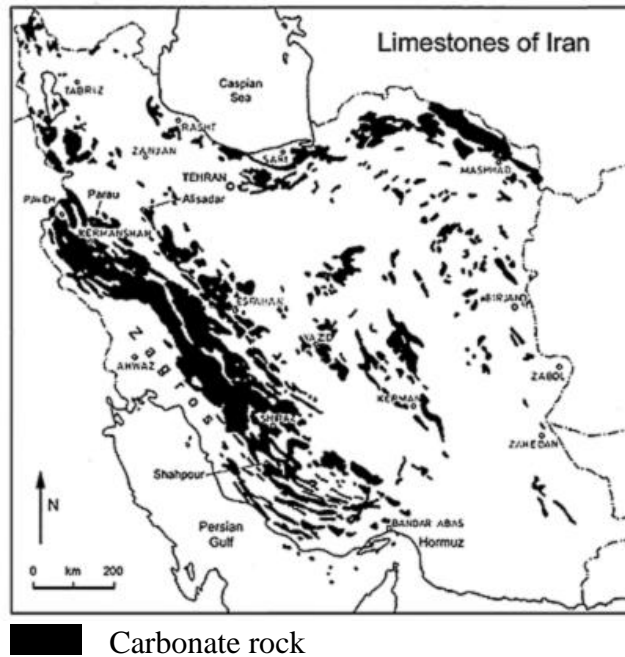
در ایران سازندهای آهکی و دولومیتی نواحی نسبتاً وسیعی را در سطح کشور پوشانده اند؛ به طوری که رشته کوه های زاگرس در غرب و جنوب غرب تا رشته کوه های البرز در شمال و ارتفاعات کوه های مرکزی را شامل می شوند. رخنمون تشکیلات کربناته کارستی در ایران حدود ۱۱ درصد مساحت کل کشور را در بر می گیرد. البته بخشی از سازندهای کربناته کارستی نیز در زیر آبرفت ها و یا سازندهای غیر کارستی قرار داشته و در سطح زمین رخنمون ندارند [کوثر، ۱۳۷۲]. نقشه پراکندگی کارست ها در ایران در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Karren

<sup>۲</sup> Grike

<sup>۳</sup> Cave

<sup>۴</sup> Sink hole



شکل ۱-۴: نقشه توزیع سازندهای کربناته کارستی ایران [کوثر، ۱۳۷۲].

## ۱-۵- روش‌های اکتشاف آب‌های زیرزمینی

بدلیل افزایش نیاز به آب در سال‌های اخیر، ارزیابی منابع آب‌های کارستی با روند رو به رشدی مورد توجه واقع شده است، لذا برای استفاده پایدار از این منابع، شناخت نحوه گسترش، ویژگی‌های هیدرولیکی و آسیب‌پذیری آنها امری ضروری است. با توجه به اهمیت اکتشاف این منابع، تلاش در جهت کمینه نمودن هزینه‌های اقتصادی، مدت زمان اکتشاف و ریسک اکتشافی از یک سو و افزایش شانس برخورد با زون‌های خردشده و هوازده سنگ بستر و تعیین محل‌های حفاری با آبدهی بالا و پایدار از سوی دیگر توجه محققان مختلف را به خود جلب نموده است.

روش‌هایی که در بررسی و شناسایی آبخوان‌ها کاربرد دارند را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم نمود

که عبارتند از [Kearey and Brooks, 1991]:

- روش‌های مستقیم
- روش‌های غیرمستقیم

در روش‌های مستقیم، با حفر گمانه، وضعیت آب‌های زیرزمینی و سنگ کف در یک منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این روش‌ها پرهزینه بوده و در مرحله اکتشاف تفصیلی و در محل‌های تعیین شده به کمک روش‌های غیرمستقیم اجرا می‌شوند.

متداول‌ترین روش‌های غیرمستقیم در بررسی‌های هیدروژئولوژیکی، مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافات ژئوفیزیکی است. برای صرفه‌جویی در هزینه و بهینه‌سازی فرآیند اکتشاف، سنجش از دور به عنوان ابزاری سریع و ارزان می‌تواند در مراحل اولیه اکتشاف (شناسایی و پی‌جویی) در مطالعات زمین‌شناسی و پتانسیل‌یابی مورد استفاده قرار گیرد و کاوش‌های ژئوفیزیکی نیز در مراحل اکتشاف مقدماتی و اکتشاف تفصیلی می‌توانند به‌کار گرفته شوند. از میان روش‌های ژئوفیزیکی موجود برای بررسی‌های مربوط به آب‌های زیرزمینی، روش‌های الکتریکی و به‌ویژه روش مقاومت‌ویژه الکتریکی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۱-۶- مروری بر مطالعات اکتشافی صورت گرفته بر روی کارست‌ها

روش‌های متعددی جهت اکتشاف آب‌های کارستی از جانب محققان مختلف ارائه شده‌است: برخی از محققان صرفاً از معیارهای سطحی همچون میزان بارندگی سالانه، زمین‌شناسی، تراکم شکستگی‌ها، کاربری اراضی، توپوگرافی، شیب، تراکم آبراهه‌ها، ویژگی‌های خاک و ژئومورفولوژی [Jaiswal et al, 2003; Srinivasa Rao and Jugran, 2003; Sener et al, 2005] استفاده از شواهد سطحی و مطالعات ژئوالکتریک [Srivastava and Bhattacharya, 2006]؛ تلفیقی از عوامل سطحی و هیدروژئولوژیکی [Ravi Shankar and Mohan, 2006; Subba Rao, 2006]؛ عوامل سطحی، هیدروژئولوژیکی و مطالعات ژئوالکتریک [Israil et al, 2006] استفاده نموده‌اند.

در صورتی که اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی در دسترس نباشد، روش‌های غیرمخرب ژئوفیزیکی ابزاری مناسب برای مطالعه ساختارهای زیرسطحی است. در طی چندین دهه اخیر مطالعات ژئوفیزیکی زیادی برای جستجوی رخساره‌های کارستی صورت گرفته است. روش‌های

ژئوفیزیکی مقاومت ویژه الکتریکی، رادار نفوذ به زمین (GPR)<sup>۱</sup>، سونداژزنی شدید مغناطیس هسته-ای (MRS)<sup>۲</sup>، الکترومغناطیس با فرکانس پایین (VLF)<sup>۳</sup> و لرزه برای تعیین محل حفرات و میانگین آزیموت زون‌های خردشده با موفقیت به کار رفته‌اند [Guérin et al., 2009].

روش‌های لرزه‌ای [Sumanovac and Weisser, 2001; Vasconcelos and Grechka, 2007]؛ مقاومت ویژه الکتریکی [Noel and Xu, 1992; Guérin and Benderitter, 1995; Gautam et al., 2000; Kaufmann and Quinif, 2001; Sumanovac and Weisser, 2001; Kaufmann and Quinif, 2002; Zhou et al., 2002; Gibson et al., 2004; Deceuster et al., 2006] برای مطالعات هیدروژئولوژی یا ژئوتکنیکی و اخیراً روش پتانسیل خودزا [Jardani et al., 2006a; Suski et al., 2008] نیز برای شناسایی شکستگی‌ها یا کارست‌ها استفاده شده‌اند.

روش سونداژزنی شدید مغناطیس هسته‌ای امکان دسترسی مستقیم به اطلاعاتی در مورد محتوای آب و سپس تعیین محل مجراهای کارستی آبدار در عمق کم را (۲۰ تا ۳۰ متر عمق) فراهم می‌سازد. این روش برای پی‌جویی آب‌های موجود در حفرات کارستی کم عمق در سیستم کارستی اویس فرانسه [Boucher et al., 2006] و تعیین محل چاه با بیشترین آبدهی [Vouillamoz et al., 2002] و تعیین محل حفرات [Vouillamoz et al., 2003] مورد استفاده قرار گرفته است.

روش‌های رادار نفوذی به زمین [Al-Fares et al., 2002] و الکترومغناطیس با فرکانس پایین [Bosch and Müller, 2001] به ترتیب برای تعیین محل حفرات کارستی و میانگین آزیموت زون‌های خرد شده، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

روش‌های غیرمستقیم مرسوم در اکتشاف آب‌های کارستی را می‌توان در دو دسته کلی قرار داد:

الف) در مقیاس منطقه‌ای یا ناحیه‌ای؛ تلفیق شواهد سطحی مانند زمین‌شناسی، میزان نزولات جوی،

---

<sup>۱</sup> Ground penetration radar

<sup>۲</sup> Magnetic resonance sounding

<sup>۳</sup> Very low frequency



شکستگی‌ها، توپوگرافی و شبکه آبراهه‌ها با شواهد هیدروژئولوژی مانند سطح آب زیرزمینی، شارژ، تغذیه و نحوه برونزد چشمه‌ها.

(ب) در مقیاس محلی؛ استفاده از یک روش مناسب ژئوفیزیکی.

در ایران یکی از آخرین تحقیقات موفق اکتشاف به کمک آرایه قطبی-دوقطبی متقارن توسط پیروز [پیروز، ۱۳۸۲(الف)؛ پیروز، ۱۳۸۲(ب)] انجام شده است. در این زمینه رفعت‌هراب و احمدزاده نیز به- ترتیب به بررسی قابلیت آرایه مذکور در تعیین محل زون‌های آبدار بر روی سازند لار در غرب شهر شاهرود [رفعت‌هراب، ۱۳۸۹] و آهک‌های کرتاسه واقع در شمال شهر شاهرود [احمدزاده، ۱۳۸۹] پرداخته‌اند. ایشان به کارگیری دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن را به عنوان بهترین آرایش الکترودی برای اکتشاف درزه‌ها و شکاف‌های آبدار معرفی نموده‌اند. همچنین کامکار روحانی و معتمدی با ترکیب نتایج سونداژزنی و پروفیل‌زنی به ترتیب با آرایه‌های الکترودی شلومبرژه و ونر موفق به تخمین عمق، ضخامت و وسعت جانبی آب‌های زیرزمینی در مناطق آهکی گردیده‌اند [کامکار روحانی و معتمدی، ۱۳۸۷].

## ۷-۱- اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین

در روش مقاومت ویژه، جریان الکتریکی مستقیم از طریق الکترودهای جریان به داخل زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل بین الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود.

### ۱-۷-۱- روش‌های برداشت مقاومت ویژه

برای برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی دو روش اصلی سونداژزنی (VES)<sup>۱</sup> و پروفیل‌زنی<sup>۲</sup> معمول است.

<sup>۱</sup> Vertical electrical sounding

<sup>۲</sup> Electrical resistivity profiling

در سونداژنی مقاومت ویژه الکتریکی، با ثابت نگه داشتن مرکز آرایه الکتروودی، فاصله الکتروودی افزایش می یابد که در نتیجه آن با افزایش فاصله الکتروودی عمق کاوش افزایش می یابد [Mooney, 1980]. در تفسیر این داده ها فرض بر این است که لایه های زیرسطحی افقی است و تغییرات جانبی مقاومت ویژه در نظر گرفته نمی شود که این باعث ایجاد خطا در تفسیر می گردد [Loke, 2004].

در پروفیل زنی مقاومت ویژه، با ثابت نگه داشتن فاصله الکتروودی، کل آرایه روی یک مسیر مستقیم جابجا می شود. با این شیوه اطلاعاتی از تغییرات جانبی مقاومت ویژه الکتریکی متناسب با عمق کاوش بدست می آید.

### ۱-۷-۲- تفسیر داده های مقاومت ویژه الکتریکی

امروزه برای تفسیر داده های ژئوفیزیکی نرم افزارهای متعدد کامپیوتری به بازار عرضه گردیده است. برای تفسیر داده های سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی از تفسیر کلاسیک با استفاده از منحنی های استاندارد<sup>۱</sup> به عنوان مدل اولیه و ورودی نرم افزار IX1D با قابلیت انجام مدل سازی پیشرو و وارون، استفاده می شود. لازم به ذکر است در صورتی که تفسیر کلاسیک با دقت بالا و نزدیک به واقعیت انجام شود، مدل خروجی نرم افزار نیز به واقعیت نزدیک تر خواهد بود.

### ۱-۸- روش های مدل سازی

یک مدل می تواند نشان دهنده یک سیستم واقعی باشد. هدف از مدل سازی افزایش فهم از مکانیزم فرآیندهایی است که در یک سیستم اتفاق می افتند. امکان پیش بینی رفتار سیستم در شرایط متفاوت و تأثیر تغییرات شرایط در داخل یا اطراف سیستم از دیگر مزایای استفاده از یک مدل مناسب برای یک فرآیند است. سه نوع مدل وجود دارد:

- مدل های مفهومی، که توصیف کننده کیفی فرآیندهای اتفاق افتاده در یک سیستم می باشند.

---

<sup>۱</sup> Master curve

- مدل‌های فیزیکی، بر اساس این مدل‌ها سیستم نزدیک به واقعیت ولی با مقیاس کوچکتر در آزمایشگاه‌ها ساخته می‌شود.

- مدل‌های ریاضی، که هدف آن کمی کردن رفتار سیستم منطبق با مدل مفهومی توصیف شده با معادلات ریاضی است. این معادلات سپس به صورت تحلیلی یا عددی، برای متغیرهای حالت که سیستم را تعریف می‌کنند، حل می‌شوند [دولتی ارده‌جانی و شفائی تنکابنی، ۱۳۸۸].

تقریباً هر پدیده‌ای در طبیعت اعم از علوم زیست‌شناسی یا مکانیکی را می‌توان با کمک قوانین فیزیک بر حسب معادلات جبری، دیفرانسیلی یا انتگرالی که ارتباط‌دهنده‌ی مقادیر مختلف مورد نظر هستند توصیف نمود [اراستگو و سلطانی، ۱۳۸۴]. به‌طور کلی برای حل مسائل فیزیکی از سه روش استفاده می‌شود [Roy, 2008]:

- روش تحلیلی دقیق: در این روش به محاسبه دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون میدان حرارتی، میدان الکتریکی و ... پرداخته می‌شود.
- روش تجربی: این روش رفتار تقریباً واقعی مسئله را در آزمایشگاه بررسی می‌کند.
- روش‌های عددی: روش‌های ریاضی هستند که به‌وسیله تقریب زدن معادلات دیفرانسیلی و انتگرالی حاکم بر انواع پدیده‌های فیزیکی و حل معادله ماتریسی بزرگ حاصل از آن عمل می‌کنند.

به علت محدودیت‌های روش‌های تحلیلی و مشکلات مدل‌سازی آزمایشگاهی و پرهزینه بودن آن و نیز پیشرفت سریع در مسائل محاسباتی روش‌های عددی و تکنولوژی نرم‌افزارها، بیشتر از روش‌های عددی استفاده می‌شود و مواردی مانند انتقال حرارت، بی‌نظمی‌های توپوگرافی و تغییرات نامنظم خواص فیزیکی همچون میدان‌های پتانسیل زمین (گرانی و مغناطیس)، توزیع پتانسیل الکتریکی، جریان آب‌های زیرزمینی، توزیع آلودگی و ... را می‌توان به‌طور عددی مدل‌سازی کرد [اراستگو و سلطانی، ۱۳۸۴؛ Roy, 2008].

## ۹-۱- مدل سازی عددی در ژئوفیزیک

مدل سازی ریاضی، هنر (یا علم) نمایش (یا تبدیل) یک واقعیت فیزیکی به مدل های انتزاعی است که برای تحلیل و محاسبه در دسترس هستند. مدل سازی عددی یکی از بخش های مهم ژئوفیزیک است، چون پیوند مستقیمی با درک طبیعت داده های ژئوفیزیکی دارد، که منجر به تصویربرداری از درون زمین می شود. در ژئوفیزیک هدف از مدل سازی، بازسازی مدلی از زمین بر اساس داده های صحرائی می باشد. مدل سازی عددی به دو روش انجام می شود [Roy, 2008]:

- روش مستقیم یا پیشرو<sup>۱</sup>
- روش وارون یا معکوس<sup>۲</sup>.

در مدل سازی پیشرو با استفاده از یک مدل اولیه و سایر اطلاعات زمین شناسی پارامترهای مدل اولیه آنقدر تعدیل می شود تا برازش مناسب میان داده های مشاهده ای و داده های تخمین زده شده توسط مدل حاصل شود. می توان به کارهای انجام شده در زمینه مدل سازی پیشرو دوبعدی [Talwani et al., 1965; Grant and West, 1959] و هم سه بعدی (Talwani and Ewing, 1960; Lee, 1980) اشاره کرد [برگرفته از میثمی، ۱۳۹۰].

استنباط خواص فیزیکی زمین از داده های مشاهده ای را مدل سازی وارون می گویند. مدل سازی وارون به منظور تعیین پارامترهای مدل از داده ها به کار می رود [میثمی، ۱۳۹۰].

### ۹-۱-۱- مدل سازی پیشرو

در مدل سازی پیشرو، یک توزیع خاص برای اجزای زیرسطحی در نظر گرفته می شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می شود سپس پاسخ این مدل، تحت آرایش الکترودی مورد نظر محاسبه می شود. برای مدل های با هندسه ساده، مسئله پیشرو به صورت تحلیلی قابل حل

<sup>۱</sup> Forward modeling

<sup>۲</sup> Invers modeling

است. در عمل چون زمین واقعی هندسه پیچیده‌ای دارد، برای محاسبه پاسخ مدل باید از یکی از روش‌های عددی مثل روش تفاضل محدود<sup>۱</sup>، تحلیل شبکه<sup>۲</sup>، اجزا محدود<sup>۳</sup>، معادله انتگرالی<sup>۴</sup>، انتگرال حجمی، انتگرال مرزی، هیبرید و غیره استفاده شود [Roy, 2008].

برای تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی، مسائل پیشرو باید قبل از ورود به بحث مسائل وارون، حل شوند. چون مقایسه داده‌های محاسبه شده (که حاصل مدل‌سازی پیشرو است) با داده‌های اندازه‌گیری شده، یک جزء کامل از الگوریتم‌های وارون‌سازی است [Scales, 2001; Roy, 2008]. بنابراین روش‌های وارون از یک روش مدل‌سازی پیشرو در بدنه خود استفاده می‌کنند و با استفاده از الگوریتم‌های تکرار خاص و روش‌های بهینه‌سازی مانند حداقل مربعات<sup>۵</sup>، تغییرات مناسب را در مدل پیش‌فرض خود ایجاد می‌کنند؛ تا خطای برازش داده‌ها در محدوده قابل قبولی قرار گیرد [Roy, 2008].

#### ۱-۹-۲- مدل‌سازی وارون (معکوس)

تئوری وارون دسته‌ای سازماندهی شده از روش‌های ریاضی برای ساده کردن داده‌ها جهت بدست آوردن اطلاعات مفید درباره فیزیک محیط براساس استنتاجات بدست آمده از مشاهدات است. تئوری وارون محدود به مشاهدات و سوالاتی است که می‌تواند به صورت عددی بیان گردند. مشاهدات شامل مجموعه اندازه‌گیری‌ها یا داده‌ها خواهد بود.

پارامترهای قابل جستجو در تئوری وارون، به صورت مقادیر عددی یا آماری هستند که بیانگر خصوصیات برجسته فیزیکی دنیای اطراف هستند. این خصوصیات پارامترهای مدل نامیده می‌شوند. عبارت تئوری وارون یا معکوس در مقابل تئوری پیشرو یا مستقیم به کار می‌رود. مسئله وارون با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها و یک مدل بر اساس اصول منطقی پذیرفته شده به تخمینی از پارامترهای مدل می‌پردازد [میثمی، ۱۳۹۰].

در مدل‌سازی وارون، از داده‌های حاصل از عملیات برداشت صحرائی به عنوان ورودی استفاده شده و

<sup>۱</sup> Finite difference

<sup>۲</sup> Mesh analysis

<sup>۳</sup> Finite element

<sup>۴</sup> Integral equation

<sup>۵</sup> Least square

خروجی فرآیند پس از انجام یک سری عملیات بهینه‌سازی و محاسبات ریاضی، مدل بازسازی‌شده زمین و پارامترهای فیزیکی آن خواهد بود. برای حل مسائل وارون روش‌های متعددی همچون روش گوس-نیوتن، روش شیب نزولی (سریعترین کاهش<sup>۱</sup>)، روش مارکوارت-لورنبرگ (رگرسیون ریج<sup>۲</sup>)، روش تجزیه مقادیر تکین<sup>۳</sup> توسعه یافته است [Roy, 2008].

## ۱-۱۰-۱- روش تحقیق

برای انجام تحقیق تعداد ۱۰ سونداژ مقاومت‌ویژه الکتریکی با فاصله تقریبی ۵۰۰ متر از یکدیگر با بکارگیری آرایه الکترودی شلومبرژه با  $AB/2$ ، ۵۰۰ متر برای هر سونداژ و تعداد ۴ پروفیل مقاومت-ویژه با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی با فواصل الکترودی ۷۵ متر و حداکثر ۸ گام برای هر پروفیل در دره کال قُرنو واقع در کوه‌های تپال شاهرود، با استفاده از تجهیزات و امکانات دانشگاه صنعتی شاهرود، برداشت گردید.

به منظور مدل‌سازی و تفسیر داده‌های سونداژها و پروفیل‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی به ترتیب از منحنی‌های استاندارد (تفسیر دستی سونداژها) و نرم‌افزارهای IX1D و Res2DINV استفاده گردید. همچنین برای تهیه نقشه توپوگرافی با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی منطقه از نرم‌افزار Global Mapper، رقومی نمودن لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی از نرم‌افزار Autodesk map و Arc view، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی منطقه از نرم‌افزار Arc GIS و تهیه مدل سه‌بعدی مقاومت‌ویژه از نرم‌افزار Voxler استفاده شده است.

## ۱-۱۱- ساختار پایان‌نامه

بررسی امکان وجود آب در جنوب‌غربی کوه‌های آهکی تپال شاهرود (دره کال قُرنو) و بالادست چاه شماره ۱۴ شرکت آب و فاضلاب شاهرود هدف اصلی این پایان‌نامه است.

<sup>۱</sup> Steepest-Descent

<sup>۲</sup> Ridge regression

<sup>۳</sup> Singular value decomposition (SVD)

این پایان‌نامه در پنج فصل تدوین گردیده است، در فصل اول به بیان کلیاتی در مورد اهمیت بررسی کارستها و نقش آنها در تأمین آب مورد نیاز و معرفی روش‌های اکتشاف آنها پرداخته شده است. فصل دوم به بیان اصول تئوری در مورد روش ژئوفیزیکی مقاومت‌ویژه اختصاص یافته است. در فصل سوم ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و مسیر برداشت داده‌های ژئوفیزیکی و اجرای عملیات صحرایی و نتایج تفسیرهای ژئوفیزیکی ارائه شده است؛ در فصل پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آمده است.

## ۲- فصل دوم

### اصول تئوری روش مقاومت ویژه



## ۱-۲- مقدمه

در روش‌های مقاومت‌ویژه، جریان الکتریکی به صورت مصنوعی به داخل زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل ایجاد شده در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. انحراف از الگوی اختلاف پتانسیل‌هایی که برای زمین همگن انتظار می‌رود، اطلاعاتی را در مورد ویژگی‌های الکتریکی و ناهمگنی‌های موجود در زیر سطح زمین فراهم می‌نماید [Keary et al., 2002].

## ۲-۲- مقاومت‌ویژه مواد سازنده زمین

جریان الکتریکی به سه شیوه می‌تواند در یک سنگ هدایت شود: هدایت الکترولیتی، الکترونیکی (اهمی) و دی‌الکتریکی. هدایت الکترولیتی با حرکت آرام یون‌ها در داخل الکترولیت صورت می‌پذیرد و به نوع یون‌ها، غلظت یونی و تحرک یونی و غیره بستگی دارد. هدایت الکترونیکی فرآیندی است که در آن برای مثال فلزات به الکترون‌ها اجازه می‌دهند تا به سرعت حرکت نموده، سپس شارش می‌نمایند [Reynolds, 1997]. هدایت دی‌الکتریکی در مواد با هدایت الکتریکی خیلی کم (یا عایق‌ها) اتفاق می‌افتد که در اثر میدان‌های متغیر خارجی، الکترون‌های اتم نسبت به هسته خود اندکی جابجا می‌شوند. این جابجایی نسبی اندک در بارهای مثبت و منفی، به قطبش دی‌الکتریکی ماده معروف است. ممکن است قطبش یونی و مولکولی در مواد با پیوندهای یونی و مولکولی رخ دهد. در همه این موارد هدایت الکتریکی، حاصل قطبش الکترونی، یونی یا مولکولی است که در اثر میدان‌های الکتریکی متناوب به وجود می‌آید [Telford, 1990]. در بسیاری از سنگ‌ها، هدایت الکتریکی از طریق عملکرد سیالات موجود در حفرات به عنوان الکترولیت و مشارکت بسیار اندک کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ (به جز در مواردی که کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ خود رسانای خوب الکتریسیته باشند) صورت می‌پذیرد [Reynolds, 1997].

مقاومت‌ویژه یک ماده به صورت مقاومت الکتریکی بین دو سطح مقابل از یک مکعب واحد از آن ماده بر حسب واحد اهم تعریف می‌شود. برای یک استوانه رسانا با مقاومت  $\delta R$ ، طول  $\delta L$  و سطح  $\delta A$

مقاومت ویژه  $\rho$  از رابطه (۱-۲) بدست می آید.

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad (1-2)$$

واحد مقاومت ویژه در سیستم استاندارد بین المللی اهم متر است و عکس مقاومت ویژه رسانندگی خوانده می شود (واحدها: زیمنس بر متر؛ برخی مواقع معکوس اهم "موهو" اطلاق می شود).

پارامترهایی که مقاومت ویژه مواد زمین را کنترل می کنند به صورت زیر است [Mooney, 1980]:

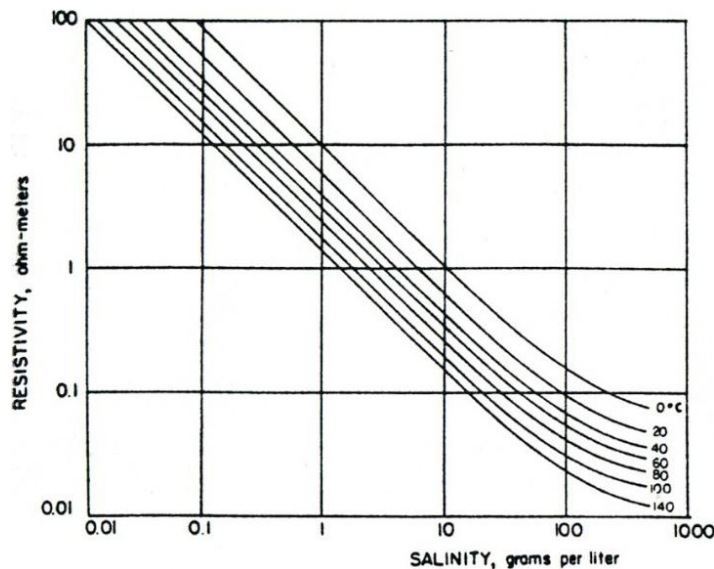
برای سنگ های آبدار و سایر مواد زمین با افزایش موارد زیر مقاومت ویژه کاهش می یابد:

- بخشی از حجم سنگ که با آب اشغال شده است
- میزان شوری یا محتوای یون های آزاد آب های فسیلی
- ارتباط درونی فضاها (متخلخل (نفوذپذیری)
- دما

سن سنگ نیز اهمیت قابل توجهی در کنترل مقاومت ویژه الکتریکی دارد، سنگ های آتشفشانی کواترنری ممکن است دامنه مقاومت ویژه از ۱۰ تا ۲۰۰ اهم متر متغیر باشد، در حالی که ممکن است معادل همان سنگ اما با سن پرکامبرین دامنه وسیع تری از مقاومت ویژه را دربر بگیرد. چون در سنگ قدیمی تر خلل و فرج بیشتر بوسیله کانی سازی در معرض پرشدگی ثانویه قرار می گیرد و در اثر تراکم سنگ ها، تخلخل و نفوذپذیری کاهش می یابد [Reynolds, 1997].

ارتباط بین مقاومت ویژه، میزان شوری و دما در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. افزایش دما از صفر تا صد درجه سانتیگراد باعث کاهش مقاومت ویژه در هر میزان از شوری شده است. این موضوع با

پی‌جویی ژئوترمال‌ها به کمک روش‌های مقاومت‌ویژه ارتباط مستقیم دارد. افزایش دما به همان اندازه که باعث افزایش تحرک یونی<sup>۱</sup> می‌شود، افزایش قابلیت انحلال را نیز در پی دارد.

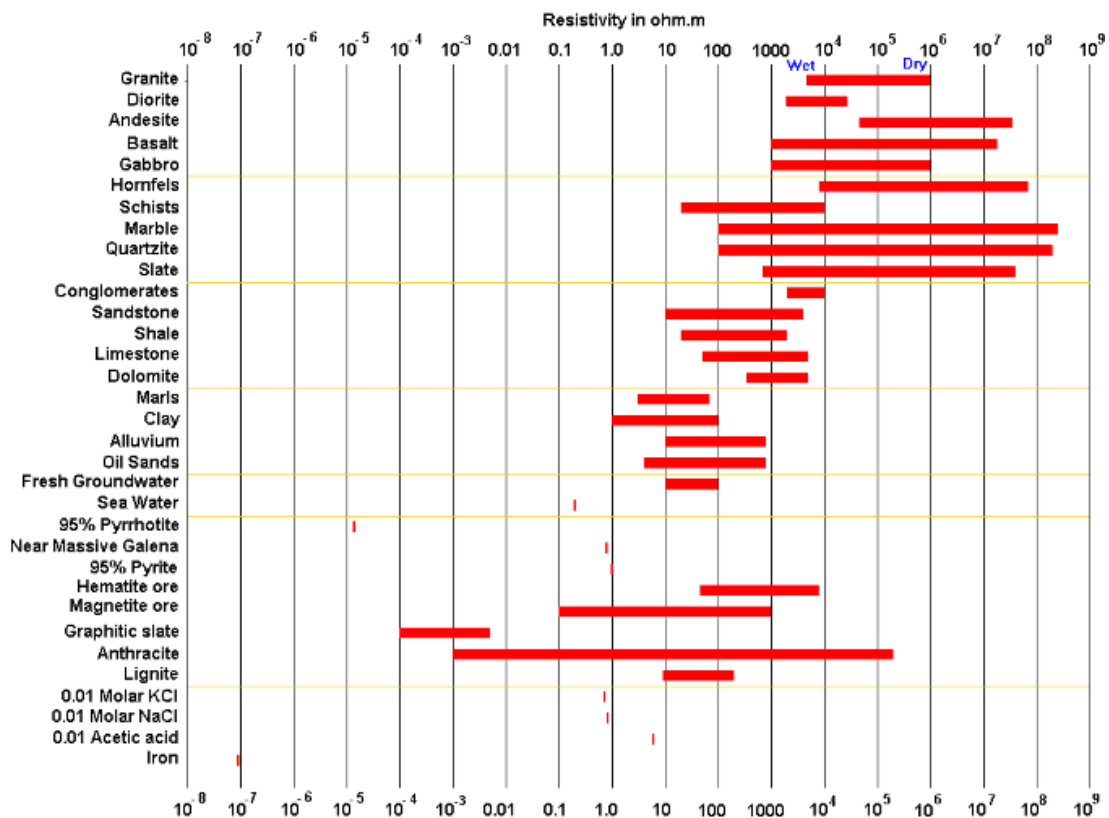


شکل ۲-۱: وابستگی مقاومت‌ویژه الکتریکی به میزان شوری و دما [Mooney, 1980].

حضور کانی‌های رسی منجر به کاهش مقاومت‌ویژه می‌گردد، زیرا الف) کانی رسی می‌تواند با آب ترکیب گردد، ب) کانی رسی قادر به جذب کاتیون‌ها در شرایط تبادل یونی بر روی سطح خود می‌باشد و ج) کانی‌های رسی تمایل به یونیزه شدن و فراهم نمودن یون‌های آزاد دارند [Mooney, 1980].

مقاومت‌ویژه برخی از سنگ‌ها، کانی‌ها و آب‌ها در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌است. همانند سایر خواص فیزیکی، هم‌پوشانی قابل توجهی در مقاومت‌ویژه مواد مختلف وجود دارد که این ابهاماتی را در تفسیر مقاومت‌ویژه ایجاد می‌کند و آشنایی با وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه کمک شایانی در رفع این ابهامات می‌نماید [Loke, 2004].

<sup>1</sup> mobility



شکل ۲-۲: مقاومت ویژه سنگ‌ها، خاک و کانی‌ها [Loke, 2004].

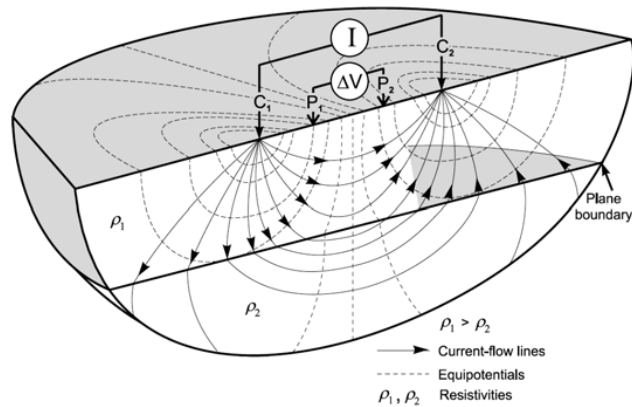
### ۳-۲- انتشار جریان در زمین همگن

برای یک الکتروود جریان که در سطح یک محیط همگن با مقاومت ویژه  $\rho$  کاشته شده است، خطوط جریان به صورت شعاعی حرکت می‌کنند و سطوح هم‌پتانسیل خطوط جریان را با زاویه قائم قطع می‌کنند [Reynolds, 1997; Keary et al., 2002] (شکل ۳-۲).

با فرض نمودن حالتی که الکتروود مصرف جریان<sup>۱</sup> در فاصله نزدیک از منبع جریان<sup>۲</sup> باشد، پتانسیل  $V_{P_1}$  در الکتروود  $P_1$  در بین دو الکتروود جریان برابر مجموع پتانسیل  $V_{C_1}$  و  $V_{C_2}$  حاصل از الکتروودهای منبع جریان  $C_1$  و مصرف  $C_2$  خواهد بود [Reynolds, 1997] (رابطه ۲-۲).

$$V_{P_1} = V_{C_1} + V_{C_2} \quad (۲-۲)$$

<sup>۱</sup> Current sink  
<sup>۲</sup> Current source



شکل ۳-۲: کلی آرایه الکترودی مورد استفاده در اندازه‌گیری مقاومت ویژه [Knodel, 2008].

$$V_{P_1} = \frac{\rho l}{2\pi} \left( \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right) \quad (3-2)$$

$$V_{P_2} = \frac{\rho l}{2\pi} \left( \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_2} \right) \quad (4-2)$$

اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود پتانسیل  $\Delta V$  به صورت رابطه (۵-۲) خواهد بود.

$$\Delta V = \frac{\rho l}{2\pi} \left( \left( \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right) - \left( \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_2} \right) \right) \quad (5-2)$$

با مرتب‌سازی رابطه (۵-۲) رابطه اساسی مقاومت ویژه به صورت رابطه (۶-۲) خواهد بود [Loke, 2004].

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{I} \left( \left( \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} \right) - \left( \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_2} \right) \right)^{-1} \quad (6-2)$$

اگر مقاومت ویژه در یک محیط همگن و همسانگرد اندازه‌گیری شود، آنرا مقاومت ویژه واقعی می‌نامند.

اما اگر اندازه‌گیری در یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد صورت گیرد آنرا مقاومت ویژه ظاهری می‌نامند

[Telford, 1990].

## ۴-۲- اثر زمین ناهمگن

در کارهای صحرایی آنچه باید عملاً آشکارسازی شود، وجود رسانندگی آنومال با شکل‌های متفاوت، همچون اجسام توده‌ای، دایک‌ها، گسل‌ها و همبری لایه‌های قائم و افقی می‌باشد.

### ۴-۲-۱- انحراف مسیر جریان در برخورد با فصل مشترک تخت

دو محیط همگن با مقاومت ویژه  $\rho_1$  و  $\rho_2$  که توسط یک مرز تخت (شکل ۴-۲) از هم جدا شده‌اند در نظر می‌گیریم. اگر جریان با چگالی  $I_1$  در محیط (۱) و با زاویه  $\theta_1$  نسبت به قائم بر مرز ساطع شود، برای تعیین جهت این جریان در محیط (۲) رابطه (۷-۲) را بکار می‌بریم [Telford, 1990].

