

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف، نفت و ژئوفیزیک

مدل سازی و تفسیر سونداژهای الکتریکی به منظور تعیین عمق و ضخامت

ذخیره و شناسایی دقیق تر زون کارستی کمرباطین بوکسیت در یکی از

معادن بوکسیت جاجرم

دانشجو: فرج اله مؤمنی

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علیرضا عرب امیری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۰

تقدیم به

روح پاک پدرم، به استواری کوه؛

آنکه عالمانه به من آموخت که چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه کنم.

مادرم، به زلالی چشمه؛

آنکه آفتاب مهرش در آستانه قلمم هرگز غروب نخواهد کرد.

و همسرم، به صمیمیت باران؛

آنکه وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

تشکر و قدردانی

سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و ادب رهنمونان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی مان ساخت.

نمی توان معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر از زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف استادان خویش آشکار نمایم، که هر چه گفته ام و سراپم کم است؛ همراهان لحظه به لحظه، آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عرب امیری که در پیشبرد این اثر از هیچ کمکی فروگذار نکردند.

از داوران این پایان نامه، آقایان دکتر مرادزاده و دکتر قوامی، که با سعه صدر زحمت داوری این اثر را به عهده گرفتند، کمال سپاس گذاری را دارم. از تمامی اساتید ارجمند آقایان دکتر پیروز، دکتر کامکار روحانی، دکتر مرادزاده، دکتر عرب امیری، دکتر آقاجانی، دکتر دولتی، دکتر تخمچی، دکتر سلیمانی و دکتر روشندل و کلیه اساتید و معلمان کلیه مقاطع تحصیلی که با آموختن علم خود، به حق، مرا بنده خویش ساخته اند، صمیمانه سپاسگذارم.

قدردانی درخور و شایسته از دوستان عزیزم آقایان کیانوش سلیمانی و ابوالفضل اسدیان آرزوی قلبی این حقیر است، که در انجام عملیات صحرایی و تفسیر نتایج دلسوزانه مرا یاری کردند.

در پایان بر خود لازم می دانم از مساعدت های بی نظیر مسئولین گروه اکتشاف معدن بوکسیت جاجرم، آقایان مهندس یوسف خانی، مهندس جعفرزاده و زحمات بی دریغ سرپرست محبوب آزمایشگاه ژئوفیزیک، آقای مهندس زارعی، قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب فرج اله مؤمنی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و تفسیر سونداژهای الکتریکی به منظور تعیین ضخامت و عمق ذخیره و شناسایی دقیق تر زون کارستی کمر پایین در یکی از معادن بوکسیت جاجرم تحت راهنمایی دکتر کامکار روحانی و دکتر عرب امیری متعهد می شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

چکیده

روش‌های اکتشافی به دو دسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مستقیم که حفاری اکتشافی نیز از آن جمله است، روش‌هایی گران‌قیمت، زمان‌بر و با دقت بالایی هستند. اما روش‌های ژئوفیزیکی از جمله روش‌های غیرمستقیم هستند که نیازمند هزینه و زمان کم‌تری می‌باشند و تعبیر و تفسیر نتایج آن‌ها مشکل است. در این پژوهش به بررسی کارایی روش سونداژزنی ژئوالکتریکی در تشخیص لایه معدنی در ذخایر بوکسیت کارستی دارای توپوگرافی شدید سطح زمین پرداخته می‌شود.

بدین منظور طراحی و برداشت ۸۲ سونداژ ژئوالکتریکی بر روی سه خط، در فازهای ۴ و ۵ محدوده معدنی تاگویی انجام شد. معادن منطقه تاگویی یکی از معادن بوکسیت جاجرم است که عملیات استخراج ماده معدنی در آن به‌ندرت صورت گرفته و اغلب حفاری‌ها، جنبه اکتشافی دارند. داده‌های برداشت شده نخست توسط سر منحنی‌های استاندارد تفسیر شده و سپس نتایج حاصله به‌عنوان مدل اولیه به‌وسیله نرم‌افزارهای IX1D، IPI2WIN و VES مدل‌سازی یک‌بُعدی شده‌اند. هم‌چنین به‌کمک قابلیت‌های نرم‌افزار IX1D داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری، مستقیماً با روش‌های اُکام و رگرسیون ریح، وارون‌سازی شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از این دو روش نشان می‌دهد که گرچه روش رگرسیون ریح در برازش پارامترهای مدل پایدارتر عمل کرده، اما استفاده از این روش برای زمین با تعداد زیادی لایه، تغییراتی شدید در مقاومت‌ویژه لایه‌ها را نشان می‌دهد. از طرف دیگر تشخیص ضعیف مرز لایه‌ها در روش اُکام و پنهان شدن بعضی از لایه‌ها کار تفسیر را مشکل می‌سازد. لذا ترجیح داده می‌شود که بسته به طبیعت مدل واقعی زمین، از یکی از دو روش و یا حتی از هر دو روش استفاده گردد. نتایج مدل‌سازی یک‌بُعدی، حداقل وجود چهار لایه ژئوالکتریکی را در منطقه تاگویی ۴ و ۵ واقع در محدوده معدنی بوکسیت جاجرم، نشان می‌دهند. جهت درک بهتر و جامع‌تر، این نتایج به‌صورت سه مقطع دو‌بُعدی و یک نمایش سه‌بُعدی نشان داده می‌شوند.

در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار Res2dinv، بر روی داده‌های اولیه، مدل‌سازی هموار دو بُعدی صورت گرفته و مقاطع به دست آمده تفسیر و با نتایج وارون‌سازی یک بُعدی مقایسه شده‌اند. با بررسی نتایج وارون‌سازی یک بُعدی و دو بُعدی نتیجه می‌شود که به دلیل تباین کافی مقاومت ویژه بین بوکسیت و سنگ کف دولومیتی، تشخیص کمر پایین لایه معدنی ممکن است. هر دو لایه بوکسیت و دولومیت شیب‌دار بوده و سنگ بستر دولومیتی توپوگرافی شدیدی دارد، به طوری که عمق مرز پایینی لایه بوکسیتی بین ۲۰ تا ۷۰ متر پیش‌بینی می‌شود. اما از آنجایی که اختلاف مقاومت ویژه بوکسیت کائولنی با لایه‌های بالایی آن کم می‌باشد، تشخیص کمر بالای ماده معدنی و در نتیجه تعیین ضخامت لایه معدنی مشکل است.

کلمات کلیدی:

سونداژ ژئوالکتریکی، مدل‌سازی هموار دو بُعدی، مدل‌سازی وارون، روش اکام، رگرسیون ریج، بوکسیت.

لیست مقالات مستخرج:

- مومنی، ف؛ کامکار روحانی، ا؛ عرب امیری، ع؛ سلیمانی، ک؛ (۱۳۹۱)؛ "مدل سازی وارون یک بعدی داده‌های سونداژهای الکتریکی با استفاده از دو روش اوکام و رگرسیون ریج به منظور تعیین کمر پائین لایه بوکسیت کارستی". شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران- شیراز.
- مومنی، ف؛ سلیمانی، ک؛ کامکار روحانی، ا؛ عرب امیری، ع؛ (۱۳۹۱)؛ "مدل سازی و تفسیر دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه و ارزیابی نتایج به منظور اکتشاف لایه بوکسیتی با بستر کربناته در منطقه معدنی بوکسیت جاجرم". شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران- شیراز.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- تاریخچه عملیات اکتشافی انجام شده
۴	۳-۱- ضرورت و هدف از انجام پایان نامه
۵	۴-۱- ساختار پایان نامه
۷	فصل دوم: مبانی روش مقاومت ویژه
۸	۱-۲- مقدمه
۸	۲-۲- تئوری روش مقاومت ویژه
۱۲	۳-۲- تقسیم بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت ویژه
۱۳	۴-۲- روش های برداشت مقاومت ویژه الکتریکی
۱۴	۱-۴-۲- سونداژزنی الکتریکی
۱۴	۲-۴-۲- پروفیل زنی الکتریکی
۱۴	۳-۴-۲- روش برداشت سونداژزنی قائم پیوسته
۱۵	۵-۲- انتخاب آرایش الکترودی مناسب
۱۷	۶-۲- تأثیر توپوگرافی بر مقادیر مقاومت ویژه ظاهری
۱۷	۷-۲- کاربردها، مزایا و معایب روش مقاومت ویژه
۲۰	فصل سوم: اصول مدل سازی عددی
۲۱	۱-۳- مقدمه
۲۱	۲-۳- مدل سازی پیشرو
۲۳	۳-۳- مدل سازی وارون
۲۷	۱-۳-۳- مدل سازی به روش اُکام
۲۸	۲-۳-۳- مدل سازی به روش رگرسیون ریج
۳۰	۴-۳- وارون سازی هموار دوبعدی توسط نرم افزار Res2dinv
۳۵	فصل چهارم: زمین شناسی ناحیه و عملیات صحرائی
۳۶	۱-۴- مقدمه
۳۶	۲-۴- موقعیت جغرافیایی و ژئوفورمولوژی
۳۸	۳-۴- زمین شناسی ناحیه ای

۳۸	۴-۴- زمین‌شناسی محدوده معدنی تاگویی
۴۰	۴-۴-۱- سازند الیکا
۴۰	۴-۴-۲- واحد بوکسیتی
۴۲	۴-۴-۳- سازند شمشک
۴۴	۴-۴-۴- رسوبات کواترنری
۴۴	۴-۴-۵- طراحی عملیات
۵۰	فصل پنجم: مدل‌سازی و تفسیر یک بُعدی داده‌های صحرایی
۵۱	۵-۱- مقدمه
۵۱	۵-۲- تفسیر کیفی سونداژهای الکتریکی
۵۲	۵-۳- تفسیر کمی سونداژهای الکتریکی
۵۲	۵-۳-۱- تفسیر سونداژهای الکتریکی به کمک آباک‌ها یا سرمنحنی‌های استاندارد
۵۹	۵-۳-۲- تفسیر سونداژهای الکتریکی با استفاده از روش‌های اُکام و ریچ
۶۴	۵-۳-۳- آنالیز مدل‌های هم‌ارز
۶۶	۵-۴- تفسیر سونداژهای الکتریکی در منطقه
۶۹	۵-۴-۱- تفسیر و مدل‌سازی خط برداشت اول
۷۲	۵-۴-۲- تفسیر و مدل‌سازی خط برداشت دوم
۷۶	۵-۴-۳- تفسیر و مدل‌سازی خط برداشت سوم
۷۹	۵-۴-۴- جمع بندی نتایج مدل‌سازی یک بُعدی
۸۵	فصل ششم: مدل‌سازی و تفسیر دوبعدی داده‌های صحرایی
۸۶	۶-۱- مقدمه
۸۶	۶-۲- تفسیر و مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری توسط نرم افزار Res2dinv
۸۸	۶-۲-۱- مدل‌سازی هموار دوبعدی و تفسیر خط برداشت اول
۹۱	۶-۲-۲- مدل‌سازی هموار دوبعدی و تفسیر خط برداشت دوم
۹۲	۶-۲-۳- مدل‌سازی هموار دو بعدی و تفسیر خط برداشت سوم
۹۵	فصل هفتم نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۶	۷-۱- نتیجه‌گیری
۹۷	۷-۲- پیشنهادات
۹۸	مراجع فارسی
۹۹	مراجع انگلیسی

فهرست اشکال

۹	توده استوانه ای در زیر سطح زمین	شکل (۱-۲)
۱۰	نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل	شکل (۲-۲)
۱۶	نمایش حساسیت آرایش‌های الکترودی در برداشت‌های دوبعدی	شکل (۳-۲)
۱۷	تأثیر توپوگرافی بر خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل	شکل (۴-۲)
	برداشت داده‌های مقاومت ویژه ظاهری به کمک آرایش ونر بر روی یک زمین دو لایه	شکل (۱-۳)
۲۳		
۳۱	نحوه مش بندی اجزاء محدود برای آرایش ونر- شلومبرژه	شکل (۲-۳)
	تغییر در خطای RMS و زمان مورد نیاز برای پردازش به همراه تعداد تکرار-	شکل (۳-۳)
۳۴	های وارون سازی برای روش‌های مختلف	
۳۷	راه‌های دسترسی به منطقه معدنی بوکسیت جاجرم	شکل (۱-۴)
۳۹	نقشه زمین شناسی منطقه تاگویی	شکل (۲-۴)
	ستون چینه شناسی سازندهای بالا و پایین افق بوکسیتی به همراه واحدهای بوکسیتی	شکل (۳-۴)
۴۲		
۴۶	مکان سونداژهای الکتریکی در منطقه مورد مطالعه	شکل (۴-۴)
۴۸	دستگاه ABEM Terrameter SAS 4000	شکل (۵-۴)
۴۹	تصویر فرم برداشت داده سونداژ الکتریکی	شکل (۶-۴)
۵۴	تفسیر سونداژ الکتریکی توسط سرمنحنی‌های استاندارد	شکل (۱-۵)
۵۵	مدل سازی پیشرو برای یک مدل فرضی توسط نرم افزار IX1D	شکل (۲-۵)
۵۶	مدل وارون با ۵ بار تکرار فرآیند مدل سازی وارون حاصل از نرم افزار IX1D	شکل (۳-۵)
۵۷	مدل سازی وارون برای یک مدل فرضی توسط نرم افزار IPI2WIN	شکل (۴-۵)
۵۸	مدل حاصله از نرم افزار VES	شکل (۵-۵)
۶۱	مدل وارون حاصل از مدل اولیه ۲۲ لایه و همگن	شکل (۶-۵)
۶۲	مدل وارون حاصل از مدل اولیه ۵۰ لایه و همگن	شکل (۷-۵)
۶۳	مدل ۷ لایه حاصل از رگرسیون ریج	شکل (۸-۵)
۶۴	مدل تعدیل یافته و حاصل از هر دو روش اُکام و ریج	شکل (۹-۵)
۶۶	نمایش مدل های هم ارز	شکل (۱۰-۵)
۷۱	نمایش دوبعدی مدل سازی یک بعدی خط برداشت اول	شکل (۱۱-۵)
۷۵	نمایش دوبعدی مدل سازی یک بعدی خط برداشت دوم	شکل (۱۲-۵)

- ۷۸ نمایش دو بُعدی مدل سازی یک بعدی خط برداشت سوم شکل (۵-۱۳)
- ۸۰ نقشه زمین شناسی ساختمانی محدوده معدنی تاگویی ۴ و ۵ شکل (۵-۱۴)
- ۸۱ تغییرات لایه بندی به علت فعالیت گسل شکل (۵-۱۵)
- ۸۲ آینه گسل که خش لغزهای روی آن جهت غالب فعالیت گسل را نشان می دهد. شکل (۵-۱۶)
- ۸۳ بررسی عمق کمربند لایه بوکسیتی توسط نمایش سه بُعدی وارون سازی یک- بُعدی شکل (۵-۱۷)
- ۸۳ بررسی شیب لایه توسط نمایش سه بُعدی وارون سازی یک بُعدی شکل (۵-۱۸)
- ۸۴ رخنمون های لایه بوکسیتی شکل (۵-۱۹)
- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی مقاومت ویژه ظاهری خط برداشت شماره (۱) شکل (۶-۱)
- ۸۹ شماره (۱) شکل (۶-۲)
- ۹۰ مدل هموار دو بُعدی خط برداشت شماره (۱) شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی مقاومت ویژه ظاهری خط برداشت شماره (۲) شکل (۶-۳)
- ۹۱ شماره (۲) شکل (۶-۴)
- ۹۲ مدل هموار دو بُعدی خط برداشت شماره (۲) شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی مقاومت ویژه ظاهری خط برداشت شماره (۳) شکل (۶-۵)
- ۹۳ شماره (۳) شکل (۶-۶)
- ۹۴ مدل هموار دو بُعدی خط برداشت شماره (۳) شکل (۶-۷)
- ۹۴ نمایش سه بُعدی مدل سازی دو بُعدی شکل (۶-۷)

فهرست جداول

۱۳	جدول (۱-۲) مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها
۱۶	جدول (۲-۲) خصوصیات مختلف چند آرایش الکترودی
	جدول (۱-۵) خصوصیات زمین ۷ لایه حاصل از تفسیر غیراتوماتیک سونداژ الکتریکی شکل (۱-۵)
۵۵	
	جدول (۲-۵) پارامترهای مدل وارون با ۵ بار تکرار فرآیند مدل‌سازی وارون حاصل از نرم‌افزار IX1D
۵۶	
۵۷	جدول (۳-۵) پارامترهای مدل حاصل از نرم‌افزار IPI2WIN
۵۸	جدول (۴-۵) پارامترهای مدل حاصل از نرم‌افزار VES
	جدول (۵-۵) مقادیر مقاومت ویژه ظاهری داده‌های صحرائی و مدل حاصل از یک سونداژ توسط نرم‌افزار VES
۵۹	
۶۴	جدول (۶-۵) پارامترهای مدل ۷ لایه حاصل از روش‌های اُکام و رگرسیون ریج
	جدول (۷-۵) عمق کمر پایین بوکسیت حاصل از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف به همراه خطای مدل‌سازی مربوط به خط برداشت اول
۷۰	
	جدول (۸-۵) عمق کمر پایین بوکسیت حاصل از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف به همراه خطای مدل‌سازی مربوط به خط برداشت دوم
۷۴	
	جدول (۹-۵) عمق کمر پایین بوکسیت حاصل از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف به همراه خطای مدل‌سازی مربوط به خط برداشت سوم
۷۷	
	جدول (۱-۶) مشخصات مدل‌های حاصله از نرم‌افزار Res2dinv برای هر سه خط برداشت شده
۸۸	

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

آلومینیم یکی از فلزات سبک است و امروزه مصرف فراوانی دارد که به دلیل خصوصیات ویژه آن هم چون رنگ سفید، مقاومت در برابر هوازدگی و موادشیمیایی، استحکام، شکل پذیری، قابلیت انتقال الکتریکی و گرمایی خوب، دارای کاربردهای فراوانی است. آلومینیم پس از اکسیژن و سیلیسیم، فراوان ترین عنصر در پوسته زمین است و حدود ۸/۸ درصد پوسته زمین را تشکیل می دهد. تقریباً تمام سنگ ها، خصوصاً سنگ های آذرین شامل آلومینیم می باشند، ولی مهم ترین منبع تولید آلومینیم، بوکسیت است. بوکسیت در نتیجه هوازدگی سنگ های مختلف در آب و هوای استوایی و با توجه به مورفولوژی و زهکشی مناسب، تشکیل می شود و حاوی اکسیدها و هیدروکسیدهای آلومینیم، آهن و مقداری سیلیس می باشد.

در دنیا بیشتر حجم بوکسیت تولیدی، صرف تهیه آلومینیم می شود و بقیه در تولید سیمان دیر گداز، صنایع نسوز، صنایع شیمیایی به مصرف می شود.

بوکسیت های ایران، بر روی کمر بند بوکسیت کارستی ایران - هیمالیا قرار دارد و در این زمینه، دارای پتانسیل معدنی بالایی است. مراکزی نیز جهت تولید آلومینا و فلز آلومینیم در کشور وجود دارد که از جمله آنها می توان به آلومینای جاجرم، ایرالکو اراک، آلومینیم المهدی و آلومینیم قشم اشاره کرد.

روش های اکتشاف بوکسیت مانند بسیاری از مواد معدنی، به دو گروه روش های مستقیم و

روش‌های غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. حفر ترانشه و یا گمانه و گرفتن مغزه از جمله روش‌های مستقیم هستند، این روش‌ها، پرهزینه و زمان‌بر هستند. اما روش‌های غیرمستقیم اکتشافی کم هزینه‌تر و سریع‌تر می‌باشند. از روش‌های غیرمستقیم می‌توان به روش‌های ژئوفیزیکی اشاره کرد که به علت سرعت عمل زیاد و هزینه کم، بسیار مورد توجه قرار گرفته و به سرعت گسترش یافته‌اند. به کمک روش‌های ژئوفیزیکی یک یا چند ویژگی فیزیکی مواد، اندازه‌گیری می‌شود و مقادیر فیزیکی اندازه‌گیری شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

منطقه تاگویی یکی از بخش‌های محدوده معدنی بوکسیت جاجرم است که عملیات اکتشافی فراوانی از جمله تهیه عکس‌های هوایی، نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی، حفر گمانه و ترانشه در آن صورت گرفته است. عملیات استخراجی نیز جز چند مورد، استخراج عدسی نزدیک سطح زمین، تقریباً صورت نگرفته است. به منظور برداشت داده‌های ۸۲ سونداژ ژئوالکتریکی، قسمتی از این منطقه موسوم به تاگویی ۴ و ۵ انتخاب گردید، زیرا این ناحیه دارای واریزه‌های حفاری کمتری است؛ چراکه تغییرات ایجاد شده در سطح زمین، بر کیفیت داده‌ها اثر سوء دارد.

۱-۲- تاریخچه عملیات اکتشافی انجام شده

پی‌جویی بوکسیت در جاجرم مربوط به زمین‌شناسان شرکت زغال‌سنگ البرز شرقی است. آن‌ها در سال ۱۳۴۷ ضمن پی‌جویی زغال‌سنگ، وجود بوکسیت را گزارش کردند. کارشناسان سازمان زمین‌شناسی نیز با مطالعه عکس‌های هوایی و بازدید از منطقه، وجود زون بوکسیتی را تأیید کردند. در سال ۱۳۴۹ گزارشی از منطقه بوکسیت‌دار جاجرم تهیه شد که در آن وجود دو افق معدنی را تأیید کرد. مطالعات اکتشافی زون بوکسیتی جاجرم به طول ۱۲ کیلومتر به همراه تهیه نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه، توسط سازمان زمین‌شناسی انجام شد [www.gsinet.ir].

در تیرماه ۱۳۶۸ بررسی‌های ژئوالکتریکی با برداشت ۴۳ سونداژ یا گمانه ژئوالکتریکی بر روی رخنمون‌های آهکی و ماده معدنی بوکسیت، در محدوده کانسارها و معادن بوکسیت، انجام شد و نتایج

حاصل به صورت نقشه‌ها و شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه ظاهری الکتریکی ارائه شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها، هرچند به طور تئوری قادر به تشخیص کنتاکت شیل‌ها و آهک‌ها و تشخیص نواحی کارستی از بوکسیت باید باشد، اما در عمل حاکی از عدم موفقیت در تحقق انتظارات خواسته شده مسئولین ذی‌ربط شرکت معادن بوکسیت جاجرم بود که از دلایل مهم آن می‌توان به عدم دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری و روش‌های تفسیر مورد استفاده، اشاره نمود.

هم‌چنین در سال ۱۳۶۳ در منطقه لنگر شهرستان کیاسر، به‌منظور اکتشاف و بررسی کانسار بوکسیت، برداشت‌های ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک توسط گروه ژئوفیزیک سازمان زمین‌شناسی کشور، صورت پذیرفت. عملیات مغناطیس‌سنجی به طول ۲۷ کیلومتر و در ۱۵۵۰ نقطه و عملیات ژئوالکتریک با برداشت ۶۴ سونداژ الکتریکی با فواصل ۱۰۰ متر از یکدیگر صورت پذیرفت که نهایتاً به نتایج قابل‌قبولی در زمینه اکتشاف بوکسیت با بستر کربناته دست نیافتند [کیمیا قلم و همکاران، ۱۳۶۳].

۱-۳- ضرورت و هدف از انجام پایان‌نامه

معادن بوکسیت جاجرم بزرگ‌ترین معدن بوکسیت ایران است؛ که تعیین ذخیره و محل قرار-گیری لایه بوکسیتی در آن به صورت حفر گمانه‌های نزدیک به هم صورت می‌گیرد [www.iranitok.com]. حفر گمانه، علی‌رغم دقت اکتشافی بالا، زمان و هزینه زیادی را در پی دارد؛ از این‌رو استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مثل روش سونداژزنی مقاومت‌ویژه الکتریکی، به‌منظور عملیات اکتشافی یک ضرورت انکارناپذیر قلمداد می‌شود.

عملیات سونداژهای مقاومت‌ویژه الکتریکی، در یک منطقه معدنی که در آن ماده معدنی به شکل توده‌ای، عدسی، رگه‌ای و یا هر شکل پیوسته دیگر، معمولاً به‌منظور تعیین عمق و ضخامت توده‌های معدنی مزبور مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما در مواردی برداشت سونداژهای مقاومت‌ویژه الکتریکی با هدف تعیین ضخامت روبراه ماده معدنی و گاهی نیز برای شناسایی و تعیین عمق سنگ

بستر یا کف که بلافاصله در زیر ماده معدنی قرار دارد، انجام می‌شود. در این تحقیق نیز برداشت سونداژهای الکتریکی، مدل‌سازی و تفسیر نتایج آن‌ها با هدف تعیین عمق، ضخامت و شناسایی دقیق-تر زون کارستی کم‌پایین بوکسیت در یکی از معادن بوکسیت جاجرم انجام شده است.

به کمک نتایج و اطلاعات به دست آمده از مدل‌سازی و تفسیر کمی داده‌های سونداژ الکتریکی در منطقه معدنی مزبور می‌توان به تعیین محل بهینه حفر چاه‌های حفاری، برای کنترل مستقیم ماده معدنی بوکسیت، در زیر سطح زمین پرداخت. استفاده از سونداژ الکتریکی قائم همراه با اطلاعات زمین‌شناسی و سایر اطلاعات موجود، باعث افزایش کیفیت و دقت بررسی‌ها می‌شود. با درک اهمیت موضوع و با توجه به مزایای روش سونداژ الکتریکی قائم، به نظر می‌رسد با استفاده از این روش، ضمن دستیابی به نتایج موردنظر، صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه و زمان انجام مطالعات روی دهد.

اما سؤال اصلی تحقیق در این است که آیا روش مقاومت‌ویژه الکتریکی در اکتشاف بوکسیت کارآمد است؟ دقت نتایج مدل‌سازی و تفسیر برداشت سونداژهای الکتریکی، در تعیین عمق و شناسایی زون کارستی کم‌پایین بوکسیت، در منطقه مورد نظر تا چه حد است؟ آیا این روش می‌تواند در تعیین ضخامت ذخیره نیز مؤثر باشد؟

با انجام برداشت سونداژهای الکتریکی در منطقه معدنی بوکسیت جاجرم و مدل‌سازی و تفسیر نتایج، قصد پاسخ به این سؤالات وجود دارد.

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

تحقیق پیش‌رو در هفت فصل تنظیم شده است. در فصل اول ضمن ارائه یک مقدمه، به بیان مسأله و روش پاسخ به آن پرداخته شده است. فصل دوم و سوم پس از معرفی اصول روش مقاومت ویژه، به بحث راجع به مدل‌سازی داده‌های حاصل از این روش، می‌پردازد. در فصل چهارم در مورد زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و نحوه طراحی پروژه و برداشت داده‌های اولیه به‌طور مفصل توضیح

داده می‌شود و در فصل پنجم به کمک اصولی که در مورد مدل‌سازی داده‌ها، وجود دارد، به مدل‌سازی یک‌بُعدی داده‌های مقاومت‌ویژهٔ ظاهری پرداخته می‌شود و نتایج حاصله در سه مقطع دو‌بُعدی و یک‌مدل سه‌بُعدی به نمایش گذاشته می‌شود؛ تا درک جامع‌تری از نتایج تفسیر سونداژهای برداشت شده به دست آید. در فصل ششم پس از بیان روش به کار گرفته شده، وارون‌سازی هموار دو‌بُعدی، بر روی داده‌های خام صورت می‌گیرد و ضمن تفسیر نتایج، مقاطع دو‌بُعدی حاصله، با نتایج مدل‌سازی یک-بُعدی نیز مقایسه می‌شوند؛ نهایتاً فصل هفتم، با نتیجه‌گیری و ذکر چند پیشنهاد خاتمه می‌یابد.

فصل دوم

مبانی روش مقاومت ویژه

۲-۱- مقدمه

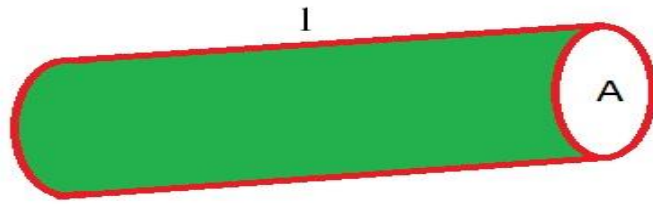
روش مقاومت ویژه الکتریکی یکی از روش‌های ژئوالکتریکی می‌باشد که در آن از یک چشمه الکتریکی مصنوعی، برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین استفاده می‌شود. برای این کار، معمولاً از چهار الکترود استفاده می‌شود که از دو تای آنها، برای فرستادن جریان الکتریکی و از دو تای دیگر، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی، استفاده می‌شود. در صورت غیر همگن^۱ و غیر همسانگرد^۲ بودن زمین، داده‌های حاصل از این روش، نشان دهنده مقادیر مقاومت ویژه‌های واقعی زمین نیستند، بلکه این مقادیر نشان دهنده مقاومت ویژه‌های ظاهری زیر سطح زمین می‌باشند [Loke, 2004a]. در ادامه، توضیح مختصری راجع مبانی روش مقاومت ویژه داده می‌شود.

۲-۲- تئوری روش مقاومت ویژه

مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین را نشان می‌دهد. در مورد رسانایی مواد با مقاومت الکتریکی R ، طول L و سطح مقطع R در زیر سطح زمین، همان‌طور که در شکل (۱-۲) دیده می‌شود؛ رابطه (۱-۲) برقرار است:

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

¹ inhomogeneous
² unisotrop



شکل (۱-۲): توده استوانه‌ای در زیر سطح زمین

بر اساس قانون اهم معادله (۱-۲) به شکل زیر در می‌آید:

$$\rho = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot l} \quad (۲-۲)$$

که در این رابطه، ρ مبین مقاومت ویژه الکتریکی، I جریان الکتریکی، ΔV برابر اختلاف پتانسیل و l طول استوانه فرضی می‌باشند. رابطه (۲-۲) برای تعیین مقاومت ویژه محیط همگن^۱ و همسانگرد^۲ مناسب است؛ اما برای یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد باید مقاومت ویژه را در هر نقطه تعیین نمود. اگر پارامترهای A و L به اجزای بینهایت کوچکی تقسیم شوند، مقاومت ویژه برای هر جزء مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [Ozebo, et al., 2008].

$$\rho = \frac{\lim_{l \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{l}}{\lim_{l \rightarrow 0} \frac{I}{A}} \quad (۳-۲)$$

در حقیقت، این رابطه، بیان دیگری از قانون اهم است. بنیادی‌ترین قانون فیزیکی که تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی بر اساس آن پایه‌ریزی می‌شود، قانون اهم^۳ می‌باشد.

$$J = \sigma E \quad (۴-۲)$$

در این رابطه، σ برابر رسانندگی الکتریکی محیط، J نشان‌دهنده چگالی جریان و E برابر شدت میدان

¹ homogeneous

² isotrop

³ Ohm's law

الکتریکی محیط می‌باشد. اندازه مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) برابر با وارون رسانندگی (σ) می‌باشد. در عمل، آن چه که اندازه گیری می‌شود، اختلاف پتانسیل میدان الکتریکی می‌باشد. ارتباط بین شدت میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی طبق رابطه (۵-۲) تعریف می‌شود [Loke, 2004 a].

$$E = -\nabla(\Phi) \quad (5-2)$$

در این رابطه، Φ پتانسیل الکتریکی است. از دو رابطه اخیر نیز نتیجه می‌شود:

$$J = -\sigma\nabla(\Phi) \quad (6-2)$$

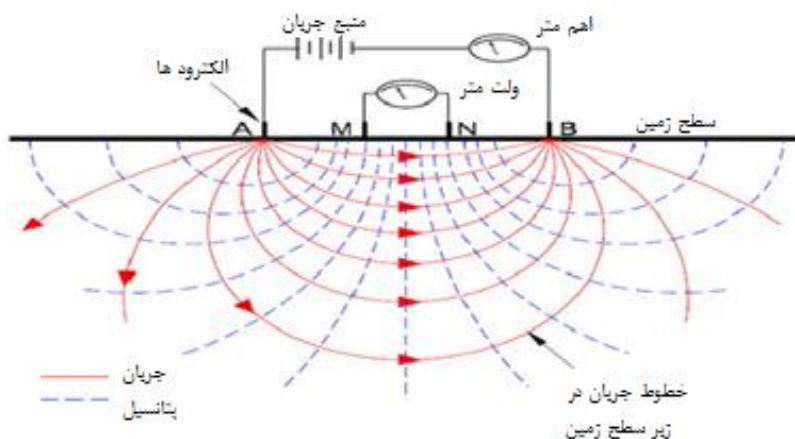
در همه برداشتها منبع جریان به صورت نقطه‌ای می‌باشد. در یک زمین همگن و همسانگرد رابطه بین اندازه پتانسیل و مقاومت ویژه زمین به صورت رابطه (۷-۲) تعریف می‌شود.

$$\Phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (7-2)$$

در این رابطه، r فاصله الکتروود مورد نظر از منبع جریان، Φ برابر اندازه پتانسیل الکتریکی از نقطه‌ای به فاصله r از منبع جریان و I مبین اندازه جریان الکتریکی می‌باشند.

شکل (۲-۲) چگونگی توزیع خطوط جریان و نحوه توزیع پتانسیل الکتریکی ایجاد شده، در اثر

شارش جریان به وسیله الکتروودهای پتانسیل را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲): نحوه توزیع خطوط جریان و پتانسیل [After Corvallis, 2000].

اندازه پتانسیل الکتریکی ایجاد شده به وسیله دو الکترودهای جریان در فاصله معلومی از یک زمین همگن و همسانگرد، مطابق رابطه (۲-۸) محاسبه می شود.

$$\Phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{C1}} - \frac{1}{r_{C2}} \right) \quad (۲-۸)$$

در این رابطه، r_{C1} فاصله نقطه مورد نظر از الکترودهای $C1$ و r_{C2} مبین فاصله همان نقطه از الکترودهای $C2$ است.

