



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفزیک

اکتشاف آبهای زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دو بعدی داده های مقاومت ویژه در

سازندلار واقع در غرب شاهرود

علی رفعت هراب

استاد راهنما

دکتر ایرج پیروز

استاد مشاور

دکتر محمد انصاری جعفری

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

اسفند ۱۳۸۹

اللَّهُمَّ احْمِمْ لِي

تقدیم ہے:

مادر م

روح شاد،

یادش کرامی

قدردانی

به نام او که زینت زبان و یادگار جان ما نام اوست

هستی را به وسعت بیکران عظمتش سکر گزارم که خالق، انجمن آن را به من ارزانی داشت تا بند وجودم در سرزمین لاله و شقایق، در خاک کبریا

ایران زمین ممد علم و ادب، رستن آغاز کند.

لیکن، پس از حمد باری تعالی بر خود واجب می دانم نسبت به زحمات خانواده عزیزم قدردان باشم و همچنین با سپاس فراوان از همه کسانی که یاریم کردند تا

بدانم آنچه را نمی دانستم به خصوص استاذ کرامت قدوم جناب آقای دکتر ایرج پیروز و دکتر مجید انصاری

از دوستان عزیزم، به ویژه مرتضی بالارستانی، مهدی صادقی، محمد زکریا قدیری و مهدی قلی پور که در به سرانجام رسانیدن این تحقیق مریاری کردند، کمال تشکر را

دارم. امیدوارم که در سایه عنایت های الهی همیشه سلامت و پیروز باشند.

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی موجود در سازندهای سخت، با استفاده از مدل‌سازی دوبعدی معکوس داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌باشد.

این داده‌ها، با استفاده از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن در دره کال‌قرنو در غرب شاهرود برداشت شده‌اند. این برداشت در کنار یک چاه آب به نام چاه آب ذوب آهن صورت گرفته است تا بدین وسیله، بتوان نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های فوق‌الذکر را با وضعیت زمین‌شناسی تحت‌الارضی محل چاه مذکور مقایسه نمود.

تحقیقات عملی جهت شناسایی وضعیت هندسی درزه و شکاف‌های محل مورد مطالعه که شامل پیمایش شیب، امتداد درزه و شکاف‌ها و مطالعه مقاطع نازک سنگ‌های برداشت شده از محل مذکور می‌باشند، نشان می‌دهند که شیب درزه و شکاف‌های مذکور بیشتر از ۸۰ درجه و دارای امتداد شمالی و جنوبی می‌باشند. مطالعات تئوری نشان داده‌اند که آرایش قطبی-دوقطبی آرایش مناسبی جهت شناسایی ناهمگنی‌های جانبی مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌باشد. برای اثبات این امر در این پژوهش از مقاطع حساسیت و مدل‌های ریاضی استفاده شده است.

با توجه به مراتب فوق‌الذکر، در کنار چاه آب یاد شده اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی توسط به کارگیری روش دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن صورت گرفته است و داده‌های حاصله توسط نرم‌افزار *Res2Dinv* مدل‌سازی شده‌اند. مقاطع حاصله از این مدل‌سازی‌ها، درزه و شکاف‌های حاوی آب که در زیر چاه فوق‌الذکر واقع می‌باشند را به خوبی نمایش می‌دهند. نتیجه جالبی که از این پژوهش گرفته می‌شود این است که با اندازه‌گیری‌های ژئوالکتریکی توسط دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن و مدل‌سازی داده‌های حاصله بوسیله نرم‌افزار *Res2Dinv*، می‌توان ناهمگنی‌های جانبی را به طور قابل قبولی اکتشاف نمود.

چکیده ج

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۱-۲- تعریف مساله و بیان سوال های اصلی تحقیق ۳
- ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق ۵
- ۱-۴- اهداف پایان نامه ۵
- ۱-۵- برخی از کارهای انجام شده در منطقه ۶
- ۱-۶- روش انجام تحقیق ۶
 - ۱-۶-۱- جمع آوری اطلاعات کتابخانه ای ۶
 - ۱-۶-۲- جمع آوری داده های مورد نیاز صحرایی ۶
 - ۱-۶-۳- مطالعات آزمایشگاهی ۷
 - ۱-۶-۴- انجام کارهای نرم افزاری و بررسی نتایج به دست آمده ۷
 - ۱-۷- ساختار پایان نامه ۷

فصل دوم: معرفی روش مقاومت ویژه الکتریکی

- ۱-۲- مقدمه ۱۰
- ۲-۲- تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی ۱۰
- ۲-۳- خواص الکتریکی مواد مختلف در زمین ۱۹
- ۲-۴- برداشت های روش مقاومت ویژه الکتریکی ۲۳
 - ۲-۴-۱- روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی ۲۴
 - ۲-۴-۱-۱- انتخاب آرایش مناسب برای روش سونداژزنی الکتریکی ۲۷
 - ۲-۴-۱-۲- نمایش داده های حاصله از به کارگیری روش سونداژزنی الکتریکی ۲۷
 - ۲-۴-۲- روش پروفیل زنی مقاومت ویژه الکتریکی ۲۸

۲۹.....۱-۲-۴-۲- انتخاب آرایش مناسب برای روش پروفیل‌زنی الکتریکی

۳۰.....۲-۲-۴-۲- نمایش داده‌های حاصله از بکارگیری روش پروفیل‌زنی الکتریکی

۳۰.....۵-۲- شبه مقطع قائم مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش ترسیم آن

۳۳.....۶-۲- مقایسه آرایش‌های الکترودی مختلف

۳۴.....۱-۶-۲- تابع حساسیت برای یک نیم‌فضای همگن و همسانگرد

۳۵.....۲-۶-۲- تابع حساسیت در حالت یک‌بعدی و عمق کاوش

۳۹.....۳-۶-۲- تابع حساسیت دوبعدی و قابلیت تفکیک قائم و جانبی آرایش‌های مختلف

۴۰.....۱-۳-۶-۲- آرایش ونر

۴۲.....۲-۳-۶-۲- آرایش دوقطبی- دوقطبی

۴۵.....۳-۳-۶-۲- آرایش قطبی- قطبی

۴۶.....۴-۳-۶-۲- آرایش قطبی- دوقطبی

۴۹.....۷-۲- کاربردهای روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

فصل سوم: مختصری راجع به روش‌های مدل‌سازی

۵۲.....۱-۳- مقدمه

۵۳.....۲-۳- مدل‌سازی مستقیم یا پیشرو

۵۵.....۳-۳- مدل‌سازی معکوس

۵۵.....۱-۳-۳- روش حداقل مربعات غیر خطی

۶۱.....۲-۳-۳- روش حداقل مربعات هموار مقید

۶۶.....۳-۳-۳- روش شبه نیوتن

۶۸.....۱-۳-۳-۲- رویه عملی استفاده از روش شبه نیوتن در مسائل معکوس‌سازی

۷۱.....۴-۳-۳- مقایسه روش شبه نیوتن با روش گاوس- نیوتن

فصل چهارم: موقعیت جغرافیایی محل برداشت و وضعیت زمین‌شناسی منطقه

۷۳.....۱-۴- موقعیت جغرافیایی محل برداشت

۷۴-۲-۴- زمین ریخت شناسی ۷۴

۷۶-۳-۴- زمین شناسی ساختمانی منطقه ۷۶

۷۶-۱-۳-۴- چین خوردگی های منطقه ۷۶

۷۷-۲-۳-۴- گسل های منطقه ۷۷

۷۸-۴-۴- واحدهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه ۷۸

۷۸-۱-۴-۴- واحد سازند لار (J_1) - ژوراسیک میانی - بالایی ۷۸

۸۰-۲-۴-۴- واحد Ku^1 ۸۰

۸۰-۳-۴-۴- واحد Qt^1 ۸۰

فصل پنجم: برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی توسط آرایش قطبی - دوقطبی

۸۲-۱-۵- مقدمه ۸۲

۸۳-۲-۵- معرفی آرایش قطبی - دوقطبی ۸۳

۸۶-۱-۲-۵- روش پروفیل زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی - دوقطبی ۸۶

۸۷-۲-۲-۵- روش سونداژ زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی - دوقطبی ۸۷

۸۸-۳-۲-۵- معرفی روش ترکیب یافته سونداژ زنی با روش پروفیل زنی الکتریکی ۸۸

۹۰-۱-۳-۲-۵- ماتریس مقاومت ویژه میانگین حاصله از دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن ۹۰

۹۱-۲-۳-۲-۵- شبه مقطع قائم مقاومت ویژه میانگین ۹۱

۹۲-۳-۵- مقایسه دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن با استفاده از مدل های ریاضی ۹۲

۹۵-۴-۵- چگونگی برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق ۹۵

فصل ششم: مدل سازی و تفسیر داده ها

۹۹-۱-۶- مقدمه ۹۹

۹۹-۲-۶- مطالعه نمونه های سنگی ۹۹

۱۰۴-۳-۶- تهیه و تفسیر مقاطع ژئوالکتریکی با استفاده از نرم افزار $RES2DINV$ ۱۰۴

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱-۷- نتیجه‌گیری ۱۲۲
- ۲-۷- پیشنهادات ۱۲۳
- منابع فارسی ۱۲۴
- منابع خارجی ۱۲۵
- پیوست الف: دستگاه به کار گرفته شده در اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی ... ۱۲۸
- پیوست ب: روش‌های مدل‌سازی وارون دوبعدی با نرم‌افزار *RES2DINV* ۱۳۱

- شکل ۱-۲-۱- نمایش سطوح هم‌پتانسیل و چگونگی شارش خطوط جریان ۱۴
- شکل ۲-۲-۲- سطوح هم‌پتانسیل و جهت شارش جریان حاصل از یک دوقطبی جریان ۱۵
- شکل ۳-۲-۳- نحوه توزیع پتانسیل ایجاد شده توسط یک جفت الکتروود جریان ۱۵
- شکل ۴-۲-۴- یک آرایش قراردادی چهار الکتروودی ۱۶
- شکل ۵-۲-۵- آرایش‌های رایج در برداشت‌های مقاومت ویژه، همراه با فاکتورهای هندسی ۱۸
- شکل ۶-۲-۶- شارش جریان در محیط، توسط شارش الکتروولیتی و الکترونی ۱۹
- شکل ۷-۲-۷- گستره مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف در زمین ۲۱
- شکل ۸-۲-۸- بسط آرایش‌های مختلف در روش سونداژزنی ۲۶
- شکل ۹-۲-۹- نمایش بعددار بودن زمین و اثر آن بر روی برداشت‌های الکتریکی ۲۶
- شکل ۱۰-۲-۱۰- نمایش بعددار بودن زمین ۲۹
- شکل ۱۱-۲-۱۱- شبهه مقطع به دست آمده برای آرایش‌های مختلف بر روی یک مدل مصنوعی ۳۲
- شکل ۱۲-۲-۱۲- پارامترهای لازم برای محاسبه تابع حساسیت در نقطه (X, Y, Z) ۳۵
- شکل ۱۳-۲-۱۳- برای زمین یک‌بعدی تنها متغیر تاثیر گذار بر حساسیت، عمق (Z) می‌باشد ... ۳۶
- شکل ۱۴-۲-۱۴- نمودار تابع حساسیت یک‌بعدی برای دو آرایش ونر و قطبی- قطبی ۳۷
- شکل ۱۵-۲-۱۵- تابع حساسیت دوبعدی برای سه نوع آرایش ونر ۴۲
- شکل ۱۶-۲-۱۶- مقطع حساسیت دوبعدی برای آرایش دوقطبی- دوقطبی ۴۳
- شکل ۱۷-۲-۱۷- دو نوع چینش الکتروودی متفاوت برای آرایش دوقطبی- دوقطبی ۴۵
- شکل ۱۸-۲-۱۸- مقطع حساسیت آرایش قطبی- قطبی ۴۶

- شکل ۲-۱۹- مقطع حساسیت آرایش قطبی- دوقطبی برای N های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ ۴۸
- شکل ۲-۲۰- نمایش آرایش قطبی- دوقطبی در دو حالت رو به جلو و رو به عقب ۴۹
- شکل ۲-۳- چگونگی چینش بلوک‌های مستطیلی در یک مدل دوبعدی. ۶۲
- شکل ۳-۳- مقایسه مدل‌های به دست آمده از دو روش معکوس‌سازی نرم l_2 و نرم l_1 ۶۵
- شکل ۴-۱- راه‌های اصلی دستیابی به محل مورد مطالعه ۷۳
- شکل ۴-۲- راه‌های فرعی دستیابی به محل مورد مطالعه ۷۴
- شکل ۴-۳- تصویر ماهواره‌ای شهرستان شاهرود ۷۶
- شکل ۴-۴- تصویر ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه ۷۸
- شکل ۴-۵- نقشه زمین‌شناسی منطقه و موقعیت محل مورد مطالعه ۷۹
- شکل ۵-۱- آرایش قطبی- دوقطبی ۸۵
- شکل ۵-۲- چینش الکترودها در آرایش قطبی- دوقطبی رو به جلو \overline{AMN} ۸۵
- شکل ۵-۳- چینش الکترودها در آرایش قطبی- دوقطبی رو به عقب، \overline{MNB} ۸۶
- شکل ۵-۴- چگونگی برداشت به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش قطبی- دوقطبی ۸۷
- شکل ۵-۵- چگونگی سونداژزنی الکتریکی با استفاده از آرایش قطبی- دوقطبی ۸۸
- شکل ۵-۶- ماتریس مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده برای عمق‌های مختلف (مستقیم) ۸۹
- شکل ۵-۷- ماتریس مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده برای عمق‌های مختلف (معکوس) .. ۹۰
- شکل ۵-۸- نمودار مدل ریاضی دو روش آرایش قطبی- دوقطبی بر روی یک دایک مقاوم .. ۹۴
- شکل ۵-۹- نمودار مدل ریاضی دو روش آرایش قطبی- دوقطبی بر روی یک رگه هادی ۹۴

- شکل ۵-۱۰- نمایش پروفیل برداشت مقاومت ویژه، همراه با موقعیت ایستگاه‌ها ۹۷
- شکل ۶-۱- نمایش منطقه مورد مطالعه همراه با گسل‌های موجود در منطقه ۱۰۰
- شکل ۶-۲- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۲ ۱۰۱
- شکل ۶-۳- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۲ ۱۰۱
- شکل ۶-۴- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۱ ۱۰۲
- شکل ۶-۵- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۱ ۱۰۲
- شکل ۶-۶- نمایش توزیع آماری دسته درزهای موجود در امتداد خط شماره ۲ ۱۰۴
- شکل ۶-۷- مقطع به دست آمده از گمانه اکتشافی شرکت زغال سنگ البرز جنوبی ۱۰۶
- شکل ۶-۸- مدل به دست آمده با روش معکوس سازی نرم l_2 ، با فاکتور میرایی ۰.۱۶ ۱۰۹
- شکل ۶-۹- مدل به دست آمده با روش معکوس سازی نرم l_2 ، با فاکتور میرایی ۰.۲۵ ۱۱۰
- شکل ۶-۱۰- مدل به دست آمده با روش معکوس سازی نرم l_2 ، فیلتر هموارساز ۴ ۱۱۱
- شکل ۶-۱۱- مدل به دست آمده با روش معکوس سازی نرم l_2 ، فیلتر هموارساز ۰.۵ ۱۱۲
- شکل ۶-۱۲- مدل به دست آمده از روش ترکیبی، فاکتور میرایی ۰.۱۶، فیلتر هموارساز ۲ ۱۱۴
- ۱۱۴
- شکل ۶-۱۳- مدل به دست آمده از روش ترکیبی، فاکتور میرایی ۰.۲۵، فیلتر هموارساز ۲ ۱۱۴
- شکل ۶-۱۴- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی ترکیبی، فیلتر هموارساز ۴، فاکتور میرایی ۰.۱۶ ۱۱۵
- شکل ۶-۱۵- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی نرم l_1 ، فاکتور میرایی ۰.۱۶ ۱۱۷
- شکل ۶-۱۶- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی نرم l_1 ، با فاکتور میرایی ۰.۲۵ ۱۱۸

شکل ۶-۱۷- مدل تهیه شده از روش معکوس‌سازی نُرْم l_1 ، فیلتر هموارساز قائم به افقی ۴ .. ۱۱۹

شکل ۶-۱۸- مدل به دست آمده از روش معکوس‌سازی نُرْم l_1 ، با مقدار ضریب تغییر عمقی

فاکتور میرایی ۱.۵..... ۱۲۰

شکل پ-ب-۶- مثالی از کاربرد روش وارون‌سازی هموار نُرْم l_2 و روش وارونسازی بلوکی نرم

l_1 ۱۴۲

شکل پ-ب-۷- پنجره انتخاب نوع روش بهینه‌سازی..... ۱۴۳

شکل پ-ب-۹- پنجره تغییر شکل سلول‌های مدل..... ۱۴۶

جدول ۱-۲- عمق میانه کاوش (Z_E) برای آرایش‌های مختلف ۳۸

جدول ۱-۳- داده‌های جمع آوری شده و یا به عبارتی داده‌های مشاهده‌ای ۵۹

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

عوامل تکتونیکی باعث ایجاد درزه و شکاف در سنگ‌های آهکی می‌شوند. از طرف دیگر، نفوذ آب‌های حاصل از نزولات جوی از طریق این درزه و شکاف‌ها، باعث ایجاد حفرات انحلالی متعددی در داخل این سنگ‌ها می‌شوند که به این حفرات، حفرات کارستی می‌گویند. این حفرات به مرور گسترش یافته و به محل مناسبی برای تجمع آب‌های زیرزمینی تبدیل می‌شوند. برای شناسایی این حفرات، در مرتبه اول، حفر گمانه‌های اکتشافی بهترین راه حل می‌باشد. ولی این روش باعث افزایش هزینه‌های اکتشاف می‌شود. مشکل دیگر تعیین محل دقیق حفر این گمانه‌ها می‌باشد. برای حل این معضل از روش‌های مقاومت‌ویژه دوبعدی استفاده می‌نمایند. روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی، از جمله روش‌های کم‌هزینه و سریع جهت شناسایی این ساختارها می‌باشند. قدرت تفکیک روش مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی در مقایسه با روش مقاومت‌ویژه الکتریکی یک‌بعدی بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر به علت این که روش مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی هم به صورت جانبی و هم به صورت عمقی زمین تحت مطالعه را مورد بررسی قرار می‌دهد در مقایسه با روش مقاومت‌ویژه الکتریکی یک‌بعدی و روش حفاری که تنها ناهمگنی‌های عمقی را مورد بررسی قرار می‌دهند. لذا، احتمال شناسایی این ساختارها توسط در حالت اول بیشتر است. بنابراین، قبل از شروع حفاری می‌توان محل مناسب برای حفر چاه یا گمانه را با استفاده از روش مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی تعیین نمود که این کار باعث کاهش ریسک عملیات حفاری می‌شود [Dunscob and Rehwoldt, 1999; Kaufmann and Quinif, 2001; Roth et al., 1999; Zhou et al., 1999].

داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی استفاده شده در این تحقیق، توسط پیروز در منطقه کال‌قرونو با استفاده از آرایش قطبی-دوقطبی برداشت شده‌اند. پیش از این هیچ‌گونه مدل‌سازی معکوس روی این داده‌ها انجام نشده و تنها از طریق تهیه شبه مقطع، کار تفسیر این داده‌ها انجام گرفته است. در این تحقیق با استفاده از مدل‌سازی معکوس به بررسی وضعیت تحت‌الارضی منطقه پرداخته شده است. امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتری و روش‌های عددی، امکان پردازش و مدل‌سازی داده‌های

مختلف بوجود آمده است. لذا آشنایی با روش‌های مدل‌سازی کامپیوتری برای داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی مفید و راه‌گشا می‌باشد.

آرایش قطبی- دوقطبی برای اولین بار در سال ۱۹۵۴، جهت شناسایی لایه‌های قائم به کار برده شد [Logn, 1954]. سپس در سال ۱۹۶۶، این آرایش جهت آشکارسازی حفرات کارستی در زمین‌های آهکی به کار رفت [Bristow, 1966]. همچنین، تحقیقات برخی محققان نشان داده است که قابلیت این آرایش برای شناسایی حفرات موجود در سنگ‌های آهکی متخلخل، نسبت به آرایش‌های ونر، ونر- شلومبرژر، روش‌های گرانی سنجی و روش رادار نفوذ به زمین^۱ بیشتر می‌باشد [Fountain et al., 1975; Bates, 1973]. کاروس و پرنو، از این آرایش جهت اکتشاف لایه‌های نازک گرافیت که به طور قائم تا نزدیک سطح زمین بالا آمده و بوسیله یک رولایه نازک پوشیده شده بودند، استفاده کردند و نتایج مفیدی را به دست آوردند [Karous and Pernu, 1985].

۱-۲- تعریف مساله و بیان سوال‌های اصلی تحقیق

هدف روش مقاومت‌ویژه الکتریکی، شناسایی ناهمگنی‌های مقاومت‌ویژه در زیرزمین می‌باشد. بنابراین، هرچه اندازه این ناهنجاری‌ها بزرگتر باشد امکان شناسایی آنها توسط روش مقاومت‌ویژه الکتریکی بیشتر خواهد بود. از آنجایی که اختلاف مقاومت‌ویژه الکتریکی بین سنگ‌های آهکی و آب‌های زیرزمینی موجود در آنها بالا می‌باشد، در نتیجه اکتشاف آب‌های زیرزمینی در مناطق آهکی با استفاده از روش مقاومت‌ویژه الکتریکی امکان‌پذیر می‌باشد.

محلی که در این تحقیق، برای مطالعه انتخاب شده است در کنار چاه آبی در دره کال‌قرنو می‌باشد. این دره، تشکیل شده از آهک‌های سازند لار می‌باشد. با توجه به اینکه وجود آب، در زمین‌های آهکی می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله پدیده کارستی شدن، گسلیدگی و یا پدیده‌های

^۱ GPR

تکتونیکی تشکیل شود که شناسایی این عوامل نیازمند بررسی‌های متعددی می‌باشد. همانطور که گفته شد روش مقاومت‌ویژه الکتریکی یک روش مفید در اکتشاف آب و بررسی زیرسطح زمین می‌باشد، لذا می‌توان با استفاده از این روش چگونگی زهکشی آب زیرزمینی در زیر چاه مورد نظر و نیز، وضعیت زیرسطحی آن را بررسی نمود. از آنجا که در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی چندین آرایش با خواص مختلف وجود دارد، لذا انتخاب آرایش مناسب جهت اکتشاف آب در شرایط خاص دره کال‌قرنو نیازمند بررسی و مقایسه آرایش‌های مختلف می‌باشد. مساله دیگری که وجود دارد، روش تفسیر مقاومت‌ویژه‌های برداشت شده می‌باشد که اینکار می‌تواند با مدل‌سازی معکوس توسط نرم‌افزار *Res2Dinv* انجام گیرد ولی این نرم‌افزار و به طور کلی مدل‌سازی معکوس دارای پیچیدگی‌ها و روش‌های مختلفی می‌باشد که قبل از استفاده از آنها باید مساله مورد نظر، وضعیت زیرسطحی زمین و کاربرد روش‌های مختلف در نرم‌افزار مذکور، مورد بررسی واقع شود.

با در نظر گرفتن مسائل مطرح شده‌ی فوق سوال‌های زیر مطرح می‌شوند:

- (۱) با توجه به ساختار زمین‌شناسی منطقه کال‌قرنو، آیا امکان تشکیل منابع آب زیرزمینی در آن وجود دارد؟
- (۲) آیا می‌توان با استفاده از روش مقاومت‌ویژه الکتریکی آب‌های زیرزمینی موجود در چنین شرایط زمین‌شناسی را اکتشاف نمود؟
- (۳) آیا آرایش قطبی-دوقطبی قابلیت اکتشاف آب‌های زیرزمینی در منطقه مذکور را دارد؟
- (۴) چگونه می‌توان با استفاده از نرم‌افزار *Res2Dinv*، مدل‌های قابل تطبیق با شرایط زمین‌شناسی خاص منطقه را ایجاد نمود؟
- (۵) آیا چاه آب ذوب‌آهن در محل مناسب حفر شده است؟

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به این که قسمت اعظم ایران را مناطق خشک و نیمه خشک، تشکیل می‌دهد، از اینرو همواره مشکلات ناشی از خشک‌سالی و کم‌آبی، ساکنان این سرزمین را مجبور به اکتشاف روش‌های مناسب برای مقابله با این مشکلات نموده است. روش‌های ژئوفیزیکی یکی از تکنیک‌های مناسب جهت اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی می‌باشند. امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتری، نیاز به بررسی‌های بیشتر در جهت استفاده هرچه بهتر از این علوم برای بهبود روش‌های ژئوفیزیکی، لازم و ضروری می‌باشد.

۱-۴- اهداف پایان‌نامه

هدف اصلی در این تحقیق، اکتشاف آب در منطقه آهکی کال‌قرونو با استفاده از روش مدل‌سازی دوبعدی معکوس داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌باشد. در این تحقیق، از نرم‌افزار *Res2dinv* جهت رسیدن به این هدف استفاده گردیده است. از آنجایی که در روش‌های مدل‌سازی معکوس، برای یک سری داده، امکان حصول چندین مدل قابل انطباق وجود دارد، در نتیجه، تشخیص مدل واقعی از میان این مدل‌ها، نیازمند آشنایی با وضعیت زمین‌شناسی منطقه و چگونگی استفاده از روش‌های مختلف موجود در نرم‌افزار *Res2dinv* می‌باشد. بدین منظور، باید منطقه مورد مطالعه، هم از نظر ماکروسکوپی و هم از نظر میکروسکوپی بررسی شود. برای مطالعه ماکروسکوپی منطقه بایستی وضعیت زمین‌شناسی منطقه، از نزدیک مشاهده و یا از روی نقشه‌های زمین‌شناسی، بررسی گردد. همچنین، جهت مطالعه میکروسکوپی منطقه، می‌توان، مقاطع نازک نمونه‌های سنگی منطقه را تهیه و مطالعه نمود.

۱-۵- برخی از کارهای انجام شده در منطقه

در منطقه کال قرونو، چندین تحقیق در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد صورت گرفته است که از میان این تحقیقات می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) اولین مورد تحقیق، با عنوان اکتشاف گسل پنهان شاهرود با استفاده از آرایش و نر توسط ترکمنچه در سال ۱۳۸۶ انجام گرفته است [ترکمنچه، ۱۳۸۶].
- (۲) دومین مورد مطالعه با عنوان تعیین موقعیت و شیب گسل پنهان شاهرود با استفاده از آرایش قطبی- دوقطبی، توسط جهانبین، در سال ۱۳۸۶، انجام گرفته است [جهانبین، ۱۳۸۶].

۱-۶- روش انجام تحقیق

ترتیب کلی انجام این تحقیق به صورت زیر می باشد:

- (۱) جمع آوری اطلاعات کتابخانه ای
- (۲) جمع آوری داده های صحرائی مورد نیاز
- (۳) مطالعات آزمایشگاهی
- (۴) انجام کارهای نرم افزاری و بررسی نتایج به دست آمده

۱-۶-۱- جمع آوری اطلاعات کتابخانه ای

در این مرحله، مقالات و مطالعات انجام شده در مورد اکتشاف آب های زیرزمینی با استفاده از آرایش قطبی- دوقطبی، مدل سازی معکوس داده های مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از نرم افزار *Res2Dinv* و نقشه های زمین شناسی و عکس های هوایی منطقه جمع آوری شده است.

۱-۶-۲- جمع آوری داده های مورد نیاز صحرائی

مطالعات صحرائی بر اساس مشاهدات و بازدیدهای صحرائی شامل موارد زیر می باشند:

- (۱) پیمایش محل مورد مطالعه به منظور تعیین انواع رخدادهای تکتونیکی شامل گسل ها،

شکستگی‌ها و مطالعه جنس مواد تشکیل دهنده منطقه در مقیاس میکروسکوپی

۲) نمونه‌برداری از سنگ‌های منطقه برای مطالعات میکروسکوپی، شناسایی گسل‌ها و

شکستگی‌های غالب منطقه و برداشت شیب و امتداد این شکستگی‌ها

۱-۶-۳- مطالعات آزمایشگاهی

در این مرحله، مقاطع نازک نمونه‌های سنگی منطقه تهیه و با میکروسکوپ بررسی شدند.

۱-۶-۴- انجام کارهای نرم‌افزاری و بررسی نتایج به دست آمده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل داده‌های مقاومت ویژه‌های الکتریکی، مقاطع نازک،

شیب و امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های غالب در منطقه می‌باشند که این داده‌ها بعد از آماده سازی با

نرم‌افزارهای مربوطه بررسی و تفسیر شدند.

۱-۷- ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر مشتمل بر ۷ فصل به صورت زیر می‌باشد:

فصل حاضر، شامل کلیات طرح، اعم از معرفی و ذکر اهداف و ضرورت انجام تحقیق می‌باشد.

فصل دوم، تحت عنوان معرفی روش مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. در این فصل به بررسی

تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی، چگونگی استفاده عملی از این روش در برداشت‌های صحرائی و

نیز به بررسی قابلیت‌های آرایش‌های مختلف پرداخته شده است.

فصل سوم، تحت عنوان معرفی روش‌های مدل‌سازی می‌باشد. در این فصل به معرفی و بررسی

انواع روش‌های مدل‌سازی پرداخته شده است.

فصل چهارم، تحت عنوان بررسی وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در این

فصل به بررسی وضعیت زمین‌شناسی و تکتونیکی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است.

فصل پنجم، تحت عنوان برداشت مقاومت ویژه الکتریکی توسط آرایش قطبی- دوقطبی متقارن

می‌باشد. در این فصل به بررسی چگونگی برداشت با آرایش قطبی - دوقطبی رو به عقب و رو به جلو، مقایسه این دو آرایش با استفاده از مدل‌های ریاضی و نیز به تشریح چگونگی برداشت داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق، پرداخته شده است.

فصل ششم، تحت عنوان مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها می‌باشد. در این فصل، نتایج به دست آمده از مقاطع نازک و نیز شیب و امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های غالب منطقه تشریح شده و در نهایت به مدل‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و تفسیر این مدل‌ها پرداخته شده است.

فصل هفتم، تحت عنوان نتیجه‌گیری و پیشنهادات می‌باشد. در این فصل به مرور و نتیجه‌گیری از فصل‌های مختلف این تحقیق پرداخته شده و سپس پیشنهادات مورد نظر مطرح می‌شوند.

فصل دوم

معرفی روش مقاومت ویژه الکتریکی

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، از چهار الکتروود استفاده می‌شود که دو تا از آنها برای فرستادن جریان الکتریکی و از دو تای دیگر، برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی استفاده می‌شود. در صورت ناهمگن و ناهمسانگرد بودن زمین، داده‌های حاصله 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].

۲-۲- تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی

بنیادی‌ترین قانون فیزیکی که تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی بر اساس آن پایه‌ریزی می‌شود، قانون اهم^۱ می‌باشد. معادله قانون اهم به صورت برداری برای شارش جریان در زمین‌های پیوسته^۲، به صورت رابطه (۱-۲) می‌باشد [Loke, 2004a]:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1-2)$$

که در رابطه فوق:

σ : رسانندگی الکتریکی محیط

\mathbf{J} : چگالی جریان

\mathbf{E} : شدت میدان الکتریکی

¹Ohm's law
²continuous

اندازه مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) برابر با وارون رسانندگی الکتریکی (σ) می باشد. در یک برداشت عملی، آنچه که اندازه گیری می شود اختلاف پتانسیل میدان الکتریکی می باشد. ارتباط بین شدت میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی طبق رابطه (۲-۲) تعریف می شود [Loke, 2004a].

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

که در رابطه فوق:

E: شدت میدان الکتریکی

Φ : پتانسیل الکتریکی

می باشند.

با ترکیب رابطه (۱-۲) و رابطه (۲-۲)، رابطه (۳-۲) حاصل می شود:

$$J = -\sigma \nabla(\phi) \quad (3-2)$$

که در رابطه فوق:

σ : رسانندگی الکتریکی محیط

J: چگالی جریان الکتریکی

می باشند.

تقریباً در کلیه برداشت ها، منبع جریان الکتریکی به صورت نقطه ای در نظر گرفته می شود. در این صورت، اگر (ΔV) به عنوان المانی از حجم اطراف محل منبع جریان (I) در نقطه (x_s, y_s, z_s) فرض شود، ارتباط بین جریان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی طبق رابطه (۴-۲) تعریف می شود.

$$\left(\frac{I}{\Delta V}\right) \nabla \cdot J = \delta(x - x_s) \delta(x - y_s) \delta(x - z_s) \quad (4-2)$$

که در رابطه فوق:

x_s : موقعیت منبع جریان در روی محور x

x : نقطه‌ای در روی محور x که چگالی جریان در آن نقطه اندازه‌گیری می‌شود

ΔV : المانی از حجم اطراف محل منبع جریان

δ : تابع دیراک [Bracewell, 1986]

می‌باشند.

رابطه (۵-۲)، معادله پایه، برای نشان دادن چگونگی توزیع پتانسیل در داخل زمین به خاطر

نقطه‌ای بودن جریان می‌باشد.

$$\left(\frac{I}{\Delta V}\right) \nabla \cdot (\sigma(x, y, z) \nabla \Phi(x, y, z)) = \delta(x - x_s) \delta(x - y_s) \delta(x - z_s) \quad (5-2)$$

تکنیک‌های مختلفی برای حل رابطه (۶-۲) ارائه شده‌اند. در واقع این یک مساله پیشرو^۱ است

که توسط آن، در سطح زمین، پتانسیل ایجاد شده توسط یک ساختار تحت‌الارضی، تعیین می‌شود.

برای حل موارد بسیار ساده، نظیر یک کره در یک محیط همگن^۲ و همسانگرد^۳ و یا یک گسل قائم بین

دو ناحیه با مقاومت ویژه‌های ثابت، از روش‌های تحلیلی استفاده می‌شود. ولی برای ساختارهای

زمین‌شناسی زیرسطحی که توزیع مقاومت ویژه در این ساختارها بسیار پیچیده می‌باشد، نمی‌توان از

روش‌های تحلیلی استفاده کرد و به ناچار باید توسط روش‌های عددی، مقادیر مجهول را تخمین زد

[Koefoed, 1979].

لازم است قبل از شروع بحث در مورد چگونگی استفاده از رابطه (۵-۲)، مفهوم سطوح

هم‌پتانسیل^۴ توضیح داده شود. به‌طور کلی سطح هم‌پتانسیل، به سطحی از فضا گفته می‌شود که

اختلاف پتانسیل بین دو نقطه در روی این سطح صفر باشد. در شکل (۱-۲)، سطوح هم‌پتانسیل در

¹Forward problem

²Homogenous

³Isotrope

⁴Equipotential surface

یک زمین همگن و همسانگرد به طور شماتیک نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، شکل این سطوح به صورت نیم کره می باشند و خطوط جریان الکتریکی به صورت عمود بر این سطوح واقع می باشند [Loke, 2004a].

برای حل رابطه (۶-۲)، ساده ترین حالت ممکن را که یک زمین همگن و همسانگرد و با یک منبع نقطه ای جریان که در سطح زمین قرار گرفته است را در نظر می گیرند، که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. در این حالت جریان به صورت شعاعی از منبع به سمت خارج دور می شود و پتانسیل به صورت وارون^۱ فاصله از چشمه جریان، تغییر می کند. در یک زمین همگن و همسانگرد، رابطه بین اندازه پتانسیل و مقاومت ویژه زمین به صورت رابطه (۶-۲) تعریف می شود [Loke, 2004a]

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (۶-۲)$$

در رابطه فوق:

r: فاصله نقطه مورد نظر از الکتروود جریان

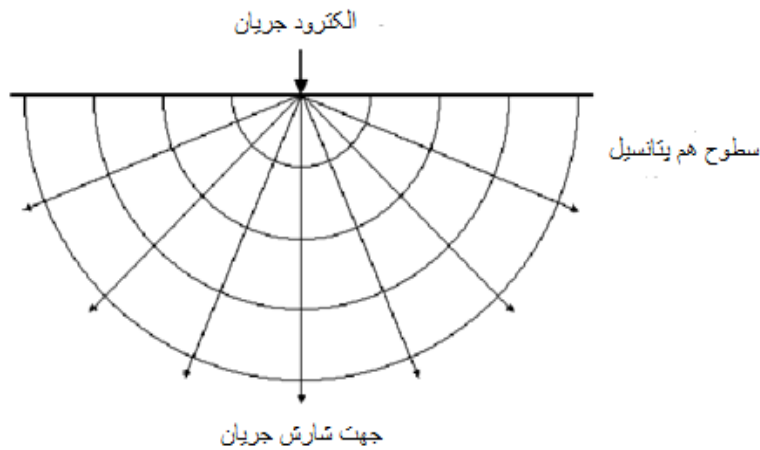
ϕ : اندازه پتانسیل الکتریکی در نقطه ای به فاصله r از یک منبع نقطه ای جریان

I: اندازه جریان الکتریکی

ρ : اندازه مقاومت ویژه الکتریکی محیط

می باشند.

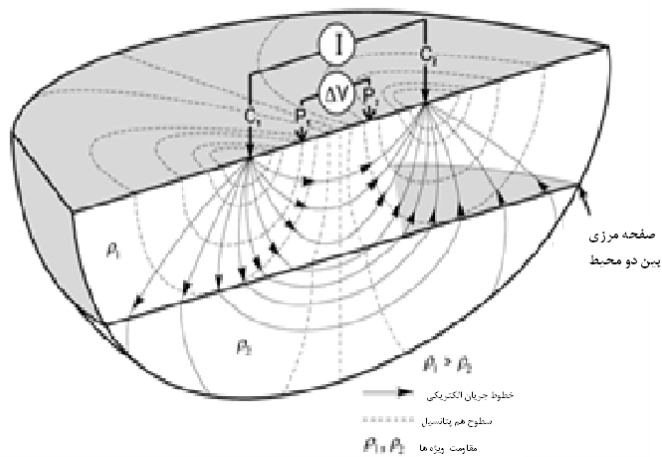
¹inverse



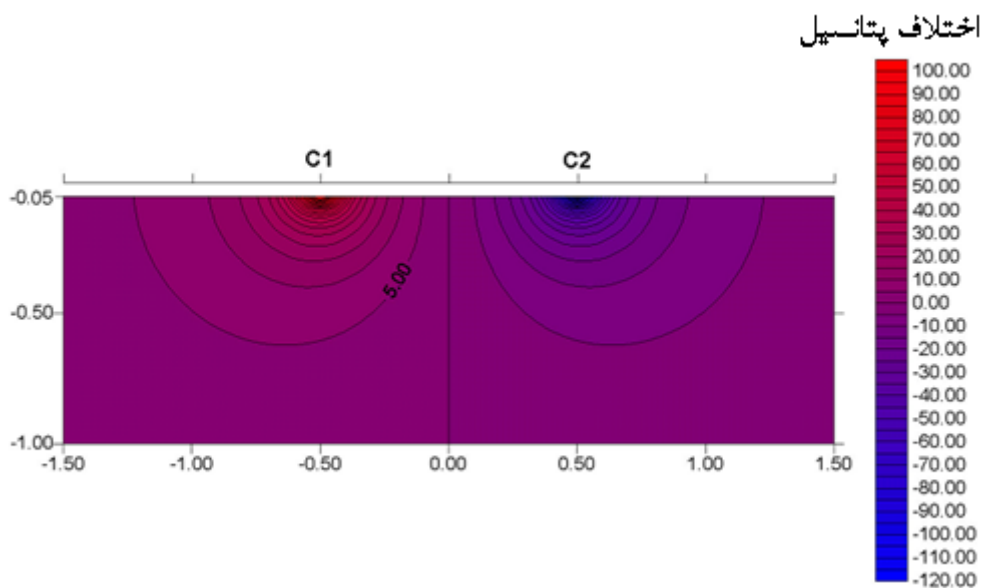
شکل ۲-۱- نمایش سطوح هم پتانسیل و چگونگی شارش خطوط جریان [After Loke, 2001]

در عمل، تمامی برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی حداقل با استفاده از دو الکتروود جریان، انجام می‌گیرد که یکی از این الکتروودها به عنوان قطب مثبت^۱ و دیگری به عنوان قطب منفی^۲ تعریف می‌شود. همچنین، اختلاف پتانسیل الکتریکی، توسط یک جفت الکتروود دیگر اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۲-۲) دو الکتروود جریان که به فاصله یک متر از هم فاصله دارند و جریان یک آمپری را به داخل زمین می‌فرستند را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در اثر برخورد خطوط جریان به مرز جدایش بین دو محیط، این خطوط شکسته می‌شوند. شکل (۲-۳)، نحوه توزیع پتانسیل الکتریکی ایجاد شده در اثر شارش جریان بوسیله یک جفت الکتروود را نشان می‌دهد. اندازه پتانسیل الکتریکی ایجاد شده توسط دو الکتروود جریان در نقطه‌ای از یک زمین همگن و همسانگرد، طبق رابطه (۲-۷) محاسبه می‌شود [Loke, 2004a]

^۱Positive current
^۲Negative current



شکل ۲-۲- سطوح هم‌پتانسیل و جهت شارش جریان حاصل از یک دوقطبی جریان در یک محیط سه‌بعدی [After Knodel, 2008]



شکل ۲-۳- نحوه توزیع پتانسیل ایجاد شده توسط یک جفت الکتروود جریان [After Loke, 2004a]

$$\phi = \frac{\rho I}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{c1}} - \frac{1}{r_{c2}} \right) \quad (7-2)$$

که در رابطه فوق:

r_{c1} : فاصله نقطه مورد نظر از الکتروود C₁

r_{c2} : فاصله نقطه مورد نظر از الکتروود C₂

می‌باشند.

در برداشت‌های صحرائی با استفاده از یک آرایش خاص، اختلاف پتانسیل ایجاد شده در زمین اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۲-۴)، نمونه‌ای از یک آرایش چهار الکترودی نشان داده شده است. در این شکل، الکترودهای C_1 و C_2 نشان دهنده الکترودهای جریان و الکترودهای P_1 و P_2 نشان دهنده الکترودهای پتانسیل می‌باشند. در این آرایش چهار الکترودی، اختلاف پتانسیل الکتریکی ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل، طبق رابطه (۲-۸) محاسبه می‌شود.

$$\Delta\phi = \frac{\rho l}{2\pi r} \left(\frac{1}{r_{c_1p_1}} - \frac{1}{r_{c_2p_1}} - \frac{1}{r_{c_1p_2}} + \frac{1}{r_{c_2p_2}} \right) \quad (۲-۸)$$

که در رابطه فوق:

$\Delta\phi$: اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکترود پتانسیل

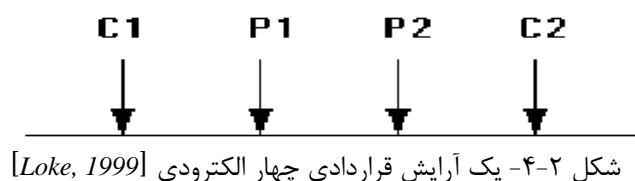
$r_{c_1p_1}$: فاصله الکترود C_1 از الکترود P_1

$r_{c_2p_1}$: فاصله الکترود C_2 از الکترود P_1

$r_{c_1p_2}$: فاصله الکترود C_1 از الکترود P_2

$r_{c_2p_2}$: فاصله الکترود C_2 از الکترود P_2

می‌باشند.