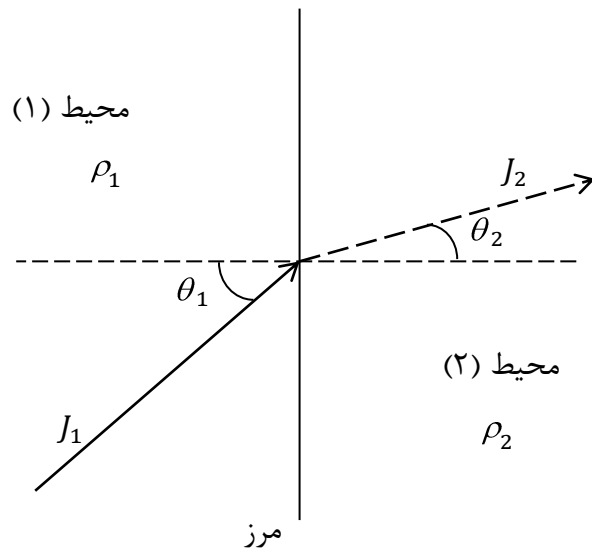
$$\tan \theta_2 / \tan \theta_1 = \rho_1 / \rho_2 \quad (7-2)$$

در نتیجه خطوط جریان در عبور از مرز خم می‌شوند. اگر  $\rho_1 < \rho_2$  باشد، خطوط جریان به طرف خط عمود خم می‌شوند و برعکس [Telford, 1990].

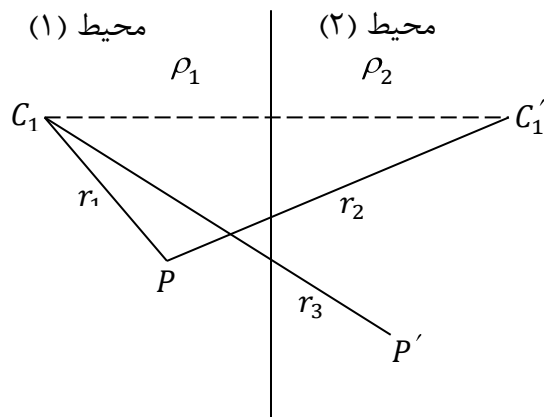
با انحراف خطوط جریان از محیطی به محیط دیگر با مقاومت ویژه متفاوت، سطوح هم‌پتانسیل نیز منحرف می‌شوند. میدان پتانسیل را می‌توان با معادله لاپلاس برای شرایط مرزی خاص یا با انتگرال-گیری مستقیم، بدست آورد. روش ساده‌تر استفاده از تصاویر الکتریکی، مثل نور هندسی، است. این روش تنها در حل تعداد محدودی از مسائل پتانسیل مانند مرز تخت و کره صدق می‌کند. با توجه به شکل ۵-۲ پتانسیل در نقطه  $P$  از محیط اول از رابطه (۸-۲) و در نقطه  $P'$  از محیط دوم از رابطه (۹-۲) بدست می‌آید [Reynolds, 1997; Telford, 1990].

$$V = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{k}{r_2} \right) \quad (8-2)$$

$$V = \frac{I\rho_2}{4\pi} \left( \frac{1-k}{r_3} \right) \quad (9-2)$$



شکل ۲-۴: انحراف مسیر جریان در برخورد با فصل مشترک تخت هنگامی  $\rho_1 < \rho_2$  [Telford, 1990].



شکل ۲-۵: شیوه تشکیل تصویر الکتریکی [Telford, 1990].

با استفاده از شرایط مرزی، باید این پتانسیل‌ها در فصل مشترک، یعنی وقتی  $r_1 = r_2 = r_3$  است، برابر باشند، لذا رابطه (۲-۱۰) بدست می‌آید.

$$k = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (۲-۱۰)$$

$k$  در این رابطه ضریب بازتاب<sup>۱</sup> است و مقدار آن، متناسب با مقاومت ویژه دو محیط بین  $\pm 1$  است [Telford, 1990].

## ۲-۴-۲- اثر توپوگرافی

اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه به شدت تحت تأثیر تغییرات رسانندگی سطحی ناشی از هوازدگی و میزان رطوبت قرار می‌گیرد. توپوگرافی ناهموار اثری مشابه دارد، زیرا شارش جریان در گودی‌ها متمرکز شده و در زیر برآمدگی<sup>۳</sup> پراکنده یا واگرا می‌شود. در نتیجه سطوح هم‌پتانسیل منحرف شده و تنها به خاطر توپوگرافی آنومالی کاذب را نشان می‌دهد. این اثر ممکن است آنومالی واقعی را تحریف نموده یا مخفی کند.

فاکس<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۸۰) یک روش تحلیلی را برای بررسی نتایج مقاومت ویژه و قطبش القایی بدست آمده بر روی عوارض دوبعدی، زمین‌های شیب‌دار<sup>۵</sup>، برآمدگی‌ها و فروافتادگی‌ها با آرایه دوقطبی-دوقطبی بسط دادند. این روش بوسیله هالکومب و ژیراک<sup>۶</sup> (۱۹۸۴) به ساختارهای سه‌بعدی تعمیم داده شد. در مطالعه آنها، روش عددی اجزاء محدود، به خاطر انعطاف‌پذیری در تطابق با مرزهای نامنظم برای مدل‌سازی استفاده شده است. پتانسیل‌ها براساس هندسه مرزی و ویژگی‌های الکتریکی هر بلوک داخلی به آنها اختصاص می‌یابند و تا زمانی که خطای باقیمانده<sup>۷</sup> در تمام شبکه مورد نظر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد محاسبات تکرار می‌شود. آنها دریافتند که در سطح زمین همگن، مقدار مقاومت ویژه بر روی برآمدگی‌ها پایین و در داخل گودی‌ها و دره‌ها بالا است [Telford, 1990].

شکل ۲-۶- الف سلول‌های شبکه‌بندی روش اجزاء محدود برای یک برآمدگی دوبعدی و شکل ۲-۶-ب

<sup>1</sup> Reflection coefficient

<sup>2</sup> valleys

<sup>3</sup> hill

<sup>4</sup> Fox

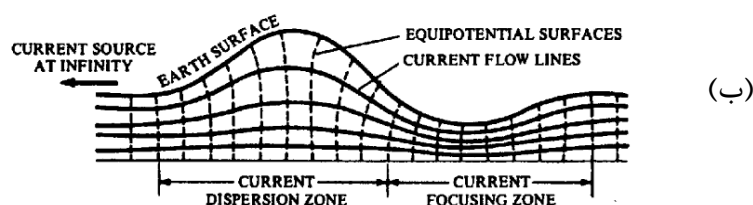
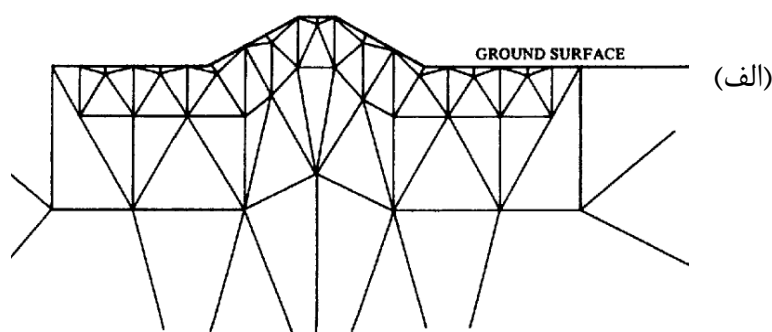
<sup>5</sup> slopes

<sup>6</sup> Holcombe and Jiracek

<sup>7</sup> residual



ب انحراف یک میدان ثابت بوسیله برآمدگی را نشان می‌دهد [Telford, 1990].



شکل ۲-۶: اثر یک برآمدگی دوبعدی بر روی میدان ثابت (بعد از فاکس و همکاران ۱۹۸۰) (الف)  
 سلول‌های روش اجزاء محدود مورد استفاده برای محاسبه اثر یک برآمدگی. (ب) انحراف میدان ثابت  
 بوسیله برآمدگی [Telford, 1990].

اثر توپوگرافی بوسیله عوارض سطحی افزایش می‌یابد و برای شیب کمتر از ۱۰ درجه قابل اغماض است. علاوه بر این نوع آرایه الکترودی مورد استفاده شرایط را پیچیده‌تر می‌کند. استفاده از سیستم دوقطبی درست برعکس نتایج ارائه شده توسط فاکس و همکاران، باعث تمرکز جریان و افزایش مقاومت ویژه بر روی برآمدگی‌ها، و کاهش مقاومت ویژه در گودی‌ها می‌گردد [Telford, 1990].

پاسخ ژئوفیزیکی دریافتی همچنین به جهت‌گسترش آرایه الکترودی نیز حساس است؛ برای ساختارهای دوبعدی اگر جهت آرایه موازی امتداد ساختار باشد آنومالی کوچکتر از حالتی است که عمود بر آن باشد. بررسی هر یک از موارد ذکر شده فوق، امکان تصحیح داده‌های صحرائی را با حذف

نمودن یا کاهش آنومالی ناشی از این عوارض، فراهم می‌نماید [Telford, 1990].

## ۲-۵- آرایه‌های الکترودی و ضریب هندسی

در واقع، زیر سطح زمین از مواد همگن تشکیل نشده است، بنابراین مقاومت ویژه بدست آمده، مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) است که می‌تواند حتی مقدار منفی هم داشته باشد. مقاومت ویژه ظاهری بر خلاف مقاومت ویژه واقعی، یک خاصیت فیزیکی برای مواد زیر سطحی محسوب نمی‌شود. در نتیجه، تمام داده‌های مقاومت ویژه صحرائی برداشت شده، مقاومت ویژه ظاهری بوده که با روش‌های تفسیر به مقاومت ویژه واقعی تبدیل می‌شوند [Reynolds, 1997]. بدست آوردن مقاومت ویژه از مقادیر مقاومت ویژه ظاهری یک مسئله مدل‌سازی وارون است [Loke, 2004].

مقدار مقاومت ویژه ظاهری تابعی از چند متغیر زیر است:

- فواصل بین الکترودها
- وضعیت هندسی آرایش الکترودها
- مقاومت ویژه واقعی و دیگر خصوصیات مواد زیرسطحی از قبیل ضخامت، شیب و خواص ناهمسانگردی لایه‌ها [کلاگری، ۱۳۷۱].

برای بدست آوردن مقدار مقاومت ویژه ظاهری از رابطه (۲-۱۱) استفاده می‌شود.

$$\rho_a = KR \quad (۲-۱۱)$$

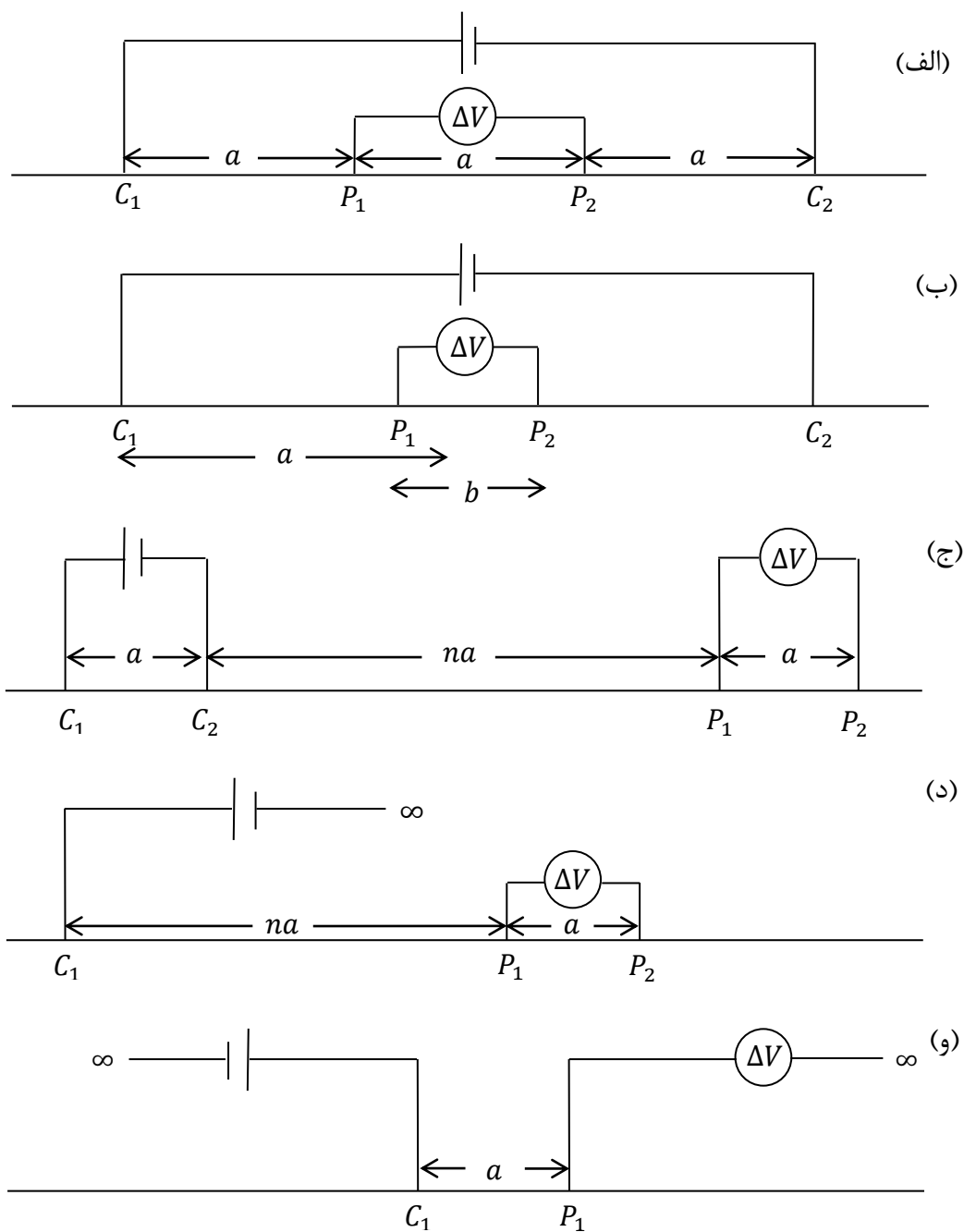
که در آن R مقاومت الکتریکی و K ضریب یا عامل هندسی است. برای بدست آوردن ضریب هندسی، از رابطه (۲-۱۲) استفاده می‌شود.

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \right)^{-1} \quad (۲-۱۲)$$

ضریب هندسی به آرایه الکترودی مورد استفاده بستگی دارد. تعداد زیادی آرایه‌های الکترودی مقاومت‌ویژه در زمان‌های مختلف بکار گرفته شده‌اند، اما عملاً تعداد محدودی از آنها کاربرد دارند [Loke, 2004].

## ۲-۵-۱- آرایه‌های الکترودی

آرایه‌های الکترودی متنوعی وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. انتخاب آرایه مناسب به فضای موجود برای گسترش آرایه به کار گرفته شده و سختی و کارایی آن در کاربرد مورد نظر، بستگی دارد. همچنین حساسیت آرایه‌ها به ناهمگنی‌های جانبی و فصل مشترک‌های شیبدار نیز از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [Reynolds, 1997]. در اصل، بکار گرفتن آرایش کاملاً خطی لزومی ندارد. اما در عمل الکترودها تقریباً همیشه در یک خط قرار می‌گیرند، زیرا در غیر این صورت تفسیر نتایج دشوار و کار صحرایی پیچیده می‌شود [حاجب‌حسینی و زمردیان، ۱۳۷۵]. آرایه‌های متداول مورد استفاده در برداشت‌های مقاومت‌ویژه عبارتند از آرایه‌های ونر، شلومبرژه، دوقطبی - دوقطبی، قطبی - دوقطبی و قطبی - قطبی [Loke, 2004].



شکل ۲-۷: آرایه‌های الکترونی (الف) و (ب) شلومبرژه (ج) دوقطبی - دوقطبی محوری (د) قطبی -

دوقطبی مستقیم (و) قطبی - قطبی

### الف) آرایه ونر

در آرایه ونر (شکل ۲-۷-الف) الکترودها با فواصل یکسان در یک خط قرار می‌گیرند. مقاومت ویژه

ظاهری با استفاده از رابطه (۲-۱۳) بدست می‌آید.

$$\rho_a = 2\pi aR \quad (۲-۱۳)$$

### ب) آرایه شلومیرژه

این آرایه بطور گسترده در اکتشافات الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترودهای جریان و پتانسیل مانند آنچه در شکل ۲-۷-ب نشان داده شده است در طول یک خط راست قرار می‌گیرند. در این آرایه  $C_1 C_2 \geq 5P_1 P_2$  می‌باشد، یعنی حداقل  $C_1 C_2$  باید ۵ برابر  $P_1 P_2$  باشد. در این آرایه مقاومت ویژه با رابطه (۲-۱۴) محاسبه می‌شود [Reynolds, 1997].

$$\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \left[ 1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] R; a \geq 5b \quad (۲-۱۴)$$

### ج) آرایه دو قطبی - دو قطبی

در این آرایش (شکل ۲-۷-ج) فاصله بین الکترودهای جریان و فاصله بین الکترودهای پتانسیل تقریباً ثابت بوده و بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از فاصله بین مراکز دو دایپل است [کلاگری، ۱۳۷۱]. برای بدست آوردن مقاومت ویژه ظاهری از رابطه (۲-۱۵) استفاده می‌شود [Reynolds, 1997].

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)aR \quad (۲-۱۵)$$

### د) آرایه قطبی - دو قطبی

در این آرایه (شکل ۲-۷-د) یکی از الکترودهای جریان، در فاصله‌ای بینهایت دور به زمین متصل می‌شود و اختلاف پتانسیل زمین، بین الکترودهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود. برای بدست آوردن مقاومت ویژه از رابطه (۲-۱۶) استفاده می‌شود [پیروز، ۱۳۹۰].

$$\rho_a = 2\pi n(n+1)aR \quad (۲-۱۶)$$

### و) آرایه قطبی - قطبی

در این آرایه (شکل ۲-۷- و ) یکی از الکترودهای جریان و یکی از الکترودهای پتانسیل در فاصله دور قرار می‌گیرند و برای بدست آوردن مقاومت ویژه الکتریکی از رابطه (۲-۱۷) استفاده می‌شود [Loke, 2004].

$$\rho_a = 2\pi aR \quad (2-17)$$

## ۲-۵-۲- مقایسه آرایه‌های الکترودی مختلف

هر آرایه الکترودی دارای مزایا و معایبی در عمق کاوش، حساسیت به تغییرات جانبی یا قائم و قدرت سیگنال دارد. انتخاب آرایه الکترودی مناسب در برداشت مقاومت ویژه نیاز به داشتن دانش از هدف مورد مطالعه، حساسیت هر آرایه نسبت به ویژگی زمین‌شناسی خاص و میزان بودجه پروژه دارد [Zhou et al., 2002].

وارد<sup>۱</sup> (۱۹۹۰) عوامل متعددی را برای مقایسه آرایه‌های الکترودی مختلف معرفی نموده است که به- صورت زیر می‌باشند:

- ۱- نسبت سیگنال به نویز
- ۲- جفت‌شدگی الکترومغناطیسی
- ۳- حساسیت به موقعیت جانبی
- ۴- قابلیت تفکیک ساختارهای شیب‌دار
- ۵- قدرت تفکیک‌پذیری ساختارهای افقی
- ۶- عمق نفوذ
- ۷- حساسیت به عمق آنومالی (عمق هدف)

---

<sup>1</sup> Ward

۸- حساسیت نسبت به شیب

۹- حساسیت نسبت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات سونداژزنی

۱۰- حساسیت به ناهمگنی‌های سطحی در عملیات پروفیل‌زنی

۱۱- حساسیت به توپوگرافی سنگ بستر

۱۲- حساسیت به اثرات جانبی

۱۳- حساسیت به روباره هادی

۱۴- حساسیت به توپوگرافی

البته اطلاعات کافی در رابطه با این عوامل و شرایط بسیار متنوعی که ارزیابی هر کدام از آن‌ها را برای آرایه‌های مختلف میسر می‌سازد، در دسترس نیست. حتی برای بعضی از این عوامل، هیچ بررسی سیستماتیک و منظمی برای مجموعه گسترده‌ای از مدل‌های زمینی انجام نشده است. در جدول ۱-۲ ارزیابی مختصری از اولویت آرایه‌های مورد استفاده با توجه به تأثیر عوامل مذکور، ارائه شده است [Ward, 1990]. در این جدول عدد ۱ نشان‌دهنده‌ی این است که آرایه مربوطه، مناسب‌ترین آرایش است؛ عدد ۵ نشان می‌دهد که آرایه مذکور، اصلاً مناسب نیست و در اولویت آخر (با توجه به عامل مورد نظر) قرار دارد؛ اعداد ۲، ۳، ۴ نیز به ترتیب اولویت‌های بعدی را نشان می‌دهند. مواردی که ارزیابی دقیقی صورت نگرفته و هیچ قطعیت و مطالعات مستندی در دسترس نبوده، با علامت \* یا + مشخص شده‌اند. برای تکمیل این جدول نیاز به مطالعات دقیق و گسترده می‌باشد.

جدول ۲-۱: ارزیابی آرایه‌های متداول با توجه به مهمترین عوامل مؤثر [Ward, 1990].

آرایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
دوقطبی - دوقطبی	۵	۱	۲	۴	۲	۲	۴	۴	۲	۲	۱	۱	۱	+
قطبی - دوقطبی	۴	۲	۳	۵	۲	۲	۳	۵	۳	۱	۳	۲	۱	+
شلومبرژه	۲	۴	۴	۲*	۱	۱	۲	۱	۱	۳	۳	۳*	۱	+
ونر	۱	۵	۵	۳*	۱	۱	۲	۲	۲	۳	۳	۳*	۱	+

رینولدز<sup>۱</sup> (۱۹۹۷) با توجه به یک سری معیار به مقایسه کارایی چهار آرایه ونر، شلومبرژه، دوقطبی - دوقطبی و مربعی پرداخته است که نتایج آن به طور خلاصه در جدول ۲-۲ آمده است.

جدول ۲-۲: مقایسه آرایه‌های الکترونی دوقطبی - دوقطبی، شلومبرژه، مربعی و ونر [Reynolds,

1997]

معیار	ونر	شلومبرژه	دوقطبی - دوقطبی	مربعی
قدرت تفکیک قائم	خوب	متوسط	ضعیف	متوسط
عمق کاوش	ضعیف	متوسط	خوب	متوسط
قابلیت استفاده در سونداژزنی	متوسط	خوب	ضعیف	نامناسب
قابلیت استفاده در پروفیل‌زنی	خوب	نامناسب	خوب	خوب
حساسیت به جهت‌گیری	بله	بله	متوسط	خیر
حساسیت به ناهمگنی‌های جانبی	بالا	متوسط	متوسط	پائین
پرزحمت بودن	بله*	متوسط*	متوسط*	بله
دسترسی به روش تفسیر	خوب	خوب	متوسط	ضعیف

\* در صورت استفاده از کابل چند هسته‌ای و سیستم آرایه الکترونی خودکار پرزحمت نیست.

<sup>1</sup> Reynolds



ژو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی آرایه الکترودی مؤثر جهت به تصویر کشیدن پتانسیل حفرات کارستی با استفاده از توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی پرداختند. در این مطالعه سه آرایه استاندارد ونر، شلومبرژه و دوقطبی - دوقطبی و نیز ترکیب همزمان داده‌های این سه آرایه، به منظور شناسایی حفرات کارستی بر روی یک حفره حاوی پرشدگی رسی و همچنین حفرات اشباع از آب به کار گرفته شده است. آرایه ترکیبی با در نظر گرفتن محاسن هر سه آرایه، محل حفره کارستی را بهتر نمایان ساخته است. آرایه ونر کمترین حساسیت، آرایه شلومبرژه حساسیت متوسط و آرایه دوقطبی - دوقطبی بیشترین حساسیت را نشان داده است. همچنین پروفیل حاصل از آرایه ترکیبی شباهت زیادی به نتایج آرایه دوقطبی - دوقطبی دارد اما به کارگیری آرایه ترکیبی جهت جمع‌آوری اطلاعات بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است.

در میان سه آرایه استاندارد استفاده شده آرایه دوقطبی - دوقطبی دقیق‌ترین نتایج را در رابطه با پتانسیل مناطق حفرات کارستی فراهم می‌کند و بیشترین حساسیت را نسبت به ساختارهای قائم دارد [Zhou et al., 2002].

لوک<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) نیز به بررسی ویژگی‌های تعدادی از آرایه‌های الکترودی متداول و شرایط کاربرد آنها پرداخته است. از دیدگاه ایشان انتخاب بهترین آرایه الکترودی برای برداشت صحرائی، وابسته به ساختار زمین‌شناسی مورد مطالعه، حساسیت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه و سطح زمینه نوفه می‌باشد و عمق کاوش، حساسیت آرایه نسبت به تغییرات عمقی و جانبی مقاومت ویژه زمین، پوشش افقی داده‌ها و قدرت سیگنال را از مهمترین ویژگی‌های یک آرایه الکترودی معرفی می‌نماید.

آرایه ونر جهت کاربرد در محل‌های با سطح نویز بالا و همچنین جایی که قدرت تفکیک قائم خوب نیاز باشد، مناسب است. اگر قدرت تفکیک و پوشش افقی خوب مورد نیاز باشد آرایه دوقطبی - دوقطبی (با فرض اینکه دستگاه ثبت مقاومت ویژه به اندازه کافی دقت داشته و تماس الکترودها با زمین به خوبی ایجاد شده باشد) مناسب‌تر است. اگر از سیستمی با تعداد الکترودها محدود استفاده

---

<sup>1</sup> Zhou

<sup>2</sup> Loke

گردد، استفاده از آرایه قطبی - دوقطبی در دو جهت مستقیم و معکوس مناسب به نظر می‌رسد. برای برداشت‌های با فاصله الکترودی کوچک و پوشش افقی خوب، ممکن است آرایه قطبی - قطبی انتخاب خوبی باشد [Loke, 2004].

## ۲-۶- روش‌های برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی

برای برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی دو روش اصلی سونداژزنی (VES) و پروفیل‌زنی معمول است. در سونداژزنی مقاومت‌ویژه الکتریکی، با ثابت نگه‌داشتن مرکز آرایه الکترودی، فاصله الکترودی افزایش می‌یابد که در نتیجه آن با افزایش فاصله الکترودی عمق کاوش افزایش می‌یابد [Mooney, 1980]. در تفسیر این داده‌ها فرض بر این است که لایه‌های زیرسطحی افقی است و تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه در نظر گرفته نمی‌شود که این باعث ایجاد خطا در تفسیر می‌گردد [Loke, 2004]. در پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه، با ثابت نگه‌داشتن فاصله الکترودی، کل آرایه روی یک مسیر مستقیم جابجا می‌شود. با این شیوه اطلاعاتی از تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه الکتریکی متناسب با عمق کاوش بدست می‌آید. روش‌های پروفیل‌زنی که حتی‌المقدور در راستای عمود بر امتداد ساختارهای زمین‌شناسی اجرا می‌شوند، تغییرات مقاومت‌ویژه را در دو بعد به تصویر می‌کشند. در این روش، مشکلات روش سونداژزنی تا حدود زیادی مرتفع می‌گردد. برای تفسیر و مدل‌سازی داده‌های این روش از روش‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون استفاده می‌شود.

مدل‌سازی وارون و همچنین ابهامات ذاتی زمین‌شناسی، عدم یکتایی تفسیرها را بدنبال دارد، لذا ممکن است برای افزایش سطح اطمینان نیاز به استفاده از چند روش ژئوفیزیکی باشد. در روش‌های مقاومت‌ویژه بهترین نتیجه از تعبیر و تفسیر داده‌ها، وقتی حاصل می‌شود که یافته‌های حاصل از سونداژزنی و پروفیل‌زنی با هم مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند [کلاگری، ۱۳۷۱].

## ۷-۲- روش سونداژزنی

اگر زمینی دارای یک سری لایه‌های افقی همگن و ایزوتروپ باشد، یافته‌های سونداژزنی فقط مبین تغییرات مقاومت ویژه نسبت به عمق می‌باشند. ولی در عمل یافته‌های این روش تحت تأثیر ناهمگنی‌های قائم و افقی مقاومت ویژه قرار می‌گیرند. از اینرو اجراء، تعبیر و تفسیر و ارائه یافته‌های سونداژزنی باید طوری باشند که تغییرات افقی مقاومت ویژه به آسانی از تغییرات قائم قابل تشخیص باشند [کلاگری، ۱۳۷۱].

اساس انجام سونداژزنی مقاومت ویژه، قطع نظر از نوع آرایش بکار رفته، بدین ترتیب است که هر چقدر فاصله الکترودهای جریان از الکترودهای پتانسیل بیشتر شود عمق تجسس افزایش خواهد یافت. ولی در آرایش‌های دوقطبی - دوقطبی هر چقدر فاصله مراکز دوقطبی‌ها افزایش یابد، عمق تحت بررسی افزایش می‌یابد.

در روش سونداژزنی با آرایه‌های ونر، شلومبرژه و یا دوقطبی - دوقطبی فواصل الکترودها به ترتیب  $a$ ،  $AB/2$  (در این پایان‌نامه  $C1C2/2$ ) و یا  $r$  (فاصله مراکز دوقطبی‌ها) با توالی لگاریتمی مرتباً افزایش یافته و مقادیر مقاومت ویژه ظاهری به‌عنوان تابعی از فواصل الکترودها در روی کاغذهای لگاریتمی ترسیم می‌شوند [کلاگری، ۱۳۷۱].

تفسیر کمی روش‌های الکتریکی به خاطر پیچیده‌بودن اصول تئوری این روش‌ها، از مشکل‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی برای تفسیر به حساب می‌آیند. در تفسیرهای مقاومت ویژه، روش‌های تحلیل ریاضی برای روش‌های سونداژزنی و پروفیل‌زنی به خوبی توسعه یافته است. روش‌های مقاومت ویژه به خاطر بهره‌گیری از تئوری میدان پتانسیل، شبیه به روش‌های گرانی و مغناطیس از مشکلات ابهام در تفسیر متأثر هستند [Kearey et al., 2002].

از آنجا که میدان پتانسیل پیچیده است، مقاومت ویژه ظاهری متأثر از هر ساختار باید با استفاده از معادله لاپلاس و اعمال شرایط مرزی برای یک ساختار خاص و یا انتگرال‌گیری مستقیم محاسبه گردد. در عمل این روش‌ها بسیار پیچیده است. یک روش ساده ابتدایی استفاده از تشابه میدان

الکتریکی با رفتار پرتوهای نور است. لازم به ذکر است که این روش الزاماً در همه موارد درست نیست [Kearey et al., 2002].

## ۲-۷-۱- برداشت و آماده‌سازی داده‌های صحرائی برای تفسیر

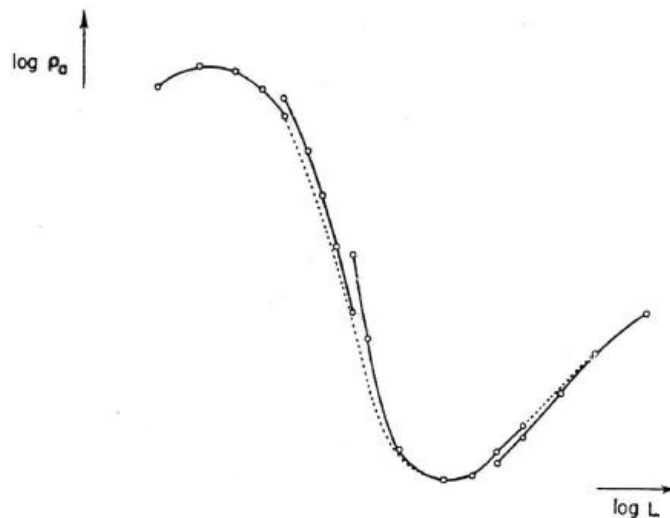
پس از محاسبه مقاومت‌ویژه ظاهری برای هر قرائت، داده‌ها در یک شکل گرافیکی ارائه می‌گردند. در سونداژنی باید فواصل متوالی الکترودی تقریباً برابر با فواصل در مقیاس لگاریتمی باشد. در تفسیر به روش انطباق منحنی، مقیاس باید با مقیاس مورد استفاده در دسته منحنی‌های استاندارد یکسان باشد [Mooney, 1980].

سونداژنی شلومبرژه همیشه باید در شرایطی اجرا گردد که فاصله الکترودهای پتانسیل، کوچکتر از  $L$  (نصف فاصله بین الکترودهای جریان) باشد. راهکار کلی در این رابطه این است که فاصله الکترودهای پتانسیل هرگز نباید بیشتر از  $0.4$  برابر فاصله  $L$  باشد [Mooney, 1980].

فرآیند کار صحرائی عبارت از افزایش فاصله الکترودهای جریان و ثابت گرفتن فاصله الکترودهای پتانسیل است. این فرآیند باعث افت سریع اختلاف پتانسیل بین دو الکترو پتانسیل می‌گردد، که سرانجام باعث افزایش قابلیت اندازه‌گیری دستگاه می‌شود. در این حالت، مقدار جدید برای فاصله الکترودهای پتانسیل، معمولاً ۲ تا ۴ برابر فاصله الکترودی قبلی، باید در نظر گرفته شود و سپس برداشت ادامه یابد. یک یا دو مقدار اخیر  $L$  باید با فاصله الکترودی جدید الکترودهای پتانسیل تکرار شود. برای ادامه برداشت، این فرآیند باید تکرار شود [Mooney, 1980].

تغییر در مقدار  $P_1P_2$  (فاصله الکترودهای پتانسیل از یکدیگر) در طی اجرای عملیات سونداژنی باعث ایجاد مشکل در تفسیر می‌گردد. زیرا موقعی که  $P_1P_2$  تغییر می‌کند، مقاومت‌ویژه ظاهری برای مقادیر یکسان  $L$  اندکی متفاوت بدست می‌آید. اگر زمین کاملاً یکنواخت باشد این نتایج باید یکسان باشد. اما این شرایط بندرت فراهم می‌شود. این اثر در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. در صورتی که زمین مورد مطالعه فاقد ناهمگنی یا تغییرات مقاومت‌ویژه جانبی باشد، در بخش پایین‌رونده (نزولی) منحنی

سونداژنی مقاومت ویژه، مقدار جدید مقاومت ویژه ظاهری بزرگتر از مقدار قبلی می باشد که با  $L$  یکسان و  $P_1P_2$  کوچکتر اندازه گیری شده است. در حالتی که زمین مورد مطالعه فاقد تغییرات جانبی مقاومت ویژه ظاهری باشد، برای بخش بالارونده (صعودی) مقدار مقاومت ویژه ظاهری جدید کوچکتر از مقدار مقاومت ویژه ظاهری قبلی است.



شکل ۸-۲: تأثیر تغییرات فاصله الکترودی بر روی منحنی سونداژنی مقاومت ویژه شلومبرژه

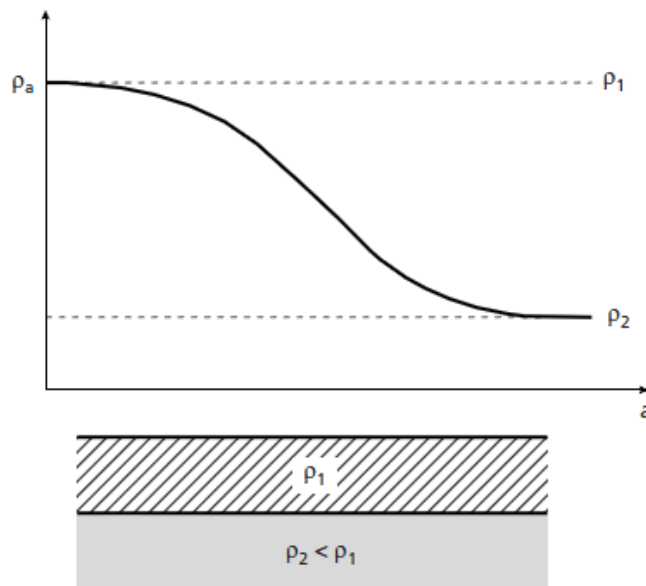
[Mooney, 1980].

برای تفسیر، منحنی قطعه‌ای نشان داده شده در شکل ۸-۲ باید به یک منحنی صاف و هموار تبدیل گردد. این کار با نقطه‌چین بر روی شکل ۸-۲ نشان داده شده است. منحنی هموار از بخش سمت راست هر قطعه منحنی پیروی می‌کند، زیرا نسبت  $L/P_1P_2$  در قسمت سمت راست بیشتر است. باقیمانده خطوط نقطه‌چین در زیر نقاط داده‌های صحرائی در قسمت پایین‌رونده و بالای نقاط داده‌ای برای قسمت بالارونده قرار می‌گیرد. منحنی هموار نهایی متشکل از نقاط ممتد و منحنی صحرائی برای تفسیر آماده است.