در شکل (۲-۲) نمونه‌ای از یک آرایش چهار الکترودی نشان داده شده است. در این شکل، الکترودهای $C1$ و $C2$ نشان‌دهنده الکترودهای جریان و الکترودهای $P1$ و $P2$ الکترودهای پتانسیل می‌باشند. در این آرایش چهار الکترودی، اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده، بین دو الکترودهای پتانسیل، طبق رابطه (۲-۹) محاسبه می شود.

$$\Delta\Phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right) \quad (۲-۹)$$

که در آن $\Delta\Phi$ برابر اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، $r_{C_1P_1}$ فاصله بین الکترود-های C_1 و P_1 ، $r_{C_2P_1}$ فاصله بین الکترودهای C_2 و P_1 ، $r_{C_1P_2}$ برابر فاصله بین الکترودهای C_1 و P_2 و $r_{C_2P_2}$ فاصله بین الکترودهای C_2 و P_2 می‌باشند.

برداشت‌های صحرائی بر روی زمین‌های غیرهمگن که مقاومت‌ویژه الکتریکی آن‌ها در سه جهت محورهای مختصات متغیر است، صورت می‌گیرد و هدف از این برداشت‌ها به دست آوردن اندازه مقاومت‌ویژه الکتریکی زمین می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل می‌توان اندازه مقاومت‌ویژه ظاهری زمین را طبق رابطه (۱۰-۲) محاسبه نمود [Loke, 2004 a].

$$\rho_a = K \frac{\Delta\Phi}{I} \quad (10-2)$$

$$K = \left(\frac{1}{r_{C_1P_1}} - \frac{1}{r_{C_2P_1}} - \frac{1}{r_{C_1P_2}} + \frac{1}{r_{C_2P_2}} \right)$$

در این رابطه، ρ_a مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری زمین و K فاکتور هندسی^۱ برای آرایش مورد استفاده خوانده می‌شود. فاکتور هندسی، بستگی به چگونگی آرایش چهار الکترود در هر آرایش دارد. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه، معمولاً مقدار مقاومت زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه بین مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری به صورت رابطه (۱۱-۲) تعریف می‌شود [Loke, 2004 a; Reynolds, 1997].

$$\rho_a = KR \quad (11-2)$$

۳-۲- تقسیم بندی مواد مختلف از لحاظ مقاومت‌ویژه

به‌طور کلی مقاومت‌ویژه سنگ‌ها عمدتاً به‌میزان خردشدگی، درصد تخلخل و درصد شکستگی‌ها

¹ Geometrical factor

در سنگ‌ها بستگی دارد. سنگ‌های رسوبی که معمولاً متخلخل بوده و دارای اشباع‌شدگی آب بالاتری می‌باشند، به طور معمول از مقاومت ویژه کمتری برخوردارند. خاک‌های رسی معمولاً مقاومت ویژه پایین‌تری نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند؛ اما نکته قابل توجه، همپوشانی مقادیر مقاومت ویژه سنگ-ها و خاک‌ها می‌باشد. این بدین دلیل است که مقاومت ویژه الکتریکی سنگ و یا نمونه خاک به عوامل دیگری مثل تخلخل، اشباع آب و غلظت نمک‌های غیرمحلول نیز وابسته می‌باشد [کلاگری، ۱۳۷۱].

جدول (۱-۲) گستره مقاومت ویژه چند نوع سنگ را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲): مقاومت ویژه برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها [After Telford, et al., 1990].

نوع آب یا سنگ	مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم‌متر
آب دریا	۰/۲
آب سفره‌های آبرفتی	۱۰ - ۳۰
آب چشمه طبیعی	۵۰ - ۱۰۰
شن و ماسه خشک	۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰
شیل	۲۰ - ۲۰۰۰
مارن	۳۰ - ۷۰
رس	۱ - ۱۰۰
بوکسیت	۲۰۰ - ۶۰۰۰
لاتریت	۱۲۰ - ۱۵۰۰
آهک	۵۰ - ۱۰۰۰۰۰۰
دولومیت	۳۵۰ - ۵۰۰۰
ماسه سنگ آرژیلیتی	۵۰ - ۳۰۰
شیست آرژیلیتی یا تخریب‌شده	۱۰۰ - ۳۰۰
شیست سالم	۳۰۰ - ۳۰۰۰

۲-۴- روش‌های برداشت مقاومت ویژه الکتریکی

داده‌های مقاومت ویژه به صورت یک‌بُعدی، دو‌بُعدی و هم‌چنین سه‌بُعدی به دست می‌آیند. به-طور کلی برداشت‌های یک‌بُعدی مقاومت ویژه، جهت بررسی تغییرات جانبی و عمقی به دو روش

صورت می‌پذیرد.

الف) پروفیل‌زنی

ب) سونداژزنی

با توجه به نوع ساختار زمین‌شناسی هدف اکتشافی مورد نظر، می‌توان یکی از روش‌های سونداژزنی و پروفیل‌زنی را طراحی و برداشت کرد. در برداشت‌های دو و سه‌بعدی، تغییرات مقاومت-ویژه، هم‌زمان در جهات مختلف بررسی می‌شود.

۲-۴-۱- سونداژزنی الکتریکی

در سونداژهای ژئوالکتریک، تغییرات عمقی مقاومت‌ویژه و لایه‌بندی‌های موجود، با استفاده از آرایش‌هایی که فاصله‌ی میان بعضی از الکترودها و یا همه‌ی آنها به‌طور متقارن افزایش می‌یابد، بررسی می‌شوند. مقادیر مقاومت‌ویژه با توجه به فاصله‌ی الکترودی بر روی نمودارهای لگاریتمی رسم می‌شوند. اگرچه روش‌هایی برای تفسیر شیب لایه‌ها نیز پیشنهاد شده است، اما سونداژزنی ژئوالکتریک تنها در مواقعی که فصل مشترک لایه‌ها افقی باشد؛ پاسخ خوبی ارائه می‌دهد. در روش سونداژ الکتریکی موقعیت مرکز آرایش ثابت مانده و در هر مرحله، بسته به نوع آرایش، الکترودها نسبت به محل مرکز آرایش جابه‌جا شده و در فاصله‌ی مشخص دورتری از آن قرار می‌گیرند. با تکمیل این عمل، جریان به اعماق بیشتر نفوذ کرده و اطلاعاتی از لایه‌ها در اعماق پایین‌تر به دست می‌دهد [Milson, 1989].

۲-۴-۲- پروفیل‌زنی الکتریکی

در روش پروفیل‌زنی فاصله‌ی میان الکترودهای جریان و پتانسیل ثابت باقی مانده ولی موقعیت مرکز آرایش با جابه‌جایی کل الکترودها در هر مرحله تغییر می‌کند. به این ترتیب می‌توان تغییرات جانبی لایه‌ها را در یک عمق معین بررسی کرد. از کاربردهای مهم این روش می‌توان به اکتشاف گسل‌ها و دایک‌ها، حفرات، رودخانه‌های مدفون و دیگر ساختارهای قائم یا با شیب زیاد اشاره کرد. در

مواقعی که احتیاج به تهیه شبه مقاطعی از مقاومت‌ویژه توده‌های زیرسطحی است، داده‌ها به صورت دو بُعدی برداشت می‌شوند [Milson, 1989; Mooney, 1980].

۲-۴-۳- روش برداشت سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته

روش سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته^۱ (CVES)، در حقیقت از تعدادی سونداژ الکتریکی تشکیل شده که در یک پروفیل خطی برداشت شده‌اند و در نتیجه می‌توانند به صورت دو بُعدی نیز تفسیر شوند [Molano, et al., 1990].

در این روش هدف اولیه بررسی زمین به صورت یک بُعدی است و برداشت در آن اغلب با آرایه شلومبرژه انجام می‌شود. با برداشت خطی چندین سونداژ امکان تفسیر دو بُعدی میسر خواهد شد. به دلیل حساسیت کم آرایه شلومبرژه به تغییرات جانبی، بهتر است مدل‌سازی به وسیله این آرایه را یک مدل‌سازی ۱/۵ بُعدی (1.5 D) دانست. آرایه شلومبرژه در نشان دادن تغییرات هموار مقاومت‌ویژه، قوی‌تر از دیگر آرایه‌ها است، از این رو روش برداشت CVES در زمین‌های با تغییرات عمقی هموار نتایجی قابل قبولی ارائه می‌دهد [Muiuane & Padersen, 1999].

۲-۵- انتخاب آرایش الکتروودی مناسب

انتخاب آرایش الکتروودی مناسب برای اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، به وضعیت ساختارهای زیر سطح زمین، حساسیت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه و به میزان نوفه زمینه بستگی دارد. چهار مؤلفه اصلی یک آرایش عبارتند از: [Loke, 2004 a]

(۱) عم

ق نفوذ

(۲) حس

¹ Continuous Vertical Electric Sounding

اسیت آرایش به تغییرات عمقی و جانبی مقاومت ویژه الکتریکی در داخل زمین

پوش

(۳)

ش افقی داده‌ها

نسب

(۴)

ت سیگنال به نویز

برای اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه، آرایش‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است. از مهمترین آرایش‌هایی که در روش مقاومت ویژه به کار برده می‌شوند، می‌توان به آرایش‌های ونر، شلومبرژه، دوقطبی - دوقطبی، قطبی - دوقطبی و گرادیان اشاره کرد. آرایش ونر در پروفیل‌زنی، آرایش شلومبرژه در سونداژزنی و آرایش دوقطبی - دوقطبی در تهیه شبه مقاطع و برداشت‌های پلاریزاسیون القایی^۱ محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. جدول (۲-۲) مقایسه‌ای بین مؤلفه‌های مذکور برای چند آرایش الکترودی را به صورت تعداد * بیان می‌کند.

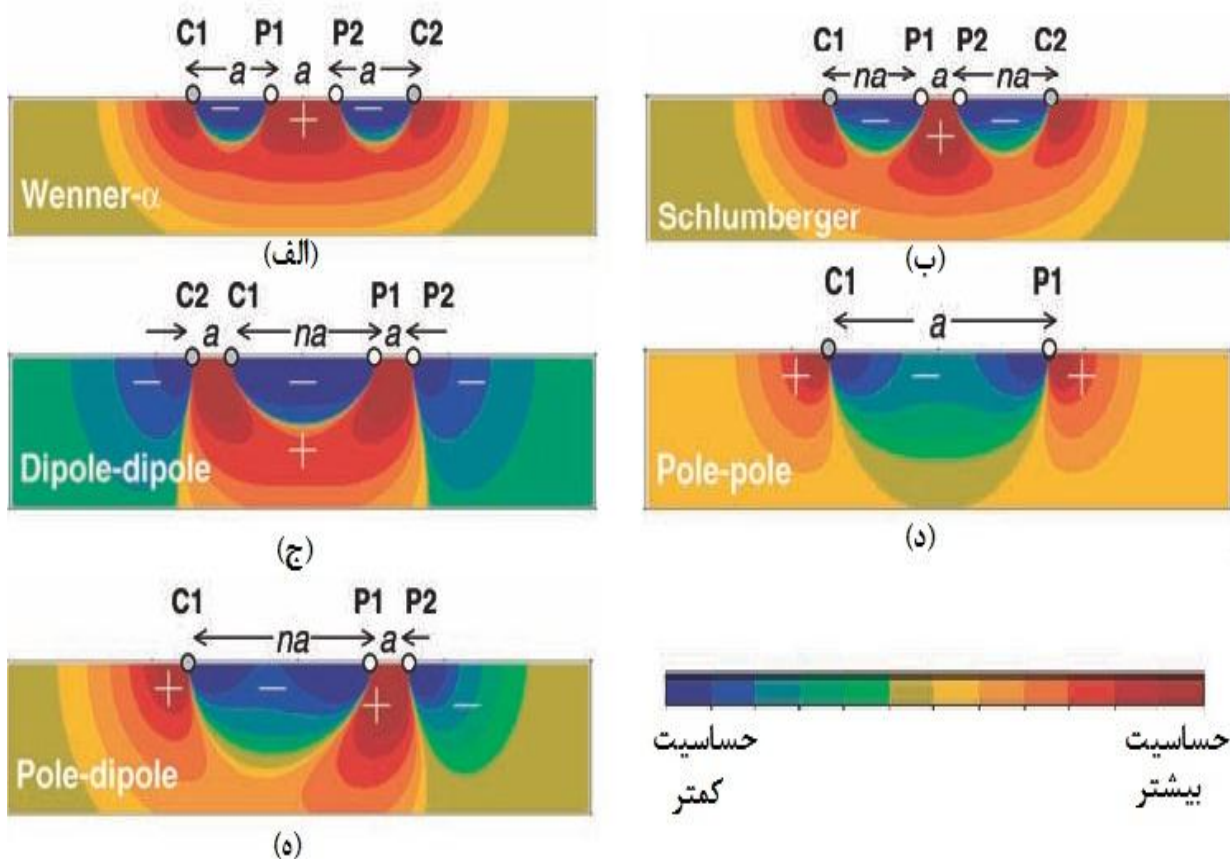
جدول (۲-۲): خصوصیات مختلف چند آرایش الکترودی [Samouelian, et al., 2005].

دوقطبی - قطبی	قطبی - قطبی	دوقطبی - دوقطبی	شلومبرژه	ونر	
**	**	*	**	****	حساسیت آرایش به ساختارهای افقی
*	**	****	**	*	حساسیت آرایش به ساختارهای قائم
***	****	***	**	*	عمق نفوذ
***	****	***	**	*	پوشش افقی داده‌ها
**	****	*	***	****	نسبت سیگنال به نویز

حساسیت آرایش به ساختارهای افقی و قائم را می‌توان در شکل (۲-۳) به خوبی درک کرد.

رنگ‌های گرم و علامت +، حساسیت بیشتر و رنگ‌های سرد حساسیت کمتر را نشان می‌دهند:

¹ Induced Polarization

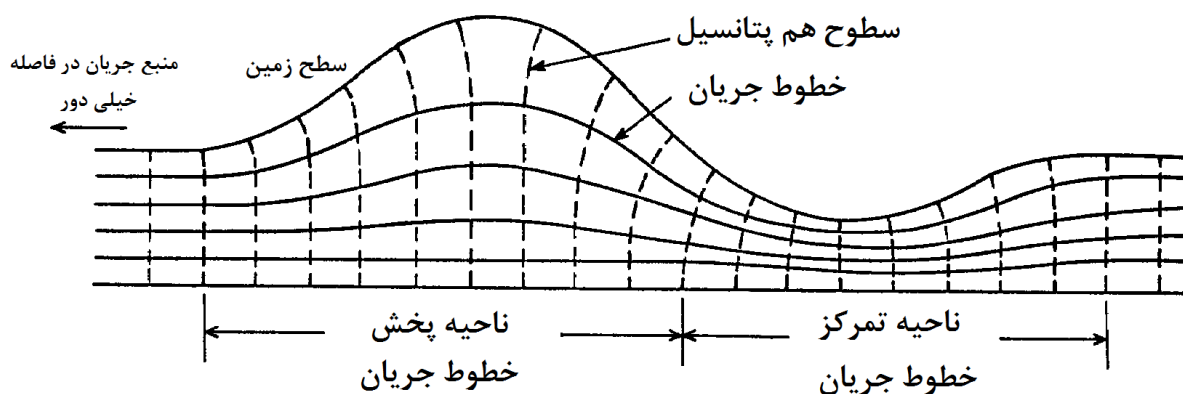


شکل (۲-۳): نمایش حساسیت آرایش‌های الکترودی در برداشت‌های دو بُعدی. (الف) ونر، (ب) شلومبرژه، (ج) دو قطبی - دو قطبی، (د) قطبی - قطبی، (ه) قطبی - دو قطبی [After Dahlin & Zhou, 2004].

۲-۶- تأثیر توپوگرافی بر مقادیر مقاومت ویژه ظاهری

توپوگرافی سطح زمین بر روی داده‌های صحرایی تأثیر گذاشته و بسته به شدت توپوگرافی باعث به وجود آمدن آنومالی‌های کاذب می‌گردد. علت این موضوع تمرکز^۱ خطوط جریان و سطوح هم-پتانسیل در زیر دره و پخش^۲ آن‌ها در زیر تپه است. شکل (۲-۴) تجمع و تفرق خطوط جریان و سطوح هم-پتانسیل را نشان می‌دهد.

¹ focusing
² dispersion



شکل (۲-۴): تأثیر توپوگرافی بر خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل [After Fox, et al., 1980].

در زیر دره‌ها آنومالی منفی نسبت به زمینه در مقادیر مقاومت ویژه ظاهری ایجاد می‌شود و وقتی داده‌های مقاومت ویژه ظاهری بر روی تپه برداشت شوند، وجود آنومالی مثبت کاذب در شبه-مقطع حاصله مشهود است [Fox, et al., 1980].

۲-۷- کاربردها، مزایا و معایب روش مقاومت ویژه

از کاربردهای روش مقاومت ویژه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [Mooney, 1980]:

- ۱) در اکتشافات معدنی (سولفیدها، اکسیدها و به‌طور کلی کانی‌هایی که دارای جلای فلزی باشند) و به‌ویژه در شناسایی زون‌های خرد شده گسله که ارتباط نزدیکی با کانی‌سازی فلزی دارند.
- ۲) مطالعه آب‌های زیرزمینی جهت تعیین سطح و عمق سفره آب‌های زیرزمینی، مرز آب شور و شیرین و محل کانال‌های رودخانه‌ای مدفون.
- ۳) در کارهای مهندسی عمران و راه، برای تعیین ضخامت آبرفت‌ها، عمق سطح سفره آب‌دار، عمق سنگ بستر، اکتشاف گسل‌ها و شناسایی حفره‌های زیر سطحی و لایه‌های رسی.
- ۴) در بررسی مسائل زیست‌محیطی جهت شناسایی زون‌های آلوده زیر سطحی، ترسیم آن‌ها و تعیین گسترش این آلودگی‌ها با زمان بسیار سودمند است.

(۵) در اکتشافات باستان‌شناسی که اکثراً برای اکتشاف و ترسیم پی دیواره‌ها به کار می‌رود.

از مزایای روش مقاومت‌ویژه در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی (مانند لرزه‌شناسی، گرانی-سنجی و ...) و یا روش‌های اکتشافی مستقیم (مانند حفاری و ...) می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [Mooney, 1980]:

(۱) انعطاف پذیری (استفاده از آن در هر مرحله از اکتشاف مثل شناسایی اولیه، تعیین جزئیات).

(۲) روشی نسبتاً سریع و آسان برای برداشت داده‌ها.

(۳) در مقایسه با دیگر روش‌های الکتریکی همچون الکترومغناطیس، کمتر به نوفه (نویز) حساس است.

(۴) هزینه‌های صحرائی پایین و کم بودن تعداد نیروی انسانی مورد نیاز برای برداشت.

(۵) سبک و قابل حمل بودن دستگاه‌ها

(۶) تفسیر کیفی داده‌ها به طور مستقیم و توسعه نرم‌افزارهای کامپیوتری به منظور تفسیر کمی داده‌ها صورت می‌گیرد.

برخی از محدودیت‌های این روش عبارتند از [کلاگری، ۱۳۷۱]:

(۱) با توجه به گستردگی دامنه تغییرات مقاومت‌ویژه تعبیر و تفسیرها قدری مبهم هستند. مخصوصاً در مناطق خرد شده، این ابهام بیشتر است، هرچند مقایسه و تطبیق با نقشه زمین‌شناسی می‌تواند تا حدی این ابهام را کاهش دهد.

(۲) عمق نفوذ این روش محدود می‌باشد (به علت محدودیت در تزریق جریان الکتریکی و گسترش کابل‌های طویل بر روی زمین). علاوه بر این روباره‌های رسا مثل رس‌ها و مارن‌ها نیز عمق نفوذ

را کاهش می‌دهند.

۳) تأسیسات بشری مانند ساختمان‌ها، کابل‌های برق و تلفن، لوله‌های فلزی و امثال آن‌ها، داده‌های اندازه‌گیری شده را به نویز آلوده می‌سازند.

۴) این روش در اکتشاف مواد معدنی پراکنده، که ذرات کانی‌ها بهم اتصال ندارند، کارایی چندانی ندارد.

۵) همانند اکثر روش‌های ژئوفیزیکی دیگر، توپوگرافی تأثیر منفی بر روی داده‌های مقاومت‌ویژه دارد. توپوگرافی موجب پراکندگی موضعی و تمرکز توزیع جریان در نزدیک سطح می‌شود؛ که این موضوع سبب تشکیل تمرکزهای کاذب مقاومت‌ویژه به علت وجود عوارض زمینی در داده‌های صحرائی می‌شود [Fox, et al., 1980].

۶) در برخی موارد، مدل‌های ژئوفیزیکی حاصل، با مدل زمین‌شناسی مربوطه بسیار تفاوت دارد. به-عبارت دیگر الزاماً لایه‌های ژئوالکتریکی بر لایه‌های زمین‌شناسی منطبق نیستند.

۷) ابهام در تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه، باعث می‌شود که چندین مدل وجود داشته باشد، بنابراین اطلاعات جنبی مانند اطلاعات زمین‌شناسی برای تفسیر نتایج ضروری است [Mooney, 1980].

فصل سوم

اصول مدل سازی عددی

۳-۱- مقدمه

داده‌های برداشت شده عملیات صحرائی، در حقیقت یک سری اعداد خام می‌باشند که توجیه دقیق رفتار لایه‌های زیر سطحی، از روی این داده‌ها (به‌طور مستقیم) غیرممکن است. بدین منظور تعیین رابطه بین داده‌های صحرائی به دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به-عبارت دیگر مدل‌سازی داده‌های برداشت شده، جهت توجیه رفتار لایه‌های زیرسطحی، ضروری می-باشد. در مدل‌سازی ریاضی، روابط فیزیکی، توسط یک‌سری معادلات دیفرانسیلی و معادلات انتگرالی بیان می‌شوند. به‌گونه‌ای که می‌توان پارامترها و خواص فیزیکی مدل را با حل این نوع معادلات ریاضی تعیین نمود.

مدل‌سازی عددی را می‌توان به دو نوع پیشرو^۱ (مستقیم) و وارون^۲ (معکوس) تقسیم‌بندی نمود؛ که در زیر به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود. در درون تمام برنامه‌های وارون‌سازی، مدل‌سازی پیشرو نیز نهفته است.

۳-۲- مدل‌سازی پیشرو

در این نوع مدل‌سازی، با وارد کردن پارامترهای یک مدل فرضی، که با داده‌های تجربی هم-خوانی دارد، یک‌سری داده‌های تئوری منطبق بر پارامترهای مدل پیشنهادی به دست می‌آید؛ که در-

^۱ Forward modeling

^۲ Inverse modeling

صورت بالا بودن جذر میانگین مربعات خطای بین این داده‌ها و داده‌های تجربی (خطای جذر میانگین مربعات)، فرآیند مدل‌سازی مجدداً تکرار خواهد شد. معادله (۱-۳)، رابطه عمومی مدل‌سازی پیشرو را بیان می‌کند [Meju, 1994].

$$d = Gm \quad (1-3)$$

در این رابطه، d پاسخ مدل، G تابع کرنل^۱ و m بیان‌گر پارامترهای مدل است.

این معادله، بیان ساده‌ای از ارتباط بین پارامترهای مدل و پاسخ ریاضی آن می‌باشد. اما در اکثر موارد از جمله مسائل ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی تابع کرنل شکل پیچیده‌ای دارد؛ لذا معادله مذکور غیرخطی است. برای یافتن پاسخ‌های مدل باید معادله (۲-۳) که معادله پایستگی جریان الکتریکی است را حل نمود.

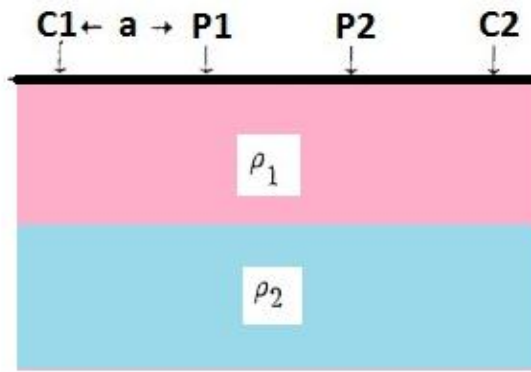
$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (2-3)$$

در این رابطه، J چگالی جریان کل و q چگالی حجمی بار الکتریکی می‌باشند. شکل توسعه یافته معادله بالا به صورت معادله (۳-۳) است [Dey & Morrison, 1979].

$$\nabla^2 [\sigma(x, z)u(x, y, z) + \sigma(x, z)\nabla^2 u(x, y, z) - u(x, y, z)\nabla^2 \sigma(x, z)] = -2I\delta(r - r_s) \quad (3-3)$$

در این رابطه، σ هدایت الکتریکی، u پتانسیل الکتریکی ناشی از جریان نقطه‌ای، I شدت جریان تزریق شده به داخل زمین، δ تابع دلتای دیراک و r_s نشان‌دهنده بردار موقعیت الکتروود جریان می‌باشند. برای حل این معادله و به دست آوردن پتانسیل الکتریکی، از روش‌های المان محدود و یا تفاضل محدود استفاده می‌شود. برای روشن شدن موضوع، یک زمین دو لایه، مانند شکل (۱-۳) در نظر گرفته می‌شود [Meju, 1994].

¹ Kereneel Function



شکل (۳-۱): برداشت داده مقاومت ویژه ظاهری به کمک آرایش ونر بر روی یک زمین دو لایه. لایه بالایی روبره با مقاومت ویژه ρ_1 و لایه پایینی سنگ بستر با مقاومت ویژه ρ_2 [After Meju, 1994].

مقاومت ویژه ظاهری حاصل از برداشت داده با آرایش ونر، به صورت معادله (۳-۴) می باشد.

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{[1 + (\frac{2nt}{a})^2]}} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{[1 + (\frac{nt}{a})^2]}} \right\} \quad (4-3)$$

در این رابطه، $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ ، ρ_1 مقاومت ویژه لایه اول، ρ_2 مقاومت ویژه لایه دوم، ρ_a مقاومت ویژه

ظاهری، t ضخامت لایه اول و a فاصله الکترودی آرایش ونر است. بدیهی است در زمین های با لایه-

بندی بیشتر این رابطه، بسیار پیچیده تر خواهد بود [Meju, 1994].

۳-۳- مدل سازی وارون

فرآیند مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه، عکس مدل سازی پیشرو است. بدین ترتیب که

در هر مرحله از تکرار، با اعمال یک سری عملیات ریاضی روی داده های مقاومت ویژه ظاهری، پارامتر-

های فیزیکی مدل به دست می آید. مسائل وارون سازی بر خلاف مسائل پیشرو که اغلب یک مرحله ای

و خوش حالت^۱ هستند، به دلایل مختلف تکراری و بد حالت^۲ می باشند. از جمله این دلایل وجود نوفه-

های زمین شناسی، ناقص بودن اطلاعات و خطا در اندازه گیری ها است. حل مسائل وارون مشکل و در

¹ Well posed

² Ill posed

برخی موارد غیرممکن است.

مسائل خطی به کمک معادله ماتریسی تعمیم یافته حاصل از معادله (۱-۳) به صورت معادله

(۵-۳) حل می‌شود.

$$m = G^{-1}d \quad (۵-۳)$$

اما بین داده‌های حاصل از پارامترهای مدل و داده‌های برداشت شده، اختلافی به اندازه e_i وجود دارد؛

که به صورت معادله (۶-۳) نشان داده می‌شود [Meju, 1994; Samouelian, et al., 2005]:

$$d = Gm + e_i \quad (۶-۳)$$

بهترین راه برای رسیدن به یک پاسخ یکتا برای پارامترهای مدل کمینه کردن مجموع مربعات

باقیمانده (e_i) است؛ که به صورت رابطه (۷-۳) قابل ارائه است:

$$q = e^T e = \sum_{i=1}^n (d_i - \sum_j^p G_{ij} m_j)^2 \quad j = 1, \dots, p \quad (۷-۳)$$

و یا

$$q = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (۸-۳)$$

برای رسیدن به کمینه مجموع مربعات باقیمانده از معادله (۸-۳) نسبت به پارامترهای مدل مشتق

گرفته و حاصل برابر صفر قرار داده می‌شود؛ بنابراین:

$$\frac{\partial q}{\partial m_j} = \frac{\partial (d^T d - d^T Gm - m^T G^T d + m^T G^T Gm)}{\partial m_j} = 0 \quad (۹-۳)$$

و یا

$$-d^T G - G^T d + G^T G m + m^T G^T G = 0 \quad (10-3)$$

و نتیجه می‌شود که:

$$2G^T G m = 2G^T d \quad (11-3)$$

به این ترتیب پاسخ کمترین مربعات پارامتر تخمینی مدل به دست می‌آید؛ که با \hat{m} نشان داده می‌شود:

$$\hat{m} = [G^T G]^{-1} G^T d \quad (12-3)$$

عبارت (12-3) کمترین مربعات تعمیم یافته، وارون نامیده می‌شود و بر روی داده‌ها اعمال می‌شود؛ تا مجدداً \hat{m} بهبود یابد [Meju, 1994].

معادله (12-3) برای مسائل خطی است و همان‌طور که در بخش (2-3) ذکر شد، در مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه، مسأله کاملاً غیرخطی است. معادله (13-3) معادله عمومی مربوط به مسائل غیرخطی است [Samouelian, et al., 2005]:

$$d_i = f_i(m_1, m_2, \dots, m_p) = f_i(m) \quad i = 1, \dots, n \quad (13-3)$$

یک راه عمومی برای حل مسائل غیرخطی، تبدیل آن‌ها به مقدار تخمینی خطی و استفاده از روش کمترین مربعات است. بدین منظور بسط تیلور مسأله را حول یک همسایگی پارامترهای مدل اولیه، نوشته و از جملات مرتبه اول به بعد صرف نظر می‌شود. این روش، راه‌حلی پذیرفته‌شده برای حل مسائل وارون است. اگر مدل اولیه را m^0 در نظر گرفته شود؛

$$d_i^0 = f_i(m_1^0, m_2^0, \dots, m_p^0) = f_i(m) \quad (14-3)$$

به زبان ساده‌تر

$$d^0 = f(m^0) \quad (15-3)$$

حال معادله (۱۳-۳) به صورت معادله (۱۶-۳) بازنویسی می‌شود.

$$f(m) = f_i(m_1^0 + \delta m_1, m_2^0 + \delta m_2, \dots, m_p^0 + \delta m_p) \quad (16-3)$$

$$f(m) = f_i(m^0) + \frac{\partial f_i}{\partial m_1} \delta m_1 + \frac{\partial f_i}{\partial m_2} \delta m_2 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial m_p} \delta m_p \quad (17-3)$$

و یا

$$f(m) = f(m^0) + \left\{ \sum_{j=1}^p \frac{\partial f_i(m)}{\partial m_j} \Big|_{m=m^0} \delta m_j \right\} \quad (18-3)$$

مجدداً جهت کمینه کردن مجموع مربعات خطا مانند روابط (۸-۳) و (۹-۳)، از مجموع مربعات باقیمانده نسبت به پارامترهای مدل مشتق‌گیری نموده و در انتها به رابطه (۱۹-۳) حاصل می‌شود:

$$m^{k+1} = m^k + (A^T A)^{-1} A^T y \quad (19-3)$$

در این معادله، A ماتریس ژاکوبین^۱، m^k پارامتر مدل در تکرار k ام، m^{k+1} پارامتر مدل در تکرار $k+1$ ام و y بردار اختلاف بین پاسخ مدل و داده‌های برداشت شده می‌باشد. درآیه‌های ماتریس ژاکوبین شامل مشتق جزئی تابع کرنل نسبت به پارامترهای مدل می‌باشند [Meju, 1994].

دو روش مرسوم مدل‌سازی وارون عبارتند از روش پارامتری^۲ و هموار^۳ که در محاسبات مربوط به هر یک، الگوریتم‌های مختلفی استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی هموار از روش اکام [Constable, et al., 1987; deGroot-Hedlin & Constable, 1990] و به‌منظور مدل‌سازی

¹ Jacobian matrix

² parametric

³ smooth

پارامتری از الگوریتم ریج^۱ [Inman, 1975] استفاده شده است. در ادامه مختصری راجع به این دو روش بحث خواهد شد.

۳-۳-۱-مدل سازی به روش اُکام

برای وارون سازی هموار، بر روی بردار پارامترهای مدل فیلتر R اعمال می شود که به وسیله رابطه (۲۰-۳) بیان می شود.

$$R = \int \left(\frac{dm}{dz}\right)^2 dz \quad (20-3)$$

در این رابطه m بردار پارامترها و Z برابر عمق است. لذا معادله (۲۰-۳) را در راستای عمق، می توان به شکل زیر نمایش داد.

$$R_1 = \sum_{i=1}^N (m_i - m_{i-1})^2 \quad (21-3)$$

حال هدف کمینه کردن معادله (۲۱-۳) می باشد. این معادله را به شکل معادله (۲۲-۳) نیز می توان نمایش داد:

$$R_1 = \|C_m\|^2 \quad (22-3)$$

که در آن، ماتریس هموارساز C با ابعاد N×N به صورت رابطه (۲۳-۳) تعریف می گردد.

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ -1 & 1 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdot & 0 \\ \cdot & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (23-3)$$

با کاربرد روش کمترین مربعات و استفاده از روش گوس-نیوتن، دستگاه معادله (۲۴-۳) به

¹ Ridge regression

دست می‌آید:

$$m_{i+1} = [\mu(C C^T) + J_i J_i^T]^{-1} J_i^T d_i \quad (24-3)$$

که در آن، \hat{i} بیان گر شماره تکرار، J_i ماتریس ژاکوبین جزئی، μ فاکتور تعدیل، d_i بردار اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تئوری، m_i بردار پارامترهای مدل برای i امین تکرار و نهایتاً C برابر ماتریس هموارساز برای محدود کردن آشفتگی پارامترهای مدل برای برخی مقادیر ثابت می‌باشند [Constable, et al., 1987].