در عمل، برداشت‌های صحرائی بر روی زمین‌های غیرهمگن که مقاومت ویژه الکتریکی آنها در سه جهت محورهای مختصات متغیر است، انجام می‌گیرد و هدف از این برداشت‌ها به دست آوردن اندازه مقاومت ویژه الکتریکی زمین می‌باشد. بعد از اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل ($\Delta\phi$)، می‌توان اندازه مقاومت ویژه ظاهری زمین را طبق رابطه (۲-۹) محاسبه نمود [Loke, 2004a].

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_a = k \frac{\Delta\theta}{I} \\ K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{c1p1}} - \frac{1}{r_{c2p1}} - \frac{1}{r_{c1p2}} + \frac{1}{r_{c2p2}} \right)} \end{array} \right. \quad (9-2)$$

که در رابطه فوق:

ρ_a : مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری زمین

K : فاکتور هندسی^۱ برای آرایش مربوطه

می باشند.

همان طور که در شکل (۵-۲) نشان داده شده است، فاکتور هندسی، بستگی به چگونگی چینش چهار الکترود در هر آرایش دارد. دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه، معمولاً مقدار مقاومت^۲ $R (= \Delta\theta/I)$ زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. رابطه بین این مقاومت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری به صورت رابطه (۱۰-۲) تعریف می‌شود.

$$\rho_a = k R \quad (10-2)$$

R : مقاومت زمین که توسط دستگاه ژئوالکتریک، اندازه‌گیری می‌شود

K : فاکتور هندسی

می باشند.

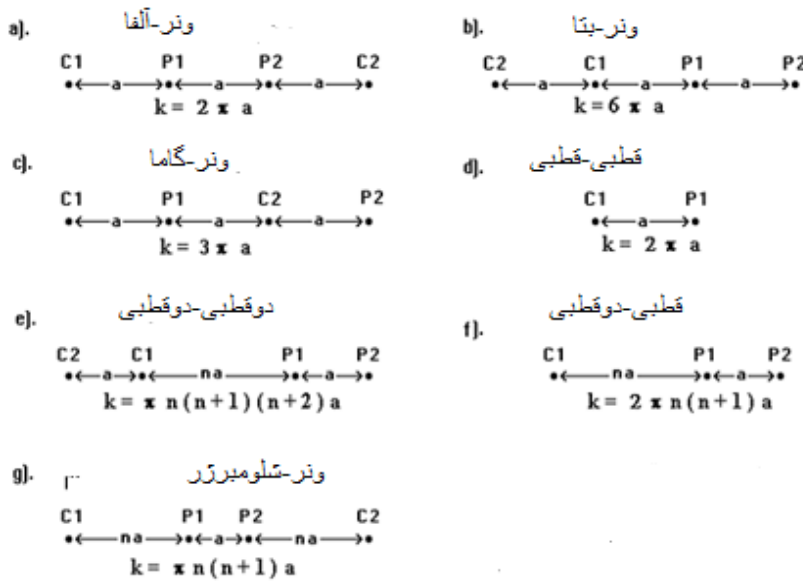
مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده در رابطه فوق، مقاومت ویژه الکتریکی واقعی زمین نیست، بلکه مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری^۳ زمین می‌باشد. در صورتی، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده، با مقدار مقاومت ویژه الکتریکی واقعی زمین برابر می‌شود که زمین تحت اندازه‌گیری، همگن و همسانگرد باشد [Loke, 2004a; Mooney, 1980].

¹ Geometrical factor

² Resistance

³ Apparent resistivity

در شکل (۲-۵)، آرایش‌های رایج در اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه، همراه با فاکتورهای هندسی مربوطه نشان داده شده‌اند. یکی از مشکلاتی که در برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی وجود دارد، جفت‌شدگی الکترومغناطیسی می‌باشد. برای کاهش اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، معمولاً از آرایش‌هایی استفاده می‌شود که این مشکل در آنها وجود نداشته باشد، مثل آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی^۱ و قطبی-دوقطبی^۲ [Loke, 2004a; Loke, 1999; Reynolds, 1987].



$k =$ فاکتور هندسی

شکل ۲-۵- آرایش‌های رایج در برداشت‌های مقاومت ویژه، به همراه با فاکتورهای هندسی [After Loke, 1999]

در بحث‌های قبلی، چگونگی اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری به کمک برداشت‌های ژئوالکتریکی، توضیح داده شد ولی شناسایی نوع ساختارهای زمین‌شناسی از روی مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده، آگاهی از مقادیر مقاومت ویژه مربوط به مواد مختلف زیرسطحی، و زمین‌شناسی مناطق تحت مطالعه، لازم می‌باشد. به همین منظور در قسمت (۲-۳)، در مورد مقاومت ویژه الکتریکی برخی از مواد تشکیل دهنده پوسته زمین بحث و بررسی‌های لازم انجام می‌گیرد.

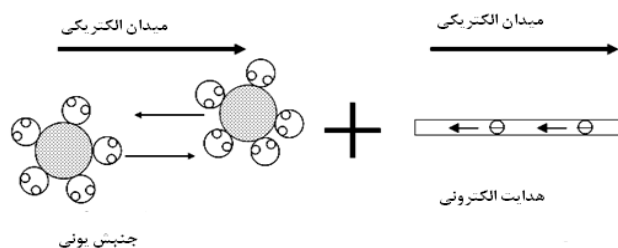
^۱-dipole-dipole
^۲-pole-dipole

۲-۳- خواص الکتریکی مواد مختلف در زمین

مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده پاسخ توده‌ای از خاک یا سنگ (شامل ماتریکس، کانی‌های تشکیل دهنده، تخلخل، سیالات درون حفره‌ای و ...)، به جریان الکتریکی عبور داده شده از این توده می‌باشد. به همین منظور جهت انجام تفسیرهای مناسب از روی مقاومت ویژه‌های الکتریکی جمع‌آوری شده، آشنایی کلی با ساختار سنگ یا کانی و همچنین عکس‌العمل قسمت‌های مختلف موجود در آن، در مقابل عبور جریان، لازم می‌باشد.

شارش جریان الکتریکی در مواد داخل زمین در عمق‌های کم، از دو طریق صورت می‌پذیرد. این دو طریق عبارتند از طریقه شارش الکترونی^۱ و طریقه شارش الکترولیتی^۲ که در شکل (۲-۶) نشان داده شداند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود است، میدان الکتریکی ایجاد شده جهت شارش جریان الکتریکی با مجموع میدان حاصله از این دو پدیده برابر می‌باشد. در شارش الکترونی، شارش جریان از طریق حرکت الکترون‌های آزاد بوجود می‌آید، مانند شارش جریان در فلزات. در شارش الکترولیتی، شارش جریان از طریق جنبش یون‌های موجود در داخل آب‌های زیرزمینی صورت

می‌گیرد [Reynolds, 1987; Mooney, 1980].



شکل ۲-۶- شارش جریان در محیط، توسط شارش الکترولیتی و الکترونی [After Fratta, 2006]

¹Electronic current

²Electrolytic current

با توجه به نقش بالای شارش الکترولیتی در سنگ‌ها و مواد اشباع از آب، برخی از شاخص‌های مربوط به شارش الکترولیتی که با افزایش آنها اندازه مقاومت ویژه الکتریکی کاهش می‌یابد، به صورت زیر، می‌باشند [Mooney, 1980]:

(۱) حجمی از سنگ که توسط آب اشغال شده است

(۲) میزان شوری و مقدار یون‌های موجود در آب درون حفره‌ای

(۳) ارتباط بین فضاهای خالی (نفوذپذیری)^۱

(۴) میزان درجه حرارت

مقاومت ویژه الکتریکی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها و مواد شیمیایی، در شکل (۲-۷) آورده شده‌اند [Keller and Frischknecht, 1966; Daniels and Albery, 1966; Telford et al., 1990]. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، سنگ‌های آذرین^۲ و دگرگونی^۳ دارای مقاومت ویژه الکتریکی بالایی هستند. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌های آذرین و دگرگونی در حد خیلی بالایی بستگی به میزان شکستگی‌های موجود در آنها و درصد پرشدگی این شکستگی‌ها از سیالات زیرزمینی دارد. بنابراین، گستره مقاومت ویژه الکتریکی یک نمونه سنگی می‌تواند از ۱۰۰۰ اهم‌متر تا ۱۰ میلیون اهم‌متر متغیر باشد. همچنین، خشک یا مرطوب بودن سنگ، تاثیر خیلی زیادی روی اندازه مقاومت ویژه دارد [Loke, 2004a; Loke, 1999].

به طور کلی چون سنگ‌های رسوبی در مقایسه با سنگ‌های آذرین متخلخل‌تر و حاوی آب بیشتری می‌باشند، در نتیجه، این سنگ‌ها دارای مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی کمتری نسبت به سنگ‌های آذرین هستند. گستره مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌های رسوبی از ۱۰ اهم‌متر تا ۱۰۰۰۰ اهم‌متر می‌باشد. با این وجود، مقاومت ویژه الکتریکی اغلب سنگ‌های رسوبی کمتر از ۱۰۰۰

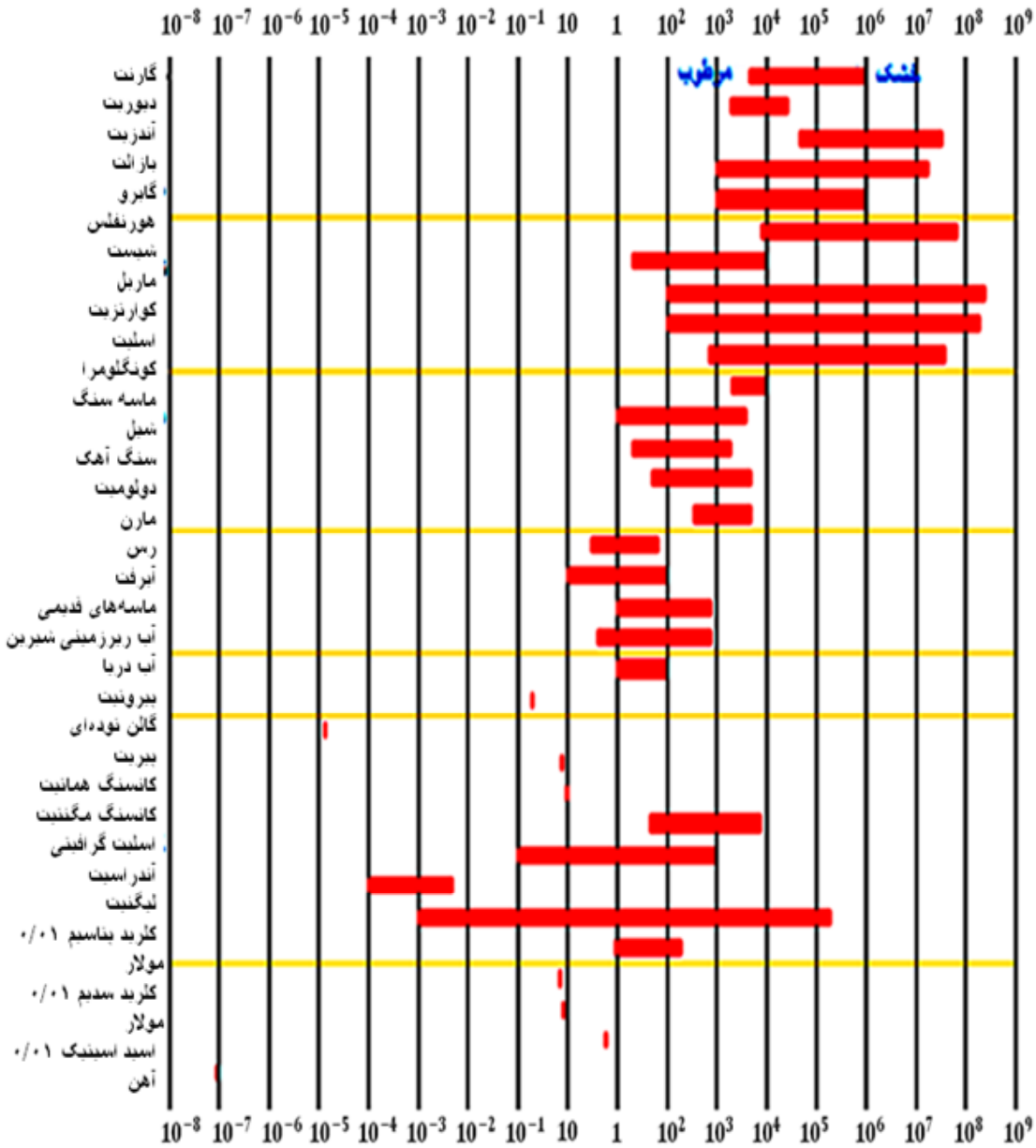
¹Permeability

²Igneous rocks

³Metamorphic rocks

اهمتر می باشد. در این سنگ ها مقدار مقاومت ویژه الکتریکی، بستگی به میزان تخلخل و نفوذپذیری

سنگ و میزان شوری آب محتوی موجود در خلل و فرج سنگ دارد [Loke, 2004a]



شکل ۲-۷- گستره مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف در زمین [After Loke, 2004a]

مقدار مقاومت ویژه الکتریکی رسوبات تحکیم نیافته^۱ در مقایسه با سنگ‌های رسوبی، پایین می‌باشد. گستره مقدار مقاومت ویژه الکتریکی رسوبات تحکیم نیافته، بین ۱۰ اهم‌متر تا ۱۰۰۰ اهم‌متر قرار دارد. اندازه مقاومت ویژه الکتریکی در رسوبات تحکیم نیافته به همان اندازه که به میزان تخلخل^۲ (حفراتی که اشباع از آب هستند) و درصد آب بین منفذی موجود در رسوبات بستگی دارد، به مقدار رس^۳ موجود در رسوبات نیز بستگی دارد. معمولاً خاک‌های رسی دارای مقاومت ویژه الکتریکی پایین‌تری هستند. اندازه مقاومت ویژه یک سنگ بستگی به چندین پارامتر مختلف نظیر تخلخل، نفوذپذیری، درجه اشباع شده‌گی و غلظت نمک‌های محلول و ... دارد، به همین خاطر، گستره مقاومت ویژه انواع مختلفی از سنگ‌ها و خاک‌ها باهم هم‌پوشانی دارند [Loke, 2004a].

یکی از روابط ریاضی ساده‌ای که بین مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک سنگ متخلخل و درصد اشباع شده‌گی از سیال آن را وجود دارد، قانون آرچی^۴ می‌باشد (رابطه ۲-۱۱). این قانون برای انواع معینی از سنگ‌ها، رسوبات و به ویژه برای موادی که دارای مقدار رس پایین هستند قابل تعمیم می‌باشد. در این قانون فرض بر این می‌باشد که شارش الکتریکی تنها از طریق سیال پرکننده حفرات صورت می‌گیرد [Keller and Frischknecht, 1966].

$$\rho = a\rho_w\varphi^{-m} \quad (2-11)$$

که در رابطه فوق

ρ : مقاومت ویژه الکتریکی سنگ

ρ_w : مقاومت ویژه آب پرکننده حفرات

φ : درصد پرشدگی کل فضای حفره توسط سیال

m : فاکتور تجربی

¹Unconsolidated sediments

²Porosity

³Clay content

⁴Archies law

a: فاکتور تجربی

می باشند.

. m و a دو فاکتور تجربی هستند که برای هر نوع سنگی با آزمایش تعیین می شوند. معمولاً، $1.3 \leq m \leq 2.5$ و $0.5 \leq a \leq 2.5$ می باشد. در پیش فرض نرم افزار *Res2Dinv* اندازه m، در حدود ۲ در نظر گرفته می شود. رابطه ۲-۱۱ برای مقادیر نمونه های سنگی که مقدار رس پایینی دارند، جواب قابل قبولی را ارائه می کند [Keller and Frischknecht, 1966].

مقدار مقاومت ویژه الکتریکی سولفیدهای فلزی (از قبیل پیروتیت^۱، گالن^۲ و پیریت^۳) معمولاً کمتر از ۱ اهم متر می باشد. با این وجود، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک توده معدنی، متفاوت از مقاومت ویژه الکتریکی تک تک بلورهای^۴ تشکیل دهنده آن می باشد. مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک توده سنگی بستگی به فاکتورهای دیگری مثل طبیعت توده سنگ^۵ (توده ای بودن یا افشان^۶ بودن آن در سنگ میزبان) دارد. وجود کانی های غیرفلزی رسانا در یک تجمع کانساری (نظیر گرافیت)، باعث ایجاد مشکل در اکتشاف کانسارهای فلزی می شود، به عنوان مثال، برداشت های روش مقاومت ویژه الکتریکی نمی توانند گرافیت و پیریت را از هم متمایز کنند [Loke, 2004a].

۲-۴- برداشت های روش مقاومت ویژه الکتریکی

بعد از آشنایی با تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی، و گستره مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف در زمین، نوبت به انواع روش های در اندازه گیری مقدار مقاومت ویژه الکتریکی زمین می رسد. به طور کلی برداشت های مقاومت ویژه الکتریکی به دو روش انجام می گیرند:

¹Pyrrhotite

²Galena

³Pyrite

⁴Crystal

⁵Nature of the ore body

⁶Disseminated

الف) روش سونداژزنی^۱

ب) روش پروفیل زنی^۲

با توجه به نوع ساختار زمین‌شناسی منطقه برداشت، می‌توان یکی از روش‌های سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی (VES) و یا پروفیل زنی مقاومت ویژه الکتریکی (HP) را انتخاب کرد.

۲-۴-۱- روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی

در روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی، تغییرات عمقی یا قائم مقاومت ویژه مواد یا لایه‌های زیرسطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برداشت سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از یک آرایش الکتروودی معین در روی زمین، به این شکل انجام می‌گیرد که طول آرایش مرتباً پس از هر بار اندازه‌گیری افزایش داده می‌شود، در حالی که مرکز آرایش در تمام اندازه‌گیری‌ها در یک نقطه از روی زمین، ثابت نگه داشته می‌شود. بدین ترتیب برای هر طول آرایش یک مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای زمین تحت مطالعه در آن نقطه به دست می‌آید که با پردازش و تفسیر این داده‌ها، می‌توان ضخامت و مقاومت ویژه لایه‌های زیرسطح زمین در آن نقطه (مرکز آرایش) را تعیین نمود. مقادیر مقاومت ویژه جمع‌آوری شده در روش سونداژزنی الکتریکی، بر حسب فاصله الکتروودی، بر روی نمودارهای لگاریتمی- لگاریتمی ترسیم می‌شوند. در شکل (۲-۸) طریقه سونداژزنی توسط چند آرایش نشان داده شده است. اگرچه برای تفسیر شیب لایه‌ها روش‌هایی پیشنهاد شده است، ولی روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی در صورتی بهترین جواب را به دست می‌دهد که لایه‌های زیر سطحی افقی باشند [Milson, 1989]. فرض دیگری که در روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی (به طور کلی در برداشت‌های یک‌بعدی) در نظر گرفته می‌شود، این است که زمین، یک‌بعدی است و تغییرات جانبی ناچیز می‌باشد و مقاومت ویژه فقط در جهت قائم تغییر می‌کند که این حالت در شکل

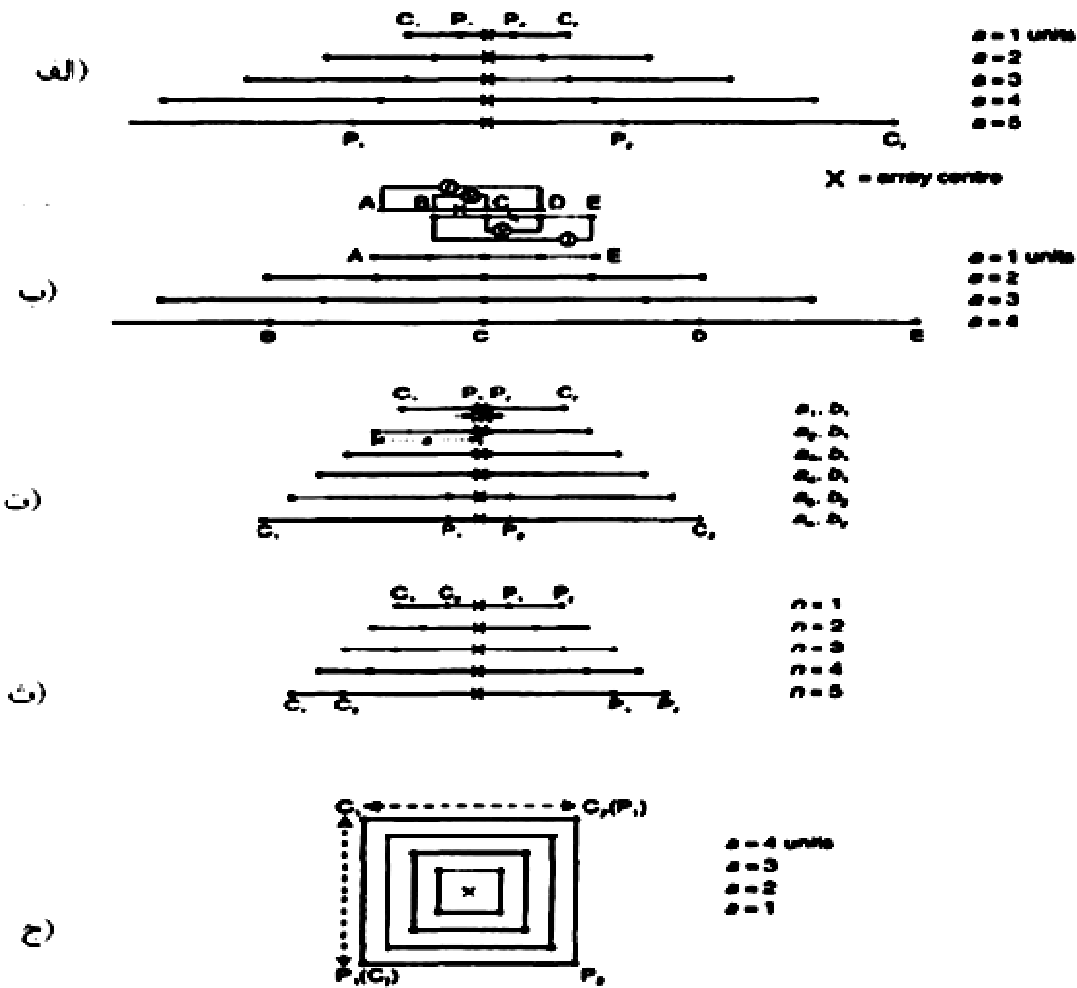
¹Resistivity sounding

²Resistivity profiling

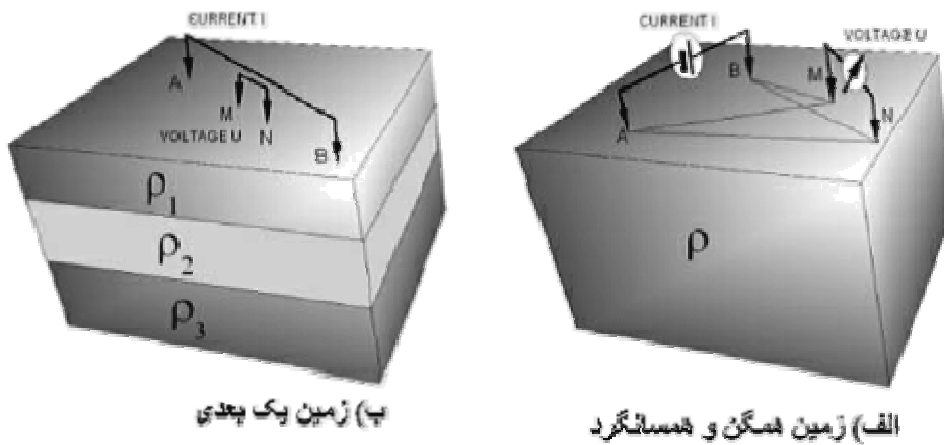
(۲-۹-ب) نشان داده شده است. در عمل، این فرض برای تغییرات مقاومت ویژه غیر متعارف است،

زیرا زمین یک محیط غیر همگن می باشد [Kirsch, 2006].

مهم ترین محدودیت روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به تغییرات جانبی مقاومت ویژه الکتریکی زمین می باشد که در اکثر مواقع با این مشکل مواجه می باشیم. چون، روش مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت ویژه حجمی از خاک را اندازه گیری می کند، که متاثر از تغییرات جانبی و هم تغییرات قائم خواهد بود (البته به نسبت های مختلف) و چون روش سونداژزنی، مقاومت ویژه، تغییرات جانبی مقاومت ویژه را به اشتباه به تغییرات عمقی نسبت می دهد، بنابراین تفسیر داده های سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی از واقعیت، دور می شود. در اکثر مطالعات مربوط به کارهای مهندسی و محیط زیستی، چون مقاومت ویژه الکتریکی به طور افقی در فاصله های کوتاه به شدت تغییر می کند، بنابراین استفاده از روش سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی برای انجام کارهای مهندسی مناسب نمی باشد [Loke, 2004a].



شکل ۲-۸- بسط آرایش‌های مختلف در روش سوندازنی، الف) آرایش ونر، ب) آرایش آفست ونر، ت) آرایش شلومبرژر، ث) آرایش دوقطبی-دوقطبی، ج) آرایش مربعی [Mooney, 1989]



شکل ۲-۹- نمایش بعددار بودن زمین و اثر آن بر روی برداشت‌های الکتریکی، الف) یک زمین همگن و همسانگرد (بدون بعد)، ب) یک زمین با لایه‌های افقی (زمین یک بعدی) [After Kirsch, 2006]

ارزیابی یک منحنی سونداژ ممکن است که چندین پاسخ معادل داشته باشد. ولی وظیفه یک ژئوفیزیکدان انتخاب مدلی است که بیشترین انطباق را با ساختارهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی شناخته شده منطقه داشته باشد. روش دیگر برای انتخاب پاسخ مناسب، مقایسه با سونداژهای مجاور می‌باشد. بدین ترتیب که امکان وصل کردن نشانه‌های عمقی مربوطه در سونداژ بعدی به نحوی که یک مقطع صحیح و منطقی از نظر زمین‌شناسی به دست آید، وجود داشته باشد. همان‌طور که در مغزه‌گیری، می‌توان بر اساس نوع سنگ‌ها، مرز لایه‌بندی را مشخص نمود، در سونداژنی هم می‌توان ضخامت لایه‌ها را بر اساس اندازه مقاومت ویژه ظاهری تخمین زد [Vogelsang, 1995].

۲-۴-۱-۱- انتخاب آرایش مناسب برای روش سونداژنی الکتریکی

به خاطر اینکه در روش سونداژنی مقاومت ویژه الکتریکی، مرکز آرایش یا همان ایستگاه، ثابت می‌باشد، در نتیجه، قابل حمل بودن دستگاه زیاد مهم نیست (نسبت به روش پروفیل زنی). شاخص دیگری که می‌توان برای انتخاب آرایش مناسب در نظر گرفت، وجود ابزارهای مناسب برای تفسیر داده‌های حاصله می‌باشد. آرایش شلومبرژر (شکل ۲-۸-ت)، با توجه به شاخص‌های ذکر شده و نیز به خاطر حساسیت پایین نسبت به تغییرات جانبی مقاومت ویژه (نسبت به آرایش ونر) و برخورداری از قدرت بالای تفکیک لایه‌ها به طور عمودی، یک آرایش مناسب برای روش سونداژنی می‌باشد.

۲-۴-۱-۲- نمایش داده‌های حاصله از به کارگیری روش سونداژنی الکتریکی

پارامترهایی که در برداشت مقاومت ویژه الکتریکی با روش سونداژنی، باید ثبت شوند به صورت

زیر می‌باشند [Mooney, 1980]:

متغیر مستقل: فاصله الکتریکی

متغیر وابسته: مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری

اطلاعات کمی: نوع آرایش الکترودی، آزمون خط برداشت، موقعیت جغرافیایی مرکز الکترودها

امروزه با پیشرفت امکانات نرم‌افزاری و کامپیوتری کار تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

بسیار تسهیل یافته است. برای مثال، می‌توان از نرم افزار IX1D برای ترسیم و تفسیر داده‌های سونداژزنی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده کرد.

۲-۴-۲- روش پروفیل زنی مقاومت ویژه الکتریکی

اگر هدف از برداشت مقادیر مقاومت ویژه زمین، تعیین تغییرات جانبی مقاومت ویژه آن باشد، از روش پروفیل زنی مقاومت ویژه الکتریکی استفاده می‌شود. برای مثال، تعیین موقعیت یک دایک قائم یا گسلی که در زیر روباره‌های کم ضخامت و نسبتاً یکنواخت قرار گرفته است، می‌تواند اهداف خوبی برای روش پروفیل زنی مقاومت ویژه باشند.

معمولاً، پروفیل زنی الکتریکی، برای تعیین چگونگی توزیع مقاومت ویژه در مناطق زیرسطحی کم عمق به کار گرفته می‌شود. در این روش مرکز آرایش بعد از هر قرائت جابجا می‌شود تا قرائت بعدی در نقطه مجاور انجام گیرد. به خاطر اینکه کل آرایش بعد از هر بار قرائت به نقطه بعدی منتقل می‌شود، در نتیجه زمان لازم برای هر قرائت نسبت به روش سونداژزنی بیشتر می‌باشد. مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از روش پروفیل زنی نیز همانند روش سونداژزنی، بستگی به درجه اشباع شدگی زمین از سیال، سنگ‌شناسی^۱، تخلخل، نفوذپذیری و مقاومت یونی سیالات زیرسطحی دارد [Parasnis, 1997].

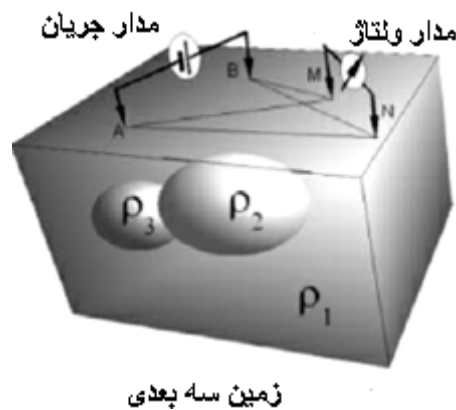
همان‌طور که در قسمت ۲-۴-۱، اشاره شد، بزرگترین محدودیت روش سونداژزنی، در نظر نگرفتن تغییرات جانبی مقاومت ویژه الکتریکی زمین می‌باشد. یک مدل دقیق‌تر از زمین، مدل دوبعدی (2D) می‌باشد که در آن خصوصیات الکتریکی زمین هم در جهت قائم و هم در جهت افقی تغییر می‌کند (شکل ۲-۱۰). از لحاظ نظری یک برداشت سه‌بعدی (3D) و یک مدل تفسیر سه بعدی، نتایج دقیق‌تری را در مورد تغییرات مقاومت ویژه در اختیار مفسر قرار می‌دهند، ولی به خاطر مسائل

¹lithology

اقتصادی، کاوش‌های سه‌بعدی کمتر مورد استقبال واقع شده‌اند [Dahlin, 1996].

امروزه معمولاً از ترکیب روش سونداژزنی مقاومت‌ویژه و پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه استفاده می‌شود. همچنین به خاطر پیشرفت سیستم‌های کامپیوتری جهت جمع‌آوری داده‌ها، از روش تصویربرداری الکتریکی به جای روش چهار الکترودی قدیمی استفاده می‌شود. در دهه‌های اخیر به خاطر گسترش روش‌های مدل‌سازی، روش تصویربرداری الکتریکی محبوبیت ویژه‌ای پیدا کرده است.

[Griffiths and Barker, 1993; Loke and Barker, 1996; Dahlin, 1996].



شکل ۲-۱۰- نمایش بعددار بودن زمین [After Kirsch, 2006]

۲-۴-۱- انتخاب آرایش مناسب برای روش پروفیل‌زنی الکتریکی

به خاطر اینکه در روش پروفیل‌زنی، کل آرایش بر روی خط برداشت جابجا می‌شود، در نتیجه سعی می‌شود که از آرایش‌هایی استفاده شود که این جابجایی در آنها به سهولت انجام گیرد. همچنین، منبع انرژی مورد استفاده در روش پروفیل‌زنی، به دلیل جابجایی دائمی، معمولاً کوچک و سبک انتخاب می‌شود. آرایش ونر جزء آرایش‌هایی می‌باشد که بیشترین استفاده را در پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه الکتریکی دارد. با توجه به یکسان بودن فاصله میان الکترودها در آرایش ونر، احتمال خطا کمتر می‌باشد. آرایش دوقطبی- دوقطبی در برداشت‌های مربوط به IP بیشترین کاربرد را دارد

[Milson, 1989].

۲-۴-۲- نمایش داده‌های حاصله از بکارگیری روش پروفیل‌زنی الکتریکی

اطلاعات و نکاتی که در روش پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه الکتریکی ثبت می‌شوند به صورت زیر می‌باشند [Mooney, 1989]:

متغیر مستقل: فاصله مرکز آرایش از یک نقطه مبنا^۱

متغیر وابسته: مقاومت‌ویژه ظاهری (ρ_a)

اطلاعات کمکی: نوع آرایش الکترودی، فاصله الکترودی، موقعیت جغرافیایی مرکز الکترودها در برداشتهای مقاومت‌ویژه می‌توان عملیات پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه الکتریکی را در طول یک خط پروفیل برای یک یا چند مقدار متفاوت فاصله الکترودی تکرار نمود. با مقایسه نتایج به دست آمده می‌توان تغییرات عمقی را نیز کنترل نمود. علاوه بر پروفیل‌زنی مقاومت‌ویژه الکتریکی در طول یک خط، می‌توان در طول خطوط موازی پروفیل‌های برداشت را انجام داد، در این حالت می‌توان به جای یک مقطع از زمین، یک منطقه را تحت پوشش قرار داد. در نهایت می‌توان داده‌های جمع‌آوری شده از خطوط موازی را به صورت یک نقشه کانتوری^۲ درآورد [Mooney, 1980]

۲-۵- شبه مقطع قائم مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش ترسیم آن

در قسمت‌های قبلی راجع به چگونگی برداشت صحرائی مقادیر مقاومت‌ویژه الکتریکی توضیح داده شد. بعد از جمع‌آوری داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی باید این داده‌ها را به صورت نقشه‌های قابل تفسیر و قابل فهم تبدیل نمود به این نقشه‌ها اصطلاحاً شبه مقطع قائم مقاومت‌ویژه الکتریکی می‌گویند. به همین منظور در این قسمت مفاهیم مربوط به این شبه مقطع توضیح داده می‌شود. برای رسم داده‌های اولیه یک اکتشاف دوبعدی الکتریکی، از روش‌های مقطع‌گیری الکتریکی معمول استفاده می‌شود. در این روش مختصات افقی نقطه برداشت در وسط مجموعه الکترودهای به

¹Reference point

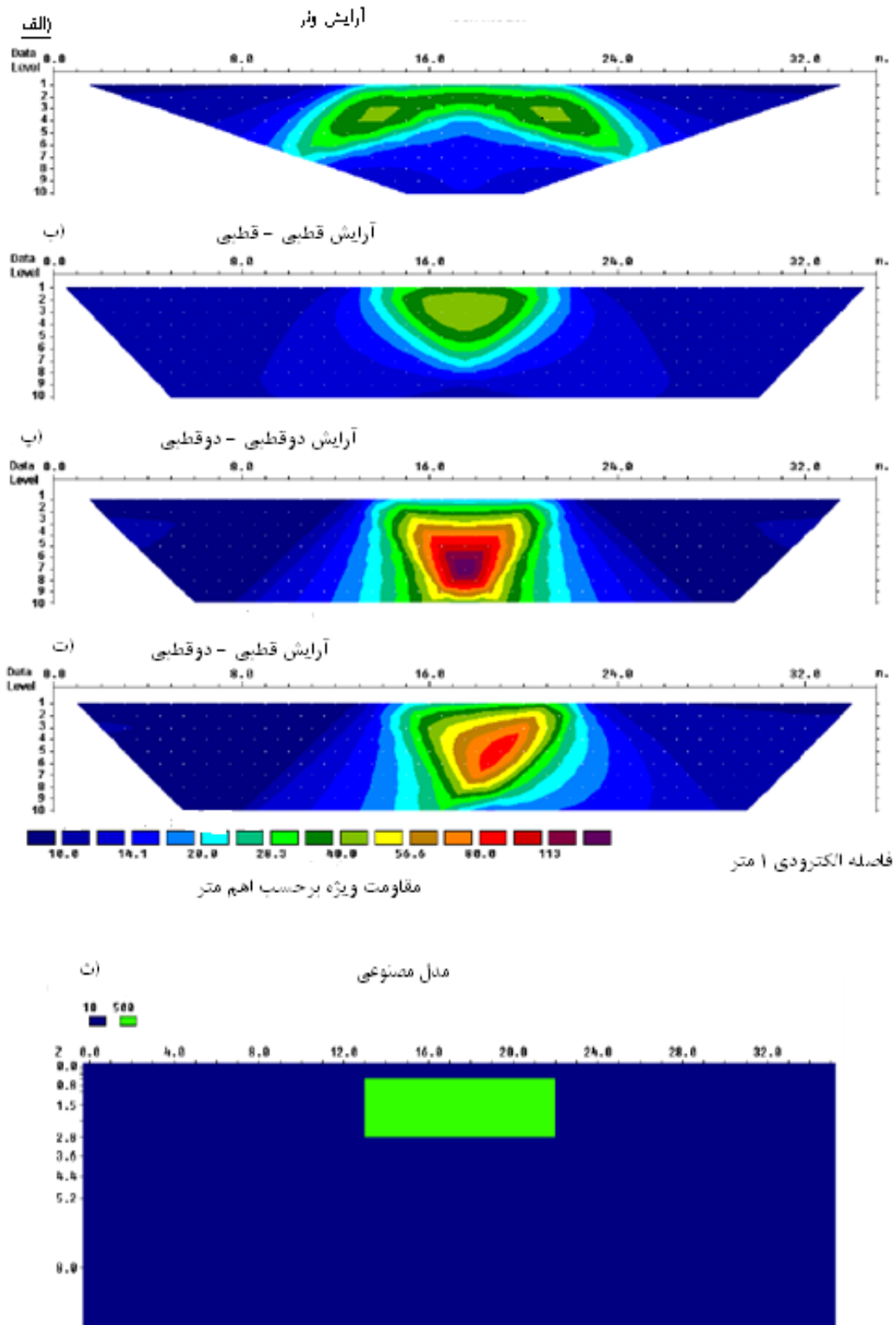
²Countour map

کار رفته در نظر گرفته می‌شود، به عنوان مثال می‌توان آرایش‌هایی مثل ونر و شلومبرگر را نام برد. مختصات قائم نقطه برداشت، فاصله‌ای متناسب با جدایش بین الکترودها می‌باشد. برای برداشت‌های پلاریزاسیون القایی که معمولاً از آرایش دوقطبی-دوقطبی استفاده می‌شود، روش متداول آن است که نقطه برداشت را در محل تقاطع دو خطی در نظر می‌گیرند که از نقطه وسط دوقطبی C_2-C_1 (الکترودهای جریان) و دوقطبی P_2-P_1 (الکترودهای پتانسیل) با زاویه 45° درجه نسبت به افق خارج می‌شوند. البته این زاویه 45° درجه به هیچ وجه نشان دهنده زاویه شار جریان یا خطوط هم‌پتانسیل با سطح زمین نمی‌باشد. روش دیگر برای رسم داده‌ها، قراردادن نقطه برداشت در عمق میانه^۱ یا شبه عمق^۲ آرایش مربوطه می‌باشد [Edward, 1977]. این مقادیر شبه عمق، بر مبنای مقادیر حساسیت برای یک نیم‌فضای همگن به دست می‌آیند. توضیحات مربوط به حساسیت یک آرایش در قسمت (۲-۶-۱) آورده شده است.

یک شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی، تصویری بسیار تقریبی و آشفته از گسترش مقاومت ویژه زیرسطحی است. همچنین شکل هر شبه مقطع، علاوه بر وابستگی به نوع ساختار زمین‌شناسی به نوع آرایش به کار رفته نیز بستگی دارد. به همین خاطر در شکل (۲-۱۱)، برای یک ساختار زمین‌شناسی معین، شبه مقطع به دست آمده از هر آرایش نسبت به آرایش دیگر متفاوت می‌باشد. به طوری که در این شکل دیده می‌شود، آرایش قطبی-قطبی، بیشترین پوشش افقی را دارد، در حالی که پوشش بدست آمده با آرایش ونر، با افزایش فاصله الکترودی بسیار سریعتر کاهش می‌یابد [Loke, 2004a].

¹Median depth

²Pseudodepth



شکل ۲-۱۱- شبه مقطع به دست آمده برای آرایش‌های مختلف بر روی یک مدل مصنوعی [After Loke, 2004a]

۲-۶- مقایسه آرایش‌های الکترودی مختلف

همان‌گونه که در قسمت (۲-۴) توضیح داده شد، برداشت مقاومت ویژه الکتریکی چه در حالت سونداژزنی و چه در حالت پروفیل‌زنی نیاز به یک آرایش الکترودی مناسب دارد. بنابراین شناخت مزایا و معایب آرایش‌های الکترودی، لازم و ضروری می‌باشد. به همین دلیل، در این قسمت به بررسی برخی از آرایش‌های پرکاربرد در برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی پرداخته می‌شود.

عمق نفوذ مد نظر برای تصویربرداری مقاومت ویژه الکتریکی، پوشش افقی محدوده برداشت مقاومت ویژه الکتریکی و میزان دقت داده‌های برداشت شده متاثر از نوع آرایشی است که برای برداشت صحرائی خاص انتخاب می‌شود [Van Nostrand, 1966; Cook, 1966; Koefoed, 1979]. برای انتخاب یک آرایش مناسب جهت برداشت صحرائی، باید به فضای موجود برای گسترش آرایش، سختی و کارایی آرایش برای هدف مورد نظر، ساختار زمین‌شناسی منطقه، حساسیت دستگاه اندازه‌گیری و سطح نوفه زمینه توجه کرد [Reynolds, 1997; Loke, 2004a; Loke, 1999]. آرایش‌های رایج که در برداشت‌های الکتریکی استفاده می‌شوند عبارتند از ونر، دوقطبی- دوقطبی، ونر- شلومبرژر، قطبی- قطبی، دوقطبی [Loke, 1999; Dobrin and Savit, 1988; Ward, 1990].