## ۲-۷-۲- تفسیر داده‌های سونداژنی

آرایه ونر را بر روی فصل مشترک افقی بین دو لایه با مقاومت ویژه  $\rho_1$  (لایه بالایی) و  $\rho_2$  (لایه تحتانی)

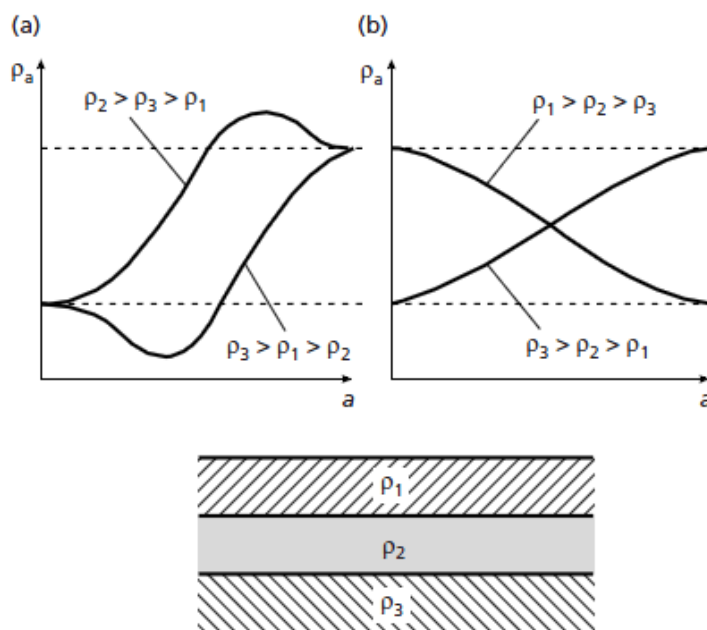
و  $\rho_1 > \rho_2$  در نظر بگیرید (شکل ۲-۹). خطوط جریان با عبور از فصل مشترک دو محیط به سمت مرز منحرف می‌گردند، چون لایه کم مقاومت تحتانی مسیر آسان‌تری برای انتشار جریان فراهم می‌کند. زمانی که فاصله الکترودی کوچک باشد، بخش عمده جریان در لایه فوقانی انتشار می‌یابد، در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری به سمت  $\rho_1$  متمایل می‌شود. با افزایش تدریجی فاصله الکترودی، جریان بیشتر وارد لایه تحتانی می‌شود و مقاومت ویژه ظاهری به سمت  $\rho_2$  میل می‌نماید. در صورتی که  $\rho_2 > \rho_1$ ، چون انتشار جریان در لایه تحتانی سخت‌تر صورت می‌گیرد، مقاومت ویژه ظاهری دیرتر به  $\rho_2$  متمایل می‌گردد [Kearey et al., 2002].



شکل ۲-۹: تغییر مقاومت ویژه ظاهری  $\rho_a$  در مقابل فاصله الکترودی  $a$  بر روی فصل مشترک افقی بین دو محیط با مقاومت ویژه‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$  [Kearey et al., 2002].

اگر سه لایه افقی وجود داشته باشد منحنی مقاومت ویژه ظاهری پیچیده‌تر می‌گردد (شکل ۲-۱۰). اگرچه مقاومت ویژه ظاهری برای فواصل الکترودی کوچک و بزرگ به ترتیب به  $\rho_1$  و  $\rho_3$  میل می‌کند، حضور یک لایه میانی باعث انحراف منحنی مقاومت ویژه ظاهری در فواصل الکترودی متوسط می‌گردد. اگر مقاومت ویژه لایه میانی بیشتر و یا کمتر از مقاومت ویژه لایه‌های فوقانی و تحتانی باشد، منحنی

مقاومت ویژه ظاهری به ترتیب به شکل زنگوله‌ای یا تشتی در می‌آید (شکل ۱۰-۲ - a). و اگر لایه میانی مقاومت ویژه متوسط بین  $\rho_1$  و  $\rho_3$  داشته باشد، منحنی مقاومت ویژه ظاهری به عنوان تابعی از فاصله الکترودی صعودی یا نزولی ایجاد می‌نماید (شکل ۱۰-۲ - b). حضور تعداد لایه‌های بیشتر باعث پیچیدگی بیشتر منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری می‌گردد [Kearey et al., 2002].



شکل ۱۰-۲: تغییرات مقاومت ویژه ظاهری در مقابل فاصله الکترودی  $a$  بر روی سه لایه افقی

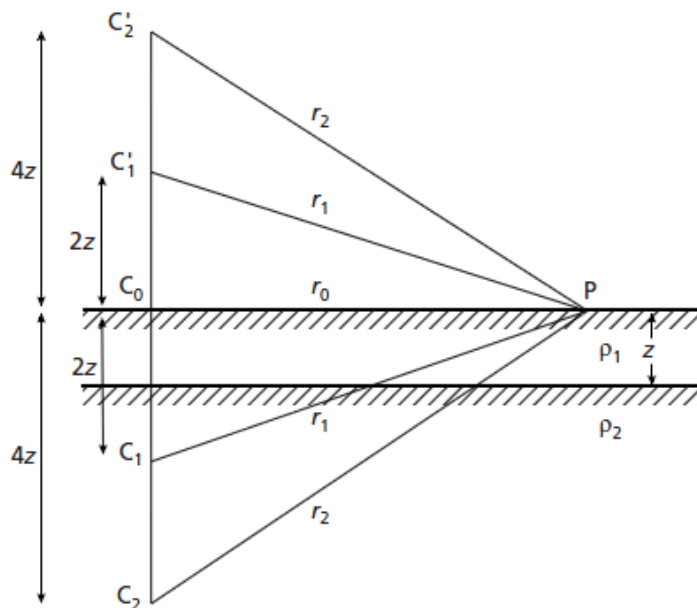
[Kearey et al., 2002]

یک راه حل ساده که در آن مقاومت ویژه ظاهری با فاصله الکترودی تغییر می‌کند و تخمینی از مقاومت ویژه لایه‌های فوقانی و تحتانی فراهم نموده و مقاومت ویژه لایه‌های میانی را نشان می‌دهد؛ این است که به جای محاسبه ضخامت لایه‌ها باید مقاومت ویژه ظاهری ساختارهای لایه‌ای محاسبه شود. این گونه محاسبات اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط هامل<sup>۱</sup> با استفاده از روش محاسبه قیاسی نوری برای بدست آوردن مقاومت ویژه ظاهری یک مدل ساده دو لایه‌ای مورد استفاده قرار گرفت [Kearey

et al., 2002]

<sup>1</sup> Hummel

با توجه به شکل ۲-۱۱، از طریق نقطه  $C_0$  در بالای فصل مشترک دو محیط با مقاومت ویژه‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$  واقع در عمق  $z$ ، جریان  $I$  به داخل زمین تزریق می‌گردد. دو فصل مشترک موازی بین محیط ۱ و ۲ و بین محیط ۱ و هوا، یک سری نامحدود از تصاویر منبع تزریق جریان در بالا و زیر سطح ایجاد می‌کند. بنابراین  $C_1$  تصویر  $C_0$  نسبت به فصل مشترک دو محیط ۱ و ۲ در عمق  $2z$ ،  $C_2$  تصویر  $C_1$  نسبت به فصل مشترک دو محیط ۱ و ۲ در عمق  $4z$  و غیره می‌باشد. هر تصویر نسبت به فصل مشترک دو محیط ۱ و ۲، بوسیله ضریب بازتاب شدت آن کاهش می‌یابد. (در فصل مشترک هوا و محیط ۱ چون ضریب بازتاب آن برابر واحد است هیچ کاهش اتفاق نمی‌افتد). روند نزولی کاهش شدت تصویر باعث می‌شود که تعداد اندکی از تصاویر در بدست آوردن پتانسیل در نقطه  $P$  مورد استفاده قرار گیرند. این موضوع به طور خلاصه در جدول ۲-۳ آمده است.



شکل ۲-۱۱: پارامترهای مورد استفاده در روش تصویرهای الکتریکی جهت محاسبه پتانسیل ناشی از

یک الکتروود جریان در بالای یک فصل مشترک افقی [Kearey et al., 2002; Telford, 1990].



جدول ۲-۳: توزیع و شدت میدان‌های الکتریکی در اثر یک فصل مشترک افقی [Kearey et al., 2002].

Source	Intensity	Depth/height	Distance
$C_0$	$I$	0	$r_0$
$C_1$	$kI$	$2z$	$r_1$
$C'_1$	$kI$	$2z$	$r_1$
$C_2$	$k^2I$	$4z$	$r_2$
$C'_2$	$k^2I$	$4z$	$r_2$
etc			

پتانسیل  $V_P$  در نقطه P برابر مجموع اثر تمام تصویرهاست؛ بنابراین رابطه (۱۸-۲) بدست می‌آید [Kearey et al., 2002; Telford, 1990].

$$V_P = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left( \frac{1}{r_0} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{r_n} \right) \quad (18-2)$$

که  $r_n$  از رابطه (۱۹-۲) بدست می‌آید:

$$r_n = \sqrt{r_0^2 + (2nz)^2} \quad (19-2)$$

در رابطه (۱۸-۲) قسمت اول داخل پرانتز مربوط به پتانسیل نرمال در حالی است، که زیر سطح همگن باشد؛ و قسمت دوم پتانسیل آشفته است که در اثر فصل مشترک ایجاد شده است.

برای آرایه ونر با فاصله الکترودی  $a$ :

مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده با آرایه ونر از رابطه (۲۰-۲) بدست می‌آید [Kearey et al.,

[2002; Telford, 1990].

$$\rho_a = \rho_1(1 + 4F_w) \quad (20-2)$$

که  $F_w$  از رابطه (21-2) بدست می آید.

$$F_w = \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 4n^2 z^2 / a^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + 4n^2 z^2 / a^2}} \right) \quad (21-2)$$

در روش سونداژزنی، استفاده از آرایه شلومبرژه مرسوم تر است (جدول 2-2). مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده بوسیله این آرایه، بر روی یک زمین دولایه از رابطه (22-2) به طریق مشابه با آرایه ونر استفاده می شود [Telford, 1990].

مقاومت ویژه ظاهری با استفاده از رابطه (22-2) محاسبه می گردد.

$$\rho_a = \rho_1(1 + F_s) \quad (22-2)$$

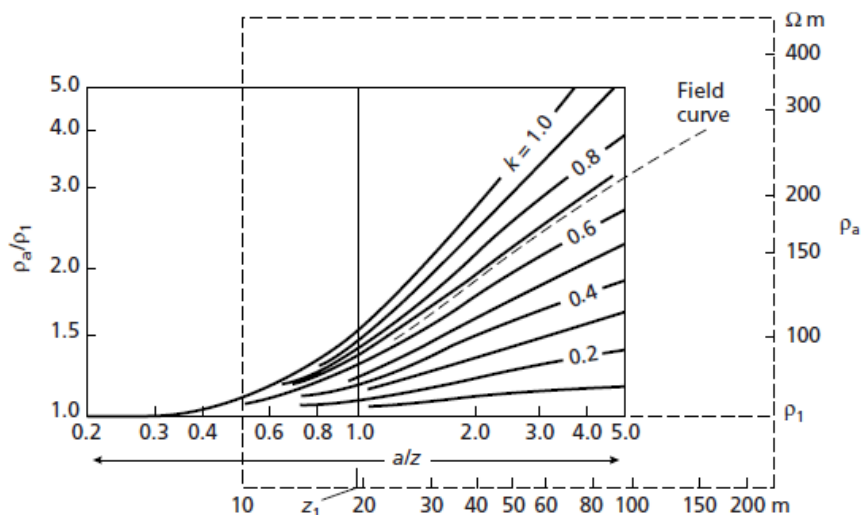
$F_s$  از رابطه (23-2) بدست می آید.

$$F_s = \left( \frac{a + b/2}{b/2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{(1 + (2nz)^2 / (a - b/2)^2)}} - \left( \frac{a - b/2}{b/2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{(1 + (2nz)^2 / (a + b/2)^2)}} \quad (23-2)$$

در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری می تواند برای فاصله های مختلف الکترودی محاسبه شود. این فرمول ها به طریق مشابه برای ساختارهای چند لایه ای نیز می تواند بسط داده شود، اگرچه انجام محاسبات با استفاده از فرمول های برگشتی<sup>1</sup> و فیلترهایی که بدین منظور طراحی گردیده اند، آسان تر است. داده-

<sup>1</sup> Recurrence formulae

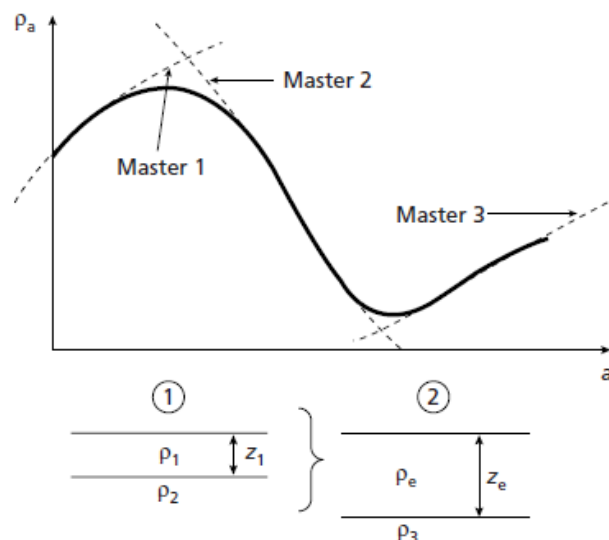
های صحرایی می‌تواند با منحنی‌های استاندارد که بیانگر تأثیرات محاسبه‌شده مدل لایه‌ای با استفاده از این تکنیک‌ها می‌باشند، که به انطباق منحنی‌ها مشهور است، مقایسه گردد. شکل ۲-۱۲، روش تفسیر با استفاده از یک دسته منحنی استاندارد برای سونداژزنی الکتریکی با آرایه ونر بر روی دو لایه افقی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲: تفسیر مقاومت ویژه ظاهری دو لایه بوسیله مقایسه منحنی استاندارد. مقاومت ویژه لایه

فوقانی  $\rho_1$ ، ۶۸ اهم‌متر و ضخامت آن  $z_1$ ، ۱۹/۵ متر است [Kearey et al., 2002].

تفسیر منحنی‌های مقاومت ویژه برای ساختارهای چند لایه‌ای با انجام انطباق جزئی منحنی‌ها امکان‌پذیر است [Bhattacharya and Partha, 1968]. این روش از طریق انطباق بخش‌های متوالی منحنی صحرایی با دسته منحنی‌های دو لایه‌ای انجام می‌شود. پس از آنکه هر قسمت برازش گردید، مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها تفسیر شده با استفاده از منحنی‌های کمکی به یک لایه هم‌ارز با ضخامت  $z_e$  و مقاومت ویژه  $\rho_e$  نسبت داده می‌شود. این لایه هم‌ارز بعنوان لایه فوقانی در تفسیر بخش بعدی منحنی صحرایی با استفاده از سایر منحنی‌های دو لایه‌ای در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳: روش انطباق منحنی جزئی. منحنی دو لایه‌ای به دو بخش اولیه منحنی صحرائی برآزش گردیده و مقاومت‌ویژه‌های  $\rho_1$  و  $\rho_2$  و ضخامت  $z_1$  لایه فوقانی تعیین گردیده است.  $\rho_1$ ،  $\rho_2$  و  $z_1$  برای تشکیل یک لایه هم‌ارز با مقاومت‌ویژه  $\rho_e$  و ضخامت  $z_e$ ، که در تفسیر قسمت بعدی منحنی صحرائی بوسیله منحنی‌های دو لایه‌ای، نقش لایه فوقانی دارد؛ با هم ترکیب می‌شوند [Kearey et al., 2002].

مشکل تفسیر داده‌های سونداژنی الکتریکی عدم یکتایی ناشی از پدیده هم‌ارزی<sup>۱</sup> و اختفاء<sup>۲</sup> است. مشکل هم‌ارزی این است که مدل‌های لایه‌ای مختلف می‌توانند منحنی مقاومت‌ویژه زنگوله‌ای یا تشتی شکل (شکل ۲-۱۰-۲) یکسان را ایجاد کنند [Kearey et al., 2002]. در پدیده هم‌ارزی تفکیک دو لایه با مقاومت‌ویژه بالا با  $z$  و  $\rho$  متفاوت که مقاومت عرضی ( $T = Z\rho$ ) آنها یکسان باشد، یا دو لایه با رسانندگی بالا که رسانندگی طولی ( $S = z/\rho$ ) در آنها یکسان باشد، غیرممکن است [Kearey et al., 2002; Reynolds, 1997; Telford, 1990]. در پدیده اختفاء اگر لایه زمین‌شناسی در مقایسه با لایه‌های بالایی و زیرین خود خیلی نازک باشد، اثر آن روی منحنی سونداژنی بی‌اهمیت است مگر اینکه مقاومت‌ویژه خیلی زیاد یا خیلی کم باشد [Kearey et al., 2002; Reynolds, 1997; Telford, 1990].

<sup>1</sup> equivalence  
<sup>2</sup> suppression

[1990]. این مشکل در منحنی‌های مقاومت‌ویژه صعودی یا نزولی ظاهر می‌گردد (شکل ۲-۱۰- b) [گری و همکاران، ۲۰۰۲]. در این موارد افزودن یک لایه میانی باعث یک جابجایی اندک افقی در منحنی، بدون تغییر شکل کلی آن می‌گردد. در تفسیر داده‌های صحرایی نویزی، این لایه‌های میانی ممکن است آشکار نگردد [Kearey et al., 2002].

فرض اساسی در تفسیر داده‌های سونداژزنی ژئوالکتریک این است که لایه‌ها افقی و همسانگرد باشند. انحراف از این فرض‌ها باعث ایجاد خطا در تفسیر نهایی می‌گردد. بزرگترین محدودیت روش سونداژزنی آن است که تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه را در نظر نمی‌گیرد. به دلیل این فرض نادرست، ممکن است خطاهای بزرگی در پارامترهای مدل (مقاومت‌ویژه و ضخامت لایه‌ها) وارد شود [Loke, 2004].

فرض همسانگردی برای لایه‌های منفرد می‌تواند نادرست باشد. به‌عنوان مثال در سنگ‌های رسوبی نظیر رس و شیل، معمولاً مقاومت‌ویژه در جهت عمود بر لایه‌بندی بیشتر از حالت موازی با لایه‌بندی است. ناهمسانگردی در لایه‌های زیرسطحی، در طی سونداژزنی الکتریکی نمی‌تواند ظاهر گردد و ضخامت لایه را بیشتر نشان می‌دهد. سایر اثرات ناهمسانگردی وابسته به عمق هستند، مانند کاهش درجه هوازگی با عمق، و افزایش تراکم رسوبات و میزان شوری سیالات موجود در حفرات با افزایش عمق. حضور یک مرز قائم، مانند گسل، باعث ایجاد ناهمگنی جانبی می‌گردد، که می‌تواند تفسیر سونداژهای الکتریکی در اطراف آن را بشدت تحت تأثیر قرار دهد [Kearey et al., 2002].

از آنجا که خطوط جریان از روند سطح زمین تبعیت می‌کنند، توپوگرافی می‌تواند برداشت‌های الکتریکی را تحت تأثیر قرار دهد. سطوح هم‌پتانسیل نیز منحرف شده و آنومالی کاذب ایجاد می‌کند [Kearey et al., 2002].

## ۲-۸-۸-۱- روش پروفیل زنی

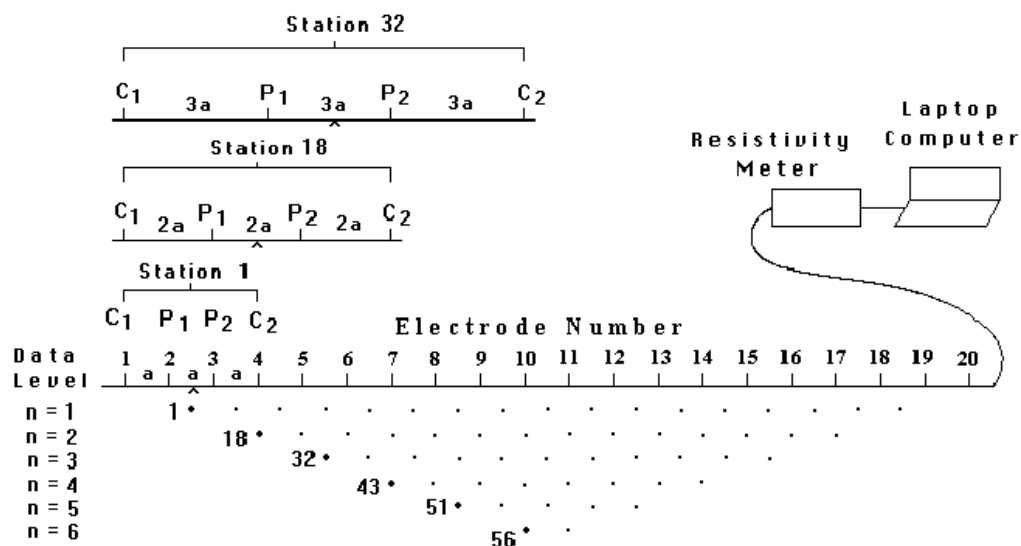
در این روش فرض می‌شود که مقاومت ویژه در راستای عمود بر خط برداشت، تغییر نمی‌کند. در بسیاری موارد، بویژه برای برداشت روی ساختارهای زمین‌شناسی طویل، این فرض درست است. روش‌های دوبعدی از لحاظ اقتصادی عملی‌ترین روش برای بدست آوردن نتایج دقیق و نسبتاً کم‌هزینه می‌باشند. معمولاً در برداشت یک‌بعدی مقاومت ویژه حدود ۱۰ تا ۲۰ قرائت انجام می‌شود، در حالیکه برداشت دوبعدی شامل ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اندازه‌گیری است. در مقابل، ممکن است در یک برداشت سه‌بعدی، چندین هزار اندازه‌گیری انجام شود. هزینه یک برداشت دو بعدی می‌تواند چندین برابر هزینه سونداژ زنی باشد، و احتمالاً با هزینه برداشت روش لرزه‌نگاری انکساری قابل مقایسه باشد. در بسیاری از شرایط زمین‌شناسی، روش مقاومت ویژه دو بعدی می‌تواند نتایج مفیدی را فراهم نماید که تکمیل‌کننده اطلاعات بدست آمده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی است [Loke, 2004].

## ۲-۸-۱-۱- روش برداشت صحرائی

برداشت‌هایی دو بعدی معمولاً با تعداد زیادی الکتروود، ۲۵ الکتروود یا بیشتر، متصل به یک کابل چند هسته‌ای انجام می‌گیرد [Loke, 2004]. در این روش الکتروودهای چیده شده توسط کابل مادر به واحد کنترل وصل می‌شوند و کاربر آرایش مورد نظر را از طریق واحد کنترل انتخاب می‌کند و سپس اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود. شکل ۲-۱۴ روش پروفیل زنی با استفاده از آرایه ونر با به‌کارگیری تعداد ۲۰ الکتروود را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، در مجموع ۶ پروفیل زنی با ۶ فاصله الکتروودی مختلف  $na$  (برای  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) انجام شده است. در اولین پروفیل زنی فاصله الکتروودی برابر  $a$  در نظر گرفته شده است و در اولین ایستگاه از الکتروودهای شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ استفاده شده است. در ایستگاه بعدی از الکتروودهای ۲، ۳، ۴ و ۵ استفاده شده، تا اینکه بعد از ۱۷ ایستگاه، اندازه‌گیری به انتهای خط پروفیل یعنی الکتروودهای ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ برای فاصله الکتروودی  $a$  رسیده است. برای دومین پروفیل زنی به ابتدای خط پروفیل بازگشت می‌شود و از الکتروودهای شماره

۱، ۳، ۵ و ۷ به ترتیب برای الکترودهای  $C_1$ ،  $P_1$ ،  $P_2$  و  $C_2$  با فاصله الکترودی  $2a$  استفاده می‌گردد و الکترودها ایستگاه به ایستگاه تا انتهای خط پروفیل جابجا می‌شوند. سپس به همین طریق پروفیل-زنی‌های بعدی برای فواصل الکترودی  $3a$ ،  $4a$ ،  $5a$  و ... تکرار می‌شوند [پیروز، ۱۳۹۰].

با افزایش فاصله الکترودی، تعداد اندازه‌گیری‌ها کاهش می‌یابد. تعداد اندازه‌گیری‌هایی که برای هر فاصله الکترودی، برای تعدادی الکتروود در راستای خط برداشت، صورت می‌گیرد؛ به نوع آرایه الکتروودی مورد استفاده بستگی دارد [Loke, 2004].



شکل ۲-۱۴: شیوه آرایش الکترودها برای برداشت دوبعدی مقاومت‌ویژه و توالی اندازه‌گیری‌ها برای

ایجاد شبه‌مقطع [Loke, 2004].

برداشت با آرایه‌های دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی اندکی متفاوت است. به‌عنوان مثال برای آرایه دوقطبی - دوقطبی، معمولاً اندازه‌گیری با فاصله الکترودی  $a$  بین الکترودهای جریان ( و همچنین فاصله بین الکترودهای پتانسیل) شروع می‌شود. سری اول قرائت‌ها با فاکتور  $n=1$  انجام می‌گیرد و با ثابت گرفتن فاصله الکترودی  $a$ ، فاکتور  $n$ ، به  $2$  افزایش می‌یابد. برای ادامه قرائت‌ها  $n$  تا

حدود ۶ افزایش می‌یابد. برای افزایش عمق کاوش، فاصله بین دو قطبی‌ها به  $2a$  افزایش یافته و قرائت‌های بعدی با مقادیر مختلف  $n$  انجام می‌گیرد [Loke, 2004].

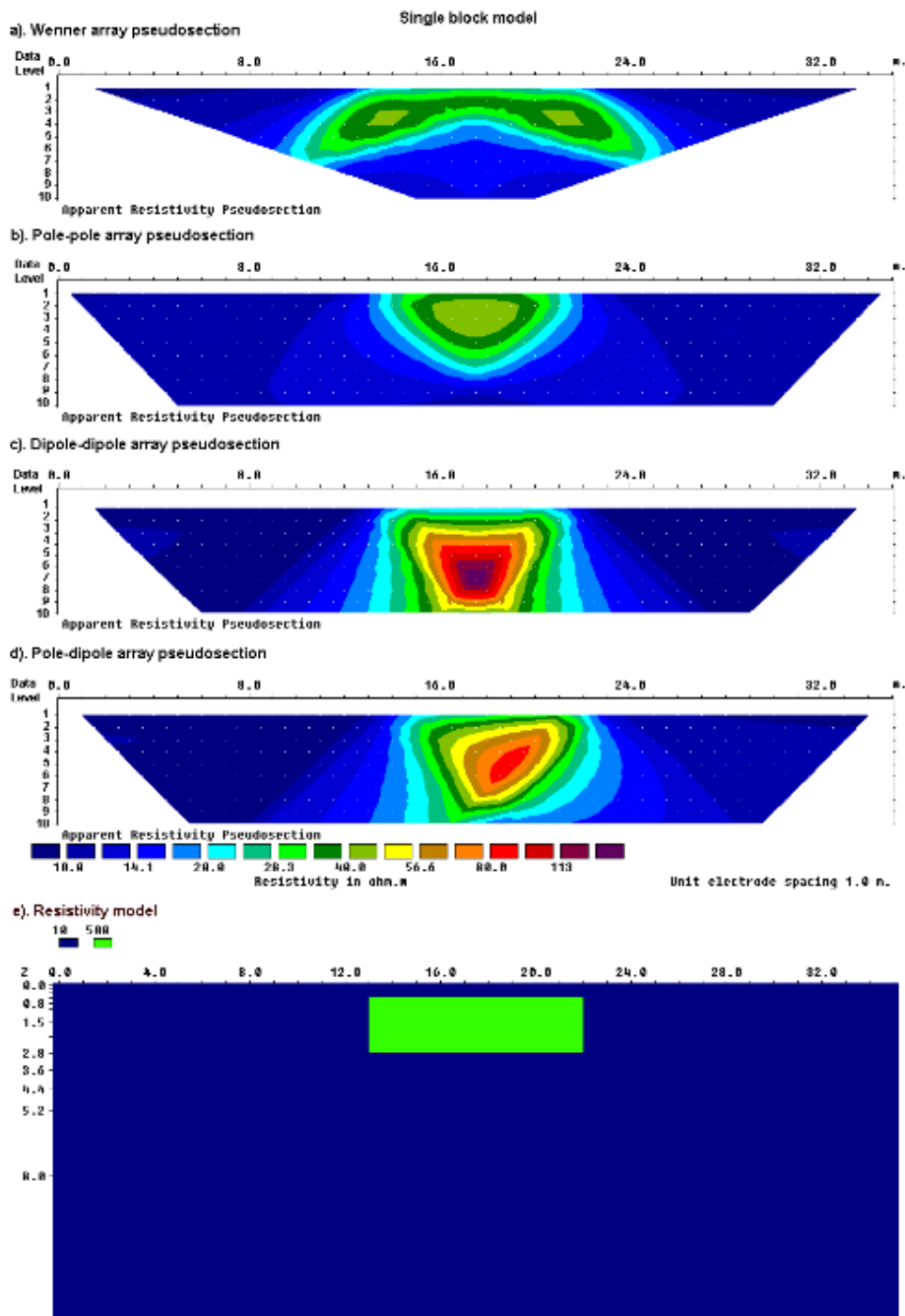
## ۲-۸-۲- رسم شبه مقطع

برای به تصویر کشیدن برداشت‌های دوبعدی، روش رسم کانتورهای شبه‌مقطع متداول است. در این روش موقعیت افقی نقطه برداشت، وسط آرایه الکتروودی در نظر گرفته می‌شود و موقعیت قائم آن متناسب با جدایش بین الکترودها در نظر گرفته می‌شود. در برداشت‌های IP با استفاده از آرایه دو قطبی-دو قطبی، یک روش متداول آن است که نقطه برداشت را در محل تقاطع دو خطی در نظر گرفت که از نقطه وسط دو قطبی‌های  $C_1 - C_2$  (الکترودهای جریان) و  $P_1 - P_2$  (الکترودهای پتانسیل) با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق خارج می‌شوند. باید توجه داشت که این صرفاً یک روش ترسیمی قراردادی است و بیانگر این نیست که عمق کاوش با استفاده از نقطه تقاطع دو خط با زاویه ۴۵ درجه بدست می‌آید [Loke, 2004].

روش دیگر رسم داده‌ها، قراردادن موقعیت قائم نقطه برداشت در عمق میانه کاوش یا شبه‌عمق آرایه به کار رفته است. این مقادیر شبه‌عمق، بر مبنای مقادیر حساسیت، برای یک نیم‌فضای همگن است. شبه مقطع بدست آمده از کانتور نمودن مقادیر مقاومت ویژه ظاهری، ابزار مناسبی برای نشان دادن داده‌ها است.

شبه مقطع تصویری بسیار تقریبی از توزیع واقعی مقاومت ویژه زیرسطحی فراهم می‌کند. شبه مقطع تصویری آشفته از زیر سطح زمین را ارائه می‌نماید (شکل ۲-۱۵)، زیرا شکل کانتورها، علاوه بر مقاومت ویژه واقعی زمین، به نوع آرایش به کار رفته نیز بستگی دارد [Loke, 2004].





شکل ۲-۱۵: شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده از برداشت‌های دوبعدی، با استفاده از آرایه-

های الکترودی مختلف بر روی یک منشور با سطح مقطع مستطیلی [Loke, 2004].

شبه‌مقطع، ابزار مفیدی برای نمایش تصویری مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و یک راهنمای اولیه برای انجام تفسیرهای کمی است. استفاده از این شبه‌مقاطع به‌عنوان مدل نهایی

مقاومت ویژه واقعی زیر سطح زمین اشتباه است. همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، آرایه‌های مختلف برای به تصویر کشیدن یک ناحیه همسان، کانتورهای مقاومت ویژه کاملاً متفاوتی را ارائه می‌نمایند. همچنین شکل ۲-۱۵ ایده‌ای در مورد پوشش افقی آرایه‌های مختلف به ما می‌دهد. آرایه قطبی-قطبی، بیشترین پوشش افقی را ارائه می‌دهد، درحالی‌که پوشش افقی در آرایه وئر، با افزایش فاصله الکتروودی به مراتب سریعتر کاهش می‌یابد.

یکی از مزیت‌های استفاده از شبه مقطع آن است که می‌توان قرائت‌های مقاومت ویژه ظاهری بد را در آن شناسایی و حذف کرد. این قرائت‌های بد معمولاً به صورت غیرمعمولی مقادیر زیاد یا کم را نشان می‌دهند و موجب بروز خطا در مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه می‌شوند [Loke, 2004].

## ۲-۹- روش‌های مدل‌سازی عددی

اولین وظیفه یک ژئوفیزیکست درک داده‌های جمع‌آوری شده در صحرا و تفسیر آنها به صورت یک مدل زمین‌شناسی قابل قبول در حد توان روش‌های مختلف میدان پتانسیل برای انجام این وظیفه است؛ ژئوفیزیکست باید مدل زمین را تشکیل داده و قادر به تبیین طبیعت پاسخ میدان ژئوفیزیکی باشد. ژئوفیزیکست‌ها برای درک این موضوع مسائل پیشرو را برای شاخه‌های مختلف ژئوفیزیک با استفاده از میدان پتانسیل حل می‌کنند. بنابراین تئوری پتانسیل، مجهز به ابزارهای مختلف ریاضی، مبنای حل مسائل پیشرو را تشکیل می‌دهد. تئوری پتانسیل برای درک رفتار داده‌های ژئوفیزیکی از اهمیت شایانی برخوردار است [Roy, 2008].

به خاطر پیشرفت خیلی سریع علوم کامپیوتر، تکنولوژی نرم‌افزاری و روش‌های عددی در مدل‌سازی ریاضی، بهره‌گیری از تئوری وارون فراهم گردیده است. توسعه چشم‌گیر علوم و تکنولوژی در این زمینه‌ها در طی سه دهه گذشته، قدرت درک ژئوفیزیکی‌ها را از داخل زمین، بهبود بخشیده است [Roy, 2008].

## ۲-۹-۱- مدل سازی پیشرو

برخی از مسائل دوبعدی با هندسه ساده به صورت تحلیلی قابل حل هستند. از آنجا که زیر سطح زمین هندسه پیچیده‌ای دارد، حل یک مسئله واقعی وارون، نیاز به حل مسائل پیشرو برای ساختارهای زیرسطحی مشابه دارد. بنابراین روش‌های عددی با تمام ابزارهای شناخته شده از قبیل روش‌های تفاضل محدود (FDM)<sup>۱</sup>، اجزاء محدود (FEM)<sup>۲</sup>، معادلات انتگرال (IEM)<sup>۳</sup>، انتگرال حجمی<sup>۴</sup>، انتگرال مرزی<sup>۵</sup>، هیبرید<sup>۶</sup> و صفحات نازک<sup>۷</sup> وارد مباحث تئوری پتانسیل گردیده است [Roy, 2008].

روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود بر مبنای معادلات دیفرانسیلی هستند. بسته به موضوع مورد بررسی روابط اولیه انتخاب می‌گردد. بعنوان مثال برای مسائل ژئوالکتریک و الکترومغناطیس روابط پواسون و موج الکترومغناطیسی هلمهولتز نقطه شروع محسوب می‌گردند. هر شاخه علمی یا مهندسی که این ابزار ریاضی در آنها کاربرد دارد از یک رابطه اولیه خاص خود استفاده می‌کنند. در هر یک از این سه روش مهم عددی، دامنه حل مسئله گسسته‌سازی شده و در نتیجه حل مسئله به کارآیی ماتریس حل‌کننده بستگی دارد. در تفاضل محدود و اجزاء محدود برای بدست آوردن مقادیر مرزی، تمام دامنه مسئله در نظر گرفته می‌شود [Roy, 2008].

مدل سازی ریاضی به خاطر اینکه با درک طبیعت داده‌های ژئوفیزیکی ارتباط مستقیم دارد، یکی از مهمترین مباحث ژئوفیزیک است که قادر به ارائه تصویری از داخل زمین است. مراحل مدل سازی ریاضی با استفاده از روش‌های عددی برای مسائل دوبعدی به صورت زیر است [Roy, 2008]:

(۱) تعیین رابطه اساسی ریاضی حاکم بر مسئله

---

<sup>1</sup> Finite difference Method  
<sup>2</sup> Finite element Method  
<sup>3</sup> Integral equation Method  
<sup>4</sup> Volume integral Method  
<sup>5</sup> Boundary integral Method  
<sup>6</sup> Hybrids Method  
<sup>7</sup> Thin sheet Method

۲) استفاده از تبدیل فوریه کسینوسی معکوس به منظور تبدیل چشمه سه‌بعدی جریان و در

نتیجه پتانسیل دوبعدی به دو بعدی (یعنی تبدیل  $\varphi(x, y, z)$  به  $\varphi(x, \lambda, z)$ ).

۳) گسسته‌سازی ناحیه و فرمول‌بندی ریاضی (در FDM، تقریب‌های تفاضلی و در FEM، روش-

های حساب تغییرات)

۴) اعمال شرایط مرزی

۵) محاسبه پاسخ در مرز شبیه‌سازی شده زمین- هوا یا درون زمین با استفاده از یک ماتریس

حل کننده  $AX = B$ .

۶) حل ماتریس فوق با استفاده از سیستم‌های معادلات خطی مثل روش حذفی گائوس و تجزیه

چولسکی.