۳-۳-۲- مدل سازی به روش رگرسیون ریج

می‌دانیم، طی یک پروسه مدل سازی پارامتری، داده‌های تجربی حاصل از عملیات صحرائی (d) توسط یک تابع غیرخطی (f)، با پارامترهای مدل زمین (m) مرتبط می‌گردند. بنابراین خواهیم داشت:

$$d = f(m) + e \quad (25-3)$$

در این رابطه e بردار خطا می باشد. اگر خطاهای تجربی (e_i) که ($i=1, \dots, n$)، از نظر آماری مستقل از یکدیگر فرض شوند، ماتریس قطری وزنی W که در فرآیند مدل سازی به طور مکرر مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$W = \text{diag}\left(\frac{1}{e_1}, \frac{1}{e_2}, \dots, \frac{1}{e_n}\right) \quad (26-3)$$

بدین ترتیب مجموع مربعات باقیمانده‌های W و $Wf(m^0)$ را می‌توان به شکل زیر نمایش داد:

$$ssq = \sum_{i=1}^n |W_i - Wf(m^0)|^2 \quad (27-3)$$

در این رابطه، m^0 اولین مدل پیشنهادی است. بسط تیلور تابع غیرخطی $f(m)$ حول m^0 برابر است با:

$$f(m) = f(m^0) + \frac{\partial f(m^0)}{\partial m} (m - m^0) \quad (28-3)$$

یا

$$f(m) = f(m^0) + Ax \quad (29-3)$$

که در آن $A = \frac{\partial f(m^0)}{\partial m}$ برابر ماتریس ژاکوبین و $X = (m - m^0)$ بردار تصحیح پارامترهای مدل

می‌باشند. بنابراین معادله (۲۷-۳) را می‌توان به شکل معادله (۳۰-۳) نوشت:

$$seq = (wy - WAX)^T (wy - WAX) \quad (30-3)$$

که در این معادله، y بردار اختلاف داده‌های تجربی، پاسخ مدل اولیه m^0 و اندیس T ترانپوز ماتریس بوده و مقدار آن برابر است با:

$$y = d - f(m^0) \quad (31-3)$$

طول گام (نمو) بردار تصحیحات X را می‌توان با افزودن یک جمله محدود کننده، به معادله (۳۱-۳)، کنترل نمود:

$$\emptyset = (wy - WAX)^T (wy - WAX) + \beta (X^T \cdot X - L^2) \quad (32-3)$$

که در این معادله، L^2 عامل محدود کننده تغییرات شدید پارامترها، ϕ میزان خطا و β فاکتور تعدیل^۱ است.

برای به دست آوردن حداقل مقدار ϕ ، از آن نسبت به X مشتق گرفته و حاصل آن را برابر صفر

قرار می‌دهیم؛ در این صورت خواهیم داشت:

¹ Damping factor

$$((WA)^T.WA + \beta I)X = (WA)^T.wy \quad (33-3)$$

$$X = ((WA)^T.WA + \beta I)^{-1}.(WA)^T.wy \quad (34-3)$$

که در این عبارت، I یک ماتریس یکه است. بدین ترتیب، فرمول تکرار مورد استفاده در این روش برابر است با:

$$m^{k+1} = m^k + ((WA)^T.WA + \beta I)^{-1}.(WA)^T.wy \quad (35-3)$$

که در آن m^k مدل تصحیح شده در تکرار k ام است [Inman, 1975].

۳-۴- وارون سازی هموار دو بُعدی توسط نرم افزار Res2dinv

در مدل سازی دو بُعدی هموار، از روش بهینه یابی حداقل مربعات استفاده می شود و یک زمین یک لایه همگن به عنوان مدل اولیه در نظر گرفته می شود [Loke, et al., 1995]. معادله این روش عبارت است از [Loke, 2004 a]:

$$(J^T J + \lambda C C^T) \Delta q_k = J^T g \quad (36-3)$$

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q_k = J^T g \quad (37-3)$$

در این معادله، q نشان دهنده بردار پارامتری مدل (شامل لگاریتم مقاومت ویژه و ضخامت لایه ها)، g تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسباتی، C ماتریس هموار سازی، I ماتریس واحد، λ فاکتور تعدیل و J ماتریس ژاکوبین مشتقات جزئی است. حال عناصر ماتریس ژاکوبین طبق رابطه (38-3) به دست می آید.

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (38-3)$$

که در آن تغییر در i امین پاسخ مدل f_i ناشی از تغییر در j امین پارامتر مدل q_j است. در مدل سازی

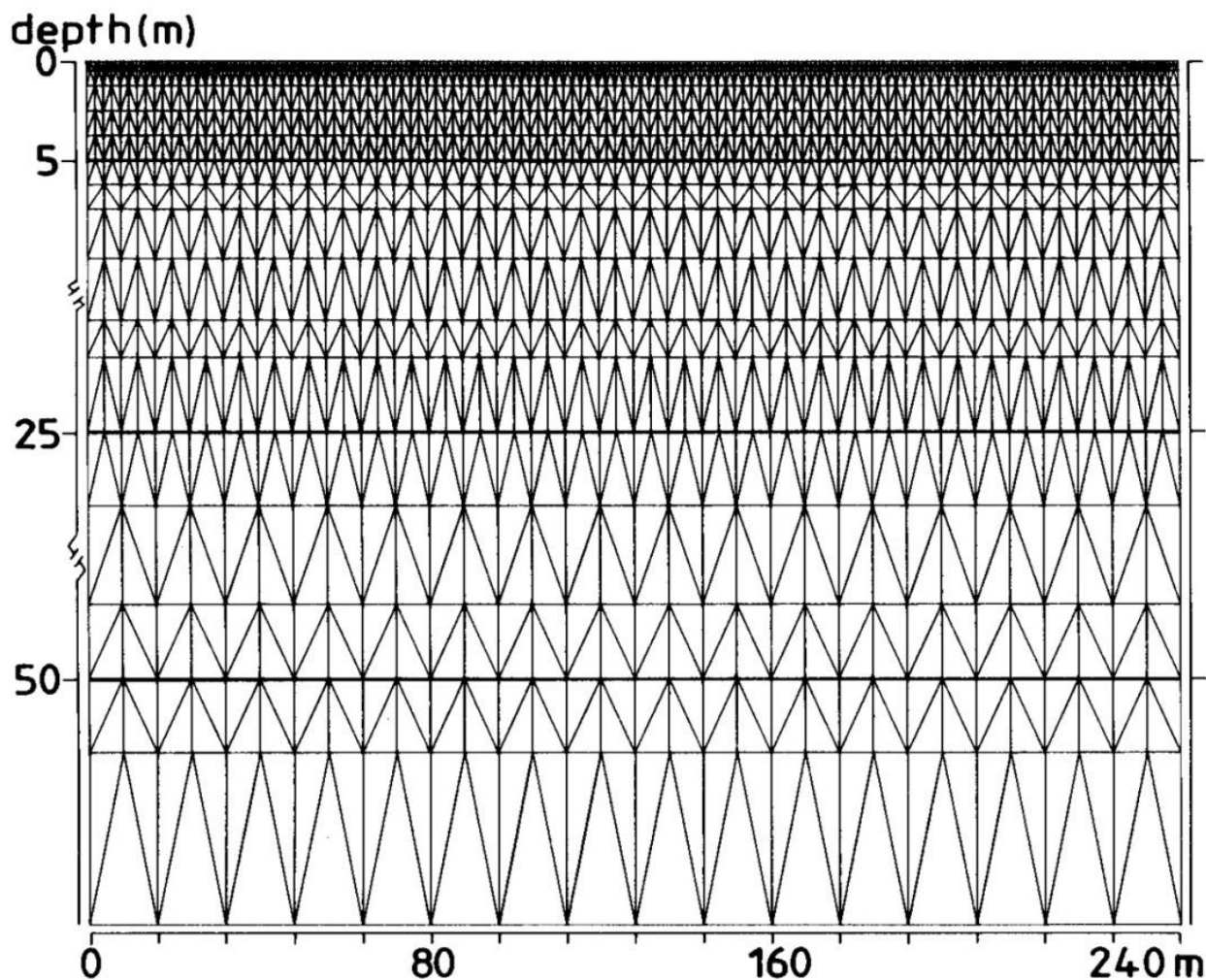
دو بُعدی قید هموار بودن مدل توسط دو فیلتر F_x و F_z اعمال می‌شود.

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (39-3)$$

در این معادله، u نشان‌دهنده فاکتور تعدیل است و F عبارت است از:

$$F = F_x F_x^T + F_z F_z^T \quad (40-3)$$

که F_x فیلتر هموار ساز افقی و F_z فیلتر هموار ساز عمودی می‌باشد. می‌توان فاکتور تعدیل و فیلتر-های هموارسازی را برای انواع مختلف داده‌ها تنظیم نمود. برای انجام محاسبات فوق از روش‌های تفاضل محدود و یا اجزاء محدود استفاده می‌شود که در مناطقی که تصحیح توپوگرافی نیاز است، به-طور پیش‌فرض نرم‌افزار Res2dinv از روش اجزاء محدود استفاده می‌نماید. شکل (۳-۲) نحوه‌ی مش-بندی اجزاء محدود را برای آرایش ونر-شلومبرژه نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲): نحوه مش بندی اجزاء محدود را برای آرایش ونر شلومبرژه [After Molano, et al., 1990].

نخست فاکتور تعدیل، یک مقدار بزرگ انتخاب می شود (λ_0) و به طور پیش رونده ای بعد از هر تکرار این مقدار کاهش می یابد تا به حد مینیمم برسد (λ_m) که معمولاً یک دهم مقدار اولیه است.

$$F = \lambda_m = 0.1 \lambda_0 \quad (۳-۴)$$

λ_0 به سطح نویز منطقه بستگی دارد؛ هرچه سطح نویز بیشتر باشد، مقدار اولیه فاکتور تعدیل هم بیشتر است. وقتی λ_0 بین ۱ تا ۲/۱ باشد نتایج رضایت بخشی برای داده های مصنوعی ایجاد می شود. با هر بار تکرار فاکتور تعدیل ۲/۵ برابر کاهش می یابد تا بعد از ۴ تکرار ثابت می گردد [Loke & Dahlin, 2002].

چگونگی محاسبه ماتریس ژاکوبین در رابطه (۳-۳۸) آورده شده است. برای بیش از ۱۰۰ نقطه داده، محاسبه ماتریس ژاکوبین وقت گیرترین مرحله فرآیند وارون سازی است. فرآیند ساخت ماتریس ژاکوبین به سه شکل عمده می تواند انجام شود:

الف) گوس- نیوتن^۱؛ ب) شبه نیوتن^۲؛ ج) ترکیب شبه نیوتن و گوس- نیوتن^۳؛

در روش گوس- نیوتن در هر مرتبه از تکرار، ماتریس ژاکوبین محاسبه می شود؛ اما در روش شبه نیوتن، در تکرار اول ماتریس ژاکوبین برای زمین همگن ساخته می شود و در تکرارهای بعدی، از روی همان ماتریس تغییر می کند. معادله (۳-۴۲) این رابطه را بیان می نماید [Loke & Dahlin, 2002]:

$$B_{i+1} = B_i + U_i P_i^T \quad (۴۲-۳)$$

$$U_i = \frac{(\Delta y_i - B_i P_i)}{P_i^T P_i} \quad (۴۳-۳)$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (۴۴-۳)$$

که در این روابط، y_i پاسخ مدل برای i امین تکرار، P_i بردار اختلاف برای i امین تکرار و B_{i+1} تقریب ماتریس ژاکوبین برای $i+1$ امین تکرار هستند.

در روش ترکیبی نیز برای تکرارهای اول، دوم و سوم ماتریس ژاکوبین ساخته شده و در تکرارهای بعدی از روی این مقادیر، ماتریس ژاکوبین تخمین زده می شود.

از آن جا که روش گوس- نیوتن از مشتقات جزئی به طور دقیق استفاده می کند، با چند بار تکرار هم گرا می شود، اما زمان بیشتری را جهت هم گرا شدن مسأله نیاز دارد. روش شبه نیوتن برعکس

¹ Gauss-Newton

² Quasi-Newton

³ Combined Gauss-Newton and Quasi-Newton

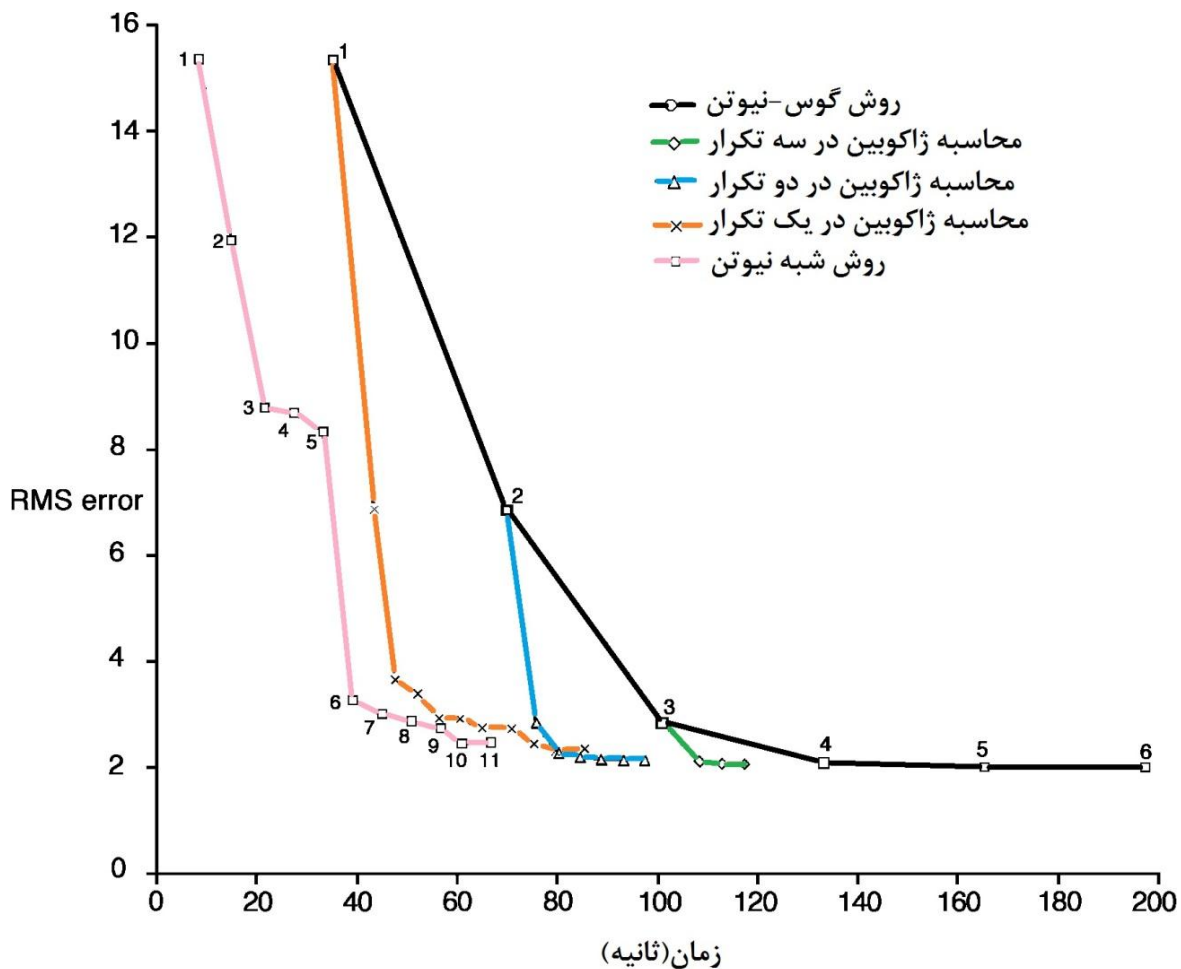
گوس- نیوتن تعداد تکرار زیاد و زمان کمتری برای هم‌گرایی نیاز دارد.

در مناطق با تباین مقاومت ویژه کمتر از ۱ به ۱۰ نتایج هر سه روش مشابه است؛ اما در مناطق با تباین مقاومت ویژه زیاد، روش گوس- نیوتن نتیجه بهتری نسبت به شبه‌نیوتن نشان می‌دهد. به هر حال اختلاف بین مدل به دست آمده از روش گوس- نیوتن و شبه‌نیوتن کم است. از آن‌جا که روش ترکیبی سریع‌تر از گوس- نیوتن است، این روش سازش رضایت بخشی بین دقت و سرعت نشان می‌دهد [Loke & Dahlin, 2002]. شکل (۳-۳) تغییر در خطای RMS^1 (خطای جذر میانگین مربعات) و زمان مورد نیاز برای پردازش را به همراه تعداد تکرارهای وارون‌سازی را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد. مقدار خطای جذر میانگین مربعات توسط معادله (۳-۴۵) تعریف می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2}{N}} \quad (۳-۴۵)$$

که در آن d_i داده برداشت شده در تکرار i ام، y_i پاسخ مدل در همان تکرار و N تعداد داده‌هاست.

¹ Root mean square



شکل (۳-۳): تغییر در خطای RMS و زمان مورد نیاز برای پردازش، به همراه تعداد تکرارهای وارون‌سازی را برای روش‌های مختلف [After Loke & Dahlin; 2002].

همان‌طور که دیده می‌شود، با روش گوس-نیوتن پس از ۴ بار تکرار وارون‌سازی، مسأله هم‌گرا شده و در تکرارهای ۵ و ۶ تغییر چندانی در خطای RMS دیده نمی‌شود؛ اما زمان زیادی برای این کار نیاز است. روش شبه‌نیوتن نیز با ۱۱ تکرار هم‌گرا شده، هرچند هنوز نسبت به روش گوس-نیوتن خطای RMS بیشتری دارد؛ اما زمان خیلی کمتری صرف فرآیند وارون‌سازی شده است. روش‌های ترکیبی گوس-نیوتن و شبه‌نیوتن نیز در سه حالت دیده می‌شوند که اختلافشان در تعداد ساخت ماتریس ژاکوبین است. این سه روش ترکیبی از لحاظ زمان و تعداد تکرار بینابین دو روش دیگرند.

فصل چهارم

زمین شناسی ناحیه

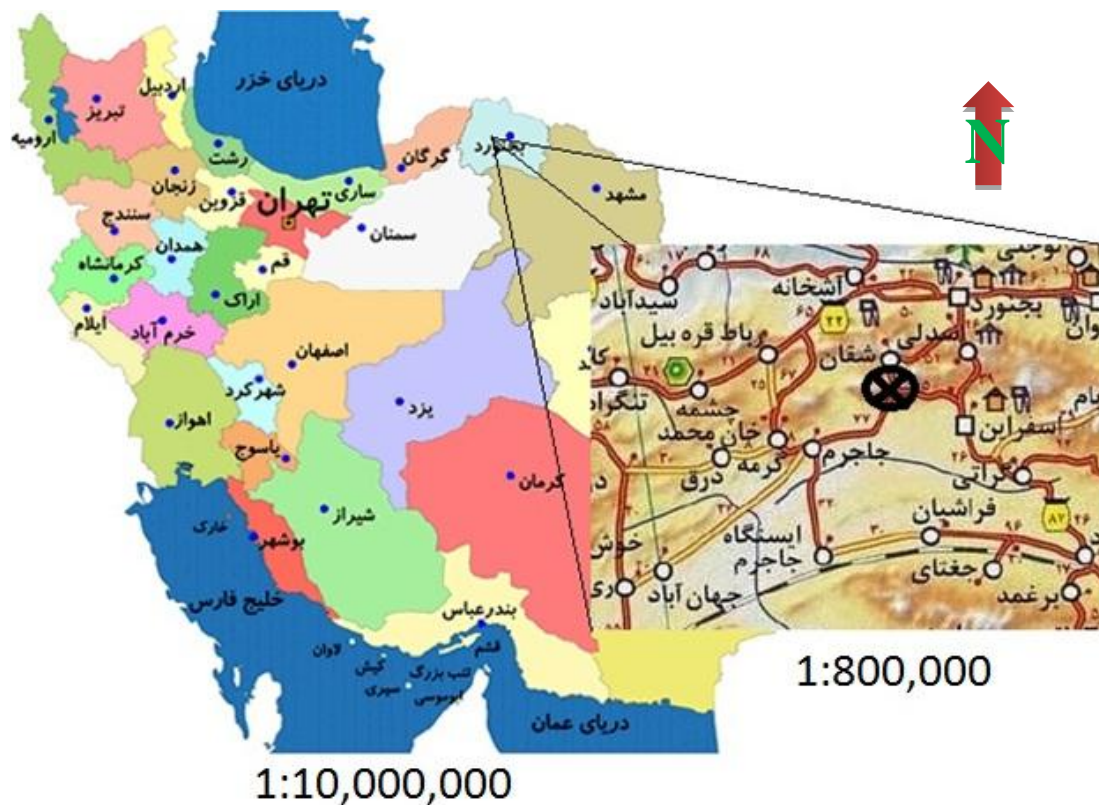
و عملیات صحرائی

۴-۱- مقدمه

لازمه یک عملیات ژئوفیزیکی موفق، طراحی صحیح پروژه و استفاده از دستگاه و تجهیزات دقیق و مدرن می‌باشد. برای دستیابی به نتایج منطقی و معقول، ضمن استفاده از روش‌های کارآمد مدل‌سازی، نیاز به توجه توأم به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه عملیاتی است؛ تا بتوان بین نتایج مدل‌سازی با واقعیت‌های زمین‌شناسی منطقه، تطابق لازم را به‌وجود آورد. با توجه به اهمیت موضوع در این فصل به بررسی زمین‌شناسی منطقه معدنی بوکسیت جاجرم و نحوه طراحی پروژه اکتشافی پرداخته می‌شود.

۴-۲- موقعیت جغرافیایی و ژئومورفولوژی

معدن بوکسیت جاجرم در ۱۹ کیلومتری شمال شرق شهرستان جاجرم قرار دارد. شهرستان جاجرم از طریق جاده آسفالته در فاصله ۱۷۵ کیلومتری شمال شرق به شهرستان بجنورد متصل می‌شود. راه آهن تهران - مشهد از ۳۵ کیلومتری جنوب جاجرم و از دشت جوبین عبور می‌کند و کارخانه آلومینای جاجرم از طریق یک خط آهن فرعی به این راه آهن متصل می‌گردد. محدوده معدنی تاگویی (منطقه مورد مطالعه) در قسمت شرقی مجموعه معادن بوکسیت جاجرم قرار می‌گیرد. این محدوده در مختصات جغرافیایی "۳۵،۵۵، ۵۶° و "۳۵،۵۱، ۵۶° طول شرقی و "۲،۵۱، ۳۷° و "۲،۴۹، ۳۷° عرض شمالی واقع شده است. راه‌های دسترسی به منطقه در شکل (۴-۱) نشان داده شده است [ناصری، ۱۳۸۲].



شکل (۴-۱): راه‌های دسترسی به منطقه معدنی بوکسیت جاجرم

منطقه معدنی مذکور به صورت رشته کوهی است با امتداد شرقی- غربی در شمال کویر جاجرم که ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۰۰۰ متر است. به‌طور کلی چینه‌شناسی و خصوصیات فیزیکی سازندهای موجود در منطقه و نیز تنش‌های ساختاری وارده بر منطقه، نقشی اساسی در تعیین وضعیت زمین‌شناسی منطقه به‌عهده داشته است؛ که از بارزترین ساختارهای حاصل از آن می‌توان تاقدیس زو، با ارتفاع ۱۸۰۰ متر از سطح دریا را ذکر نمود.

در منطقه مورد مطالعه، سازندهای کربناته الیکا و مبارک با مقاومت بسیار زیاد خود در مقابل فرسایش، ارتفاعات خشن و صعب‌العبوری را در بخش جنوبی رشته کوه مورد بحث تشکیل داده‌اند. در میانه منطقه، سازند شمشک با تناوبی از شیل و لایه‌های نرم ذغالی و ماسه‌سنگ، توان فرسایشی بالایی دارد و دره‌های شرقی- غربی را در کل منطقه بوجود آورده است. واحد کوارتزیتی نسبتاً ضخیم و

مقاومی در بخش میانی سازند شمشک، دامنه شمالی درّه مورد بحث را تشکیل می‌دهد که به صورت تپه‌ماهورهای کشیده و پشته‌ای دیده می‌شود. ارتفاعات اصلی، در شمال منطقه قرار دارد و آهک‌های لار با مورفولوژی خشن و سخت، آن‌ها را به وجود آورده است [ناصری، ۱۳۸۲].

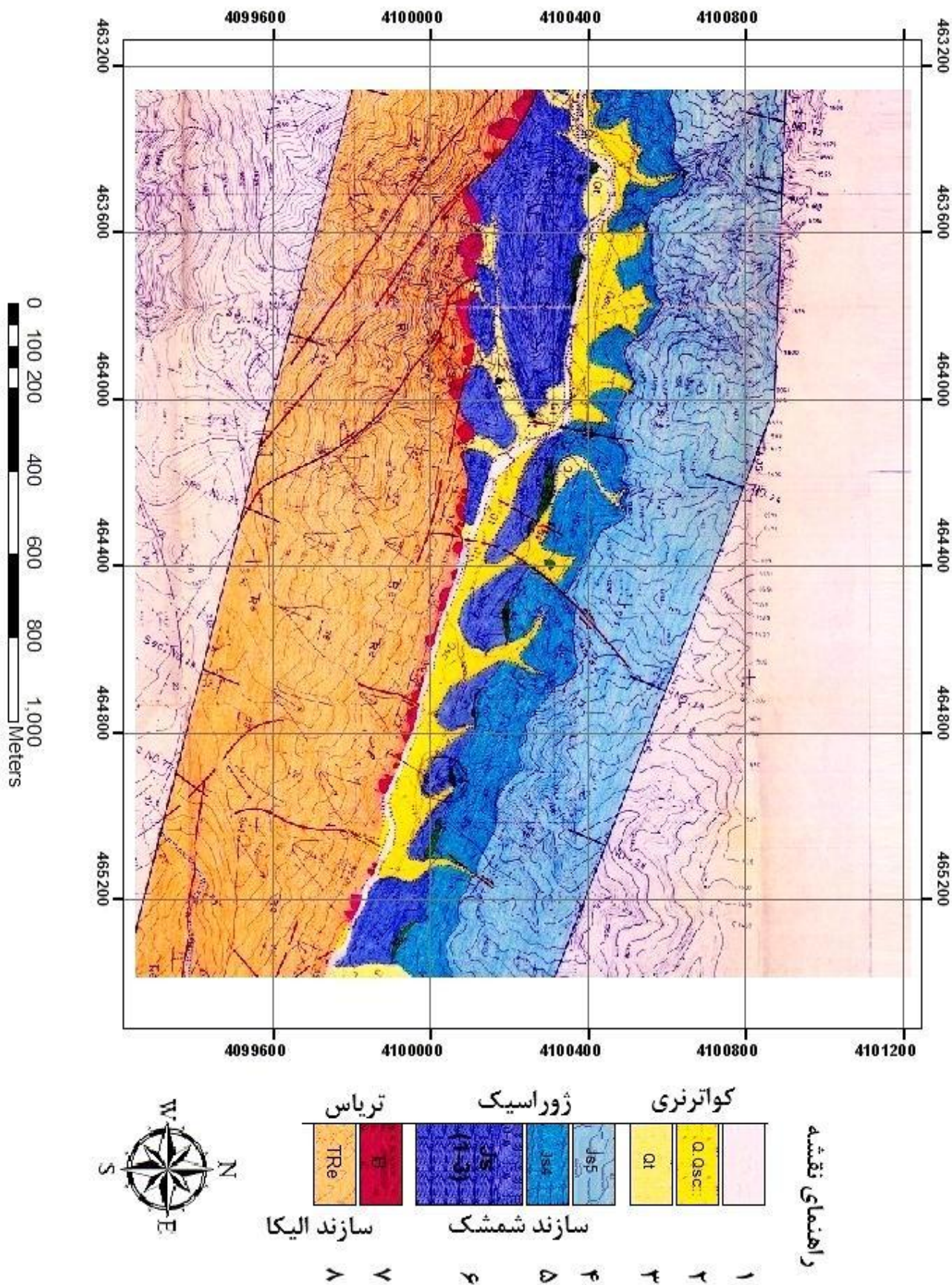
۳-۴ - زمین‌شناسی ناحیه‌ای

محدوده دربرگیرنده معادن بوکسیت جاجرم در مرز بین حوضه‌های رسوبی - تکتونیکی البرز شرقی، کپه داغ و شمال شرق ایران قرار دارد. در دوران‌های پالئوزوئیک و مزوزوئیک مجموعه قابل توجهی از نهشته‌های رسوبی در این منطقه بر جای مانده است. رخنمون‌های این واحدها در محدوده کوه زو برون‌زود داشته و نهشته‌های کم‌عمق دریائی، رسوبات تخریبی - تبخیری و حتی نفوذی‌های آذرین در آن نمود پیدا کرده‌اند. تنش‌های وارده بر نهشته‌های فوق طی چند مرحله، موجب تشکیل ساختارهای تکتونیکی مختلفی گردیده که از بارزترین این ساختارها، تاقدیسی بزرگ با امتداد شرقی - غربی می‌باشد؛ که توسط گسل‌های مختلف تراستی، نرمال و امتداد لغز به قطعات متعددی تبدیل شده است. سازندها و واحدهای مختلف منطقه به ترتیب سن عبارتند از:

سازند پادها، سازند خوش‌بیلاق، سازند مبارک، رسوبات پرمین، سازند سرخ‌شیل، سازند الیکا، واحد بوکسیتی، سازند شمشک، رسوبات ژوراسیک میانی و فوقانی، رسوبات کرتاسه، رسوبات پالئوژن و نئوژن [جعفرزاده، ۱۳۸۱].

۴-۴ - زمین‌شناسی محدوده معدنی تاگویی

محدوده معدنی تاگویی، در قسمت شرقی معدن بوکسیت جاجرم واقع شده و در قسمت جنوب شرقی ورقه ۱/۱۰۰,۰۰۰ زمین‌شناسی سنخواست قرار می‌گیرد. شکل (۲-۴) نقشه زمین‌شناسی منطقه تاگویی را که توسط گروه اکتشاف معدن بوکسیت جاجرم تهیه شده، نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): نقشه زمین‌شناسی منطقه تاگویی [جعفر زاده، ۱۳۸۱ با اندکی تغییر].

(۱) رسوبات آبرفتی، (۲) واریزه‌های دوران چهارم، (۳) مخروط افکنه‌های قدیمی مربوط به تریاس، (۴) شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سفید کوارتزیتی، (۵) مارن‌های خاکستری زیتونی و لایه نازک ماسه‌ای، (۶) شیل‌های خاکستری دگرسان شده و لایه‌های ماسه‌سنگ با مقدار کم فسیل، (۷) بوکسیت، (۸) دولومیت توده‌ای به رنگ سفید، خاکستری و زرد نخودی.

در ادامه سازندهای زیرین، فوقانی و واحدهای بوکسیتی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۴-۱- سازند الیکا

در منطقه مورد مطالعه، سازند الیکا از دو بخش زیرین و فوقانی تشکیل شده است. رسوبات بخش زیرین شامل دولومیت‌های آهکی، آهک مارنی نازک‌لایه متورق، همراه با مقدار کمی شیل و مارن زرد تا صورتی رنگ می‌باشد.

لیتولوژی بخش فوقانی سازند الیکا شامل دولومیت‌های با لایه‌بندی خوب تا ضخیم‌لایه به رنگ کرم تیره و خاکستری روشن می‌باشد. حدود ۱۰ متر فوقانی این واحد، به علت مجاورت با واحدهای بوکسیتی به رنگ صورتی روشن تا قرمز درآمده است. این سازند به علت ضخیم‌لایه بودن، کمتر تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته و ارتفاعات زبر و خشن جنوبی منطقه را تشکیل می‌دهد. به علت مقاومت زیاد این واحد سنگی در برابر فرسایش، انواع گسل‌های تراستی، نرمال و امتداد لغز که در مراحل مختلف اعمال تنش بر منطقه، این سازند را نیز تحت تأثیر خود قرار داده‌اند، به خوبی در آن حفظ شده و امکان اندازه‌گیری دقیق وضعیت این گسل‌ها وجود دارد.

مرز بالایی سازند الیکا ناپیوسته بوده و به صورت فرسایشی و کارستی شده می‌باشد. لایه بوکسیتی، این سطح فرسایش یافته را پر کرده و در نتیجه در بخش‌هایی از معدن، عدسی‌های بوکسیت شکل گرفته‌اند. تصور می‌رود که عامل فرسایشی، در امتداد این شکستگی‌ها موجب کارستی شدن و فرسایش دولومیت‌های سازند الیکا گردیده‌اند [جعفر زاده، ۱۳۸۱].

۴-۴-۲- واحد بوکسیتی^۱

این واحد که معدن بوکسیت جاجرم را تشکیل داده بر روی سنگ‌های دولومیتی سازند الیکا و

^۱ در گزارشات زمین شناسی منطقه از دو واحد بوکسیتی نام برده شده که یکی از آن دو در زیر سازند الیکا و با درصد خلوص کم، به صورت لایه‌ای نازک واقع است. با توجه به محدودیت عمق نفوذ اکتشافی روش مقاومت‌ویژه و غیر اقتصادی بودن لایه مذکور در این پژوهش بحثی از آن به میان نخواهد آمد و منظور از واحدهای بوکسیتی، انواع بوکسیت با سن کم‌تر از سازند الیکا و بیش‌تر از سازند شمشک است.