چهار مولفه اصلی یک آرایش عبارتند از [Loke, 2004a]:

(۱) عمق نفوذ

(۲) حساسیت آرایش به تغییرات جانبی و عمقی مقاومت ویژه الکتریکی در داخل زمین

(۳) پوشش افقی داده‌ها

(۴) نسبت سیگنال به نویز

برای به دست آوردن عمق نفوذ و میزان حساسیت یک آرایش نسبت به تغییرات عمقی و

جانبی مقاومت ویژه زمین، ابتدا باید تابع حساسیت^۱ آرایش مورد نظر را با استفاده از روابط ریاضی مربوطه محاسبه نمود. روش محاسبه این تابع، در قسمت بعد توضیح داده می‌شود.

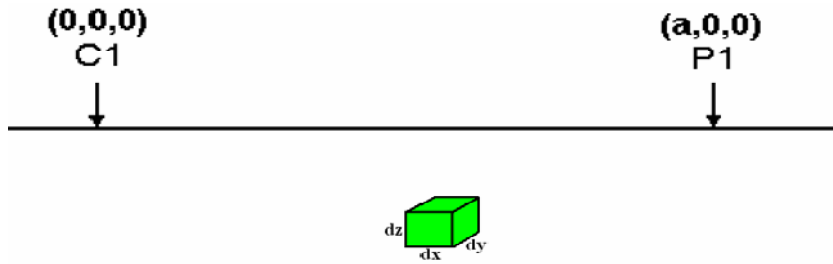
۲-۶-۱- تابع حساسیت برای یک نیم‌فضای همگن و همسانگرد

از روی تابع حساسیت می‌توان دو مولفه عمق نفوذ و حساسیت یک آرایش را برای یک محیط همگن و همسانگرد بدست آورد. تابع حساسیت یک آرایش نشان می‌دهد که تغییر مقاومت ویژه الکتریکی در یک محیط چقدر می‌تواند مقادیر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده توسط آن آرایش را تحت تاثیر قرار دهد. به عبارتی، هر چه مقدار حساسیت یک آرایش بیشتر باشد، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده توسط آن آرایش، بیشتر تحت تاثیر تغییرات قرار می‌گیرد [McGillivray and Oldenburg., 1990].

در شکل (۲-۱۲)، ساده‌ترین حالت آرایش الکتروودی، یعنی آرایش قطبی-قطبی، نشان داده شده است، که در آن تنها یک الکتروود جریان در مبدا مختصات (۰,۰,۰) و یک الکتروود پتانسیل در مختصات (a,۰,۰) قرار داده شده است. به عبارتی فاصله دو الکتروود از هم، a می‌باشد. اگر توسط الکتروود C_۱ جریانی به اندازه یک آمپر به داخل زمین فرستاده شود، در این صورت، پتانسیلی به اندازه \emptyset در محل الکتروود P_۱ ایجاد می‌شود. فرض می‌کنیم که در محدوده کوچکی از محیط فوق‌الذکر با مختصات (x,y,z)، مقاومت ویژه به مقدار جزئی $\delta\rho$ تغییر کند، در این صورت تغییر پتانسیل اندازه‌گیری شده در P_۱، طبق رابطه (۲-۱۲) محاسبه خواهد شد [Loke and Barker, 1995]:

$$\frac{\delta\emptyset}{\delta\rho} = \iiint \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} dx dy dz = \iiint F_{3D}(x,y,z) dx dy dz \quad (2-12)$$

^۱Sensitivity function



شکل ۲-۱۲- پارامترهای لازم برای محاسبه تابع حساسیت در نقطه (x,y,z) در یک نیم‌فضای همگن و همسانگرد [Loke, 2004a]

$F_{3D}(x,y,z)$ نشان دهنده تابع حساسیت آرایش قطبی-قطبی می‌باشد، که در آن تنها، تاثیر دو الکتروود در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن تابع حساسیت برای آرایش‌های دیگر باید به صورت جداگانه سهم هر چهار الکتروود را در پتانسیل ایجاد شده محاسبه کرد [Loke, 2004a].

۲-۶-۲- تابع حساسیت در حالت یک بعدی و عمق کاوش

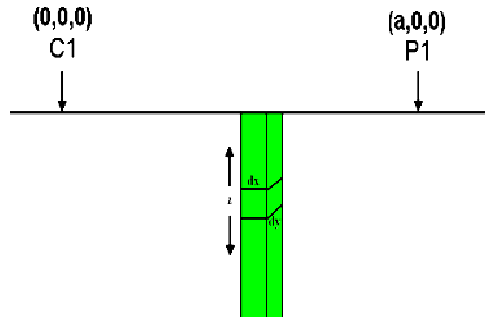
واضح است که در سونداژزنی‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، با افزایش فاصله بین الکتروودی، عمق نفوذ قابل بررسی توسط آرایش مورد نظر نیز افزایش می‌یابد. ولی در اینجا این سوال مطرح می‌باشد که عمق نفوذ برای هر آرایش چقدر می‌تواند باشد؟ یک روش کمی برای محاسبه اندازه عمق قابل بررسی توسط هر آرایش، استفاده از تابع حساسیت می‌باشد. هدف اصلی از به دست آوردن تابع حساسیت برای یک آرایش خاص، محاسبه مقدار تغییر صورت گرفته در اندازه پتانسیل الکتریکی در اثر تغییر مقدار مقاومت‌ویژه لایه‌ای نازکی از زمین است. برای زمین یک‌بعدی، محدوده مقادیر x و y لایه‌ها، از $-\infty$ تا $+\infty$ تغییر می‌کند (شکل ۲-۱۳). بنابراین با انتگرال‌گیری از تابع حساسیت مربوط به آرایش قطبی-قطبی، نسبت به x و y ، در فاصله $-\infty$ تا $+\infty$ خواهیم داشت:

$$F_{1D}(z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} dx dy \quad (2-13)$$

با حل تحلیلی رابطه (۲-۱۳)، رابطه (۲-۱۴) به صورت زیر به دست می‌آید [Roy and

:Apparo, 1971]

$$F_{1D}(z) = \frac{2}{\pi} \frac{z}{(a^2 + 4z^2)^{1.5}} \quad (14-2)$$

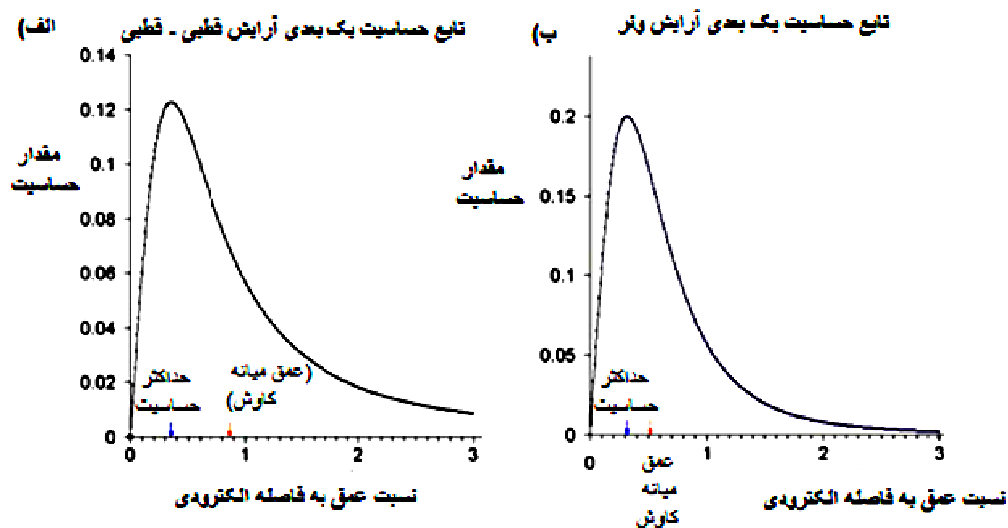


شکل ۲-۱۳- برای زمین یک‌بعدی تنها متغیر تاثیر گذار بر حساسیت، عمق (Z) می‌باشد [Loke, 2004a]

رابطه (۲-۱۴)، مقیاسی برای تعیین مقدار عمق قابل بررسی توسط آرایش قطبی-قطبی می‌باشد. از این رابطه تنها برای زمین یک‌بعدی استفاده می‌شود [Barker, 1991; Merrick, 1997]. در شکل (۲-۱۴)، نمودار تغییرات مقدار حساسیت آرایش‌های قطبی-قطبی و ونر نسبت به فاصله الکتروودی، نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود این نمودارها از صفر شروع می‌شود و در عمق $0.35a$ به حداکثر مقدار خود می‌رسند و سپس به طور مجانب نسبت به محور افقی به سمت صفر میل می‌کنند. در برخی از منابع، از نقطه ماکزیمم به عنوان حداکثر عمق نفوذ آرایش مورد نظر استفاده شده است. در برخی دیگر از منابع نشان داده شده است که تقریب واقعی‌تر از عمق کاوش، عمق میانه کاوش^۱ می‌باشد [Barker, 1991; Edwards, 1977]. عمق میانه کاوش، عمقی است که در آن مساحت زیر منحنی تابع حساسیت شکل (۲-۱۴)، برابر با نصف مساحت کل زیر منحنی می‌باشد. به عبارت دیگر، زمین بالاتر و پایین‌تر از عمق میانه، تاثیر یکسانی روی مقدار پتانسیل اندازه‌گیری شده دارند. طبق شکل (۲-۱۴)، عمق میانه کاوش بیش از دو برابر عمقی است که در آن عمق، حداکثر مقدار حساسیت اتفاق می‌افتد. عمق میانه کاوش می‌تواند به طور تقریبی، قدرت نفوذ

¹Median Depth of investigation

هر آرایش را نشان دهد. این عمق، مستقل از مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده بر روی زمین همگن و همسانگرد می‌باشد. عمق میانه کاوش تنها برای یک زمین همگن و همسانگرد تقریب خوبی را ارائه می‌دهد. هرچند در عمل زمین همگن و همسانگرد نیست. بنابراین، عمق نفوذ یک آرایش در صحرا متفاوت از آن عمقی خواهد بود که در تئوری تعریف می‌شود [Loke, 2004a]. همانطور که در این شکل دیده می‌شود برای عمق‌های کمتر از عمق میانه کاوش، حساسیت آرایش ونر بیشتر از آرایش قطبی-قطبی می‌باشد ولی برای عمق‌های بیشتر حساسیت آرایش ونر کمتر از حساسیت آرایش قطبی-قطبی می‌باشد.



شکل ۲-۱۴- نمودار تابع حساسیت یک‌بعدی برای دو آرایش ونر و قطبی-قطبی [After Loke, 2004a]

در جدول (۲-۱)، عمق میانه کاوش برای آرایش‌های مختلف آورده شده است. برای تعیین ماکزیمم عمق قابل بررسی با استفاده از یک آرایش، باید طول کل آرایش (L) را در ضریب عمقی آن آرایش ضرب کرد (جدول ۲-۱). برای مثال، اگر ماکزیمم طول آرایش ونر، ۳۰۰ متر باشد ($a = 100$)، حداکثر عمق اکتشاف این آرایش، ۵۱.۹ متر خواهد بود. برای آرایش‌های ونر-شلومبرژر و قطبی-دوقطبی، ضریب n را نیز باید در نظر گرفت. معمولاً، برای آرایش‌های چهار الکترودی مثل آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی، ونر-ونر، شلومبرژر از حداکثر طول آرایش (L)، استفاده می‌شود. به

عنوان مثال، اگر در آرایش دوقطبی- دوقطبی، کوچکترین فاصله الکترودی برابر با ۱۰ متر باشد و n برابر ۶ باشد در این صورت، حداکثر عمق قابل بررسی $0.216 \times 6 \times 10$ متر، خواهد بود.

جدول ۱-۲- عمق میانه کاوش (Z_e) برای آرایش‌های مختلف [Loke, 2004a]

Array type	z_e/a	z_e/L	Geometric Factor	Inverse Geometric Factor (Ratio)
Wenner Alpha	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
Wenner Beta	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
Wenner Gamma	0.594	0.198	9.4248	0.10610 (0.6667)
Dipole-dipole				
n = 1	0.416	0.139	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 2	0.697	0.174	75.398	0.01326 (0.0833)
n = 3	0.962	0.192	188.50	0.00531 (0.0333)
n = 4	1.220	0.203	376.99	0.00265 (0.0166)
n = 5	1.476	0.211	659.73	0.00152 (0.0096)
n = 6	1.730	0.216	1055.6	0.00095 (0.0060)
n = 7	1.983	0.220	1583.4	0.00063 (0.0040)
n = 8	2.236	0.224	2261.9	0.00044 (0.0028)
Equatorial dipole-dipole				
n = 1	0.451	0.319	21.452	0.04662 (0.2929)
n = 2	0.809	0.362	119.03	0.00840 (0.0528)
n = 3	1.180	0.373	367.31	0.00272 (0.0171)
n = 4	1.556	0.377	841.75	0.00119 (0.0075)
Wenner - Schlumberger				
n = 1	0.519	0.173	6.2832	0.15915 (1.0000)
n = 2	0.925	0.186	18.850	0.05305 (0.3333)
n = 3	1.318	0.189	37.699	0.02653 (0.1667)
n = 4	1.706	0.190	62.832	0.01592 (0.1000)
n = 5	2.093	0.190	94.248	0.01061 (0.0667)
n = 6	2.478	0.191	131.95	0.00758 (0.0476)
n = 7	2.863	0.191	175.93	0.00568 (0.0357)
n = 8	3.247	0.191	226.19	0.00442 (0.0278)
n = 9	3.632	0.191	282.74	0.00354 (0.0222)
n = 10	4.015	0.191	345.58	0.00289 (0.0182)
Pole-dipole				
n = 1	0.519		12.566	0.07958 (0.5000)
n = 2	0.925		37.699	0.02653 (0.1667)
n = 3	1.318		75.398	0.01326 (0.0833)
n = 4	1.706		125.66	0.00796 (0.0500)
n = 5	2.093		188.50	0.00531 (0.0334)
n = 6	2.478		263.89	0.00379 (0.0238)
n = 7	2.863		351.86	0.00284 (0.0178)
n = 8	3.247		452.39	0.00221 (0.0139)
Pole-Pole	0.867		6.28319	0.15915 (1.0000)

همچنین در جدول (۱-۲)، ضریب هندسی^۱ برای $a = 1$ آورده شده است. وارون ضریب هندسی^۲ شاخصی از ولتاژ اندازه‌گیری شده بین P_1 و P_2 می‌باشد. نسبت^۳ این پتانسیل، در مقایسه با آرایش ونر آلفا، برای تمامی آرایش‌ها آورده شده است (در داخل پارانترز و در ستون آخر). برای مثال، مقدار 0.01 به این معنی است که پتانسیل اندازه‌گیری شده با این آرایش، یک درصد پتانسیل اندازه‌گیری شده با آرایش ونر آلفا، با همان مقدار a می‌باشد [Loke, 2004a].

با استفاده از جدول (۱-۲) می‌توان مقایسه کلی در مورد قدرت تفکیک‌پذیری و عمق نفوذ هر یک از آرایش‌ها انجام داد. با مقایسه نسبت وارون فاکتور هندسی بین آرایش قطبی-دوقطبی و آرایش ونر برای حالتی که $a = 1$ می‌باشد، مشخص می‌شود که عمق نفوذ این دو آرایش در حالتی که اندازه n برابر یک باشد یکسان است ولی وقتی که n بیش از یک شود، عمق نفوذ آرایش قطبی-دوقطبی بیش از عمق نفوذ آرایش ونر خواهد بود هرچند قدرت تفکیک‌پذیری آرایش قطبی-دوقطبی کمتر از قدرت تفکیک‌پذیری آرایش ونر است.

همچنین، با توجه به این جدول، قدرت تفکیک‌پذیری آرایش قطبی-دوقطبی بیش از آرایش دوقطبی-دوقطبی می‌باشد. عمق نفوذ آرایش قطبی-دوقطبی تقریباً برابر با عمق نفوذ آرایش ونر-شلومبرژر می‌باشد ولی قدرت تفکیک‌پذیری این آرایش کمتر از آرایش ونر-شلومبرژر است.

۲-۶-۳- تابع حساسیت دو بعدی و قابلیت تفکیک قائم و جانبی آرایش‌های مختلف

رسم یک بعدی تابع حساسیت در شکل (۱۴-۲) نشان می‌دهد که حساسیت یک آرایش به لایه‌های سطحی، بسیار پایین است. سهم لایه‌های سطحی، زمانی کوچک می‌شود که زمین کاملاً همگن و همسانگرد باشد. در غیر این صورت نتایج خیلی متفاوت خواهند بود. قبل از بررسی قابلیت آرایش‌ها در برداشت‌های دو بعدی، باید شکل دوبعدی تابع حساسیت را محاسبه نمود. به همین

¹Geometric factor

²Inverse geometric factor

³Ratio

منظور، برای نقطه‌ای به مختصات (x, y) ، لازم است سهم تمام نقاط y از $-\infty$ تا $+\infty$ را محاسبه نمود. به عبارت دیگر، انتگرال تابع حساسیت سه‌بعدی نسبت به متغیر y از $-\infty$ تا $+\infty$ محاسبه می‌شود.

$$F_{2D} = \int_V F_{3D}(x, y, z) dy = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} dy \quad (15-2)$$

هر چه مقدار تابع حساسیت در نقطه‌ای بیشتر باشد، اثر آن نقطه روی اندازه‌گیری‌ها بیشتر خواهد بود. تفاوت الگوی پربندی تابع حساسیت برای آرایش‌های مختلف، به ما کمک می‌کند تا پاسخ آرایش‌ها را به انواع مختلفی از ساختارهای زمین‌شناسی پیش‌بینی کنیم. همچنین، برای تمامی این آرایش‌ها عمق مورد بررسی از ۰.۲۵ تا ۱ متر در نظر گرفته شده است [Loke, 2004a].

۲-۶-۳-۱- آرایش ونر

در شکل (۱۵-۲)، پربندهای تابع حساسیت دوی بعدی برای آرایش‌های ونر آلفا، بتا و گاما، در نزدیک مرکز آرایش تقریباً به صورت افقی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، آرایش‌های مذکور نسبت به تغییرات قائم مقاومت‌ویژه الکتریکی در نقطه برداشت داده (با علامت + نشان داده شده) حساس می‌باشند. در نتیجه این آرایش برای اکتشاف ساختارهای افقی مناسب‌تر می‌باشد [Ward, 1990; Sharma, 1997; Loke, 2001].

همان‌طور که در جدول (۱-۲) مشاهده می‌شود، عمق میانه کاوش برای آرایش ونر آلفا، تقریباً نصف فاصله الکترودی (a) می‌باشد. در مقایسه با سایر آرایش‌ها، عمق میانه کاوش آرایش ونر متوسط می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد، قدرت سیگنال متناسب با وارون فاکتور هندسی می‌باشد. فاکتور هندسی آرایش ونر آلفا برابر با $2\pi a$ می‌باشد و این فاکتور هندسی، جزء کوچک‌ترین فاکتورهای هندسی در میان تمامی آرایش‌ها می‌باشد. از اینرو، در بین تمامی آرایش‌ها، آرایش ونر آلفا، بالاترین نسبت سیگنال به نوفه را دارد و به همین علت می‌توان از این آرایش در مناطق با سطح نوفه بالا استفاده کرد [Ward, 1990; Sharma, 1997; Loke, 2001].

یکی از معایب آرایش ونر در کاوش‌های دو بعدی، پوشش افقی ضعیف آن با افزایش فاصله الکترودی می‌باشد. این ویژگی زمانی مشکل‌ساز می‌شود که تعداد الکترودهای مورد استفاده در برداشت صحرائی با آرایش ونر کمتر باشد [Loke, 2004a].

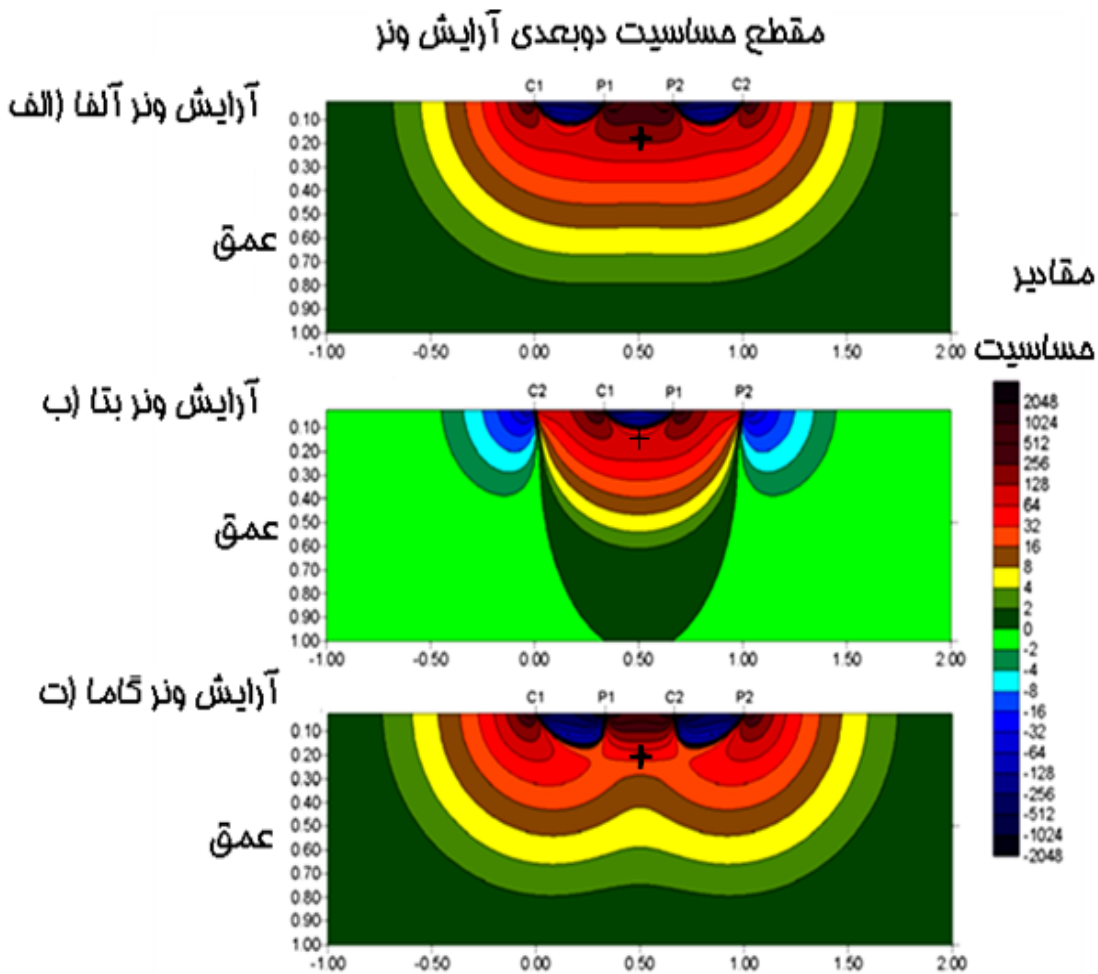
آرایش ونر بتا، در واقع حالت خاصی از آرایش دوقطبی- دوقطبی است که در آن فاصله بین الکترودها یکسان است. چینش الکترودی آرایش ونر گاما نسبتاً غیرمتمعارف می‌باشد، که در آن الکترودهای جریان و پتانسیل به صورت یک در میان قرار می‌گیرند. مقطع حساسیت مربوط به این آرایش نشان می‌دهد که بیشترین عمق نفوذ این آرایش در زیر مرکز آرایش قرار ندارد بلکه در زیر دو الکتروود خارجی C_1 و P_2 در شکل (۲-۱۵-ت) قرار دارد.

رابطه (۲-۱۶) چگونگی محاسبه فاکتور هندسی برای آرایش ونر آلفا را نشان می‌دهد و رابطه (۲-۱۷) چگونگی محاسبه فاکتور هندسی آرایش ونر بتا را نشان می‌دهد، همچنین اندازه فاکتور هندسی مربوط به آرایش ونر گاما طبق رابطه (۲-۱۷) محاسبه می‌شود.

$$k = 2\pi a \quad (۲-۱۶)$$

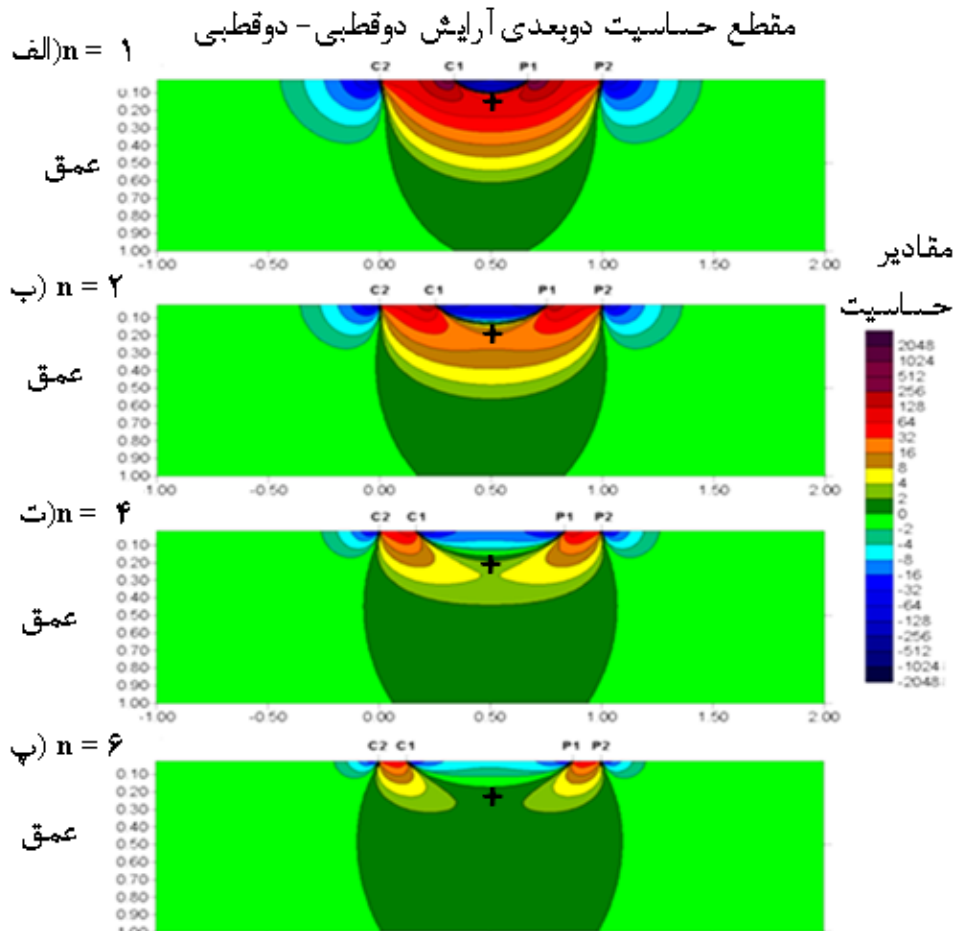
$$k = 6\pi a \quad (۲-۱۷)$$

$$k = 3\pi a \quad (۲-۱۸)$$



۲-۳-۶-۲- آرایش دوقطبی - دوقطبی

پایین بودن جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین مدارهای جریان و پتانسیل در آرایش دوقطبی - دوقطبی، این آرایش را به یک آرایش مفید برای برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و IP تبدیل کرده است. در این آرایش، فاصله الکتروودی برابر است با فاصله بین دو الکتروود P_1 و P_2 ، که این فاصله را با a نشان می‌دهند. در برخی مواقع، برای جلوگیری از کاهش قدرت سیگنال به هنگام افزایش طول کل آرایش، فاصله بین P_1 و P_2 را زیادتر می‌کنند (برای مثال $2a$ و $3a$ و غیره). پارامتر دیگر این آرایش، n می‌باشد و مقدار آن برابر با نسبت فاصله P_1-C_1 ، به فاصله الکتروودی a می‌باشد. با افزایش ضریب n ، از ۱ تا ۸ (تا جایی که نسبت سیگنال به نوفه اجازه می‌دهد) عمق کاوش نیز افزایش می‌یابد [Loke, 2004a].



شکل ۲-۱۶- مقطع حساسیت دوبعدی برای آرایش دوقطبی- دوقطبی برای n های ۱، ۲، ۴، ۶ [After Loke, 2004a]

در شکل (۲-۱۶)، مقاطع حساسیت برای این آرایش، با n های ۱، ۲، ۴، ۶ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، بزرگترین مقادیر حساسیت بین جفت الکترودهای جریان و پتانسیل قرار گرفته اند. در نتیجه این آرایش، به تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در نواحی زیر الکترودهای مذکور حساس تر می باشد. وقتی ضریب n ، از ۴ تجاوز می کند، ناحیه با حساسیت بالا بیشتر به سمت جفت الکترودهای پتانسیل و جریان متمرکز می شود و از حساسیت ناحیه بین C_1 و P_1 کاسته می شود. برای مقادیر n بزرگتر از ۲، شکل پربند موجود در مقطع حساسیت، تقریباً قائم می شود. بنابراین، این آرایش نسبت به تغییرات افقی مقاومت ویژه الکتریکی حساس بوده و قادر به شناسایی ساختارهای زمین شناسی قائم از جمله دایکها و حفرات زیرسطحی می باشد [Loke, 2004a; Ward, 1990; Reynolds, 1997].

برای فاصله الکتروودی یکسان، عمق میانه کاوش برای آرایش دوقطبی- دوقطبی کم تر از عمق میانه کاوش آرایش های ونر و قطبی- دوقطبی و قطبی- قطبی می باشد. برای مثال در جدول (۲-۱)، در $n = 1$ عمق کاوش برای این آرایش $0.416a$ است در حالی که برای آرایش ونر آلفا، این مقدار $0.519a$ می باشد. تجربیات حاصل از مدل های مصنوعی و داده های صحرائی نشان داده اند که برای n های بزرگتر از ۸، دقت برآورد عمق میانه برای این آرایش بین 20% تا 30% می باشد. برای کاوش های دوبعدی، پوشش افقی این آرایش بهتر از آرایش ونر است. بنابراین هنگامی که تعداد گره های موجود در یک سیستم چند الکتروودی کم باشد، استفاده از این آرایش یک مزیت محسوب می شود [Loke, 2004a].

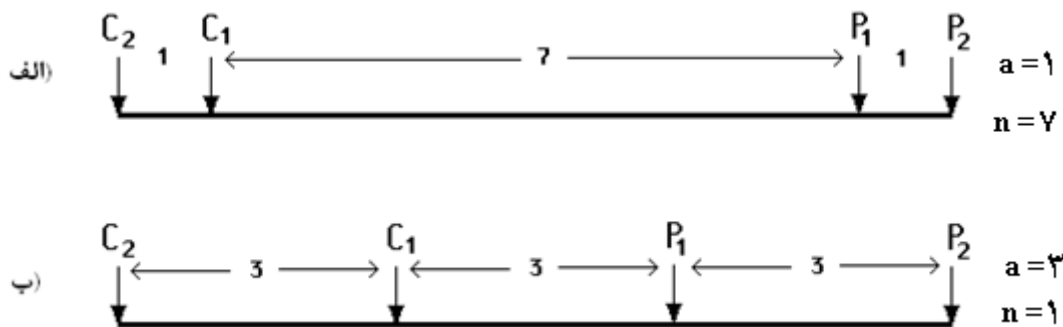
ولتاژ ثبت شده در این آرایش، متناسب با وارون n^3 می باشد. یکی از معایب این آرایش، کاهش شدید قدرت سیگنال، با افزایش n می باشد. یک روش برای غلبه بر این مشکل، افزایش فاصله بین C_1-C_2 و P_1-P_2 هم زمان با افزایش طول کل آرایش می باشد. قدرت سیگنال به نويز این آرایش کمتر از آرایش های ونر، ونر- شلومبرژر و قطبی- دوقطبی می باشد. اندازه فاکتور هندسی این آرایش طبق رابطه (۲-۱۹) محاسبه می شود. در شکل (۲-۱۷)، دو چینش الکتروودی متفاوت از آرایش دوقطبی- دوقطبی نشان داده شده است که در آنها طول کل آرایش یکسان است ولی مقدار a و ضریب n در آنها متفاوت است. قدرت سیگنال آرایشی که n کوچکتر دارد (شکل ۲-۱۷-ب)، بیشتر از آرایشی است که n بزرگتر دارد [Loke, 2004a].

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (۲-۱۹)$$

به دلیل پایین بودن قدرت سیگنال در این آرایش، دستگاه اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی باید حساسیت نسبتاً بالایی داشته باشد. همچنین، این دستگاه اندازه گیری باید دارای یک مدار حذف نوفه خوبی داشته باشد و تماس الکتریکی بین الکتروودها و زمین مناسب باشد [Loke, 2004a].

در شکل (۲-۱۶)، نقطه ای که مقاومت ویژه الکتریکی قرائت شده به آن نسبت داده می شود با علامت (+) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، محل رسم داده ها برای

n های بیشتر از ۴، در ناحیه‌ای با حساسیت کم قرار می‌گیرد. برای آرایش دوقطبی- دوقطبی، ناحیه با حساسیت بالا در حوالی دوقطبی‌های جریان و پتانسیل قرار می‌گیرد. در واقع آرایش دوقطبی- دوقطبی اطلاعات کمی از مقاومت ویژه الکتریکی ناحیه اطراف نقطه رسم داده بدست می‌دهد به همین خاطر، نتایج به دست آمده برای این آرایش در مقایسه با آرایش ونر ضعیف‌تر می‌باشد [Loke, 2004a; Loke and Barker, 1996].



شکل ۲-۱۷- دو نوع چینش الکترودی متفاوت برای آرایش دوقطبی- دوقطبی [After Loke, 2004a]

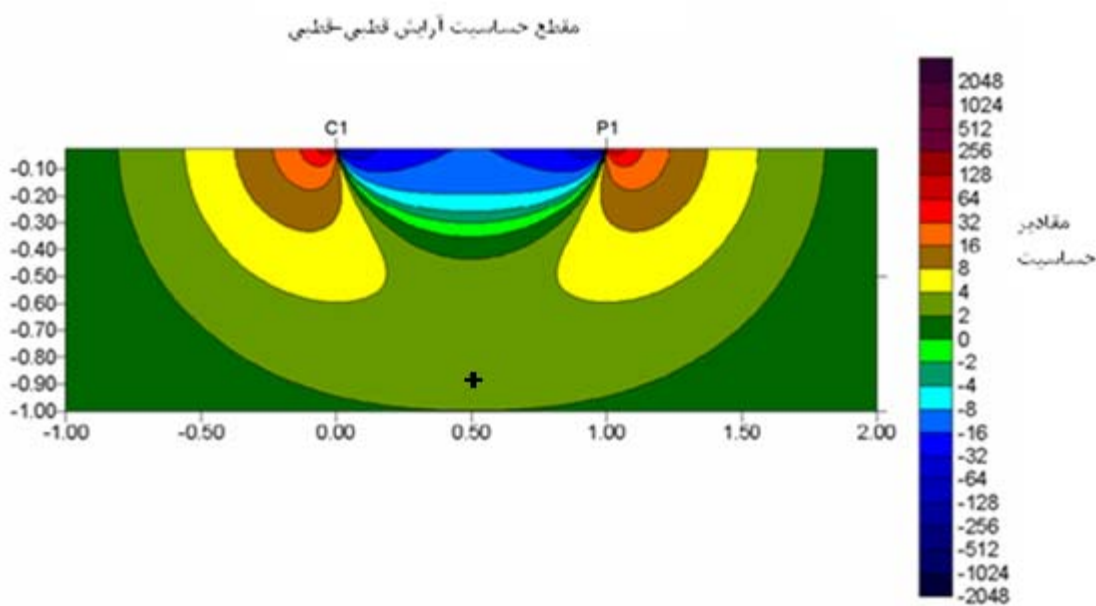
۲-۳-۳-۳- آرایش قطبی- قطبی

کاربرد این آرایش نسبت به آرایش‌های ونر و دوقطبی- دوقطبی کمتر می‌باشد. این آرایش از دو الکترود تشکیل شده است، که یکی الکترود جریان و دیگری الکترود پتانسیل می‌باشد. برای اینکه به طور تقریبی، این آرایش را ایجاد کنیم، باید الکترودهای C_2 و P_2 را در فاصله‌ای بیش از ۲۰ برابر حداکثر فاصله بین C_1 و P_1 قرار دهیم، به عبارتی دیگر، زمانی می‌توان از تاثیر الکترودهای C_2 و P_2 روی اندازه‌گیری‌ها صرف نظر کرد که فاصله الکترودهای C_2 و P_2 از مرکز آرایش، بیش از بزرگترین فاصله بین C_1-P_1 باشد. یکی از مشکلات آرایش قطبی- قطبی این می‌باشد که وقتی فاصله بین الکترودهای پتانسیل افزایش می‌یابد، داده‌های مقاومت ویژه تحت تاثیر نویز قرار می‌گیرند. به همین خاطر، بهتر است که از این آرایش برای شناسایی اهدافی استفاده شود که نیاز به فواصل الکترودی کوچک داشته باشند. برای مثال، این آرایش در اکتشافات باستان‌شناسی کاربرد زیادی دارد [Loke,

[2004a]. این آرایش بالاترین پوشش افقی و بیشترین عمق نفوذ و کمترین قدرت تفکیک را در میان تمامی آرایش‌ها دارد [Robain et al., 1999]. با توجه به شکل (۲-۱۸)، علت پایین بودن قدرت تفکیک پذیری این آرایش به خاطر بالا بودن فاصله بین پربندهای حساسیت در مقطع حساسیت این آرایش می‌باشد. اندازه فاکتور هندسی برای این آرایش طبق رابطه ۲-۲۰ محاسبه می‌شود.

$$k = 2\pi a$$

$$2-20$$



شکل ۲-۱۸- مقطع حساسیت آرایش قطبی-قطبی [After Loke, 2004a]

۲-۶-۳-۴- آرایش قطبی-دوقطبی

پوشش افقی این آرایش نسبتاً خوب است و قدرت سیگنال این آرایش در مقایسه با آرایش دوقطبی-دوقطبی، بیشتر می‌باشد. این آرایش به اندازه آرایش قطبی-قطبی به نوفه تلوریک، حساس نیست. مقطع حساسیت این آرایش در شکل (۲-۱۹) آورده شده است، با توجه به این شکل، ناحیه دارای بالاترین حساسیت در نزدیکی دوقطبی‌های P_1-P_2 قرار می‌گیرد. در صورتی که $n \geq 4$ باشد، پربندهای بین P_1 و P_2 ، به حالت تقریباً قائم درمی‌آیند، به این خاطر، این آرایش هم مانند آرایش دوقطبی-دوقطبی، نسبت به شناسایی ساختارهای قائم بسیار قوی عمل می‌کند. آرایش

قطبی- دوقطبی نیز دارای یک الکتروود بینهایت (C_2) می‌باشد که باید در فاصله دوری نسبت به پروفیل اندازه‌گیری‌ها قرار داده شود. تاثیر این الکتروود بی‌نهایت بر روی اندازه‌گیری‌ها، متناسب با مربع نسبت فاصله C_1-P_1 به فاصله C_2-P_1 می‌باشد. اگر فاصله الکتروود C_2 (الکتروود بی‌نهایت)، بیش از ۵ برابر بزرگترین فاصله C_1-P_1 باشد، خطای ناشی از در نظر نگرفتن الکتروود C_2 کمتر از ۰.۵٪ خواهد شد. معمولاً فاصله الکتروود بینهایت را ۱۵ الی ۲۰ برابر فاصله C_1-P_1 در نظر می‌گیرند [Loke, 2004a].

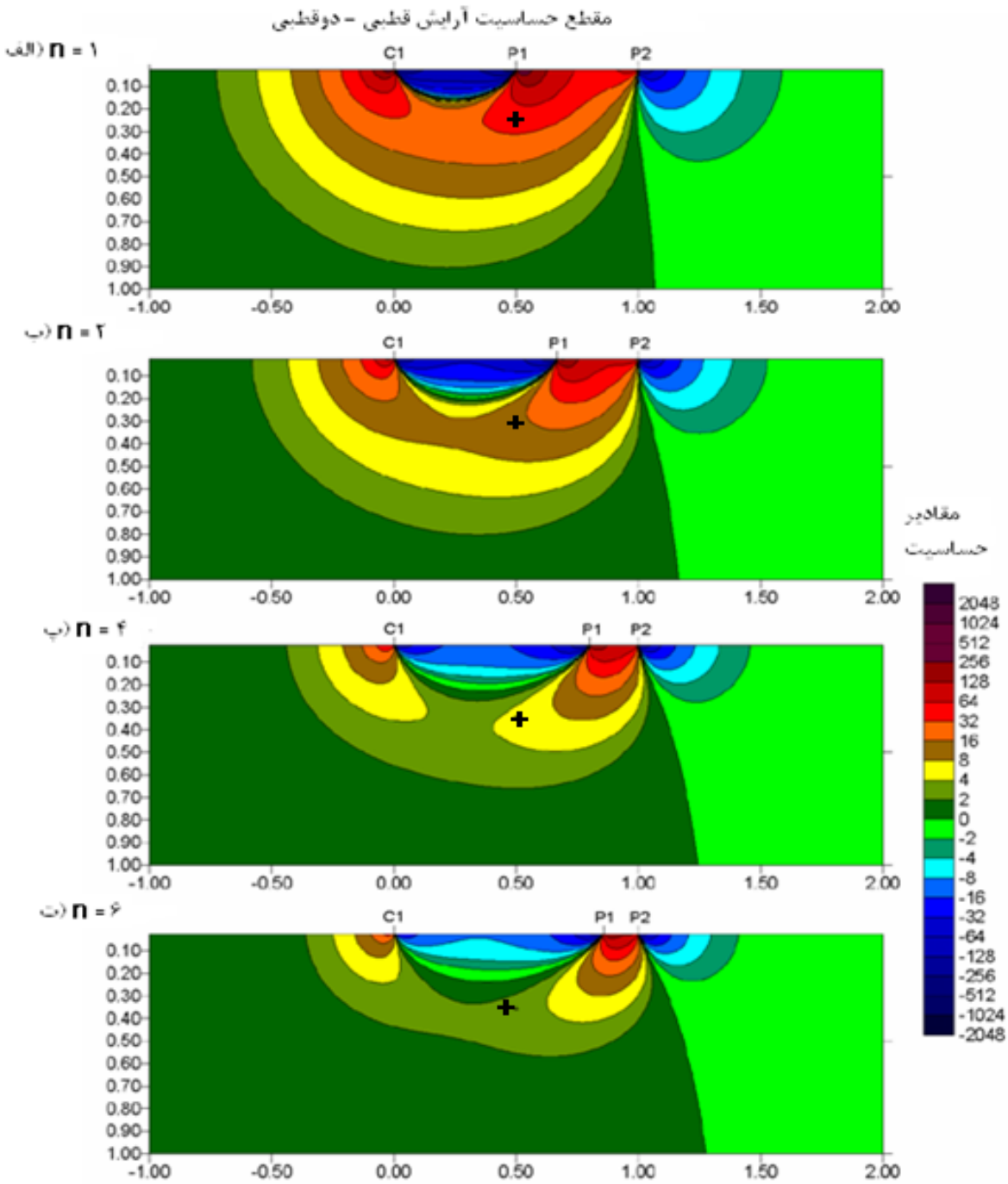
بعد از آرایش قطبی- قطبی این آرایش بیشترین پوشش افقی را در میان تمامی آرایش‌ها دارد. پوشش افقی خوب آرایش قطبی- دوقطبی باعث شده است تا استفاده از این آرایش برای سیستم‌های چندکاناله که تعداد گره‌های کمی دارند مناسب باشد. قدرت سیگنال این آرایش برابر با آرایش وئر- شلومبرژر می‌باشد و در مقایسه با آرایش وئر کمتر و در مقایسه با آرایش دوقطبی- دوقطبی بیشتر می‌باشد. بنابراین آرایش قطبی- دوقطبی، از نظر پوشش افقی، قدرت سیگنال و حداقل جفت‌شدگی الکترو مغناطیسی یک آرایش مفید برای برداشت‌های الکتریکی می‌باشد [Loke, 2004a].