## ۲-۹-۲- مدل‌سازی وارون

در مدل‌سازی وارون ژئوفیزیکی، به دنبال مدلی هستیم که پاسخی مشابه با مقادیر اندازه‌گیری شده را

تولید نماید. مدل نمایش ایده‌آل مقطعی از زمین به صورت ریاضی است. هر مدل دارای پارامترهایی

است که هر یک از آنها یک کمیت فیزیکی و در مدل‌سازی دنبال تخمین این کمیت‌ها با استفاده از

داده‌های برداشت شده، هستیم [Loke, 2004].

در تمام روش‌های وارون‌سازی مدلی برای زیر سطح تهیه می‌شود که پاسخ مدل با داده‌های اندازه-

گیری شده موافق باشد. در روش‌های مورد استفاده در نرم‌افزار RES2DINV، پارامترهای مدل

مقاومت‌ویژه سلول‌های مدل و داده اندازه‌گیری شده، مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری است. ارتباط ریاضی

بین پارامترهای مدل و پاسخ دریافتی از مدل، برای مدل‌های مقاومت‌ویژه، با استفاده از روش‌های

تفاضل محدود و اجزاء محدود ایجاد می‌شود [Loke, 2004].

در تمام روش‌های بهینه‌سازی، یک مدل اولیه با رفتار قابل تکرار تعریف می‌شود، سپس اختلاف بین

پاسخ مدل و داده‌های مشاهده شده کاهش می‌یابد. داده‌های مشاهده شده را می‌توان به صورت یک

بردار ستونی (رابطه (۲۴-۲)) نوشت.

$$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (24-2)$$

که  $m$  تعداد اندازه‌گیری‌هاست. می‌توان پاسخ مدل ( $f$ ) را به صورت رابطه (۲۵-۲) نوشت.

$$f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (25-2)$$

در مسائل مقاومت‌ویژه، استفاده از لگاریتم مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری بعنوان داده مشاهده‌ای و پاسخ مدل، و لگاریتم مقادیر مدل بعنوان پارامترهای مدل امری رایج می‌باشد. پارامترهای مدل می‌تواند به صورت بردار رابطه (۲۶-۲) ارائه شود.

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (26-2)$$

که  $n$  تعداد پارامترهای مدل است. اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و پاسخ مدل با بردار اختلاف  $g$  نشان داده می‌شود (رابطه (۲۷-۲)).

$$g = y - f \quad (27-2)$$

در روش بهینه سازی کمترین مربعات، مدل اولیه به گونه‌ای تعریف می‌شود که مجموع مربعات خطای  $E$ ، اختلاف بین پاسخ مدل و مقادیر داده‌های مشاهده‌ای به حداقل برسد (رابطه (۲۸-۲)) [Loke, 2004].

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (28-2)$$

برای کاهش مقدار خطای رابطه (۲۸-۲)، رابطه گاوس-نیوتن (رابطه (۲۹-۲)) برای تعیین میزان تغییرات مورد نیاز در پارامترهای مدل استفاده می‌شود.

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (29-2)$$

که  $\Delta q$  بردار تغییرات پارامترهای مدل، و  $J$  ماتریس ژاکوبین ( $m$  در  $n$ ) مشتقات جزئی است. درایه‌های ماتریس ژاکوبین از رابطه (۳۰-۲) بدست می‌آید، که تغییرات پاسخ نام مدل به خاطر تغییر در

پارامتر  $J$  /ام مدل است [Loke, 2004].

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (30-2)$$

پس از محاسبه بردار تغییرات پارامتر، مدل جدید با رابطه (۳۱-۲) بدست می‌آید.

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (31-2)$$

در عمل معادله کمترین مربعات ساده (رابطه (۲۹-۲))، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی موارد ممکن است حاصل ماتریس  $J^T J$ ، منفرد (تکین) باشد، پس در این صورت معادله کمترین مربعات، پاسخی برای  $\Delta q$  ارائه نمی‌کند. مشکل رایج دیگر این روش این است که حاصل ماتریس  $J^T J$ ، تقریباً تکین باشد، این در حالتی می‌تواند رخ دهد که مدل اولیه ضعیفی که خیلی با مدل بهینه متفاوت باشد، مورد استفاده قرار گیرد. بردار تغییرات محاسبه شده با استفاده از رابطه (۲۹-۲) می‌تواند دارای مؤلفه‌های بزرگی شده که ممکن است مدل جدید محاسبه شده با رابطه (۳۱-۲) مقادیر غیرواقعی به خود بگیرد. معروفترین روش برای پرهیز از این مشکل، استفاده از روش بهبودیافته مارکوارت-لونبرگ برای معادله گاوس-نیوتن است که با رابطه (۳۲-۲) بیان می‌شود [Loke, 2004].

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad (32-2)$$

که  $I$ ، ماتریس همانی است.  $\lambda$  ضریب میرایی یا مارکوارت است و این روش به روش رگرسیون ریج مشهور است. ضریب میرایی محدوده تغییراتی را که  $\Delta q$  می‌تواند داشته باشد، به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد. روش گاوس-نیوتن در معادله (۲۹-۲) تنها جمع مربع‌های بردار اختلاف را مینیمم می‌کند، در حالی که در روش بهبودیافته مارکوارت-لونبرگ، ترکیبی از بزرگی بردار اختلاف و بردار تغییر پارامتر با هم مینیمم می‌شوند. این روش در وارون‌سازی داده‌های سوندازنی، برای مدل‌های با تعداد لایه‌های محدود قابل استفاده است. زمانی که تعداد پارامترهای مدل زیاد باشند، مانند مدل‌های وارون دوبعدی و سه‌بعدی که شامل تعداد سلول‌های زیادی است، مدل حاصل از این روش دارای گسترش مقاومت‌ویژه نامنظم و نواحی با مقاومت‌ویژه کاذب خیلی بزرگ یا خیلی کوچک

خواهد بود [Constable, 1987]. جهت رفع این مشکل، معادله کمترین مربعات گاوس- نیوتن برای به حداقل رساندن تغییرات فضایی پارامترهای مدل، بیشتر تعدیل یافته است (یعنی مقادیر مقاومت ویژه مدل با یک رفتار تدریجی و هموار تغییر می کند) این هموارسازی، روش های کمترین مربعات را به شکل رابطه (۳۳-۲) در آورده است.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (33-2)$$

$$F = \alpha_x C_X^T C_X + \alpha_y C_Y^T C_Y + \alpha_z C_Z^T C_Z \quad (34-2)$$

که در این رابطه  $C_X$ ،  $C_Y$  و  $C_Z$  ماتریس های هموار کننده در جهت های  $x$ ،  $y$  و  $z$  و  $\alpha_x$ ،  $\alpha_y$  و  $\alpha_z$  اوزان مربوط به فیلترهای هموار کننده در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  می باشند [Loke, 2004].

معادله (۳۳-۲)، مربع تغییرات فضایی یا ناهمواری<sup>۱</sup> مقادیر مقاومت ویژه مدل را نیز به حداقل می رساند. این روش در واقع یک روش بهینه سازی هموار مقید است که در آن مدلی با تغییرات هموار مقاومت- ویژه بدست می آید. این روش تنها هنگامی قابل استفاده است که مقاومت ویژه حقیقی زمین نیز به شکل هموار و تدریجی تغییر کند.

---

<sup>1</sup> Roughness

### ۳- فصل سوم

نتایج برداشت، تفسیر و مدل‌سازی در دره کال قُرنو



### ۱-۳- موقعیت جغرافیایی و وضعیت آب و هوایی منطقه دره کال قُرنو

منطقه مورد مطالعه در موقعیت جغرافیایی نزدیک به شش کیلومتری غرب تا شمال غربی شهر شاهرود واقع شده است. برای ورود به منطقه لازم است پس از طی بلوار آیت الله طاهری (شهرک البرز) به سمت شمال غرب حرکت نموده و با عبور از کنار یک منبع زمینی ذخیره آب که متعلق به شرکت آب و فاضلاب شهری شاهرود است؛ مسیری چهار کیلومتری را تا رسیدن به رشته کوه‌های تپال ادامه داد. در این مسیر چهار چاه آب حفر گردیده است؛ که چاه نخست در مالکیت شرکت تهیه و توزیع مواد معدنی، چاه دوم متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود و دو چاه آخر در مالکیت شرکت آب و فاضلاب شهری شاهرود است. برداشت‌های ژئوفیزیکی مطالعه حاضر در بستر رودخانه و با فاصله تقریبی ۷۰۰ متر از چاه چهارم (چاه شماره دو شرکت آب و فاضلاب شهری شاهرود) آغاز شده و در طول این رودخانه تا رسیدن به انتهای دره ادامه یافته است (شکل ۱-۳).

### ۲-۳- شرایط اقلیمی منطقه برداشت

آب و هوای منطقه برداشت، در زمستان نسبتاً سرد و خشک و در تابستان معتدل تا گرم است. میزان بارندگی سالیانه در خلال سال‌های اخیر به طور متوسط بین  $۱۸۳/۳ - ۷۲/۸$  میلی‌متر بوده است؛ که در برخی موارد افزایش قابل توجهی نیز دارد. نزولات جوی رشته‌کوه‌های البرز در شمال منطقه برداشت منبع اصلی تغذیه رودها و قنوات این منطقه است. در این منطقه رود دائمی جریان نداشته و آب مورد دسترس در بیشتر اوقات سال متکی به آب چند چاه عمیق حفر شده در منطقه است. با وجود این در فصل‌های زمستان و بهار، گاهاً جویبارهای فصلی در منطقه جاری می‌شود [اوزیری و همکاران، ۲۰۰۱].

پوشش گیاهی این منطقه، اندک و پراکنده بوده و بیشتر به صورت بوته (زرشک) و گیاهان وحشی مقاوم در مقابل خشکی و گرماست.



شکل ۳-۱: موقعیت قرارگیری محدوده مورد مطالعه و راه دسترسی به آن [Google earth, 2011].

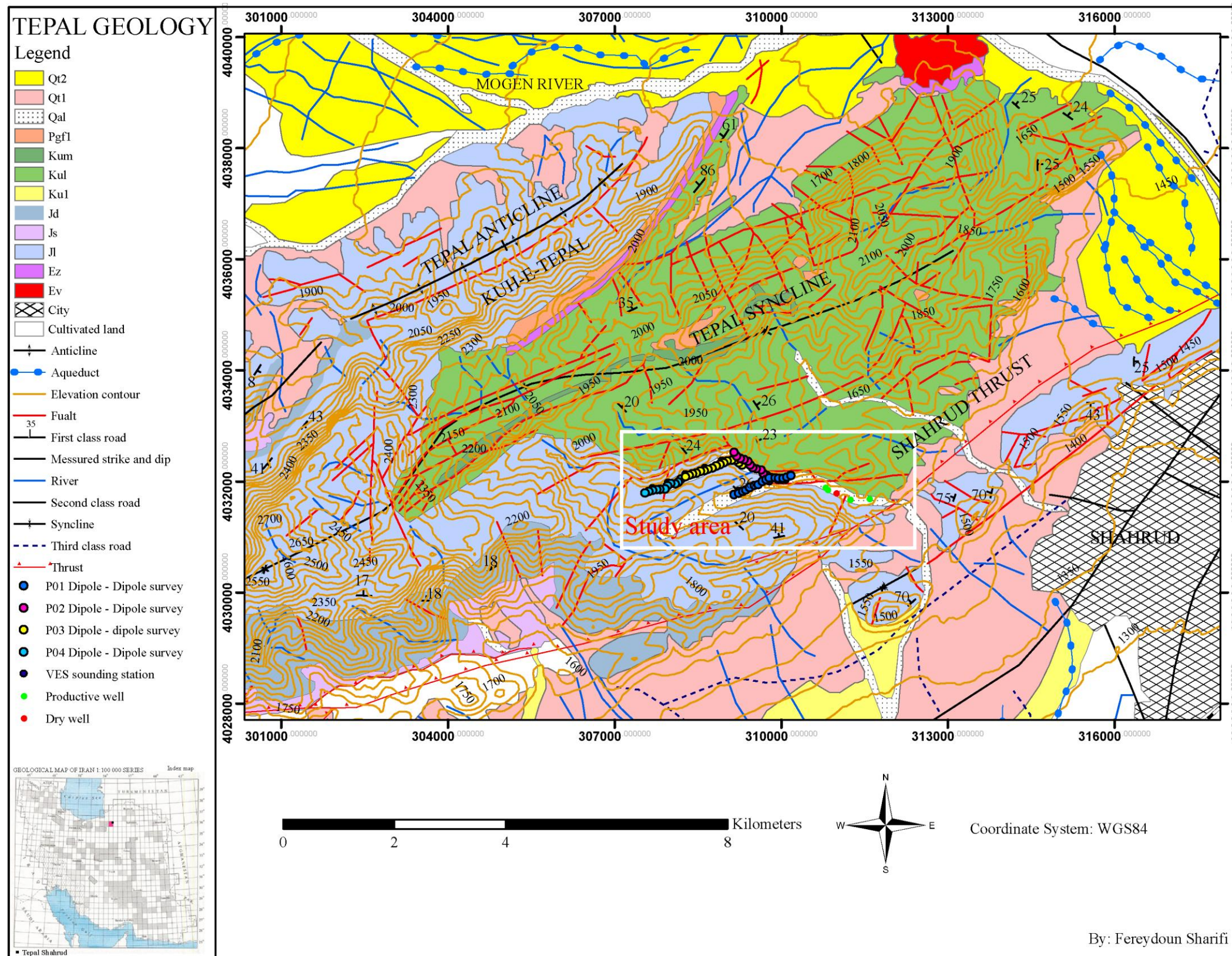
### ۳-۳- وضعیت زمین‌شناسی منطقه برداشت

به طور کلی، شرایط زمین‌شناسی منطقه مورد نظر از وضعیت زمین‌شناسی ناحیه شاهرود که دربرگیرنده منطقه مزبور است، تبعیت می‌کند. در شکل ۳-۲ بخشی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ که در آن محدوده برداشت نیز مشخص شده، آورده شده است. به‌منظور پرهیز از افزایش حجم مطالب، تنها به چند نکته مهم درباره زمین‌شناسی منطقه بسنده می‌نماید و اطلاعات بیشتر در مورد زمین‌شناسی منطقه، در نقشه زمین‌شناسی شاهرود درج گردیده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود؛ منطقه مورد مطالعه در مرز جنوبی ناودیس تپال واقع شده است. در این ناحیه به طور عمده دو ساختار زمین‌شناسی یکی با سن ژوراسیک میانی- بالایی (سازند لار) و دیگری با سن کرتاسه بالایی قابل تمایز است.

### ۳-۳-۱- سازند لار (II) ژوراسیک میانی- بالایی

توالی‌های سازند لار در منطقه مورد مطالعه از سنگ‌آهک‌های خاکستری روشن حاوی مقدار کمی آمونیت تشکیل شده است. این سنگ‌ها ابتدا ضخیم لایه است و به تدریج به سنگ آهک‌های توده‌ای و دیواره ساز تبدیل می‌شوند. این سنگ‌ها در قسمت فوقانی خود دارای ندول‌های چرت فراوانی هستند، که همین چرت‌ها از اختصاصات بارز سازند لار است. مطالعه محیط رسوبی سازند لار نشان می‌دهد که این سازند در محیطی سدی، لاگونی و پهنه جزر و مدی تشکیل شده و یک رخساره کم عمق دریا است. با بررسی تغییرات عمودی رخساره‌های سازند دلیچای و لار می‌توان نتیجه گرفت که از زمان ژوراسیک میانی تا ژوراسیک بالایی پسروری دریا موجب شده است تا رخساره‌های کم عمق سازند لار بر روی رخساره‌های عمیق سازند دلیچای راسب شوند. توالی‌های این سازند در ناحیه مورد مطالعه حدوداً دارای ۶۰۰ متر ضخامت می‌باشد. سن سازند لار بر اساس آمونیت‌های مطالعه شده در آن ژوراسیک میانی- ژوراسیک بالایی تعیین شده است [اوزیری و همکاران، ۲۰۰۱].





شکل ۳-۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه برداشت [اوزیری و همکاران، ۲۰۰۱].



### ۳-۳-۲- سنگ‌های کرتاسه بالایی ( $Ku^1$ )

سنگ‌های کرتاسه بالایی در منطقه شاهرود بر حسب تغییر رخساره سنگی به سه واحد تقسیم شده- اند؛ که در منطقه برداشت واحد  $Ku^1$  قابل مشاهده است. توالی‌های اصلی این واحد با ضخامت‌های زیاد سنگ آهک قابل مشاهده است. این واحد از تناوب‌های سنگ آهک خاکستری روشن با مارن‌های سبز روشن در ابتدای واحد و سپس سنگ آهک‌های خاکستری متمایل به قهوه‌ای ضخیم لایه، توده‌ای و صخره‌ساز که عمدتاً فرسایش یافته، هوازده شده و تبلور یافته‌اند و در اثر نفوذ قطرات باران و جریان آب‌های جاری حاوی حفرات متعددی هستند؛ تشکیل شده است. ضخامت تقریبی کل سنگ‌های کرتاسه بالایی در منطقه به ۴۰۰ متر می‌رسد [اوزیری و همکاران، ۲۰۰۱].

گسل‌های متعددی در منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است؛ که به طور عمده دسته گسل‌هایی با روند شرقی- غربی و شمال شرقی- جنوب غربی می‌باشند. برای رسیدن به وضوح بهتری از شرایط زمین‌شناسی و تکتونیک موجود در منطقه برداشت، در شکل ۳-۳ نقشه زمین‌شناسی منطقه با بزرگنمایی قابل توجه و درج نقاط برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی در منطقه برداشت، ارائه شده است. در منطقه برداشت داده‌های سونداژ و پروفیل مقاومت‌ویژه الکتریکی در درون رسوبات رودخانه‌ای انجام شده است.

### ۳-۴- عملیات صحرائی و برداشت داده‌های ژئوالکتریک در محدوده دره کال قُرنو

پس از انجام مطالعات اولیه و بازدید مقدماتی از منطقه دره کال قُرنو، برداشت ۱۰ سونداژ الکتریکی به نام‌های S01 تا S10 با فواصل تقریبی ۵۰۰ متر از یکدیگر در امتداد قسمتی از دره کال قُرنو با امتداد جنوب شرقی- شمال غربی و طول تقریبی ۴ کیلومتر انجام شد. فاصله اولین سونداژ (S01) تا نزدیکترین چاه آب حفر شده، که آخرین چاه مورد بهره‌برداری در دره کال قُرنو است، ۷۰۰ متر در نظر گرفته شد. در ضمن به دلیل تغییرات توپوگرافی و پیچاپیچی دره کال قُرنو در انتهای منطقه برداشت، فواصل سونداژهای متوالی در قسمت‌های انتهایی مورد برداشت دره کال قُرنو، حدود ۴۰۰-















۳۵۰ متر از یکدیگر در نظر گرفته شدند.

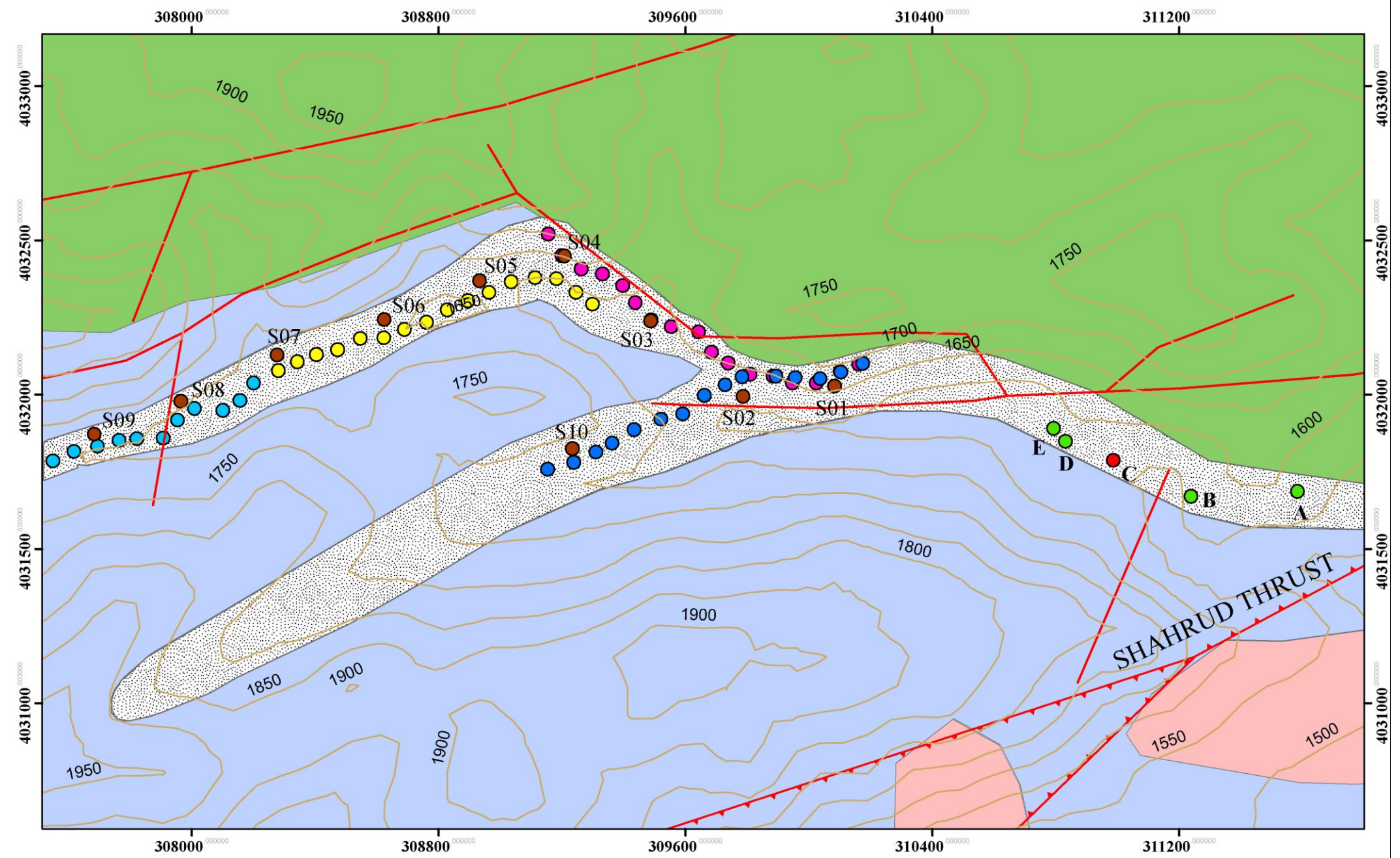
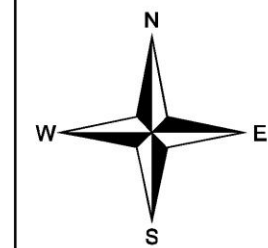
به منظور بررسی تغییرات جانبی مقاومت ویژه سنگ‌ها و ساختارهای زیرسطحی منطقه برداشت، علاوه بر سونداژهای مذکور، ۴ مقطع مقاومت ویژه الکتریکی نیز در مسیر دره کال قُرنو طراحی شده و برداشت داده در آنها انجام گرفت. فواصل تقریبی مراکز پروفیل‌ها از یکدیگر حداقل ۸۰۰ متر در نظر گرفته شد. آرایه برداشت در پروفیل‌ها دوقطبی- دوقطبی با فواصل الکترودی ۷۵ متر و حداکثر تعداد گام ۸ در نظر گرفته شده است. شکل ۳-۳ موقعیت ۱۰ نقطه سونداژ و ۴ پروفیل بر روی نقشه زمین- شناسی و توپوگرافی را نشان می‌دهد.

برای انجام سونداژنی مقاومت ویژه، آرایه شلومبرژه که متداول‌ترین آرایه مورد استفاده در عملیات سونداژنی است، انتخاب گردید. از مزایای آرایه شلومبرژه این است که چون الکترودهای پتانسیل حداقل برای چند طول خط جریان یا فاصله الکترودهای جریان ثابت مانده و جابجا نمی‌شود، در نتیجه، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و همچنین مصرف کابل و سایر لوازم ایجاد می‌شود. با اندازه-گیری مقادیر مقاومت ویژه برای دو مقدار MN (فاصله الکترودهای پتانسیل) در سونداژنی با آرایش شلومبرژه، می‌توان به اثر تغییرات سطحی و جانبی منطقه مورد مطالعه پی برده و آنها را از تغییرات عمقی مقاومت ویژه تفکیک نمود. برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه در هر نقطه، با نصب دستگاه مقاومت-سنج و ارسال جریان به داخل زمین، مقادیر مقاومت الکتریکی قرائت شده و با استفاده از معادله (۱۱-۲) به مقاومت ویژه ظاهری تبدیل شد.

# Study area

## Legend

-  Qal
-  Kul
-  Jl
-  Qtl
-  Elevation contour
-  Fault
-  Thrust
-  VES sounding station
-  Productive well
-  Dry well
-  P01 profile
-  P02 profile
-  P03 profile
-  P04 profile



Coordinate system: WGS84

0 0.2 0.4 0.8 1.2 1.6 Kilometers

By: Fereydoun sharifi

شکل ۳-۳: نقشه زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه برداشت و موقعیت نقاط برداشت مقاومت ویژه

در برداشت صحرائی سونداژهای مقاومت ویژه مزبور، حداکثر طول خط جریان الکتریکی یا به عبارت دیگر حداکثر فاصله الکترودهای جریان (AB)، ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است که به نظر می‌رسد برای دسترسی به عمق سنگ کف مورد نظر در منطقه برداشت کافی باشد.

در عملیات صحرائی انجام شده در این مطالعه، برای اندازه‌گیری داده‌ها و برداشت سونداژهای مورد نظر، از دستگاه ژئوالکتریک Terrameter SAS-4000 ساخت شرکت ABEM استفاده شده است.

پس از اندازه‌گیری‌های صحرائی و محاسبه مقادیر مقاومت ویژه برای سونداژها، تفسیر داده‌ها ابتدا با استفاده از آباک‌ها یا منحنی‌های استاندارد و سپس مدل‌سازی کامپیوتری و تفسیر آنها با استفاده از نرم‌افزار IX1D ساخت شرکت Interpex انجام شده و برای پروفیل‌های برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV ساخت شرکت Geotomo صورت پذیرفته است.

### ۳-۵- تفسیر نتایج

برای بدست آوردن مدل واقعی از زمین، تفسیر باید به صورت کمی انجام پذیرد. در تفسیر کمی از داده‌های خام (مقاومت ویژه ظاهری) پارامترهای فیزیکی شامل مقاومت ویژه واقعی و عمق یا ضخامت لایه‌ها تفسیر می‌شود. برای بدست آوردن تفسیر دقیق‌تر باید نتایج حاصله را با سایر داده‌های حاصل از زمین‌شناسی، حفاری و غیره تلفیق نمود.

معمولاً نتایج داده‌های حاصل از برداشت یک سونداژ مقاومت ویژه الکتریکی به صورت یک منحنی بر روی یک نمودار با محورهای لگاریتمی ارائه می‌شود. در این نمودار با محورهای تمام لگاریتمی، مقدار مقاومت ویژه ظاهری ( $\rho_a$ ) به صورت تابعی از فاصله الکترودی (طول  $\frac{AB}{2}$  در آرایه شلومبرژه) رسم می‌شود و با توجه به این محورهای لگاریتمی تأثیر یک لایه در منحنی سونداژ به ازای عمق آن کمتر می‌گردد. با استفاده از این سیستم محورهای لگاریتمی، تفسیر نتایج به کمک منحنی‌های استاندارد آسان‌تر می‌گردد؛ به طوری که اگر آباکی برای مدل مشخص تنظیم شده باشد، در شرایطی که تغییرات



مقاومت ویژه و ضخامت لایه دارای نسبت برابری با مدل مورد نظر باشد؛ با روش بسیار ساده‌ای که مبتنی بر موازی قرار دادن محورهای مختصات است، می‌توان از این آباک استفاده نمود [ Reynolds, 1997].

### ۳-۶- تفسیر کیفی و کمی سونداژهای الکتریکی

اطلاعات حاصل از هر روش ژئوفیزیکی باید به اطلاعات زمین‌شناسی برگردانده شود. بنابراین یک تعبیر و تفسیر کامل، از یک طرف به تجربه و تبحر کافی در مسائل ژئوالکتریک بستگی دارد و از طرف دیگر مستلزم آن است که اطلاعات جامعی از زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در دسترس باشد [Reynolds, 1997]. به منظور تفسیر صحیح سونداژهای الکتریکی یک منطقه باید به نکات زیر توجه داشت:

۱) هر سونداژ الکتریکی باید با توجه به سونداژهای الکتریکی دیگری که در منطقه اجرا شده است، مورد تعبیر و تفسیر قرار گیرد.

۲) هرگاه در مجاورت سونداژهای الکتریکی گمانه‌هایی موجود باشد، باید اطلاعات حاصل از این گمانه‌ها در تعبیر و تفسیر سونداژهای الکتریکی مورد توجه قرار گیرد.

۳) سونداژهای الکتریکی که روی رخنمون‌ها و یا طبقات مجاور آن پیاده شده است، با توجه به مشخصات زمین‌شناسی این طبقات مورد بررسی قرار گیرد.

۴) قبل از تعبیر و تفسیر منحنی ترسیم شده بایستی با تصحیح داده‌ها، این منحنی به یک منحنی هموار تبدیل گردد.

هر چه حدود تعیین‌رشته مقاومت ویژه دقیق‌تر تعیین شود، تعبیر و تفسیر حاصل دقیق‌تر خواهد بود. بنابراین برای یک تفسیر نهایی باید از تمام اطلاعات موجود در منطقه استفاده نمود تا بتوان به نتایج دقیق‌تری دست یافت [Reynolds, 1997].

روش کلی و اساسی متداول برای تفسیر داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه شامل مراحل زیر می‌باشد  
[Mooney, 1980]:

الف) در نظر گرفتن یک مدل زمین آزمون<sup>۱</sup>

ب) محاسبه منحنی نظری<sup>۲</sup> مربوط به این مدل

ج) مقایسه این منحنی نظری با منحنی صحرایی مشاهده‌ای<sup>۳</sup>

د) تصحیح یا تغییر مدل در نظر گرفته شده تا زمانی که بهترین انطباق ممکن با منحنی مشاهده‌ای بدست آید.

این روش بیشترین استفاده را در تفسیر داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه دارد. در نتیجه‌ی تفسیر، مدلی شامل پارامترهای زیر بدست می‌آید:

الف) تعداد لایه‌ها (N)

ب) مقاومت‌ویژه واقعی هر لایه ( $\rho$ )

ج) ضخامت یا عمق هر لایه.

در مرحله تفسیر، مقادیر عددی این پارامترها که بهترین تطبیق را با داده‌های صحرایی داشته باشند، تعیین می‌شوند. پس از آن، باید تفسیر زمین‌شناسی انجام شود؛ که اطلاعات زمین‌شناسی موجود، داده‌های گمانه‌های حفاری و غیره، باعث افزایش کیفیت این تفسیر می‌شوند [Mooney, 1980].

### ۳-۷- تفسیر کمی سونداژها و پروفیل‌های الکتریکی برداشت شده در دره کال قُرنو

برای بدست آوردن اطلاعات مورد نظر در منطقه مورد مطالعه، داده‌های ۱۰ سونداژ مقاومت‌ویژه

---

<sup>1</sup> Trial Earth Model

<sup>2</sup> Theoretical Curve

<sup>3</sup> Observed Field Curve

الکتریکی برداشت شده با آرایش شلومبرژه و ۴ پروفیل دوقطبی - دوقطبی که موقعیت آنها در شکل ۳-۳ نشان داده شده است، مورد تفسیر قرار گرفتند.

کلیه سونداژها در ابتدا با استفاده از منحنی‌های استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه تفسیر شده و سپس برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر در تفسیر، با استفاده از نرم‌افزار IX1D، مدل‌سازی و تفسیر گردیدند. جهت مدل‌سازی با این نرم‌افزار، نتایج تفسیر کمی با استفاده از منحنی‌های استاندارد به‌عنوان مدل اولیه، مورد استفاده قرار گرفتند. برای مدل‌سازی نتایج پروفیل‌زنی نیز از نرم‌افزار RES2DINV استفاده شده است. مدل اولیه مورد نیاز برای مدل‌سازی داده‌های پروفیل‌ها توسط این نرم‌افزار، توسط خود نرم‌افزار با استفاده از روش‌های مدل‌سازی پیشرو (روش تفاضل محدود یا اجزاء محدود) تولید می‌شود. در ادامه، داده‌های خام مربوط به سونداژهای برداشت (پیوست - الف)، نتایج حاصل از مدل‌سازی سونداژها و سپس پروفیل‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

### ۳-۷-۱- تفسیر کمی سونداژهای الکتریکی برداشت شده در دره کال قُرنو

تفسیر کمی ده سونداژ S01 تا S10 در زیر آورده شده است:

#### الف - سونداژ S01

سونداژ S01 که اولین سونداژ برداشت‌شده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد به فاصله تقریبی ۷۰۰ متری شمال‌غربی آخرین چاه آب بهره‌برداری (E) در دره کال قُرنو انتخاب شده است (شکل ۳-۳). نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه در جدول ۳-۱ نشان داده شده است. نتایج تفسیر بیانگر وجود ۹ لایه‌ی ژئوالکتریک تا عمق اکتشاف مشخص شده و با مشخصات لایه‌های نشان داده شده در این جدول است.

مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ مزبور با استفاده از نرم‌افزار IX1D، در مراحل تکرار مختلف با استفاده از این نرم‌افزار، برای رسیدن به تفسیر دقیق‌تر داده‌ها انجام شده و نتایج مدل‌سازی پیشرو و

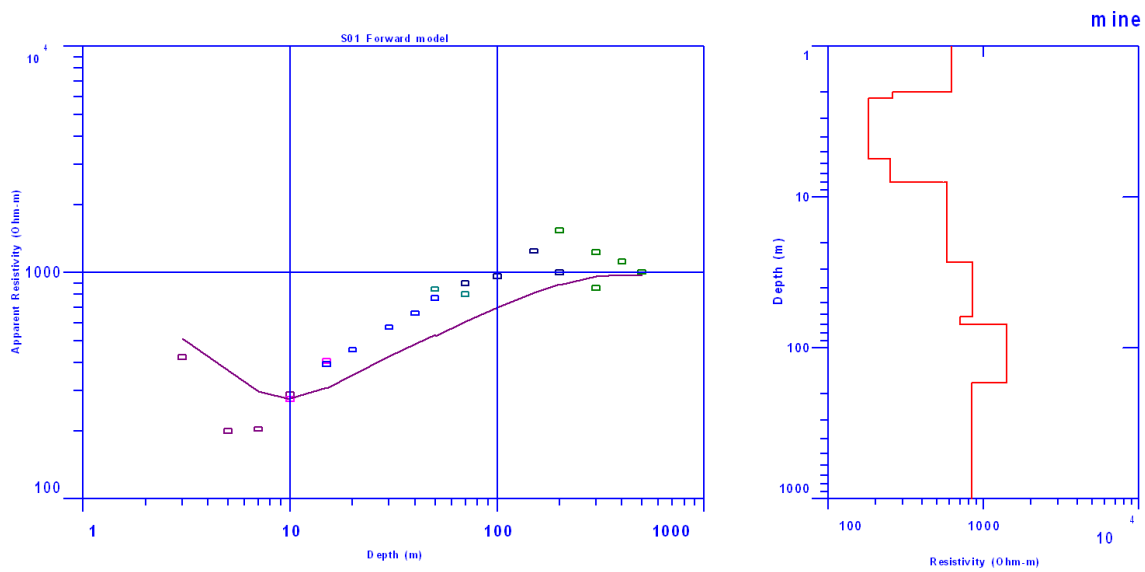
وارون به ترتیب در شکل ۳-۴ و شکل ۳-۵ نشان داده شده است. در شکل ۳-۴ نتایج مدل سازی پیشرو مدل اولیه به دست آمده از تفسیر کمی این سونداژ توسط منحنی استاندارد را نشان می دهد. خطای برازش جذر میانگین مربعات (RMS)<sup>۱</sup> که بیانگر خطای برازش بین داده های صحرائی و داده های نظری حاصل از مدل اولیه می باشد، برابر ۳۷/۷۶ درصد است، که دلیل آن وجود تغییرات قابل توجه داده های مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده در محل این سونداژ می باشد که با انجام مدل سازی وارون در مراحل تکرار مختلف، میزان خطا کاهش یافته است و در مرحله تکرار دوم به ۱۲/۳۱ درصد کاهش یافته که تقریباً مقدار قبولی می باشد (جدول ۳-۲).