در زیر شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک قرار گرفته است (شکل (۳-۴)). واحد بوکسیت با امتداد تقریبی شرقی-غربی، بیش از ۱۲ کیلومتر گسترش داشته و در شرق به یک زون برشی محدود می‌گردد. به طرف غرب و جنوب‌غرب، بوکسیت توسط نهشته‌های آبرفتی پوشیده می‌شود. این واحد در هیچ راستایی دارای ضخامت و کیفیت یکسانی نیست و به‌طور کلی ضخامت بوکسیت بین کمتر از یک متر تا حدود ۴۰ متر و بیشتر تغییر می‌کند. در حفاری‌های اکتشافی و در مناطق استخراج شده، لایه‌های تشکیل دهنده این واحد به صورت زیر مشخص شده است:

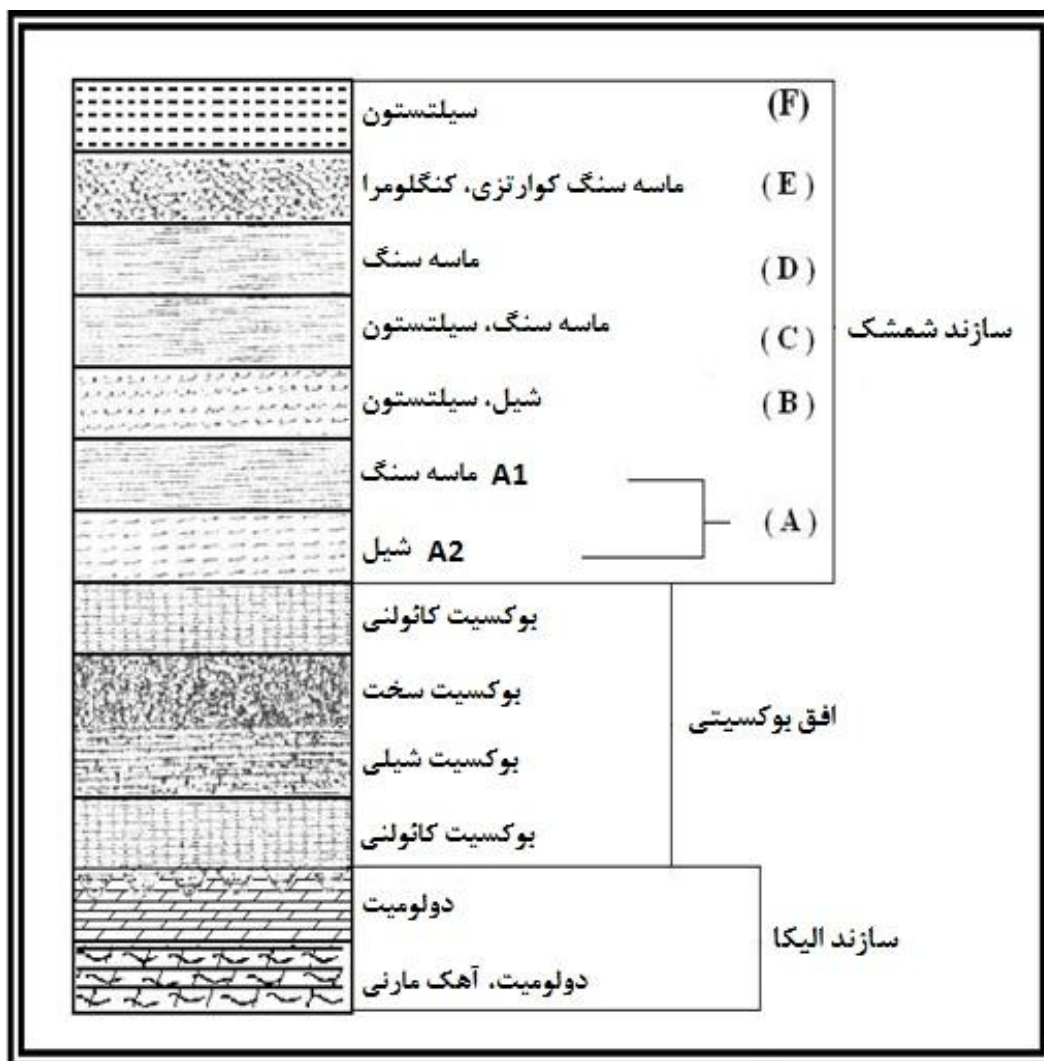
کائولن و بوکسیت کائولنی: که مشابه لایه کائولنی در بالای بوکسیت سخت می‌باشد.

بوکسیت نرم یا شیلی: این لایه، به علت پایین بودن درصد Al_2O_3 در رده لاتریت‌ها بوده و اصطلاحاً بوکسیت شیلی نام‌گذاری شده است. بوکسیت نرم دارای لایه‌بندی بسیار نازک و به رنگ قرمز روشن است. این بوکسیت دارای ارزش معدنی برای تولید آلومینا نیست و به‌واسطه رنگ، لایه‌بندی و مقاومت کم، به‌خوبی می‌توان آن را از بوکسیت سخت تشخیص داد.

بوکسیت سخت: که به رنگ‌های سبز تیره، خاکستری و قرمز تیره تا قهوه‌ای تیره است.

کائولن و بوکسیت کائولنی: که به رنگ صورتی، کرم، خاکستری متمایل به زرد می‌باشد.

واحد بوکسیتی جاجرم در رده بوکسیت‌های لایه‌ای-عدسی قرار دارد و گسترش بوکسیت عموماً به صورت لایه‌ای است. با این حال سطح زیرین واحد بوکسیتی صاف و یکنواخت نبوده و به‌دلیل تشکیل آن در فرورفتگی‌های کارستی سازند الیکا، در بخش‌هایی از لایه، حالت عدسی‌مانند دارد. یکی از این عدسی‌های بوکسیتی با دیواره قائم، حدود ۷۵ متر ضخامت داشته و حجم عظیمی از مواد معدنی را در خود جای داده است. کیفیت ماده معدنی، ارتباط مستقیمی با ضخامت آن دارد و معمولاً بهترین کیفیت را می‌توان در این فرورفتادگی‌ها یافت. برخی از این فرورفتادگی‌ها در ارتباط با فعالیت‌های تکتونیکی و گسل‌ها می‌باشند [جعفر زاده، ۱۳۸۱].



شکل (۳-۴): ستون چینه‌شناسی سازندهای بالا و پایین افق بوکسیتی به همراه واحدهای بوکسیتی [جعفر زاده، ۱۳۸۱ با اندکی تغییر].

۳-۴-۴ - سازند شمشک

رسوبات آواری سازند شمشک با سنی معادل تریاس فوقانی، به‌طور هم‌شیب و عادی بر روی واحدهای بوکسیتی، قرار گرفته‌اند. با استفاده از خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی واحدهای سازند شمشک و همچنین اطلاعات گرفته شده در هنگام عملیات استخراج بوکسیت، سازند شمشک در محدوده معدن، به شش لایه اصلی و دو زیرلایه، تقسیم‌بندی می‌شود؛ که به ترتیب از قدیم به جدید به شرح زیر می‌باشند:

لایه A: این لایه، کمر بالای بلاواسطه ماده معدنی است و از دو بخش کاملاً مجزای شیل و ماسه‌سنگ تشکیل شده است؛ که به ترتیب به نام زیرلایه‌های A_1 و A_2 اسم گذاری شده‌اند. ضخامت لایه A حدود ۱۵ متر است.

زیرلایه A_1 : این لایه، غالباً شامل شیل‌های ذغالی بوده و یک لایه ماسه‌سنگ قهوه‌ای به ضخامت ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر در قسمت فوقانی آن دیده می‌شود. زیرلایه A_1 ، به دلیل قابلیت فرسایش شدید به ندرت رخنمون دارد. این زیرلایه، دارای تخلخل نسبتاً زیادی است ولی تراوایی آن خیلی کم می‌باشد. زیرلایه A_1 در اثر جذب آب، به شدت متورم شده و به صورت ورقه‌ای در می‌آید.

زیرلایه A_2 : این زیرلایه، شامل ماسه‌سنگ دانه‌ریز تا متوسط با لایه‌بندی نازک تا ضخیم می‌باشد. تخلخل زیرلایه A_2 خصوصاً در درزه‌ها و شکاف‌ها زیاد است و سبب می‌شود تا آب از این زیر-لایه‌ها نفوذ کند. زیرلایه A_2 دارای قابلیت فرسایش نسبتاً کمی بوده و رخنمون خوبی دارد.

لایه B: رسوبات این لایه، اغلب از شیل، سیلت‌استون و ماسه‌سنگ نازک‌لایه، همراه با رگه‌های ذغالی تشکیل شده است. قابلیت فرسایش لایه B زیاد است و در مقاطع عرضی، به صورت فرورفتگی‌هایی دیده می‌شود. تخلخل این لایه، زیاد، ولی تراوایی آن کم می‌باشد. ضخامت این لایه، در حدود ۳۵ متر می‌باشد.

لایه C: این لایه، شامل سیلت‌استون و ماسه‌سنگ است که درون آن، تعداد کمی رگه‌های نازک ذغالی وجود دارد. ضخامت لایه C حدود ۵۰ تا ۸۰ متر است

لایه D: این لایه، بیشتر شامل ماسه‌سنگ دانه‌ریز تا متوسط به رنگ خاکستری و زیتونی و هم-چنین سیلت‌استون می‌باشد. در بخش فوقانی این لایه، ضخیم‌ترین رگه ذغال دار منطقه، مشاهده می‌شود. ضخامت واقعی لایه D نزدیک به ۱۵۰ متر است.

لایه E: لایه E، اکثراً از ماسه‌سنگ کوارتزیتی و ماسه‌سنگ همراه با کنگلومرای دانه‌ریز تشکیل شده است. رنگ رسوبات این لایه، خاکستری تیره است و آثار ورنی بیابان در روی آن‌ها مشاهده می‌گردد. تخلخل و تراوایی لایه E زیاد است. به دلیل قابلیت فرسایش کم این لایه، در سرتاسر معدن بوکسیت جاجرم، ارتفاعات نسبتاً بلندی توسط این لایه، تشکیل شده است. در بخش میانی این لایه، یک لایه ماسه‌سنگ به رنگ قهوه‌ای متمایل به خاکستری با فرسایش حفره‌ای و لایه‌بندی ضخیم مشاهده می‌گردد. ضخامت این لایه، به ۱۵۰ متر می‌رسد.

لایه F: این لایه، ضخیم‌ترین بخش سازند شمشک است. لایه F بیشتر از سیلت‌استون همراه با مقدار کمی ماسه‌سنگ تشکیل شده است. به دلیل فرسایش نسبتاً زیاد این لایه، نواحی کم‌ارتفاع و پستی توسط آن در منطقه به وجود آمده است. تخلخل و نفوذپذیری بخش سیلت‌استون این لایه، کم ولی در فواصل ماسه‌سنگی زیاد می‌باشد [جعفر زاده، ۱۳۸۱].

۴-۴-۴ رسوبات کواترنری

این لایه را، رسوبات آبرفتی، واریزه‌های مربوط به دوران چهارم تشکیل می‌دهند.

۴-۵- طراحی عملیات

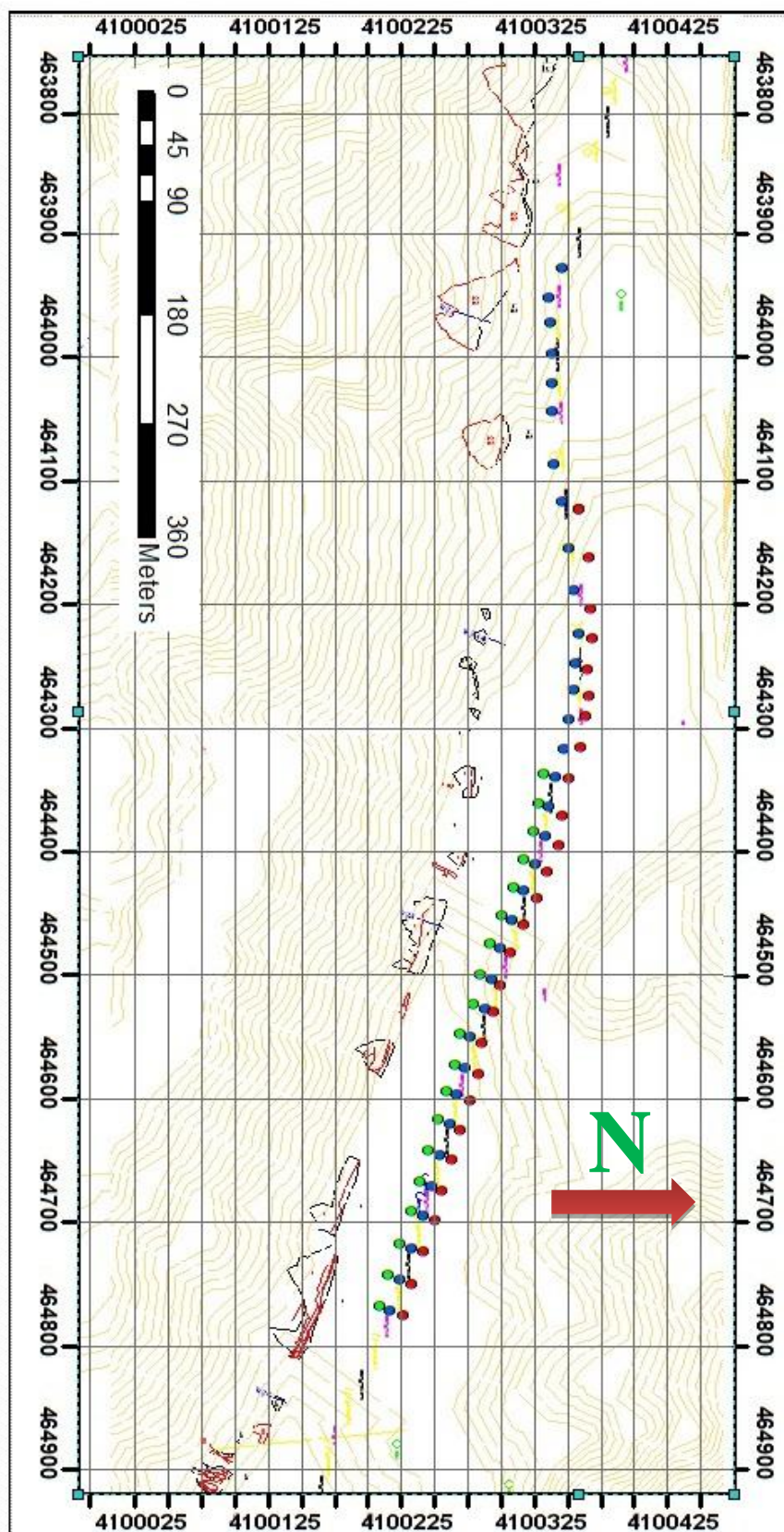
پس از انجام مطالعات اولیه و بازدید مقدماتی ناحیه معدنی بوکسیت جاجرم، بلوک ۴ و ۵ تاگویی به عنوان محل طراحی و برداشت پروژه انتخاب گردید. همان‌طور که اشاره شد، منطقه مورد نظر دارای توپوگرافی خشنی است که طراحی شبکه برداشت را محدود می‌نماید.

از آن‌جا که هدف، یافتن عمق و ضخامت لایه معدنی می‌باشد و تغییرات قائم مقاومت‌ویژه، بیشتر از تغییرات افقی، بیان‌گر مشخصات لایه بوکسیتی است؛ بنابراین، آرایش شلومبرژه برای برداشت داده‌های مورد نظر به کار گرفته شده است. آرایش شلومبرژه متداول‌ترین آرایش مورد استفاده در عملیات سونداژزنی است. از مزایای این آرایش این است که چون الکترودهای پتانسیل

حداقل برای چندین طول AB، ثابت مانده و جابه‌جا نمی‌شود؛ صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان ایجاد می‌شود.

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی به‌ویژه کربناته بودن بستر ماده معدنی و نیز حفاری‌های اکتشافی قبلی که در این منطقه صورت گرفته، تغییرات شدیدی در عمق و ضخامت لایه بوکسیتی مورد انتظار است و به‌همین دلیل فواصل سونداژها ۲۵ متر در نظر گرفته می‌شود؛ کما این‌که فواصل گمانه‌های حفر شده نیز همین مقدار می‌باشد. هم‌چنین شواهد و رخنمون‌های موجود در منطقه، حاکی از شیب‌دار بودن لایه‌های زمین‌شناسی است؛ بنابراین در طراحی اولیه، فواصل دو خط برداشت کمتر از فواصل سونداژها در نظر گرفته شد. که با توجه به عرض کم دره فواصل خطوط برداشت به ۱۰ متر رسید.

تعداد ۸۲ سونداژ به فاصله ۲۵ متر از هم بر روی سه خط برداشت موازی به فاصله ۱۰ متر در طول دره برداشت شد. با توجه به توپوگرافی خشن منطقه و محدودیت فضای برداشت، ۳۴ سونداژ بر روی خط اول، ۲۹ سونداژ بر روی خط دوم و ۱۹ سونداژ بر روی خط سوم برداشت شدند. البته ابتدای همه این خطوط برداشت، از یک ناحیه و به فاصله ۱۰ متر از هم طراحی گردیده‌اند. شکل (۴-۴) شبکه برداشت سونداژهای ژئوالکتریکی را نشان می‌دهد. رخنمون‌های بوکسیتی در جنوب مراکز سونداژها دیده می‌شوند و خطوط کنتوری، نمایش توپوگرافی سطح زمین است. این داده‌ها در آبان و دی‌ماه سال ۱۳۹۰ برداشت شدند.



شکل (۴-۴): مکان سونداژهای الکتریکی در منطقه مورد مطالعه؛ نقاط آبی سونداژهای خط برداشت اول، نقاط قرمز سونداژهای خط برداشت دوم، نقاط سبز سونداژهای خط برداشت سوم.

علاوه بر این به منظور دستیابی به عمق مطلوب و کافی بیشینه فاصله الکترودی برای همه سونداژها $AB/2 = 500$ متر در نظر گرفته شد. بر روی کابل‌های جریان و پتانسیل برچسب‌هایی نصب گردید که فاصله از مرکز سونداژ را نشان می‌داد. این کار در تعیین دقیق مکان الکترودهای جریان و پتانسیل بسیار مفید واقع شد.

آزموت خطوط برداشت و گسترش الکترودی برای هر سونداژ 300 درجه و پس از تغییر مسیر دره (سونداژ هجدهم به بعد) این جهت تغییر کرده و برای خطوط 1 و 2 آزموت برداشت و گسترش الکترودی برابر 270 درجه شد.

داده‌های مورد نظر توسط دستگاه ABEM SAS4000 ساخت کشور سوئد، برداشت شدند (شکل (۴-۵)). دقت این دستگاه در مقایسه با دستگاه‌های مقاومت‌سنج دیگر، بسیار بالا بوده و

حساسیت کمتری نسبت به نوفه SP نشان می‌دهد. دستگاه مذکور علاوه بر ارائه مقادیر $R = \frac{\Delta V}{I}$ ،

انحراف معیار داده‌های قرائت شده را نیز ارائه می‌نماید که بیان‌گر کیفیت داده‌ها می‌باشد. البته پایین بودن این عدد، تضمین کافی برای صحت داده‌های برداشت نیست؛ از این‌رو در این عملیات اپراتور دستگاه، پس از ثبت مقدار مقاومت هر فاصله الکترودی با ضرب فاکتور هندسی K در مقدار مقاومت، مقاومت ویژه ظاهری را یادداشت نموده و همزمان ضمن تفسیر کیفی از کیفیت مقادیر برداشتی مطمئن می‌شد.



شکل (۴-۵): دستگاه ABEM Terrameter SAS 4000

مقاومت الکترودها باید خیلی پائین باشد؛ در غیر این صورت، حساسیت دستگاه کاهش پیدا می کند و با کاهش حساسیت دستگاه، ممکن است پتانسیل های کاذب و اضافی ایجاد شود و باعث اندازه گیری پتانسیل غیرواقعی و خطا شود. همچنین مقاومت بالای الکترودهای جریان باعث می شود، شارش جریان کاهش یافته و مقاومت بالا در الکترودهای پتانسیل باعث کم شدن حساسیت در اندازه گیری ها و ابهام در قرائت پتانسیل خواهد شد [کامکار روحانی، ۱۳۸۴]. بدین منظور از الکترودهای با روکش مس سالم استفاده شده و آن ها را به مقدار کافی در خاک فرو برده و اطراف الکترودها آب نمک ریخته شده است و نیز در برخی مواقع که پس از چند بار تکرار قرائت همچنان، انحراف معیار داده ها بالا بوده و یا مقدار مقاومت اندازه گیری شده غیر منطقی می باشد، به جای یک الکتروده، از چند الکتروده موازی نیز استفاده شده است.

در مکان هایی که امکان کوبیدن الکتروده به زمین نبود، الکتروده را به مقدار کافی در راستای عمود بر گسترش الکترودهی جابه جا نموده و میزان جابه جایی اندازه گرفته شد. الکتروده پتانسیل دیگر نیز به همان اندازه و در جهت مخالف جابه جا می گشت. اما در شرایطی که فقط امکان جابه جایی در راستای گسترش الکترودهی بوده، پس از جابه جایی الکتروده دیگر، موضوع در فرم برداشت یادداشت

می شد تا در صورت نیاز، فاکتور هندسی K اصلاح شود. شکل (۴-۶) تصویر یک فرم برداشت داده را نشان می دهد.

سونداژ - پروفیل (38) S2-4 رکورد دستگاه RS 0038.34K

مختصات و موقعیت:
 $x = 464698$
 $y = 4100225$
 $z = 1244$

آزمودن خط برداشت 300 درجه می باشد

تاریخ برداشت: دوشنبه 90.8.23

اپراتور و افراد برداشت کننده:
 مهندس سیدانی اسریان

توضیحات: * سونداژ روی سونداژ S1-31 در 22° از آن واقع است
 * سونداژ در فاصله 27 متری غرب سونداژ S2-3 می باشد
 * الکترودهای C1 و P1 به سمت غرب و الکترودهای C2 و P2 به سمت شرق نسبت به سطح دریا
 * در کنار، روی سطح زمین شوره روئیت می شود.

N درجه	OA=AB/ 2 (m)	OM=MN/ 2 (m)	K (m)	R=V/I (ohm)	واحد	Pa=K*R (ohm-m)	S.Dev (%)	ملاحظات comments
32	3	1	12.566	3.342	Ω	42	0.004	
31	5	1	37.699	0.97395	Ω	37	0.003	
30	7	1	75.398	546.65	mΩ	41	0.007	
29	10	1	155.509	264.2	mΩ	41	0.124	
28	10	2.5	58.905	678.29	mΩ	40	0.006	
26	15	1	351.858	115.04	mΩ	40	0.058	
24	15	2.5	137.445	285.04	mΩ	39	0.185	
23	20	2.5	247.4	163.56	mΩ	40	0.09	
19	30	2.5	561.56	83.292	mΩ	47	0.017	
18	40	2.5	1001.383	45.875	mΩ	46	0.038	
17	50	2.5	1566.868	29.778	mΩ	47	0.083	
15	50	10	376.991	126.02	mΩ	48	0.09	
14	70	2.5	3074.834	18.362	mΩ	56	0.000	
13	70	10	753.982	76.523	mΩ	58	0.009	
12	100	10	1555.088	47.405	mΩ	74	0.067	
11	150	10	3518.584	27.61	mΩ	97	0.025	
9	200	10	6267.477	18.573	mΩ	116	0.019	
8	200	40	1507.965	73.746	mΩ	111	0.000	
7	300	10	14121.459	10.624	mΩ	150	0.661	
6	300	40	3471.4	44.83	mΩ	156	0.266	
5	400	40	6220.354	28.248	mΩ	176	0.062	
3	500	40	9754.645	19.519	mΩ	190	0.144	

الکترودهای C1 و P1 حدود 5 متر
 عمود بر جهت شرق الکترودهای C2 و P2 به جهت غرب
 جایی شدند

شکل (۴-۶): تصویر جدول برداشت داده های سونداژ الکتریکی

فصل پنجم

مدل سازی و تفسیر یک بعدی داده های صحرائی

۵-۱- مقدمه

در فصل‌های قبل ضمن آشنایی با اصول روش مقاومت‌ویژه و مدل‌سازی داده‌های برداشت شده، به بحث در مورد زمین‌شناسی منطقه و نحوه جمع‌آوری مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری پرداخته شد. در این فصل مدل‌سازی و تفسیر داده‌های سونداژهای الکتریکی تشریح خواهد شد.

هدف از تفسیر داده‌های حاصل از سونداژزنی الکتریکی قائم در یک منطقه، به دست آوردن یک تصویر یا مدل ژئوالکتریکی قابل قبول و منطقی است که با نتایج زمین‌شناسی آن منطقه مطابقت داشته باشد. ابتدا ممکن است برای به دست آوردن یک تصویر عمومی از منطقه مورد مطالعه، تفسیر به صورت کیفی انجام پذیرد. در تفسیر کیفی، تغییرات مقاومت‌ویژه به دست آمده از نقشه‌ها و مقاطع مربوط به آن، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای به دست آوردن مدل واقعی از زمین، تفسیر باید به روش کمی نیز صورت پذیرد. در تفسیر کمی از داده‌های خام (مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری)، یک سری پارامترهای فیزیکی شامل مقاومت‌ویژه واقعی و ضخامت لایه‌ها تعیین می‌شوند [Reynolds, 1997].

۵-۲- تفسیر کیفی سونداژهای الکتریکی

آنچه در تعبیر و تفسیر کیفی یک منحنی سونداژ الکتریکی مورد توجه قرار می‌گیرد، نقاط ماکزیمم و مینیمم در روی این منحنی است. وجود هر ماکزیمم یا مینیمم برای طبقات افقی می‌تواند معرف وجود یک لایه با مقاومت‌ویژه متفاوت باشد. البته باید در نظر داشت که این قاعده کلی نیست و

برای این که یک لایه بتواند خود را روی منحنی نشان دهد، باید دارای ضخامت کافی و تباین مقاومت-ویژه مناسب با لایه‌های مجاورش باشد. نکته قابل توجه، شناخت منحنی‌های سونداژ الکتریکی برای حالت‌های مختلف است [Mooney, 1980].

۵-۳- تفسیر کمی سونداژهای الکتریکی

داده‌های خام به دست آمده از زمین، هیچ‌گونه اطلاعات کمی در رابطه با توزیع خواص فیزیکی زمین و یا عمق آنومالی‌ها ارائه نمی‌کنند؛ بنابراین، مدل‌سازی داده‌ها به منظور تفسیر کمی، از جمله تشخیص عمق اهداف اکتشافی امری لازم است

در این پژوهش به منظور تفسیر کمی از منحنی‌های استاندارد و نرم‌افزارهای IX1D [INTERPEX, 2008]، VES [G.R.J. cooper, 2000] و IPI2WIN [Geoscan-M Ltd, 2001] استفاده شده است. سونداژهای الکتریکی به دو طریق مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. ابتدا منحنی‌های سونداژ الکتریکی با استفاده از منحنی‌های استاندارد یا سرمنحنی‌های دو لایه‌ای و منحنی‌های کمکی مورد تفسیر قرار گرفته‌اند؛ سپس نتایج حاصله به عنوان مدل اولیه با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری مدل‌سازی شده‌اند. در روش دیگر داده‌های خام صحرایی مستقیماً توسط نرم‌افزار IX1D به کمک دو روش اکام و ریج وارون‌سازی می‌شوند. که در ادامه به بحث در این زمینه پرداخته می‌شود.

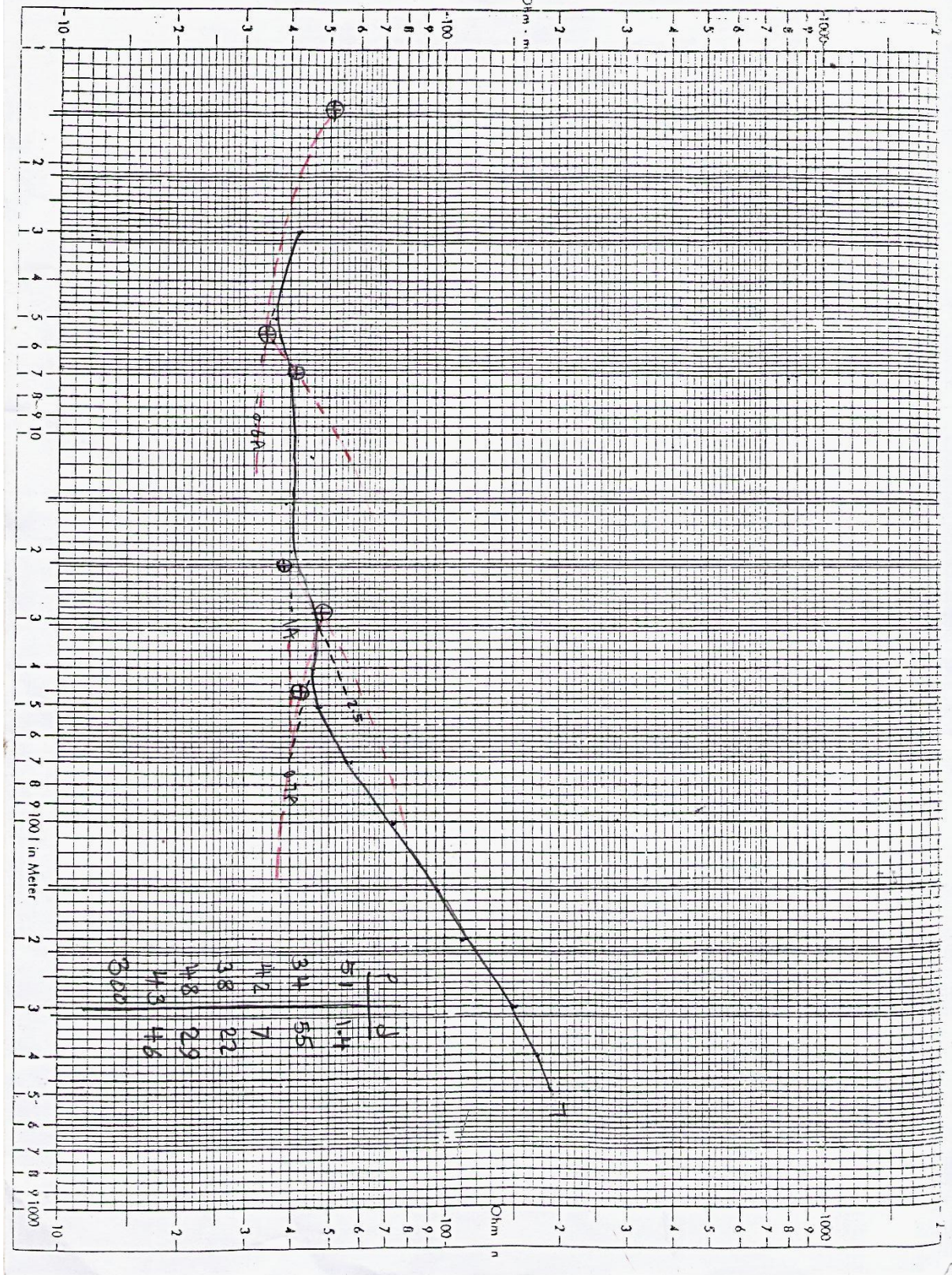
۵-۳-۱- تفسیر سونداژهای الکتریکی به کمک آباک‌ها یا منحنی‌های استاندارد

مجموعه وسیعی از منحنی‌های استاندارد (آباک‌ها) برای طبقات افقی دو تا چهار لایه، تهیه شده که این منحنی‌های سونداژ الکتریکی به شکلی طبقه‌بندی شده که می‌توان، به راحتی منحنی‌های استاندارد را که مشابه منحنی سونداژ الکتریکی به دست آمده می‌باشد را مشخص و خصوصیات لایه‌ها را تعیین نمود. مجانب منحنی برای مقادیر کوچک فاصله الکترودی، مشخص کننده مقاومت-ویژه لایه اول است (یا متوسط چند مقدار اولیه مقاومت ویژه است) اما برای تعیین مشخصات این لایه،

منحنی آن لایه بر منحنی استاندارد مربوطه منطبق می‌گردد. تقاطع محورهای افقی و قائم منحنی استاندارد را روی کاغذ لگاریتمی که منحنی سونداژ الکتریکی روی آن رسم شده با علامت (+) مشخص کرده و مختصات این نقطه به دست می‌آید. طول این نقطه، معادل ضخامت لایه اول و عرض آن مقاومت ویژه لایه اول را مشخص خواهد نمود [Mooney, 1980].

برای تعیین مشخصات لایه دوم، در صورتی که زمین مورد مطالعه، فقط از دو لایه تشکیل شده باشد، منحنی سونداژ الکتریکی به مقدار حقیقی مقاومت ویژه لایه دوم نمی‌رسد؛ حال با استفاده از منحنی-های کمکی و با تطبیق جزء به جزء منحنی سونداژ، می‌توان مشخصات لایه‌ها را به راحتی تعیین نمود [Telford, et al., 1990]. شکل (۵-۱) تفسیر غیر اتوماتیک یکی از سونداژهای الکتریکی منطقه مورد مطالعه را به کمک سرمنحنی‌های استاندارد نشان می‌دهد.

تاریخ: پروتکل: شماره سونداژ: P2 4-20



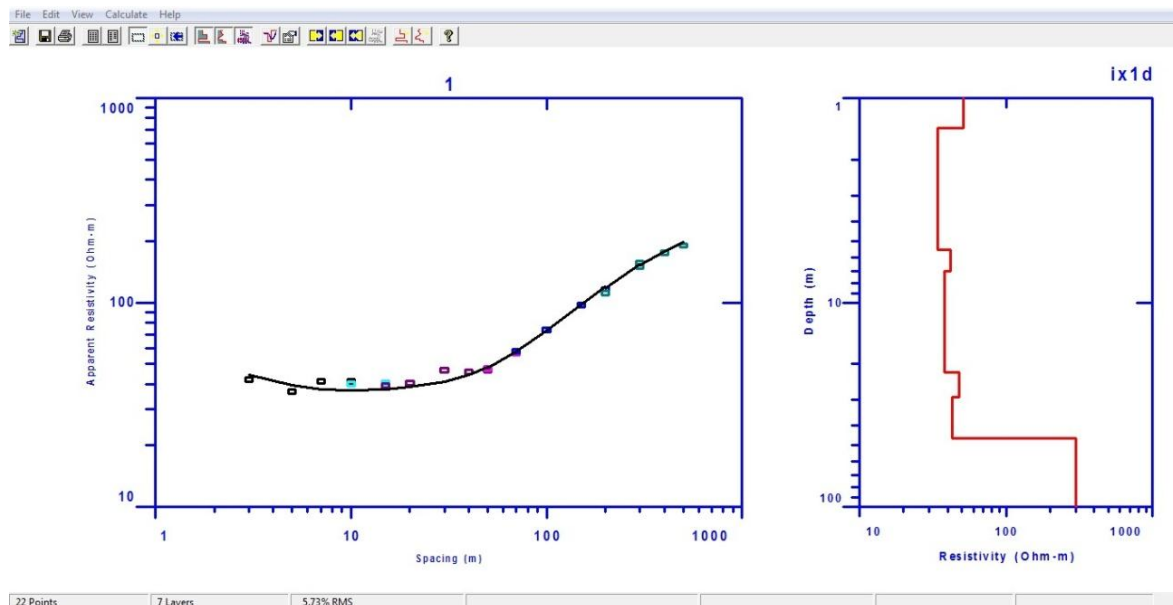
شکل (۵-۱): تفسیر سونداژ الکتریکی توسط سرمحنی‌های استاندارد

همان‌طور که در شکل (۱-۵) دیده می‌شود، نتیجه تفسیر این سونداژ یک زمین ۷ لایه است؛ که خصوصیات این لایه‌ها در جدول (۱-۵) آمده است.