قدرت سیگنال آرایش قطبی- دوقطبی، متناسب با وارون مربع n می‌باشد. هنگامی که اندازه n از ۱۰ بیشتر شود، داده‌های برداشت شده بیشتر تحت تاثیر نویز قرار خواهند گرفت. بنابراین بهتر است که مقدار n از ۱۰ بیشتر نشود. اندازه فاکتور هندسی این آرایش طبق رابطه (۲-۲۱) محاسبه می‌شود [Loke, 2004a].

$$k = 2\pi n(n+1)a \quad (2-21)$$

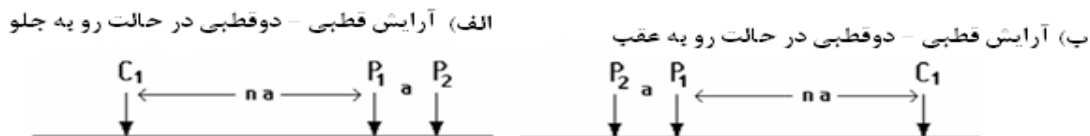
یکی از معایب آرایش قطبی- دوقطبی، نامتقارن^۱ بودن چینش الکتروودی آن در مقایسه با سایر آرایش‌های متداول می‌باشد. به همین دلیل، مقاطع به‌دست آمده از این آرایش برای ساختارهای زمین‌شناسی متقارن، شکلی نامتقارن دارند. یک روش برای حل مشکل عدم تقارن، تکرار اندازه‌گیری‌ها در جهت معکوس^۲ و یا به عبارت دیگر رو به عقب می‌باشد. چگونگی برداشت رو به

^۱Asymmetrical
^۲Reverse manner



شکل ۲-۱۹- مقطع حساسیت آرایش قطبی - دو قطبی برای nهای ۱، ۲، ۴، ۶ [After Loke, 2004a]

عقب، در شکل (۲-۲۰-ب) نشان داده شده است. با ترکیب اندازه‌گیری‌های رو به عقب و رو به جلو^۱، می‌توان این عدم تقارن فوق‌الذکر را کاهش داد. با این وجود، تکرار اندازه‌گیری‌ها باعث می‌شود که زمان برداشت داده‌ها و هزینه برداشت دو برابر شود. توضیحات بیشتر در مورد چگونگی برداشت داده‌های صحرائی با استفاده از آرایش قطبی-دوقطبی در فصل ۵، خواهد آمد.



شکل ۲-۲۰-۲- نمایش آرایش قطبی-دوقطبی در دو حالت رو به جلو و رو به عقب [After Loke, 2004a]

۷-۲- کاربردهای روش مقاومت ویژه الکتریکی

در قسمت‌های قبلی، تئوری روش مقاومت ویژه الکتریکی و انواع آرایش‌های الکتریکی به همراه ویژه‌گی‌های مربوطه، شرح داده شد. در این قسمت، جهت آشنایی کلی در مورد برخی از اهداف موجود در برداشت‌های به روش مقاومت ویژه الکتریکی، تعدادی از کاربردهای کلی و عملی روش مقاومت ویژه الکتریکی ذکر می‌شود.

از جمله مواردی که برداشت به روش مقاومت ویژه الکتریکی می‌تواند در شناسایی آنها به کار

برده شود عبارتند از [Mooney, 1980]:

- (۱) ترسیم و تعیین محل رسوبات شنی و ماسه‌ای
- (۲) تعیین عمق سطح آب زیرزمینی^۲
- (۳) تعیین عمق و ضخامت خاک‌ها
- (۴) ترسیم نقشه کانال‌های رودخانه‌ای دفن شده در زیر آبرفت^۱

^۱Forward manner

^۲Water table

- ۵) ترسیم نقشه آنومالی‌های زمین‌گرمایی^۲
- ۶) ترسیم نقشه مرز مشترک بین آب‌های شیرین و شور
- ۷) تعیین محدوده‌های گسلیده
- ۸) شناسایی و ترسیم نقشه آلودگی آب‌های زیرزمینی
- ۹) تعیین محل و ترسیم نقشه کانسارهای معدنی
- ۱۰) مطالعات باستان‌شناسی
- ۱۱) اکتشاف آب‌های زیرزمینی در درزه و شکاف‌های سنگ‌های سخت

¹Buried stream channels

²Geothermal anomalies

فصل سوم

مختصری راجع به روش های مدل سازی

۳-۱- مقدمه

برای به دست آوردن یک تصویر کلی از زیر زمین با استفاده از داده های ژئوفیزیکی، باید یک مدل مصنوعی ایجاد نمود و سپس پاسخ این مدل مصنوعی را با پاسخ مدل واقعی (زمین تحت مطالعه) مقایسه نمود تا میزان دقت این مدل مصنوعی ایجاد شده، مشخص شود. در علم ژئوفیزیک در کل سه روش جهت ایجاد مدل مصنوعی برای زمین تحت مطالعه وجود دارد [آزرممنش، ۱۳۸۶]:

الف) روش تحلیلی

ب) روش مدل سازی فیزیکی^۱

پ) روش مدل سازی عددی^۲

روش تحلیلی، با استفاده از نوع روابط ریاضی حاکم بر میدان فیزیکی مورد نظر، پاسخ آنومالی موجود در زیر سطح زمین را محاسبه می کند. به عنوان مثال اگر زمین تحت مطالعه از یک محیط همسانگرد و همگن تشکیل شده باشد و آنومالی قرار گرفته در داخل زمین، دارای شکل هندسی معین مثل کره یا استوانه باشد، می توان از روش تحلیلی برای محاسبه مدل مورد نظر و نیز پاسخ آن در سطح زمین استفاده کرد. نکته ای کاملاً بدیهی این که وضعیت زمین شناسی در طبیعت کاملاً ناهمگن و پیچیده می باشد. همچنین آنومالی های موجود در درون زمین شکلی کاملاً پیچیده دارند، لذا کاربرد روش تحلیلی در عمل، بسیار اندک است [آزرممنش، ۱۳۸۶].

در روش مدل سازی فیزیکی یا آزمایشگاهی ساختار زمین تحت مطالعه را با توجه به اطلاعات کلی زمین شناسی که جمع آوری شده است، در مقیاس کوچک در آزمایشگاه شبیه سازی می کنند و سپس بر روی این مدل ایجاد شده برداشت های ژئوفیزیکی را انجام می دهند و در نهایت داده های به دست آمده در آزمایشگاه را با داده های صحرائی مقایسه می کنند. اگر اختلاف بین داده های صحرائی و

¹Physical modeling

²Numerical modeling

داده‌های برداشت شده بر روی مدل مصنوعی، زیاد باشد، دوباره تغییراتی را در مدل ساخته شده در آزمایشگاه اعمال می‌کنند و مراحل قبلی را تکرار می‌کنند تا در نهایت اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های صحرائی به حداقل برسد. این مدل سازی دارای یک سری مشکلاتی می‌باشد که امکان استفاده از آن را بسیار محدود می‌کند. همچنین به خاطر پیچیدگی وضعیت زمین شناسی طبیعت، امکان شبیه سازی دقیق آن غیرممکن و غیر اقتصادی است. امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتری و در نتیجه افزایش سرعت پردازش حجم زیادی از داده‌ها، دیگر نیازی به مدل سازی آزمایشگاهی وجود ندارد [آزممنش، ۱۳۸۶].

در روش مدل سازی عددی، از طریق مسائل عددی به حل مجهولات مساله پرداخته می‌شود. در این روش مدل سازی، زمین تحت مطالعه، به قطعات بسیار کوچک تقسیم بندی می‌شود. به طور کلی روش مدل سازی عددی به دو زیرگروه به صورت زیر تقسیم می‌شود:

الف) مدل سازی مستقیم^۱

ب) مدل سازی معکوس^۲

داده‌های خام به دست آمده از زمین، هیچ گونه اطلاعات کمی در مورد خواص فیزیکی زمین به دست نمی‌دهند. بنابراین، مدل سازی در علم ژئوفیزیک امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. اگر از توزیع خواص فیزیکی به پاسخ ژئوفیزیکی (اندازه گیری صحرائی) برسیم مدل سازی مستقیم انجام داده ایم ولی اگر از روی داده‌های صحرائی، خواص فیزیکی مدل را به دست بیاوریم در این صورت مدل سازی معکوس انجام داده ایم [Loke, 2004a].

۳-۲- مدل سازی مستقیم یا پیشرو

در این نوع مدل سازی، مدل آغازین^۱ (مدل مصنوعی) مورد نیاز به صورت حدسی و با توجه به

^۱Forward modeling

^۲Inverse modeling

شرایط زمین شناسی منطقه، تجربه ژئوفیزیکدان و یا به صورت آزمون و خطا تعیین می شود. به تعبیر دیگر، پارامترهای یک مدل آغازین با توجه به داده های برداشت شده در صحرا و اطلاعات زمین شناسی حدس زده می شود و سپس پاسخ این مدل آغازین را (داده های مصنوعی^۲) به دست می آورند. (تفاضل) بین مجموع مربعات خطای^۳ این پاسخ مدل^۴ مصنوعی و داده های برداشت^۵ شده در صحرا، باید حداقل باشد وگرنه باید یک سری تغییراتی در پارامترهای مدل فرضی ایجاد کرد تا در نهایت اختلاف بین داده های مصنوعی که از روی این مدل فرضی جدید حاصل می شود و داده های برداشت شده در صحرا به حداقل مقدار خود برسد [Loke, 2004a; Loke and Barker, 1996].

اگر پارامترهای (مجهولات) مدل شامل ماتریس (β) باشد و داده های صحرائی برداشت شده، شامل ماتریس (y) ، در این صورت در روش مدل سازی مستقیم رابطه ای که بین داده های صحرائی و پارامترهای مدل تعریف می شود به صورت $\beta = f(y)$ خواهد بود.

روش های عددی مختلفی برای مدل سازی پیشرو وجود دارند که از جمله می توان به روش هایی چون المان محدود^۶ (FEM)، تفاضل محدود^۷ (FDM) و روش معادله انتگرال^۸ (IEM) اشاره کرد. مبنای روش های المان محدود (FEM) و تفاضل محدود (FDM)، معادلات دیفرانسیل، و مبنای روش معادله انتگرال (IEM) بر مبنای مسائل انتگرالی می باشد. در این روش ها مدل مربوطه به سلول های کوچک تقسیم بندی می شود. معادلات آغازین در این روش ها بر مبنای موضوع مورد مطالعه انتخاب می شوند [Loke, 2004a].

¹Initial model

²Synthetic data

³Sum of squares error

⁴Model response

⁵Observed data

⁶Finite element methods-FEM

⁷Finite difference methods-FDM

⁸Integral equation method-IEM

۳-۳- مدل سازی معکوس

پیشتر اشاره شد که در مدل سازی معکوس، از روی داده های صحرائی برداشت شده پارامترهای فیزیکی مدل تخمین زده می شود. به عبارت دیگر اگر پارامترهای (مجهولات) مساله ماتریس (β) فرض شود و داده های صحرائی برداشت شده (داده های مشاهده ای) ماتریس (y) در نظر گرفته شود، در این صورت در روش مدل سازی معکوس رابطه ای که بین داده های صحرائی و پارامترهای مدل تعریف می شوند به صورت $\beta = f^{-1}(y)$ خواهد بود.

ورودی مورد نیاز در روش مدل سازی معکوس، داده های برداشت شده در صحرا می باشد. مدل اولیه مورد نیاز برای حل مساله معکوس نیز بر اساس همین داده های برداشت شده ایجاد می شود. سپس با استفاده از روش های عددی و روابط فیزیکی حاکم بر میدان الکتریکی، پاسخ این مدل، محاسبه می شود. در این روش، جهت انطباق مدل به دست آمده با مدل واقعی زمین، سعی می شود که اختلاف بین پاسخ مدل و داده های برداشت شده، با استفاده از روش های ریاضی مثل روش حداقل مربعات به حداقل مقدار ممکن برسد. در قسمت بعدی جهت درک کلی چگونگی انطباق مدل مصنوعی تهیه شده با مدل زمین شناسی واقعی، ابتدا روش حداقل مربعات و سپس روش های دیگری که از روی روش حداقل مربعات مشتق شده و در فرآیند معکوس سازی استفاده می شود، توضیح داده می شوند.

۳-۳-۱- روش حداقل مربعات غیر خطی^۱

اگر داده های معلوم برداشت شده در صحرا به صورت $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)$ و پارامترهای مجهول مدل مورد نظر به صورت $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ در نظر گرفته شوند. در این صورت رابطه بین داده های برداشت شده در صحرا و پارامترهای مدل مورد نظر به صورت تابع

^۱Non-linear least squares

$y = f(x, \beta)$ تعریف می شود. حال، باید با استفاده از روش حداقل مربعات، مقادیر پارامترهای مجهول β را طوری تقریب زد، که منحنی تابع f و داده های برداشت شده بیشترین انطباق را با هم داشته باشند. بنابراین در گام اول، اختلاف بین مقدار واقعی y_i با مقدار تابع f در نقطه x_i ، طبق رابطه (۱-۳) محاسبه می شود و مقدار به دست آمده به اسم r_i تعریف می شود [*Bonnans, et al., 2006*;

[*Lawson and Hanson, 1974; Davies and Swann, 1969; Fletcher, 1987*

$$\begin{cases} r_i = y_i - f(x_i, \beta) \\ i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1-3)$$

که در رابطه فوق:

r_i : باقیمانده یا خطا^۱

β : پارامترهای مجهول مدل

m : تعداد داده های برداشت شده در صحرا (داده های مشاهده ای)

گام دوم، محاسبه مجموع مربعات خطاها (S)، می باشد.

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{r} \quad (2-3)$$

که در رابطه فوق:

S : مجموع مربعات خطاها

می باشد.

شکل ماتریسی رابطه (۲-۳) می باشد. در گام سوم، باید حداقل مقدار S را محاسبه کرد.

برای محاسبه حداقل مقدار رابطه (۲-۳)، باید از این رابطه نسبت به پارامترهای مجهول (β) مشتق

گرفته شود. که نتیجه این مشتق گیری عبارتست از:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \beta_j} = 2 \sum_i r_i \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} = 0 \\ j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3-3)$$

¹Residual or Error

که در رابطه فوق:

z: تعداد پارامترهای مجهول مساله

می باشد.

در سیستم معادلات غیر خطی، مشتقات $\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}$ تابعی از دو متغیر x و β می باشند. برای حل این معادلات یک سری مقادیر اولیه¹ را در نظر می گیرند، و معادلات را برای این مقادیر اولیه به صورت تکراری حل می کنند. سپس در تکرارهای بعدی این مقادیر اولیه را طبق رابطه (۳-۴) تصحیح و در نهایت به مقدار واقعی نزدیک می شود.

$$\beta_j^{k+1} = \beta_j^k + \Delta\beta_j \quad (4-3)$$

که در رابطه فوق:

k: شماره تکرار

$\Delta\beta$: بردار جابجایی

J: شماره متغیر

می باشند.

در هر تکرار، مدل مورد نظر با یک تقریبی از مرتبه یک (ΔO^{order})، با استفاده از بسط

سری تیلور، مطابق رابطه ۳-۵، خطی^۲ می شود [Nocedal and Wright, 1999].

$$f(x_i, \beta) \approx f(x_i, \beta^k) + \sum_j \frac{\partial f(x_i, \beta^k)}{\partial \beta_j} (\beta_j - \beta_j^k) \approx f(x_i, \beta^k) + \sum_j J_{ij} \Delta\beta_j \quad (5-3)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta_j} \quad (6-3)$$

که در رابطه فوق:

J_{ij} : ژاکوبین تابع f

¹initial values

²Linearization

می باشد.

با توجه به رابطه (۱-۳) و رابطه (۶-۳)، می توان رابطه (۷-۳) را به دست آورد:

$$\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} = -J_{ij} \quad (۷-۳)$$

با جایگذاری رابطه (۵-۳) در رابطه (۱-۳)، رابطه (۸-۳) به صورت زیر دست می آید:

$$\begin{cases} r_i = \Delta y_i - \sum_{s=1}^n J_{is} \Delta \beta_s \\ \Delta y_i = y_i - f(x_i, \beta^k) \end{cases} \quad (۸-۳)$$

و در نهایت با در نظر گرفتن روابط (۷-۳) و (۸-۳)، روابط (۹-۳) و (۱۰-۳) به دست می آیند.

$$-2 \sum_{i=1}^m J_{ij} \left(\Delta y_i - \sum_{s=1}^n J_{is} \Delta \beta_s \right) = 0 \quad (۹-۳)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{s=1}^n J_{ij} J_{is} \Delta \beta_s = \sum_{i=1}^m J_{ij} \Delta y_i \quad (j = 1, \dots, n) \quad (۱۰-۳)$$

شکل ماتریسی رابطه (۱۰-۳) نیز به صورت رابطه (۱۱-۳) می باشد.

$$J^T J \Delta \beta_s = J^T \Delta y \quad (۱۱-۳)$$

پیشتر اشاره شد هدف از طرح روابط از ۱-۳ تا ۱۱-۳، این است که پارامترهای مدل ریاضی

طوری انتخاب شوند که مجموع مربعات اختلاف های بین پاسخ مدل $f(x, \beta)$ و داده های تجربی (y_i)

به حداقل مقدار ممکن برسند.

برای تفهیم بیشتر چگونگی استفاده از روش حداقل مربعات، در این قسمت مثالی آورده

می شود. فرض می شود که داده های مشاهده ای مساله مورد نظر جدول (۱-۳) باشد و رابطه ریاضی

بین x و y ، رابطه (۱۲-۳) باشد. هدف این می باشد که در این مساله مقادیر β_1 و β_2 را با استفاده از

روش حداقل مربعات طوری تعیین کرد که بهترین انطباق بین مقادیر (x_i, y_i) آورده شده در جدول

(۱-۳) و داده های رابطه (۱۲-۳) ایجاد شود. در قدم اول باید مقدار باقیمانده (r) را طبق رابطه (۳-

۱۳) محاسبه کرد. برای محاسبه عناصر ماتریس ژاکوبین، باید از رابطه (۱۴-۳) استفاده کرد. ماتریس

ژاکوبین مورد نظر از مرتبه ۷×۲ می باشد که عدد ۷ نشان دهنده تعداد سطرها و برابر با تعداد داده های

مشاهده‌ای در جدول (۱-۳) می‌باشد. عدد ۲ نشان دهنده تعداد ستون‌ها است و برابر با تعداد پارامترهای مجهول مساله می‌باشد. برای پیدا کردن مقادیر بهینه برای β_1 و β_2 باید از رابطه (۱۱-۳) شروع کرد. روش کار بدین منوال می‌باشد که ابتدا باید مقادیر اولیه مربوط به β_1 و β_2 تعیین شود. به همین منظور، مقادیر اولیه به صورت $\beta_1^0 = 0.9$ و $\beta_2^0 = 0.2$ در نظر گرفته می‌شود. سپس رابطه (۱۱-۳)، برای این مقادیر اولیه حل می‌شود، و مقدار $\Delta\beta_0$ از روی رابطه (۱۱-۳) به دست می‌آید. در قدم بعد، با استفاده از رابطه (۴-۳) مقادیر β_1^1 و β_2^1 ، برای انجام تکرار بعدی محاسبه می‌شود. برای انجام تکرار بعدی دوباره از رابطه (۱۱-۳) شروع می‌کنیم. این تکرارها تا زمانی انجام می‌گیرد که الگوریتم مساله همگرا^۱ شود. به تعبیر دیگر چنانچه از تکرار k به بعد، تغییر خاصی در مقدار β صورت نگیرد محاسبه خاتمه می‌یابد [Bjorck, 1996]

$$y = \frac{\beta_1 x}{\beta_2 + x} \quad (12-3)$$

$$r_i = y_i - \frac{\beta_1 x_i}{\beta_2 + x_i} \quad (13-3)$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial \beta_1} = -\frac{x_i}{\beta_2 + x_i}, \quad \frac{\partial r_i}{\partial \beta_2} = \frac{\beta_1 x_i}{(\beta_2 + x_i)^2} \quad (14-3)$$

جدول ۱-۳- داده‌های جمع آوری شده و یا به عبارتی داده‌های مشاهده‌ای [Bjorck, 1996]

i	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
x	۰.۰۳۸	۰.۱۹۴	۰.۴۲۵	۰.۶۲۵	۱.۲۵۳	۲.۵	۳.۷۴
y	۰.۰۵	۰.۱۲۷	۰.۰۹۴	۰.۲۱۲	۰.۲۷۲	۰.۲۶۵	۰.۳۳۱

^۱Convergence

بحث مربوط به همگرایی و پایداری^۱ الگوریتم حل مساله، جزء بحث های مهم در مسائل مربوط به روش های مدل سازی هستند. گاهی ممکن است به دلایل مختلف، الگوریتم مساله به یک جواب قابل قبول همگرا نشود و یا به عبارت دیگر الگوریتم مساله واگرا شود. در این صورت نه تنها انطباقی بین داده های مشاهده ای (داده های صحرایی) و داده های مربوط به پاسخ مدل مصنوعی ایجاد نخواهد شد، بلکه اختلاف بین این دو مقدار سیر صعودی خواهد داشت. با توجه به شکل (۳-۱)، یکی از دلایلی که ممکن است باعث واگرایی الگوریتم حل مساله شود، انتخاب نادرست مقادیر اولیه برای متغیرها می باشد. تعریف کلی پایداری مساله این می باشد که از یک تکرار به تکرار بعدی مقدار خطای rms کل^۲ بوجود آمده، طبق رابطه (۳-۱۵) سیر نزولی داشته باشد. در غیر این صورت الگوریتم حل مساله پایدار نیست و از یک تکرار به تکرار بعدی میزان خطا در حال افزایش خواهد بود و در نهایت از جواب واقعی دور و واگرا^۳ خواهد شد [Thomas, 1995].

$$\varepsilon^{n+1} \leq \varepsilon^n \quad (3-15)$$

که در رابطه فوق:

ε^n : مقدار خطای rms در تکرار nام

می باشد.

از جمله روش هایی که از روش حداقل مربعات مشتق می شوند، روش های حداقل مربعات هموار- مقید، روش گاوس- نیوتن^۴ و روش شبه نیوتن^۵ می باشند. در قسمت های بعدی به توضیح ویژگی های این روش ها پرداخته خواهد شد.

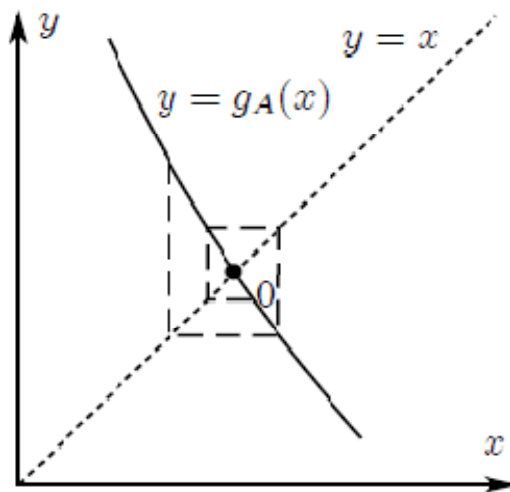
¹Stability

²Cumulative rms error

³Divergence

⁴Gauss-Newton least squares method

⁵quasi-Newton least squares method



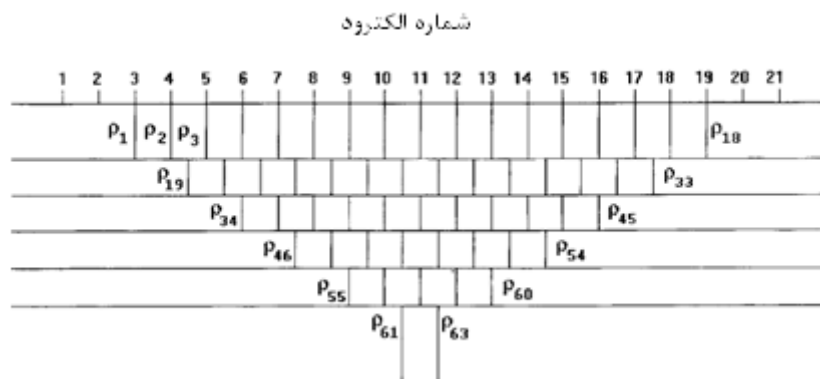
شکل ۳-۱- ناپایداری الگوریتم حل مساله به خاطر انتخاب نادرست مقدار اولیه [Fenton, 2008]

۳-۲- روش حداقل مربعات هموار مقید

تحقیقات زیادی جهت بهبود روش معکوس سازی اتوماتیک داده های صحرائی انجام گرفته است [Smith and Vozoff, 1984; Tripp et al., 1984]. روش مدل سازی حداقل مربعات گاوس- نیوتن در طی چندین سال، توسط محققان مختلفی تعدیل و به یک روش قدرتمند، با سرعت همگرایی بالا تبدیل شده است. ولی با این وجود این روش دارای محدودیت های خاص خود نیز می باشد. مدل نشان داده شده در شکل (۳-۲) که شامل بلوک های مستطیلی دو بعدی می باشد، نشان دهنده مدل اولیه از زمینی می باشد که این زمین به المان های کوچکتری گسسته سازی^۱ شده است تا از این المان های کوچک به جای بحث در کل ناحیه استفاده شود. در این مدل تعداد بلوک های ایجاد شده با تعداد نقاط مقاومت ویژه برداشت شده در صحرا برابر می باشد. عمق بلوک ها نیز با عمق میانگین قابل برداشت تعریف شده برای هر نوع آرایش خاص برابر می باشد [Edwards, 1977]. برای مثال، عمق میانگین قابل برداشت برای آرایش ونر، در حدود نصف فاصله الکترودی می باشد و در مورد

¹Discretization

ابعاد بلوک‌ها، ذکر این نکته ضروری می‌باشد که معمولاً ابعاد بلوک‌هایی که نزدیک به سطح زمین می‌باشند را در مقایسه با ابعاد بلوک‌های قرار گرفته شده در عمق، کمتر در نظر می‌گیرند [Loke, 1994].



شکل ۳-۲- چگونگی چینش بلوک‌های مستطیلی در یک مدل دوبعدی [After Loke and Barker, 1996].

همانند روابط ریاضی مطرح شده در قسمت (۳-۳-۱) مجهولات یا به عبارتی پارامترهای مساله در اینجا، همان مقادیر مقاومت ویژه بلوک‌ها می‌باشند. روش حداقل مربعات گاوس- نیوتن معمولی [Lines and Treitel, 1984] که برای حداقل سازی اختلاف بین داده‌های مقاومت ویژه محاسبه شده و مشاهده‌ای استفاده می‌شود، مقادیر مقاومت ویژه بلوک‌های مستطیلی را نیز به دست می‌دهد [Loke and Barker, 1996]. در روش مدل سازی معکوس، یک مدل اولیه تقریبی در نظر گرفته می‌شود و سپس با استفاده از روش گاوس- نیوتن یا هر روش دیگری این مدل بهبود و تصحیح می‌یابد. شکل اولیه و ساده روش گاوس- نیوتن در رابطه (۳-۱۱) آورده شده است، ولی در معکوس سازی داده‌های ژئوفیزیکی از این رابطه ساده استفاده نمی‌شود. ابتدا یک سری تغییراتی را روی این رابطه اعمال می‌کنند تا پاسخ آن یک پاسخ غیر معمول نباشد. یکی از تغییراتی که روی این رابطه اعمال می‌شود به نام روش تعدیل مارکوآرت-لونیبرگ^۱ می‌باشد [Lines and Treitel, 1984].

¹Marquart-Levenberg

$$(J^T J + \lambda I) \Delta \beta_s = J^T r \quad (16-3)$$

که در رابطه فوق:

I : ماتریس همانی

λ : ضریب مارکوآرت یا ضریب میرایی^۱

می باشند.

این روش به نام روش رگرسیون ریج^۲ نیز معروف است [Inman, 1975]. ضریب میرایی (λ)، محدوده تغییراتی را که $\Delta \beta$ می تواند داشته باشد را به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر قرار می دهد. روش گاوس- نیوتن در معادله (۱۱-۳) تنها جمع مربع های بردار اختلاف یا باقیمانده را مینیمم می کند، در حالی که در روش تعدیل مارکوآرت- لونبرگ، ترکیبی از بزرگی بردار اختلاف و بردار تغییر پارامتر را باهم مینیمم می شوند. این روش در معکوس سازی داده های سونداژزنی، برای تعداد لایه های محدود (پارامترهای فیزیکی کم) قابل استفاده است. زمانی که تعداد پارامترهای مدل زیاد باشند، مدل حاصل از این روش دارای گسترش مقاومت ویژه نامنظم و نواحی با مقاومت ویژه کاذب به شدت بزرگ یا کوچک خواهد بود [Constable, 1987]. جهت رفع این مشکل، رابطه (۱۶-۳) تعمیم داده شده است تا تغییرات فضایی پارامترهای مدل نیز در آن مینیمم شوند. به عبارتی، تغییر مقاومت ویژه مدل به صورت هموار و تدریجی صورت بگیرد. در نهایت رابطه به دست آمده را، روش حداقل مربعات هموار- مقید از نوع نرم ℓ_2 می گویند [Rodi and Mackie, 2001]. شکل ریاضی این روش به صورت رابطه (۱۷-۳) می باشد [Elis and Oldenburg, 1994].

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) P_i = J_i^T r_i \quad (17-3)$$

که در رابطه فوق:

i : نشان دهنده شماره تکرار^۳

¹Damping factor

²Ridge regression

³Iteration

J_i : ماتریس ژاکوبین

r_i : بردار اختلاف^۱ یا باقیمانده

λ_i : فاکتور میرایی یا دمپینگ فاکتور

P_i : بردار انحراف^۲ پارامترهای مدل

C : ماتریس هموارکننده^۳

می باشند.

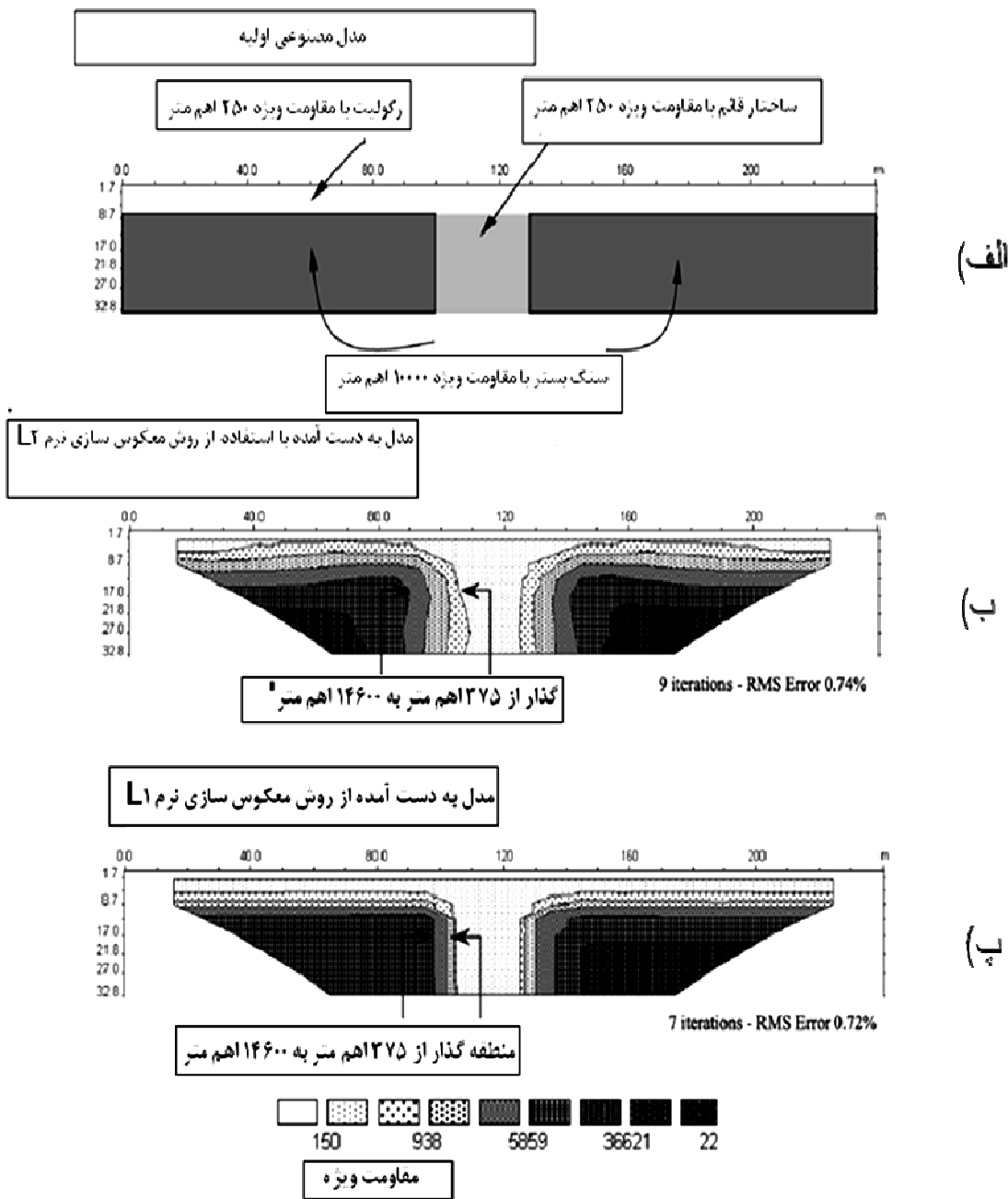
ویژگی روش حداقل مربعات هموار-مقید، این می باشد که منجر به ایجاد مدلی می شود که در آن تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی به صورت کاملاً هموار اتفاق می افتد. و حتی در زمین هایی که در آنها مرزهای تند با تغییرات زیاد مقاومت ویژه وجود دارد، این روش تغییرات مقاومت ویژه این گونه مرزها را به صورت هموار و تدریجی نشان می دهد. بنابراین در این گونه مناطق زیرسطحی، استفاده از روش نورم l_2 منطقی نیست. پس باید دوباره تغییراتی در الگوریتم گاوس-نیوتن داده شود تا در این گونه مناطق زیرسطحی جواب قابل قبولی به دست آید. بدین منظور، رابطه (۳-۱۷) را طوری تغییر می دهند که تغییرات مطلق^۴ مقادیر مقاومت ویژه مینیمم شوند [Cleaerbout and Muir, 1973]. این روش در برخی موارد نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد. در نهایت، این روش را روش نورم l_1 و یا روش معکوس سازی بلوکی می نامند [Wolk and Schwetlick, 1988]. در شکل (۳-۳) مدل به دست آمده از دو روش نورم l_2 و نورم l_1 را نشان می دهد، همانطور که در این شکل دیده می شود، مدل به دست آمده از روش نورم l_1 به مدل واقعی شباهت زیادی دارد.

¹Discrepanci

²Perturbation vector

³Flatness filter

⁴Absolute



شکل ۳-۳- مقایسه مدل های به دست آمده از دو روش معکوس سازی نرم ℓ_2 و نرم ℓ_1 . (الف) مدل به دست آمده از روش نرم ℓ_2 (ب) مدل به دست آمده از روش نرم ℓ_1 [After Seaton and Burbey, 2002]

چگونگی محاسبه ماتریس ژاکوبین در رابطه (۳-۶) آورده شد. برای محاسبه پارامتر r_i طبق رابطه (۳-۱) باید اختلاف بین مقادیر مقاومت ویژه های اندازه گیری شده و محاسبه شده را حساب کرد. ولی ذکر این نکته ضروری است که به جای استفاده از مقادیر مطلق مقاومت ویژه های اندازه گیری شده و مقادیر مطلق مقاومت ویژه های محاسبه شده، از لگاریتم این مقادیر استفاده

می کنند. این کار باعث می شود که مقادیر مقاومت ویژه محدود به مقادیر مثبت باشند [*Loke and Barker, 1996*]. اندازه فاکتور میرایی بستگی به سطح نویز در داده ها دارد [*Sasaki, 1992*]. هرچه سطح نویز در داده ها بیشتر باشد مقدار فاکتور میرایی (λ) را بیشتر انتخاب می کنند. فیلتر هموار کننده دو بعدی (C)، آشفتگی پارامترهای مدل را به یک مقدار ثابت و معینی هموار می کند [*Sasaki, 1992*]. با افزایش عمق اندازه درایه های این ماتریس نیز افزایش می یابد و با این روش از ناپایداری فرآیند معکوس سازی داده های مربوط به عمق بیشتر جلوگیری می شود [*George and Liu, 1981*; *Loke and Barker, 1996*].

در روش گاوس- نیوتن باید در هر مرحله از تکرار، با محاسبه مشتقات جزئی، درایه های ماتریس ژاکوبین را محاسبه نمود. خوبی این روش این می باشد که محاسبات مربوط به بردار تغییر پارامترهای مدل خیلی دقیق محاسبه می شوند و این الگوریتم در تعداد تکرار کمی نسبت به روش های دیگر، همگرا می شود. ولی بدی این روش، زمان و حافظه کامپیوتری مورد نیاز زیاد به خاطر محاسبات دقیق مذکور می باشد. سایر مزایا و معایب این روش در مقایسه با روش شبه نیوتن بعد از معرفی روش شبه نیوتن تشریح خواهد شد [*Loke and Barker, 1996*].

۳-۳-۳- روش شبه نیوتن

همان گونه که در قسمت قبلی ذکر گردید، در روش گاوس- نیوتن بعد از هر بار تکرار باید ماتریس ژاکوبین محاسبه شود ولی در روش شبه نیوتن به جای محاسبه مجدد ماتریس ژاکوبین از تخمین مقدار ماتریس ژاکوبین بعد از تکرار اول استفاده می شود. اگر ماتریس ژاکوبین برای مدل آغازین در تکرار اول موجود باشد می توان با استفاده از یک فرمول به روزرسانی که روش شبه نیوتن ارائه می دهد، مقادیر ماتریس ژاکوبین در تکرار بعدی محاسبه می شود. همچنین، می توان مشتقات جزئی را برای مدل همگن اولیه به روش تحلیلی محاسبه کرد [*McGillivray and Oldenburg, 1990*; *Park and Van 1991*].

تکنیک‌های به روزرسانی مختلفی وجود دارند که برای تخمین ماتریس ژاکوبین استفاده می‌شوند و روش برویدن یکی از این روش‌ها می‌باشد. در این تحقیق، به خاطر برخی ویژگی‌هایی که روش برویدن^۱ دارد، تنها به توضیح این روش پرداخته می‌شود. یکی از ویژگی‌های روش برویدن، سرعت همگرایی بالای این روش می‌باشد. با این وجود، تکنیک‌های دیگری هم وجود دارند که سرعت همگرایی برخی از این تکنیک‌ها برای معکوس‌سازی داده‌های مقاوم ویژه، بیشتر از روش برویدن می‌باشد [Dennis and Schanabel, 1983; Golub and van Loan; 1989]. ولی به طور کلی، به خاطر سرعت همگرایی بالای روش برویدن و همچنین پایداری این روش برای بسیاری از مسائل غیر خطی، این روش کاربرد گسترده‌ای در مسائل معکوس‌سازی ژئوفیزیکی پیدا کرده است [Broyden, 1976; More and Trangenstein, 1972]. همان‌طور که گفته شد روش شبه نیوتن از یک روش به‌روزرسانی خاص، جهت تخمین ماتریس ژاکوبین استفاده می‌کند، روش به‌روزرسانی تکنیک این روش، بدین صورت است که در تکرار i ام، ماتریس ژاکوبین J_i ، توسط ماتریس تخمینی B_i جایگزین می‌شود. برای به دست آوردن ماتریس B_i ، از رابطه (۱۸-۳) استفاده می‌شود [Broyden, 1965].

$$\begin{cases} B_{i+1} = B_i + u_i p_i^T \\ u_i = \frac{(\Delta y_i - B_i p_i)}{p_i^T p_i} \\ \Delta y_i = y_{i+1} - y_i \end{cases} \quad (18-3)$$

که در رابطه فوق:

y_i : پاسخ مدل در تکرار i ام

B_{i+1} : تقریب ماتریس ژاکوبین برای تکرار $(i+1)$ ام

p_i : بردار آشفته‌گی پارامترهای مدل برای تکرار i ام

می‌باشند.

در روش برویدن، بردار پارامتر آشفته‌گی مدل در تکرار i ام، توسط رابطه (۱۹-۳) محاسبه

¹Broyden

می شود.

$$(B_i^T B_i + \lambda_i C^T C) P_i = B_i^T r_i \quad (19-3)$$

۳-۳-۱- رویه عملی استفاده از روش شبه نیوتن در مسائل معکوس سازی

در قسمت قبلی، در مورد روابط ریاضی مربوط به روش شبه نیوتن بحث و بررسی انجام شد. در این قسمت در مورد چگونگی استفاده از این روابط بحث خواهد شد. فرض اولیه در استفاده از روش شبه نیوتن این می باشد که تنها داده های مشخص و موجود، داده های مربوط به مقاومت ویژه های ظاهری اندازه گیری شده در صحرا می باشد. چگونگی استفاده از روش شبه نیوتن شامل چهار مرحله به صورت زیر می باشد:

الف) ابتدا باید مقدار فاکتور میرایی آغازین (λ_0) و حداقل مقدار فاکتور میرایی (λ_m) را برای روش حداقل مربعات مشخص شود. معمولاً مقدار فاکتور میرایی آغازین (λ_0) را در حدود ۰.۲ و حداقل مقدار فاکتور میرایی λ_m را در حدود ۰.۰۴ انتخاب می کنند. به طور کلی، حداقل مقدار فاکتور میرایی (λ_m) را معمولاً یک سوم مقدار اولیه فاکتور میرایی (λ_0) در نظر می گیرند [Loke and Dahlin, 2002]. حداکثر تعداد تکرارها برای معکوس سازی به روش شبه نیوتن نیز باید در این مرحله مشخص شود [Loke and Barker, 1996].