جدول ۳-۱: نتایج تفسیر سونداژ S01 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه ای شلومبرژه

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۶۲۰	۲	۲
۲	۲۶۰	۲/۲	۰/۲
۳	۱۸۰	۵/۶	۳/۴
۴	۲۵۰	۸	۲/۴
۵	۵۸۰	۲۷	۱۹
۶	۸۵۰	۶۲	۳۵
۷	۷۰۰	۷۰	۸
۸	۱۴۰۰	۱۷۰	۱۰۰
۹	۸۴۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error) = 37.76%

<sup>۱</sup> RMS (Root Mean Square Fitting Error)

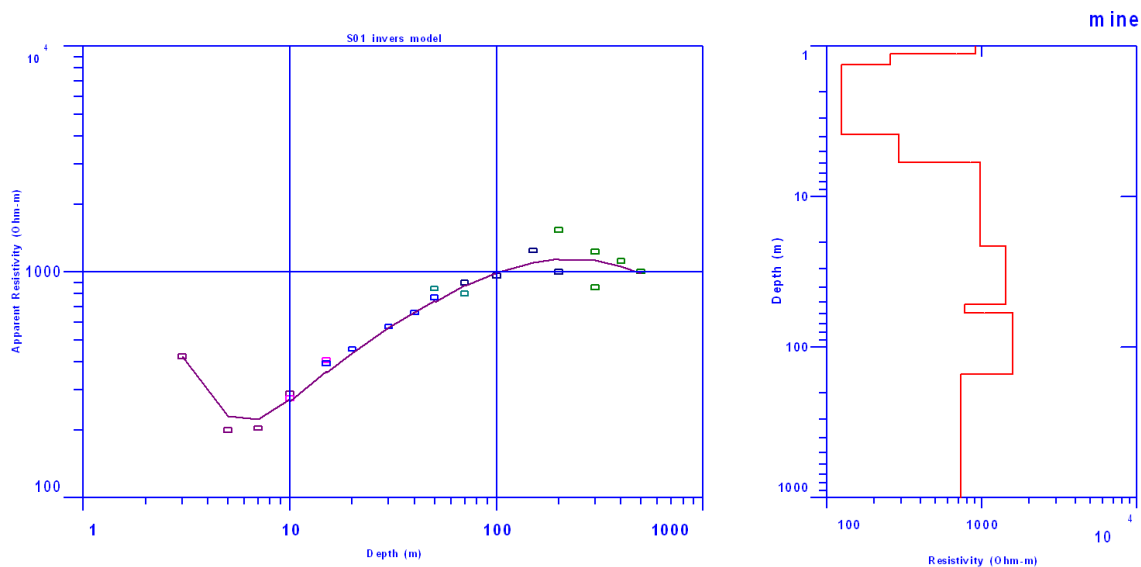


شکل ۳-۴: نتایج مدل سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S01.

جدول ۳-۲: نتایج مدل سازی وارون داده های سونداژ S01 پس از دو مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۰۲/۴۲	۱/۱۲۳۱	۱/۱۲۳۱
۲	۲۵۵/۳۲	۱/۳۱۷۷	۰/۱۹۴۶۵
۳	۱۲۳/۶۲	۳/۸۷۹۵	۲/۵۶۱۸
۴	۲۹۰/۰۸	۵/۸۸	۲/۰۰۰۴
۵	۹۷۱/۱۷	۲۱/۳۷۳	۱۵/۴۹۳
۶	۱۴۲۲/۱	۵۱/۹۷۵	۳۰/۶۰۲
۷	۷۷۵/۶۹	۵۹/۴۵۹	۷/۴۸۴۶
۸	۱۵۷۵/۴	۱۵۱/۱	۹۱/۶۴۰
۹	۷۲۹/۴۵	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error) = 12.31%



شکل ۳-۵: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S01 پس از دو مرحله تکرار.

با توجه به نتایج مدل‌سازی وارون، در محل این سونداژ، تا عمق تقریبی ۱۵۰ متر، ۹ لایه ژئوالکتریکی تشخیص داده شده که با توجه به مقاومت‌ویژه الکتریکی آنها، تمامی لایه‌ها به جز لایه‌های سطحی قرار گرفته در عمق کمتر از ۱۰ متر، نسبتاً مقاوم بوده و با توجه به این مقادیر مقاومت‌ویژه، زون آبدار قابل توجهی در زیر سطح زمین در محل این سونداژ وجود ندارد. همچنین برخی لایه‌ها مانند لایه‌های دوم و هفتم دارای ضخامت کمی بوده و با توجه به اصل اختفا در روش مقاومت‌ویژه می‌توان آنها را در نظر نگرفت و خصوصیات مقاومت‌ویژه و ضخامت آنها را در لایه‌های بالایی یا پایینی ادغام نمود. لازم به ذکر است که لایه‌های ژئوالکتریکی با لایه‌های زمین‌شناسی متفاوت بوده و الزاماً لایه‌های ژئوالکتریکی منطبق بر لایه‌های زمین‌شناسی نیست.

### ب- سونداژ S02

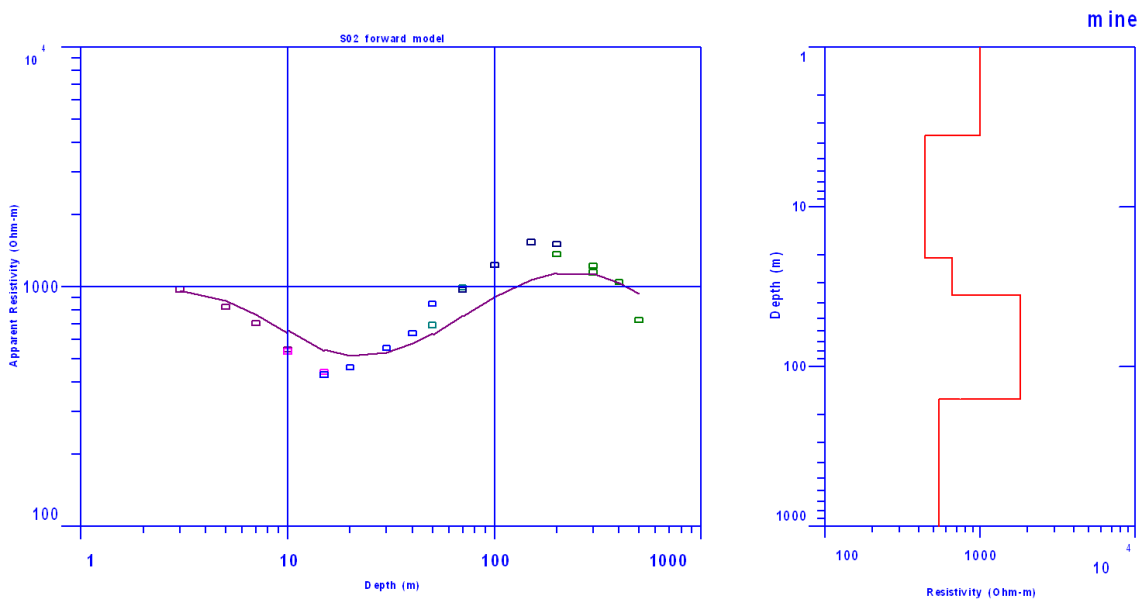
تفسیر این سونداژ ابتدا با استفاده از منحنی‌های استاندارد صورت گرفت و سپس بر مبنای پارامترهای مدل بدست آمده، مدل‌سازی پیشرو با استفاده از نرم‌افزار IX1D انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول ۳-۳ و شکل ۳-۶ نشان داده شده است. همچنین مدل‌سازی وارون در مراحل تکرار مختلف با این نرم-

افزار انجام گرفته است که نتایج نهایی آن در جدول ۴-۳ و شکل ۷-۳ درج گردیده است.

جدول ۳-۳: نتایج تفسیر سونداژ S02 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱۰۰۰	۳/۶	۳/۶
۲	۴۴۰	۲۱	۱۷/۴
۳	۶۶۰	۳۶	۱۵
۴	۱۸۰۰	۱۶۰	۱۲۴
۵	۵۴۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error) = 21.49%

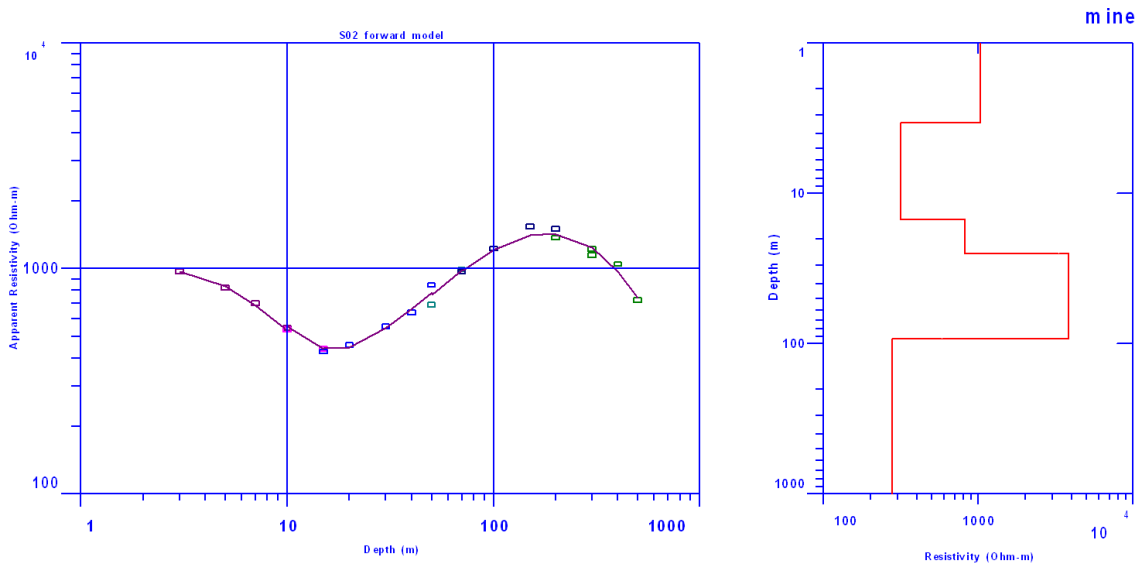


شکل ۳-۶: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S02

جدول ۳-۴: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S02 پس از سه مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱۰۲۸/۱	۳/۳۹۱	۳/۳۹۱
۲	۳۱۵/۱۶	۱۵/۰۰۶	۱۱/۶۱۵
۳	۸۱۸/۶۲	۲۵/۲۵۸	۱۰/۲۵۳
۴	۳۸۳۴/۶	۹۳/۰۹۲	۶۷/۸۳۴
۵	۲۷۵/۶۴	$\infty$	$\infty$

RMS (Root Mean Square Fitting Error) = 4.77%



شکل ۳-۷: مدل وارون برآزش داده‌شده به داده‌های سونداژ S02 پس از سه مرحله تکرار.



همانگونه که از نتایج مدل‌سازی پیداست، خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۲۱/۴۹ درصد بوده است که با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مرحله تکرار سوم به ۴/۷۷ درصد کاهش یافته است.

با توجه به نتایج مدل‌سازی وارون در محل این سونداژ، تا عمق بالای ۱۰۰ متر، ۵ لایه ژئوالکتریکی با مقاومت‌ویژه و ضخامت‌های مختلف قابل تفسیر است. مقادیر نسبتاً بالای مقاومت‌ویژه در زیر سطح زمین تا عمق ۹۳ متری در محل این سونداژ، بیانگر عدم وجود زون آبدار تا این عمق است.

در عمق ۹۳ متری حضور یک لایه با مقاومت‌ویژه ۲۷۵ اهم‌متر می‌تواند دلیل بر وجود زون آبدار با پتانسیل ضعیف تا متوسط در این عمق باشد.

#### پ- سونداژ S03

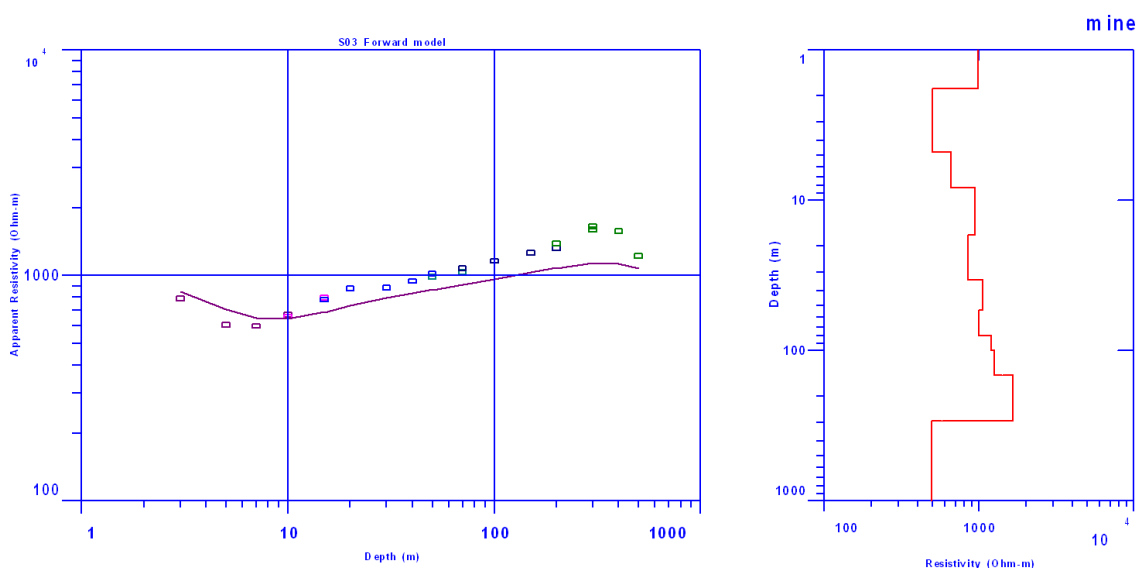
تفسیر این سونداژ ابتدا با استفاده از منحنی‌های استاندارد صورت گرفت و سپس بر مبنای پارامترهای مدل بدست آمده، مدل‌سازی پیشرو با استفاده از نرم‌افزار IX1D انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول ۵-۳ و شکل ۳-۸ نشان داده شده است.

همچنین مدل‌سازی وارون در مراحل تکرار مختلف با این نرم‌افزار انجام گرفته است که نتایج نهایی آن در جدول ۳-۶ و شکل ۳-۹ درج گردیده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۲۰/۶۸ درصد است که با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مرحله تکرار هشتم، به ۳/۵ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج مدل وارون، در محل این سونداژ، تا عمق حدود ۱۸۰ متر، ۱۱ لایه ژئوالکتریکی تشخیص داده شده است که با توجه به مقادیر مقاومت-ویژه بالای این لایه‌ها در زیر سطح زمین تا عمق ۱۷۶ متر، حضور زون آبدار، امری بعید به نظر می‌رسد. در عمق ۱۷۶ متری در محل این سونداژ، یک لایه با مقاومت‌ویژه ۹۸ اهم‌متر وجود دارد که می‌تواند نشان‌دهنده زون آبداری با پتانسیل متوسط تا خوب در این عمق باشد.

جدول ۳-۵: نتایج تفسیر سونداژ S03 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۸۰	۱/۸	۱/۸
۲	۵۰۰	۴/۸	۳
۳	۶۶۰	۸/۲	۳/۴
۴	۹۴۰	۱۷	۸/۸
۵	۸۵۰	۳۴	۱۷
۶	۱۰۵۰	۵۴	۲۰
۷	۱۰۰۰	۸۰	۲۶
۸	۱۲۰۰	۱۰۰	۲۰
۹	۱۲۵۰	۱۴۵	۴۵
۱۰	۱۶۵۰	۲۹۵	۱۵۰
۱۱	۴۹۵	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 20.68%

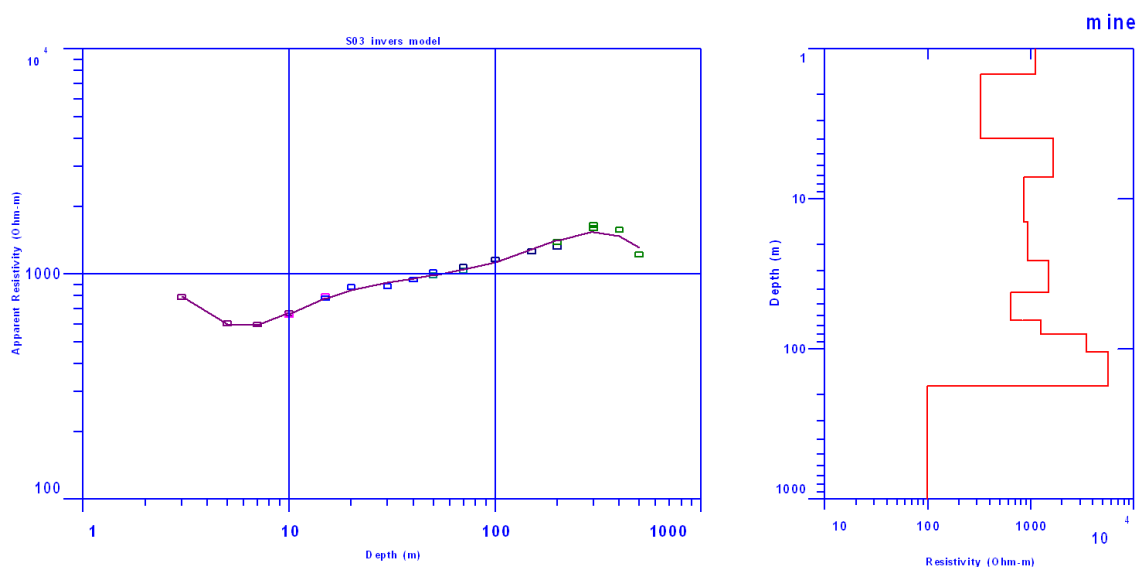


شکل ۳-۸: نتایج مدل‌سازی پیش‌رو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S03.

جدول ۳-۶: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S03 پس از هشت مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱۰۹۹/۳	۱/۴۷۴۲	۱/۴۷۴۲
۲	۳۲۵/۱۸	۳/۹۶۳۲	۲/۴۸۹۰
۳	۱۶۴۷/۹	۷/۱۴۴۱	۳/۱۸۰۹
۴	۸۵۷/۸۶	۱۴/۱۹۷	۷/۰۵۳۳
۵	۹۳۲/۴۷	۲۵/۹۱۱	۱۱/۷۱۳
۶	۱۴۸۹/۳	۴۲/۰۸۸	۱۶/۱۷۷
۷	۶۳۷/۳۵	۶۴/۰۰۹	۲۱/۹۲۲
۸	۱۲۳۸/۴	۷۹/۳۲۴	۱۵/۳۱۵
۹	۳۴۴۲/۶	۱۰۴/۹۷	۲۵/۶۵۱
۱۰	۵۵۶۳/۴	۱۷۶/۵۸	۷۱/۶۰۸
۱۱	۹۷/۹۵۶	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)=3.5%



شکل ۳-۹: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S03 پس از هشت مرحله تکرار.

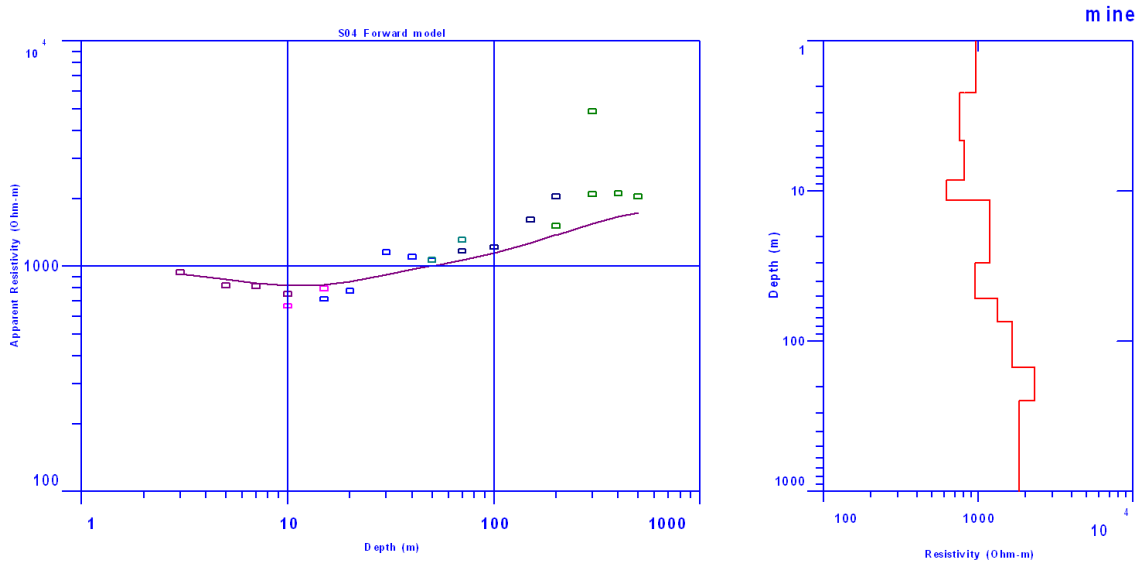
## ت- سونداژ S04

نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو در جدول ۷-۳ و شکل ۱۰-۳ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۸-۳ و شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۳۴/۴۶ درصد است که با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۱۹/۸۵ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج مدل‌سازی وارون در محل این سونداژ؛ تا عمق حدود ۱۵۵ متری، تمام لایه‌ها از نظر الکتریکی مقاوم هستند. حضور یک زون با مقاومت ویژه ۲۳۳ اهم‌متری در عمق حدود ۱۵۵ متری می‌تواند نشان‌دهنده یک زون آبدار با پتانسیل ضعیف باشد.

جدول ۷-۳: نتایج تفسیر سونداژ S04 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۶۰	۲/۲	۲/۲
۲	۷۵۰	۴/۶	۲/۴
۳	۸۱۰	۸/۴	۳/۸
۴	۶۲۰	۱۱/۵	۳/۱
۵	۱۱۸۰	۳۰	۱۸/۵
۶	۹۵۰	۵۲	۲۲
۷	۱۳۲۰	۷۴	۲۲
۸	۱۶۵۰	۱۵۰	۷۶
۹	۲۳۰۰	۲۵۰	۱۰۰
۱۰	۱۸۴۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 34.46

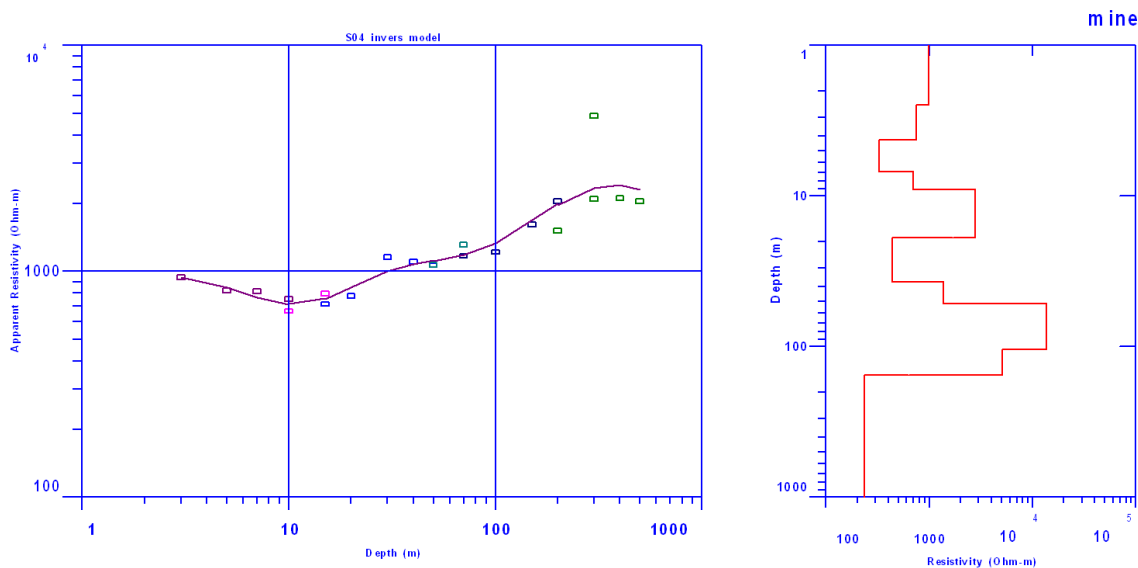


شکل ۳-۱۰: نتایج مدل‌سازی پیش‌رو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S04.

جدول ۳-۸: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S04 پس از هفت مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۸۵	۲/۴۹۴۳	۲/۴۹۴۳
۲	۷۵۳/۰۷	۴/۲۵۶	۱/۷۶۱۷
۳	۳۲۷/۵۷	۶/۹۰۸۳	۲/۶۵۲۲
۴	۶۹۳/۹۷	۹/۰۳۶۱	۲/۱۲۷۸
۵	۲۷۹۷/۴	۱۸/۸۴۸	۹/۸۱۲۰
۶	۴۳۷/۱۶	۳۷/۱۲۹	۱۸/۲۸۱
۷	۱۳۷۹/۸	۵۱/۶۳۶	۱۴/۵۰۷
۸	۱۳۵۵۴	۱۰۳/۹۵	۵۲/۳۰۹
۹	۵۰۷۶/۱	۱۵۵/۲۸	۵۱/۳۳۰
۱۰	۲۳۳/۹۴	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 19.85



شکل ۳-۱۱: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S04 پس از هفت مرحله تکرار.

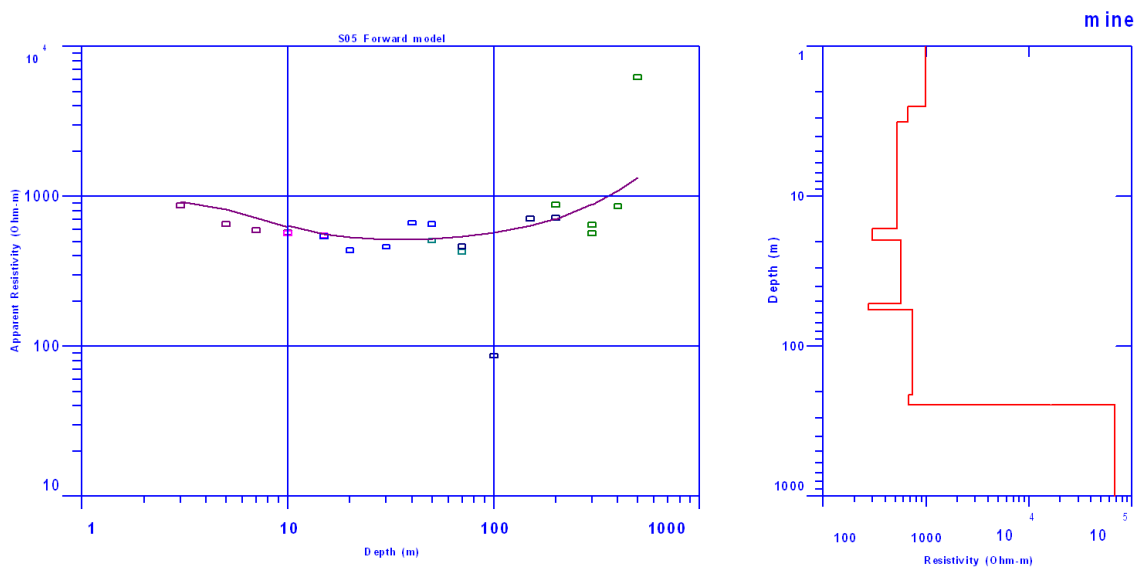
### ج- سونداژ S05

نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو به ترتیب در جدول ۳-۹ و شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۳-۱۰ و شکل ۳-۱۳ برای تکرار نهایی نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۷۴/۰۹ درصد است. این میزان خطای نسبتاً بالا به تغییرات نسبتاً زیاد داده‌های مقاومت‌ویژه اندازه‌گیری شده در محل این سونداژ نسبت داده می‌شود. با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۶۲/۸۹ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج مدل‌سازی وارون در محل این سونداژ، در عمق حدود ۲۵ تا ۴۸ متر، وجود یک زون آبدار با پتانسیل متوسط پیش‌بینی می‌شود. بعد از عمق حدود ۴۸ متر، مقاومت الکتریکی لایه‌ها بسیار بالا بوده و از این عمق به بعد تا عمق مورد اکتشاف، لایه آبداری وجود ندارد.

جدول ۳-۹: نتایج تفسیر سونداژ S05 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۸۵	۲/۵۳	۲/۵۳
۲	۶۶۰	۳/۲	۰/۶۷
۳	۵۲۰	۱۶/۵	۱۳/۳
۴	۳۰۰	۱۹/۵	۳
۵	۵۷۰	۵۲	۳۲/۵
۶	۲۷۵	۵۷	۵
۷	۷۴۰	۲۱۰	۱۵۳
۸	۶۸۰	۲۴۵	۳۵
۹	۶۸۰۰۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 74.09

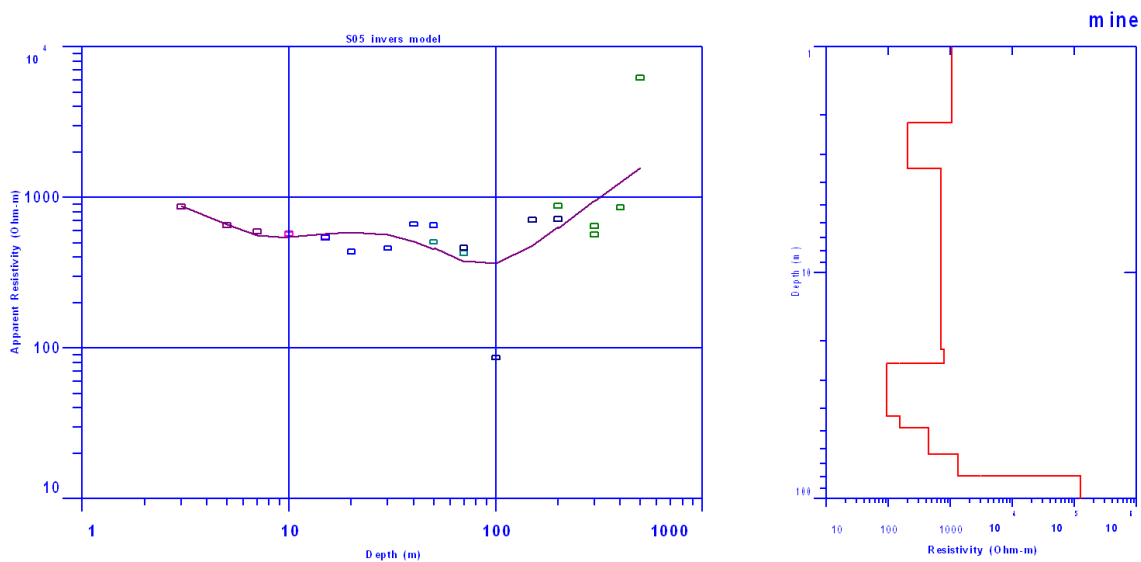


شکل ۳-۱۲: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S05.

جدول ۳-۱۰: نتایج مدل سازی وارون داده‌های سونداژ S05 پس از ۱۱ مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱۰۵۷/۵	۲/۱۶۲۹	۲/۱۶۲۹
۲	۲۰۳/۲۳	۳/۴۵۷۲	۱/۲۹۴۲
۳	۷۰۶/۱۹	۲۱/۸۶۲	۱۸/۴۰۵
۴	۷۸۹/۵۹	۲۵/۱۸۰	۳/۳۱۷۵
۵	۹۴/۲۵۲	۴۳/۱۳۶	۱۷/۹۵۶
۶	۱۵۲/۵۷	۴۸/۷۶۳	۵/۶۲۶۹
۷	۴۴۳/۱۳	۶۳/۷۱۲	۱۴/۹۴۹
۸	۱۲۹۹/۹	۷۹/۳۰۰	۱۵/۵۸۸
۹	۱۲۴۲۰۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 62.89%



شکل ۳-۱۳: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S05 پس از ۱۱ مرحله تکرار.



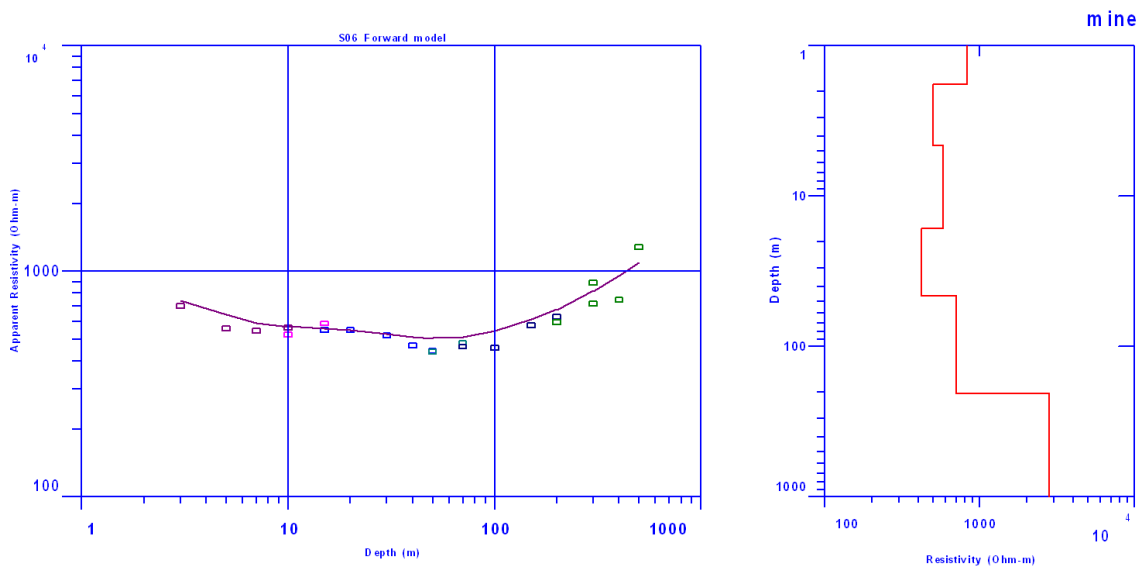
### ح- سونداژ S06

نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو به ترتیب در جدول ۱۱-۳ و شکل ۱۴-۳ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۱۲-۳ و شکل ۱۵-۳ برای تکرار نهایی نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۱۱/۶۶ درصد است. با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۷/۴۸ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج مدل‌سازی وارون، در محل این سونداژ تا عمق تقریبی بیش از ۲۰۰ متر، ۶ لایه مقاوم الکتریکی تشخیص داده شده است، که با توجه به مقادیر بالای مقاومت ویژه در تمامی لایه‌ها، حضور زون آبدار در زیر زمین محل این سونداژ منتفی است.

جدول ۱۱-۳: نتایج تفسیر سونداژ S06 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۸۲۵	۱/۸	۱/۸
۲	۵۰۰	۴/۶	۲/۸
۳	۵۸۰	۱۶/۵	۱۱/۹
۴	۴۲۰	۴۶	۲۹/۵
۵	۷۰۰	۲۰۵	۱۵۹
۶	۲۸۰۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 11.66%

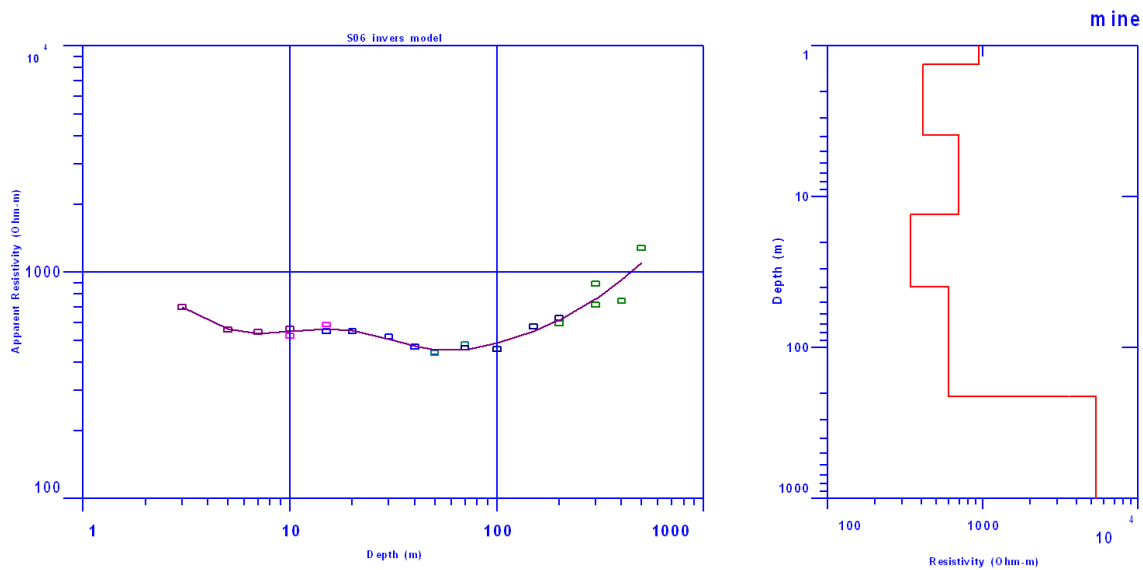


شکل ۳-۱۴: نتایج مدل‌سازی پیش‌رو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S06.