جدول (۱-۵): خصوصیات زمین ۷ لایه حاصل از تفسیر غیراتوماتیک سونداژ الکتریکی شکل (۱-۵)

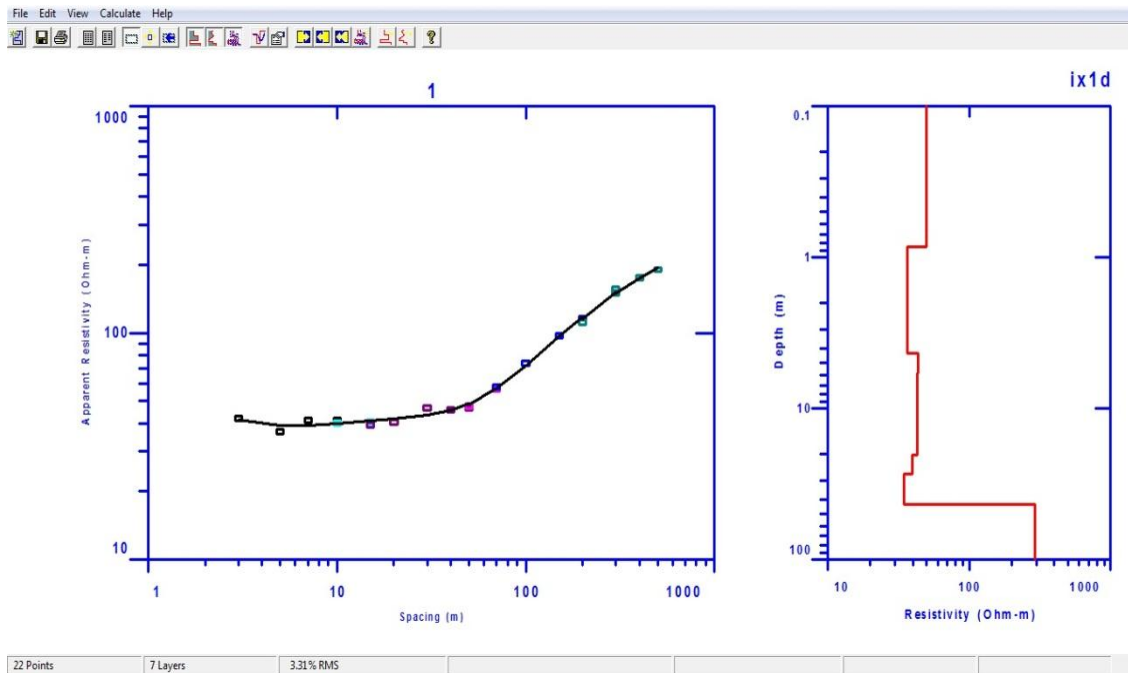
شماره لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقاومت ویژه	۵۱	۳۴	۴۲	۳۸	۴۸	۴۳	۳۰۰
ضخامت	۱/۴	۴/۱	۱/۵	۱۵	۷	۱۷	
عمق	۱/۴	۵/۵	۷	۲۲	۲۹	۴۶	

طی فرآیند مدل‌سازی پیشرو، پاسخ مدل فوق، به دست می‌آید و اختلاف بین منحنی حاصله و منحنی داده‌های صحرائی به صورت درصد خطای RMS محاسبه می‌شود؛ برای داده‌های با کیفیت، این مقدار نباید زیاد باشد. این مدل، یک مدل اولیّه بسیار مناسب برای وارون‌سازی داده‌های سونداژ الکتریکی است. شکل (۲-۵) مدل‌سازی پیشرو را برای مقادیر مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌های حاصله نشان می‌دهد. خطای RMS محاسبه شده برابر ۵/۷۳ درصد است. این فرآیند توسط نرم‌افزار IX1D انجام شده است.



شکل (۲-۵): مدل‌سازی پیشرو برای یک مدل فرضی توسط نرم‌افزار IX1D

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین پاسخ مدل با داده‌های صحرائی وجود دارد؛ بنابراین از آن به عنوان مدل اولیه برای مدل‌سازی وارون استفاده می‌شود. به کمک نرم‌افزار IX1D مدل وارون با ۵ بار تکرار حاصل می‌شود. شکل (۳-۵) این مدل وارون را نشان می‌دهد که خطای RMS آن برابر ۳/۳۱٪ می‌باشد.



شکل (۳-۵): مدل وارون با ۵ بار تکرار فرآیند وارون‌سازی حاصل از نرم‌افزار IX1D

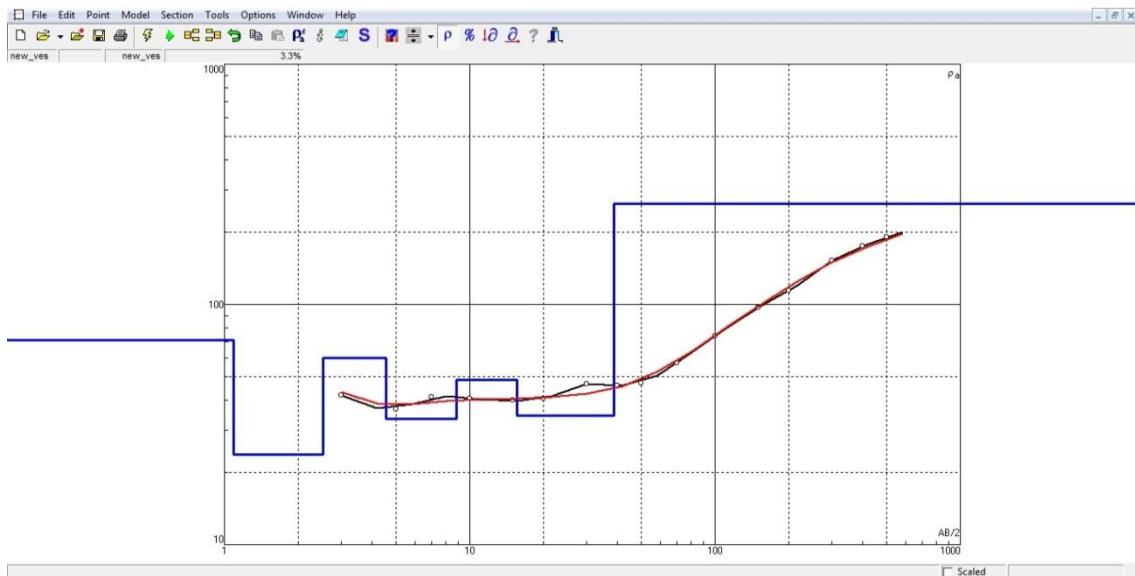
جدول (۲-۵) پارامترهای مدل حاصله را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۵): پارامترهای مدل وارون با ۵ بار تکرار فرآیند مدل‌سازی وارون حاصل از نرم‌افزار IX1D

شماره لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقاومت ویژه	۴۹/۹	۳۶/۶	۴۳/۸	۴۲/۷	۳۹/۹	۳۴/۴	۲۹۱/۷
ضخامت	۰/۸۵	۴/۳	۱/۴۹	۱۴/۴۶	۶/۷۶	۱۶/۳۴	
عمق	۱/۴	۴/۳	۵/۸۲	۲۰/۲۸	۲۷/۰۴	۴۳/۳۷	

تاکنون مدل اولیه‌ای حاصل از تفسیر غیراتوماتیک توسط سرمنحنی‌های استاندارد ایجاد شد و مدل‌سازی پیشرو و وارون نیز توسط نرم‌افزار IX1D بر روی این مدل صورت گرفت؛ اکنون مدل اولیه

مورد نظر توسط نرم افزار IPI2WIN وارون سازی می شود. از آن جایی که نرم افزار IPI2WIN در زمین- های لایه ای خوب عمل می کند، در این پژوهش، از تفسیر نیمه اتوماتیک این نرم افزار برای وارون سازی داده های مقاومت ویژه استفاده می شود؛ کما این که وارون سازی اتوماتیک توسط نرم افزار مذکور بر روی داده های منطقه مورد نظر نتایج غیرمنطقی ارائه می دهد. شکل (۴-۵) مدل حاصله را نشان می دهد.



شکل (۴-۵): مدل سازی وارون برای یک مدل فرضی توسط نرم افزار IPI2WIN. داده های برداشتی به صورت نقاط سبز- رنگ و پاسخ مدل به صورت منحنی قرمز رنگ و مدل وارون به شکل خط آبی رنگ دیده می شود.

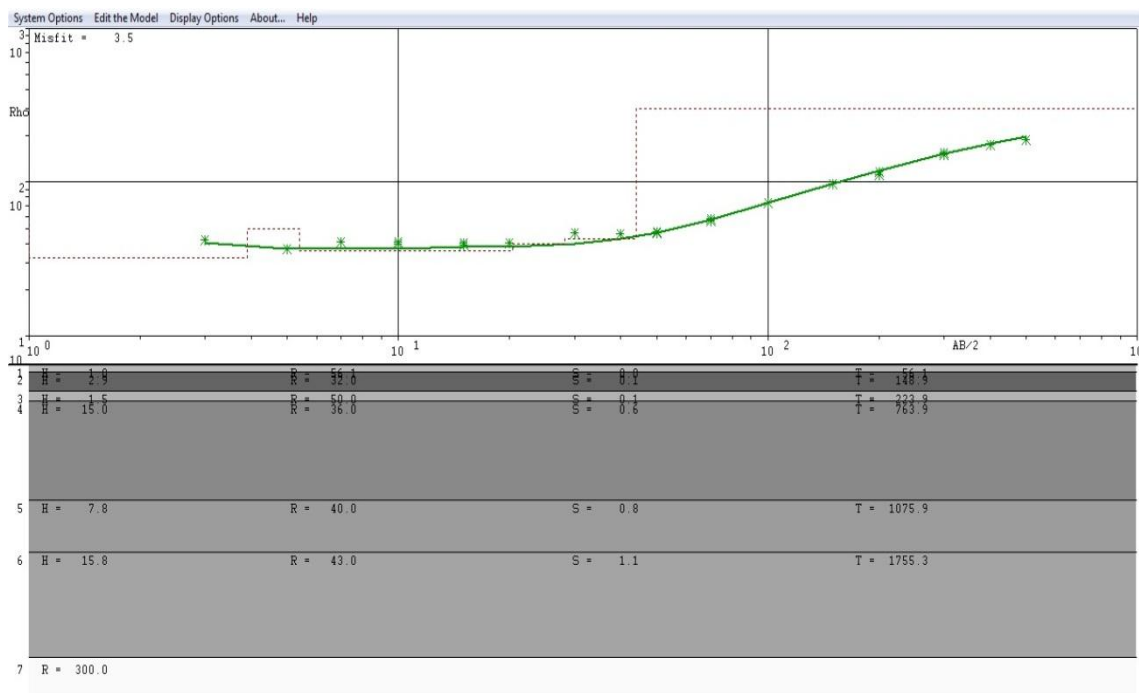
این مدل سازی دارای $\text{RMS error} = 3/3\%$ است. جدول (۳-۵) پارامترهای مدل حاصله را نشان می دهد. این پارامترها از مدل وارون که به شکل خط آبی است، استخراج می شود. مقادیر مقاومت ویژه از روی محور مقاومت ویژه ظاهری و عمق لایه ها از روی محور AB/2 به دست می آید.

جدول (۳-۵): پارامترهای مدل حاصل از نرم افزار IPI2WIN

شماره لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقاومت ویژه	۷۱	۲۳/۷	۵۹/۸	۳۳/۴	۴۸/۵	۳۴/۴	۲۶۲
ضخامت	۱/۱	۱/۴	۲	۴/۳	۶/۷	۲۳/۱	
عمق	۱/۱	۲/۵	۴/۶	۸/۹	۱۵/۶	۳۸/۷	

این فرآیند توسط نرم افزار VES نیز انجام می شود. شکل (۵-۵)، مدل حاصله از نرم افزار VES را نشان

می دهد.



شکل (۵-۵): مدل حاصله از نرم افزار VES. داده های برداشتی به صورت نقاط سبزرنگ و پاسخ مدل به صورت منحنی سبزرنگ و مدل وارون به شکل نقطه چین مشکی دیده می شود.

خطای Misfit این مدل برابر ۳/۵٪ است و پارامترهای آن در جدول (۴-۵) قابل مشاهده است.

جدول (۴-۵): پارامترهای مدل حاصل از نرم افزار VES

شماره لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقاومت ویژه	۵۶/۱	۳۲	۵۰	۳۶	۴۰	۴۳	۳۰۰
ضخامت	۱	۲/۹	۱/۵	۱۵	۷/۸	۱۵/۸	
عمق	۱	۳/۹	۵/۴	۲۰/۴	۲۸/۲	۴۴	

مقایسه بین داده های صحرائی و پاسخ مدل حاصل از نرم افزار VES در جدول (۵-۵) نشان داده شده است.

جدول (۵-۵): مقادیر مقاومت ویژه ظاهری داده‌های صحرایی و مدل حاصل از یک سونداژ توسط نرم‌افزار VES

AB/2	MN/2	مقاومت ویژه ظاهری مشاهده شده	مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده
۳	۱	۴۲	۴۰/۶
۵	۱	۳۶/۷	۳۶/۷
۷	۱	۴۱/۲	۳۶/۷
۱۰	۱	۴۱/۱	۳۷/۱
۱۰	۲/۵	۴۰	۳۷/۱
۱۵	۱	۴۰/۵	۳۷/۷
۱۵	۲/۵	۳۹/۲	۳۷/۷
۲۰	۲/۵	۴۰/۵	۳۸/۱
۳۰	۲/۵	۴۶/۸	۳۹/۹
۴۰	۲/۵	۴۵/۹	۴۲/۹
۵۰	۲/۵	۴۶/۷	۴۶/۹
۵۰	۱۰	۴۷/۵	۴۶/۹
۷۰	۲/۵	۵۶/۵	۵۶/۸
۷۰	۱۰	۵۷/۷	۵۶/۸
۱۰۰	۱۰	۷۳/۷	۷۳
۱۵۰	۱۰	۹۷/۱	۹۸/۲
۲۰۰	۱۰	۱۱۶/۴	۱۱۹/۶
۲۰۰	۴۰	۱۱۱/۲	۱۱۹/۶
۳۰۰	۱۰	۱۵۰	۱۵۳/۳
۳۰۰	۴۰	۱۵۵/۶	۱۵۳/۳
۴۰۰	۴۰	۱۷۵/۷	۱۷۸/۶
۵۰۰	۴۰	۱۹۰/۴	۱۹۷/۲

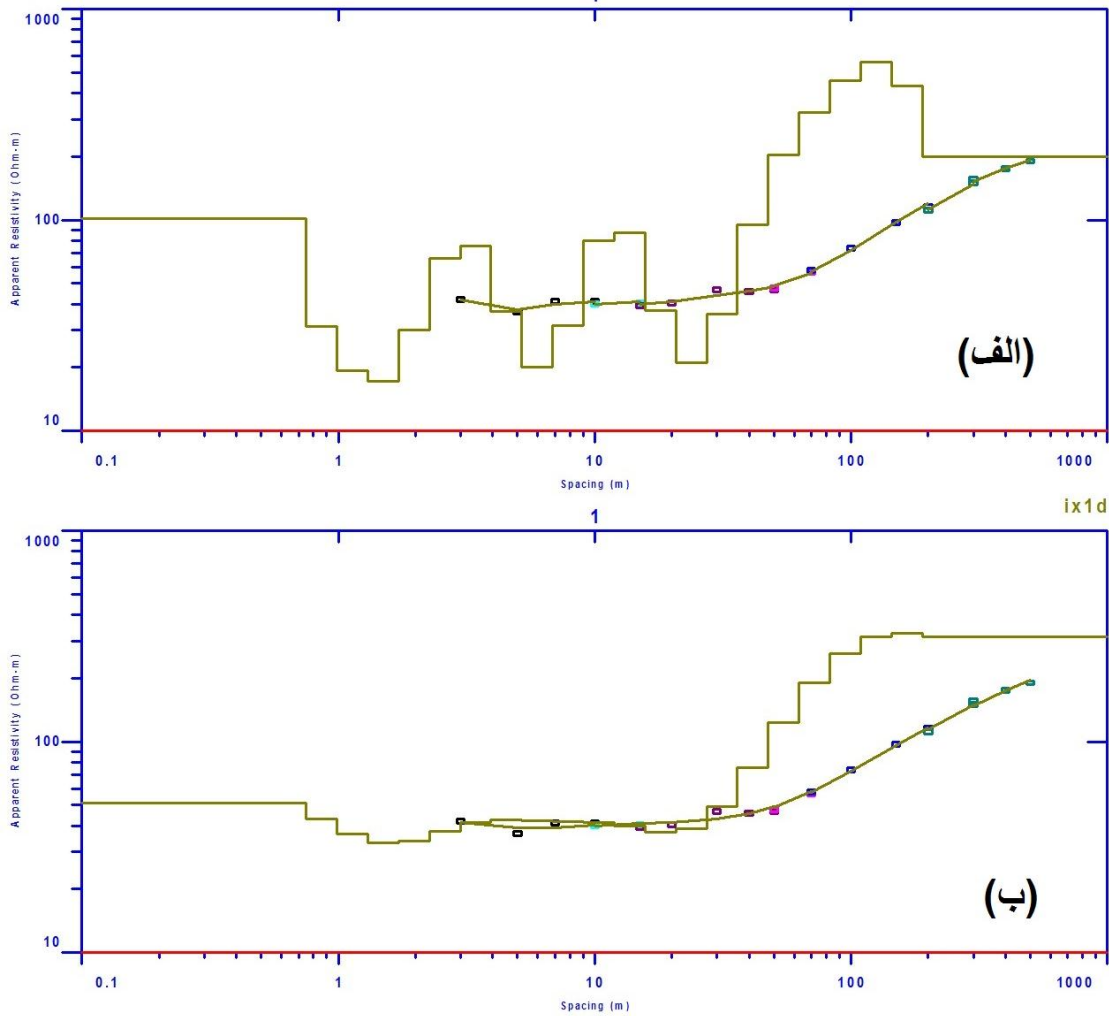
۵-۳-۲- تفسیر سونداژهای الکتریکی با استفاده از روش‌های اکام و ریج

پیشتر و در بخش‌های (۱-۳-۳) و (۲-۳-۳) پیرامون تئوری دو روش اکام و ریج بحث شد. در این بخش داده‌های سونداژهای الکتریکی به کمک این دو روش وارون‌سازی شده و مقایسه نتایج حاصل از این دو روش انجام خواهد شد؛ در نهایت ضمن توجه توأم به این دو روش، مدل‌سازی داده‌ها صورت می‌گیرد.

روش اکام در وارون‌سازی هموار یک راه ساده و ارزان برای حل مسائل ناپایدار یا مسائلی است

که داده‌ها در آن کم است. در عین حال اگر محدودیت‌های اولیه یا مدل اولیه در دسترس نباشد، این مدل‌سازی بهترین است. در فرمولاسیون مسائل وارون‌سازی هموار، مطلوب آن است که پارامترهای مدل نسبت به مکان با تغییرات کمی همراه باشند. در این صورت می‌توان در فرمول‌های مدل‌سازی وارون اختلاف بین پارامترهای مجاور را به حداقل رساند. مزیت بزرگ این روش این است که مدل‌هایی که ذاتاً با داده‌های مشاهده‌ای سنخیتی ندارند و تغییرات شدید و غیر واقعی ایجاد می‌نمایند، در مجموع پاسخ‌ها وارد نمی‌گردد [Constable, et al., 1987].

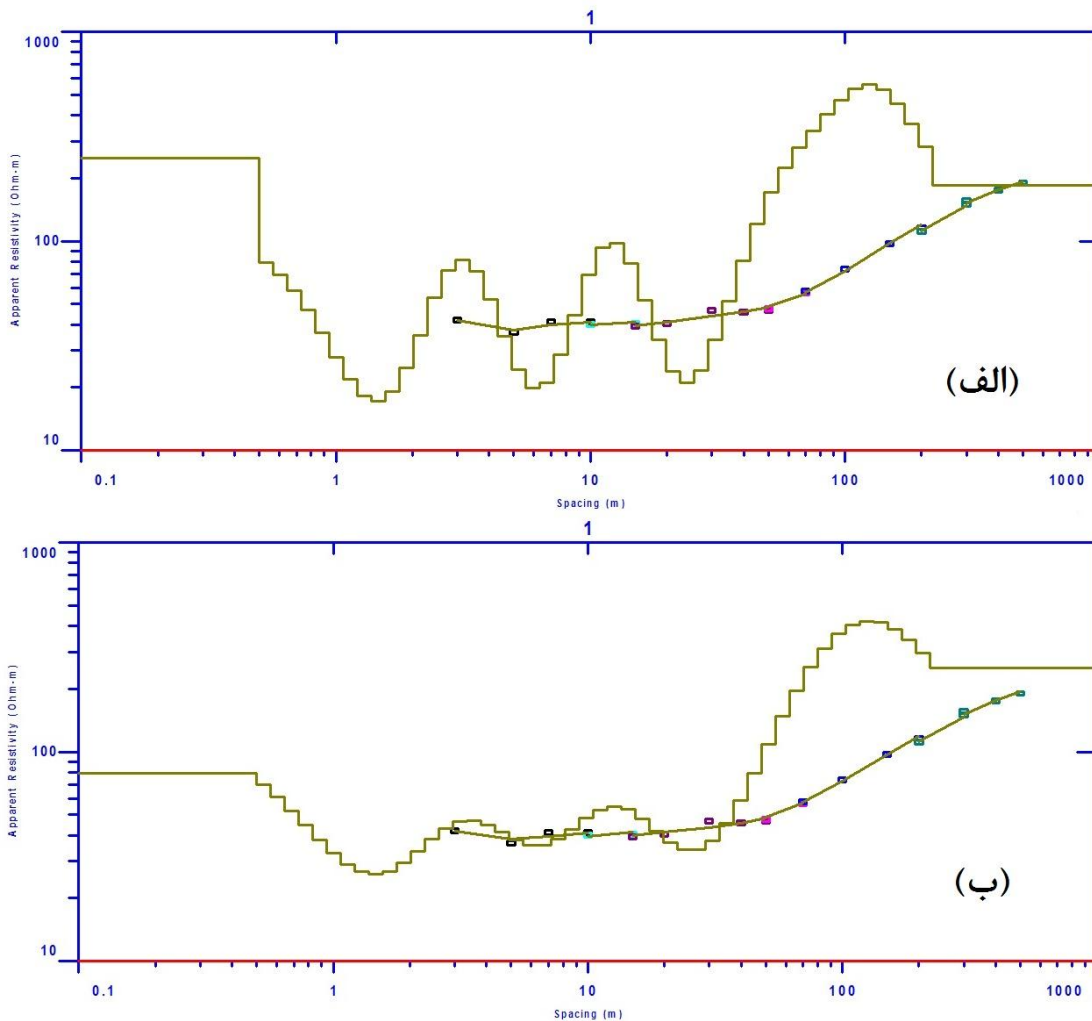
رگرسیون ریج در وارون‌سازی داده‌های سونداژ الکتریکی، برای تعداد لایه‌های محدود (پارامتر-های فیزیکی کم) مناسب است، اما زمانی که تعداد پارامترهای مدل زیاد باشد، مدل حاصل از این روش دارای گسترش مقاومت‌ویژه نامنظم است و نواحی با مقاومت‌ویژه کاذب به شدت بزرگ یا کوچک خواهند بود [Constable, et al., 1987]. استفاده از این روش برای یافتن مرزهای تیز مناسب می‌باشد؛ از این رو مقادیر مقاومت‌ویژه و قطبش القایی داخل این مرزها، گاه دچار نوسانات و اشتباهات زیاد است، در عوض وارون‌سازی هموار انجام شده توسط الگوریتم آکام، علی‌رغم ارائه مقاومت‌ویژه و قطبش القایی منطقی‌تر، مرزهایی مبهم را ارائه می‌نماید و برای بعضی مقاصد حفاری و تونل‌زنی و یا محاسبات ذخیره زیرزمینی به‌تنهایی مؤثر نیست. لذا، تلفیقی از دقت مرزبندی مدل‌سازی پارامتری و دقت مقادیر پارامترهای مدل‌سازی هموار باید مورد توجه قرار گیرد [مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۴]. در شکل (۵-۶) مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری یک سونداژ الکتریکی توسط هر دو روش آکام و رگرسیون ریج وارون‌سازی شده‌اند. در این دو، یک زمین ۲۲ لایه (به تعداد داده‌های برداشت شده سونداژ الکتریکی) با مقاومت‌ویژه ۱۰۰ اهم‌متر به عنوان مدل اولیه، در نظر گرفته شده است. خطای RMS مربوط به روش آکام برابر ۳/۱۷ درصد و خطای مدل حاصل از رگرسیون ریج ۲/۲۶ درصد است.



شکل (۵-۶): مدل وارون حاصل از مدل اولیه ۲۲ لایه و همگن (الف) مدل پارامتری حاصل از رگرسیون ریج. (ب) مدل هموار به دست آمده از الگوریتم آکام. داده‌های برداشتی به صورت نقاط با رنگ‌های مختلف و پاسخ مدل به صورت منحنی سبز رنگ و مدل وارون به شکل خط سبز رنگ دیده می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل حاصل از رگرسیون ریج در برآزش پارامترها، پایدارتر و مؤثرتر عمل کرده است؛ بدین معنی که خطای RMS کمتری دارد و مرز لایه‌ها را بهتر نشان می‌دهد. در قسمت (الف) شکل در عمق ۴ تا ۸ متری لایه‌ای دیده می‌شود که تباین چندانی با لایه‌های مجاور ندارد، اما در هر صورت رگرسیون ریج قادر به نمایش این لایه است. اما در قسمت (ب) شکل و در مدل روش آکام، این لایه دیده نمی‌شود. نکته دیگر این شکل، نمایش تغییرات شدید در مقاومت ویژه لایه‌ها در مدل حاصل از رگرسیون ریج است. روش آکام نیز علی‌رغم نمایش منطقی مقاومت ویژه، در

تشخیص مرز لایه‌ها ضعیف عمل می‌نماید. در شکل (۷-۵) وارون سازی فوق بر روی همان داده‌های مقاومت ویژه ظاهری صورت می‌گیرد، اما این بار به جای ۲۲ لایه، مدل ۵۰ لایه همگن با مقاومت ویژه ۱۰۰ اهم‌متر به عنوان مدل اولیه، در نظر گرفته می‌شود. خطای RMS مربوط به روش‌های اُکام و رگرسیون ریج به ترتیب ۲/۷۰ درصد و ۲/۲۱ درصد است.



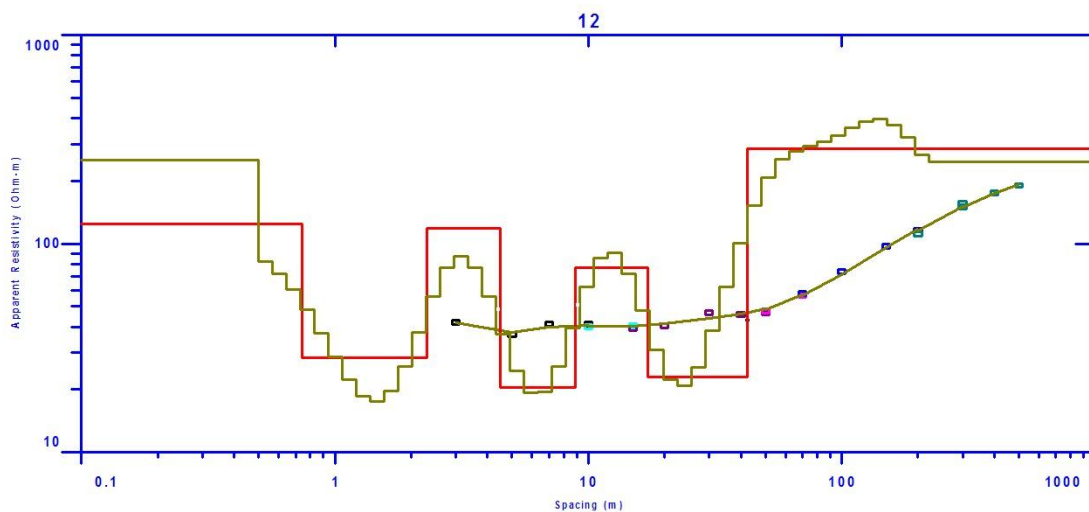
شکل (۷-۵): مدل وارون حاصل از مدل اولیه ۵۰ لایه و همگن (الف) مدل پارامتری حاصل از رگرسیون ریج. (ب) مدل هموار به دست آمده از الگوریتم اُکام. داده‌های برداشتی به صورت نقاط با رنگ‌های مختلف و پاسخ مدل به صورت منحنی سبزرنگ و مدل وارون به شکل خط سبزرنگ دیده می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۷-۵) دیده می‌شود، این بار لایه با تباین مقاومت ویژه کم، در هر دو مدل دیده می‌شود؛ همچنان روش پارامتری، مقادیر غیرمنطقی را برای سونداژ مورد نظر نشان می‌دهد

و نیز روش اُکام، مرزهایی ملایم و رگرسیون ریج مرزهایی تیز را نشان می‌دهد.

اما استفاده از این روش برای زمین با تعداد زیادی لایه (۲۲ لایه) تغییراتی شدید در مقاومت-ویژه لایه‌ها را نشان می‌دهد. از طرف دیگر تشخیص ضعیف مرز لایه‌ها در روش اُکام و پنهان شدن بعضی از لایه‌ها کار تفسیر را مشکل می‌سازد.

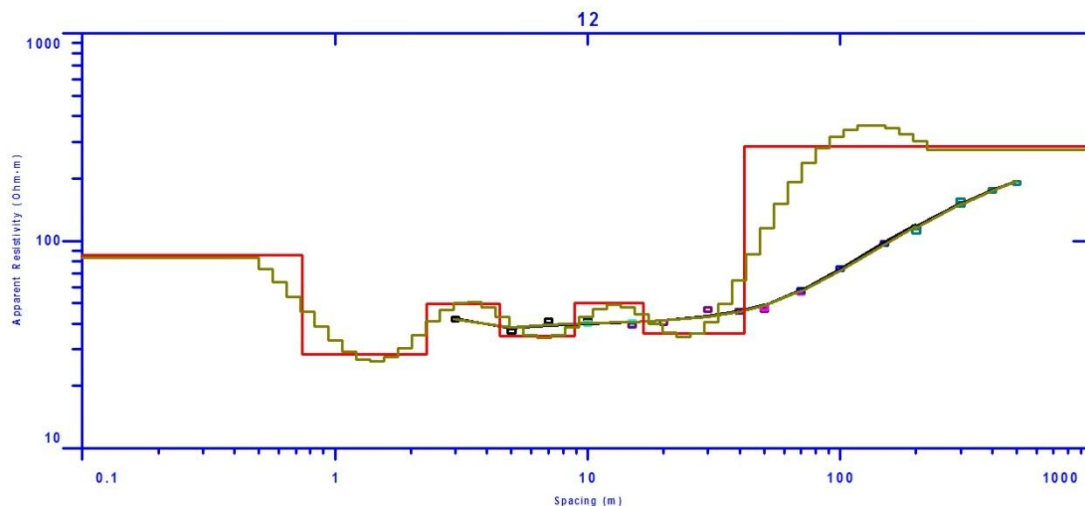
اکنون برای تفسیر معقولانه بر روی این مدل‌ها یک مدل چند لایه، برازش می‌شود، چرا که وجود ۲۰ یا ۵۰ لایه ژئوالکتریکی در زیر سطح زمین چندان منطقی نیست. از روش اُکام در تعیین مقاومت‌ویژه و از رگرسیون ریج جهت تعیین ضخامت لایه‌ها استفاده می‌شود. در شکل (۸-۵) مدل ۷ لایه‌ای مد نظر است، که مرزهای آن توسط مدل حاصل از رگرسیون ریج تعیین شده است.



شکل (۸-۵): مدل ۷ لایه حاصل از رگرسیون ریج.

سپس مقادیر مقاومت‌ویژه لایه‌ها، به کمک روش هموار اُکام، تعدیل می‌شود. در شکل (۹-۵)

این مدل با خطای RMS آن ۳/۰۵٪ نشان داده شده است



شکل (۵-۹): مدل تعدیل یافته و حاصل از هر دو روش آکام و ریچ.

اکنون در صورت عدم رضایت از مدل حاصله می‌توان مجدداً آن را به عنوان مدل اولیه وارد فرآیند مدل‌سازی نمود. البته تکرارهای بیشتر و خطای کمتر همیشه مدل دقیق‌تری را نشان نمی‌دهد. چه بسا ممکن است مدلی که بدین صورت به‌وجود آید از شواهد مسأله و واقعیت‌های زمین‌شناسی دور شود؛ چراکه داده‌های برداشت شده متأثر از عوامل نوین متعددی هستند. جدول (۵-۶) پارامتر-های مدل منتجه را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۶): پارامترهای مدل ۷ لایه حاصل از روش‌های آکام و رگرسیون ریچ

شماره لایه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقاومت ویژه	۸۵/۷	۲۸/۴	۴۹/۶	۳۴/۸	۴۷/۱	۳۶	۲۸۵
ضخامت	۰/۷	۱/۵۷	۲/۲	۴/۴	۷/۷	۲۵/۲	
عمق	۰/۷	۲/۳	۴/۵	۸/۹	۱۶/۶	۴۱/۸	

۵-۳-۳- آنالیز مدل‌های هم‌ارز

اگر تعداد مجهولات مسأله را با M و تعداد معلومات را با N نمایش دهیم، می‌توان این مسائل را

به سه گروه تقسیم کرد:

۱) مسائل فرا برآورد^۱ ($N > M$)؛ در این مسائل، اطلاعات بسیار زیادی از محیط نسبت به پارامترهای مجهول مسأله در دست است و تنها یک جواب برای مسأله وجود دارد.

۲) مسائل دقیقاً تعیین شده^۲ ($M = N$)؛ در این حالت تعداد اطلاعات موجود دقیقاً برابر تعداد مجهولات است و تنها یک جواب برای مسأله وجود دارد.

۳) مسائل فرو برآورد^۳ ($M < N$)؛ در این مسائل اطلاعات کافی در مسأله موجود نیست و تعداد مجهولات مسأله (پارامترهای مدل) بیشتر از تعداد معلومات می باشد. در این حالت چندین پاسخ برای مسأله وجود دارد.