همچنین در این مرحله باید برخی از شاخص های^۱ همگرایی تعیین شوند. از قبیل حداقل مقدار خطای rms، که باید مشخص شود. برای داده های صحرائی که سطح نویز در این داده ها مشخص نیست، معمولاً از تغییرات خطای rms (e_i) طبق رابطه (۳-۲۰) استفاده می شود. معمولاً وقتی خطای rms کمتر از ۵ درصد باشد، فرآیند معکوس سازی متوقف می شود [Loke and Barker, 1996].

$$e_i = (\epsilon_i - \epsilon_{i+1}) / \epsilon_i \quad (20-3)$$

¹Criterion

که در رابطه فوق:

ϵ_i : مقدار خطای rms در تکرار i ام

ϵ_{i+1} : مقدار خطای rms در تکرار $(i+1)$ ام

e_i : مقدار تغییر در خطای rms.

می باشند.

ب) مدلی از یک زمین همگن به عنوان یک مدل آغازین برای تکرار اول در نظر گرفته می شود. برای تعیین این مدل همگن اولیه، ابتدا باید مقاومت ویژه الکتریکی این مدل همگن را مشخص نمود. در بحث مسائل ژئوفیزیک به جای اینکه از مقدار مطلق مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شود از لگاریتم اندازه مقاومت ویژه الکتریکی استفاده می شود. به همین منظور، برای تعیین اندازه مقاومت ویژه الکتریکی مدل اولیه همگن، باید از رابطه (۳-۲۱) استفاده کرد. با توجه به این رابطه می توان این گونه نتیجه گیری کرد، که اندازه لگاریتم مقاومت ویژه الکتریکی مدل اولیه همگن برابر با میانگین لگاریتم مقاومت ویژه های اندازه گیری شده در صحرا می باشد.

$$R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i \quad (۳-۲۱)$$

که در رابطه فوق:

n : تعداد داده های صحرائی.

R_0 : لگاریتم مقاومت ویژه مدل اولیه همگن

f_i : لگاریتم مقاومت ویژه اندازه گیری شده

می باشند.

بعد از انجام محاسبات فوق الذکر، ماتریس ژاکوبین B_0 از روی مشتقات جزئی که قبلاً برای آرایش مورد نظر، محاسبه و در فایل کامپیوتر ذخیره شده است، محاسبه می شود [Loke and Barker, 1995]. بعد از محاسبه B_0 ، می توان با حل رابطه (۳-۱۹)، بردار آشفستگی پارامتر مدل (P_1) را محاسبه نمود. و از روی همین بردار آشفستگی مدل می باشد که طبق رابطه (۳-۲۲) مقاومت ویژه

بلوک های مدل به دست می آید.

$$R_1 = R_0 + p_0 \quad (22-3)$$

که در رابطه فوق:

R : مقاومت ویژه الکتریکی یک بلوک از مدل

می باشد.

(پ) روش برویدن برای به دست آوردن ماتریس B_{i+1} جهت شروع تکرار بعدی استفاده می شود. معمولاً اگر مقدار خطای rms، در تکرار بعدی از مقدار خطای rms در تکرار قبلی کمتر باشد، در این صورت اندازه فاکتور میرایی را به نصف کاهش می دهند (به شرط اینکه مقدار به دست آمده برای فاکتور میرایی کمتر از مینیمم مقدار (λ_m) تعریف شده در مرحله (الف) نباشد. ولی اگر مقدار خطای rms، در تکرار بعدی از مقدار خطای rms در تکرار قبلی بیشتر باشد، در این صورت اندازه فاکتور میرایی افزایش داده می شود و بردار آشفستگی پارامتر (P_i) مجدداً محاسبه می شود [Loke and Barker, 1996].

(ت) در این مرحله، با استفاده از ماتریس ژاکوبین تخمین زده شده (B_{i+1})، بردار آشفستگی پارامتر (P_{i+1}) توسط رابطه (3-19) محاسبه می شود. بعد از این مرحله یک مدل جدیدی به دست می آید. سپس مراحل (پ) و (ت)، تا زمانی که الگوریتم همگرا نشده است و یا به حداکثر تعداد تکرارها نرسیده است، تکرار می شوند.

روش شبه نیوتن نیز مثل روش گاوس-نیوتن، دارای یک سری مزایا و معایب می باشد که باید این مزایا و معایب را به صورت نسبی و در مقایسه با سایر روشها مشخص نمود. به همین منظور در قسمت بعدی ویژگی های این دو الگوریتم باهم مقایسه می شوند و برتری نسبی هر الگوریتم نسبت به دیگری مشخص می شود [Loke and Barker, 1996].

۳-۳-۴- مقایسه روش شبه نیوتن با روش گاوس- نیوتن

به صورت تئوری، سرعت همگرایی روش شبه نیوتن، کمتر از روش گاوس- نیوتن می باشد. با اینکه روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گاوس- نیوتن به تعداد تکرارهای بیشتری نیاز دارد تا همگرا شود ولی مدت زمان لازم برای انجام یک تکرار در روش شبه نیوتن کمتر از روش گاوس- نیوتن می باشد [Burden et al., 1981].

هر چه اختلاف مقاومت ویژه بین ساختارهای مختلف در داخل مدلی از یک زمین بیشتر می شود، اختلاف بین ماترس ژاکوبین تخمین زده شده (B) و محاسبه شده (J) بیشتر خواهد بود. اگر اختلاف مقاومت ویژه^۱ بین ساختارها در یک مدل کمتر از ۱۰ به ۱ باشد، تفاوت خاصی در نتایج به دست آمده از دو روش وجود نخواهد داشت [Loke and Barker, 1996].

¹Contrasts

فصل چهارم

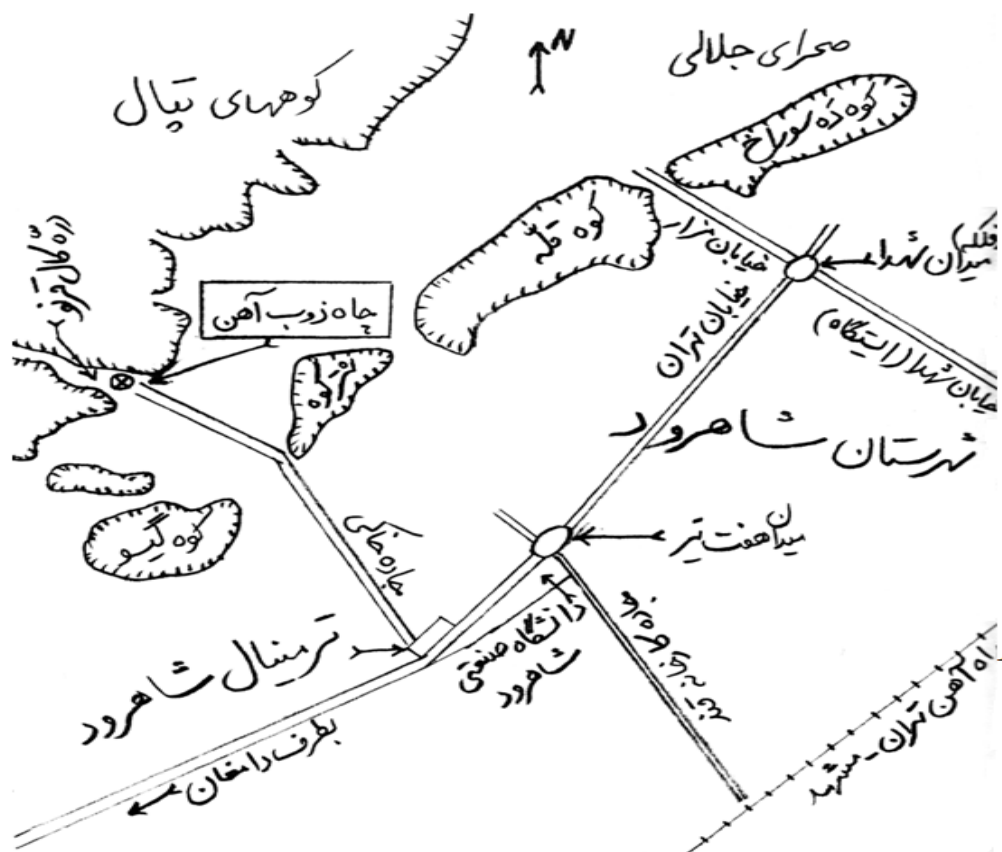
موقعیت جغرافیایی محل برداشت و وضعیت زمین شناسی منطقه

۴-۱- موقعیت جغرافیایی محل برداشت

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در محلی به نام دره کال‌قرنو (دره ذوب آهن) در شش کیلومتری غرب شاهرود برداشت شده‌اند. با توجه به شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲)، راه‌های اصلی دستیابی به محل مورد مطالعه، جاده آسفالتی شاهرود به دامغان می‌باشد و از ترمینال شاهرود به بعد، این راه از نوع درجه سه و به طور خاکی می‌باشد که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- راه‌های اصلی دستیابی به محل مورد مطالعه



شکل ۴-۲- راه‌های فرعی دستیابی به محل مورد مطالعه

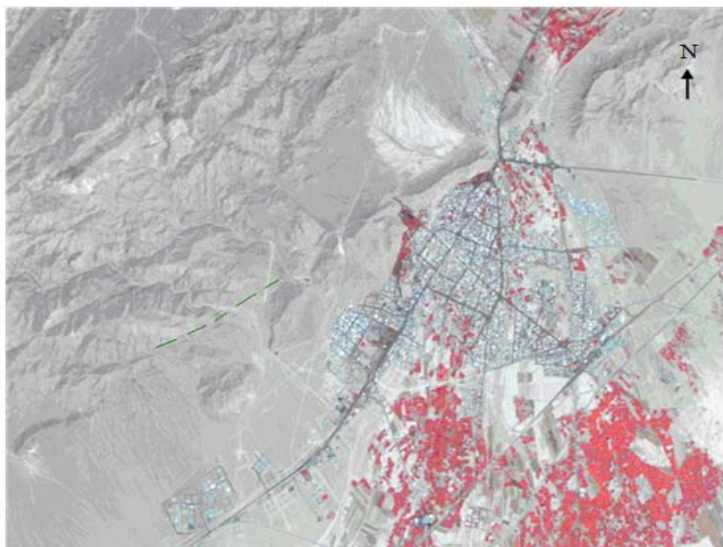
۲-۴- زمین ریخت‌شناسی^۱

ارتفاعات شمالی منطقه مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات البرز خاوری است. ارتفاعات البرز خاوری نسبت به ارتفاعات البرز باختری رو به نقصان گذاشته و کم عرض تر و باریک‌ترند تا آنکه در ۲۰۰ کیلومتری خاور دریای خزر ارتفاعات آن به دشت آرموتلی در شرق جنگل گلستان منتهی می‌شود. بخش‌های جنوبی نقشه نیز که سرزمین کویری می‌باشد بخشی از ایالت ساختاری ایران مرکزی است. بلندترین نقطه منطقه مورد مطالعه را کوه چالوئی با ارتفاع ۳۷۵۰ متر از سطح دریا تشکیل شده است. نزولات جوی رشته کوه‌های البرز در شمال شاهرود منبع اصلی تغذیه رودها و قنوات این منطقه است. در قسمت جنوبی، رشته کوه‌های کم‌ارتفاع موازی با رشته کوه‌های اصلی

1- Geomorphology

کشیده شده است که آنها نیز با نزدیک شدن به دشت کویر کم ارتفاع می‌شوند [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].

با توجه به شکل (۳-۴) بخش اعظم رخنمون سنگ‌های منطقه در شمال نقشه قرار دارد که بخشی از ارتفاعات البرز خاوری را تشکیل می‌دهد که دارای روند گسترشی شمال خاوری- باختری است. این سنگ‌ها در بیشتر مناطق ارتفاعات بلند را تشکیل می‌دهد. واحدهای سنگی منطقه، اساساً از واحدهای رسوبی دریایی (سنگ آهک‌ها) تشکیل شده‌اند که در دو مورد سنگ آهک‌های سازند لار و سنگ آهک‌های کرتاسه بالائی مرتفع‌ترین نقاط منطقه را تشکیل داده است. اما بخش‌هایی از سنگ‌های فوق اساساً از واحدهای فرسایش‌پذیر نظیر شیل، مارن و کنگلومرا شکل گرفته‌اند که مناطق کم‌ارتفاع و پست را تشکیل داده‌اند. اما همان‌گونه که بیان شد می‌توان ارتفاعات بلند ستیغ‌سازی که دارای شیب توپوگرافی زیادی بوده و پرتگاه‌های متعددی را پدید آورده است را در سلسله کوه‌های شمال منطقه مورد مطالعه، در توالی‌های سازند لار و کرتاسه بالایی مشاهده نمود. البته می‌دانیم که ریخت این پستی و بلندی‌ها به جنس واحدهای سنگی پدید آورنده آنها بستگی دارد. مکانهایی که جنس واحدهای سنگی از سنگ‌های مقاوم در برابر فرسایش است ارتفاع بیشتری را نسبت به مناطق دیگر تشکیل داده‌اند و مناطقی که توالی‌های آن سست و ریزدانه می‌باشند در برابر فرسایش مقاوم نبوده و تحت تاثیر شدید قرار می‌گیرند ارتفاع کمتری نسبت به توالی‌های دیگر داشته و سرزمین‌های کم ارتفاع و پست را تشکیل می‌دهند. لذا در شمال منطقه مورد مطالعه که رخنمون‌های مربوط به سنگ آهک‌های سازند لار وجود دارد مرتفع بوده و در کنار بلندی‌هایی از سنگ آهک‌های کرتاسه بالایی گسترش قابل توجهی را با روند گسترش خاوری- باختری تشکیل می‌دهند [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].



شکل ۳-۴- تصویر ماهواره‌ای شهرستان شاهرود [سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح]

۳-۴- زمین‌شناسی ساختمانی منطقه

منطقه مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات البرز خاوری است با توجه به شناختی که از ویژگی‌های زمین‌ساختی البرز وجود دارد. طبعاً در طول ادوار گذشته دست‌خوش رویدادها و پدیده‌های مختلفی مانند عملکرد رویدادهای کوهزائی، چین‌خوردگی و گسلش‌های متعدد بوده و ساختمان‌های جالبی را ایجاد کرده است [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].

۳-۴-۱- چین‌خوردگی‌های منطقه

چین‌خوردگی‌های منطقه مورد مطالعه را اساساً ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی تشکیل می‌دهند که تعداد قابل توجهی را تشکیل می‌دهند. ساختمان‌های فوق عمدتاً دارای گسترش شمال‌خاور- جنوب‌باختر و یا خاوری- باختری بوده و از انواع متقارن و یا نامتقارن هستند. برای مثال از مجموع فوق می‌توان به تاقدیس متقارن خربش در توالی‌های سازند سلطانیه، تاقدیس متقارن نیال در توالی‌های ژوراسیک با میلی در جهت شمال‌خاور و ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی پیوسته حنفی، مهماندویه و جگل شاه با محوری در راستای شمال‌خاوری- جنوب‌باختری اشاره نمود [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].

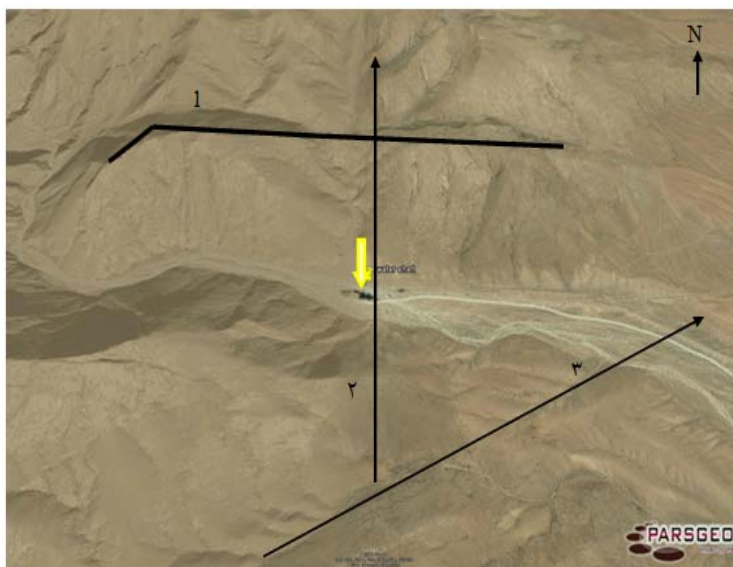
۴-۳-۲- گسل‌های منطقه

سیستم اصلی گسل‌های منطقه مورد مطالعه را راندگی‌ها^۱ و سپس گسل‌های امتدادلغز^۲ تشکیل می‌دهد. راندگی‌های موجود در منطقه دارای امتداد تقریبی خاوری- باختری بوده و حرکات قابل توجهی را از شمال به سمت جنوب در بر داشته است. این راندگی‌ها در مکانهایی که شیب گسل نزدیک به صفر شده است، سفره‌های رورانده^۳ را بوجود آورده‌اند. از جمله گسل‌های راندگی منطقه شاهرود می‌توان گسل‌های راندگی طزره، مجن، میامی را نام برد.

به انضمام گسل‌های معرفی شده تعدادی نیز گسل‌های عادی و معکوس (با شیب بیش از ۴۵ درجه) و همچنین گسل‌های امتدادلغز که اساساً راستگرد می‌باشند بطور پراکنده در منطقه قابل رویت است [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].

گسل معکوس شاهرود، یکی از گسل‌های اصلی منطقه می‌باشد و دارای طول زیاد در راستای غرب- شرق می‌باشد. گسل فوق از پائین شهر بسطام و شمال شاهرود با حرکتی از سمت شمال غرب به سمت جنوب شرق عبور کرده و در ادامه با حرکتی از سمت شمال به طرف جنوب در مسیر خود صفحه‌های رورانده‌ای را نیز ایجاد کرده است که می‌توان در این رابطه به صفحه رورانده بزرگ سازند الیکا بر روی توالی‌های سازند شمشک و در برخی مناطق بر روی توالی‌های پالئوزوئیک اشاره نمود. این گسل رانده در مسیر خود یال شمالی ناودیس ده‌ملا را نیز بریده است و موجب حذف تناوب‌های سازند زاگون در این یال شده است. این گسل از منطقه مورد مطالعه (کال قرنو) عبور می‌کند [نقشه زمین‌شناسی شاهرود]. شکل (۴-۴) عکس ماهواره‌ای محل مورد مطالعه را نشان می‌دهد در این شکل خط شماره ۳ امتداد گسل شاهرود را نشان می‌دهد. همچنین، محل چاه ذوب آهن با فلش زرد رنگ نشان داده شده است که گسل شماره ۲ از کنار آن عبور نموده و گسل شماره ۱ را قطع کرده است.

-
- 1- Thrust Faults
 - 2- Strike slip Faults
 - 3- Nappes



شکل ۴-۴- تصویر ماهواره‌ای از منطقه مورد مطالعه [www. Google Earth.com]

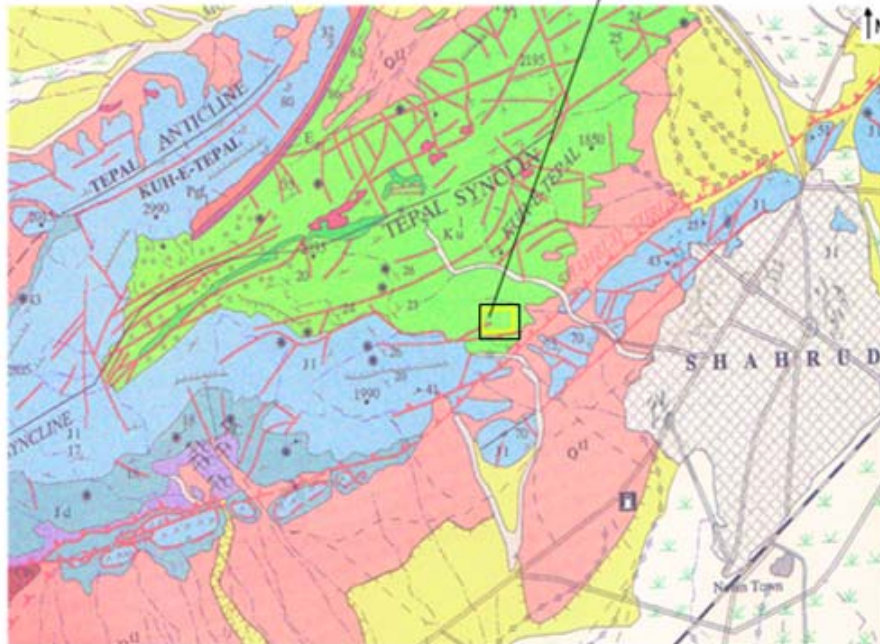
۴-۴- واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

شکل (۴-۵) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که از قدیم به جدید به ترتیب شامل سه واحد زمین‌شناسی J_1 ، Ku^1 و Q^{t1} می‌باشد که هر یک به طور مختصر توضیح داده می‌شود [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].

۴-۴-۱- واحد سازند لار (J_1) - ژوراسیک میانی - بالایی

توالی‌های سازند لار در ناحیه مورد مطالعه از سنگ آهک‌های خاکستری روشن حاوی تعداد کمی آمونیت تشکیل شده است. این سنگ آهک‌ها ابتدا ضخیم لایه بوده که تدریجاً به سنگ آهک‌های توده‌ای و دیواره‌ساز تبدیل می‌شوند. این سنگ‌ها در قسمت‌های فوقانی خود دارای ندول‌های چرت فراوان هستند. با بررسی تغییرات عمودی رخساره‌های سازندهای دلیچای و لار می‌توان نتیجه گرفت که از زمان ژوراسیک میانی تا ژوراسیک بالایی پستی دریا موجب شده تا رخساره‌های کم‌عمق سازند لار بر روی رخساره‌های عمیق سازند دلیچای رسوب‌گذاری شوند. توالی‌های این سازند در ناحیه مورد مطالعه حدوداً دارای ۶۰۰ متر ضخامت می‌باشند. سن سازند لار بر اساس آمونیت‌های مطالعه شده از ژوراسیک میانی تا ژوراسیک بالایی تعیین گردیده است.

محل مورد مطالعه



1/100000



شکل ۴-۵- نقشه زمین شناسی منطقه و موقعیت محل مورد مطالعه [نقشه زمین شناسی شاهرود، ۱۳۸۰]

۴-۴-۲- واحد Ku^1

توالی‌های اصلی با ضخامت‌های زیاد سنگ آهک کرتاسه بالائی متعلق به این واحد می‌باشند. این واحد از تناوب‌های سنگ آهک خاکستری روشن با مارن‌های سبز روشن در ابتدای واحد و سپس آهک‌های خاکستری متمایل به قهوه‌ای ضخیم لایه، توده‌ای و صخره‌ساز که به مقدار زیاد فرسایش یافته و هوازده و کریستالیزه می‌باشند و همچنین در اثر فرسایش حاصل از بارندگی و جریان آب‌های جاری حفرات متعددی در آنها تشکیل شده است. در این سنگ‌ها صدف دو کفه‌ای‌ها، فسیل اینوسراموس و هیپوریت قابل رویت است و نیز، میکروفسیل‌های ریز در مقاطع نازک سنگ‌های فوق رویت گردیده است. بر اساس مطالعه میکروفسیل‌های این واحد می‌توان سن دقیق این سنگ‌ها را به زمان سنومادین- کامپانین نسبت داد. سنگ‌های کرتاسه بالائی در منطقه مورد مطالعه با وجود وقفه و نبود چینه‌ای بر روی سنگ آهک‌های سازند لار قرار گرفته و در مرز بالائی خود نیز بواسطه ناپیوستگی و نبود چینه‌ای توسط توالی سازند مچن پوشیده می‌شود. این سنگ‌ها با ضخامت تقریبی ۴۰۰ متر دستخوش گسل خوردگی و چین خوردگی متعددی شده‌اند.

۴-۴-۳- واحد Q^t1

این واحد شامل پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و مارن‌های گراولی است که در قسمت بالا دست رودخانه‌ها و یا در کنار دره‌ها تشکیل شده‌اند که بخش قابل توجهی از نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه را این نوع رسوبات دربر گرفته است [نقشه زمین‌شناسی شاهرود].

فصل پنجم

برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی توسط آرایش

قطبی- دو قطبی متقارن

۵-۱- مقدمه

وجود آب در محلی که برداشت‌های ژئوالکتریکی در آن صورت گرفته است از قبل مشخص بوده است ولی به خاطر اینکه ساختار زمین‌شناسی تشکیل شده از سازند آهکی لار می‌باشد و چون تا به حال روش کلی برای اکتشاف آب در اینگونه زمین‌های سخت تعریف نشده است لذا، ما در این تحقیق قابلیت آرایش‌های مختلف برای اکتشاف آب در سازندهای سخت بررسی نمودیم و به این نتیجه رسیدیم که مناسب‌ترین آرایش جهت اکتشاف آب در اینگونه سازندها، آرایش قطبی-دوقطبی می‌باشد. برای اثبات این موضوع داده‌های برداشت شده با استفاده از این آرایش را انتخاب و مدل‌سازی نمودیم تا قابلیت این آرایش برای اکتشاف آب در این نوع سازندها اثبات شود. در فصل دو، در مورد برخی از خصوصیات این آرایش توضیحاتی داده شد، همان‌طور که اشاره شد، به علت عدم تقارن الکترودهای آرایش قطبی-دوقطبی، مقاطع تهیه شده توسط این آرایش بر روی آنومالی‌های متقارن، دارای شکلی نامتقارن می‌باشند. برای رفع این مشکل، برداشت‌های مقاومت ویژه، توسط دو روش رو به عقب و رو به جلو انجام می‌گیرند که در قسمت بعدی راجع به این دو روش توضیح داده خواهد شد. ترکیب اندازه‌گیری‌ها توسط دو روش رو به عقب و رو به جلو، باعث ایجاد آرایشی می‌شود که به آن، آرایش قطبی-دوقطبی متقارن می‌گویند. برای ایجاد آرایش قطبی-دوقطبی متقارن، دو روش وجود دارد، یکی روش لوک و دیگری روش کاروس و پرنو، که در هر دو روش چگونگی آرایش الکترودها و همچنین نقطه‌ای که مقاومت ویژه قرائت شده به آن نسبت داده می‌شود، متفاوت می‌باشند. داده‌های مقاومت ویژه مورد استفاده در این تحقیق با استفاده از روش کاروس و پرنو برداشت شده است ولی اساس کار نرم‌افزار Res2Dinv که مدل‌سازی دوبعدی معکوس توسط آن انجام می‌گیرد، بر اساس روش لوک می‌باشد. به همین دلیل، در این تحقیق به منظور این که مشخص شود که کدامیک از دو روش مناسب‌تر است. ابتدا داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده در کنار چاه ذوب‌آهن را که ساختار زمین‌شناسی آن از قبل مشخص می‌باشد، توسط هر دو روش، به نرم‌افزار مذکور داده شد. در نهایت مشخص گردید که اگر این داده‌ها را توسط روش کاروس و پرنو مدل‌سازی

نمائیم، پاسخی که نرم‌افزار مذکور می‌دهد به واقعیت‌های زمین‌شناسی بیشتر نزدیک می‌باشد.

در این فصل، نخست توضیحاتی راجع به نحوه تشکیل آرایش قطبی-دوقطبی متقارن با استفاده از روش لوک و روش کاروس و پرنو ارائه می‌شود. سپس به تشریح دقیق چگونگی پروفیل‌زنی و سونداژزنی ترکیب یافته، توسط آرایش قطبی-دوقطبی پرداخته می‌شود. در نهایت، چگونگی اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی، ارائه می‌گردد.

۵-۲- معرفی آرایش قطبی-دوقطبی

نحوه قرار گرفتن الکترودها در آرایش قطبی-دوقطبی به صورت شکل (۵-۱) می‌باشد. در این شکل، الکترودها (A) نشان دهنده الکترودهای جریان، الکترودهای (M) و (N) نشان دهنده الکترودهای پتانسیل و (a) نشان دهنده فاصله M-N می‌باشند. همچنین در این شکل نقطه (O) در وسط فاصله M-N و نقطه (O') در وسط A-N قرار دارد. در روش لوک، مقاومت ویژه الکتریکی قرائت شده به نقطه (O') نسبت داده می‌شود ولی در روش کاروس و پرنو، به نقطه (O) نسبت داده می‌شود. عمقی که در روش لوک برای نقطه اندازه‌گیری شده در نظر گرفته می‌شود، برابر عمق میانه کاوش می‌باشد که مقدار آن طبق جدول (۲-۱) تعیین می‌شود ولی در روش کاروس و پرنو این عمق در حدود $(\frac{AO}{2})$ در نظر گرفته می‌شود. فاصله الکترودهای A-M در آرایش قطبی-دوقطبی با ضریب (n) افزایش داده می‌شود. مقدار (n) یک عدد صحیح می‌باشد ولی مقدار (a) می‌تواند مقادیر غیر صحیح را نیز داشته باشد. حداکثر مقدار برای (n) را معمولاً ۱۰ در نظر می‌گیرند چون اگر مقدار (n) از ۱۰ تجاوز کند نسبت سیگنال به نوفه کاهش یافته و داده‌های جمع‌آوری شده تحت تاثیر نوفه بیشتری قرار می‌گیرند. همان‌طور که در قسمت (۲-۳-۴) آورده شد پوشش افقی این آرایش نسبتاً خوب و قدرت سیگنال آن در مقایسه با آرایش دوقطبی-دوقطبی، بیشتر می‌باشد. این آرایش به اندازه آرایش قطبی-قطبی، به نوفه حساس نیست. مقطع حساسیت این آرایش (شکل ۲-۱۸) نشان می‌دهد که ناحیه دارای بالاترین حساسیت در بین الکترودهای M-N قرار می‌گیرد (بویژه برای nهای بزرگتر از

۲)، به همین دلیل روش کاروس و پرنو بر روش لوک برتری دارد. با توجه به ویژگی‌های مقطع حساسیت این آرایش، می‌توان از این آرایش برای اکتشاف ناهمگنی‌های جانبی (گسل قائم، دایک و ...) استفاده کرد. همان‌طور که در شکل (۵-۱) دیده می‌شود، این آرایش دارای یک الکتروود بی‌نهایت می‌باشد که در فاصله تقریبی $15AN$ تا $20AN$ از خط برداشت قرار داده می‌شود. رابطه بین اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده توسط آرایش قطبی-دوقطبی و مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری زمین مورد مطالعه، طبق رابطه (۵-۱) تعریف می‌شود.

$$\begin{cases} \rho = 2\pi na(n+1) \frac{\Delta V}{I} \\ n = \frac{AM}{MN} \end{cases} \quad (5-1)$$

که در رابطه فوق:

ρ : مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری زمین مورد مطالعه

ΔV : اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین الکتروودهای پتانسیل M و N

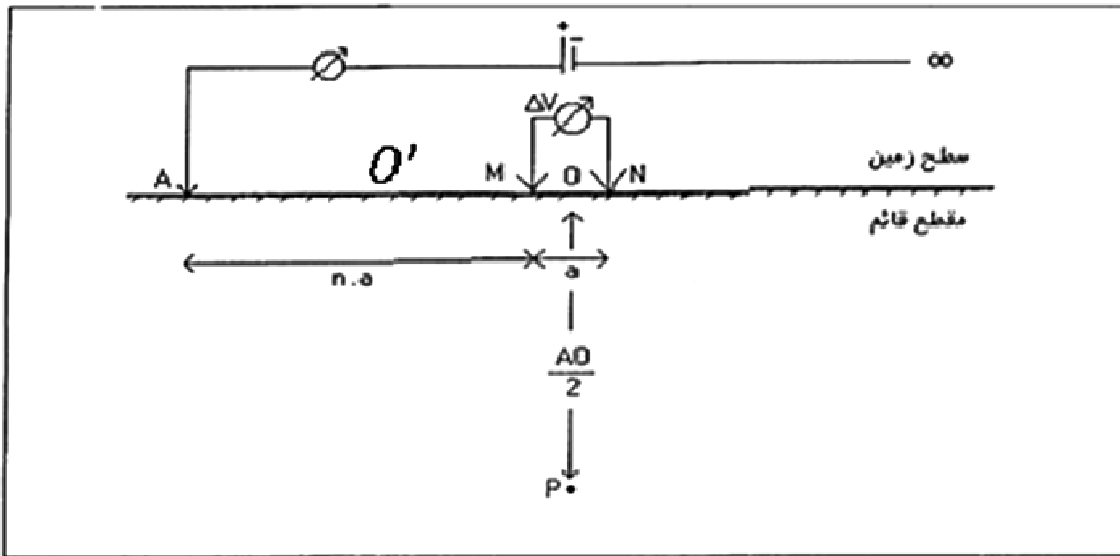
a : فاصله بین الکتروودهای پتانسیل (در آرایش قطبی-دوقطبی)

I : اندازه جریان تزریق شده به زمین

A : الکتروود جریان

M : الکتروود پتانسیل

N : الکتروود پتانسیل



شکل ۵-۱- آرایش قطبی-دوقطبی [پیروز، ۱۳۸۲ الف]

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، نامتقارن بودن الکترودهای این آرایش، باعث به وجود آمدن خطا در تفسیر مقاطع حاصله می‌شود که برای رفع این مشکل، برداشت‌های مقاومت ویژه، در دو آرایش رو به جلو و رو به عقب انجام می‌شوند. شکل چینش رو به جلو آرایش قطبی-دوقطبی برای هر دو روش لوک و کاروس و پرنو مطابق شکل (۵-۲) می‌باشد. این آرایش با علامت قراردادی \overline{AMN} نمایش داده می‌شود که نشان می‌دهد. الکترودهای A در سمت چپ الکترودهای پتانسیل واقع است [پیروز، ۱۳۸۲ الف].



شکل ۵-۲- چینش الکترودها در آرایش قطبی-دوقطبی رو به جلو \overline{AMN} [پیروز، ۱۳۸۲ الف]

در روش لوک برای ایجاد آرایش قطبی-دوقطبی رو به عقب، جای الکترودهای (A) و (N) تعویض می‌گردند و الکترودهای (M) در سمت راست الکترودهای (N) قرار می‌گیرد، ولی در فواصل الکترودها نسبت به حالت رو به جلو تغییر داده نمی‌شود. در روش کاروس و پرنو، چینش الکترودها در آرایش قطبی-دوقطبی رو به عقب مطابق شکل (۵-۳) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود فقط الکترودهای A نسبت به وسط $M-N$ ، قریب‌تر می‌شود. اگر در این حالت، اسم الکترودهای جریان را

B بنامیم، در این صورت می‌توانیم آرایش مذکور را توسط علامت قراردادی \overline{MNB} نمایش دهیم، که نشان می‌دهد الکتروود جریان B در سمت راست الکتروودهای پتانسیل \overline{MN} واقع است (شکل ۵-۳). در هر دو آرایش \overline{AMN} و \overline{MNB} الکتروود جریان قطب منفی در بی‌نهایت می‌باشد. با توجه به اینکه، داده‌های مورد استفاده در این تحقیق بر اساس روش کاروس و پرنو برداشت شده‌اند، به همین خاطر در ادامه، به شرح چگونگی برداشت مقاومت ویژه با استفاده از این روش پرداخته خواهد شد [پیروز، ۱۳۸۲ الف].



شکل ۵-۳- چینش الکتروودها در آرایش قطبی-دوقطبی رو به عقب، \overline{MNB} [پیروز، ۱۳۸۲ الف]

۵-۲-۱- روش پروفیل‌زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی-دوقطبی

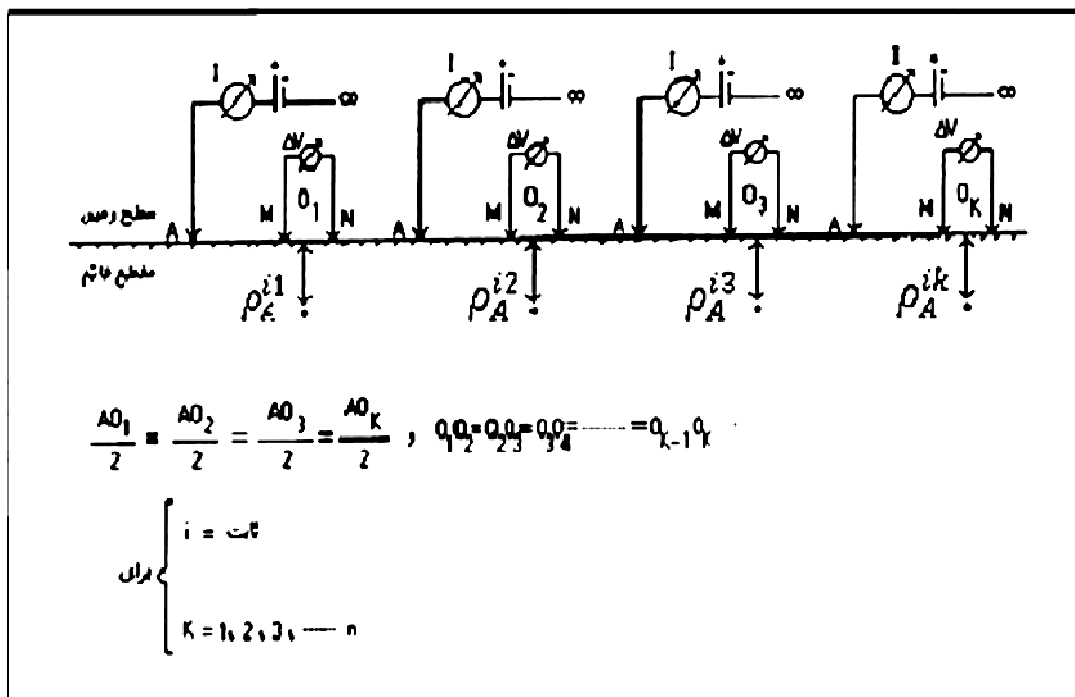
در صورتی که بخواهیم تغییرات مقاومت ویژه زمین را به طور جانبی توسط آرایش قطبی-دوقطبی برای یک عمق ثابت اندازه‌گیری نمائیم، باید این آرایش را بدون اینکه فواصل بین الکتروودهای آن را تغییر دهیم در امتداد خط پروفیل، ایستگاه به ایستگاه جابجا کنیم. جابجایی باید با فاصله‌های یکسان و به طور متوالی انجام گیرد. در این حالت، روش مذکور را پروفیل‌زنی الکتریکی^۱ می‌گویند. با توجه به شکل (۵-۴)، با استفاده از اولین آرایش قطبی-دوقطبی در سمت چپ شکل مذکور، مقاومت ویژه زمین، در زیر ایستگاه (O_1) برای یک عمق ثابت اندازه‌گیری می‌گردد.

در روش پروفیل‌زنی، از اندازه‌گیری در هر ایستگاه، یک مقاومت ویژه بدست می‌آید که آن را توسط $\rho_A^{i,k}$ نمایش می‌دهند. در این نمایش، i یک عدد ثابت است، که نمایانگر یک عمق اندازه‌گیری ثابت می‌باشد و علامت K ، نشان دهنده تعداد ایستگاه می‌باشد ($k = 1, 2, 3, \dots, n$)

اگر O وسط MN باشد، (O_k) محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری متوالی که با فاصله‌های یکسان از یکدیگر در روی خط پروفیل قرار دارند، می‌باشند به عبارتی دیگر، (O_k) وسط فاصله MN در ایستگاه

¹-Electrical profiling

اندازه‌گیری K ام می‌باشد. مقادیر $(\rho_A^{i1}, \rho_A^{i2}, \rho_A^{i3}, \dots, \rho_A^{ik})$ ، به ترتیب مقاومت ویژه در زیر ایستگاه‌های O_1, O_2, \dots, O_k ، برای یک عمق ثابت می‌باشند (i ، در اینجا یک عدد ثابت فرض شده است) [پیروز، ۱۳۸۲ الف].



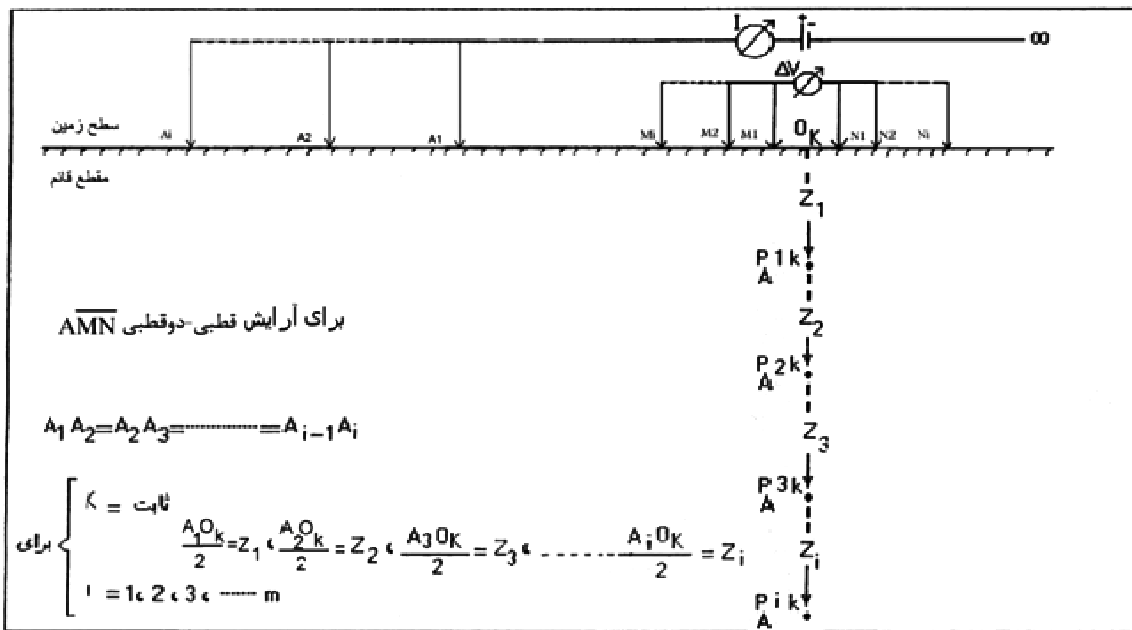
شکل ۴-۵- چگونگی برداشت به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش قطبی-دوقطبی [پیروز، ۱۳۸۲ الف]

۵-۲-۲- روش سونداژزنی الکتریکی^۱ توسط آرایش قطبی-دوقطبی

اگر امتداد خط پروفیل در امتداد محور x ها فرض شود و عمق زمین در امتداد محور z ها باشد، در این حالت می‌توان با استفاده از روش سونداژزنی، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی را در عمق‌های مختلف، برای یک مقدار ثابتی از x به دست آورد. برای انجام سونداژزنی، باید مطابق شکل (۵-۵) الکترودهای پتانسیل را ثابت در نظر گرفته و فقط الکترودهای جریان را نسبت به وسط MN دور نمود. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، اگر الکترودهای جریان (A_1) در فاصله (A_1O_k) قرار گیرد،

1-Electrical sounding

مقاومت ویژه‌ای که در این حالت اندازه‌گیری می‌شود به محلی از زمین نسبت داده می‌شود که در زیر نقطه (O_k) واقع و دارای عمقی برابر $\frac{A_1 O_k}{2}$ باشد. بنابراین با قرار دادن الکترودهای جریان، به ترتیب در موقعیت‌های (A_1, A_2, \dots, A_i)، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ($\rho_A^{1k}, \rho_A^{2k}, \rho_A^{3k}, \dots, \rho_A^{ik}$) برای عمق‌های ($Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_i$)، در زیر ایستگاه (O_k) بدست می‌آیند (K در اینجا یک عدد ثابت فرض شده است). مقدار این مقاومت ویژه توسط ρ_A^{ik} نشان داده می‌شود [پیروز، ۱۳۸۲ الف].