جدول ۳-۱۲: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S06 پس از ۲ مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۳۹/۰۹	۱/۳۲۶۴	۱/۳۲۶۴
۲	۴۰۸/۵۱	۳/۹۰۷۶	۲/۵۸۱۲
۳	۶۹۳/۸۲	۱۳/۱۳۵	۹/۲۲۷۹
۴	۳۳۸/۹۲	۳۹/۲۷۱	۲۶/۱۳۶
۵	۶۰۱/۸۹	۲۰۹/۵۲	۱۷۰/۲۵
۶	۵۳۶۹/۱	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 7.48%



شکل ۳-۱۵: مدل وارون برآزش داده‌شده به داده‌های سونداژ S06 پس از ۲ مرحله تکرار.

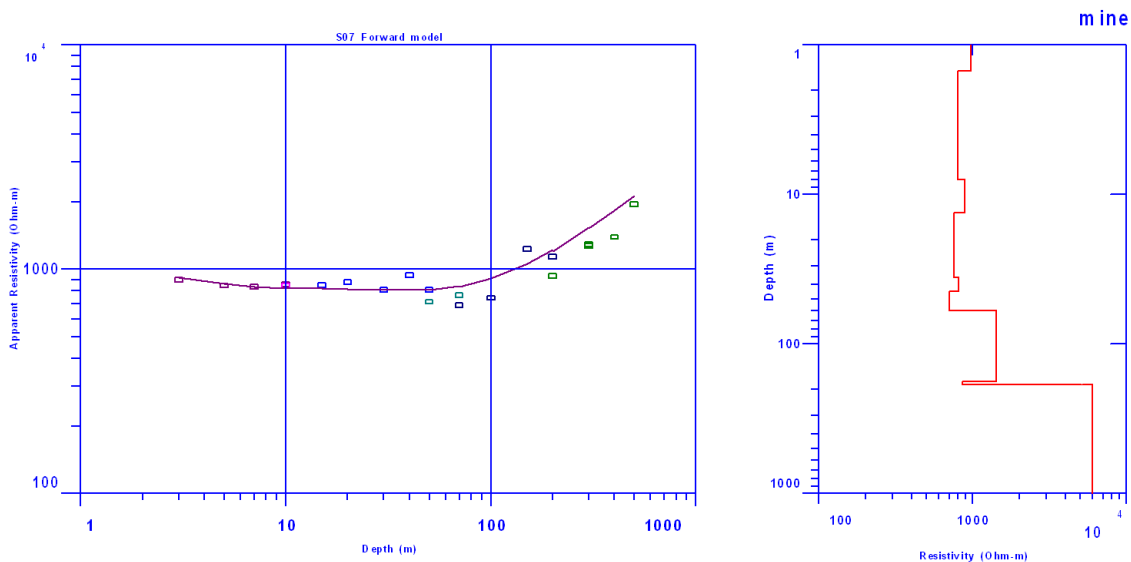
#### خ- سونداژ S07

نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو به ترتیب در جدول ۳-۱۷ و شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۳-۱۴ و شکل ۳-۱۷ برای تکرار نهایی نشان داده شده است. خطای برآزش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۱۳/۸۶ درصد است. با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۸/۴۶ درصد کاهش یافته است. نتایج مدل‌سازی وارون بیانگر مقاومت‌ویژه نسبتاً زیاد در زیر زمین در محل این سونداژ می‌باشد و زون آبدار قابل توجهی در محل این سونداژ نمی‌تواند وجود داشته باشد.

جدول ۳-۱۳: نتایج تفسیر سونداژ S07 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۷۵	۱/۵	۱/۵
۲	۸۰۰	۸	۶/۵
۳	۸۹۰	۱۳/۲	۵/۲
۴	۷۵۰	۳۶	۲۲/۸
۵	۸۱۰	۴۴/۵	۸/۵
۶	۷۰۰	۶۰	۱۵/۵
۷	۱۴۲۰	۱۷۸	۱۱۸
۸	۸۶۰	۱۸۷	۹
۹	۶۰۲۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 13.86%

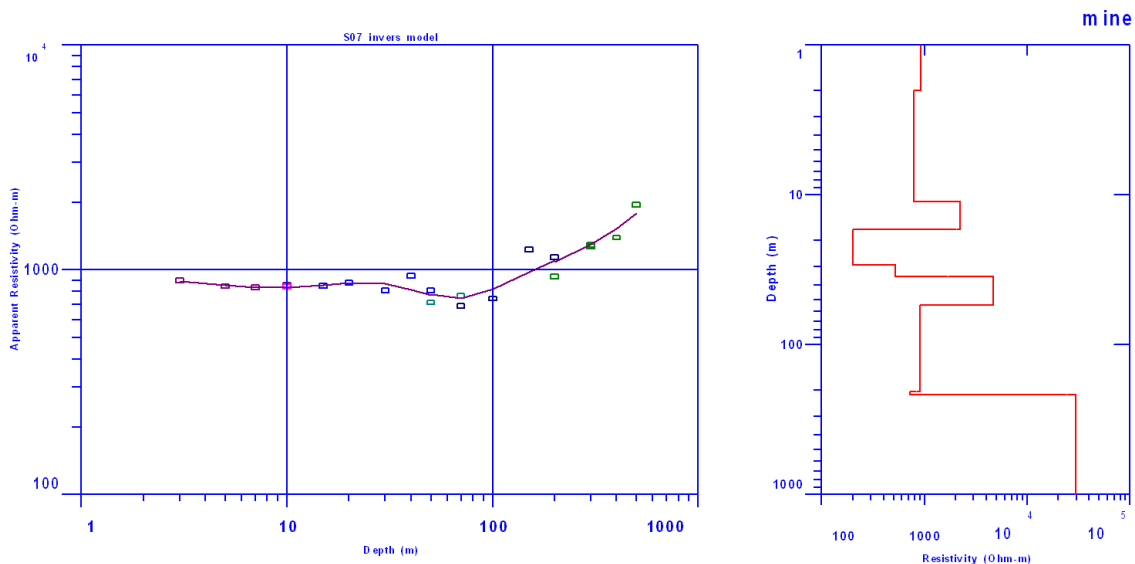


شکل ۳-۱۶: نتایج مدل‌سازی پیش‌رو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S07.

جدول ۳-۱۴: نتایج مدل سازی وارون داده های سونداژ S07 پس از ۲۱ مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۹۱۵/۳۱	۱/۹۹۹۱	۱/۹۹۹۱
۲	۷۸۲/۷۷	۱۱/۰۸۴	۹/۰۸۴۵
۳	۲۲۳۱/۴	۱۷/۰۰۸	۵/۹۲۴۴
۴	۲۰۰/۰۷	۲۹/۴۰۷	۱۲/۳۹۹
۵	۵۲۱/۱۷	۳۵/۰۰۳	۵/۵۹۶۵
۶	۴۷۰۰/۷	۵۴/۲۸۹	۱۹/۲۸۵
۷	۹۰۹/۱۶	۲۰۵/۹۷	۱۵۱/۶۸
۸	۷۲۵/۳۹	۲۱۶/۵۲	۱۰/۵۵۶
۹	۲۹۳۶۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 8.46%



شکل ۳-۱۷: مدل وارون برازش داده شده به داده های سونداژ S07 پس از ۲۱ مرحله تکرار.

#### د- سونداژ S08

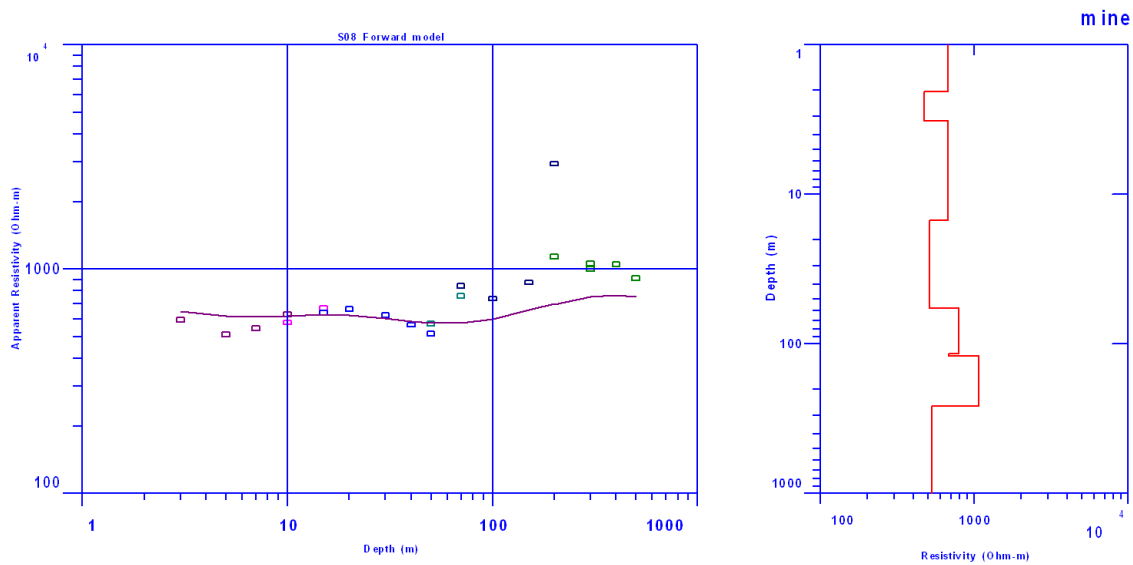
نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو به ترتیب در جدول ۱۵-۳ و شکل ۱۸-۳ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۱۶-۳ و شکل ۱۹-۳ برای تکرار نهایی نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۴۵/۰۹ درصد است. با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۲۳/۶۲ درصد کاهش یافته است.

نتایج مدل‌سازی وارون این سونداژ در مراحل تکرار نهایی، حاکی از آن است که احتمالاً یک زون آبدار با مقاومت ویژه حدود ۱۱۸ اهم‌متر در عمق بیش از ۱۰۵ متر در محل این سونداژ وجود داشته باشد.

جدول ۱۵-۳: نتایج تفسیر سونداژ S08 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۶۷۵	۲/۰۵	۲/۰۵
۲	۴۷۰	۳/۲۲	۱/۱۷
۳	۶۷۰	۱۵	۱۱/۷۸
۴	۵۱۰	۵۸	۴۳
۵	۷۹۰	۱۱۶	۵۸
۶	۶۸۰	۱۲۰	۴
۷	۱۰۶۰	۲۶۰	۱۴۰
۸	۵۳۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 45.09%

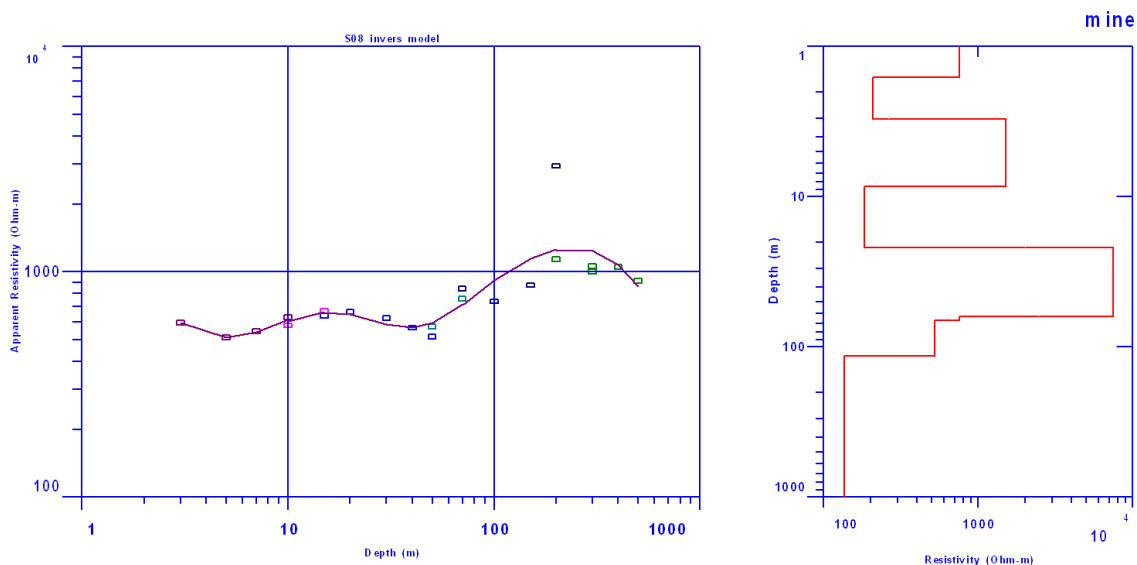


شکل ۳-۱۸: نتایج مدل سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S08.

جدول ۳-۱۶: نتایج مدل سازی وارون داده های سونداژ S08 پس از ۹ مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۷۳۸/۵۱	۱/۶۷۴۳	۱/۶۷۴۳
۲	۱۹۶/۵۰	۳/۰۴۸۱	۱/۳۷۳۸
۳	۱۶۶۸/۷	۸/۱۰۴۷	۵/۰۵۶۵
۴	۱۶۵/۶۱	۲۰/۱۲۱	۱۲/۰۱۷
۵	۸۰۱۰/۱	۵۹/۲۲۶	۳۹/۱۰۵
۶	۷۵۷/۸۶	۶۲/۹۱۴	۳/۶۸۸۰
۷	۵۰۱/۶۹	۱۰۵/۷۱	۴۲/۷۹۵
۸	۱۱۸/۳۴	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 23.62%



شکل ۳-۱۹: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S08 پس از ۹ مرحله تکرار.

### ر- سونداژ S09

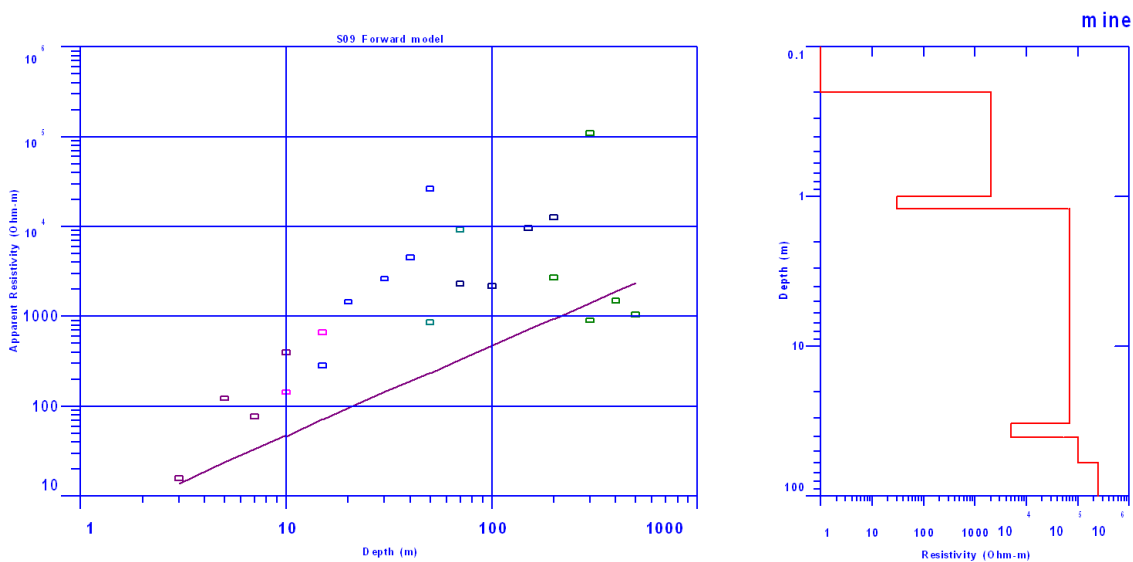
نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو به ترتیب در جدول ۳-۱۷ و شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۳-۱۸ و شکل ۳-۲۱ برای تکرار نهایی نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۹۰۷/۴۳ درصد است، که دلیل بالا بودن خطا تغییرات شدید و همچنین نویزی بودن احتمالی داده‌های این سونداژ است. با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۲۶۰/۶۴ درصد کاهش یافته است. در تفسیر این سونداژ، با توجه به بالا بودن مقادیر مقاومت‌ویژه بدست آمده از تفسیر نتایج مدل وارون، هیچ زون آبدار قابل توجهی در محل این سونداژ دیده نمی‌شود.



جدول ۳-۱۷: نتایج تفسیر سونداژ S09 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱	۰/۲	۰/۲
۲	۲۰۰۰	۱	۰/۸
۳	۳۰	۱/۲	۰/۲
۴	۷۰۰۰۰	۳۲/۵	۳۱/۳
۵	۵۰۰۰	۴۰/۵	۸
۶	۱۰۰۰۰۰	۶۰	۱۹/۵
۷	۲۵۰۰۰۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 907.43%

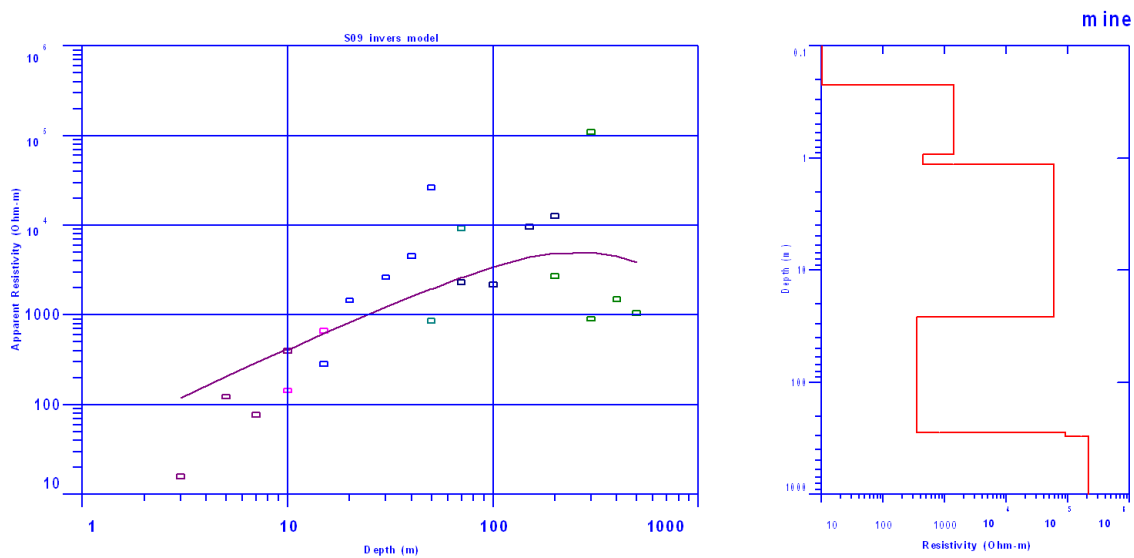


شکل ۳-۲۰: نتایج مدل‌سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S09.

جدول ۳-۱۸: نتایج مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ S09 پس از ۵ مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱۰/۰۶۱	۰/۲۲۴۸۳	۰/۲۲۴۸۳
۲	۱۳۸۵/۴	۰/۹۲۶۹۷	۰/۷۰۲۱۴
۳	۴۴۰/۱۴	۱/۱۳۵۷	۰/۲۰۸۷۶
۴	۵۸۴۶۸	۲۶/۰۸۹	۲۴/۹۵۴
۵	۳۴۵/۹۳	۲۷۹/۰۷	۲۵۲/۹۸
۶	۹۱۰۸۹	۳۰۵/۷۵	۲۶/۶۸۲
۷	۲۱۶۶۶۰	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 260.64%



شکل ۳-۲۱: مدل وارون برازش داده‌شده به داده‌های سونداژ S09 پس از ۵ مرحله تکرار.

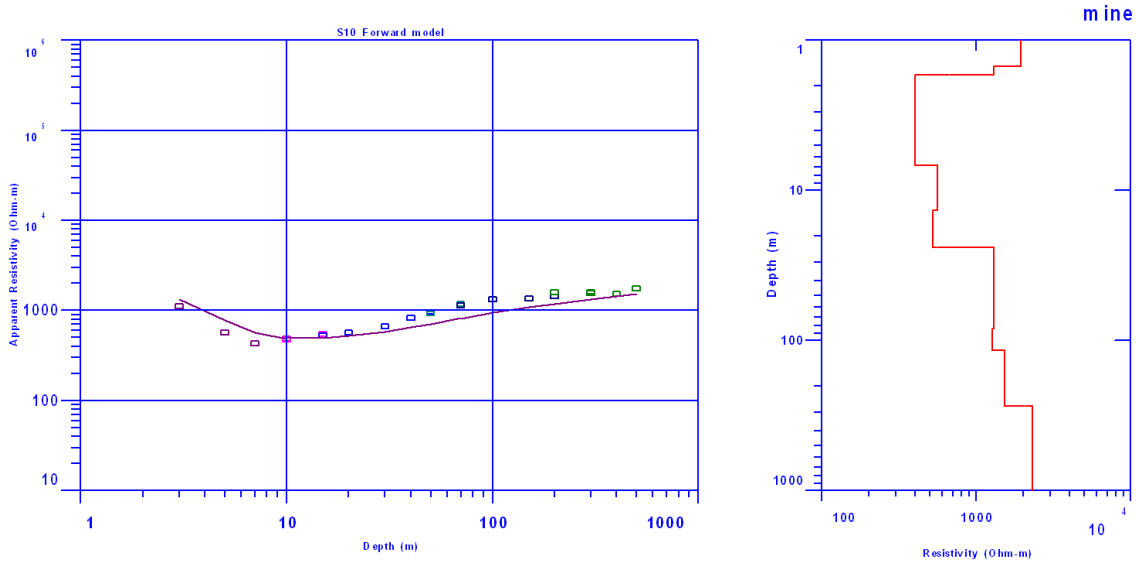
## ز- سونداژ S10

نتایج تفسیر این سونداژ با استفاده از منحنی‌های استاندارد و مدل‌سازی پیشرو به ترتیب در جدول ۱۹-۳ و شکل ۲۲-۳ نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی وارون نیز در جدول ۲۰-۳ و شکل ۲۳-۳ برای تکرار نهایی نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل پیشرو ۲۴/۹۷ درصد است. با انجام مدل‌سازی وارون داده‌های سونداژ در مراحل تکرار نهایی، به ۳/۲۵ درصد کاهش یافته است. با توجه به نتایج مدل‌سازی وارون، مقاومت ویژه لایه ژئوالکتریکی بدست آمده در محل این سونداژ، نسبتاً بالا بوده و در نتیجه وجود هیچ زون آبدار قابل توجهی در محل این سونداژ پیش‌بینی نمی‌گردد.

جدول ۱۹-۳: نتایج تفسیر سونداژ S10 با استفاده از منحنی استاندارد دو لایه‌ای شلومبرژه.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۱۹۵۰	۱/۵	۱/۵
۲	۱۳۰۰	۱/۷	۰/۲
۳	۴۰۰	۶/۸	۵/۱
۴	۵۶۰	۱۳/۵	۶/۷
۵	۵۲۰	۲۴	۱۰/۵
۶	۱۳۰۰	۸۳	۵۹
۷	۱۲۷۰	۱۱۷	۳۴
۸	۱۵۳۰	۲۷۵	۱۵۸
۹	۲۲۹۵	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 24.97

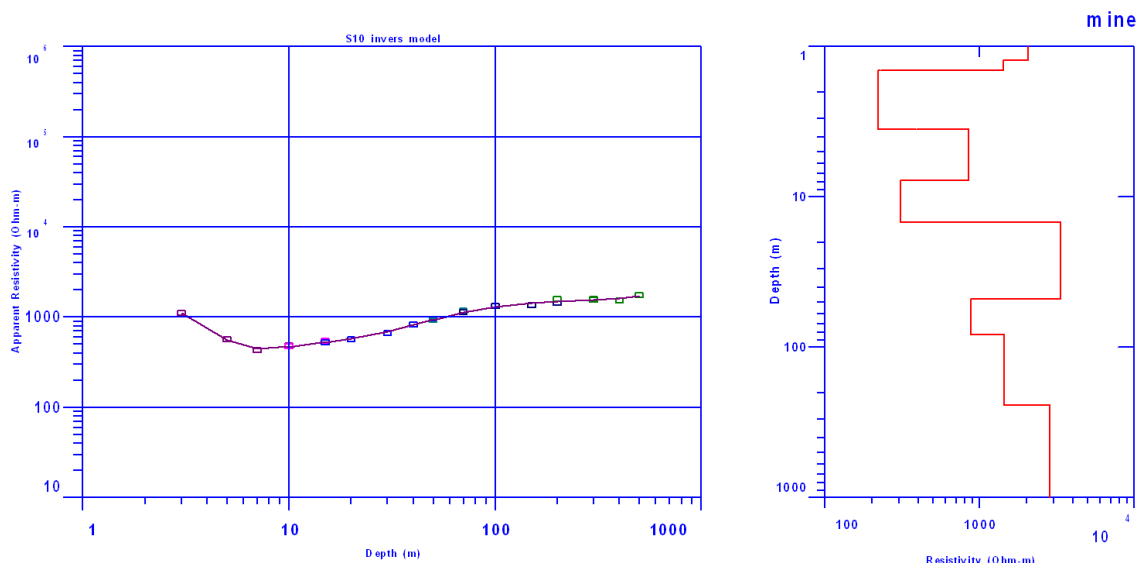


شکل ۳-۲۲: نتایج مدل سازی پیشرو حاصل از مدل اولیه تفسیر کمی سونداژ S10.

جدول ۳-۲۰: نتایج مدل سازی وارون داده های سونداژ S10 پس از ۹ مرحله تکرار.

شماره لایه	مقاومت ویژه (ohm.m)	عمق لایه (m)	ضخامت لایه (m)
۱	۲۰۶۵/۳	۱/۲۲۹	۱/۲۲۹
۲	۱۴۲۷/۸	۱/۴۳۷۴	۰/۲۰۸۲۵
۳	۲۲۰/۹۶	۳/۵۵۷۲	۲/۱۱۹۸
۴	۸۴۶/۰۸	۷/۷۷۲۵	۴/۲۱۵۳
۵	۳۰۸/۷۶	۱۴/۷۷۹	۷/۰۰۶۹
۶	۳۳۳۷	۴۷/۵۹۲	۳۲/۸۱۳
۷	۸۷۸/۲۹	۸۲/۶۰۶	۳۵/۰۱۴
۸	۱۴۴۲/۶	۲۴۱/۸۶	۱۵۹/۲۵
۹	۲۸۴۲/۷	∞	∞

RMS (Root Mean Square Fitting Error)= 3.25%



شکل ۳-۲۳: مدل وارون برآزش داده‌شده به داده‌های سونداژ S10 پس از ۹ مرحله تکرار.

### ۳-۷-۲- تفسیر کمی پروفیل‌های برداشت شده در دره کال قُرنو

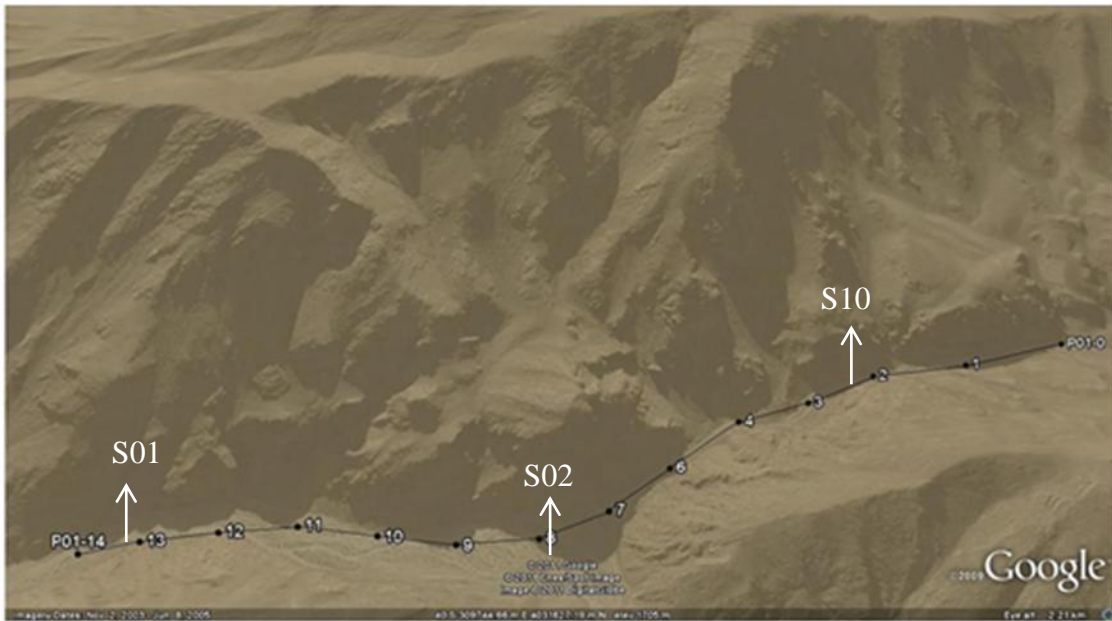
نتایج تفسیر کمی ۴ پروفیل برداشت شده P<sub>01</sub> تا P<sub>04</sub> در زیر آمده است:

#### الف- پروفیل P01

پروفیل P01 اولین پروفیل برداشت شده در منطقه مورد مطالعه است که انتهای آن به فاصله تقریبی ۷۰۰ متری شمال غربی آخرین چاه آب بهره‌برداری در دره کال قُرنو، قرار گرفته است. شکل ۳-۲۴ موقعیت نقاط برداشت بر روی این پروفیل را نشان می‌دهد. طول این پروفیل با ۱۵ نقطه برداشت با فواصل الکترودی ۷۵ متر، برابر ۱۰۵۰ متر است.

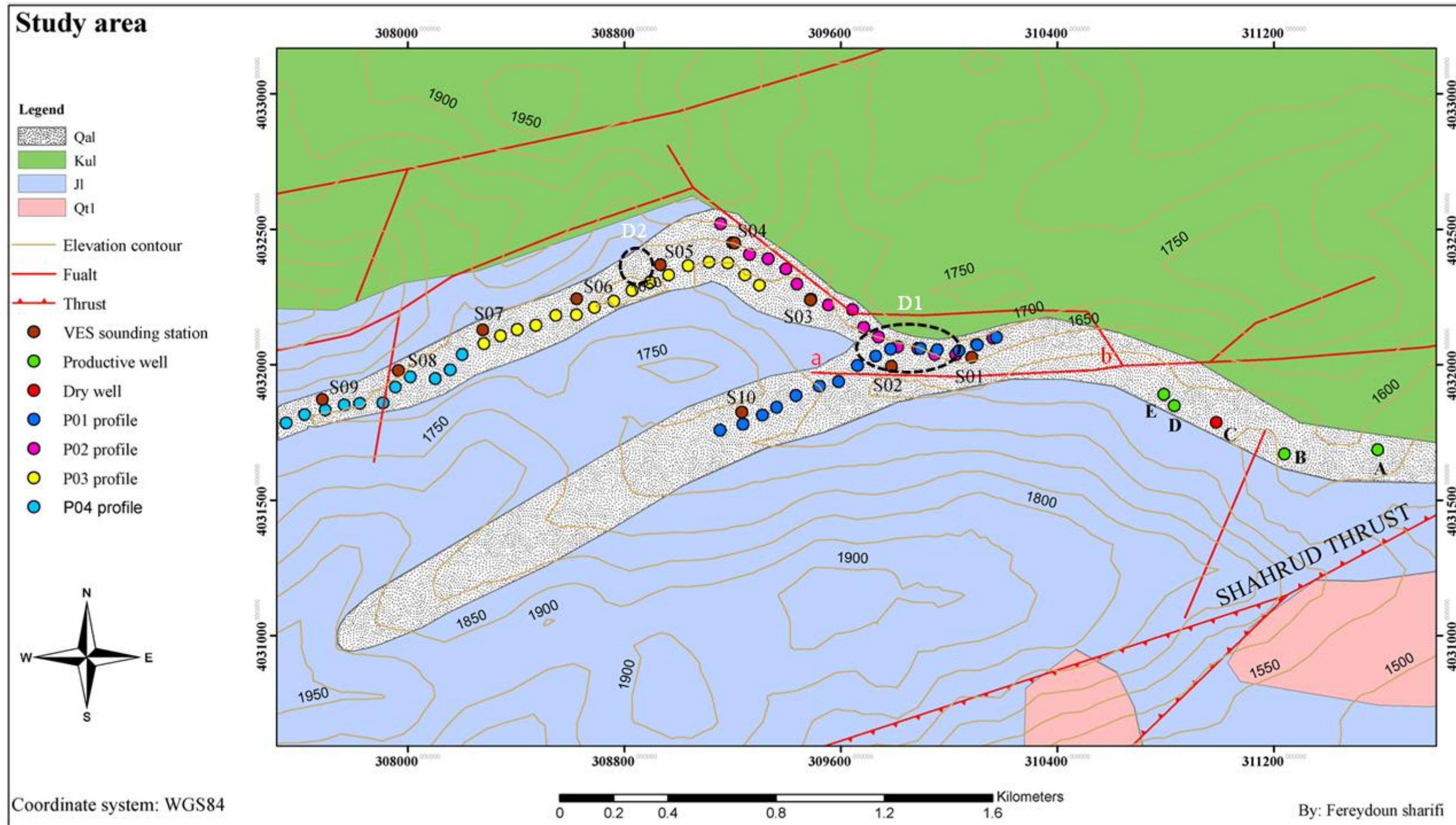
با توجه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۳-۲۵) محل تقاطع دو آبراهه، که با علامت پیکان آبی رنگ مشخص شده‌اند، و گسل ab از لحاظ زمین‌شناسی شرایط بسیار مطلوبی را برای توسعه کارست فراهم نموده است. تقاطع این نشانگرهای سطحی در مسیر برداشت پروفیل P01 قرار گرفته و اثر توسعه پدیده کارست با مقاومت ویژه پایین (منطقه آبی رنگ روی پروفیل که با خطوط بریده بیضی‌شکل به

رنگ سفید قرار گرفته است) روی این پروفیل ظاهر شده است.



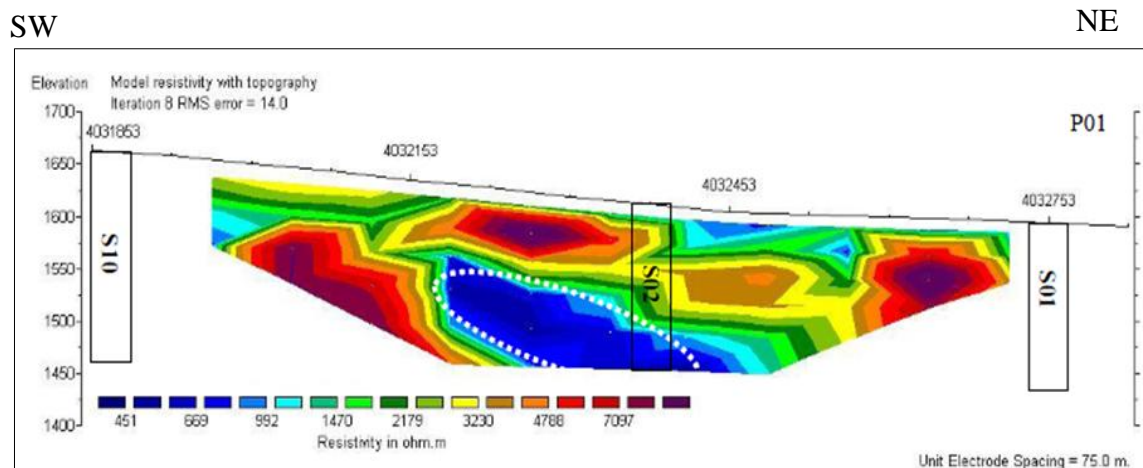
شکل ۳-۲۴: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P01 و تغییرات توپوگرافی منطقه.

مدل‌سازی این پروفیل با روش مدل‌سازی وارون با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV، انجام شده که نتایج آن با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی مسیر برداشت پروفیل، در شکل ۳-۲۶ نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرایی و داده‌های نظری حاصل از مدل اولیه در این پروفیل برابر ۱۴ درصد است؛ که دلیل آن وجود تغییرات نسبتاً زیاد و همچنین وجود نویز احتمالی در داده‌های مقاومت‌ویژه برداشت شده در محل برداشت این پروفیل حدس زده می‌شود.



شکل ۳-۲۵: موقعیت چاه‌های آب موجود در منطقه و سایر نقاط اطلاعاتی بر روی نقشه زمین‌شناسی.