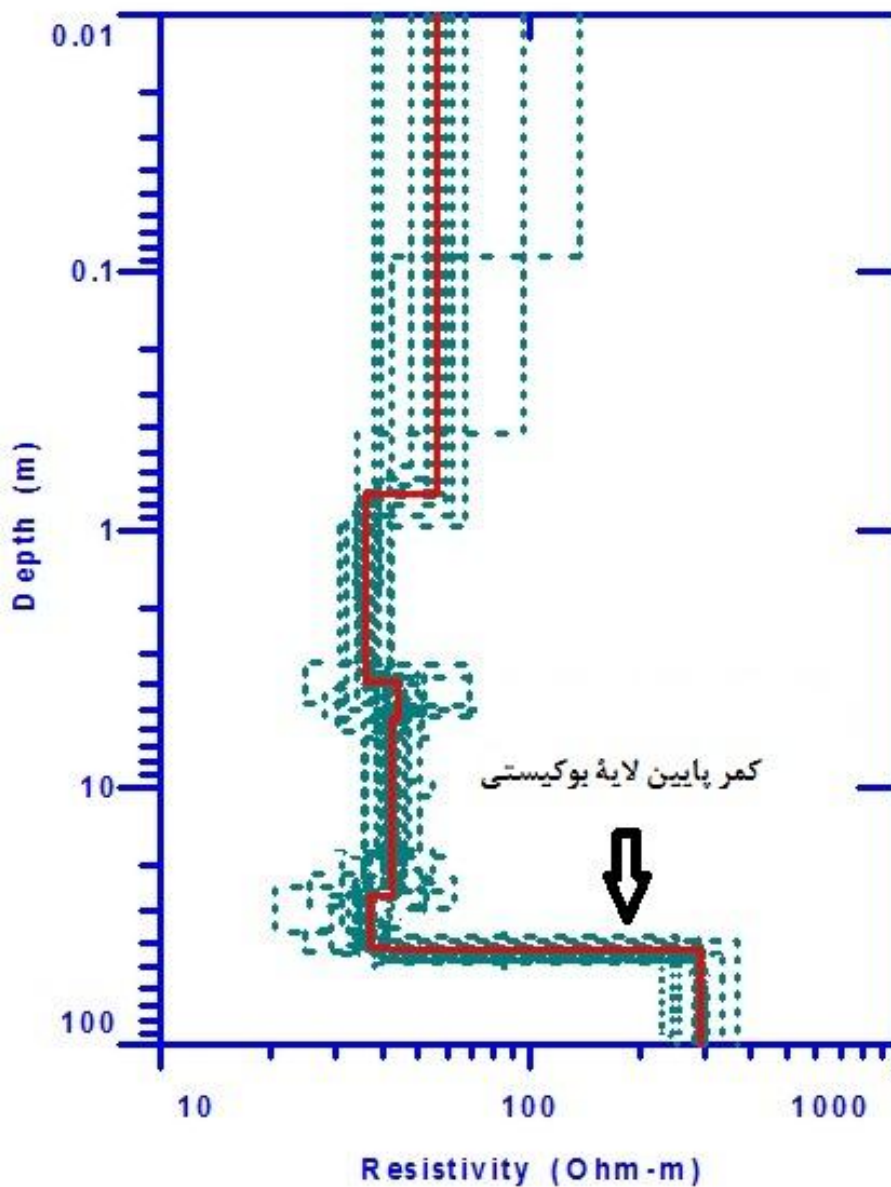
مسائل ژئوالکتریکی از جمله مسائل فرو برآورد هستند و به همین دلیل پس از وارون سازی چندین پاسخ هم ارز به دست می آید. به عبارت دیگر تعداد زیادی از مدل های زمینی می توانند داده های مشاهده ای یا نمودارهای سونداژ مشابهی را تولید کنند [Meju, 1994].

انتخاب بهترین مدل در بین آنها نیاز به استفاده از اطلاعات جانبی دیگر از قبیل مغزه های حفاری در گمانه های نزدیک سونداژ، اطلاعات زمین شناسی، نتایج حاصل از لرزه نگاری احتمالی و نتایج حاصل از سونداژهای مجاور دارد. شکل (۵-۱۰) مدل های هم ارز مدل حاصل از سونداژ قبلی را که توسط روش های مختلف وارون سازی شده، نشان می دهد. . فلش روی شکل، عمق کمر پائین لایه بوکسیتی را نشان می دهد خطای RMS برای تمامی مدل ها در بازه $۳/۲۸\% - ۳/۹۸\%$ می باشند.

¹ Over determined problem

² Even determined problem

³ Under determined problem



شکل (۵-۱۰): نمایش مدل‌های هم‌ارز. خطوط نقطه‌چین مدل‌های معادل حاصل از وارون‌سازی داده‌های سونداژ خط قرمز بهترین مدل را نشان می‌دهد.

۴-۵- تفسیر سونداژهای الکتریکی در منطقه

آن‌چه در این مبحث بیشتر مورد توجه قرار گرفته، جنبه فیزیکی مسأله است. بدیهی است اطلاعات حاصل از مدل‌سازی سونداژهای ژئوالکتریکی باید به اطلاعات زمین‌شناسی برگردانده شود. بنابراین یک تعبیر و تفسیر کامل، از یک طرف نیازمند داشتن تجربه در مسائل ژئوالکتریک و از طرف

دیگر دسترسی به اطلاعات جامع زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه مربوط است [Loke, 2004 a] به-
طور خلاصه به منظور تفسیر صحیح سونداژهای الکتریکی یک منطقه باید به نکات زیر توجه داشت
[حجت، ۱۳۸۲]:

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

(۲) هرگاه در مجاورت سونداژهای الکتریکی، ترانشه یا گمانه‌ای وجود داشته باشد، باید از اطلاعات
حاصل از این گمانه‌ها در تفسیر سونداژهای الکتریکی استفاده نمود.

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

(۴) گاهی در منحنی‌های سونداژ الکتریکی صحرائی، انحنا و یا تیزی‌هایی وجود دارد که مفسّر در
مورد واقعی بودن و میزان اهمیت آن‌ها تصمیم‌گیری می‌کند. در بعضی مواقع، یک منحنی
صحرائی که آثار نویزهای زیادی در آن مشاهده می‌گردد، هموار می‌شود تا یک منحنی ساده‌تر
برای مدل‌سازی آماده شود.

بنابراین برای یک تفسیر نهایی باید از تمام اطلاعات موجود در منطقه استفاده نمود تا بتوان به
نتایج دقیق‌تری دست یافت. در مورد منطقه مورد مطالعه این پژوهش نیز ضمن توجه توأم به شواهد
منطقه و زمین‌شناسی آن که در بخش (۳-۴) و (۴-۴) آورده شده است.

آنچه در جدول (۱-۲) به عنوان مقاومت ویژه واقعی دولومیت و بوکسیت آورده شده، با مقادیر
حاصل از مدل‌سازی برای این دو سنگ و کانی متفاوت است و دلیل آن وجود رس در هر دو آن‌ها
است.

به دلیل تباین کافی مقاومت ویژه بوکسیت کائولنی و دولومیت، تشخیص توپوگرافی سنگ بستر

ممکن است، اما به دلیل اختلاف کم مقاومت ویژه بوکسیت کائولنی با لایه‌های بالایی، تشخیص ضخامت لایه معدنی مشکل است. در مدل‌های ۷ لایه به دست آمده در بخش (۵-۳-۱) و (۵-۳-۲) نیز لایه‌های شماره ۳، ۴، ۵ و ۶ مقاومت ویژه تقریباً یکسانی دارند که تفکیک و تشخیص آن‌ها از هم مشکل می‌باشد. هم‌چنین روش‌های مختلف مدل‌سازی ضخامت‌های بسیار متفاوتی برای آن‌ها ارائه می‌کنند؛ اما مجموع ضخامت این ۴ لایه، در همگی این روش‌ها، تقریباً یکسان و منطقی است. گاهی به دلیل تفاوت کم مقاومت ویژه این ۴ لایه، پس از وارون‌سازی، تیپ نمودارهای سونداژ الکتریکی نیز تغییر می‌کند. از سوی دیگر در بسیاری از سونداژهای برداشت شده دیگر، ثبت ۷ لایه ژئوالکتریکی غیر ممکن است؛ بنابراین در تفسیر کلی، مجموع این لایه‌ها، یک لایه در نظر گرفته شد. به طور کلی ۴ لایه ژئوالکتریکی مشهود است. این لایه‌ها به ترتیب سن عبارتند از:

(۱) لایه دولومیتی که نقش سنگ بستر را دارد و تا حداکثر عمق نفوذ جریان مستقیم الکتریکی، گسترش قائم دارد. این لایه، نسبت به لایه‌های ژئوالکتریکی دیگر مقاومت ویژه بالاتری دارد و گستره مقاومت ویژه آن از ۲۰۰ تا ۵۰۰ اهم‌متر و بیشتر، است.

(۲) لایه بعد حاوی انواع واحدهای بوکسیتی، شیل‌های ذغالی، ماسه‌سنگ دانه‌ریز و متخلخل و سیلت‌استون و ... می‌باشد؛ که به دلیل عدم تباین مقاومت ویژه و هم‌پوشانی گستره مقاومت ویژه آن‌ها از هم قابل تفکیک نیستند. مقاومت ویژه این لایه، در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر و در موارد انگشت‌شماری بیش از این مقدار می‌باشد.

(۳) یک روبره رسانا با مقاومت ویژه کمتر از لایه دوم که مقاومت ویژه آن در حدود ۳۰ تا زیر ۱۰۰ اهم متر می‌باشد. جنس این لایه، عموماً آبرفت‌های سطحی است. با توجه به میزان بالای نزولات جوی و زمان برداشت داده (آبان و دی ماه) این لایه، مرطوب بوده و کم بودن مقاومت ویژه آن متأثر از این موضوع است.

(۴) یک لایه نازک سطحی که گستره مقاومت ویژه بالایی دارد و مقاومت ویژه‌های بسیار بالا (بیش از

۱۰۰۰ اهم‌متر) تا کم (حدود ۴۰ اهم‌متر) در آن دیده می‌شود. مقادیر کم احتمالاً مربوط به رس-ها و آبرفت‌های دانه‌ریز و مرطوب سطحی و مقادیر بالا در روی سکوی حفاری گمانه‌ها و واریزه-های ناشی از حفاری ثبت گردیدند.

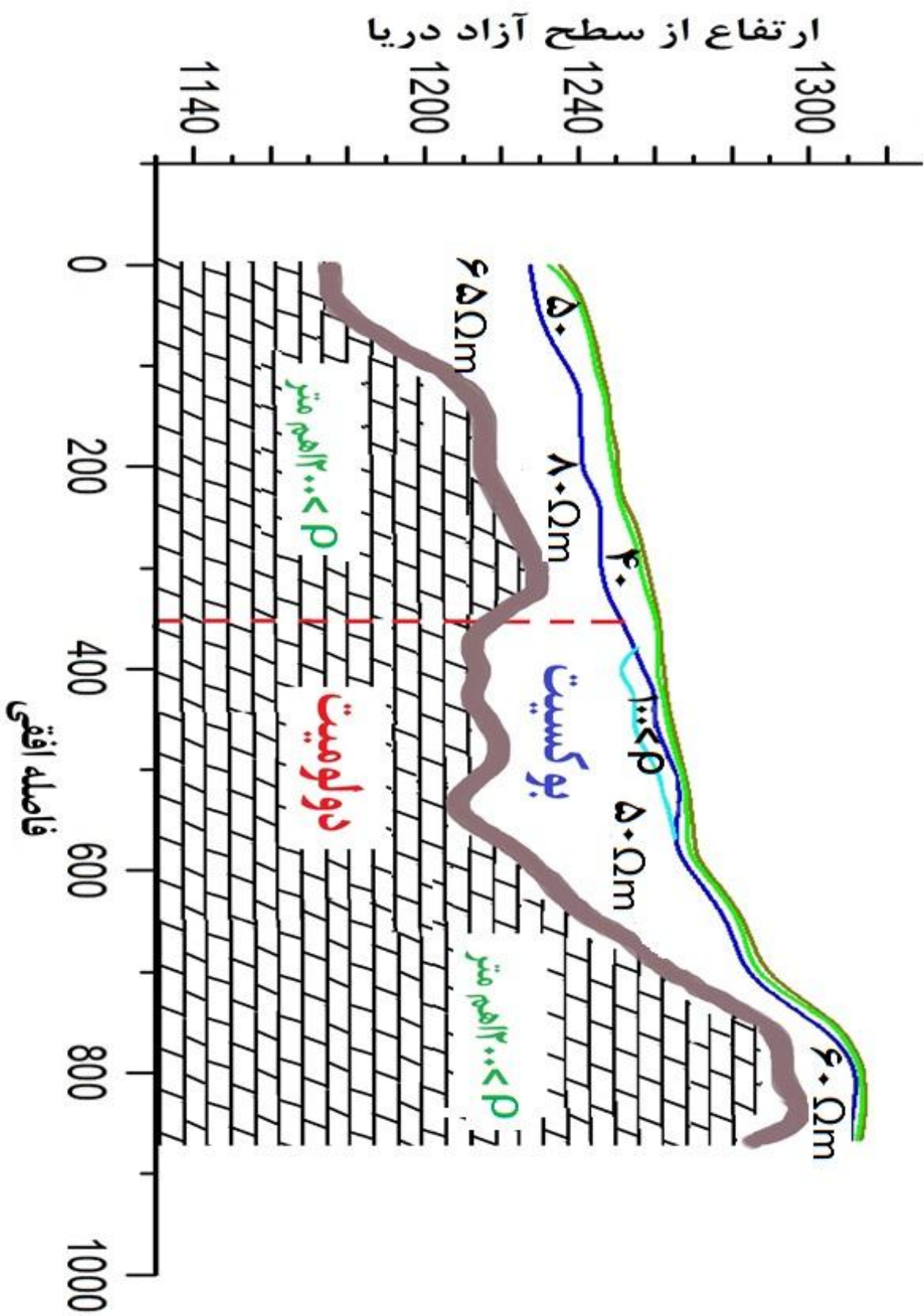
۵-۴-۱- تفسیر و مدل‌سازی خط برداشت اول

طول این خط برداشت حدود ۸۷۰ متر می‌باشد و بر روی آن ۳۴ سونداژ الکتریکی وجود دارد. یک‌سوم سونداژهای این خط بر روی توپوگرافی خشن برداشت شده‌اند. در جدول (۵-۷) عمق کمر-پایین ماده معدنی با روش‌های مختلف تفسیر سونداژ که به آن‌ها اشاره شد و نیز خطای حاصل از هر روش، به تفکیک آمده است.

نتایج مدل‌های حاصل از روش‌های اُکام و ریچ نیز به صورت یک مدل دو بُعدی به همراه توپوگرافی سطح زمین در شکل (۵-۱۱) آورده شده است. چهار لایه‌ای که قبلاً در مورد آن بحث شد، در این شکل نمایش داده شده است.

جدول (۵-۷): عمق کمرپایین بوکسیت حاصل از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف به همراه خطای مدل‌سازی مربوط به خط برداشت اول

مدل حاصل از روش‌های آکام و رگرسیون رنج		IPI2WIN		VES		IX1D		منحنی استاندارد		نام سونداز
RMS(%)	عمق	RMS(%)	عمق	misfit(%)	عمق	RMS(%)	عمق	RMS(%)	عمق	
۸/۹۷	۵۹/۷۴	۵/۵۶	۶۰	۹/۲	۶۰/۶	۸/۷۷	۵۹/۷۱	۱۶/۳	۶۰	S1-1
۳/۰۵	۶۵/۹۶	۲/۴۸	۶۵/۸	۳/۳	۶۷	۳/۱۵	۶۵/۵۶	۱۰/۳۱	۶۶	S1-2
۳/۹۷	۶۲/۷۳	۳/۸۴	۶۰/۴	۵/۶	۶۱/۹	۵/۶۵	۶۰/۱۵	۱۶/۸۱	۶۶	S1-3
۴/۹۹	۵۱/۹۵	۶/۷۴	۴۵/۶	۵	۴۳/۳	۵/۶۷	۴۳/۷۲	۶/۷۲	۴۶	S1-4
۷/۹۶	۴۰/۷۳	۶/۱۴	۴۲/۷	۱۴/۹	۴۲	۷/۹۹	۴۲/۶۹	۸/۳	۴۳	S1-5
۵/۲۳	۳۷/۰۵	۷/۳۶	۳۴/۷	۹/۷	۳۲	۶/۲	۳۲/۳۱	۱۱/۸۹	۳۸	S1-6
۹/۷۱	۳۲/۴۱	۱۲/۷	۳۱/۲	۱۰/۹	۳۴/۹	۱۰/۲۵	۳۱/۲۶	۱۶/۸۵	۴۰	S1-7
۸/۶۷	۳۵	۵/۸۶	۳۸/۵	۹/۷	۳۵/۲	۹/۱۹	۳۲/۷۱	۲۲/۸۶	۳۸	S1-8
۵/۸	۳۵/۳۹	۵/۹۳	۳۹	۵/۹	۴۱	۵/۹۶	۴۴/۸	۲۰/۶۴	۴۰	S1-9
۶/۲۷	۳۰/۳	۵/۵۳	۳۴/۲	۷/۲	۳۵	۷/۹۸	۳۴/۷	۲۰/۵۸	۴۰	S1-10
۲/۹۷	۳۱/۱	۴/۷۳	۳۸	۳/۷	۳۹/۵	۳/۲۷	۴۲/۸۳	۸/۸۷	۳۸	S1-11
۶/۷۷	۳۰/۴۱	۵/۰۵	۳۵/۶	۶/۷	۳۷	۷/۰۲	۳۷/۴۵	۱۹/۳۴	۴۰	S1-12
۵/۷۴	۲۸/۰۵	۵/۰۲	۳۲/۱	۶/۴	۳۲/۳	۶/۲۹	۳۰/۸۴	۱۹/۵۵	۳۳	S1-13
۱۸/۷۲	۳۲/۳۷	۱۲	۳۲/۱	۲۰/۶	۳۴/۸	۲۴/۱۳	۳۰/۲۳	۳۲/۸۴	۳۲	S1-14
۵/۸۲	۴۷/۵۸	۸/۷۶	۴۴/۴	۱۱/۳	۴۶/۵	۷/۱۲	۴۹/۰۸	۱۶/۸۱	۴۶	S1-15
۴/۱۹	۴۹/۶۹	۶/۴۶	۵۴/۱	۸/۹	۵۸/۳	۴/۶۹	۶۴/۲	۹/۳۲	۷۰	S1-16
۷/۰۱	۴۷/۷۱	۴/۵۴	۵۲	۱۲/۵	۴۶	۷/۱۷	۴۸/۰۹	۱۳/۹	۵۲	S1-17
۶/۶۳	۵۲/۶۵	۴/۷۴	۵۴/۱	۱۱/۵	۵۶	۷/۳۷	۵۸/۴۸	۱۳/۰۳	۶۰	S1-18
۵/۲	۴۷/۳۲	۴/۹۵	۵۰/۵	۱۷/۳	۴۶/۶	۵/۰۷	۴۸/۸۹	۹/۸۸	۶۰	S1-19
۸/۷	۴۴/۸۴	۶/۷۱	۴۴	۱۱/۲	۴۵/۵	۸/۷۷	۴۶/۳	۱۱/۰۴	۵۰	S1-20
۶/۹۳	۴۸	۶/۳	۵۰/۶	۱۰/۶	۵۳/۵	۷/۲۷	۵۷/۱۵	۱۴/۵۸	۶۲	S1-21
۶/۱۱	۶۳/۴۳	۵/۲۲	۶۰/۴	۱۱/۶	۶۰	۶/۳۶	۶۵/۱۶	۱۱/۲۲	۷۰	S1-22
۵/۸۲	۶۰/۲۲	۷/۳۳	۵۷/۷	۱۴/۷	۶۲/۵	۸/۱۱	۶۴/۵۹	۹/۸۷	۵۷	S1-23
۹/۶۸	۵۰/۷۷	۷/۸	۵۲/۷	۱۸/۴	۶۰	۷/۷۵	۵۵/۳۵	۱۰/۲۶	۵۲	S1-24
۸/۸۱	۴۱/۱۸	۸/۲۳	۴۲/۷	۲۲/۶	۳۷	۷/۷۴	۴۲	۱۴/۰۶	۴۲	S1-25
۱۶/۴۲	۴۵/۱۲	۱۱/۷	۴۷/۵	۳۰/۵	۴۱/۸	۱۵/۴۸	۴۱/۳	۲۸/۸۵	۴۵	S1-26
۱۷	۲۷/۴۲	۱۴/۶	۲۸/۹	۱۰۳/۵	۲۸/۳	۲۲/۹۵	۲۸/۰۱	۲۹/۴۶	۳۰	S1-27
۲۰/۸۱	۲۵/۷۲	۱۵/۹	۲۵/۷	۱۴۹/۸	۲۰/۵	۲۴/۸۲	۲۱/۲۸	۳۷/۱۸	۲۳	S1-28
۷/۶۴	۱۷/۱۸	۱۵/۳	۲۰	۳۹/۷	۲۱/۳	۱۰/۵۱	۱۴/۸۵	۲۲/۲۳	۲۱	S1-29
۹/۷۶	۱۶/۸۸	۱۲/۷	۱۶/۴	۳۱/۶	۱۴/۵	۱۰/۲۱	۱۲/۶۷	۱۷/۱۸	۱۲	S1-30
۱۷/۲۵	۲۲/۶۵	۱۴	۱۸/۲	۲۰	۲۵/۶	۱۹/۴۶	۲۰/۸۴	۲۶/۱۹	۳۳	S1-31
۱۳/۰۳	۱۷/۶۶	۱۱/۱	۲۱/۴	۲۲/۱	۲۲/۵	۱۳/۱۱	۱۷/۸۸	۲۳/۹۳	۲۴	S1-32
۱۱/۹۶	۱۴/۳	۱۵	۱۳/۷	۴۲	۱۸	۱۳/۵	۱۱/۹۶	۲۰/۹۱	۱۸	S1-33
۱۴/۴۲	۲۶/۵۲	۴۵/۱	۳۰/۳	۶۶/۳	۲۰	۱۴/۷۹	۱۷/۰۷	۲۳/۴۸	۱۹/۵	S1-34



شکل (۵-۱۱): نمایش دو بُعدی مدل سازی یک بُعدی خط برداشت اول

در شکل (۵-۱۱)، خط ضخیم خاکستری توپوگرافی سنگ بستر دولومیتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در فاصله ۱۰۰ متری تا حدود ۳۵۰ متری مبدأ خط برداشت، عمق کمربین لایه بوکسیتی، کاهش یافته و به حدود ۴۰ و ۳۰ متری از سطح زمین می‌رسد. پس از آن مجدداً عمق سنگ کف افزایش ناگهانی داشته و به حدود ۶۰ متر و بیشتر می‌رسد. دلیل شدت این فروافتادگی احتمالاً عملکرد گسلی است که به صورت نقطه‌چین قرمز نشان داده شده است. این افزایش عمق تا فاصله ۷۰۰ متری از ابتدای خط برداشت، مشهود است. از ۷۰۰ متری تا انتهای خط برداشت، عمق ماده معدنی کمتر است. در این فاصله، سونداژها در ارتفاعات بالاتری برداشت شده‌اند؛ یعنی باطله بیشتری روی ماده معدنی را پوشانده است و انتظار افزایش عمق کمربین لایه بوکسیتی نسبت به سونداژهای مجاور می‌رود. با این وجود، در این نواحی عمق کمی برای لایه بوکسیتی مشهود است. دلیل آن را می‌توان، تغییر آزمون خط برداشت، به سمت دامنه کوه دانست؛ که با توجه به شیب‌دار بودن لایه، تعیین عمق کمتر سنگ‌بستر کاملاً منطقی است. بنابراین می‌توان گفت که، کاهش عمقی که در این نقاط نسبت به سونداژهای مجاور دیده می‌شود، نسبی است. همان‌طور که در بخش (۴-۵) ذکر شد، به دلیل محدودیت فضای برداشت ناشی از توپوگرافی خشن، این خط برداشت این‌گونه طراحی گردید.

روباره با مقاومت ویژه کم به صورت لایه‌ای با مقاومت ویژه زیر ۱۰۰ اهم‌متر نشان داده شده است، که در ارتفاعات بالاتر به علت فرسایش بیشتر، ضخامت این روباره رسانا کم می‌شود. هم‌چنین در بخشی از این مدل، یک لایه با مقاومت ویژه بالاتر نسبت به لایه‌های بالا و پایین دیده می‌شود که با $(\rho < 100)$ نمایش داده شده است.

۵-۴-۲- تفسیر و مدل‌سازی خط برداشت دوم

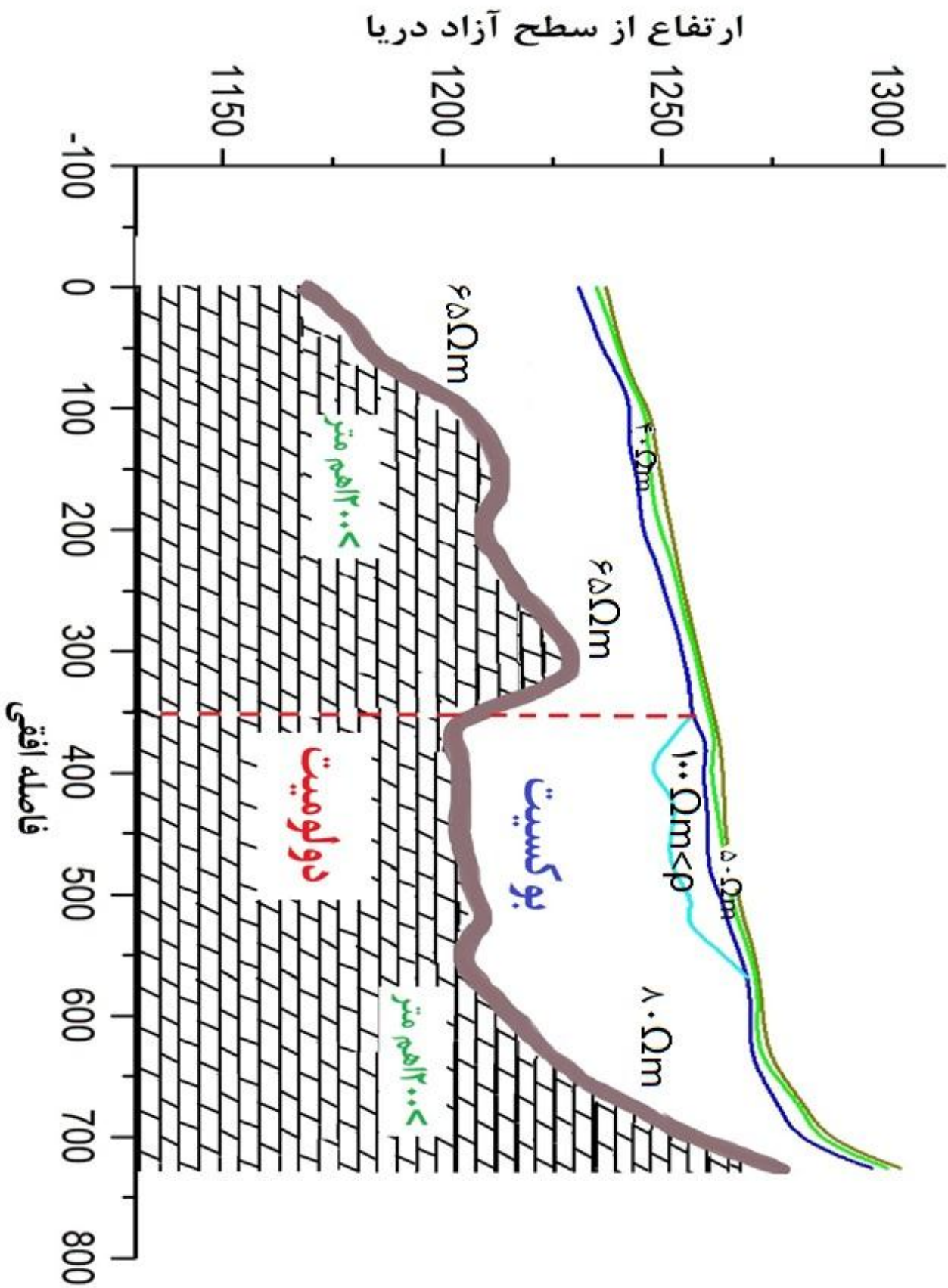
این خط برداشت در شمال خط برداشت اول، طراحی شده و فاصله آن از دامنه کوه دورتر است؛ بنابراین عمق سنگ بستر در نقاط مختلف آن بیشتر از خط برداشت شماره یک پیش‌بینی می‌شود.

در جدول (۵-۸) عمق کمربایین ماده معدنی با روش‌های مختلف تفسیر سونداژ و نیز خطای حاصل از هر روش به تفکیک، آمده است.

طول این خط حدود ۷۳۰ متر می‌باشد و بر روی آن ۲۹ سونداژ الکتریکی برداشت شده است. ۵ سونداژ انتهایی این خط بر روی توپوگرافی خشن برداشت شده‌اند. نتایج مدل‌های حاصل از روش‌های اُکام و ریچ را به صورت یک مدل دوبعدی به همراه توپوگرافی سطح زمین در شکل (۵-۱۲) آمده است. خط ضخیم خاکستری حدود کمربایین لایه بوکسیتی را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۸): عمق کمرباین بوکسیت حاصل از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف به همراه خطای مدل‌سازی مربوط به خط برداشت دوم

مدل حاصل از روش‌های آکام و رگرسیون ریج		IPI2WIN		VES		IX1D		منحنی استاندارد		نام سونداژ
RMS(%)	عمق	RMS(%)	عمق	misfit(%)	عمق	RMS(%)	عمق	RMS(%)	عمق	
۵/۸۴	۶۸/۸۷	۴/۸	۶۶/۷	۶/۹	۶۶/۷	۵/۷۹	۷۲/۴۳	۱۲/۶۸	۶۴	S2-1
۸/۲	۵۹/۰۶	۶/۶۲	۵۱/۳	۱۱/۸	۵۱	۸/۹۱	۵۱/۵۹	۲۶/۴۷	۶۰	S2-2
۶/۹۱	۵۹/۱۵	۷/۶۱	۵۸/۵	۵/۴	۶۸	۶/۹۵	۶۰/۲۶	۱۳/۷۷	۷۶	S2-3
۳/۰۵	۴۱/۸	۳/۳	۳۸/۷	۳/۵	۴۴	۳/۳۱	۴۳/۳۷	۵/۷۳	۴۶	S2-4
۸/۳۲	۴۰/۱۵	۹/۱۴	۴۰/۵	۹/۱	۴۳	۸/۳	۴۳/۹۶	۱۴/۲۸	۴۹	S2-5
۱۵/۲۲	۳۷/۹۵	۱۶/۷	۴۳/۹	۱۹/۲	۴۳	۱۹/۳۱	۴۴/۶۱	۲۵/۳۷	۴۴	S2-6
۵/۱۷	۳۵/۲۶	۴/۷۵	۴۶/۸	۵/۵	۴۶	۷/۰۷	۴۶/۴	۱۲/۶۳	۴۸	S2-7
۵/۵۵	۳۹/۹	۵/۱۷	۴۱	۴/۷	۴۱	۴/۷۲	۴۲/۱	۱۴/۲۸	۴۸	S2-8
۴/۲۱	۴۵/۳۷	۳/۸۵	۴۵	۶/۶	۴۰/۶	۴/۳۶	۴۱/۰۶	۱۱/۷۲	۴۰	S2-9
۲/۹۸	۳۷/۶۴	۴/۱	۳۷/۵	۴/۷	۳۶/۶	۳/۲	۳۷/۲۵	۶/۲۵	۴۲	S2-10
۲/۵۹	۳۷/۲۹	۶/۷۱	۳۷/۵	۵/۵	۳۹	۲/۸۸	۳۹/۴	۵/۰۵	۴۴	S2-11
۲۲/۲	۳۰/۹۸	۹	۳۸	۸	۳۶	۷/۹۶	۳۸/۵۱	۹/۹۴	۴۰	S2-12
۷/۷۱	۲۷/۸۴	۴/۹۹	۳۲/۹	۴/۷	۳۲	۴/۳	۳۵/۳۷	۲۳/۵۴	۳۶	S2-13
۹/۹	۳۱/۷	۱۰/۹	۴۲/۲	۱۰/۱	۴۵	۱۶/۸۲	۳۸/۴۳	۱۷/۵۴	۴۰	S2-14
۳/۹۷	۶۰/۵۴	۵/۷۹	۴۹/۳	۷/۱	۴۹	۶/۵۶	۵۱/۵۳	۹/۱۶	۵۳	S2-15
۶/۳۳	۶۰/۳۳	۷/۵۸	۵۷/۷	۸/۶	۵۵/۵	۷/۶۶	۵۸/۳۶	۱۲/۱۶	۶۰	S2-16
۶/۱۶	۵۸/۵۸	۹/۹۱	۶۴/۱	۹	۶۶/۲	۶/۵۶	۶۵/۲۴	۶/۲۷	۶۷	S2-17
۲/۶۷	۵۹/۰۶	۴/۲۱	۶۵/۸	۵/۱	۶۷	۲/۶	۶۸/۱۹	۷/۱۱	۶۵	S2-18
۴/۷۲	۶۱/۵۶	۴/۵۵	۶۳/۷	۹/۱	۶۱/۵	۶/۵۸	۶۳/۳۸	۱۱/۵۶	۶۰	S2-19
۲/۷۴	۵۹/۰۷	۴/۶۶	۷۰/۲	۶/۸	۶۸/۵	۳/۸۲	۷۰/۴۵	۵/۶۷	۶۸	S2-20
۳/۶۴	۶۰/۵۷	۴/۹۲	۶۴/۱	۱۴/۳	۶۵/۴	۵/۸۶	۶۹/۴۹	۸/۰۷	۷۸	S2-21
۴/۰۴	۵۷/۳۱	۳/۲۴	۶۳	۹/۴	۶۱/۳	۵/۲۶	۶۰/۴۹	۱۲/۵۱	۶۲	S2-22
۵/۱۹	۶۸/۸	۴/۸	۶۹/۳	۱۱/۶	۷۰/۶	۶/۱۱	۷۵/۹	۱۱/۱۸	۷۰	S2-23
۳/۰۵	۶۵/۲۲	۲۸/۳	۶۶/۵	۱۰/۸	۶۸/۳	۴/۲۳	۷۰/۶۵	۶/۷۹	۷۴	S2-24
۵/۹	۵۸/۰۶	۳۲	۵۷	۴۶/۵	۵۲/۸	۲۳/۳۱	۵۶/۲۱	۳۱/۱۶	۶۰	S2-25
۸/۳۱	۵۱/۲۳	۱۰	۵۳/۴	۱۹/۶	۵۴/۲	۱۰/۰۵	۵۱/۲۶	۱۵/۲۱	۶۲	S2-26
۱۳/۰۲	۳۸/۷۹	۱۲/۵	۳۵/۱	۵۰	۳۵/۱	۱۲/۳	۲۹/۸۹	۱۶/۶۹	۳۲	S2-27
۱۷/۹۲	۳۱/۰۶	۱۴/۱	۲۰/۴	۶۴/۸	۳۷/۱	۱۷/۴۴	۲۳/۹۷	۲۶/۱۸	۳۸	S2-28
۱۵/۷۴	۲۶/۴۹	۱۵/۱	۲۸/۱	۲۰/۶	۵۱	۱۵/۹۸	۵۲/۲۵	۲۱/۷۴	۵۳	S2-29



شکل (۵-۱۲): نمایش دو بُعدی مدل سازی یک بُعدی خط برداشت دوم

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در فاصله ۱۰۰ متری تا حدود ۳۵۰ متری مبدأ خط برداشت، عمق کمربین لایه بوکسیتی کاهش یافته و به عمق ۴۵ و ۳۵ متری از سطح زمین می‌رسد. پس از آن مجدداً عمق سنگ کف افزایش داشته و به حدود ۶۰ تا ۷۰ متری می‌رسد و تا انتهای خط برداشت که ارتفاع مراکز سونداژ افزایش می‌یابد، این افزایش عمق مشهود است. همچون شکل (۵-۱۲) در این شکل نیز روبره رسانا و لایه محدود با مقاومت ویژه بالای ۱۰۰ اهم‌متر، هر دو قابل رؤیت هستند.