شکل ۵-۵- چگونگی سونداژزنی الکتریکی با استفاده از آرایش قطبی-دوقطبی [پیروز، ۱۳۸۲ الف]

۵-۲-۳- معرفی روش ترکیب یافته سونداژزنی با روش پروفیل‌زنی الکتریکی^۱

اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق، از ترکیب نمودن روش سونداژزنی با روش پروفیل‌زنی بدست آمده است. به منظور توضیح در مورد نحوه این ترکیب، فرض می‌کنیم هدف ما انجام اکتشافات زمین تا عمق ۷۰ متری باشد. ابتدا با استفاده از روش سونداژزنی با آرایش قطبی-دوقطبی، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی تا عمق ۷۰ متری را برای ایستگاه (O_1) انجام

^۱ Combined electrical sounding and profiling method

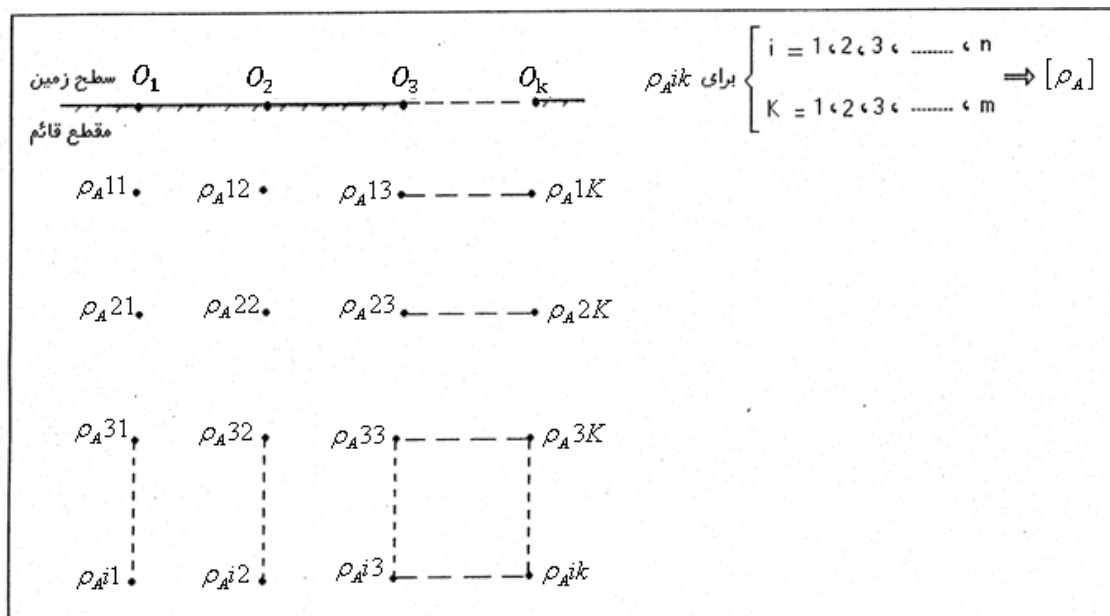
می‌دهیم و بعد، الکترودها را جابجا کرده (پروفیل‌زنی) و به ایستگاه O_2 ، منتقل می‌کنیم. این دفعه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی تا عمق ۷۰ متری را برای ایستگاه O_2 ، به روش سونداژزنی تکرار می‌کنیم و این کار را تا ایستگاه O_k تکرار می‌کنیم. در این صورت اگر مقادیر مقاومت ویژه‌های بدست آمده از ایستگاه‌های متوالی را در زیر آن ایستگاه بنویسیم، می‌توان هر مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده را به صورت $\rho_A^{i,k}$ نمایش داد. در این نمایش i و k هر دو متغیر هستند. به طوری که می‌توانیم بنویسیم:

$$i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n$$

با این تعریف، هر $\rho_A^{i,k}$ را می‌توان یک عنصر از یک ماتریس تلقی نمود و ماتریس حاصله را

می‌توان مانند شکل (۵-۶) بصورت $[\rho_A]$ نمایش داد.

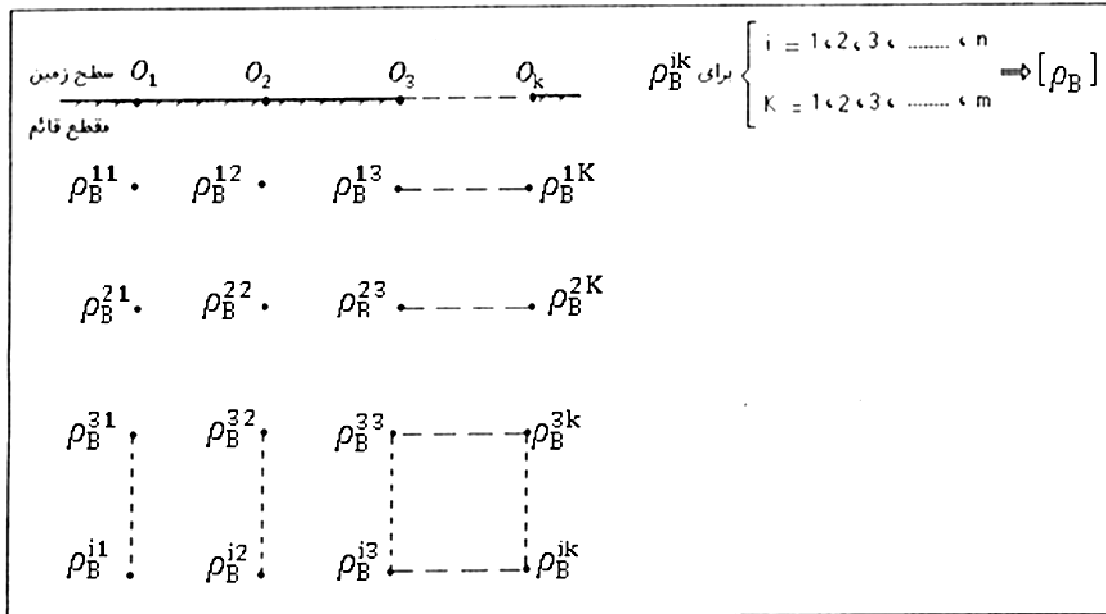


شکل ۵-۶- ماتریس مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده برای عمق‌های مختلف در ایستگاه‌های مشخص شده [پیروز، ۱۳۸۲ الف].

در شکل (۵-۶)، اندیس‌های $(i = 1, 2, 3, \dots, m)$ ، تغییرات مقاومت ویژه را بطور عمقی و اندیس‌های $(k = 1, 2, 3, \dots, n)$ ، تغییرات مقاومت ویژه را بطور جانبی نشان می‌دهند. در این ماتریس، نوشتن اندیس A در زیر حرف ρ به این معنی است که الکترودها جریان، A نام دارد و چینش آرایش قطبی-دوقطبی

به صورت رو به جلو می‌باشد.

مشابه آنچه که برای آرایش (\overline{AMN}) گفته شد، توسط آرایش (\overline{MNB}) نیز می‌توان با ترکیب نمودن روش‌های سونداژزنی و پروفیل‌زنی، داده‌های مقاومت ویژه را بصورت $\rho_B^{i,k}$ نشان داد و یک ماتریس مانند $[\rho_B]$ بدست آورد. عناصر این ماتریس در شکل (۷-۵) نشان داده شده‌اند.



شکل ۷-۵- ماتریس مقاومت ویژه‌های اندازه‌گیری شده برای عمق‌های مختلف در ایستگاه‌های مشخص شده [پیروز، ۱۳۸۲ الف]

۵-۲-۳-۱- ماتریس مقاومت ویژه میانگین حاصله از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن

با تشکیل دو ماتریس $[\rho_A]$ و $[\rho_B]$ ، می‌بینیم که برای زیر هر ایستگاه اندازه‌گیری مانند O_K به هر عمق، دو داده تعلق می‌گیرد که از این دو داده، یک داده توسط آرایش \overline{AMN} و یک داده توسط آرایش \overline{MNB} اندازه‌گیری می‌شود. حال چنانچه از داده‌های $[\rho_A^{i,k}]$ و $[\rho_B^{i,k}]$ ، مطابق رابطه زیر میانگین گرفته شود:

$$\rho_m^{i,k} = \frac{\rho_A^{i,k} + \rho_B^{i,k}}{2} \quad (۲-۵)$$

داده‌های حاصله، تشکیل یک ماتریس مقاومت ویژه میانگین $[\rho_m]$ را می‌دهند. گرفتن این

میانگین باعث می‌شود که آنومالی‌های مقاومت ویژه کاذبی که در اثر تصویر الکتریکی در نزدیکی فصل مشترک قائم دو محیط با مقاومت ویژه‌های متفاوت بوجود می‌آیند، تقلیل یابند [پیروز، ۱۳۸۲ الف].

۵-۲-۳-۲- شبه مقطع قائم مقاومت ویژه میانگین

برای تفسیر کیفی نتایج اندازه‌گیری، می‌توان ماتریس $[\rho_m]$ فوق‌الذکر را در یک دستگاه مختصات قائم وارد و سپس کانتور (پربند) نمود. برای این کار، محور افقی دستگاه مختصات را بر امتداد خط پروفیلی که اندازه‌گیری در امتداد آن انجام شده است، منطبق می‌گیریم و محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری را در روی آن مشخص می‌نماییم. جهت مثبت محور قائم دستگاه مختصات را به طرف پایین می‌گیریم و آن را محور عمق می‌نامیم. حال می‌خواهیم موقعیت هر عنصر از یک ماتریس را در این دستگاه مشخص نماییم. طول مربوط به هر عنصر در دستگاه مختصات مذکور، برابر با فاصله ایستگاه اندازه‌گیری مربوطه (که در آن ایستگاه، عنصر مذکور اندازه‌گیری شده است) از مبدا می‌باشد. عمق مربوط به هر عنصر در دستگاه مختصات مذکور بدین طریق به دست می‌آید که مقادیر مقاومت ویژه‌های الکتریکی محاسبه شده $\rho_m^{i,k}$ که مربوط به اعماق مختلف یک ایستگاه می‌باشند را در زیر همان ایستگاه وارد می‌کنیم. به طوری که عمق مربوطه به هر عنصر، از رابطه $\frac{A_i O_K}{2}$ و $\frac{B_i O_K}{2}$ به دست آید. به این وسیله هر عنصر $\rho_m^{i,k}$ از ماتریس $[\rho_m]$ بر یک نقطه در دستگاه مختصات مذکور منطبق می‌گردد و مقدار عددی هر عنصر در این نقطه نوشته می‌شود. سپس این اعداد توسط نرم‌افزار Surfer (کانتور) می‌گردند. در نتیجه از عناصر ماتریس $[\rho_m]$ ، یک شبه مقطع قائم مقاومت ویژه میانگین به دست می‌آید که در آن وضعیت توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین مشخص می‌گردد.

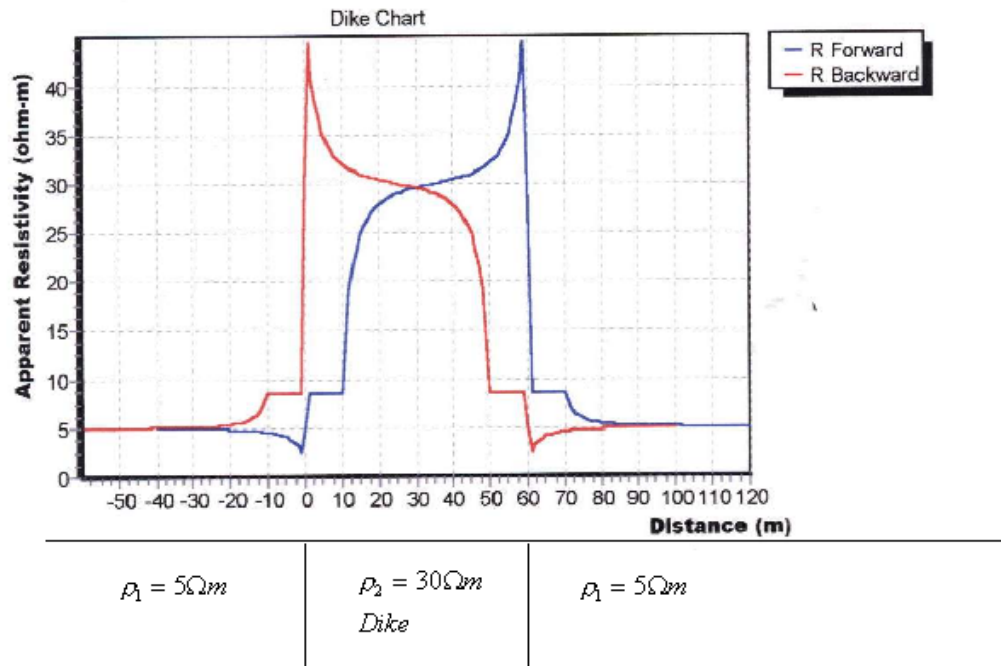
۵-۳- مقایسه دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن با استفاده از مدل‌های

ریاضی

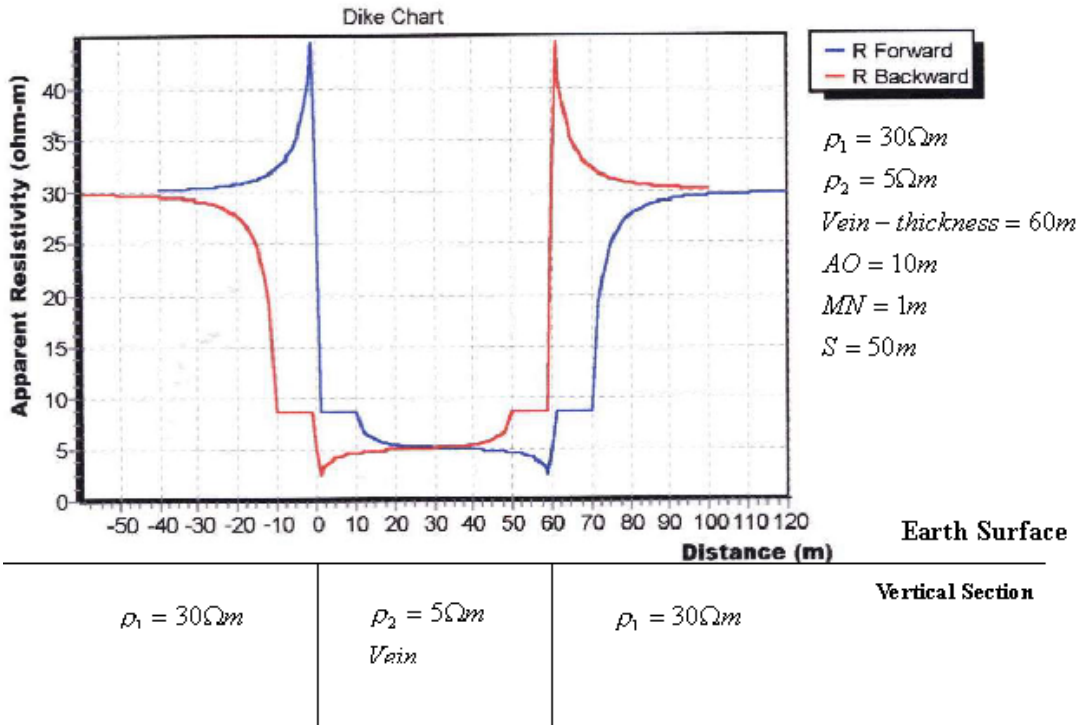
در شکل (۵-۸)، به عنوان مدل، یک مقطع قائم از یک دایک مقاوم ضخیم نشان داده شده است که متشکل از دو مرز ناهمگنی جانبی سمت چپی و سمت راستی می‌باشد. هر یک از این مرزهای ناهمگنی را، به طور مستقل می‌توان به عنوان یک گسل قائم در نظر گرفت. بنابراین، نمودارهای حاصله از به کارگیری روش پروفیل‌زنی الکتریکی با هر یک از آرایش‌های قطبی- دوقطبی رو به جلو و رو به عقب بر روی دایک مذکور، به طور موضعی، برای ناهمگنی‌های فوق‌الذکر نیز صادق می‌باشند. این نمودارها در شکل (۵-۸) نشان داده شده‌اند. نمودار آبی رنگ مربوط به آرایش قطبی- دوقطبی رو به جلو و نمودار قرمز رنگ مربوط به آرایش قطبی- دوقطبی رو به عقب می‌باشد [پیروز، ۱۳۸۲ ب].

نکته مهم در مورد این نمودارها این است که هنگام عبور آرایش قطبی- دوقطبی مستقیم از روی محل ناهمگنی جانبی سمت چپی، در روی نمودار مربوطه (آبی رنگ) فقط یک جهش کوچک حاصل شده است ولی هنگام عبور آرایش قطبی- دوقطبی معکوس از روی محل این ناهمگنی، در روی نمودار مربوطه (قرمز رنگ) یک جهش بزرگ حاصل شده است. بنابراین اگر مقدار ضریب بازتاب، نسبتاً کوچک باشد و یا سطح زمین توسط یک رولایه ضخیم پوشانده شده باشد، ممکن است توسط نمودار آبی رنگ نتوان محل ناهمگنی را مشخص نمود ولی توسط نمودار قرمز رنگ، احتمال تشخیص محل این ناهمگنی بیشتر می‌باشد و برعکس، هنگام عبور آرایش قطبی- دوقطبی مستقیم از روی ناهمگنی قائم سمت راستی، در روی نمودار مربوطه (آبی رنگ) یک جهش بزرگ حاصل شده است ولی هنگام عبور آرایش قطبی- دوقطبی معکوس از روی محل این ناهمگنی، در روی نمودار مربوطه (قرمز رنگ) فقط یک جهش کوچک حاصل شده است. بنابراین بر خلاف حالت قبل، احتمال تشخیص محل این ناهمگنی توسط نمودار آبی رنگ بیشتر از نمودار قرمز رنگ می‌باشد. مقاومت ویژه حقیقی

دایک، از محل برخورد دو نمودار قرمز رنگ و آبی رنگ حاصل می‌گردد. شکل (۵-۹)، مدل مربوط به یک رگه هادی قائم ضخیم و نمودارهای حاصله از به کارگیری دو روش آرایش قطبی-دوقطبی متقارن بر روی این رگه را نشان می‌دهد. به طوری که از روی این نمودارها نیز نتیجه می‌شود، برای مشخص نمودن محل ناهمگنی‌های جانبی در زیر سطح زمین، به کارگیری این دو آرایش الزامی می‌باشد [پیروز، ۱۳۸۲ ب].



شکل ۵-۸- نمودار مدل ریاضی دو روش آرایش قطبی-دوقطبی رو به جلو (آبی رنگ) و رو به عقب (قرمز رنگ) بر روی یک دایک مقاوم ضخیم [پیروز، ۱۳۸۲ ب]



شکل ۵-۹- نمودار مدل ریاضی دو روش آرایش قطبی-دوقطبی رو به جلو (آبی رنگ) و رو به عقب (قرمز رنگ) بر روی یک رگه هادی ضخیم [پیروز، ۱۳۸۲ ب]

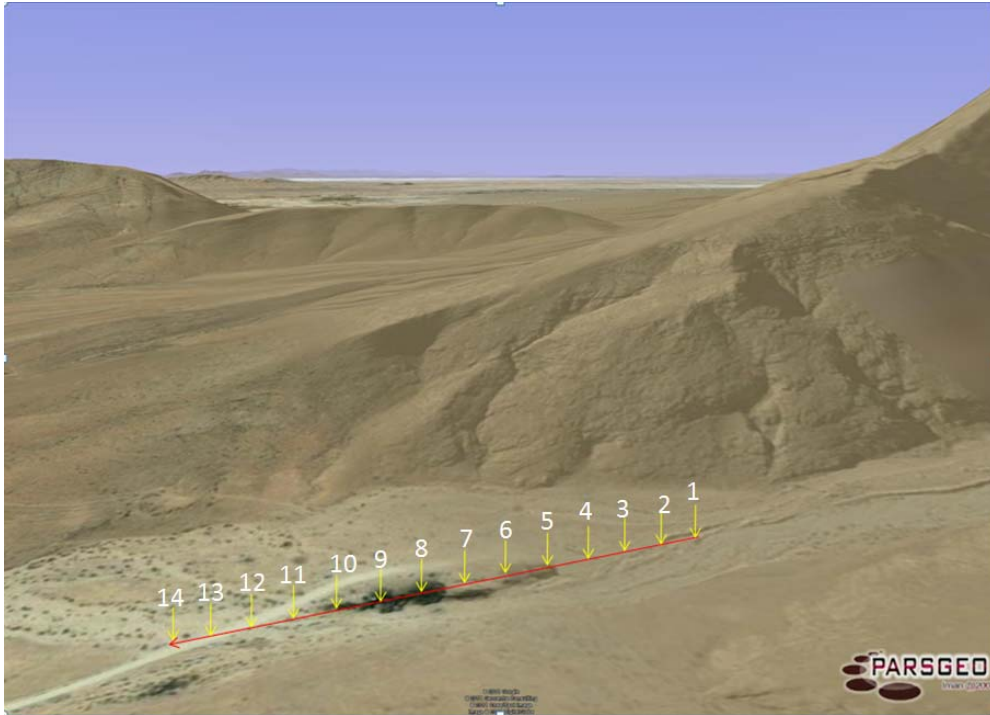
۴-۵- چگونگی برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در این

تحقیق

بعد از آشنایی با تئوری کاربرد آرایش قطبی-دوقطبی، در این قسمت به تشریح چگونگی استفاده از این آرایش برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در این تحقیق پرداخته می‌شود. داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در این تحقیق در منطقه کال‌قرنو برداشت شده‌اند. همان‌طور که در فصل ۴ گفته شد، دره کال‌قرنو دارای امتداد شرقی-غربی می‌باشد و مطابق شکل (۵-۱۰) پروفیل برداشت داده‌های مقاومت ویژه در امتداد دره و در کنار چاه آب ذوب آهن انتخاب شده است. این چاه در شکل (۵-۱۰) تقریباً در کنار ایستگاه شماره ۶ قرار گرفته است. علت انتخاب پروفیل برداشت در کنار چاه آب، به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی با داده‌های به دست آمده از گمانه اکتشافی توسط روس‌ها در سال ۱۳۶۰ می‌باشد.

مطابق شکل (۵-۱۰)، پروفیل برداشت داده‌ها شامل چهارده ایستگاه می‌باشد که در این شکل با شماره ۱ تا ۱۴ شماره‌گذاری شده‌اند. اندازه‌گیری‌ها توسط روش ترکیب یافته از سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی با استفاده از دو آرایش متقارن قطبی-دوقطبی انجام شده است. به عنوان مثال اگر در این شکل، ایستگاه اندازه‌گیری ۱ در نظر گرفته شود الکتروود جریان A، در قسمت سمت چپ ایستگاه ۱ و الکتروود جریان B در طرف راست ۱ گسترش یافته‌اند. به این ترتیب که ابتدا الکتروود جریان A را در فاصله ۱۰ متری طرف چپ ایستگاه ۱ قرار داده و مقاومت ویژه حاصله قرائت شده و سپس فاصله این الکتروود از وسط الکتروودهای پتانسیل را دو برابر کرده و سپس مقاومت ویژه مربوطه قرائت می‌شود و تا زمانی که فاصله الکتروود A به ۱۵۰ متری از وسط الکتروودهای پتانسیل نرسیده است فاصله الکتروودهای پتانسیل را در همان اندازه ۲ متری ثابت نگه می‌داریم ولی وقتی فاصله الکتروود جریان A از ۱۲۰ متر تجاوز می‌کند، فاصله الکتروودها پتانسیل را به ۱۰ متر افزایش می‌دهیم تا نسبت سیگنال به نویز کاهش نیابد. بعد از افزایش فاصله الکتروودهای پتانسیل به ۱۰ متر، فاصله الکتروود جریان به ۱۲۰ متر افزایش داده می‌شود و اینکار تا زمانی که فاصله این الکتروود جریان

به ۲۴۰ متر نرسیده است ادامه می‌یابد. بعد از اینکه برداشت‌های سونداژزنی در ایستگاه یک خاتمه یافت الکترودهای پتانسیل را به ایستگاه ۲ انتقال داده و به همان طریقی که در ایستگاه ۱ عمل شده بود در اینجا نیز تکرار می‌شود. در حالت برداشت رو به عقب، الکترودهای جریان A به سمت راست ایستگاه مربوطه منتقل و همان روالی که برای برداشت رو به جلو توضیح داده شد در اینجا نیز تکرار می‌شود ولی با این تفاوت که گسترش الکترودهای جریان در سمت راست ایستگاه مربوطه صورت می‌گیرد. ایستگاه شماره ۶ در شکل (۵-۱۰) حدوداً، در کنار چاه آب ذوب آهن قرار گرفته است. همانطور که گفته شد برداشت‌ها در دو مرحله صورت گرفته است که مرحله اول به منظور بررسی زیر سطح زمین از عمق ۶۰ متری می‌باشد و مرحله دوم به منظور بررسی وضعیت زمین از عمق ۶۰ متر تا عمق ۱۲۰ متر می‌باشد. در مرحله اول، برای تمام اندازه‌گیری‌ها فاصله بین M-N (فاصله بین دو الکترودهای جریان) ثابت و برابر ۲ متر در نظر گرفته شده است و در مرحله دوم فاصله بین M-N ثابت و برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. در کلیه اندازه‌گیری‌ها به منظور بالا بردن نسبت سیگنال به نویز، هر قرائت، چهار بار تکرار شده است و میانگین حاصله یادداشت شده است. در بعضی از اندازه‌گیری‌ها قرائت مذکور تا ۱۲ بار تکرار شده است.



شکل ۵-۱۰- نمایش پروفیل برداشت مقاومت ویژه، همراه با موقعیت ایستگاه‌ها
[www.Google earth.com]

فصل هشتم

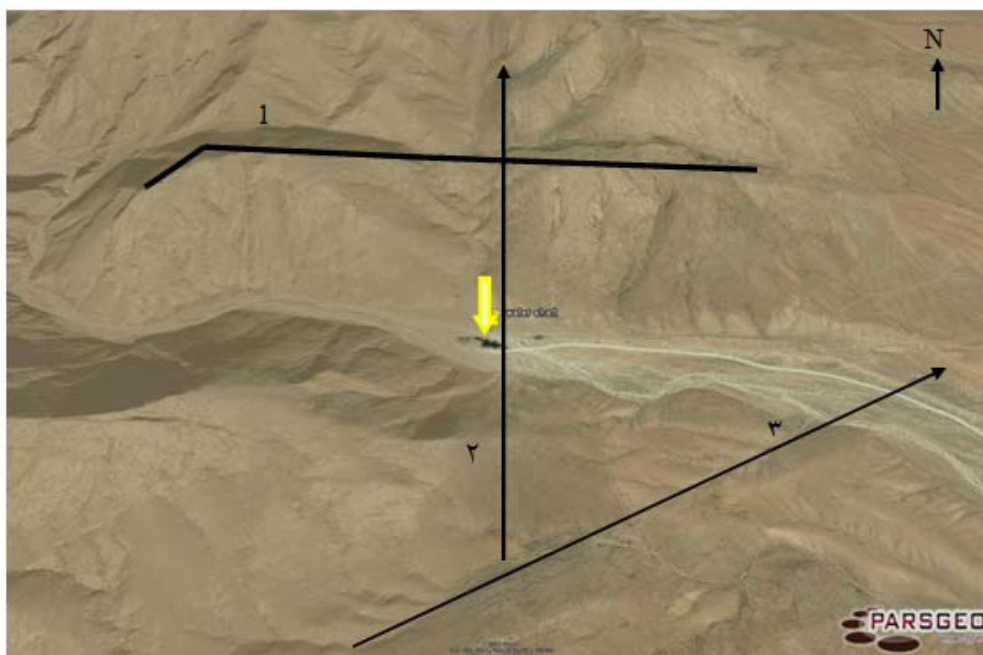
مدل سازی و تفسیر داده‌ها

۶-۱- مقدمه

در این تحقیق سه نوع برداشت در کنار چاه ذوب آهن، جهت دستیابی به اهداف این پایان نامه انجام شده است. برداشت نوع اول، تهیه نمونه های سنگی از محل مورد مطالعه، جهت مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک آنها می باشد. برداشت نوع دوم، مطالعه وضعیت شیب و امتداد دسته درزها و به طور کلی شکستگی های غالب محل مورد مطالعه می باشد. برداشت سوم که اساس کار این تحقیق است، اندازه گیری داده های مقاومت ویژه الکتریکی می باشد. برداشت های نوع اول و دوم به این منظور انجام شده اند که قبل از اینکه نتایج مربوط به داده های مقاومت ویژه الکتریکی تفسیر شوند، اطلاعات دقیق تری از وضعیت زمین شناسی در دست باشد.

۶-۲- مطالعه نمونه های سنگی

به منظور مطالعه هر چه بهتر محل برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی، از دو محل در نزدیکی چاه آب ذوب آهن، چندین نمونه سنگی به منظور تهیه مقاطع نازک و مطالعه میکروسکوپی آنها گرفته شد. با توجه به شکل (۶-۱)، محل هایی که از آنها نمونه برداری شده در امتداد خط شماره ۱ و خط شماره ۲ می باشند. علت نمونه برداری از این دو امتداد، وجود شواهدی دال بر عملکرد گسل در این دو امتداد می باشند. محل چاه ذوب آهن با علامت فلش زرد رنگ در روی شکل (۶-۱) نشان داده شده است. همچنین، خط شماره ۳ در این شکل، امتداد گسل شاهرود را نشان می دهد.

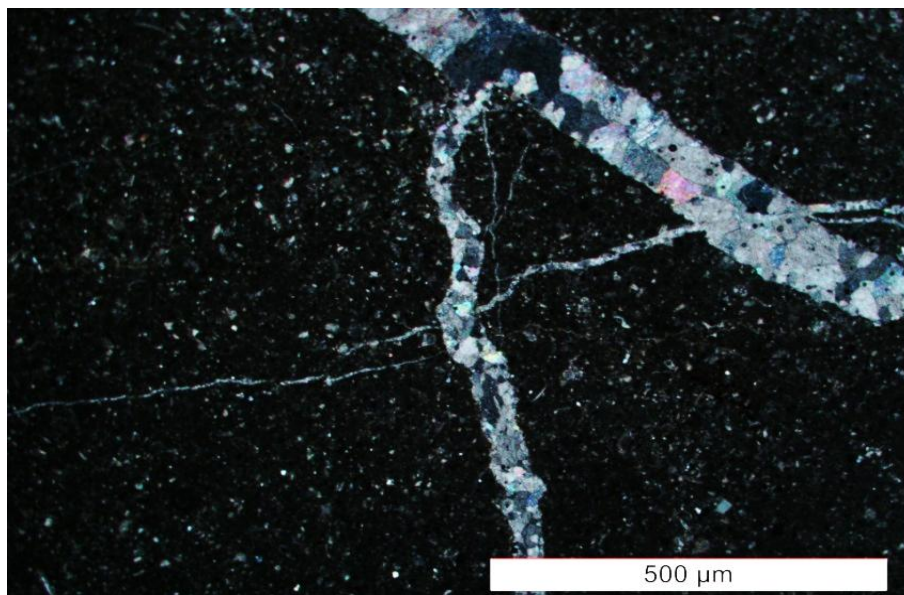


شکل ۶-۱- نمایش منطقه مورد مطالعه همراه با گسل های موجود در منطقه [WWW.Google Earth.com]

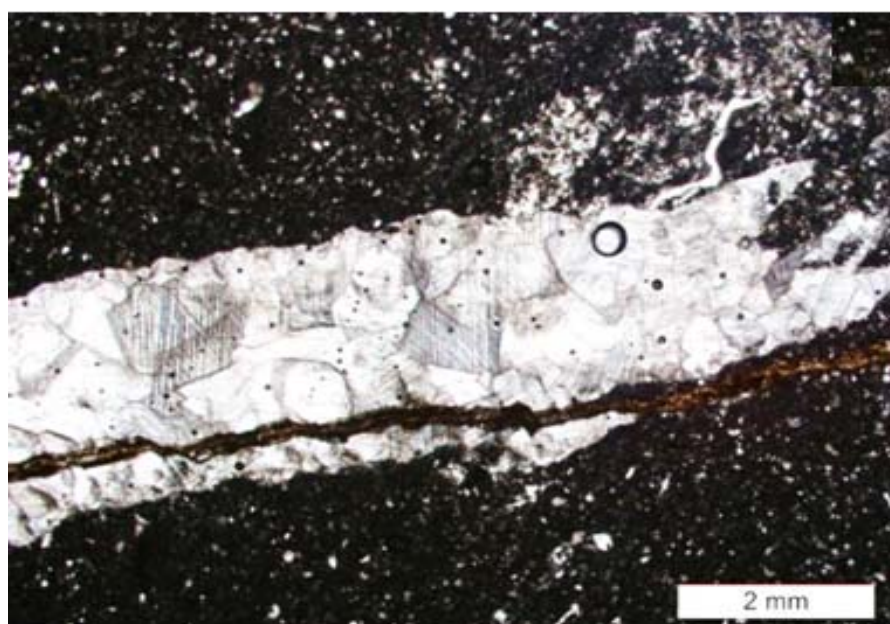
اشکال (۲-۶) تا (۵-۶)، مربوط به تصاویر گرفته شده در زیر میکروسکوپ از روی مقاطع نازک می باشند. شکل های (۲-۶) و (۳-۶) تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک نمونه های سنگی برداشته شده از امتداد خط شماره ۲ در روی شکل (۱-۶) می باشند و شکل های (۴-۶) و (۵-۶) مربوط به نمونه های سنگی برداشت شده از امتداد خط شماره ۲ در روی شکل (۱-۶) می باشند. با توجه به این مقاطع نازک، سنگ آهک مربوطه، سنگ آهک اسپاری می باشد، که به علت وجود آهن در بعضی از نقاط، به صورت کدر مشاهده می شود. همچنین با توجه به این اشکال، قطعات اینتراکلیست در بعضی از نقاط به خوبی مشخص می باشد. در این اشکال، وجود رگه های کلسیتی متبلور با رخ کامل کلسیتی می تواند دلیلی مطمئن برای وجود گسل در منطقه باشد. زیرا پدیده گسل در رگه هایی که متبلور شده اند کاملاً مشهود و واضح می باشد. دلیل دیگر بر تایید وجود گسل در دو منطقه نشان داده شده در شکل (۱-۶)، جابجایی درزها با توجه به شکل های (۲-۶) و (۴-۶) می باشد.

در ارتباط با گسل شماره ۳ در شکل (۱-۶) نکته جالب این است که اکثر چاه های حفر شده در قسمت شرقی این گسل در دشت شاهرود به آب زیرزمینی برخورد نکرده اند. برای توجیه این مطلب

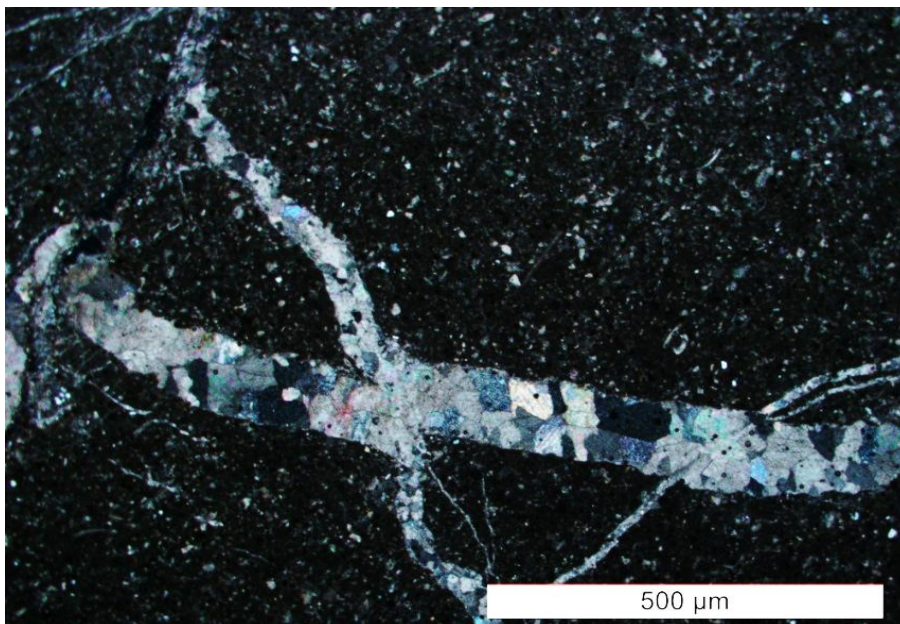
می توان گفت که احتمالاً گسل شاهرود به عنوان یک سد عمل نموده و مانع از ورود آب های زیرزمینی به سمت شرقی می شود.



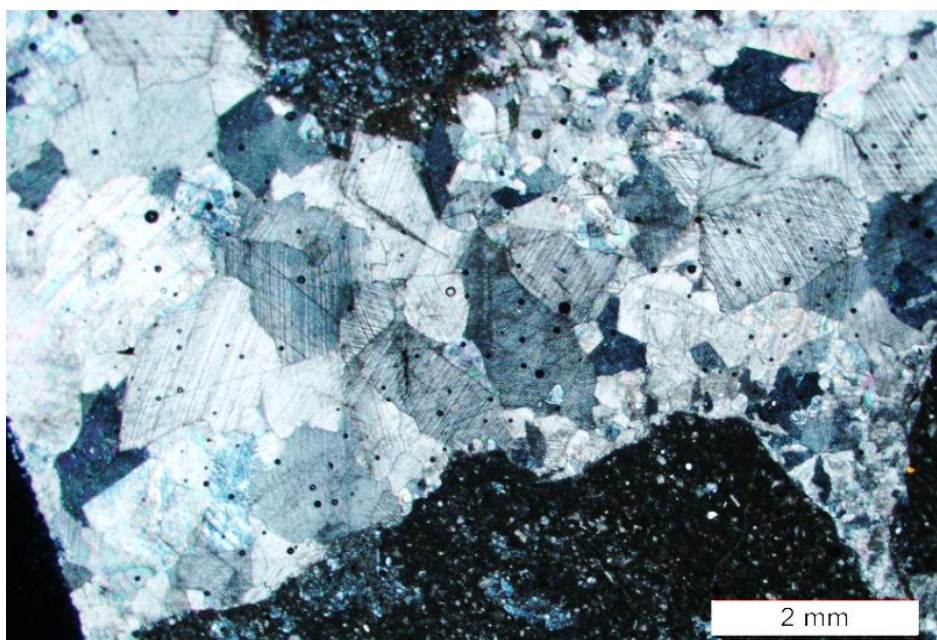
شکل ۶-۲- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۲



شکل ۶-۳- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۲



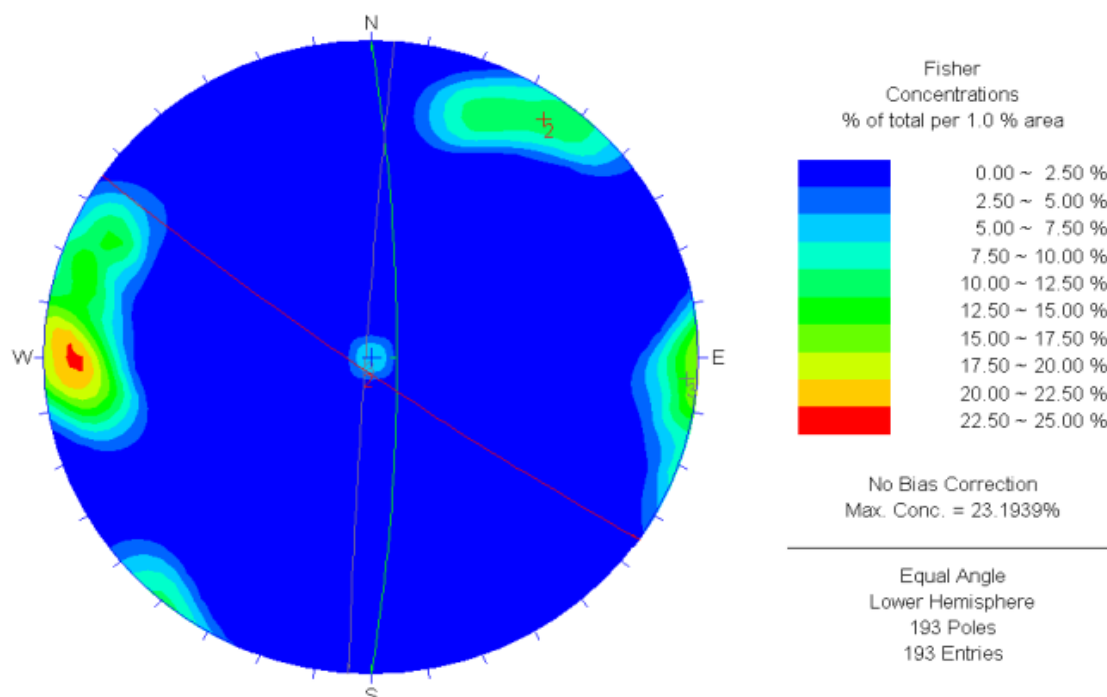
شکل ۶-۴- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۱



شکل ۶-۵- مقطع نازک برای نمونه تهیه شده از روی گسل شماره ۱

با توجه به نتایج به دست آمده از مقاطع نازک، نتیجه می شود که چاه آب ذوب آهن (فلش زرد رنگ در شکل ۶-۱) در روی یک گسل قرار گرفته است که این گسل با خط سیاه به شماره ۲ در این شکل نشان داده شده است. همچنین، به طوری که در این شکل دیده می شود، یک گسل دیگر که با منحنی مشکی و با شماره ۱ نشان داده شده است، بدر اطراف چاه مذکور عمل کرده است.