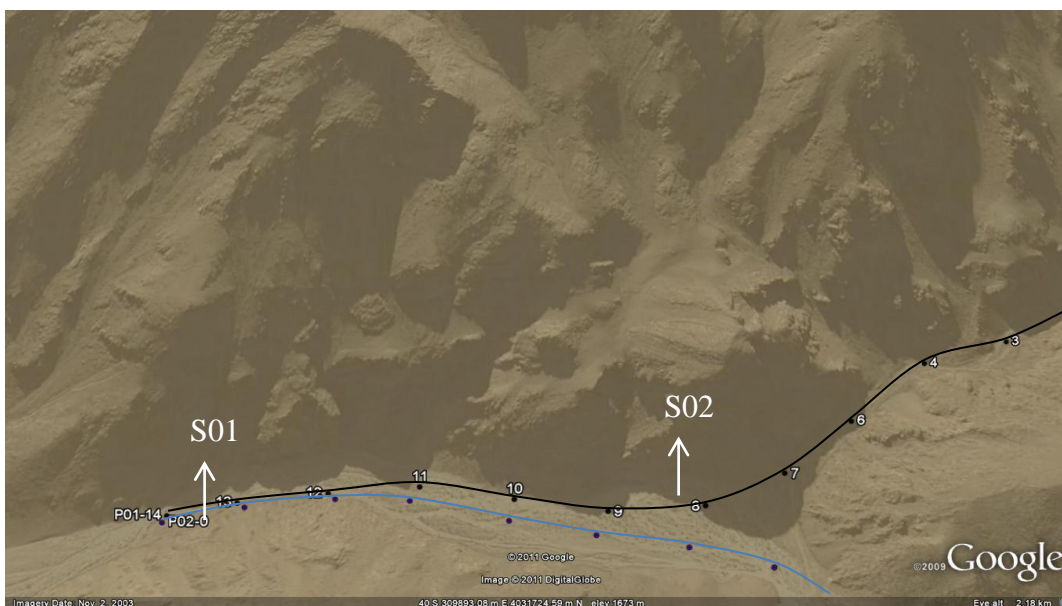
شکل ۳-۲۶: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P01 با استفاده از نرم افزار RES2DINV.

در خصوص تفسیر ساختارهای احتمالی زیر سطحی در محل برداشت این پروفیل، باید اشاره نمود که، نتایج مدل‌سازی وارون سونداژهای واقع در محدوده این پروفیل (S01, S02 و S10) همخوانی بالایی با نتایج مدل وارون این پروفیل دارد (شکل ۳-۲۶). منطقه آبی رنگ با عمق بیش از ۵۰ متر واقع در فواصل بیش از ۳۰۰ تا ۶۰۰ متری مبدا پروفیل P01، می‌تواند نشانگر وجود زون آبدار باشد. در تفسیر سونداژ S02 نیز در عمق بیش از ۹۳ متری محل قرارگیری زون آبدار شناسایی شده بود.

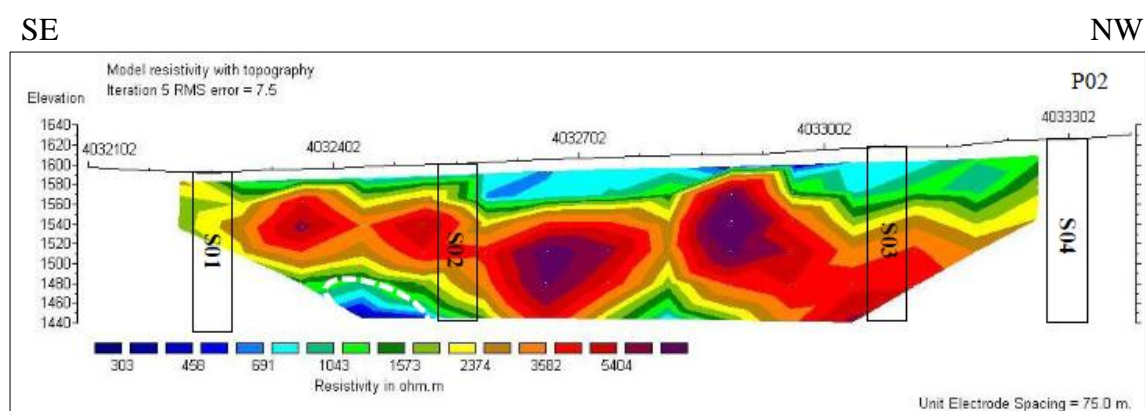
### ب- پروفیل P02

پروفیل P02 دومین پروفیل برداشت شده در منطقه مورد مطالعه است. شکل ۳-۲۷ موقعیت نقاط برداشت بر روی این پروفیل را نشان می‌دهد. طول این پروفیل با ۱۷ نقطه برداشت با فواصل الکترودی ۷۵ متر، برابر ۱۲۷۵ متر است. مدل‌سازی این پروفیل با روش مدل‌سازی وارون با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV، انجام شده که نتایج آن با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی مسیر برداشت پروفیل، در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است.





شکل ۳-۲۷: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P01 و P02 تغییرات توپوگرافی منطقه.



شکل ۳-۲۸: نتایج مدل سازی وارون دوبعدی پروفیل P02 با استفاده از نرم افزار RES2DINV.

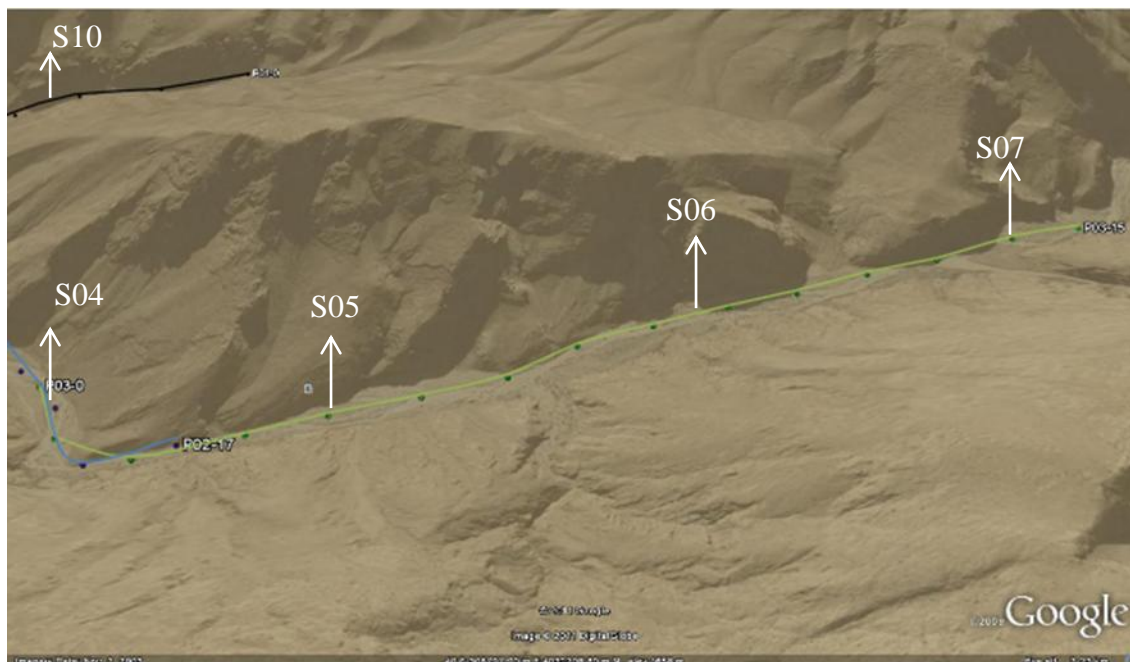
خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل اولیه در این پروفیل برابر ۷/۵ درصد است؛ که خطای اندکی بوده و می‌تواند نشان‌دهنده انطباق بالای نتایج حاصل از برداشت و مدل

بدست آمده باشد.

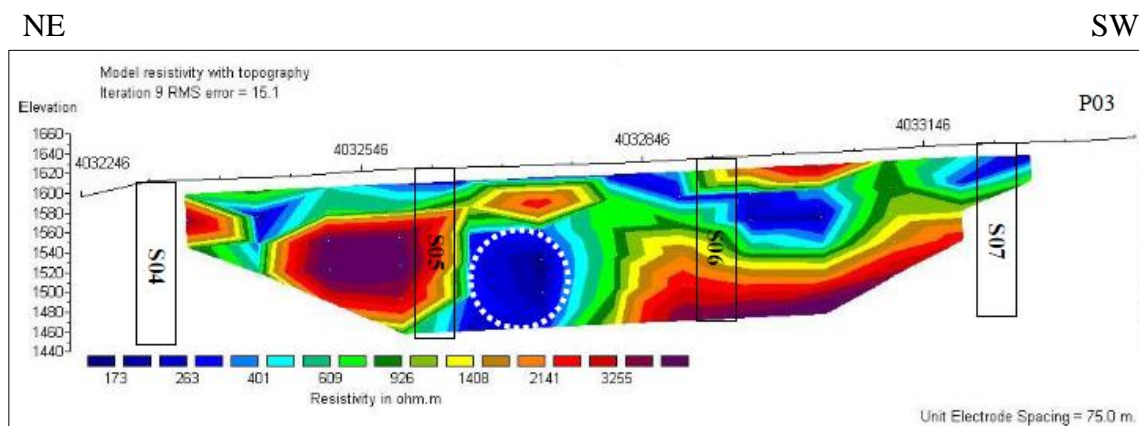
تفسیر ساختارهای احتمالی زیر سطحی در محل برداشت این پروفیل حاکی از انطباق بالای نتایج آن با نتایج مدل‌سازی وارون سونداژهای واقع در محدوده این پروفیل (S01، S02 و S03) است (شکل ۳-۲۸). همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، منطقه آبی رنگ که با خطوط بریده سفید رنگ روی مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی نشان داده شده است، با عمق بیش از ۱۰۰ متر واقع در فواصل بیش از ۲۵۰ تا ۴۵۰ متری مبدا پروفیل P02، می‌تواند نشانگر وجود زون آبدار باشد. در تفسیر سونداژ S02 در عمق بیش از ۹۳ متری و پروفیل P01 نیز محل قرارگیری زون آبدار شناسایی شده است. همچنین تفسیر نتایج مدل‌سازی وارون سونداژ S03 نیز قبلاً وجود هرگونه زون آبدار را تا عمق ۱۵۵ متری نشان داده است، که در این پروفیل هم به‌وضوح قابل تأیید است.

### ج- پروفیل P03

پروفیل P03 سومین پروفیل برداشت شده در منطقه مورد مطالعه است. شکل ۳-۲۹ موقعیت نقاط برداشت بر روی این پروفیل را نشان می‌دهد. طول این پروفیل با ۱۵ نقطه برداشت با فواصل الکترودی ۷۵ متر برابر ۱۱۲۵ متر است. مدل‌سازی این پروفیل با روش مدل‌سازی وارون با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV، انجام شده که نتایج آن با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی مسیر برداشت پروفیل، در شکل ۳-۳۰ نشان داده شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل اولیه در این پروفیل برابر ۱۵/۱ درصد است. که دلیل آن وجود تغییرات نسبتاً زیاد و همچنین وجود نویز در داده‌های مقاومت‌ویژه برداشت شده در محل برداشت این پروفیل حدس زده می‌شود.



شکل ۳-۲۹: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P03 و تغییرات توپوگرافی منطقه.



شکل ۳-۳۰: نتایج مدل سازی وارون دوبعدی پروفیل P03 با استفاده از نرم افزار RES2DINV.

تفسیر ساختارهای احتمالی زیر سطحی در محل برداشت این پروفیل حاکی از انطباق بالای نتایج آن با نتایج مدل سازی وارون سونداژهای واقع در محدوده این پروفیل (S05 و S06) است (شکل ۳-۳۰).

همان گونه که مشاهده می‌شود، احتمالاً منطقه آبی رنگ (دایره خط‌چین با رنگ سفید در اعماق ۶۵ متری و بیشتر) واقع در فاصله ۳۷۵ تا ۵۲۵ متری مبدا پروفیل، می‌تواند نشانگر وجود زون آبدار باشد. سونداژ S05 در عمق بین ۲۵ تا ۴۸ متری مقاومت ویژه افت قابل توجهی نشان داده است؛ که می‌تواند دلیلی بر وجود زون آبدار در این عمق باشد.

#### د- پروفیل P04

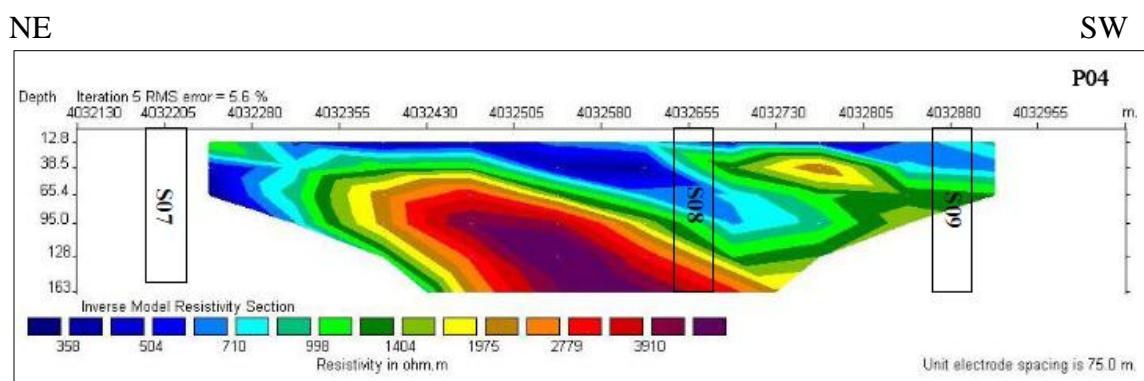
پروفیل P04 چهارمین پروفیل برداشت شده در منطقه مورد مطالعه است. شکل ۳-۳۱ موقعیت نقاط برداشت بر روی این پروفیل را نشان می‌دهد. طول این پروفیل با ۱۳ نقطه برداشت با فواصل الکترونی ۷۵ متر برابر ۹۷۵ متر است.



شکل ۳-۳۱: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P04 و تغییرات توپوگرافی منطقه.

مدل‌سازی این پروفیل با روش مدل‌سازی وارون با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV، انجام شده که نتایج آن با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی مسیر برداشت پروفیل، در شکل ۳-۳۲ نشان داده شده

است. در این پروفیل شیب توپوگرافی کم‌تر از ۱۰ درجه بوده و به همین منظور از اثر ناچیز توپوگرافی توسط نرم‌افزار نیز، چشم‌پوشی شده است. خطای برازش بین داده‌های صحرائی و داده‌های نظری حاصل از مدل اولیه در این پروفیل برابر ۵/۶ درصد است؛ که خطای اندکی بوده و می‌تواند نشان‌دهنده انطباق بالای نتایج حاصل از برداشت و مدل بدست آمده باشد.

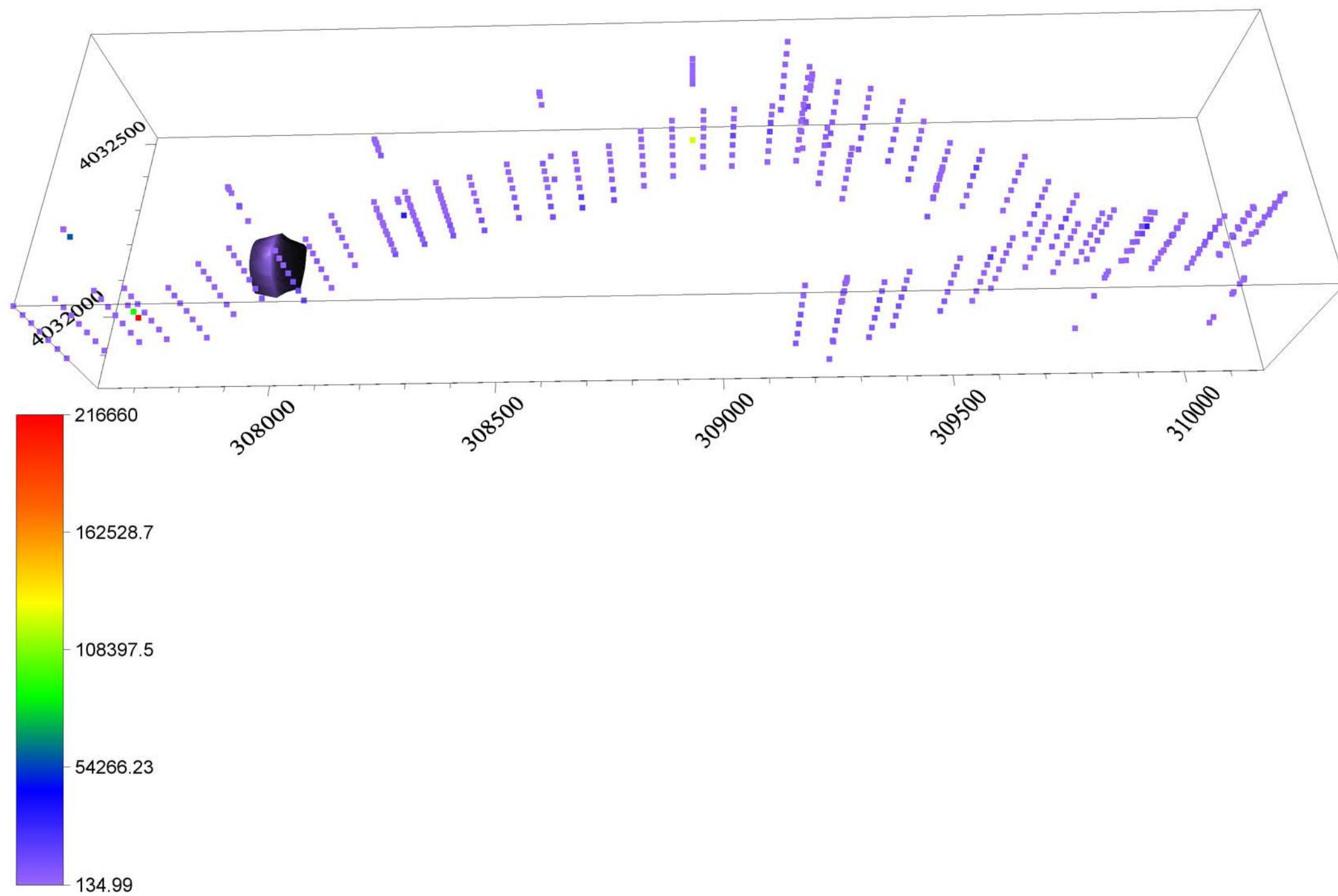


شکل ۳-۳: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P04 با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV.

تفسیر ساختارهای احتمالی زیرسطحی در محل این پروفیل برداشت حاکی از عدم وجود هرگونه زون احتمالی آبدار در این محدوده است (شکل ۳-۳).

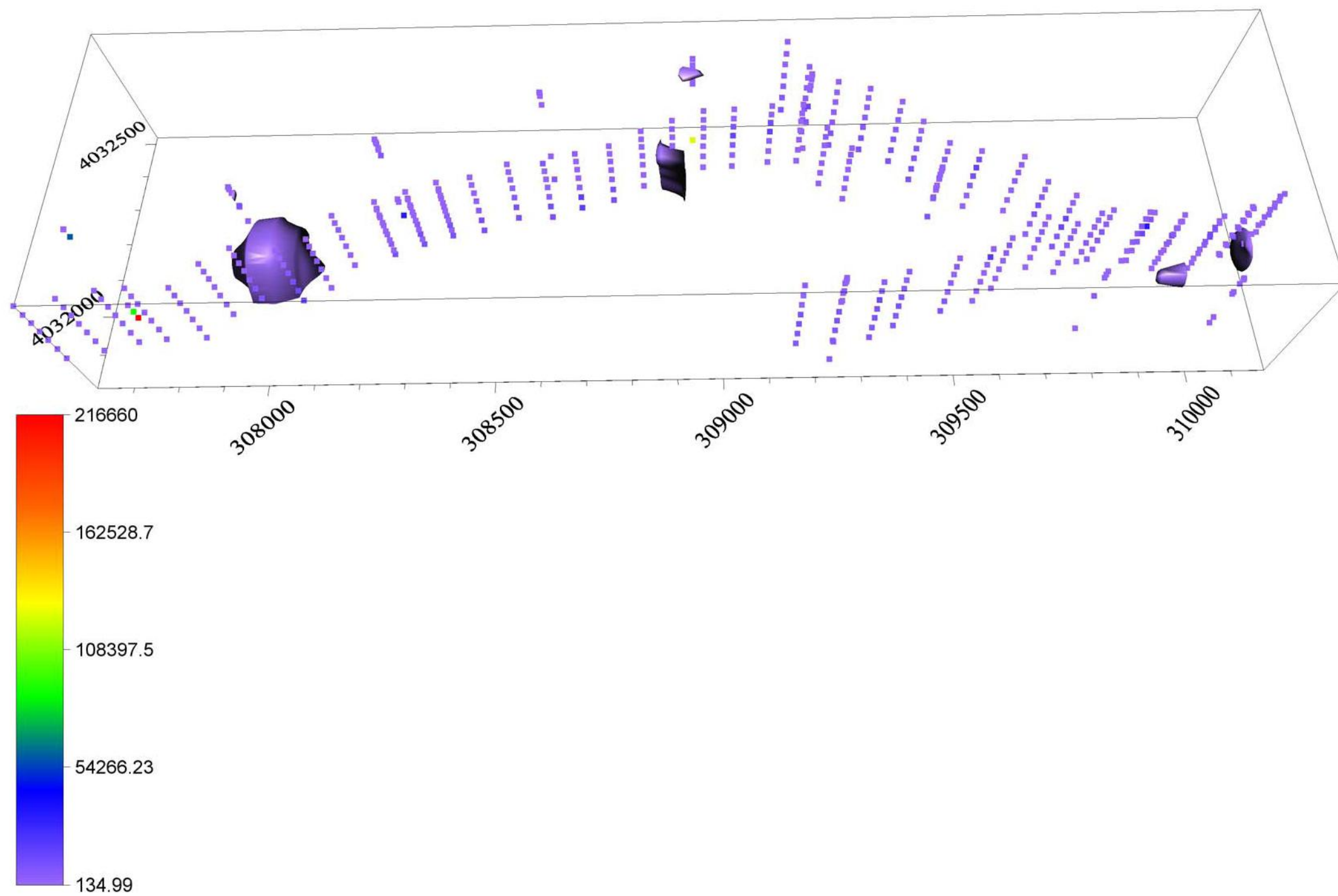
### ۳-۷-۳- مدل سه‌بعدی داده‌های مقاومت‌ویژه در منطقه تپال

برای به تصویر کشیدن ارتباط بین داده‌های مقاومت‌ویژه و تعیین وضعیت تقریبی زون‌های آبدار؛ اطلاعات بدست‌آمده از مدل‌سازی وارون دو روش سونداژزنی و پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه با استفاده از نرم‌افزار Voxler با هم ترکیب گردید. نتایج بدست آمده در شکل ۳-۳۳، شکل ۳-۳۴، شکل ۳-۳۵ و شکل ۳-۳۶ نشان داده شده است. در شکل ۳-۳۳، نقشه هم‌مقاومت‌ویژه به ازای مقادیر مقاومت‌ویژه ۱۴۰ اهم‌متر ترسیم گردیده است. همان‌گونه که قبلاً در تفسیر سونداژ S08 بیان گردید، این مقدار از مقاومت‌ویژه می‌تواند بیانگر حضور زون آبدار باشد.

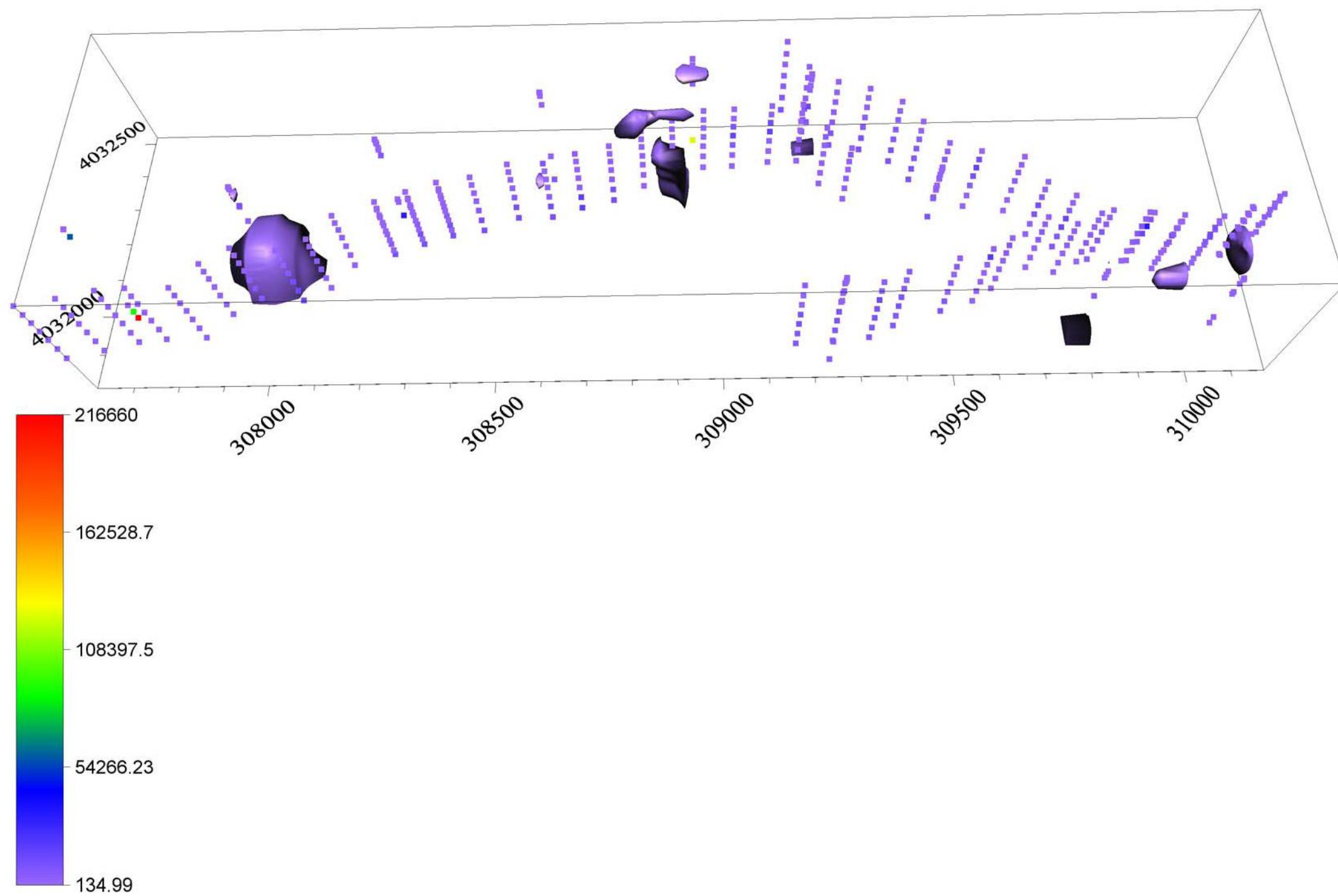


شکل ۳-۳۳: نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقاومت ویژه ۱۴۰ اهم‌متر



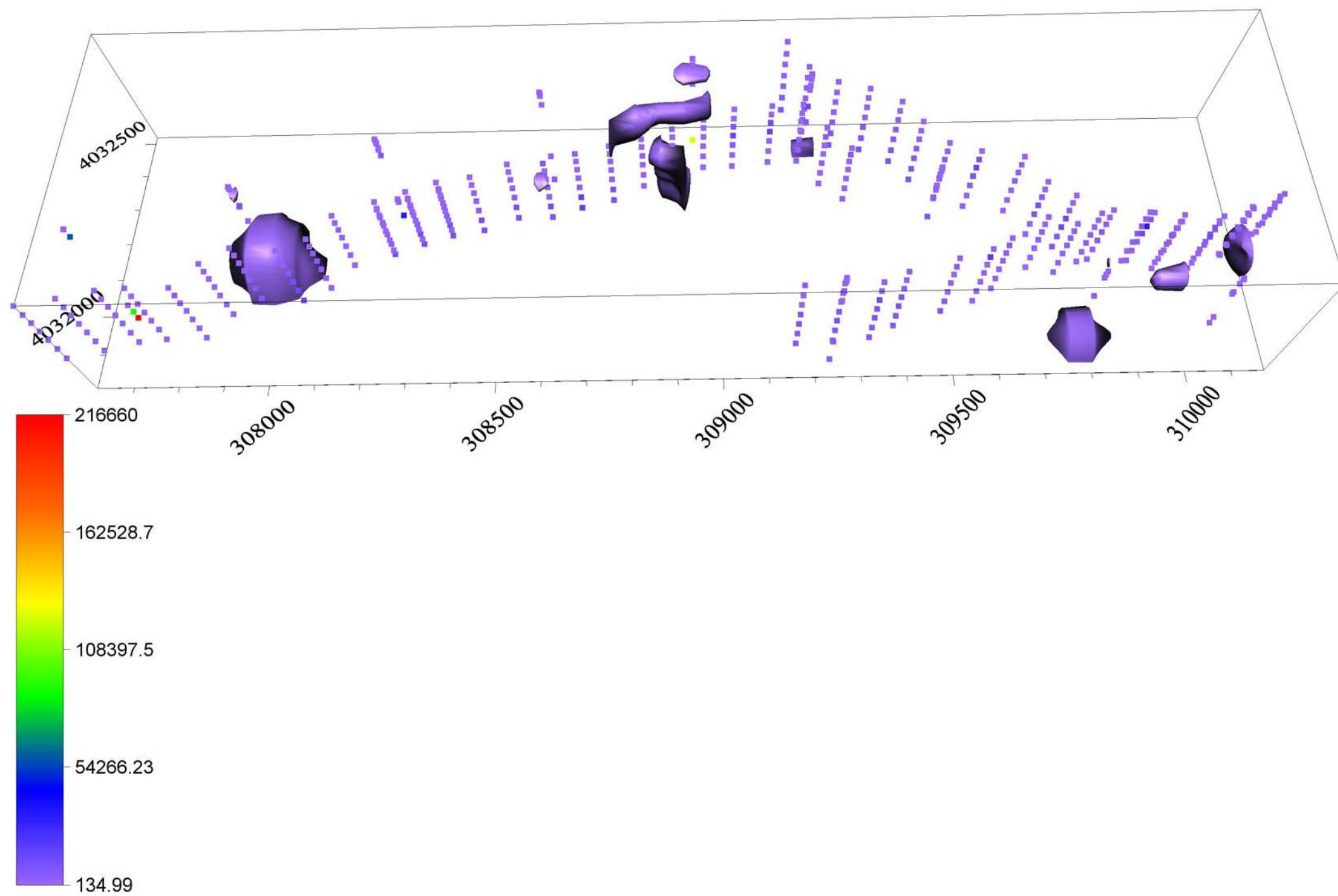


شکل ۳-۳۴: نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقاومت ویژه ۲۳۰ اهم‌متر



شکل ۳-۳۵: نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقاومت ویژه ۲۷۶ اهم‌متر





شکل ۳-۳۶: نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقاومت ویژه ۳۰۰ اهم‌متر

در شکل ۳-۳۴، نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقادیر مقاومت ویژه ۲۳۰ اهم‌متر به تصویر کشیده شده است؛ که منطبق بر محل پروفیل‌های P01، P02، P03، سونداژهای S05 و S08 بیانگر پتانسیل متوسط زون آبدار است.

در شکل ۳-۳۵، نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقادیر مقاومت ویژه ۲۷۶ اهم‌متر، ترسیم شده است که این مقدار از مقاومت ویژه در مقایسه با شکل ۳-۳۴ می‌تواند بیانگر پتانسیل ضعیف زون آبدار در محل سونداژهای S02 و S04 باشد. شکل ۳-۳۶ نیز نقشه هم‌مقاومت ویژه به ازای مقادیر مقاومت ویژه ۳۰۰ اهم‌متر را نشان می‌دهد که در اطراف زون‌های احتمالی آبدار متمرکز شده است.

## ۴- فصل چهارم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

#### ۱-۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

لیتولوژی، میزان توسعه درزه و شکستگی‌ها در اثر فرآیندهای تکتونیکي مانند گسل و چین‌خوردگی، شرایط اقلیمی و آب و هوایی مانند میزان نزولات جوی، دما، فشار گاز CO<sub>2</sub>، پوشش گیاهی، پوشش خاک، شیب توپوگرافی و شیب لایه‌بندی و ویژگی‌های ژئومورفولوژی از جمله آبراهه‌ها، از عوامل تأثیرگذار در کنترل فرآیند تشکیل کارست‌ها هستند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۳-۲)، برونزد سنگ آهک‌های خالص سازند لار (JI)، توسعه گسل و شکستگی‌های متعدد و شیب کم لایه‌بندی که شرایط مساعدی برای توسعه کارست‌های آهکی را در منطقه مورد مطالعه فراهم نموده است، می‌توان مشاهده نمود. همچنین متوسط بارندگی سالانه در شاهرود ۱۳۰ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین شرایط وجود زون‌های آبدار کارستی در این منطقه محتمل است؛ که حضور چاه‌های بهره‌برداری آب در این منطقه (جدول ۴-۱)، این احتمال را به یقین تبدیل نموده است. همین امر می‌تواند دلیل اصلی جستجوی منابع جدید آب‌های کارستی در این منطقه باشد.

از جمله عوارض ژئومورفولوژیکی که در پدیده نفوذ نیز مؤثر است و خود معلول عوامل دیگر می‌باشد، آبراهه‌ها است. آبراهه‌ها در مناطق پرشیب تشکیل می‌شوند و با ایجاد رواناب تا حدودی در نفوذ آب نقش دارند. بخش قابل توجهی از طول دره‌ها (بین ۶۰ تا ۸۰ درصد) بخصوص دره‌های فرعی، در مناطق کربناته توسط تمرکز عمل انحلال و هوازدگی در راستای مسیر شکستگی‌ها کنترل می‌شوند. و چاه‌هایی که در کف دره‌ها حفر شده باشند، نسبت به چاه‌هایی که در همان نوع لیتولوژی، در نقاط مرتفع مجاور دره حفر شده باشند، با سنگ‌های به مراتب دارای تخلخل و هوازدگی شدیدتر برخورد خواهند نمود. لذا به خاطر افزایش شانس برخورد با زون‌های کارستی و نیز شرایط توپوگرافی منطقه، برداشت‌های ژئوالکتریکی در بستر آبراهه اصلی موجود در این منطقه انجام پذیرفته است.

جدول ۱-۴: اطلاعات مربوط به عمق و عمق سطح آب چاه‌های موجود در منطقه

چاه	A	B	C	D	E
عمق سطح آب (متر)	-	-	خشک	۱۵۰	۱۶۵
عمق چاه (متر)	۱۲۰	۱۶۰	-	۳۰۰	۲۸۰

با توجه به تباین بالای مقاومت‌ویژه الکتریکی در زون‌های کارستی آبدار با سنگ بستر آنها و نیز، آشکارسازی زون‌های آبدار کارستی هدف اکتشافی مناسبی در جهت به‌کارگیری روش‌های مقاومت-ویژه الکتریکی می‌باشند. در منطقه مورد مطالعه به خاطر شیب نسبتاً کم لایه‌بندی (شکل ۲-۳)، عمق نسبتاً زیاد سطح آب (جدول ۱-۴) با استفاده از سونداژزنی به‌کمک آرایه شلومبرژه قابل آشکارسازی است. همچنین حضور ناهمگنی جانبی از ویژگی‌های ذاتی رخساره‌های کارستی است. با توجه به پایین بودن حساسیت جانبی آرایه شلومبرژه تأثیر این ناهمگنی‌ها روی منحنی سونداژ الکتریکی تهیه شده به‌کمک این آرایه، نسبت به سایر آرایه‌های الکترودی مورد استفاده در سونداژزنی الکتریکی کمتر خواهد بود و منحنی‌های سونداژزنی شلومبرژه نسبتاً پایدارتر است.

برای کسب اطلاعات کامل‌تر از زیر سطح زمین و به تصویر کشیدن ناهمگنی‌های جانبی استفاده از روش پروفیل‌زنی، اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به تحقیقات ژو (۲۰۰۲) و لوک (۲۰۰۴) استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی برای این منظور مناسب است. اما با توجه به محدودیت‌های این آرایه، دسترسی به عمق کاوش بالا و حفظ قدرت تفکیک مناسب به‌صورت همزمان، در این روش هم محدود خواهد بود.

با در نظر گرفتن حساسیت پایین به تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه و عمق کاوش مناسب آرایه شلومبرژه و مزایای آرایه دوقطبی-دوقطبی، به‌ویژه عمق کاوش متوسط، پایین بودن جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین دوقطبی‌های جریان و پتانسیل و حساسیت بالای آن به تغییرات افقی مقاومت-

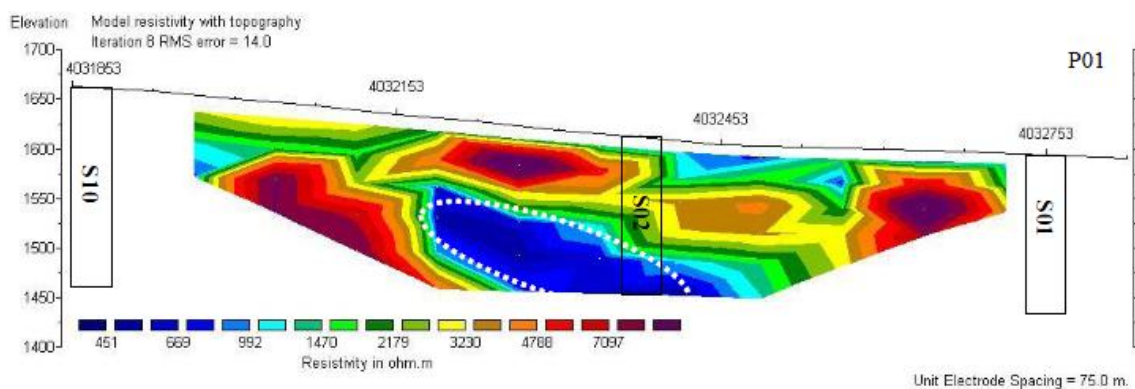
ویژه؛ و با توجه به ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه و عمق کاوش مورد نیاز و همچنین بررسی ناهمگنی‌های جانبی در این منطقه ترکیب روش سونداژزنی با بکارگیری آرایه شلومبرژه و پروفیل‌زنی با بکارگیری آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی اطلاعات کافی را از این منطقه فراهم ساخت.