۵-۴-۳- تفسیر و مدل‌سازی خط برداشت سوم

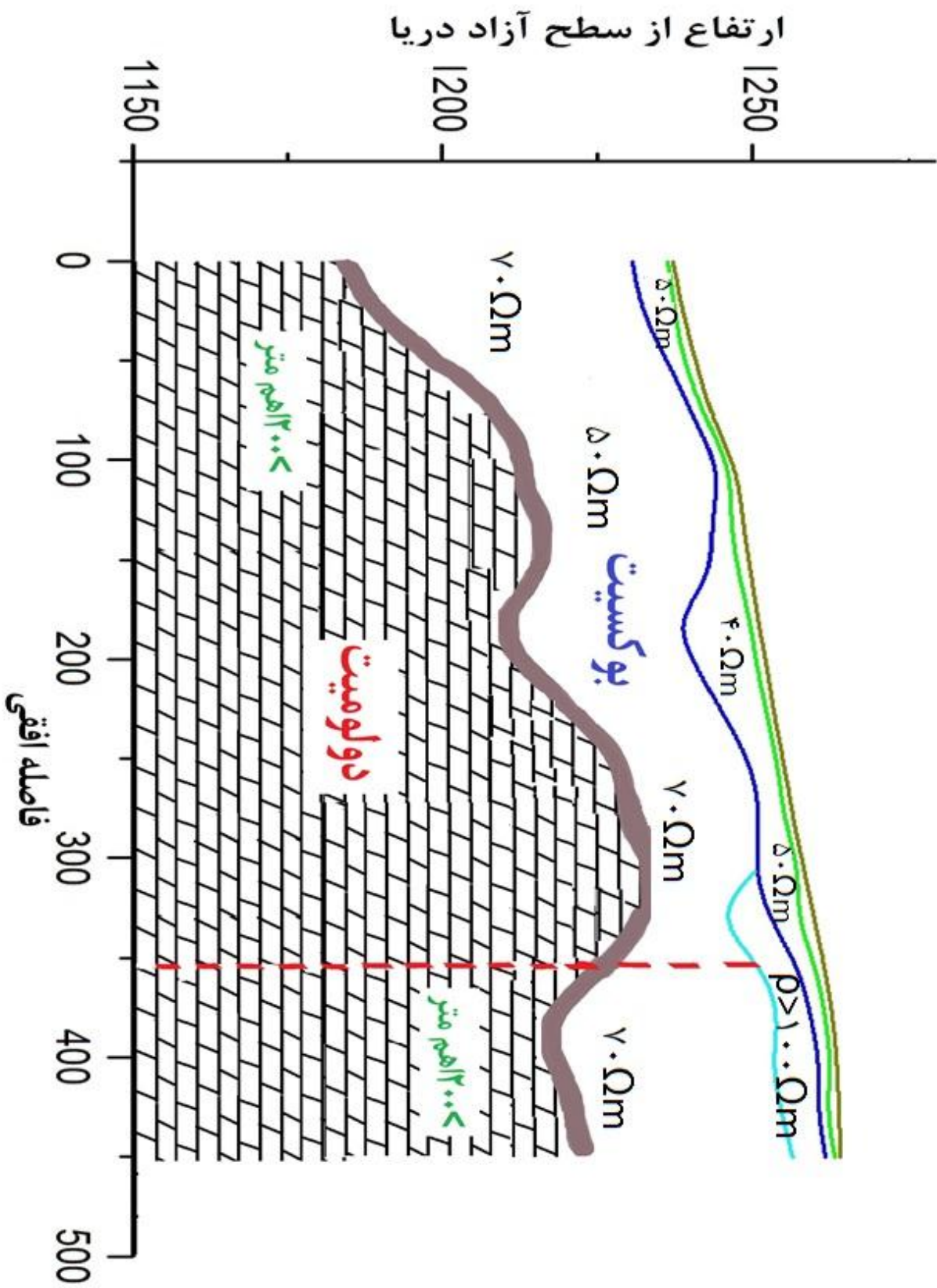
این خط برداشت در جنوب خط برداشت اول طراحی شده و به دامنه کوه نزدیک‌تر می‌باشد، بنابراین عمق سنگ بستر در نقاط مختلف برای آن کمتر از خط برداشت شماره یک و دو پیش‌بینی می‌شود، طول این خط حدود ۴۵۰ متر می‌باشد و بر روی آن ۱۹ سونداژ الکتریکی برداشت شده است. تقریباً تمامی مراکز این سونداژها بر روی قسمت‌های تقریباً هموار دره برداشت شده‌اند، اما برخی از الکترودهای این سونداژها بر روی توپوگرافی خشن کوبیده شده‌اند. در جدول (۵-۹) عمق کمربین ماده معدنی که با روش‌های مختلف تفسیر سونداژ محاسبه شده و نیز خطای حاصل از هر روش به-تفکیک آمده است.

جدول (۵-۹): عمق کمرباطین بوکسیت حاصل از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف به همراه خطای مدل‌سازی مربوط به خط برداشت سوم

مدل حاصل از روش‌های آکام و رگرسیون ریبج		IPI2WIN		VES		IX1D		منحنی استاندارد		
RMS(%)	عمق	RMS(%)	عمق	misfit(%)	عمق	RMS(%)	عمق	RMS(%)	عمق	نام سونداژ
۵/۱	۵۲/۵۸	۲/۲۶	۵۶/۶	۴	۵۵	۳/۴۸	۵۲/۲۲	۱۱/۹۸	۶۶	S3-1
۴/۶۵	۵۰/۳۷	۴/۷	۵۲/۱	۷/۶	۴۵/۲	۳/۴۵	۴۵/۹۲	۵/۴۷	۴۸	S3-2
۷/۰۴	۴۰/۵	۷/۸۵	۴۳/۶	۷	۴۰/۱	۷/۹۳	۴۳/۹	۹/۷	۵۰	S3-3
۵/۱۱	۳۲/۱۲	۶/۹۲	۳۳/۲	۱۰/۴	۳۸	۷/۹	۳۵/۸۵	۸/۹۲	۴۰	S3-4
۱۲/۳۷	۳۴/۷۵	۱۰/۷	۲۸/۹	۱۳/۹	۲۷	۱۱/۳	۲۶/۴	۱۸/۸	۳۱	S3-5
۷/۰۱	۳۲/۲۸	۵/۸۵	۲۷/۷	۶/۵	۳۰	۵/۴	۲۷/۳	۱۴/۴۵	۳۰	S3-6
۱۱/۱	۳۳/۷۶	۸/۱۸	۳۳/۵	۱۰/۸	۳۲	۸/۵۱	۲۹/۸۹	۹/۰۶	۳۱	S3-7
۱۰/۴۵	۴۳/۵۶	۵/۵۷	۳۴/۶	۱۱/۷	۳۳	۱۲/۹۸	۳۱/۲۹	۱۳/۰۱	۳۴	S3-8
۵/۳۹	۳۸/۰۵	۴/۹۳	۳۳/۲	۶/۸	۳۲/۷	۵/۲۶	۳۲/۷۳	۶/۹۲	۳۰	S3-9
۴/۲	۳۱/۹۲	۱/۹۶	۳۴/۵	۶/۱	۳۲/۳	۴/۴۶	۳۵/۳۶	۶/۳	۳۲	S3-10
۴/۵۶	۲۴/۷۷	۱/۸۵	۲۶/۳۱	۷/۶	۲۸	۴/۴۷	۳۴/۷۷	۷/۹۴	۳۰	S3-11
۴	۲۷/۷۵	۱/۹۲	۲۸/۹۲	۵/۲۹	۳۱/۲	۳/۶۷	۳۴/۲۷	۷/۸۴	۳۰	S3-12
۶/۹۴	۲۳/۴۱	۳/۴۶	۲۷/۷	۹/۵	۲۶/۶	۴/۹۴	۲۶/۸۷	۷/۲۴	۲۸	S3-13
۵/۶۷	۲۷	۱/۴۵	۳۱/۴۶	۶/۶	۳۲/۱	۷/۲۲	۳۱/۲	۹/۷۴	۳۲	S3-14
۳/۵۳	۳۵	۳/۵۶	۳۸	۷/۸	۴۰	۶/۴۳	۴۱/۷۵	۷/۱	۴۶	S3-15
۵/۸۱	۴۷/۶۳	۳/۵۶	۴۳/۷	۹/۳	۳۸/۷	۵/۹۵	۴۳/۹۹	۱۱/۵۴	۴۷	S3-16
۷/۸۴	۴۳/۹۶	۶/۸	۳۹	۱۴/۲	۴۲	۸/۲۵	۴۲/۳۸	۱۶/۸۲	۴۷	S3-17
۴/۴۶	۴۴/۲۱	۳/۶۳	۴۷/۳	۱۶/۲	۴۲	۵/۴	۴۴/۹۶	۱۲/۶۲	۵۰	S3-18
۲/۹۷	۴۰/۴۵	۳/۴۱	۴۳/۱	۱۰/۲	۴۰	۵/۳۶	۳۹/۷	۱۳/۰۲	۳۶	S3-19

نتایج مدل‌های حاصل از روش‌های آکام و ریبج نیز به صورت یک مدل دو بُعدی به همراه

توپوگرافی سطح زمین در شکل (۵-۱۳) آورده شده است.

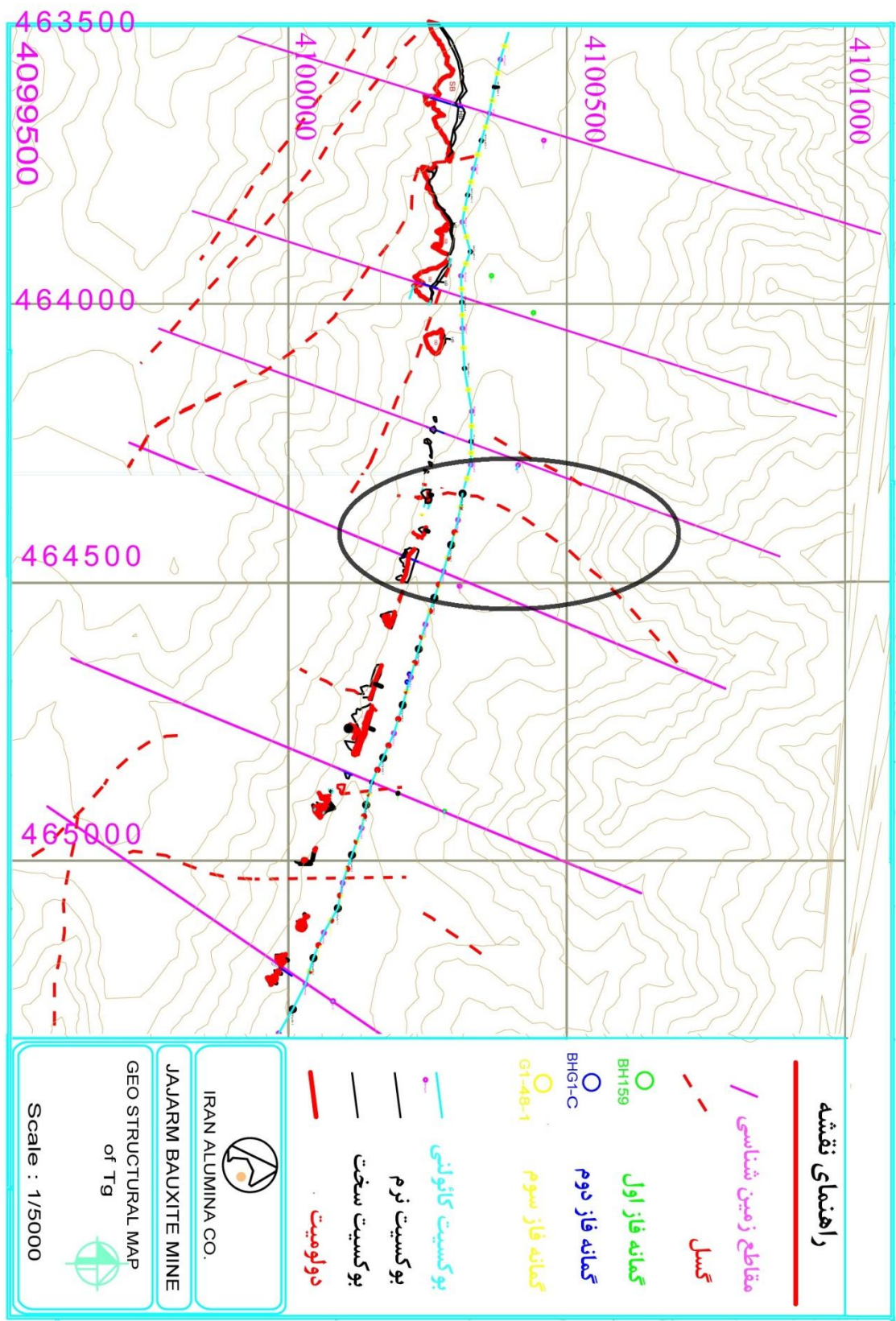


شکل (۵-۱۳): نمایش دو بُعدی مدل سازی یک بُعدی خط برداشت سوم

خط ضخیم خاکستری مرز لایه بوکسیتی و دولومیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در فاصله ۸۰ متری تا حدود ۳۳۰ متری مبدأ خط برداشت (محل گسل) عمق کمربین لایه بوکسیتی، کاهش یافته و تا عمق ۳۲ و ۲۸ متری از سطح زمین می‌رسد. در فاصله حدود ۲۰۰ متری از مبدأ خط برداشت نیز افزایش عمق تا حدود ۴۰ متر با گستردگی جانبی کم، رؤیت می‌شود. پس از آن مجدداً عمق سنگ کف افزایش ناگهانی داشته و به حدود ۵۰ متر می‌رسد و تا انتهای خط برداشت نیز این افزایش عمق مشهود است. گسل، لایه نازک سطحی، روباره رسانا و لایه مقاوم در این شکل نمایش داده شده‌اند.

۵-۴-۴- جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی یک‌بُعدی

همان‌طور که در شکل‌های (۵-۱۱)، (۵-۱۲) و (۵-۱۳) دیده می‌شود، توپوگرافی سنگ بستر لایه بوکسیتی دارای تغییرات زیادی می‌باشد. علاوه بر این خطوط برداشت شده نیز، در نمایش مکان این تغییرات یکدیگر را تأیید می‌نمایند. از مبدأ هر سه خط تا حدود ۱۰۰ متری آن‌ها عمق کمربین ماده معدنی زیاد می‌باشد. این عمق به آرامی کاهش می‌یابد و تا حدود ۳۵۰ متری مبدأ خطوط برداشت تغییرات ناچیزی دیده می‌شود. سپس افزایش شدید و ناگهانی کمربین لایه معدنی قابل مشاهده است. یک لایه با مقاومت‌ویژه‌ای بالاتر از لایه‌های مجاور نیز به چهار لایه مورد انتظار، اضافه می‌شود. لایه مذکور مقاومت‌ویژه بالای ۱۰۰ اهم‌متر دارد؛ در صورتی که لایه‌های بالایی و پایینی آن مقاومتی در حدود ۴۰ تا ۸۰ اهم‌متر دارند. به همین دلیل به خوبی می‌توان آن را تشخیص داد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر گردید وجود تغییرات در توپوگرافی بستر کربناته بوکسیت، کاملاً طبیعی است؛ اما تغییرات با این شدت احتمالاً به دلیل وجود گسل است. در روی زمین، آثاری از گسل دیده نمی‌شود، اما در فاصله حدودی ۱۰۰ متری و عمود بر خطوط برداشت، این گسل کاملاً مشهود است و امتداد آن نیز از منطقه برداشت می‌گذرد. این گسل را در نقشه‌های ۱:۵۰۰۰ زمین‌شناسی ساختمانی محدوده معدنی تاگویی ۴ و ۵ نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۴): نقشه زمین شناسی ساختمانی محدوده معدنی تاگویی ۴ و ۵، خط بسته مشکی گسل موردنظر را نشان می دهد.

شکل (۱۵-۵) این گسل را بر روی دامنه کوه نشان می دهد.



شکل (۱۵-۵): تغییرات لایه بندی به علت فعالیت گسل

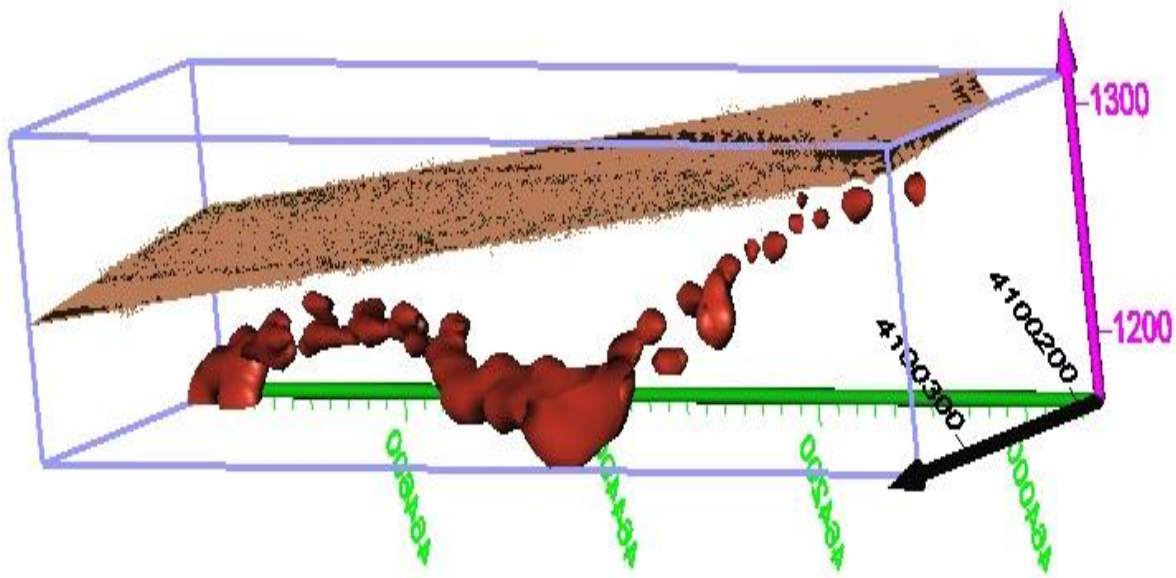
همان طور که در شکل دیده می شود قطع شدگی لایه بندی به خوبی مشهود است. هم چنین در

شکل (۱۶-۵) آینه گسل به همراه آثار فعالیت آن دیده می شود

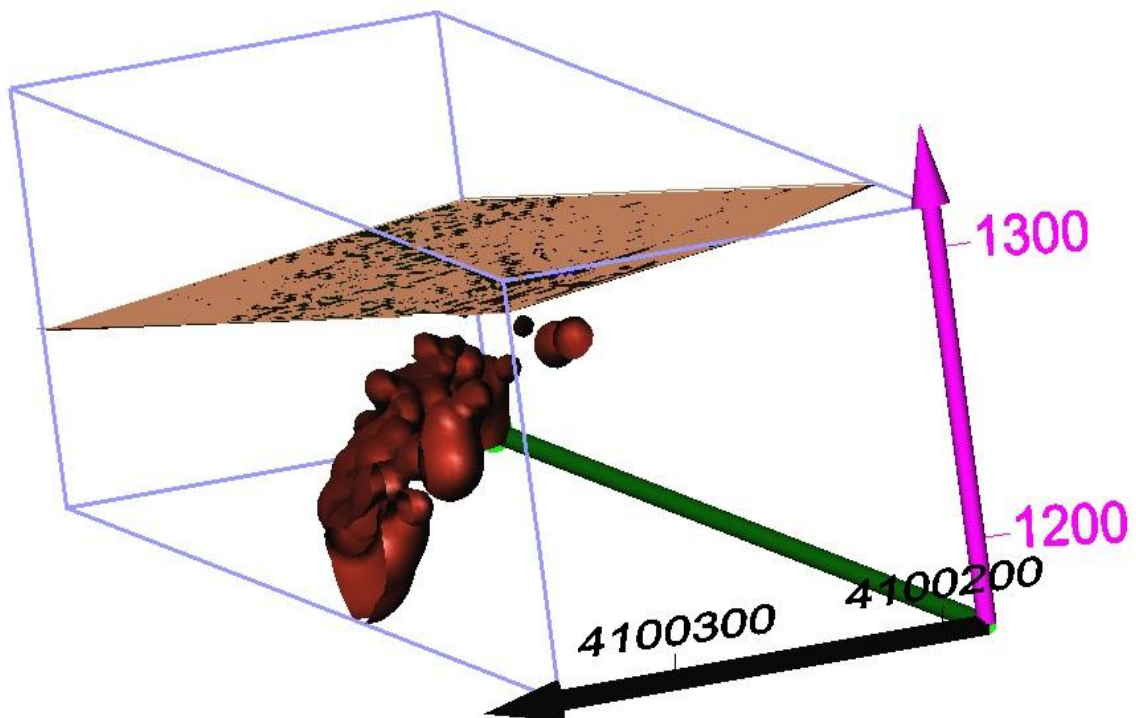


شکل (۵-۱۶): آینه گسل که خش لغزهای روی آن جهت غالب فعالیت گسل را نشان می‌دهد.

در خطوط برداشت ۲ و ۱ که طول بزرگتری نسبت به خط برداشت ۳ دارند، قسمتی از سونداژها روی توپوگرافی خشن برداشت شده است؛ در این مناطق عمق سنگ بستر کاهش می‌یابد که به دلیل نزدیک شدن سونداژها به دامنه کوه است و این موضوع بدیهی است؛ چراکه لایه معدنی شیب زیادی دارد. نهایتاً در نمایش سه‌بعدی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی یک‌بعدی، شیب‌دار بودن لایه، به خوبی مشهود است. اشکال (۵-۱۷) و (۵-۱۸) نمایش سه‌بعدی مدل‌های فوق، حاصل از نرم‌افزار Voxler [Golden Software, 2006] است.

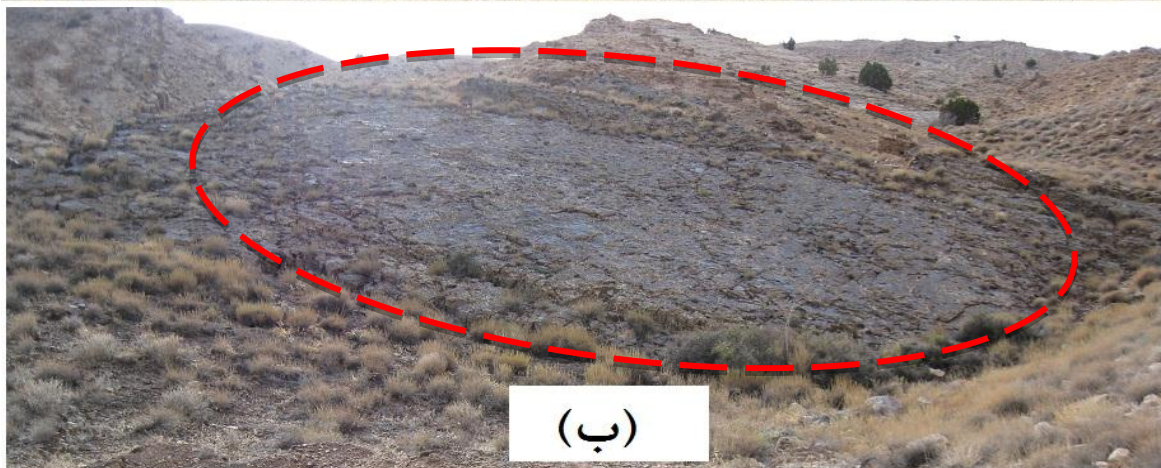


شکل (۵-۱۷): بررسی عمق کمربند لایه بوکسیتی توسط نمایش سه‌بعدی وارون‌سازی یک‌بعدی. صفحه خاک‌رنگ بیان‌گر تقریبی توپوگرافی سطح زمین و توده به رنگ قرمز تا قهوه‌ای نمایش حدود مرز لایه بوکسیتی است



شکل (۵-۱۸): بررسی شیب لایه، توسط نمایش سه‌بعدی وارون‌سازی یک‌بعدی

رخنمون‌های موجود نیز این شیب را تأیید می‌نمایند. شکل (۱۹-۵) بخشی از رخنمون‌های لایهٔ بوکسیتی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۹-۵): رخنمون‌های لایهٔ بوکسیتی که توسط نقطه‌چین قرمز رنگ مشخص شده‌اند. الف) رخنمون در سمت چپ شکل دیده می‌شود. ب) رخنمون در وسط شکل و به‌طور وسیع دیده می‌شود.

فصل هشتم

مدل سازی و تفسیر دوبعدی داده‌های صحرایی

۶-۱- مقدمه

در فصل گذشته تفسیر و مدل‌سازی یک‌بُعدی داده‌های مقاومت‌ویژه انجام شد و سپس نتایج به دست آمده به شکل دو‌بُعدی و سه‌بُعدی به نمایش درآمد. در این فصل داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری، پس از مدل‌سازی هموار دو‌بُعدی به صورت مقاطع دو‌بُعدی نمایش داده می‌شوند و در مورد نتایج به دست آمده بحث خواهد شد.

یکی از محدودیت‌های روش سونداژزنی مقاومت‌ویژه، عدم پاسخ مناسب به تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه در زیر سطح زمین است. با مدل‌سازی دو‌بُعدی داده‌ها می‌توان تصویر دقیق‌تری از تغییرات مقاومت‌ویژه در هر دو امتداد قائم و افقی، در طول یک خط برداشت، تهیه نمود. در اکثر مواقع، خصوصاً هنگام بررسی ساختارهای طویل زمین‌شناسی، این روش مدل‌سازی یک روش مناسب و منطقی است؛ بنابراین جهت بررسی هم‌زمان تغییرات جانبی و قائم لایه بوکسیتی، بر روی داده‌های صحرایی وارون‌سازی دو‌بُعدی صورت می‌گیرد. بدین منظور از نرم‌افزار [Geotomo Software, 2004] Res2dinv ver3.54 استفاده شده است.

۶-۲- تفسیر و مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری توسط نرم‌افزار Res2dinv

نرم‌افزار Res2dinv با حداقل داده‌های ورودی می‌تواند فرآیند مدل‌سازی را به‌طور خودکار و پر قدرت انجام دهد. از این برنامه برای مدل‌سازی داده‌های حاصل از برداشت توسط آرایه‌های ونر،

قطبی- قطبی، قطبی- دو قطبی، دو قطبی- دو قطبی و ونر- شلومبرژه استفاده می شود. از آن جا که نرم افزار داده های صحرایی را با آرایه شلومبرژه مستقیماً نمی پذیرد، داده های منطقه در قالب آرایه ونر- شلومبرژه ساخته و فراخوانی می شود.

در این طرح با توجه به شرایط حاکم بر مسأله از قیدهای پیش فرض نرم افزار استفاده می شود.

(۱) به علت حجم زیاد داده و زمان بالای مورد نیاز و نیز محدودیت در گرفتن خروجی مدل سازی، از روش شبه نیوتن استفاده شد.

(۲) هم چنین مقدار اولیه فاکتور تعدیل ۰/۱۶ انتخاب می شود، چراکه با وجود توپوگرافی شدید، داده ها از کیفیت خوبی برخوردار می باشند و نوفه منطقه در حد معمول است. از طرف دیگر جهت بررسی تغییرات عمق سنگ کف باید کمترین تغییرات نیز مشاهده شوند؛ زیرا مدل سازی دوبعدی با قید هموار در نمایش تغییرات کم ضعیف عمل می کند، بنابراین نمی توان به راحتی از آن ها صرف نظر کرد.

(۳) نسبت هموارترین فیلتر قائم به افقی^۱ را ۱ در نظر می گیریم، زیرا علی رغم شیب زیاد لایه، جهت برداشت در طول لایه است و نه عمود بر آن و به دلیل نیاز به ثبت تغییرات کم جانبی نمی توان این مقدار را زیر ۱ (مربوط به لایه های افقی) انتخاب کرد.

(۴) تغییر فاکتور تعدیل نسبت به عمق^۲، همان مقدار پیش فرض ۱/۰۵ در نظر گرفته می شود، زیرا نوسانات غیر طبیعی در مقاطع پایین تر مورد انتظار نیست.

(۵) شبکه شطرنجی استفاده شده با ۲ گره^۳ بین الکترودهای مجاور تعریف می شود. دلیل آن حجم بالای داده و الکترودهای استفاده شده و فواصل کم داده های برداشتی است.

¹ Vertical to horizontal flatness filter ratio

² Change of damping factor with depth

³ Mesh

جدول (۱-۶) تعداد بلوک‌ها، الکترودها و داده‌های مقاومت ویژه برای هر سه خط برداشت را نشان می‌دهد.

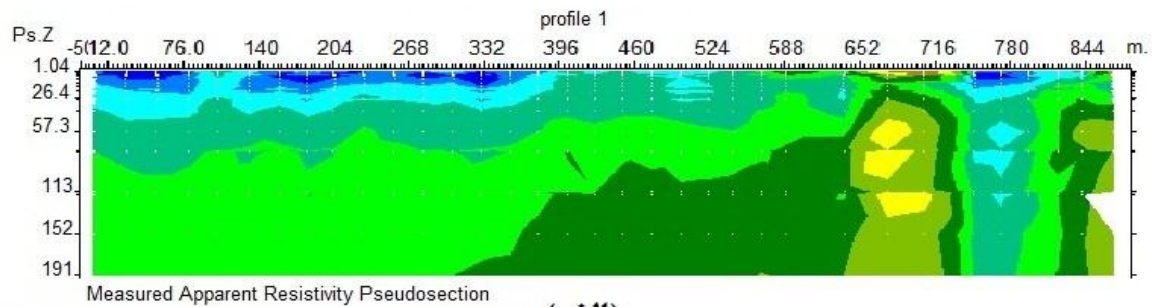
جدول (۱-۶): مشخصات مدل‌های حاصله از نرم‌افزار Res2dinv برای هر سه خط برداشت شده

تعداد بلوک‌های وارون‌سازی	تعداد الکترودها	تعداد نقاط داده‌ای	شماره خط برداشت
۳۳۸۹۱	۱۸۶۸	۷۴۷	(۱)
۲۸۳۹۲	۱۷۲۷	۶۳۶	(۲)
۱۷۶۲۸	۱۴۵۱	۴۱۸	(۳)

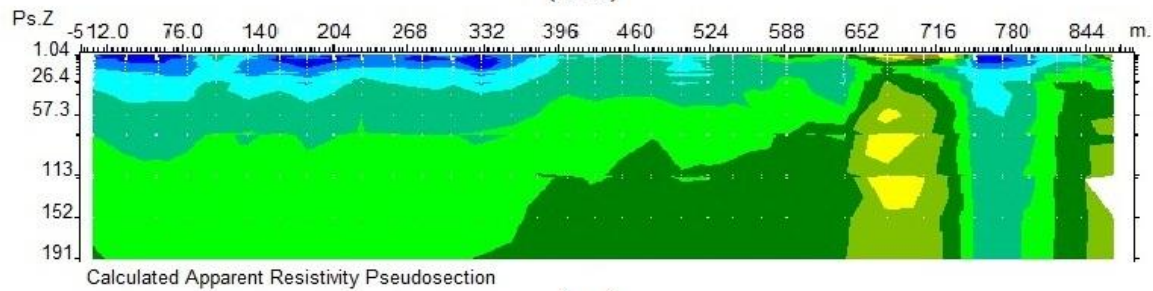
برای هر سه خط برداشت فرآیند وارون‌سازی ۱۰ مرتبه تکرار شده و بهترین مدل حاصله نمایش داده می‌شود.

۶-۲-۱- مدل‌سازی هموار دو بُعدی و تفسیر خط برداشت اول

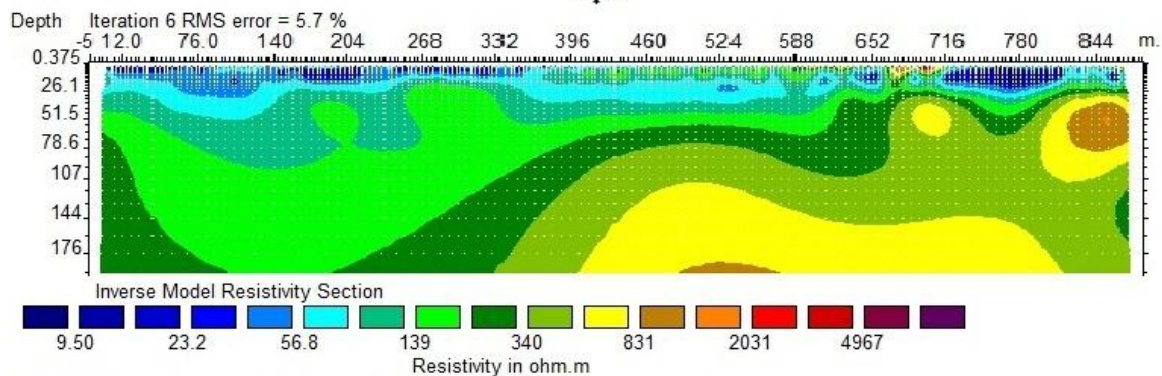
نتیجه وارون‌سازی خط برداشت اول در شکل (۱-۶) قابل مشاهده است. این مدل در تکرار ششم و با خطای RMS برابر ۵/۷٪ حاصل شده است.