با توجه به اینکه هدف مورد نظر در این تحقیق اکتشاف آب در مناطق سنگی می باشد، لذا وجود آب در این گونه سنگ ها تا حد زیادی بستگی به میزان خرد شدگی و گسلیدگی سنگ های مذکور دارد. این گونه خردشدگی ها و گسلیدگی ها باعث ایجاد ناهمگنی جانبی می شوند. بدیهی است که برای شناسایی این گونه ناهمگنی های جانبی توسط روش مقاومت ویژه الکتریکی، باید آرایشی را انتخاب نمود که بیشترین حساسیت را نسبت به این ناهمگنی ها داشته باشد. همانطور که در فصل ۲، آورده شد برای شناسایی این ناهمگنی ها بهتر است از آرایش قطبی-دوقطبی استفاده نمود. با توجه به این که، امتداد پروفیل این آرایش باید عمود بر امتداد گسل نشان داده شده با خط شماره ۲ روی شکل (۶-۱) باشد، تا بیشترین آنومالی حاصل گردد. لذا، جهت حصول به این موضوع، نخست، شیب و امتداد گسل مذکور و نیز دسته درزهای غالب موجود در کنار این گسل، با استفاده از کمپاس برداشت شدند و سپس توزیع آماری آنها توسط نرم افزار *Dips* محاسبه گردید. تعداد نقاط برداشت شده در حدود ۱۹۴ تا درزه بودند که نتیجه به دست آمده از این محاسبه در شکل (۶-۶) نشان داده شده است. نواحی رنگی نشان داده شده بر روی دایره این شکل، نشان دهنده قطب های صفحات این ۱۹۴ تا درزه می باشند همانطور که می بینیم چهار تا از این نواحی رنگی در روی دایره وجود دارند که هر کدام از این چهار تا رنگ، نشان دهنده چهار تا دسته درزه می باشند و چون این نواحی رنگی در فاصله دورتری نسبت به مرکز دایره تجمع یافته اند بنابراین شیب اکثر این دسته درزها نزدیک ۹۰ می باشد. با توجه به این شکل بیشترین تجمع دسته درزها در طرف غرب دایره هستند که در این محدوده رنگ ناحیه مربوطه قرمز شده است. این دسته درزه دارای امتداد شمالی جنوبی می باشد که این امتداد عمود بر امتداد پروفیل برداشت مقاومت ویژه می باشد.



شکل ۶-۶- نمایش توزیع آماری دسته درزهای موجود در امتداد خط شماره ۲ در شکل (۶-۱)

۶-۳- تهیه و تفسیر مقاطع ژئوالکتریکی با استفاده از نرم افزار *Res2Dinv*

در این قسمت ابتدا به چگونگی تهیه مدل های ژئوالکتریکی داده های مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از نرم افزار *Res2Dinv* و سپس به تفسیر این مدل ها پرداخته می شود.

همان طور که در فصل ۲ توضیح داده شد، یکی از معایب روش مقاومت ویژه الکتریکی، حصول چندین مدل ژئوالکتریکی برای یک وضعیت زمین شناسی تحت الارضی می باشد. همچنین، نرم افزار *Res2Dinv* شامل روش های معکوس سازی متعددی می باشد که ممکن است مدل های به دست آمده توسط هر یک از این روش ها، در مقایسه با روش دیگر، کاملاً متفاوت باشد. به همین منظور، قبل از انجام معکوس سازی و تهیه مدل، باید ساختار زمین شناسی محل مورد مطالعه تا اندازه ای مشخص باشد تا بتوان مناسب ترین روش معکوس سازی را انتخاب نمود. با توجه به اطلاعات زمین شناسی توضیح داده شده در فصل ۴ و نتایج قسمت (۶-۲)، این نکته واضح می باشد که منطقه مورد مطالعه

جزء مناطق آهکی تکتونیکی شده می باشد و پروفیل برداشت مقاومت ویژه، عمود بر امتداد گسلی است که چاه آب ذوب آهن بر روی آن حفر شده است. همچنین در محل چاه ذوب آهن یک گمانه اکتشافی توسط شرکت ذغال سنگ البرز جنوبی حفر شده است که اطلاعات مربوط به آن مطابق شکل (۶-۷) می باشد. مطابق اطلاعات این گمانه، محل مورد مطالعه در نزدیکی چاه ذوب آهن، از سطح زمین تا عمق ۲۵ متری شامل رسوبات آبرفتی می باشد و از عمق ۲۵ متری به پایین شامل سنگ های آهکی لار می باشد. همچنین از عمق ۳۰ متری به پایین، سنگ های آهکی داری شکستگی و خردشدگی متعددی می باشند که در این شکل نشان داده شده است. همان گونه که قبلا ذکر گردید، وجود گسل یا شکستگی، باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در داده های مقاومت ویژه الکتریکی به طور جانبی می گردد. در فصل ۳ و همچنین در پیوست (ب)، در مورد روش های مختلف معکوس سازی با استفاده از نرم افزار *Res2Dinv* و قابلیت های هر یک از این روش ها توضیحاتی داده شده است. در اینجا بیشتر به بررسی نتایج تجربی به دست آمده از هر یک از این روش ها برای داده های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده در دره کال قرنو پرداخته می شود.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ И КОНСТРУКЦИЯ СКВАЖИНЫ
GEOLOGICAL SECTION AND BOREHOLE DESIGN

Литическое описание, лит. пород Lithological description of lith. rocks	Интервал зале- гаи слоб, в м Interval of vein occurrence, m		Мощность слоб, в м Layer thickness, m	Глубина появления воды в м. Версия от желег appearance, m	Глубина установивше гося уровня в м Depth, m	Конструкция скважи- ны Borehole design	Примечание Note
	от соев	до соев					
магматическо-осадочные породы	0.0	23.0	23.0				
тонкий серый известняк, толщина 20-105 м, 180-160 м пластов, в среднем 1 м; 182-206 м с приростом мощности известняка.	23.0	206.0	183.0		95.12	490 м 426 м 23.1 м 325 м 40 м 394 м 110 м 120.4 м 173 м 136 м 193 м 193 м 206 м 295 м 190 м 318 м	
песчаник и глина	106.0	318.0	412.0				

شکل ۶-۷- مقطع به دست آمده از گمانه اکتشافی شرکت ذغال سنگ البرز جنوبی در محل مورد مطالعه
[شرکت ذغال سنگ البرز شرقی]

در نرم‌افزار *Res2Dinv* چندین روش مدل‌سازی معکوس وجود دارد که می‌توان از هر کدام از آنها جهت انجام مدل‌سازی معکوس استفاده کرد. در این تحقیق از سه روش نرْم ℓ_2 ، روش ترکیبی و روش نرْم ℓ_1 استفاده شده است و نتایج به دست آمده توسط هر کدام از این روش‌ها با هم مقایسه شده است. با توجه به روابط ریاضی مورد استفاده در هر یک از این روش‌ها، نرم‌افزار *Res2Dinv* امکان تغییر محدوده پارامترهای موجود در روابط ریاضی هر یک از این روش‌ها را به کاربر می‌دهد. در این تحقیق، از پارامترهای تاثیرگذار اصلی، مثل فاکتور میرایی^۱، محدوده مقاومت ویژه الکتریکی برای مدل^۲، نسبت فیلتر هموار ساز قائم به افقی^۳، استفاده شده است. هر یک از روش‌های معکوس‌سازی یاد شده توسط پارامترهای فوق‌الذکر، محاسبه گردیده و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

اولین روش معکوس‌سازی مورد استفاده، روش نرْم ℓ_2 می‌باشد. همانطور که در فصل ۳ آورده شد. این روش معکوس‌سازی برای مدل‌سازی شرایط زمین‌شناسی، مفید می‌باشد که مقدار تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در آنها، شدید و ناگهانی نباشد [Loke, 2004b].

برای انجام معکوس‌سازی با روش فوق‌الذکر، ابتدا به صورت سعی و خطا، مقدار فاکتور میرایی برابر ۰.۱۶، مقدار نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی را برابر ۲ و مقدار حداکثر مقاومت ویژه^۴ مدل معکوس ۱۰ برابر مقدار متوسط مقاومت ویژه تکرار قبلی و حداقل مقدار آن ۰.۰۱۵ برابر مقدار متوسط مقاومت ویژه تکرار قبلی، در نظر گرفته شده است. مدل به دست آمده با استفاده از این روش معکوس‌سازی و پارامترهای در نظر گرفته شده، مطابق شکل (۶-۸) می‌باشد. در شکل (۶-۸ الف) شبه مقطع محاسبه شده برای داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده می‌باشد. شکل (۶-۸ ب) شبه مقطع محاسبه شده برای داده‌های به دست آمده توسط نرم‌افزار می‌باشد. شکل (۶-۸ ج) مدل محاسبه شده می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر گردید چاه آب ذوب آهن در فاصله

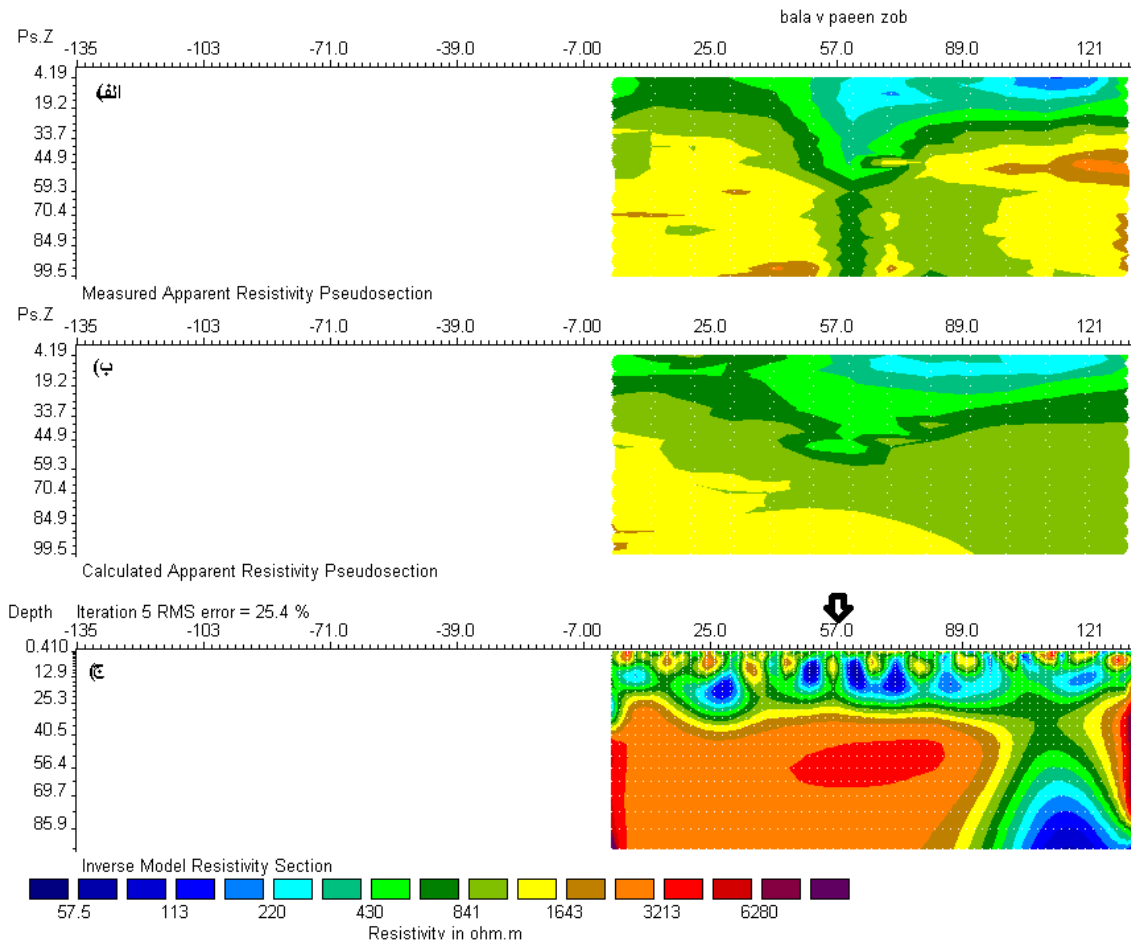
¹ Damping factor

² Range of model resistivity

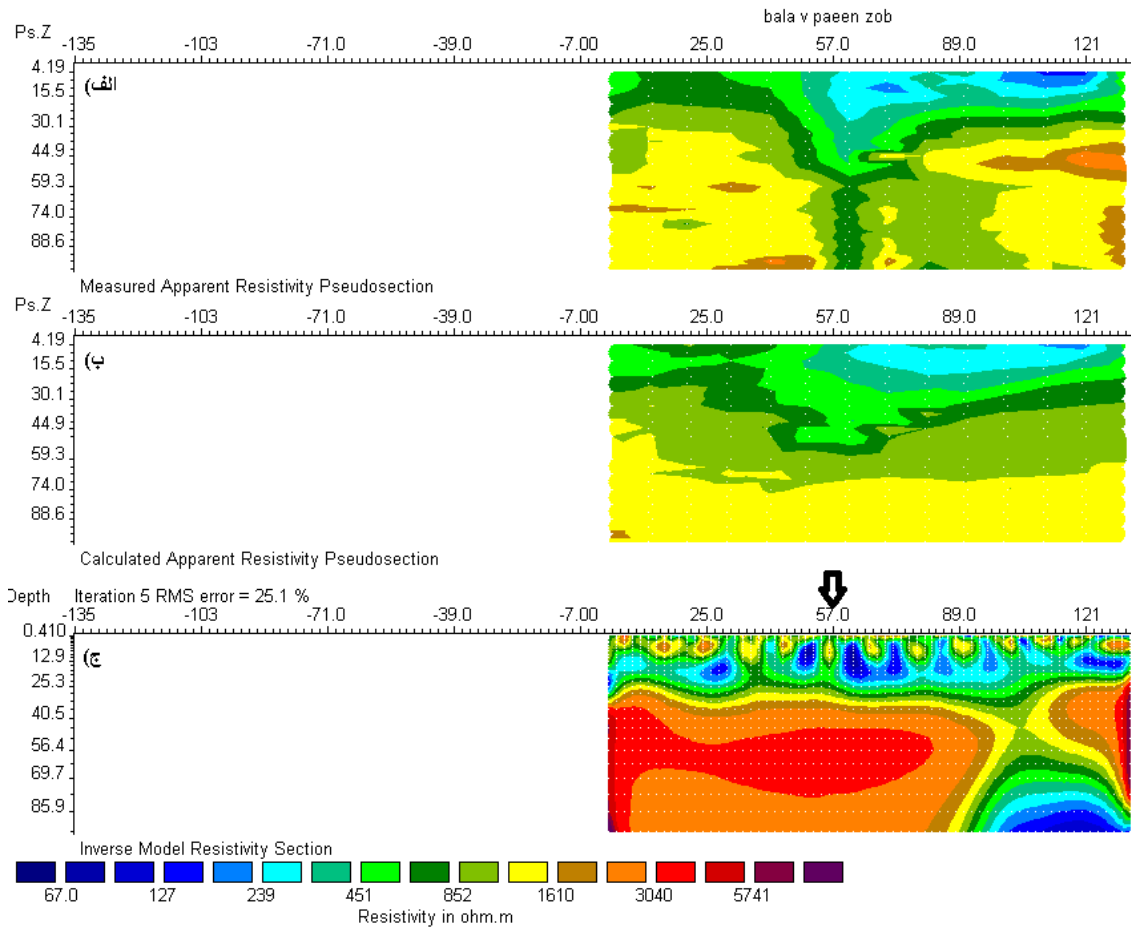
³ Vertical/Horizontal flatness filter ratio

⁴ Upper value of resistivity

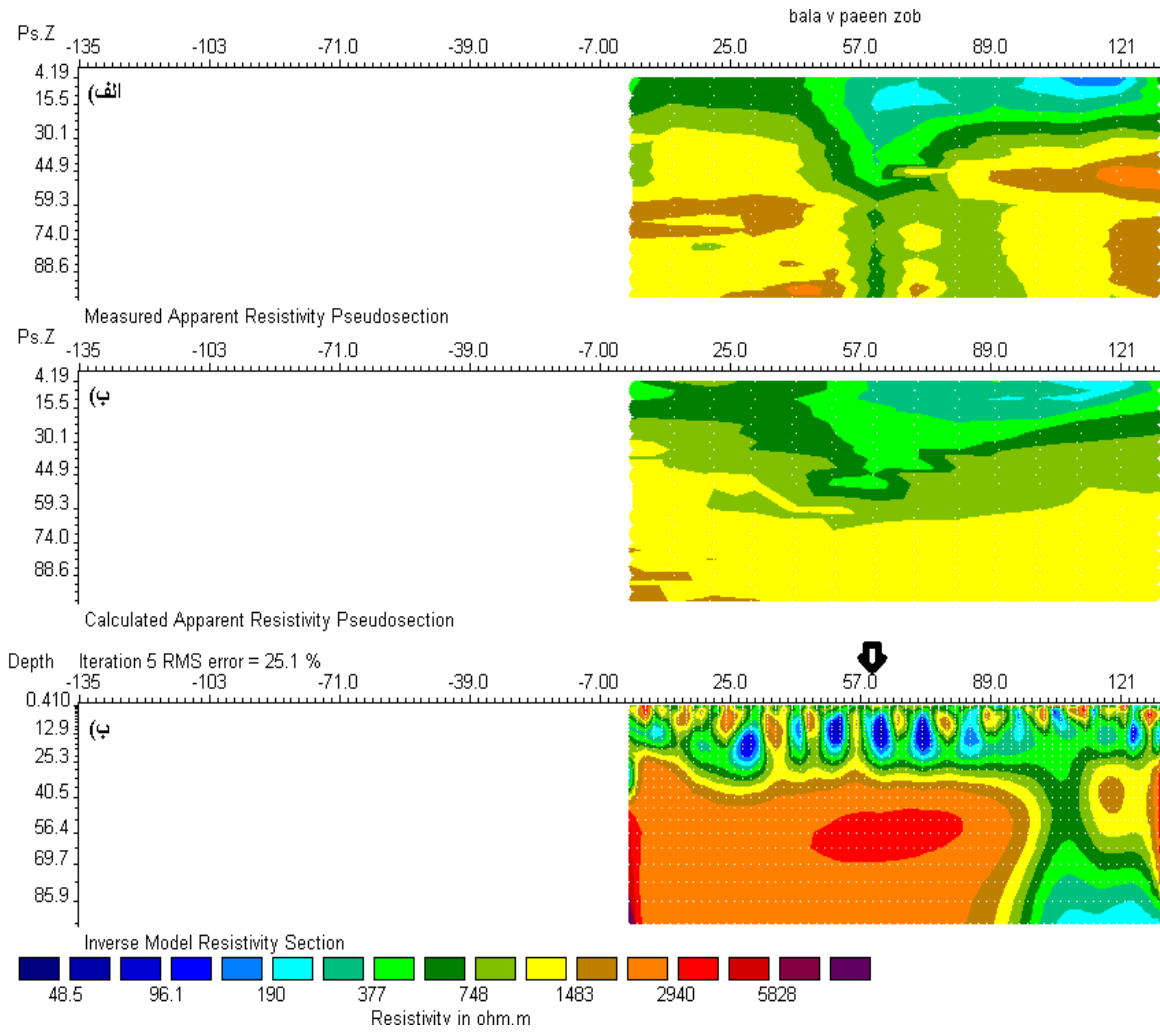
افقی ۶۰ متری از مبدا مختصات قرار گرفته است. به طوری که در شکل (۶-۸-الف) دیده می شود، در این فاصله و از عمق تقریباً ۶۰ متری به پایین، یک ناهمگنی جانبی شدید به چشم می خورد که بیانگر وجود یک شکستگی در سنگ آهک می باشد که محتوی آب می باشد. همانطور که قبلاً ذکر گردید، گمانه اکتشافی روس ها نشان می دهد که از سطح زمین تا عمق ۲۵ متری را رسوبات آبرفتی تشکیل می دهند. شکل (۶-۸) نیز این وضعیت را تایید می کند، زیرا، تا این عمق، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۵۰۰ اهم متر می باشد. این مقاومت ویژه مربوط به رسوبات آبرفتی در دره کال قرنو می باشد. همچنین طبق این شکل، از عمق ۲۵ متری به پایین مقدار مقاومت ویژه بیش از ۱۰۰۰ اهم متر می باشد. که این مقاومت ویژه مربوط به سنگ های آهکی می باشد. همان گونه که در شکل (۶-۷) دیده می شود گمانه اکتشافی روس ها نیز این وضعیت را تایید می کند. در شکل (۶-۸-ج) در فاصله افقی ۱۰۰ متری تا ۱۲۱ متری از مبدا و از عمق ۲۵ متری به پایین، یک ناهمگنی جانبی در مقاومت ویژه دیده می شود، چون ناهمگنی جانبی مذکور، در زیر چاه آب ذوب آهن واقع نشده است و با شبه مقطع فوق الذکر هم خوانی ندارد، لذا مدل حاصله، با طبیعت، مطابقت ندارد و باید پارامترهای انتخاب شده آن را تغییر داد. برای این منظور در روش معکوس سازی نرم ℓ_2 ، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، مقدار پارامتر میرایی از ۰.۱۶ به ۰.۲۵ تغییر داده شد. مدل به دست آمده برای این حالت در شکل (۶-۹) نشان داده شده است. فاکتور دیگری که تاثیر تغییر آن بر روی مدل به دست آمده بررسی شده است، مقدار نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی می باشد. نتایج به دست آمده از انتخاب مقادیر ۴ و ۰.۵ برای این فاکتور، به ترتیب در شکل های (۶-۱۰) و (۶-۱۱) نشان داده شده اند. کلیه مدل های نشان داده شده در شکل های (۶-۸-ج) لغایت (۶-۱۱-ج)، چون ناهمگنی های جانبی مشاهده شده در این اشکال با شبه مقطع مربوطه و محل چاه آب و نیز با نتایج قسمت (۶-۲) هم خوانی ندارند، لذا مدل های فوق الذکر با واقعیت های موجود در طبیعت مطابقت ندارند. اینجا نتیجه می شود که روش مدل سازی مربوطه و یا پارامترهای به کار گرفته شده در آنها، مناسب انتخاب نشده اند.



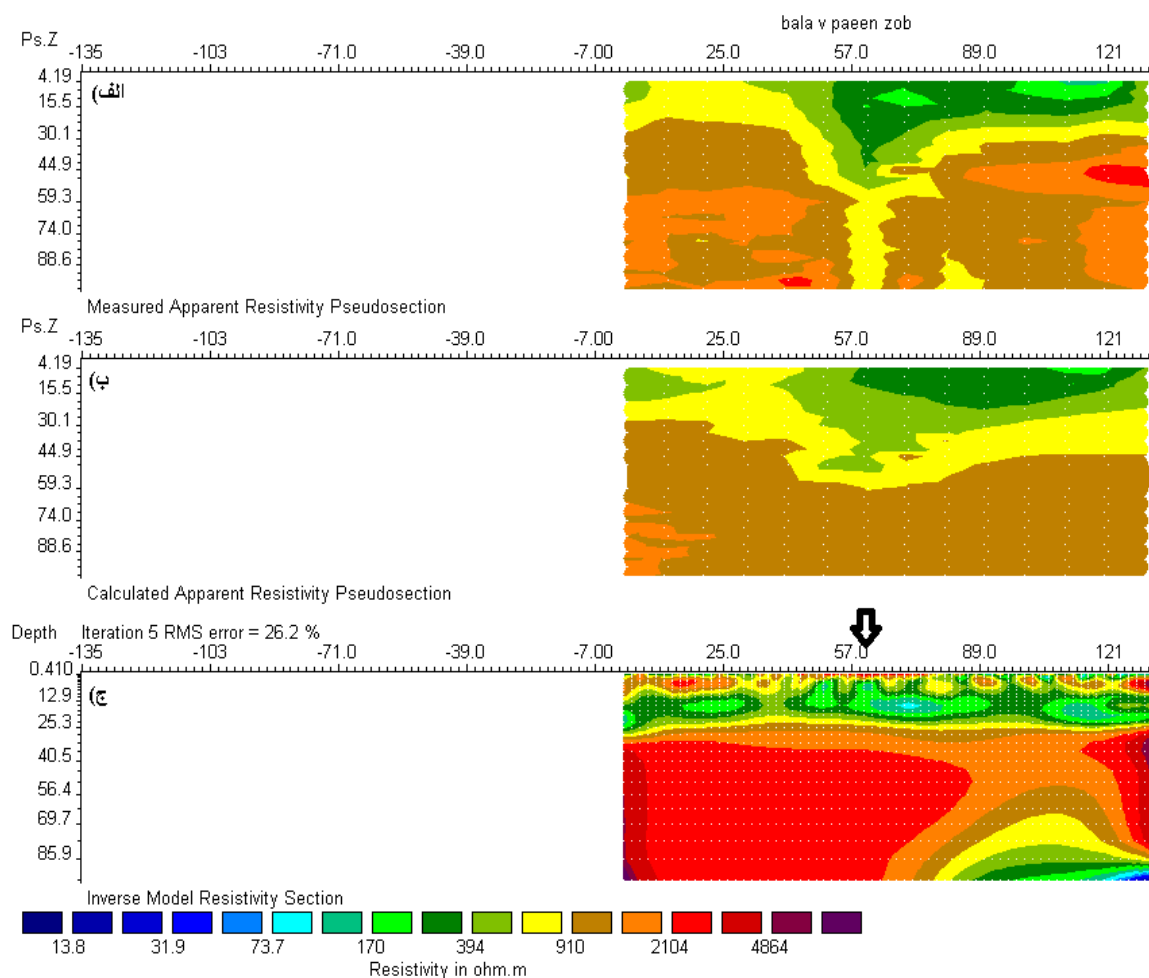
شکل ۶-۸- مدل به دست آمده با استفاده از روش معکوس سازی نرْم l_2 با فاکتور میرایی ۰.۱۶



شکل ۶-۹- مدل به دست آمده با استفاده از روش معکوس سازی نرْم l_2 ، با فاکتور میرایی ۰.۲۵



شکل ۶-۱۰- مدل به دست آمده با استفاده از روش معکوس سازی نرم ℓ_2 ، با نسبت فیلتر هموار ساز ۴

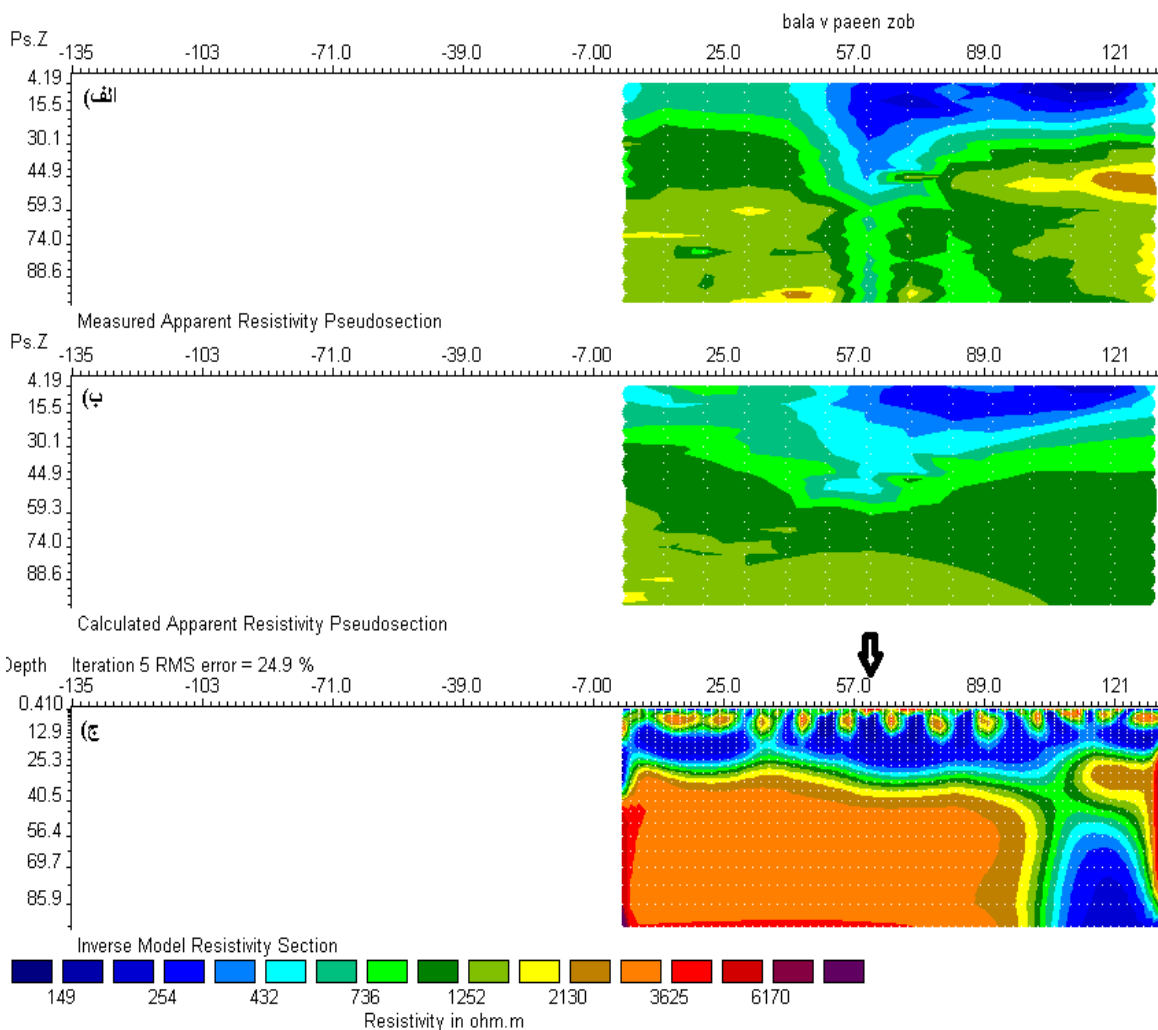


شکل ۶-۱۱- مدل به دست آمده با استفاده از روش معکوس سازی نرم l_2 ، با نسبت فیلتر هموارساز ۰.۵

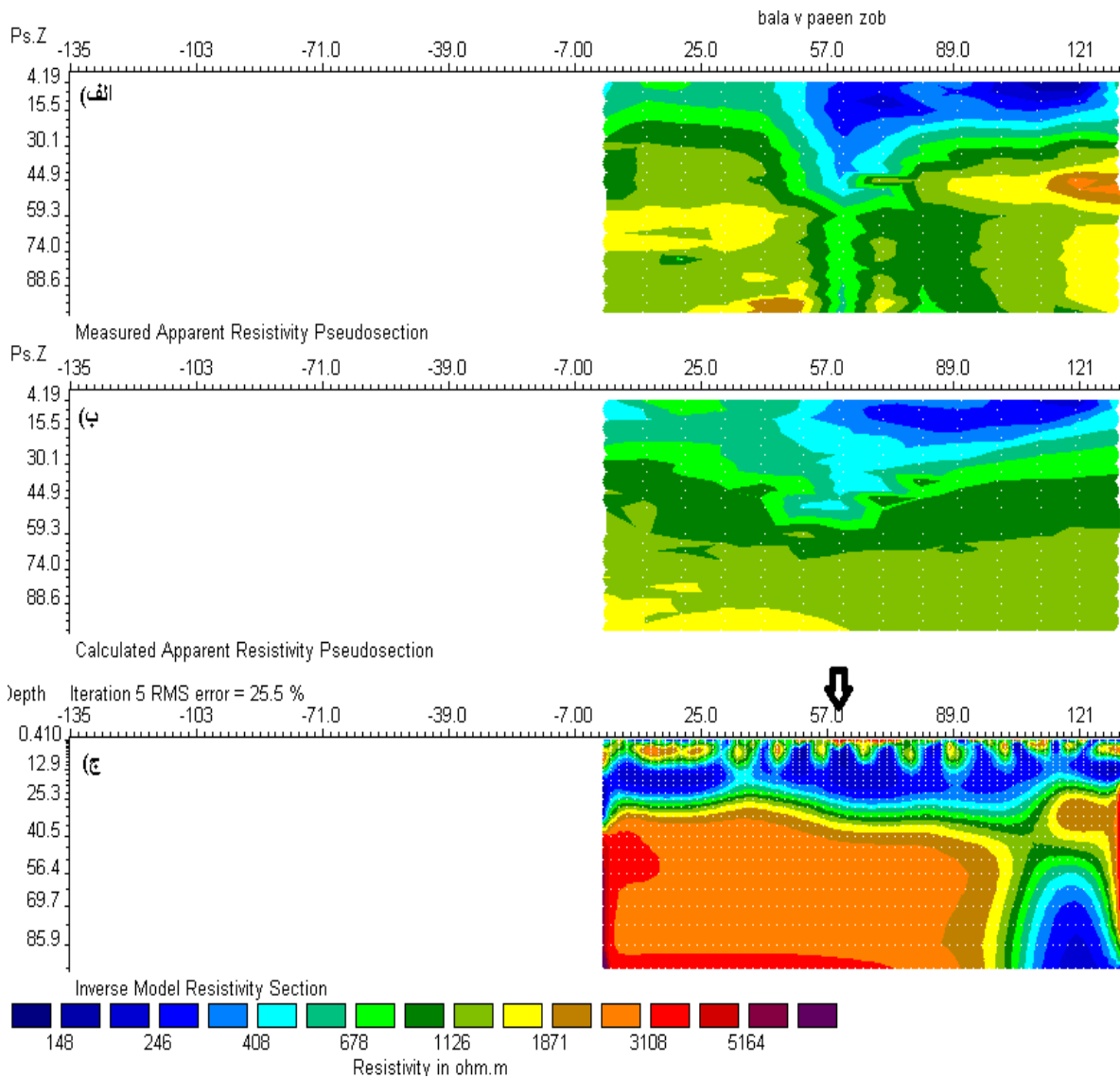
روش دیگری که برای انجام مدل سازی معکوس بر روی داده های مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است، روش معکوس سازی ترکیبی می باشد. در این روش نیز تاثیر چند پارامتر تاثیر گذار جهت به دست آوردن یک مدل قابل توجیه با واقعیت های زمین شناسی، باهم مقایسه شداند. برای انجام معکوس سازی با استفاده از روش معکوس سازی ترکیبی، ابتدا مقدار فاکتور میرایی را برابر ۰.۱۶، حداکثر محدوده مقاومت ویژه را ۱۰ برابر متوسط مقاومت ویژه تکرار^۱ قبلی و حداقل آن را برابر ۰.۰۱۵ متوسط مقاومت ویژه تکرار قبلی و مقدار نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی، برابر ۲ در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده با توجه به این مقادیر در شکل (۶-۱۲) نشان داده شده

^۱ Iteration

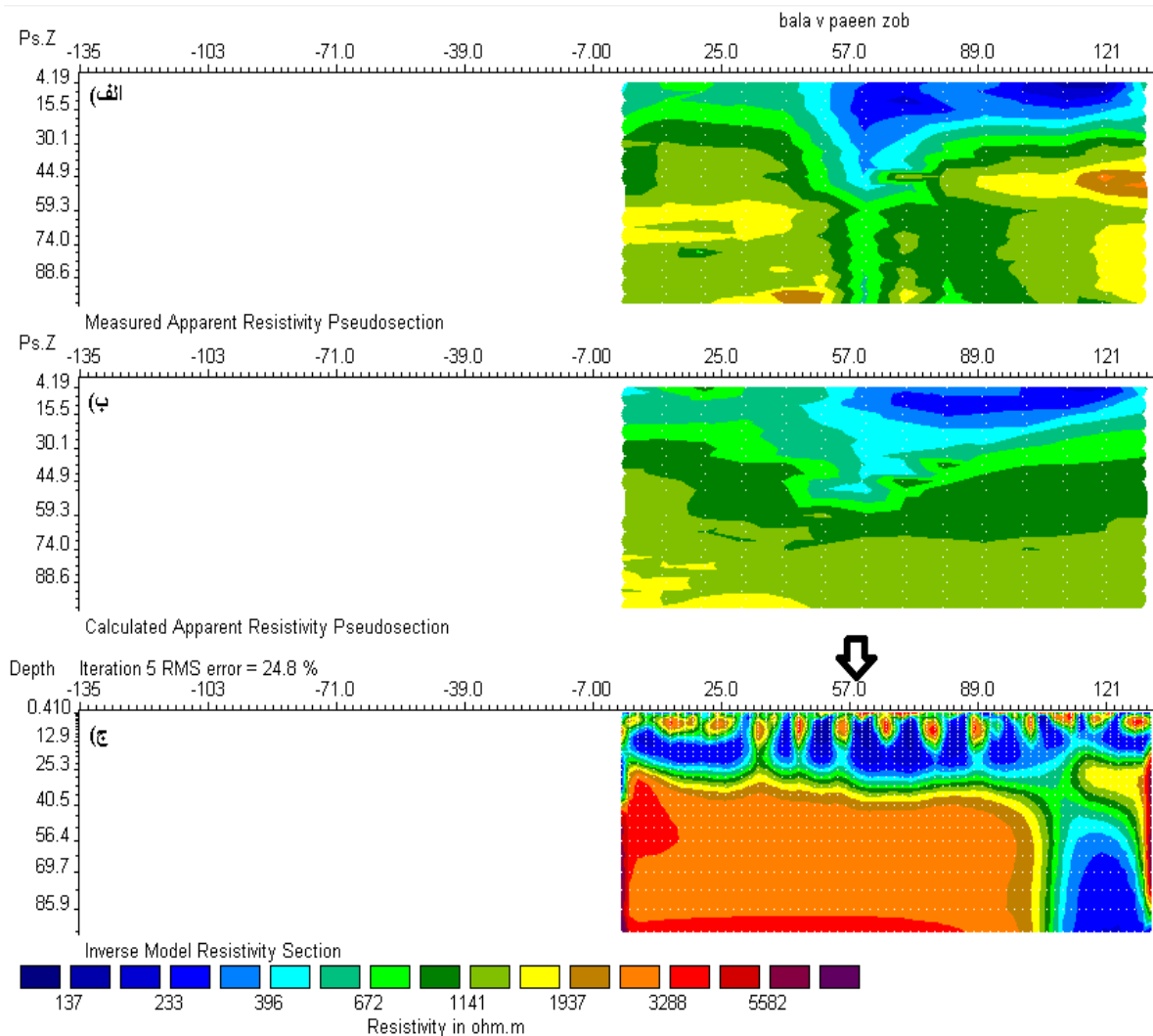
است. همچنین اگر مقدار فاکتور میرایی را در روش معکوس‌سازی ترکیبی اولی، از مقدار ۰.۱۶ به مقدار ۰.۲۵ افزایش دهیم، نتیجه به دست آمده مطابق شکل (۶-۱۳) می‌باشد. اکنون، در روش معکوس‌سازی ترکیبی اولی نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی از مقدار ۲ به مقدار ۴، تغییر می‌دهیم که باعث می‌شود، تغییرات جانبی مقاومت ویژه الکتریکی بهتر نمایان گردند. نتیجه این تغییر در شکل (۶-۱۴) نشان داده شده است. کلیه مدل‌های نشان داده شده در شکل‌های (۶-۱۲) (ج) لغایت (۶-۱۴) (ج)، به خاطر اینکه، ناهمگنی‌های جانبی مشاهده شده در این اشکال با شبه مقطع مربوطه و محل چاه آب و نیز با نتایج قسمت (۶-۲) هم‌خوانی ندارند، لذا مدل‌های فوق‌الذکر با واقعیت‌های موجود در طبیعت مطابقت ندارند. اینجا نتیجه می‌شود که روش مدل‌سازی مربوطه و یا پارامترهای به کار گرفته شده در آنها، مناسب انتخاب نشده‌اند. بنابراین باید روش معکوس‌سازی عوض شود.