#### ۲-۴- پیشنهادات

با توجه به نتایج تفسیر سونداژهای الکتریکی (جدول ۲-۴) و پروفیل‌های برداشت‌شده در منطقه و به کمک منحنی‌های استاندارد و نرم‌افزارهای IX1D و RES2DINV، مدل‌سازی یک و دو بعدی وارون انجام شد و نتایج با دقت بالایی به دست آمد. براساس نتایج بدست‌آمده می‌توان چنین استنباط کرد که به‌طور کلی تنها در مناطقی از پروفیل P01، بخش کوچکی از P02، که در واقع بخشی از همان آنومالی موجود روی پروفیل P01 می‌باشد؛ و P03 استعداد وجود زون‌های آبدار از دیدگاه ژئوفیزیکی وجود دارد. لذا به جهت رعایت اختصار، تنها مناطقی که احتمالاً مستعد وجود زون آبدار می‌باشند؛ معرفی شده‌اند.

جدول ۴-۲: خلاصه نتایج تفسیر منحنی‌های سونداژزنی الکتریکی در منطقه تپال

سونداژ	نتایج تفسیر
S01	نشان‌دهنده ۹ لایه مقاوم الکتریکی و عدم حضور زون آبدار در محل برداشت این سونداژ
S02	در عمق بیشتر از ۹۳ متری، مقاومت ویژه به ۲۷۵ اهم‌متر کاهش یافته که می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل ضعیف تا متوسط حضور زون آبدار در محل برداشت این سونداژ باشد.
S03	در عمق بیشتر از ۱۷۶ متری، مقاومت ویژه به ۹۳ اهم‌متر کاهش یافته که می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل خوبی برای حضور زون آبدار در محل برداشت این سونداژ باشد.
S04	در عمق بیشتر از ۱۵۵ متری، مقاومت ویژه به ۲۳۳ اهم‌متر کاهش یافته که می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل ضعیفی برای حضور زون آبدار در محل برداشت این سونداژ باشد.
S05	در عمق ۲۵ تا ۴۸ متری، پتانسیل متوسطی برای حضور زون آبدار وجود دارد.
S06	مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطحی بیشتر از آن است که بتوانند دربرگیرنده زون آبدار باشند.
S07	مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطحی بیشتر از آن است که بتوانند دربرگیرنده زون آبدار باشند.
S08	در عمق بیشتر از ۱۰۵ متری، احتمال حضور زون آبدار با مقاومت ویژه ۱۱۸ اهم‌متر وجود دارد.
S09	مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطحی بیشتر از آن است که بتوانند دربرگیرنده زون آبدار باشند.
S10	مقاومت ویژه ساختارهای زیر سطحی بیشتر از آن است که بتوانند دربرگیرنده زون آبدار باشند.



شکل ۴-۱: نتایج مدل‌سازی وارون دوبعدی پروفیل P01 با استفاده از نرم افزار RES2DINV.



شکل ۴-۲: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل‌های P01 و P02 و تغییرات توپوگرافی منطقه و

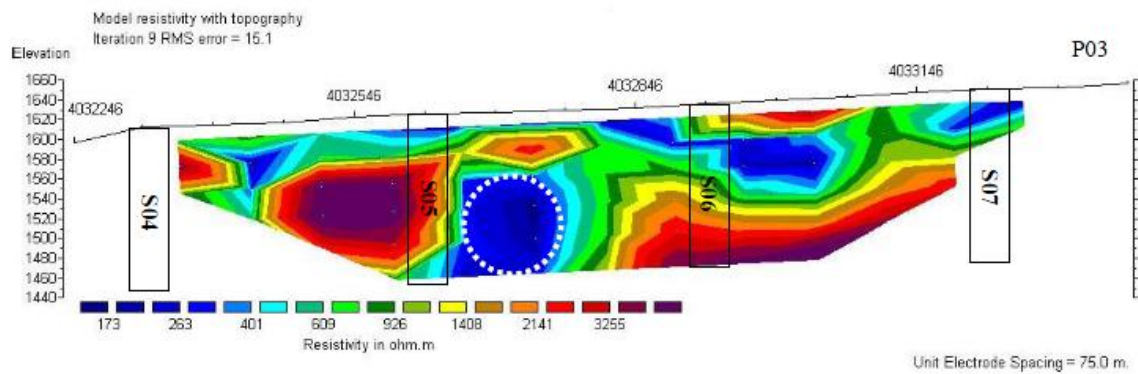
محل احتمالی حضور زون آبدار.

همان گونه که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، منطقه آبی رنگ با مقاومت ویژه پایین (بیضی خط‌چین به رنگ سفید) در فواصل ۳۵۰ تا ۵۵۰ متری مبدا پروفیل P01 و در اعماق بیش از ۹۳ متری که اتفاقاً سونداژ S02 نیز در مجاورت آن واقع شده است؛ می‌تواند یک زون احتمالی با پتانسیل مطلوب آب باشد. محل قرارگیری این زون در سطح زمین نیز در شکل ۴-۲ با یک بیضی با خط‌چین سفید رنگ مشخص شده است (ناحیه D1 در شکل ۴-۶).

اولویت بعدی در معرفی منطقه با پتانسیل مطلوب آب در شکل ۴-۳ قابل مشاهده است. در این شکل نیز منطقه آبی رنگ با مقاومت ویژه پایین (دایره خط‌چین به رنگ سفید) در فاصله ۴۰۰ تا ۵۰۰ متری مبدا پروفیل P03 و در اعماق بیش از ۶۵ متری مقطع که سونداژ S05 نیز در حاشیه آن واقع شده؛ می‌تواند یک زون احتمالی با پتانسیل مطلوب آب باشد. محل قرارگیری این زون نیز بر روی سطح



زمین در شکل ۴-۴ با یک بیضی با خطچین سفید رنگ نشان داده شده است ( ناحیه D2 در شکل ۴-۶).



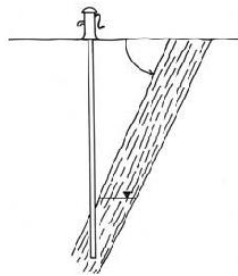
شکل ۴-۳: نتایج مدل سازی وارون دوبعدی پروفیل P03 با استفاده از نرم افزار RES2DINV.



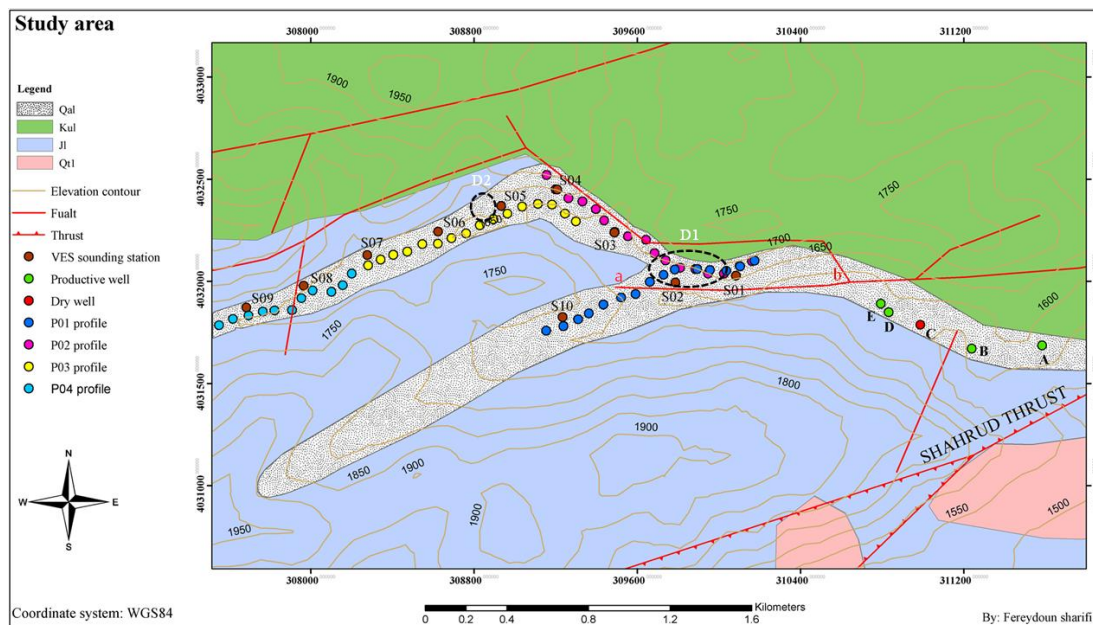
شکل ۴-۴: موقعیت نقاط برداشت مربوط به پروفیل P03 و تغییرات توپوگرافی منطقه و محل احتمالی

حضور زون آبدار.

در تعیین محل حفاری باید جهت شیب زون خرد شده را در نظر گرفت و آن را مطابق شکل ۴-۵ در جهت شیب زون خردشده در نظر گرفت. با توجه به شکل ۴-۶ مسیر پروفیل P01، امتداد گسل ab را قطع نموده است و اثر آن در مجموع با تأثیر محل تقاطع دو آبراهه اصلی، مقاومت ویژه پایینی را روی دو پروفیل P01 و P02 نشان داده است. با توجه به نحوه تقاطع آن با پروفیل P01 می‌توان گفت که شیب گسل به سمت شمال است و در تعیین محل حفاری در محل D1 (شکل ۴-۶) باید این نکته را مد نظر قرار داد. لذا در کل دو محل D1 و D2 در روی شکل ۴-۶ بعنوان محل‌های امیدبخش حفاری در این منطقه معرفی می‌گردد.



شکل ۴-۵: تعیین محل حفر چاه با در نظر گرفتن جهت شیب زون خردشده.



شکل ۴-۶: محل پیشنهادی D1 و D2 برای حفر چاه آب بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد

مطالعه.

پیوست‌ها

پیوست الف: مشخصات داده‌های خام ده سونداژ مقاومت ویژه برداشت شده در دره کمال قزوین

AB/2 (m)	MN/2 (m)	S <sub>01</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>02</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>03</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>04</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>05</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>06</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>07</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>08</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>09</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)	S <sub>10</sub> ρ <sub>a</sub> (Ωm)
3	1	422.49	972.32	792.22	941.58	873.32	703.68	894.26	594.02	15.77	1108.56
5	1	198.90	822.29	602.62	824.51	654.79	558.66	845.59	512.82	122.65	564.99
7	1	203.50	701.52	596.66	816.64	597.09	546.6	836.77	545.32	77.34	430.86
10	1	289.64	545.12	668.91	755.74	571.81	563.38	854.09	626.75	399.95	488.84
10	2.5	275.82	535.66	656.20	666.75	565.44	524.24	841.10	578.52	143.88	473.3
15	1	405.69	441.09	797.24	795.30	547.03	587.43	850.51	670.18	666.56	546.75
15	2.5	394.38	428.29	781.47	716.36	539.53	550.16	846.8	638.27	283.27	522.58
20	2.5	455.83	458.61	873.17	780.25	438.44	550.69	877.73	661.99	1452.68	571.3
30	2.5	573.52	553.24	883.84	1153.73	461.38	521.25	807.52	623.44	2633.21	667.98
40	2.5	661.41	639.18	943.77	1104.12	665.74	468.69	939.17	564.90	4519.14	824.89
50	2.5	771.68	845.39	1015.97	1063.57	656.11	442.34	809.4	515.26	26534.91	960.27
50	10	845.63	690.39	983.98	1068.84	507.24	439.99	716.36	570.01	861.54	923.67
70	2.5	802.99	990.83	1034.59	1309.45	425.62	481.83	765.42	761.76	9202.67	1172.77
70	10	899.35	967.06	1072.92	1169.43	463.86	463.09	692.89	840.99	2298.74	1140.02
100	10	964.06	1226.92	1160.64	1216.03	86.41	456.48	744.93	738.93	2179.14	1326.27
150	10	1246.21	1531.89	1258.14	1605.71	713.99	574.87	1234.25	872.43	9664.14	1361.62
200	10	999.41	1504.32	1322.06	2048.46	721.39	627.56	1137.86	2950.10	12614.55	1427.29
200	40	1539.63	1369.07	1384.09	1512.79	878.31	593.28	934.26	1134.20	2715.09	1595.28
300	10	854.98	1218.64	1601.94	4888.57	644.56	889.34	1288.61	999.81	109982.1	1569.32
300	40	1227.97	1145.01	1644.78	2095.72	564.97	716.46	1274.49	1059.19	905.86	1605.7
400	40	1117.18	1046.39	1570.83	2112.68	856.73	746.82	1392.30	1049.31	1491.83	1539.48
500	40	1006.68	723.10	1221.48	2046.52	6218.2	1277.66	1950.05	909.85	1046.28	1755.84

پیوست ب: داده‌های خام برداشت شده مربوط به پروفیل P<sub>01</sub>

Northing	n	Roh( $\Omega$ m)	Northing	n	Roh( $\Omega$ m)
4031853	1	1925.5667	4031853	4	1790.4477
4031928	1	2046.7187	4031928	4	886.7983
4032003	1	2026.3617	4032003	4	1981.4352
4032078	1	2511.6764	4032078	4	1730.0555
4032153	1	2745.0741	4032153	4	1656.3465
4032228	1	2.5794	4032228	4	2160.2368
4032303	1	1336.5590	4032303	4	2361.2896
4032378	1	1469.0911	4032378	4	2216.3314
4032453	1	1113.7780	4031853	5	348092.0226
4032528	1	1852.7625	4031928	5	1295.1030
4032603	1	1739.3857	4032003	5	630.3577
4031853	2	2239.0916	4032078	5	1318.4569
4031928	2	1648.0623	4032153	5	1325.5818
4032003	2	2158.1163	4032228	5	2547.1596
4032078	2	2469.0117	4032303	5	1521.9625
4032153	2	2171.0090	4031853	6	882.6987
4032228	2	1836.2507	4031928	6	552.4427
4032303	2	1986.2134	4032003	6	1533.4415
4032378	2	1643.9909	4032078	6	1571.0453
4032453	2	1823.4711	4032153	6	2213.7133
4032528	2	2867.2156	4032228	6	1806.7219
4031853	3	1921.7498	4031853	7	893.5365
4031928	3	1892.9108	4031928	7	2161.5826
4032003	3	1977.5900	4032003	7	471.3255
4032078	3	1575.2581	4032078	7	1203.1618
4032153	3	1236.4708	4032153	7	942.6509
4032228	3	2154.4407	4031853	8	476.0466
4032303	3	2020.0002	4031928	8	1514.9620
4032378	3	1998.2296	4032003	8	5438.6905
4032453	3	1767.5179	4032078	8	2524.9366

پیوست ج: داده‌های خام برداشت شده مربوط به پروفیل P<sub>02</sub>

Northing	n	Roh(Ωm)	Northing	n	Roh(Ωm)
4032102	1	1284.91748	4032402	4	2159.07755
4032177	1	2017.17286	4032477	4	2505.93685
4032252	1	1634.49104	4032552	4	1369.87935
4032327	1	1995.82637	4032627	4	1627.19647
4032402	1	1059.06876	4032702	4	1844.16731
4032477	1	971.604691	4032777	4	2602.1233
4032552	1	901.444001	4032852	4	2387.27297
4032627	1	903.409009	4032927	4	1221.01937
4032702	1	1562.67635	4032102	5	736.439855
4032777	1	1088.06324	4032177	5	1282.78283
4032852	1	944.052165	4032252	5	1500.29087
4032927	1	696.13598	4032327	5	2496.79037
4033002	1	930.028509	4032402	5	905.557795
4033077	1	1010.9614	4032477	5	1988.3975
4033152	1	1336.57317	4032552	5	1669.26037
4032102	2	1687.81486	4032627	5	1610.87559
4032177	2	2061.53398	4032702	5	2173.05173
4032252	2	2864.21864	4032777	5	3648.1085
4032327	2	1705.74026	4032852	5	2633.20294
4032402	2	1170.18362	4032102	6	845.411578
4032477	2	2087.09322	4032177	6	2121.32678
4032552	2	1403.10071	4032252	6	2156.71389
4032627	2	1360.40773	4032327	6	3646.93091
4032702	2	926.918424	4032402	6	268.356229
4032777	2	1775.85854	4032477	6	2395.87377
4032852	2	1260.77191	4032552	6	1834.27159
4032927	2	1020.50371	4032627	6	1968.93261
4033002	2	1470.90056	4032702	6	2506.62673
4033077	2	1346.72335	4032777	6	4431.30566
4032102	3	1155.72172	4032102	7	956.948274
4032177	3	2638.62439	4032177	7	1235.58022
4032252	3	1732.45871	4032252	7	1368.34127
4032327	3	1735.00333	4032327	7	4830.45962
4032402	3	1999.64329	4032402	7	1509.88972
4032477	3	2354.75845	4032477	7	2219.05696
4032552	3	1606.07617	4032552	7	2158.61387
4032627	3	1308.08761	4032627	7	2564.14068
4032702	3	1711.39496	4032702	7	2491.94147
4032777	3	2082.34328	4032102	8	931.0407
4032852	3	1835.23289	4032177	8	4092.75877
4032927	3	1271.74203	4032252	8	3374.49877
4033002	3	1681.14231	4032327	8	9335.68351
4032102	4	1364.25292	4032402	8	1832.63172
4032177	4	1725.39034	4032477	8	2609.92679
4032252	4	1137.81046	4032552	8	2502.37439
4032327	4	2762.20786	4032627	8	2757.34481

پیوست د: داده‌های خام برداشت شده مربوط به پروفیل P<sub>03</sub>

Northing	n	Roh(Ωm)	Northing	n	Roh(Ωm)
4032246	1	1049.2579	4032396	4	673.3051
4032321	1	426.4351	4032471	4	673.3051
4032396	1	460.8156	4032546	4	429.7007
4032471	1	495.9879	4032621	4	575.1395
4032546	1	462.2010	4032696	4	1028.6182
4032621	1	530.2412	4032771	4	168.3291
4032696	1	266.5201	4032846	4	542.3988
4032771	1	396.7479	4032921	4	690.5520
4032846	1	348.5557	4032246	5	1031.0356
4032921	1	417.5430	4032321	5	343.6736
4032996	1	2088.5634	4032396	5	368.2199
4033071	1	453.8321	4032471	5	879.1857
4033146	1	412.6800	4032546	5	562.1267
4032246	2	736.4116	4032621	5	830.0039
4032321	2	675.3974	4032696	5	2945.7594
4032396	2	712.0398	4032771	5	2279.3318
4032471	2	684.5580	4032846	5	834.9518
4032546	2	476.9344	4032246	6	981.8934
4032621	2	448.8814	4032321	6	157.1045
4032696	2	556.7957	4032396	6	399.0985
4032771	2	454.1403	4032471	6	1256.8362
4032846	2	458.2173	4032546	6	780.4956
4032921	2	426.4322	4032621	6	824.8285
4032996	2	8380.2654	4032696	6	15731.8278
4033071	2	866.8655	4032771	6	1525.6041
4032246	3	962.9813	4032246	7	530.2367
4032321	3	892.4106	4032321	7	288.9987
4032396	3	610.1987	4032396	7	641.3974
4032471	3	1332.6149	4032471	7	1356.5851
4032546	3	406.7991	4032546	7	589.1479
4032621	3	496.7654	4032621	7	401703.1024
4032696	3	280.5438	4032696	7	5110.5878
4032771	3	507.6507	4032246	8	577.1526
4032846	3	504.9930	4032321	8	598.2220
4032921	3	424.7952	4032396	8	922.6095
4032996	3	20848.8789	4032471	8	1009.9747
4032246	4	1242.7900	4032546	8	229.5921
4032321	4	490.9693	4032621	8	463.4083

پیوست و: داده‌های خام برداشت شده مربوط به پروفیل P<sub>04</sub>

Northing	n	Roh( $\Omega$ m)	Northing	n	Roh( $\Omega$ m)
4032130	1	960.1681	4032655	3	455.8961
4032205	1	799.3767	4032130	4	683.1302
4032280	1	1159.5811	4032205	4	905.0771
4032355	1	1229.7842	4032280	4	1153.8557
4032430	1	1171.8518	4032355	4	629.3822
4032505	1	1697.4278	4032430	4	501.3316
4032580	1	1183.1046	4032505	4	760.8682
4032655	1	1030.7387	4032580	4	888.5937
4032730	1	855.8318	4032130	5	717.1432
4032805	1	1110.7951	4032205	5	662.3209
4032130	2	2138.0209	4032280	5	554.1267
4032205	2	1750.5538	4032355	5	986.8017
4032280	2	1913.1405	4032430	5	1093.3928
4032355	2	1225.0413	4032505	5	855.9519
4032430	2	591.7644	4032130	6	927.3708
4032505	2	1286.7609	4032205	6	734.4890
4032580	2	5906.7978	4032280	6	905.1478
4032655	2	5542.3977	4032355	6	981.4297
4032730	2	1735.9477	4032430	6	962.8258
4032130	3	951.0465	4032130	7	766.7349
4032205	3	1210.5242	4032205	7	1137.8105
4032280	3	10986.3922	4032280	7	1238.7469
4032355	3	10839.3813	4032355	7	1125.0026
4032430	3	817.2794	4032130	8	1911.1472
4032505	3	1598.7646	4032205	8	904.0028
4032580	3	18395.8700	4032280	8	1044.7765



## فهرست منابع

احمدزاده، غ.، (۱۳۸۹)، اکتشاف آبهای زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دوبعدی داده های مقاومت ویژه در آهک های کرتاسه واقع در شمال شاهرود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

پیروز، ا.، (۱۳۸۲ الف)، استفاده از مدل های ریاضی به منظور تعیین بهترین روش الکتریکی برای اکتشاف محل ناهمگنی های جانبی، "یازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران"، انجمن ملی ژئوفیزیک ایران، تهران.

پیروز، ا.، (۱۳۸۲ ب)، بکارگیری روش ترکیب یافته از حفاری الکتریکی و ترانسه زنی الکتریکی برای اکتشاف منابع آبهای زیرزمینی در زمینهای سخت (کارست)، پروژه پژوهشی-کاربردی، دانشگاه صنعتی شاهرود، سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان سمنان.

تلفورد، د. م.، جلدارت، ا. پ.، شریف، ا. ا.، کیز، د. ا.، (۱۳۷۵)، ژئوفیزیک کاربردی، جلد دوم، حاجب حسینی، ح و زمردیان، ح، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۵۷۹ ص.

خدایی، ک.، (۱۳۸۰)، نقش نمایانگرهای آبهای زیرزمینی در شناسایی منابع آب کارستی حوضه نمونه ارومیه با استفاده از GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

خداری، ا.، (۱۳۹۰)، تلفیق اطلاعات سنجش از دور و GIS برای پیشرفت توسعه کارست با تحلیل هیدروگراف چشمه-ها در تاقدیس پیون، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم.

دولتی ارده جانی، ف. و شفائی تنکابنی، س. ض.، (۱۳۸۸)، مدل سازی زمین زیست محیطی، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۲۹۱ ص.

دولتی ارده جانی، ف.، (۱۳۸۹)، جزوه درس آبهای زیرزمینی پیشرفته، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

ردی، ج. ن.، (۱۳۸۴)، مقدمه ای بر روش اجزاء محدود، جلد اول، سلطانی، ن و راستگو، ع، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۴۵۲ ص.

رفعت هراب، ع.، (۱۳۸۹)، اکتشاف آبهای زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دوبعدی داده های مقاومت ویژه در سازند لار واقع در غرب شاهرود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

شکری، م.، (۱۳۹۰)، بررسی توسعه کارست در حوضه آبخیز چشمه علی دامغان با تلفیق مطالعات هیدروژئولوژیکی، GIS و RS، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

عبادیان، س.، (۱۳۸۱)، ارزیابی عوامل موثر در پتانسیل آب های کارستی کوه های گر و برم فیروز در استان فارس با استفاده از اطلاعات رقمی ماهواره ای و روش های سنجش از دور و GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز.

کامکار روحانی، ا. و معتمدی، ا.، (۱۳۸۷) " مدل سازی و تفسیر داده های ژئوالکتریک به منظور تعیین عمق، ضخامت و حجم سفره های آب زیرزمینی در مناطق آهکی حومه شمالی راز"، دوازدهمین همایش زمین شناسی، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اهواز.

کلاگری، ع. ا.، (۱۳۷۱)، اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، چاپ اول، انتشارات تابش، ۵۸۵ ص.

کوثر، ن.، (۱۳۷۲)، بررسی هیدروژئولوژیکی و غار شناسی غار شاپور، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز.

میثمی، ف.، (۱۳۹۰)، تهیه الگوریتم وارون سازی دو بعدی غیر خطی داده های مغناطیسی با استفاده از روش های لونبرگ- مارکواریت (LM) و تجزیه مقادیر تکین (SVD)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مینویی، ا.، (۱۳۸۸)، نقش شکستگی ها در جریان آب زیرزمینی در منطقه کارستی کوه های شاهو کردستان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

نیک پیمان، ی.، (۱۳۸۸)، بررسی تاثیر خطواره ها بر روی نوع جریان آب زیرزمینی در آبخوان های کارستی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

وزیری، س. ه.، مجیدفرد، م. ر.، سیدی، ع.، (۱۳۸۰)، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

Afrasiabian A. (1998) "Importance of study and research on karst water resources on Iran", 2<sup>nd</sup> international symposium on karst water resources, Tehran, Kermanshah, Iran, pp 126-137.

Al-Fares W., Bakalowicz M., Guérin R., Dukhan M. (2002) "Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area (Hérault, France) with ground penetrating radar" **Journal of Applied geophysics** 51, pp 97-106.

Berkowitz B. (2002) "Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review" **Advances in water Resources**, 25, pp 861-884.

Bhattacharya P.K. and Patra H.P. (1968) "Direct Current Electrical Sounding" Elsevier, Amsterdam.

Bögli A. (1980) "Karst Hydrology and Physical Speleology" New York: Springer, 270 p.

Bosch F. P. and Müller I. (2001) "Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of karst structures" **First Break**, 19, pp 343-350.

Boucher M., Girard J.F., Legchenko A., Baltassat J.M., Dörfliger N., Chalikakis K. (2006) "Using 2D inversion of magnetic resonance soundings to locate a water-filled karst conduit" **Journal of Hydrogeology**, 330, pp 413-421.

Constable S.C., Parker R.L., Constable, C.G., (1987) "Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data" **Geophysics**, 52, pp 289-300.

Jupp D. L. and Vozzof K. (1975) "Stable iterative methods for the inversion of geophysical data" **Geophysics**, 42, pp 957-976.

Deceuster J., Delgranche J., Kaufmann O. (2006) "2D cross-borehole resistivity tomographies below foundations as a tool to design proper remedial actions in covered karst" **Journal of Applied Geophysics**, 60, pp 68-86.

Edwards L.S. (1977) "A modified pseudosection for resistivity and induced polarization" **Geophysics**, 42, pp 1020-1036.

Ford D. and Williams p. (2007), "**Karst Hydrogeology and Geomorphology**" John Wiley & son Ltd, England, pp 1-562.

Gautam p., Pant S. R., Ando H. (2000) "Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles: a case study from pokharavally, central Nepal" **journal of Applied Geophysics**, 45, pp 97-110.

Gibson P. J., Lyle p., George D.M. (2004) "Application of resistivity and magnetometry geophysical techniques for near-surface investigations in Karstic terrains in Irland" **Journal of cave and karst Studies**, 66, pp 35-38.

Guérin R., Baltassat J-M., Boucher M., Chalikakis K., Galibert P-Y., Girard J-F., Plagnes V., Valois R. (2009) "Geophysical characterisation of karstic networks – Application to the Ouyse system (Poumeyssen, France)" **C. R. Geoscience, Internal geophysics (Applied geophysics)**, 341, pp 810-817.

Guérin R., Benderitter Y. (1995) "Shallow karst exploration using MT-VLF and DC resistivity methods" **Geophysical prospecting** , 43, pp 635- 653.

Israil M., Al-hadithi M., Singhal D. C. (2006) "Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area, Himalayan foothill region, India" **Hydrogeology Journal**, 14, pp 753-759.

Jaiswal R. K., Mukherjee S., Krishnamurthy J., Saxena R. (2003) "Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development - an approach" **International Journal of Remote Sensing**, 24, pp 993 –1008.

Jardani A., Dupont J. P., Revil A. (2006) "Self-potential signals associated with preferential groundwater flow pathways in sinkholes" **journal of Geophysical Research**, 111, pp 1-13.

Kaufmann O., Quinif Y. (2002) "Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium" **Engineering geology**, 65, pp 117-124.

Kaufmann O., Quinif Y. (2001) "An application of cone penetration tests and combined array 2D electrical resistivity tomography to delineate cover-collapse sinkholes prone areas" In: Beck, B.F., Herring, J.G. (Eds.), **Geotechnical and Environmental Applications of karst Geology and Hydrogeology**, Balkema, Lisse, pp 359-364.

Kearey P., Brooks M. (1991), **An Introduction to Geophysical Exploration**, second edition, pp 173-197.

Kearey P., Brooks M., Hill L.(2002) , **An Introduction to Geophysical Exploration**, third edition, Blackwell Science Ltd, UK, pp 281.

Kirsch R (2006) "**Groundwater Geophysics-a Tool for Hydrogeology**" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 85-116.

Knödel K., (2008) "**Environmental geology**" Springer, pp 1340.

Lattman L. H. and parizek R. P. (1964) "relationship between fracture traces and the occurrence of ground water in carbonate rocks" **journal of hydrogeology**, Vol.2, pp. 73-91

Loke M. H. (2004) "Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys" pp 128.

Mooney H.M. (1980) "**Handbook of Engineering Geophysics: Vol. 2: Electrical Resistivity**" Bison Instruments, Inc, pp 81.

Nguyen F., Garambois S., Chardon D., Hermitte D., Bellier O., Jongmans D. (2007) "Subsurface electrical imaging of anisotropic formations affected by a slow active revers fault , Provence, France" **Journal of applied geophysics**, 62, pp 338-353.

Noel M., Xu B. (1992) "Cave detection using Electrical Resistivity Tomography (ERT)" **Cave science**, 19, pp 91-94.

Orellana E. and Mooney H.M. (1966) "Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over Layered Structures" Interciencia, Madrid.

Orellana E. and Mooney H.M. (1972) "Two and Three Layer Master Curves and Auxiliary Point Diagrams for Vertical Electrical Sounding Using Wenner Arrangement" Interciencia, Madrid.

Parizek R.P. (1976) "on the nature and significance of fracture traces and lineaments in carbonate and other terrains" In: Yevejevich, V. karst hydrology and water resources, Water resources publications, Colorado, USA, 1, pp 47-100.

Ravi Shankar M. N., Mohan G. (2006) "Assessment of the groundwater potential and quality in Bhatsa and Kalu river basins of Thane district, western Deccan Volcanic Province of India" **Journal of Environmental Geology**, 49, pp 990-998.

Reynolds J. M. (1997) "**An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**" pp 418-459.

Roy K. K. (2008), "**Potential Theory in Applied Geophysics**", springer, pp, 671.

Scales J. A., Smith M., Treitel S. (2001), **Introductory Geophysical Inverse Theory**, Samizdat Press.  
Sener E., Davraz A., Ozcelik M. (2005) "An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey" **Hydrogeology Journal**, 13, pp 826-834.

Skinner D., Heinson G. (2004) "A comparison of electrical and electromagnetic methods for the detection of hydraulic pathways in a fractured rock aquifer, Clare valley, South Australia" **Hydrogeology Journal**, 12, pp 576-590.

Smith N.C. and Vozoff K. (1984) "Two dimensional DC resistivity inversion for dipole dipole data", **geoscience and remote sensing**, 22, pp 21-28.

Srinivasa Rao Y. and Jugran D. K. (2003) "Delineation of groundwater potential zones and zones of groundwater quality suitable for domestic purposes using remote sensing and GIS" **Hydrological Sciences Journal**, **48**, pp 821- 833.

Srivastava P.K., Bhattacharya A. (2006) "Groundwater assessment through an integrated approach using remote sensing, GIS and resistivity techniques: a case study from a hard rock terrain" **International Journal of Remote Sensing**, **27**, pp 4599 – 4620.

Stoklin J. (1974) "Northern Iran: Alborz Mountains, Mesozoic-Cenozoic Orogenic Belt" Data for Orogenic Studies: Geological Society London. 1st Edn., Scottish Academic Press, London, pp 213-234.

Subba Rao N. (2006) "Groundwater potential index in a crystalline terrain using remote sensing data" **Journal of Environmental Geology**, **50**, pp 1067-1076.

Šumanovac F., Weisser M. (2001) "Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karsts terrains" **Journal of Applied Geophysics**, **47**, pp 13-28.

Suski B., Lander F., Baron L., Vuataz F.D., Philipposian F., Holliger K. (2008) "Detection and characterization of hydraulically active fractures in carbonate aquifer: results from self-potential, temperature and fluid electrical conductivity logging in the Combioula hydrothermal system in the southwestern Swiss Alps" **Hydrogeology journal**, **16**, pp 1319-1328.

Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. (1990), **Applied Geophysics**, second edition, Cambridge University Press, pp 760.

Vasconcelos I., Grechka V. (2007) "Seismic characterization of multiple fracture sets at Rulison Field, Colorado" **Geophysics**, **72**, B19-B30.

Vouillamoz J. M., Descloitres M., Bernard J., Fourcassier P., Romagny L. (2002) "Application of integrated magnetic resonance sounding and resistivity methods for borehole implementation: A Case Study in Cambodia" **Journal of Applied Geophysics**, **50**, pp 67-81.

Vouillamoz J. M., Legchenko A., Albouy Y., Bakalowicz M., Baltassat J. M., Al-Fares W. (2003) "Localization of karst aquifer with magnetic resonance sounding and resistivity imagery" **Ground-water**, **41**, pp 578-586.

White W. B. and White E. L. (1989) "**Karst hydrology: Concepts from the Mammoth Cave area**" Van Nostrand Reinhold, 346 p.

White W. B. (1988) "**Geomorphology and hydrology of karst terrains**" New York: Oxford University Press, 464 p.

Williams P. W. (1983) "The role of the subcutaneous zone in karst hydrology" **Journal of Hydrology**, **61**, pp 45–67.

Zhou W., Beck B. F., Adams A. L. (2002) "Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography" **Environmental geology**, **42**, pp 922-928.

Zohdy A.A.R. (1989) "A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves" **Geophysics**, **54**, pp 245–53.

Ward S. H. (1990) "Resistivity and Induced Polarization Methods" in Ward, S. H., Ed., **Geotechnical and Environmental Geophysics: Soc. Of Explor. Geophys**, Vol. **1**, pp. 147-189.

[www.irsen.org](http://www.irsen.org)

[www.Google.com](http://www.Google.com)

**Abstract:**

Due to the importance and high quality of karstic waters in supplying water in our country especially in Shahrood city, it is attempted in this research work to recognize and explore karstic waters in southwest of Tepal area, Shahrood. For this purpose, integration of the results obtained from the methods of vertical electrical sounding (VES) and resistivity profiling has been used in this research work. The VES surveys have been carried out in 10 sounding points ( $S_{01}$ - $S_{10}$ ) using the Schlumberger array with electrode separations of a maximum 500 meters and also, the resistivity profiling surveys have been carried out along 4 lines ( $P_{01}$ - $P_{04}$ ) with a length of more than 4 kilometers using dipole-dipole electrode array with 75m electrode spacing and dipole steps 1 to 8 in the study area, and then, one-dimensional (1-D) modeling and interpretation of the sounding results using master curves and IX1D software, and two-dimensional (2-D) modeling and interpretation of the profiling results using Res2DINV have been made. Interpretation results show that; the location of  $S_{02}$ ,  $S_{03}$ ,  $S_{04}$ ,  $S_{05}$  and  $S_{08}$  sounding points and the parts of  $P_{01}$ ,  $P_{02}$  and  $P_{03}$  profiling line surveys could be expected as water bearing zone; and also results in both sounding and profiling survey methods are consistent closely. As a result of the interpretation and integration of the results, karstic water zones in the study area have been determined, and based on that, suitable locations for drilling to access and extract karstic ground water have been introduced.

**Key words:** Modeling, Vertical electrical sounding (VES), Resistivity profiling, Karst, Schlumberger array, Dipole-dipole array.