(الف)



(ب)

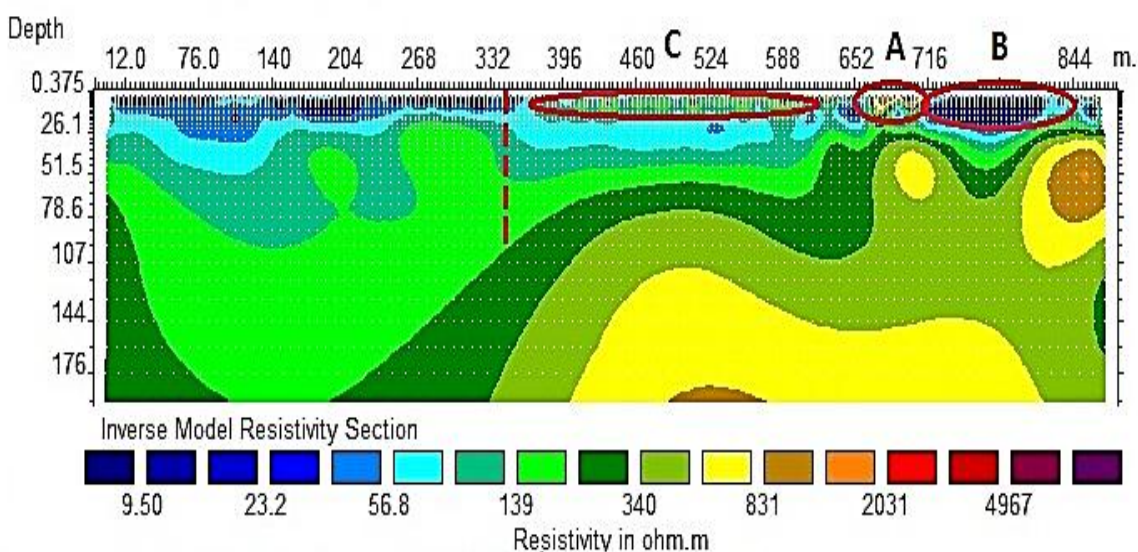


(ج)

شکل (۱-۶): شبه‌مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی مقاومت‌ویژه ظاهری خط برداشت شماره (۱). (الف) شبه‌مقطع داده‌های مشاهده شده. (ب) شبه‌مقطع حاصل از پاسخ مدل. (ج) مدل وارون.

طول این خط برداشت حدود ۸۵۰ متر می‌باشد و همان‌طور که شکل (۶-۲) مشاهده می‌شود در روی سطح زمین اغلب مقادیر مقاومت‌ویژه، اندک است؛ چرا که جنس لایه سطحی، آبرفت می‌باشد و در زمان برداشت داده، سطح زمین مرطوب بوده است؛ بنابراین پایین بودن مقاومت‌ویژه لایه سطحی کاملاً منطقی است. اما در فاصله ۶۵۰ تا ۷۰۰ متری مبدأ خط برداشت (بیضی A)، مقدار بالایی در مقاومت‌ویژه لایه سطحی مقطع مدل‌سازی دیده می‌شود. در ناحیه مذکور به دلیل انجام عملیات حفاری، لایه‌ای از جنس واریزه‌های متخلخل و درشت ماسه‌سنگ و دولومیت، سطح زمین را پوشانده

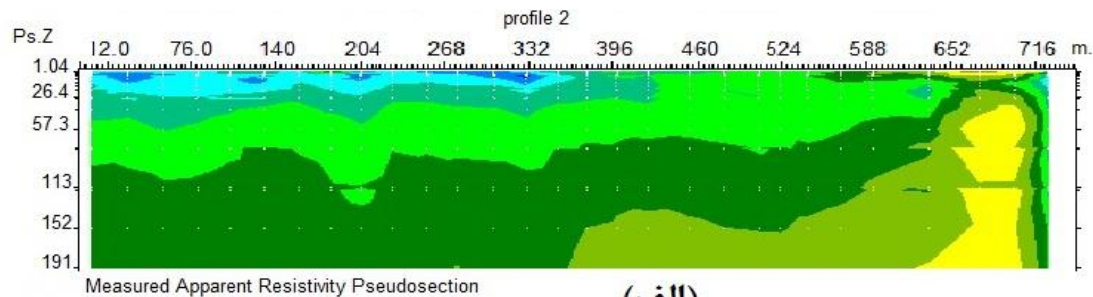
بود. اما در کنار آن به طول حدود ۱۲۰ متر، یعنی فاصله ۷۰۰ تا حدود ۸۲۰ متر از مبدأ خط برداشت (بیضی B)، مقاومت ویژه به شدت کاهش می‌یابد. در این ناحیه تپه‌ای با شیب ملایم که سطح آن را رس و آبرفت‌های دانه‌ریز تشکیل می‌دهد، قرار دارد. از آن جایی که مقاومت ویژه بوکسیت کائولنی، حدود ۵۰ تا ۹۰ اهم‌متر می‌باشد. رنگ آبی فیروزه‌ای را به عنوان حدود لایه بوکسیتی فرض می‌شود. بنابراین در مورد لایه بوکسیتی همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در ابتدای خط برداشت عمق لایه، بیشتر از قسمت‌های دیگر بوده است و تا حدود ۶۰ تا ۷۰ متر هم می‌رسد و پس از آن در فاصله ۱۵۰ تا ۳۵۰ متری از ابتدای خط برداشت عمق لایه، کاهش داشته و به حدود ۳۰ تا ۴۰ متر نیز می‌رسد و مجدداً به دلیل طبیعت بستر کربناته و فعالیت گسل تا فاصله حدودی ۶۰۰ متر از مبدأ خط برداشت، این عمق افزایش می‌یابد. پس از آن مجدداً عمق لایه بوکسیتی کاهش می‌یابد و همان‌طور که ذکر شد به دلیل تغییر مسیر خط برداشت به سمت دامنه کوه و رخنمون بوکسیتی است. نکته دیگری که در این مقطع مشهود است، افزایش مقاومت ویژه در فاصله ۳۵۰ متری تا ۶۰۰ متری مبدأ خط برداشت (بیضی C) و در عمق کم (حدود ۱۰ متر) است. این لایه، در مقاطع دو بُعدی حاصل از مدل‌سازی یک-بُعدی نیز مدل شده بود.



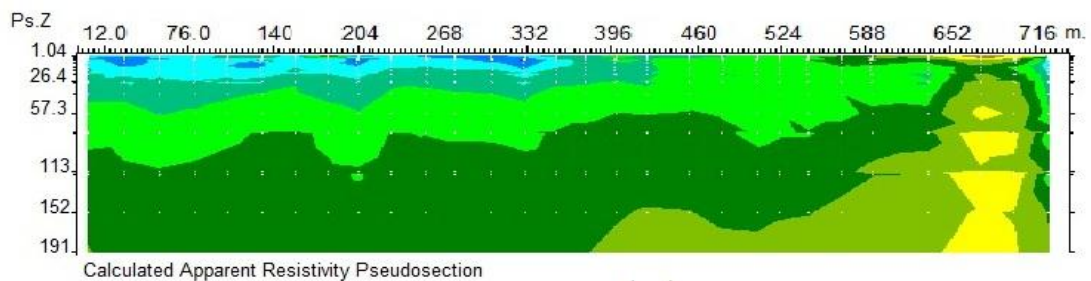
شکل (۶-۲): مدل وارون هموار دو بُعدی خط برداشت شماره (۱)

۶-۲-۲- مدل سازی هموار دو بُعدی و تفسیر خط برداشت دوم

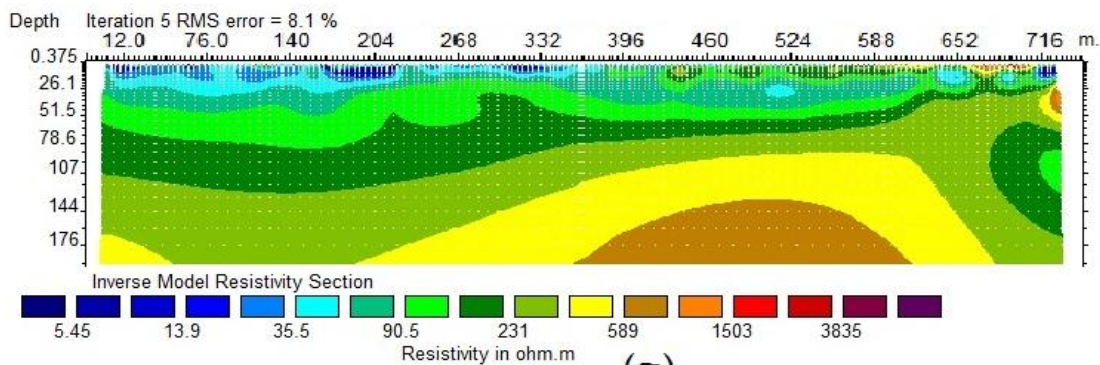
شکل (۳-۶) نتیجه وارون سازی خط برداشت دوم را نشان می‌دهد. این مدل در تکرار پنجم و با خطای RMS برابر ۸/۱٪ حاصل شده است.



(الف)



(ب)

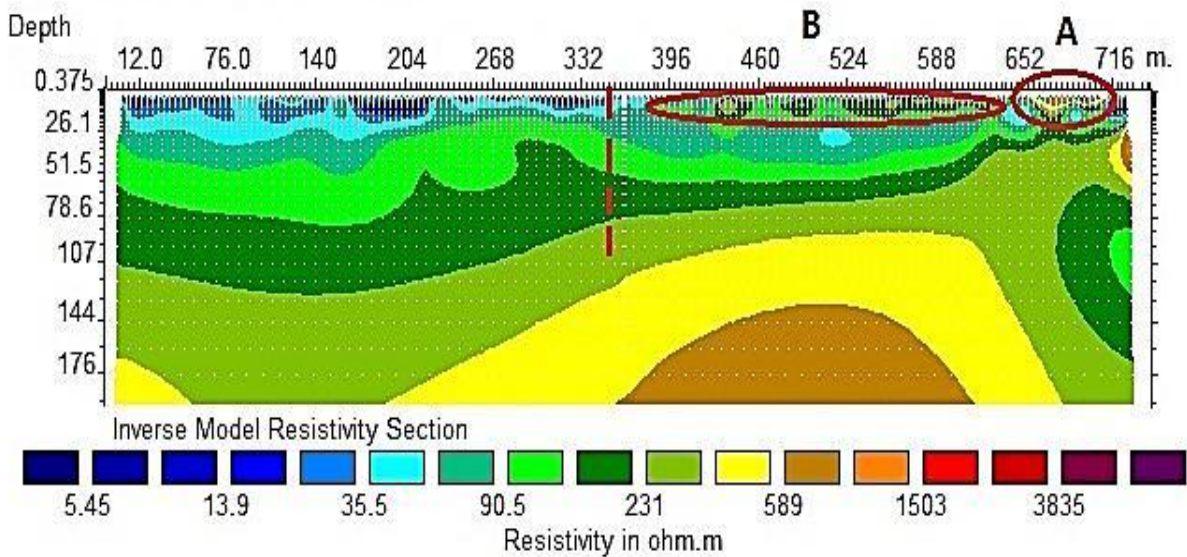


(ج)

شکل (۳-۶): شبه‌مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی مقاومت ویژه ظاهری خط برداشت شماره (۲). (الف) شبه‌مقطع داده‌های مشاهده شده. (ب) شبه‌مقطع حاصل از پاسخ مدل. (ج) مدل وارون.

طول این خط برداشت حدود ۷۲۰ متر است و همان‌طور که در شکل (۴-۶) دیده می‌شود، لایه سطحی به دلیل وجود آبرفت‌های دانه‌ریز و مرطوب عمدتاً دارای مقاومت ویژه کم می‌باشد؛ البته ناحیه ۶۵۰ تا ۷۰۰ متری مبدأ خط برداشت (بیضی A)، به خاطر واریزه‌های متخلخل و درشت ناشی از

حفری، مقاومت ویژه بالایی را نشان می‌دهد. در دو منطقه ۱۵۰ تا ۳۵۰ متری و ۶۰۰ متری مبدأ تا انتهای خط برداشت عمق لایه، کم و در سایر قسمت‌های خط برداشت عمق لایه، نسبتاً زیاد است.

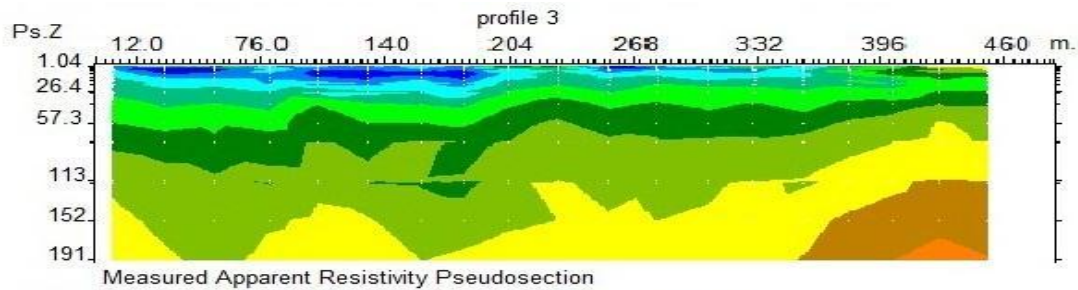


شکل (۴-۶): مدل وارون هموار دو بُعدی خط برداشت شماره (۲)

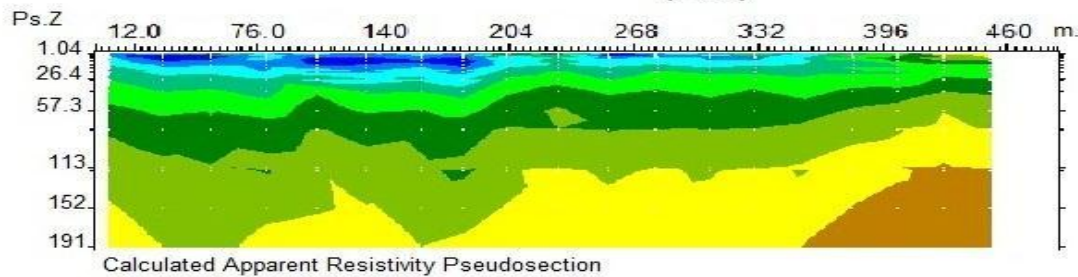
این فراز و نشیب به دلیل کارستی بودن بستر لایه، تغییر مسیر خط برداشت به سمت رخنمون بوکسیت و فعالیت‌های تکتونیکی شدید منطقه است. لایه مقاوم با مقاومت ویژه بالای ۱۰۰ اهم‌متر که در مقطع حاصل از مدل‌سازی یک بُعدی مشاهده می‌شود، در فاصله ۳۵۰ تا ۶۰۰ متری مبدأ خط برداشت (بیضی B) و در عمق کم در این مدل نیز دیده می‌شود.

۳-۲-۶- مدل‌سازی هموار دو بُعدی و تفسیر خط برداشت سوم

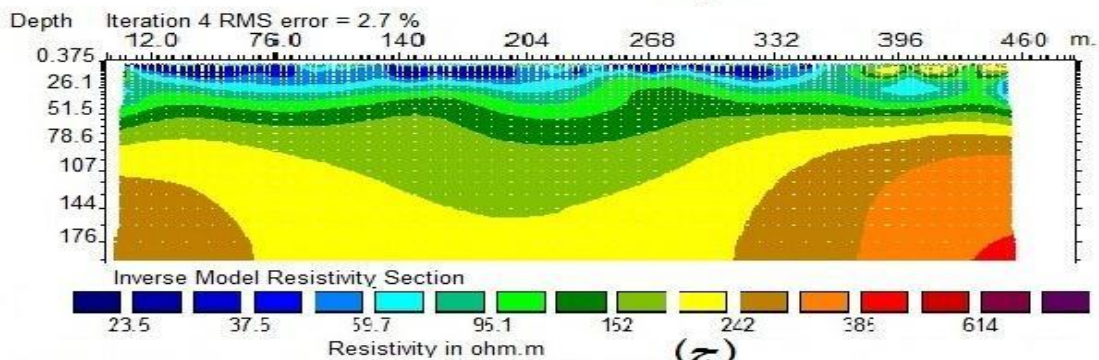
نتیجه وارون‌سازی خط برداشت سوم در شکل (۵-۶) قابل مشاهده است. این مدل در تکرار چهارم و با خطای RMS برابر ۲/۷٪ به دست آمده است.



(الف)



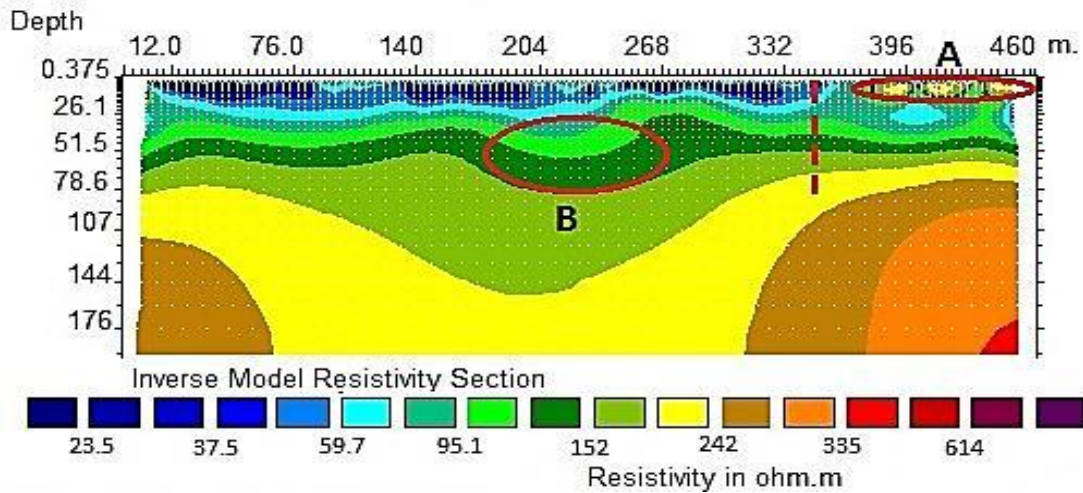
(ب)



(ج)

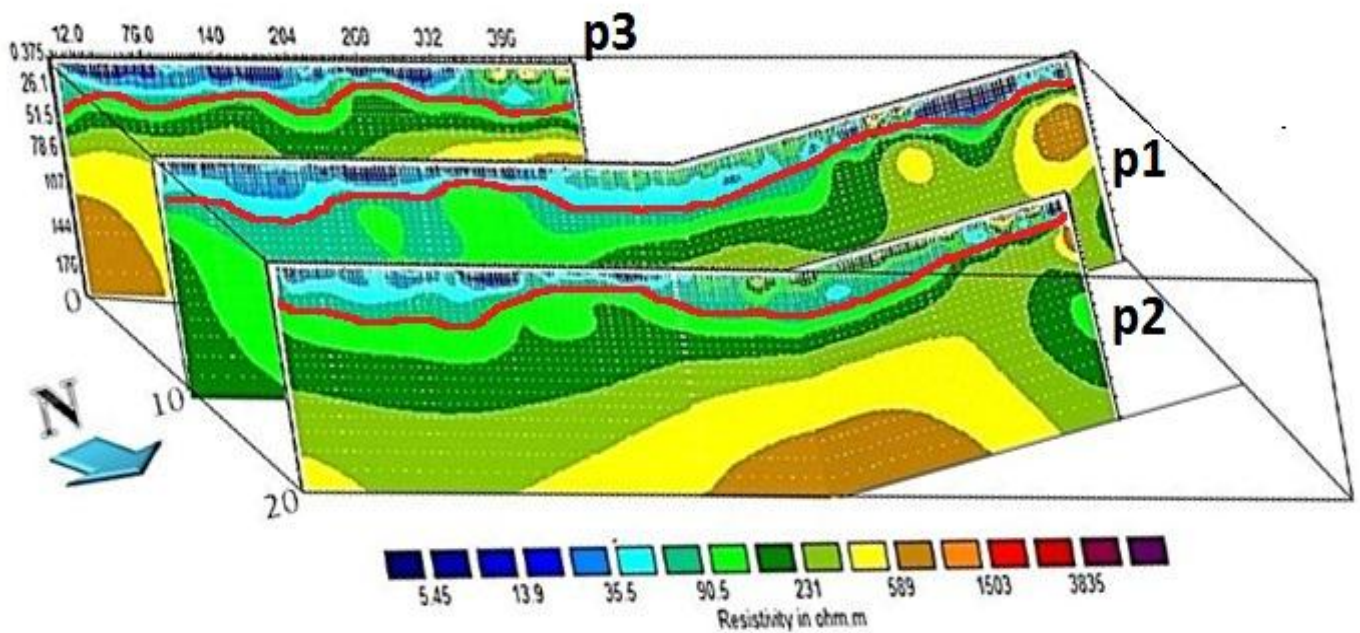
شکل (۶-۵): شبه‌مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی مقاومت‌ویژه ظاهری خط برداشت شماره (۳). (الف) شبه‌مقطع داده‌های مشاهده شده. (ب) شبه‌مقطع حاصل از پاسخ مدل. (ج) مدل وارون.

طول این خط برداشت حدود ۴۵۰ متر است و همان‌طور که در شکل (۶-۶) دیده می‌شود لایه سطحی عمدتاً مقاومت کمی دارد و عمق لایه بوکسیتی در ابتدا و انتهای خط برداشت بیشتر از اواسط آن است. قسمتی از لایه مقاوم با مقاومت ویژه بالای ۱۰۰ اهم‌متر در شکل مشهود است (بیضی A). در حدود ۲۱۰ متری از مبدأ خط برداشت و به‌طور محدود (بیضی B)، عمق مرز بوکسیت و دولومیت افزایش می‌یابد؛ این موضوع نیز در شکل (۵-۱۳) مشاهده می‌گردد.



شکل (۶-۶): مدل وارون هموار دو بُعدی خط برداشت شماره (۳)

شکل (۶-۷) نمایش سه بُعدی مدل سازی هموار دو بُعدی خطوط برداشت را نشان می دهد. خط برداشت اول در وسط شکل، خط برداشت دوم مقطع پایین شکل و خط برداشت سوم کوتاه ترین مقطع است. مقاطع حاصل از مدل سازی هموار دو بُعدی خطوط برداشت اول و دوم، مطابق شکل (۴-۴) به صورت زاویه دار نشان داده شده اند. همان طور که در این شکل دیده می شود، در هر سه مقطع مقاومت ویژه لایه سطحی، پایین بوده و تغییرات عمقی سنگ بستر دولومیتی شدید است.



شکل (۶-۷): نمایش سه بُعدی مدل سازی دو بُعدی. خط قرمز حدود کم پایین لایه بوکسیتی را نشان می دهد.

فصل ہفتم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۷-۱- نتیجه گیری

- ۱) نتایج حاصل از مدل سازی یک بُعدی، حداقل وجود چهار لایه ژئوالکتریکی را در منطقه تاگویی ۴ و ۵ واقع در محدوده معدنی بوکسیت جاجرم، نشان می دهند.
- ۲) روش سونداژنی مقاومت ویژه، روشی ارزان، سریع و با تجهیزات قابل حمل می باشد که با طراحی و برداشت صحیح، حتی در مناطق با توپوگرافی خشن، می تواند در تشخیص کمربائین بوکسیت کارستی مفید باشد. در منطقه معدنی بوکسیت جاجرم، به دلیل اختلاف قابل مقایسه بین مقاومت ویژه لایه معدنی با سنگ بستر دولومیتی، احتمالاً تشخیص عمق سنگ بستر دولومیتی با مدل سازی و تفسیر یک بُعدی و دو بُعدی داده های مقاومت ویژه امکان پذیر است.
- ۳) در معادن بوکسیت با زمین شناسی مشابه معدن بوکسیت جاجرم، به دلیل عدم تباین مقاومت ویژه بوکسیت و کائولن، تشخیص کمر بالای بوکسیت و در نتیجه مشخص نمودن ضخامت لایه معدنی، کار ساده ای نیست.
- ۴) روش رگرسیون ریج در مدل سازی وارون، پایدارتر و مؤثرتر از روش اُکام است؛ اما استفاده از این روش برای زمین با تعداد زیادی لایه، تغییراتی شدید در مقاومت ویژه لایه ها را نشان می دهد. از طرف دیگر تشخیص ضعیف مرز لایه ها در روش اُکام و پنهان شدن بعضی از لایه ها کار تفسیر را مشکل می سازد. لذا ترجیح داده می شود که بسته به طبیعت مدل واقعی زمین، از یکی از دو روش و یا حتی از هر دو روش استفاده گردد.
- ۵) نتایج به دست آمده در این تحقیق، لایه بوکسیتی را شیب دار و تغییرات عمقی سنگ بستر دولومیتی را شدید نشان می دهد. مرز پایینی لایه بوکسیتی بین ۲۰ تا ۷۰ متر پیش بینی می شود.

۲-۷- پیشنهادات

(۱) با توجه به تکتونیزه بودن منطقه و حساسیت کم آرایش شلومبرژه به تغییرات جانبی، پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی بیشتر و نمایش دقیق گسل‌های موجود، برداشت‌های ژئوالکتریک با آرایش‌های نیم‌شلومبرژه یا قطبی-دوقطبی و یا دو قطبی-دو قطبی در راستای عمود بر گسل‌ها و موازی خطوط برداشت شده، انجام شود.

(۲) با توجه به وجود رخنمون‌های بوکسیتی موجود، برداشت داده ژئوالکتریکی، با روش اتصال به جرم^۱ [Reynolds, 1997]، پیشنهاد می‌شود.

(۳) از آنجایی که مرز تیزی^۲ بین دولومیت و بوکسیت و لایه‌های بالایی وجود ندارد و نیز با توجه به توپوگرافی خشن منطقه، ممکن است روش لرزه نگاری انکساری جهت اهداف مورد نظر روش نا-موفقی باشد؛ با این وجود، برداشت داده لرزه نگاری انکساری برای بررسی احتمالی عمق و ضخامت ذخیره معدنی قابل پیشنهاد است.

(۴) برای تأیید و بررسی نتایج و به منظور رسیدن به پاسخ منطبق با شرایط موجود زمین‌شناسی اظهار نظر نهایی به شکل تلفیق نتایج حفاری و ژئوفیزیکی است، لذا نگارنده انجام این بررسی را با توجه به وجود داده‌های حفاری در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌نماید.

¹ Mise-a-la-masse method

² Sharp

مراجع فارسی

- ۱) جعفر زاده ر، (۱۳۸۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز بوکسیت جاجرم"، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز،
- ۲) حجت آ، (۱۳۸۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "مطالعات ژئوالکتریک جهت بررسی آبهای زیر زمینی و ساختارهای زمین‌شناسی در محدوده آنومالی شماره ۳ معدن گل‌گهر". دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود،
- ۳) کلاگری ع، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی". انتشارات دانشگاه تبریز.
- ۴) کیمیا قلم ج، محمدی جوآبادی ع و شاهین ا. (۱۳۶۳). "گزارش ژئوفیزیکی پیمایش مغناطیسی و سونداژهای الکتریک منطقه کیاسر". تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی.
- ۵) مراد زاده ع، عرب امیری ع و چاکری م. (۱۳۸۴). "نگرشی آگاهانه بر کاربرد مدل‌سازی هموار و پارامتری داده‌های مقاومت‌ویژه و قطبش‌القایی". بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین.
- ۶) ناصری ح، علیجانی ف و میرزایی ی، (۱۳۸۷). "توموگرافی ژئوالکتریک کارست تاقدیس آسماری (جنوب شرق مسجد سلیمان)". مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۹، ۱۰۰-۱۱۰.
- ۷) ناصری م، (۱۳۸۲)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانسار بوکسیت جاجرم با نگرشی بر کاربردها و محدودیت‌ها در کاربرد صنعتی" دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد،
- ۸) کامکار روحانی ا، (۱۳۸۸)، گزارش نهایی طرح پژوهشی: "بررسی ژئوفیزیک (ژئوالکتریک) به منظور شناسایی سنگ کف در بستر رودخانه قلعه دختر" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود،

- 9) Constable S. Parker L. & Constable G. (1987). "Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data". *J. of Geophysics*, 52, pp 289-300.
- 10) Corvallis O. (2000). DC resistivity method. Northwest Geophysical Associates, Inc.
- 11) Dahlin T. & Zhou B. (2004). "A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays" *J. of Geophysical Prospecting*, 52, pp 379-398.
- 12) deGroot-Hedlin C. & Constable S. (1990). "Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data" *J. of Geophysics*, 55, pp 1613-1624
- 13) Dey A. & Morrison H. F. (1979). "Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures" *J. of Geophysical prospecting*, 27, pp 106-136.
- 14) Fox R. Hohmann G. Killpack T. & Rijo L. (1980). "Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys" *J. of Geophysics*, 45, pp 75-93.
- 15) Ginzburg A. & Levanon A. (1976). "Determination of a saltwater interface by electric resistivity depth sounding" *J. of Department of Environmental Science*, pp 561-568.
- 16) Inman J. (1975). "Resistivity inversion with ridge regression" *J. of Geophysics*, 40, pp 798-817.
- 17) Inman J. Jisoo R. & Ward S. (1973). "Resistivity inversion" *J. of Geophysics*, 38, pp 1088-1108.
- 18) "Instruction manual Terrameter SAS 4000/ SAS 1000". (2009). ABEM.
- 19) *IPI2Win v. 2.1, User Manual*. (2001). Moscow: Geoscan-M Ltd.
- 20) *IX1D v3 Instruction Manual Version 1.1*. (2007). Golden, Colorado: Interpex Ltd.

- 21) Loke M. H. (2004) a. "Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys".
- 22) Loke M. H. (2004) b. "Res2dinv ver. 3.54, Manual, (Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method)". Geotomo software.
- 23) Loke M. H. & Dahlin T. (2002). "A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion" *J. of Applied Geophysics*, 49, pp 149-162.
- 24) Loke M. H. & Barker R. (1995). "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections" *J. of Geophysics*, 60, pp 1682-1690.
- 25) Loke M. H. & Barker R. (1996). "Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method" *J. of Geophysical Prospecting*, 44, pp 131-152.
- 26) Malamphy M. & Vallely J. (1944). "Geophysical survey of the Arkansas bauxite region" *J. of Geophysics*, 9, pp 324-366.
- 27) Meju M. (1994). "Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice". Society of Exploration Geophysicists. United States of America. pp 16-130.
- 28) Milson J. (1989). "Field Geophysics". Geological Society of London Handbook. pp 90-97.
- 29) Molano E. Salamanca M. & Van Overmeeren A. (1990). "Numerical modelling of standard and continuous vertical electrical soundings" *J. of Geophysical Prospecting* 38, pp 705-718.
- 30) Mooney H. (1980). "Handbook of Engineering Geophysics" (Vol. 2). Instruments, Inc. Minnesota, U.S.A: Bison pp 1-53.
- 31) Muiwane E. & Padersen L. (1999). "Automatic 1D interpretation of DC resistivity sounding data". *J. of Applied Geophysics*, 42, pp 35-45.
- 32) Ozebo V. Odunaike R. & Balogun A. (2008). "Identification of Depth to Top of Limestone Body Within a Concession at Ibese" *J. of Earth Sciences*, 3, pp 99-

107.

- 33) Reynolds J. (1997). "*An Introduction to applied and environmental geophysics*" John Wiley. England. pp 418-490.
- 34) Samouelian A. Cousin I. Tabbagh A. Bruand A. & Richard G. (2005). "Electrical resistivity survey in soil science: a review" *J. of Soil & Tillage Research*, 83, pp 173-193.
- 35) Telford W. Geldart L. & Sheriff R. (1990). "*An Introduction to Applied Geophysics*" Cambridge University Press. New York. pp 283-292 & 522-577.
- 36) *VOXLER, Ver.1.1.1716 Manual*. (2006). Golden software.
- 37) www.interpex.com. (2011).
- 38) www.abem.com. (2012).
- 39) www.iranitok.com. (2012).
- 40) www.goelectrical.com.(2012).
- 41) www.gsinet.ir.(2012).

Abstract

Exploration methods are divided into two categories: direct and indirect methods. Direct methods such as exploration drilling are expensive, slow and possess high accuracy. However geophysical methods are among indirect methods that need low time and cost and also explanation and interpretation of their results are difficult. In this research, the efficiency of electrical sounding method to distinguish the ore or mineral layer in karstic bauxite deposit with rough topography of earth surface is investigated.

For this purpose, in Taguee 4 & 5 bauxite mineral area, 82 electrical soundings on 3 lines have been planed and surveyed. Taguee region is one of the Jajarm bauxite mines, in which extraction activities have been carried out rarely and most drillings have been made for exploration purpose. In this work, Frist, the acquired data have been interpreted using standard curves and then, the obtained results have been modeled by IX1D, VES & IPI2WIN software packages. Thus, using IX1D software abilities, apparent resistivity data have been inverted directly by Occam and ridge regression methods. Comparison of the results of both methods shows that although ridge regression is superior in terms of fitting parameters to the model, but using this method for a ground with many layers results in very intense variations in resistivity of layers. On the other hands the inaccuracy to recognize the edge of layers by the Occam method and hiding some layers in this method cause difficulty in interpretation. Thus, it is preferred that depending on condition of actual earth model, either methods or both are used. The results of 1D modeling show at least, 4 geoelectrical layers in Taguee area that take place in the limits of Jajarm bauxite mines. For comprehensive understanding of the results, we have presented them in three 2D section and a 3D representation.

In next phase, on the primary data, 2D smooth modeling have been made using Res2dinv software package. The obtained sections have been interpreted and compared with the results of 1D inversion. From investigation the results of 1D & 2D inversion, it is concluded that because of enough resistivity contact between the bauxite and dolomitic bed rock, the recognition of the basement is possible. Both bauxite and dolomite layer are This layer is steep and the bed rock possesses very rough topography, as the depth of lower edge of bauxite layer forecast between 20 to 70 meters. Despite this, due to the low resistivity contrast between the kaolinite bauxite and upper layers, the recognition of upper layers and thus, determination of the mineral layer thickness is difficult.

Keywords:

Electrical sounding, 2D smooth modeling, Inversion modeling, Occam method, Ridge regression, Bauxite.



Shahrood University of Technology

*Faculty of Mining, Petroleum and
Geophysics*

Modeling and interpretation of electrical soundings to determine
the depth and thickness of the deposit and accurate recognition of
karstic zone bedrock in one of Jajarm bauxite mines

Farajollah Momeni

Supervisors:

A. Kamkar Rouhani

A. Arabamiri

Date: September 2012