شکل ۶-۱۲- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی ترکیبی، با فاکتور میرایی ۰.۱۶ و فیلتر هموارساز ۲



شکل ۶-۱۳- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی ترکیبی، با فاکتور میرایی ۰.۲۵ و فیلتر هموارساز ۲



شکل ۶-۱۴- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی ترکیبی، با نسبت فیلتر هموارساز ۴ و فاکتور میرایی ۰.۱۶

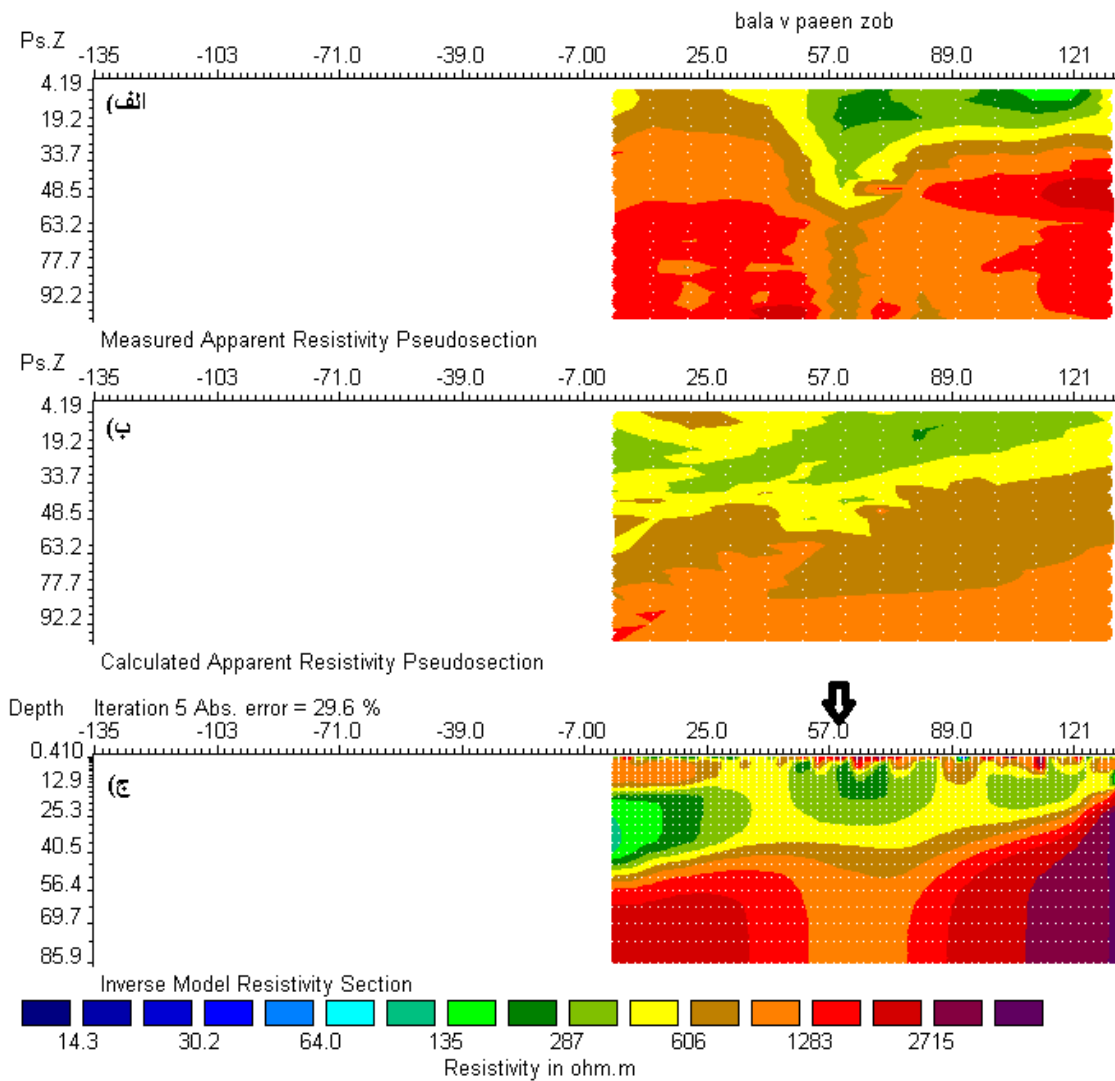
سومین روش معکوس سازی که برای به دست آوردن یک مدل مناسب جهت تفسیر داده های مقاومت ویژه الکتریکی استفاده شده است. معکوس سازی به روش قوی یا روش نرَم l_1 می باشد. به طور کلی، از این روش معکوس سازی برای مدل سازی ساختارهای زمین شناسی که در آنها تغییرات مقاومت ویژه به صورت جانبی شدید و ناگهانی است، استفاده می شود. ابتدا برای انجام این معکوس سازی، مقدار فاکتور میرایی را برابر ۰.۱۶، حداکثر مقاومت ویژه برای مدل تهیه شده در هر تکرار ۱۰ برابر میانگین مقاومت ویژه در تکرار قبلی و حداقل آن ۰.۰۵، در نظر گرفته شده است. مدل به دست آمده با این مقادیر، در شکل (۶-۱۵) نشان داده شده است. همان گونه که قبلا ذکر گردید، چاه آب ذوب آهن در فاصله افقی ۶۰ متری از مبدا مختصات قرار گرفته است. به طوری که در شکل

(۶-۱۵-ج) دیده می‌شود در این فاصله و از عمق تقریباً ۴۰ متری به پایین، یک ناهمگنی جانبی شدید به چشم می‌خورد که بیانگر وجود یک شکستگی در سنگ آهک می‌باشد، که محتوی آب می‌باشد. لذا با توجه به این توضیحات، نتیجه می‌شود که مدل نشان داده شده در شکل (۶-۱۵-ج) هم با شبهه مقطع مربوطه هم‌خوانی دارد و هم با واقعیت‌های موجود در طبیعت مطابقت دارد و یا به عبارت دیگر، روش مدل‌سازی و پارامترهای انتخاب شده، نسبتاً قابل قبول می‌باشند. همچنین با توجه به این شکل، گستره مقاومت‌ویژه الکتریکی از سطح زمین تا عمق ۲۵ متری کمتر از ۵۰۰ اهم‌متر می‌باشد که با توجه به گمانه اکتشافی روس‌ها، می‌توان این قسمت را جزء رسوبات آبرفتی محسوب کرد. مقدار مقاومت‌ویژه رسوبات حوالی چاه در مقایسه با رسوبات دورتر، در حدود ۲۰۰ اهم‌متر کمتر می‌باشد که این در نتیجه نفوذ آب خارج شده از چاه به حوالی آن می‌باشد. نکته جالب توجه‌ای که در این شکل دیده می‌شود، بالا آمدگی سنگ‌های آهکی با مقاومت‌ویژه الکتریکی نسبتاً زیاد می‌باشد. همانطور که در شکل (۶-۱) دیده می‌شود خطی که توسط شماره ۳ نشان داده شده است، امتداد گسل شاهرود را نشان می‌دهد که یک گسل معکوس با شیب تقریباً ۸۰ درجه رو به شمال می‌باشد [جهانبین، ۱۳۸۶]. این گسل باعث شده است که بلوک سمت راست شکاف ایجاد شده در شکل (۶-۱۵-ج)، نسبت به بلوک سمت چپ آن به طرف بالا حرکت نماید.

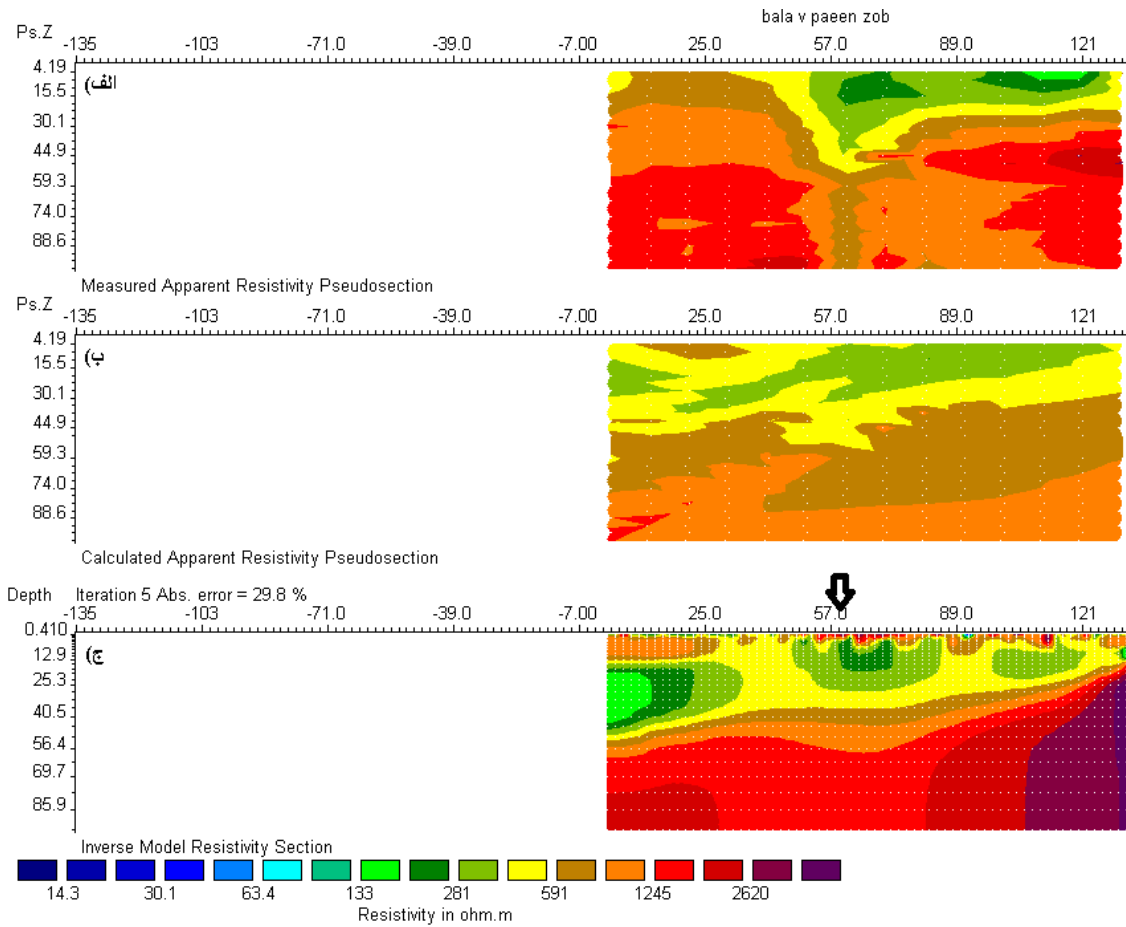
پارامتر دیگری که هنوز می‌توان تاثیر تغییرات آن را بر روی مدل به دست آمده از روش نرم ℓ_1 ، بررسی نمود، مقدار فاکتور میرایی می‌باشد. با تغییر اندازه فاکتور میرایی از مقدار ۰.۱۶ به مقدار ۰.۲۵ شکل (۶-۱۶) حاصل می‌گردد. با توجه به این شکل، این نکته مشخص می‌شود که با افزایش اندازه فاکتور میرایی، کلا شکاف مورد نظر بسته شده است. لذا نتیجه می‌شود که پارامتر انتخاب شده اخیرالذکر، قابل قبول نمی‌باشد.

سومین پارامتری که تاثیر آن بر روی مدل به دست آمده از روش معکوس‌سازی نرم ℓ_1 بررسی شده است، نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی می‌باشد. ابتدا اندازه نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی، ۲ در نظر گرفته شده است که مدل به دست آمده در این حالت در شکل (۶-۱۵) نشان داده

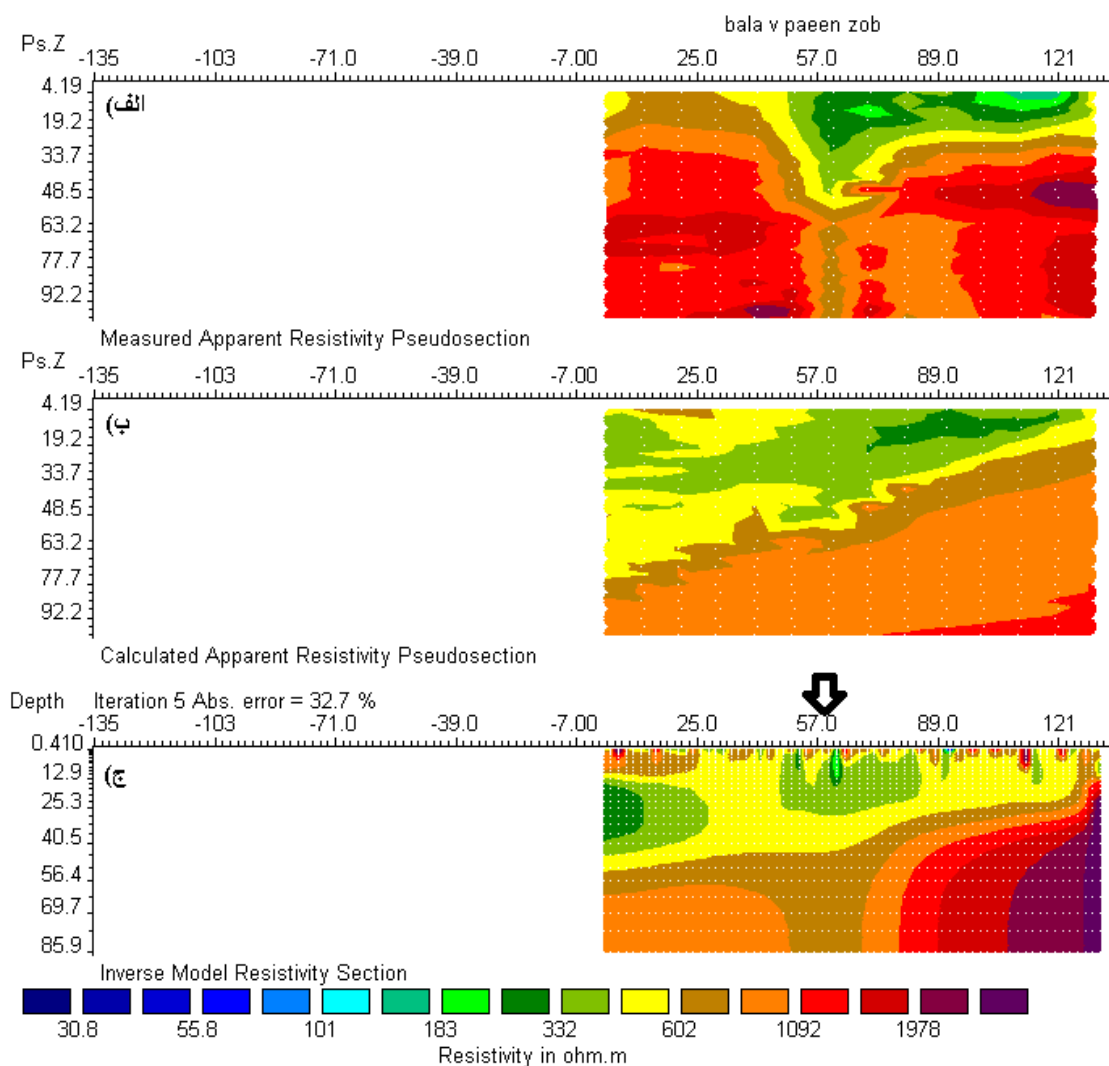
شده است. اکنون اندازه این پارامتر را برابر ۴ در نظر می گیریم که نتیجه به دست آمده در شکل (۶-۱۷) آورده شده است. با مقایسه این دو شکل، این نکته حاصل می شود که تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به دو بلوک اطراف شکاف ایجاد شده در شکل (۶-۱۷)، غیر واقعی به نظر می رسند. لذا نتیجه می شود که پارامتر انتخاب شده اخیرالذکر قابل قبول نمی باشد.



شکل ۶-۱۵- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی نرْم ρ_1 ، با فاکتور میرایی ۰.۱۶



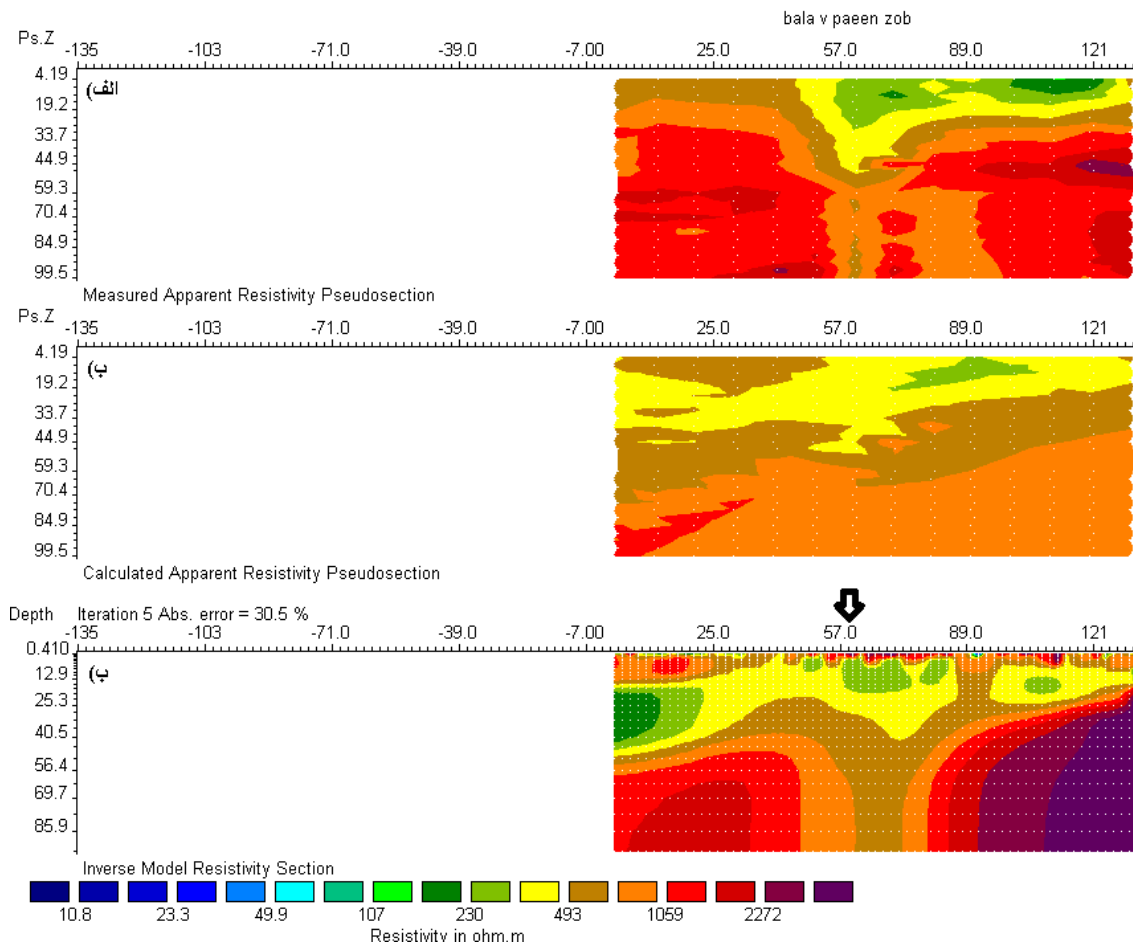
شکل ۶-۱۶- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی نرَم ℓ_1 ، با فاکتور میرایی ۰.۲۵



شکل ۶-۱۷- مدل تهیه شده با استفاده از روش معکوس سازی نرم ρ_1 ، با نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی ۴

همانطور که قبلاً گفته شد برای داده‌هایی که سطح نویز در آنها بالا می‌باشد می‌توان با افزایش مقدار فاکتور میرایی از برازش مدل به این نویزها جلوگیری کرد. علاوه بر این که نویزهای مختلف دقت مدل به دست آمده را کاهش می‌دهند با افزایش عمق برداشت نیز دقت داده‌های مقاومت‌ویژه پایین رفته در نتیجه تفکیک پذیری مدل در عمق‌های زیاد، کمتر می‌شود. نرم افزار Res2Dinv برای افزایش تفکیک پذیری مدل، در عمق‌های بیشتر این امکان را به کاربر داده است که با تعریف یک ضریب، اندازه فاکتور میرایی از یک عمق به عمق دیگر به نسبت این ضریب افزایش داده شود. به عبارتی دیگر، با افزایش عمق، اندازه فاکتور میرایی نیز افزایش پیدا می‌کند. در پیش فرض این نرم افزار اندازه این ضریب در حدود ۱.۰۵ در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی تاثیر افزایش این ضریب بر

روی مدل تهیه شده، اندازه آن به ۱.۵ افزایش داده شد که در شکل (۶-۱۸) نتیجه به دست آمده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود با افزایش مقدار ضریب تغییر عمقی فاکتور میرایی، مدل به دست آمده در شکل (۶-۱۸-ج)، وجود گسل را در مقایسه با شکل (۶-۱۵-ج) بهتر نشان می دهد.



شکل ۶-۱۸- مدل به دست آمده از روش معکوس سازی نرَم ℓ_1 ، با مقدار ضریب تغییر عمقی فاکتور میرایی

۱.۵

فصل ہفتم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۷-۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشان داده شده است که مناسب‌ترین روش ژئوالکتریکی برای اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی در زمین‌های سخت، روش ترکیب یافته از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن می‌باشد. توسط این روش می‌توان بیشترین اطلاعات درباره توزیع جانبی تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین را به دست آورد. ترکیب یاد شده این امکان را فراهم می‌کند که تغییرات جانبی و قائم مقاومت‌ویژه در زیر سطح زمین، هم به صورت عمقی و هم به صورت جانبی مشخص گردد. نظر به اینکه آب موجود در درزها، شکاف‌ها و گسل‌ها دارای مقاومت‌ویژه الکتریکی کمتری از سنگ میزبان خود می‌باشد، لذا می‌توان در مدل‌های حاصله از مدل‌سازی دوبعدی معکوس داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، محل آب‌های مذکور را در زیر سطح زمین اکتشاف نمود.

این روش نه تنها برای اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی در زمین‌های سختی که دارای درز و شکاف و گسل می‌باشند مفید می‌باشد، بلکه برای اکتشاف گسل‌های پنهان در زیر آبرفت نیز کاربرد دارد.

با توجه به مقادیر شیب و امتداد دسته درزهای محل مورد مطالعه و نیز توزیع آماری آنها در شکل (۶-۶)، نتیجه گرفته می‌شود که شیب اکثر آنها بیش از ۸۰ درجه می‌باشد. با توجه به این شیب و مقاطع حساسیت آرایش قطبی-دوقطبی، می‌توان گفت که انتخاب آرایش قطبی-دوقطبی جهت اکتشاف آب در این دسته درزها، یک انتخاب مناسب می‌باشد.

بعد از بررسی‌های زیاد به صورت سعی و خطا، نتیجه گرفته شد که مدل حاصله از به کارگیری

روش نرْم ℓ_1 با پارامترهای مشروحه زیر:

(۱) نسبت فیلتر هموارساز قائم به افقی برابر ۲

(۲) مقدار فاکتور میرایی برابر ۰.۱۶

(۳) مقدار ضریب تغییر عمقی فاکتور میرایی برابر ۱.۵

برای مشخص نمودن ناهمگنی‌های جانبی موجود در دره کال‌قرنو بهترین جواب را ارائه

می‌دهد.

با توجه به مدل‌های به دست آمده از روش معکوس‌سازی نرَم l_1 و نیز اطلاعات مربوط به مقاطع نازک، نتیجه گرفته می‌شود که چاه آب ذوب آهن بر روی یک گسل قرار گرفته است، که امتداد آن با خط شماره ۲ در شکل (۶-۱) نشان داده شده است. احتمال دارد که آب چاه مذکور به علت قرار گیری آن در روی گسل شماره ۲ و ارتباط این گسل با گسل‌های شماره ۱ و ۳، به صورت زه‌کشی تامین گردد.

۲-۷- پیشنهادات

با توجه به مدل نشان داده شده در شکل (۶-۱۸) مشاهده می‌شود که سنگ بستر از سمت راست به چپ و در خلاف جهت رودخانه شیب پیدا کرده است که برای اثبات این مساله، پیشنهاد می‌شود در محل مورد نظر، برداشت‌های لرزه‌نگاری انجام بگیرد.

به طور کلی به کارگیری دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن به منظور به دست آوردن یک مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی، مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی می‌باشد. لذا، پیشنهاد می‌گردد که به منظور انجام تحقیقات آتی، برای بالا بردن سرعت اندازه‌گیری در صحرا و کاهش هزینه‌ها و همچنین جلوگیری از اشتباهات در قطع و وصل کردن الکترودها، از دستگاه‌های خودکار انتخاب کننده چندین الکترودها، استفاده گردد.

منابع فارسی

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

پیروز ا.، (۱۳۸۲ ب)، "استفاده از مدل‌های ریاضی به منظور تعیین بهترین روش الکتریکی برای اکتشاف محل ناهمگنی‌های جانبی"، یازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک، تهران

ترکمنچه، (۱۳۸۶)، "اکتشاف گسل پنهان شاهرود در محدوده دره کال قرنو با استفاده از روش ژئوالکتریک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

جهانبین م.، (۱۳۸۶)، "تعیین موقعیت و شیب گسل پنهان شاهرود، واقع در منطقه کال قرنو با استفاده از دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح

نقشه زمین شناسی شاهرود، (۱۳۸۰)، مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰. ۱. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

منابع خارجی

- Barker R.D., (1991), "*Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays*", Geophysics, Vol. 54, pp. 1031-1037
- Barker R.D., (1992), "*A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface*", First Break 10, pp. 53-62
- Bates E.R., (1973), "*Detection of subsurface cavities*", U.S. Army Corps of Eng, Waterways Exp, Stat, Misc, pp. 40-73
- Bjorck A., (1996), "*Numerical methods for least squares problems*", SIAM, Philadelphia, Vol. 260, pp. 341, 342.
- Bonnans J.F., Gilbert J.C.h., Lemarechal C. and Sagastizabal C.A., (2006), "*Numerical optimization, theoretical and numerical aspects*", Second edition.
- Bracewell R., (1986), "*The Fourier Transform and Its Applications*", McGraw-Hill
- Bristow C.M., (1966), "*A new graphical resistivity technique for detection air-filled cavities*", Stud, Speleology, 1, pp. 204-227
- Broyden C.G., (1965), "*A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations*".
- Burden R.L., Faires J.D. and Reynolds A.C., (1981), "*Numerical Analysis*", Prindle, Webber & Schmidt.
- Claerbout J.F. and Muir F., (1973), "*Robust modeling with erratic data*", Geophysics, Vol. 38, pp. 826-844
- Corvallis O.R., (2000), "*D.C. Resistivity methods*", Northwest Geophysical Associates, Inc.
- Broyden C.G., (1965), "*A class of methods for solving nonlinear simultaneous equations*", Mathematics of Computarion, Vol. 19, pp. 577-593
- Broyden C.G., (1972), "*Quasi-Newton methods In Numerical Methods for Unconstrained Optimization*", Academic Press, Inc., pp. 87-106
- Burden R.L., Faires J.D. and Reynolds A.C., (1981), "*Numerical Analysis*".
- Constable S.C., Parker R.L. and Constable C.G., (1987), "*Occam's Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data*", Geophysics, Vol. 52, pp. 289-300

Dahlin T., (1996), *"2D resistivity surveying for environmental and engineering applications"*, First Break 14, pp. 275-283

Dahlin T. and Loke M.H., (1998), *"Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modeling"*, J. Appl., Geophysics

Daniels F. and Alberty R.A., (1966), *"Physical Chemistry"*, John Wiley and Sons, Inc.

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

Davis D. and Swann W.H., (1969), *"Non-Linear optimisation Techniques"*, Oliver & Boyd.

Dennis J.E. and Schnabel R., (1983), *"Numerical Methods for Nonlinear Equations"*, Prentice-Hall, Inc.

Dey A. and Morrison H.F., (1979), *"Resistivity modeling for arbitrarily shaped twodimensional structures"*, Geophysical Prospecting, Vol, 27, pp. 106-136

Douglas L.S., (1986), *"Application of the pole-dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways"*, Geophysics, Vol. 51, No. 3, pp. 833-837

Dunscumb M.H. and Rehwoldt E., (1999), *"Two-Dimensional Profiling; Geophysical Weapon of Choice in Karst Terrain for Engineering Applications"*, Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst– 1999, Proceedings of the Seventh Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Hershey, Pennsylvania, April 10-14, pp. 219-224

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

Ellis R.G. and Oldenburg D.W., (1994), *"Applied geophysical inversion. Geophysical Journal International"*, Vol. 116, pp. 5-11.

Fenton J.D., (2008), *"Numerical methods"*, New York: John Wiley and Sons, pp. 9-11

Fletcher R., (1987), *"Practical methods of optimization"*, New York: John Wiley and Sons, pp. 113

Fratta D., (2006), *"Electrical resistivity methods"*, Lectures from Wisconsin University.

Herzig F.Z. and Owen T.E., (1975), *"Detection of subsurface cavities by surface remote sensing techniques"*, Federal Highway Admin, Rep, No. FHWA-RD, pp. 75-80

George A. and Liu J.W., (1981), *"Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems"*, Prentice-Hall Inc.

Golub G.H. and Van Loan C.F., (1989), *"Matrix Computations"*, The Johns Hopkins University Press.

WWW.Google Erthe.com

Griffiths D.H. and Barker R.D., (1993), *"Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology"*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 29, pp. 211-226

Inman J.R., (1975), *"Resistivity inversion with ridge regression"*, Geophysics, Vol. 40, pp. 798-817

Karous M. And Pernu T.K., (1985), "Combined Sounding-Profiling Resistivity Measurements With The Three-Electrode Arrays", Geophysical prospecting, Vol. 33, pp. 447-459

Kaufmann O. and Quinif Y. (2001), *"An Application of Cone Penetration Tests and Combined Array 2D Electrical Resistivity Tomography to Delineate Cover-Collapse Sinkhole Prone Areas"*, Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology, Proceedings of the Eighth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Louisville, Kentucky, pp. 359-364

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

Keller G.V. and Frischknecht F.C., (1966), *"Electrical methods in geophysical prospecting"*. Pergamon Press Inc, Oxford

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

Kirsch R., (2006), *"Groundwater geophysics a tool for hydrogeology"*, Springer, pp. 493

Koefoed O., (1975), *"Geosounding Principles: Resistivity sounding measurements"*, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

Koefoed O., (1979), *"Geosounding principles"*, Elsevier Science Publ, CO, Inc

Lawson C.L. and Hanson R.J., (1974), *"Solving Least Squares Problems,"*, Prentice-Hall.

Lines L.R. and Treitel S., (1984), *"Tutorial: A review of least-squares inversion and its*

application to geophysical problems", Geophysical Prospecting, Vol. 32, pp. 159-186

Loke M.H., (1994), *"The inversion of two-dimensional apparent resistivity data"*, PhD thesis, The University of Birmingham.

Loke M.H., (1999), *"Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies; A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys"*, pp. 1-4

Loke M.H., (2001), *"Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, Course Notes for USGS Workshop: 2-D and 3-D Inversion and Modeling of Surface and Borehole Resistivity Data"*, Storrs, CT, pp. 13-16

Lock M.H., (2004a), *"Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys"*, pp. 1-77

Lock M.H., (2004b), *"Res2dinv ver. 3.54, Geotomo software"*, pp. 1-130

Loke M.H. and Barker R.D., (1995), *"Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections"*, Geophysics, Vol. 60, pp. 1682-1690

Loke M.H. and Barker R.D., (1996), *"Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method"*, Geophysical Prospecting, Vol. 44, pp. 131-152

Loke M.H. and Dahlin T., (2002), "A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion", Journal of Geophysics, Vol. 49, pp. 149-162

Logn O., (1954), *"Mapping nearly vertical discontinuities by earth reresistivities"*, Geophysics, Vol. 19, pp. 739-760

Mcdowell P.W., (1981), *"Recent developments in geophysical techniques for the rapid location of near-surface anomalous ground condtions"*. Ground Engineering, Vol. 14(3), pp. 20-23

McGilivray P.R. and Oldenburg, D.W., (1990), *"Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study"*. Geophysical prospecting, Vol. 38, pp. 499-524

Millitzer H., Roster R. and Losch W., (1975), *"Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods"*, Geophysical Prospecting, Vol. 27, pp. 640-652

Milson J., (1989), *"Field Geophysics"*, Geological Society of London Handbook Series, pp. 90-97

Mooney H. M., 1980, *"Handbook of Engineering Geophysics"* Vol. 2. Electrical Resistivity, Bison Instruments, Inc.

More J.J. and Trangenstein J.A., (1976), *"On the global convergence of Broyden's method"*, Mathematics of Computation, Vol. 30, pp. 523-540

Nocedal J. and Wright S. J., (1999), "*Numerical Optimization*", Springer, pp. 1320

Parasnis D.S., (1997), "*Principles of Applied Geophysics*", 5th edition, Chapman and Hall, London, New York.

Park S.K. and Van G.P., (1991), "*Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes*", *Geophysics*, Vol. 56, pp. 951-960

Reynolds J.M., (1997), "*An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*", Wiley, New York

Rigby J., Matthews M.C. and McDowell P.W., (1997), "*Electrical Resistivity imaging systems for ground investigations*", With particular reference features in Chalk areas. *Moern Geophysics in Engineering Geology*, Vol. 12, pp. 235-245

Robain H., Albouy Y., Dubas M., Descloitres M., Camerlynck C., Mechler P. and Tabbagh A., (1999), "*The location of infinite electrodes in pole-pole electrical surveys*": Consequences for 2D imaging, *J.Appl. Geophys*, Vol. 41, pp. 313-333

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

Roth M. J.S., Mackey J. R., Mackey C. and Nyquist J. E. (1999), "*A Case Study of the Reliability of Multi-Electrode Earth Resistivity Testing for Geotechnical Investigations in Karst Terrains*", *Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst*, 1999, Proceedings of the Seventh Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Hershey, Pennsylvania, April 10-14, pp. 247-252

Sasaki Y., (1992), "*Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation*", *Geophysical Prospecting*, Vol. 40, pp. 453-464

Seaton W.J. and Burbey T.J., (2002), "*Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane*", *Journal of Geophysics*, Vol. 51, pp. 21-41

Sharma P.V., (1997), "*Environmental and Engineering Geophysics*", Cambridge Univ, Press, Cambridge, U.K., New York, USA.

Silvester P.P. and Ferrari R.L., (1990), "*Finite elements for electrical engineers*", Cambridge University Press.

Smith N.C. and Vozoff K., (1984), "*Two-dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole data*" *IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 22, pp. 21-28

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

Thomas J.W., (1995), *"Numerical Partial Differential Equations– Finite Difference Methods"*, Springer-Verlag, New York.

Tripp A.C., Hohmann G. and Swift C.M., (1984), *"Two-dimensional resistivity inversion"*, Geophysics, Vol. 49, pp. 1708-1717

Zhou W., Beck B.F. and Stephenson J.B. (1999), *"Application of Electrical Resistivity Tomography and Natural-Potential Technology to Delineate Potential Sinkhole Collapse Areas in a Covered Karst Terrane"*, Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst– 1999, Proceedings of the Seventh Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Hershey, Pennsylvania, April 10-14, pp. 187-193

Zonge K., Wynn J. and Urquhart S., (2005), *"Resistivity, Induced Polarization and Complex Resistivity"* Investigation in Geophysics, Vol. 13, pp. 265-299

Van Nostrand R.G. and Cook K.L., (1966), *"Interpretation of resistivity data"*, U.S. Geoelectrical Survey, pp. 499

Vogelsang D., (1995), *"Environmental Geophysics"*, Springer-Verlag.

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

Wolk R. and Schwetlick H., (1988), *"Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis and numerical comparisons"*, SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations, Vol. 9, pp. 907-921

William J.S. and Thomas J.B., (2002), *"Evaluation of two- dimensional resistivity methods in a fractured crystalline- rock terrane"*.

پوست الف

مختصری در مورد دستگاه به کار گرفته شده در اندازه گیری

مقاومت ویژه الکتریکی

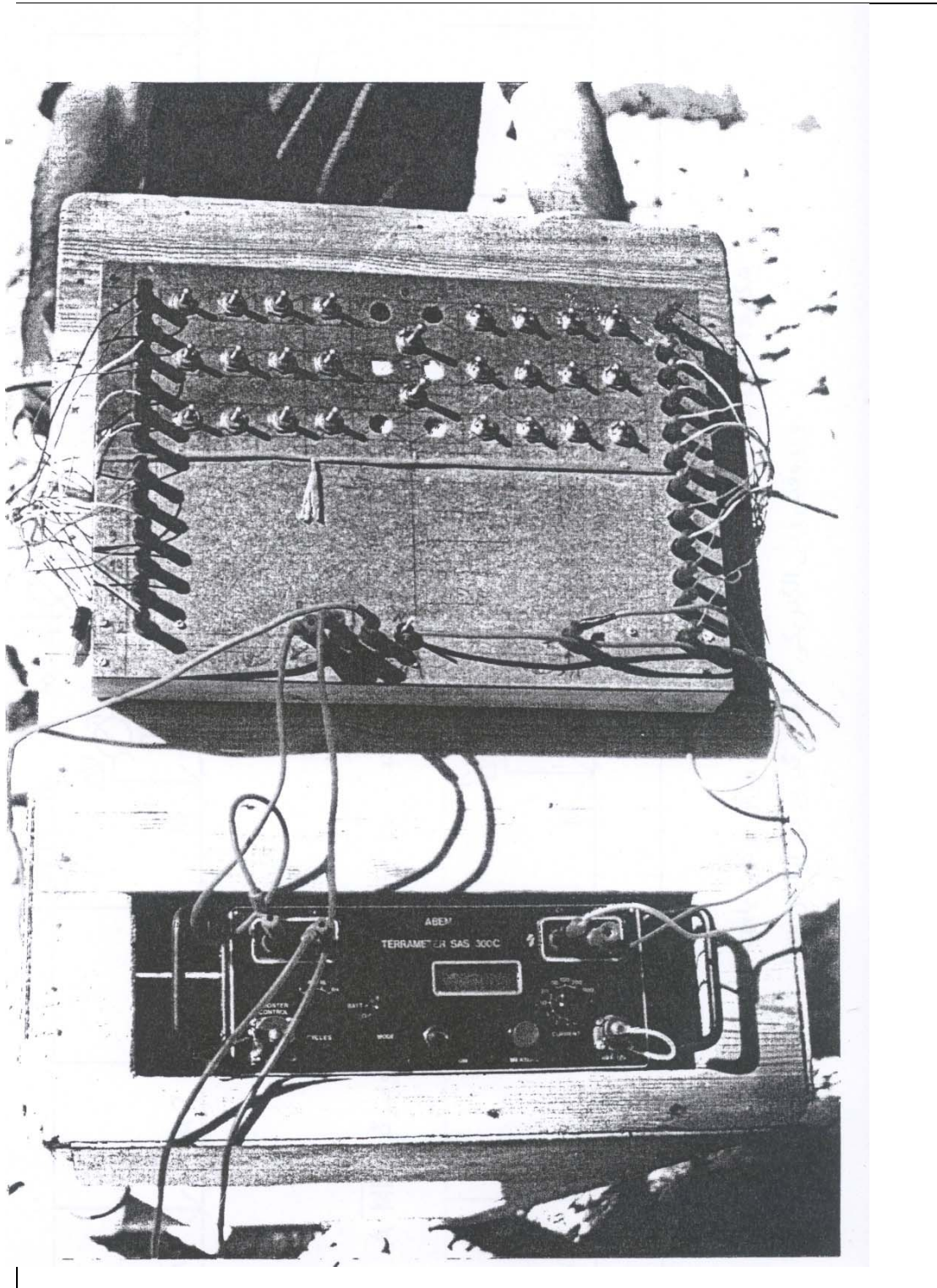
پ-الف-۱- مختصری در مورد دستگاه به کار گرفته شده برای اندازه‌گیری

مقاومت ویژه الکتریکی

نام دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی به کار گرفته شده در این تحقیق، ABEM و ساخت کشور سوئد بوده و مدل آن TERAMETER SAS 300C می‌باشد که تصویر آن (دید از بالا) در پایین شکل (پ-الف-۱) نشان داده شده است.

به منظور سرعت بخشیدن به نحوه اندازه‌گیری در صحرا، صفحه کلیدی به صورت ابتکاری ساخته شده که در بالای شکل (پ-الف-۱) نشان داده شده است. یک کابل ۱۲ رشته‌ای در طرف چپ این جعبه کلید قرار دارد. انتهای هر یک از این رشته‌ها به ترتیب به یکی از الکترودهای A_4 تا A_{16} مطابق شکل (پ-الف-۱) متصل شده است. ابتدای هر یک از این رشته‌ها به فیشی متصل است که آن نیز به صفحه کلیدی که در بالای شکل (پ-الف-۱) مشاهده می‌گردد وصل شده است. به طوری که در کنار سمت چپ این صفحه کلید دیده می‌شود دوازده عدد فیش به صفحه کلید متصل شده‌اند. همچنین در قسمت سمت چپ صفحه کلید، ۱۲ عدد کلید قطع و وصل دیده می‌شود که هر یک از این کلیدها مربوط به یکی از فیش‌های مذکور می‌باشد. در هنگام اندازه‌گیری، همیشه فقط یکی از این کلیدها وصل و سایر کلیدها قطع می‌باشند.

شبهه همین سیستم اندازه‌گیری، برای اندازه‌گیری رو به عقب، در طرف راست صفحه کلید مذکور توسط الکترودهای B_1 و B_{12} تعبیه شده است. به طوری که در این شکل دیده می‌شود، توسط یک کابل دوازده رشته‌ای، این الکترودهای B_1 تا B_{12} توسط ۱۲ فیش به کنار سمت راست صفحه کلید مذکور وصل می‌شوند که توسط ۱۲ عدد کلید قطع و وصلی که در قسمت سمت راست صفحه کلید دیده می‌شوند، ارتباط هر یک از الکترودهای اخیرالذکر با دستگاه اندازه‌گیری برقرار می‌گردد.



شکل پ-الف-۱- دستگاه SAS 300C

پوستب

روش های مدل سازی وارون دو بعدی با نرم افزار

Res2Dinv

پ-ب-۱- مقدمه

پس از اندازه گیری های صحرائی، مقادیر مقاومت الکتریکی اندازه گیری شده، تبدیل به مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری می شوند. سیستم های چندالکترودی جدید، این کار را به صورت خودکار انجام می دهند. به طوری که خروجی دستگاه، مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری را نشان می دهد. در این پیوست، مراحل تبدیل مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری را به مقاومت ویژه الکتریکی مدل و استفاده از آن در تفسیر زمین شناسی، نشان داده می شود. داده های اندازه گیری شده به ترتیبی که در نرم افزار آمده، باید به صورت پسوند DAT ذخیره شوند. برای ساختن فایل داده های ورودی نرم افزار Res2dinv، از نرم افزارهایی مانند Surfer که قابلیت ذخیره فایل با پسوند dat را دارند، استفاده می شود. نحوه وارد کردن اطلاعات بصورت زیر می باشد:

سطر اول: اسم خط برداشت

سطر دوم: کوچکترین فاصله الکترودی

سطر سوم: عدد مشخص کننده نوع آرایش (آرایش قطبی - دوقطبی = ۶)

سطر چهارم: تعداد کل داده های پروفیل

سطر پنجم: مکان داده ها (اگر داده برداشت شده را به مرکز آرایش نسبت دهیم = ۱، اگر داده

برداشت شده را به اولین الکترود نسبت دهیم = ۰)

سطر ششم: وجود داده های IP (وجود داشته باشد = ۱، وجود نداشته باشد = ۰)

سطر هفتم ستون اول: مختصات داده ها

سطر هفتم ستون دوم: فاصله الکترودهای پتانسیل

سطر هفتم ستون سوم: فاکتور n (نسبت فاصله الکترودهای پتانسیل و جریان به فاصله

الکترودهای پتانسیل)

سطر هفتم ستون چهارم: داده های مقاومت ویژه

اگر داده های توپوگرافی موجود نباشند، در زیر ستون اول داده ها، ۴ عدد صفر زیر هم وارد

می شود.

لازم به ذکر است که در وارد کردن داده های دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن و به روش

کاروس، هنگام وارد کردن داده های آرایش \overline{AMN} مختصات مربوط به الکترودهای A باید نوشته شود و

برای داده های آرایش \overline{MNB} ، مختصات مربوط به الکترودهای N را باید وارد کرد و عدد مربوط

به فاکتور n نیز در منفی یک ضرب می شود [Loke, 2004b].

برای خواندن فایل DAT از منوی فایل، گزینه Read data file، انتخاب می شود تا پارامترهای

اندازه گیری توسط نرم افزار خوانده شود. قبل از هر کاری باید نقاط داده بد را که باعث تحریف روند

واقعی داده های مقاومت ویژه می شود، حذف کرد. این کار را می توان در دو مرحله انجام داد. یک بار

قبل از وارون سازی و یک بار بعد از وارون سازی [Loke, 2004a].

پ-ب-۱- وارون سازی ابتدایی و وارون سازی نهایی برای حذف داده

بد

برای دستیابی به یک مدل خوب، داده ها باید از نظر کیفی، خوب و یک دست باشند. نقاط

داده بد، از دو طریق وارد می شوند. یکی از طریق نویز دستگاهی^۱، و دیگری از طریق نویز پیشا^۲.

نویز دستگاهی، به دلیل برخی مشکلات در کاوش صحرائی وارد اندازه گیری ها می شود. در این

¹ Systematic noise

² Random noise

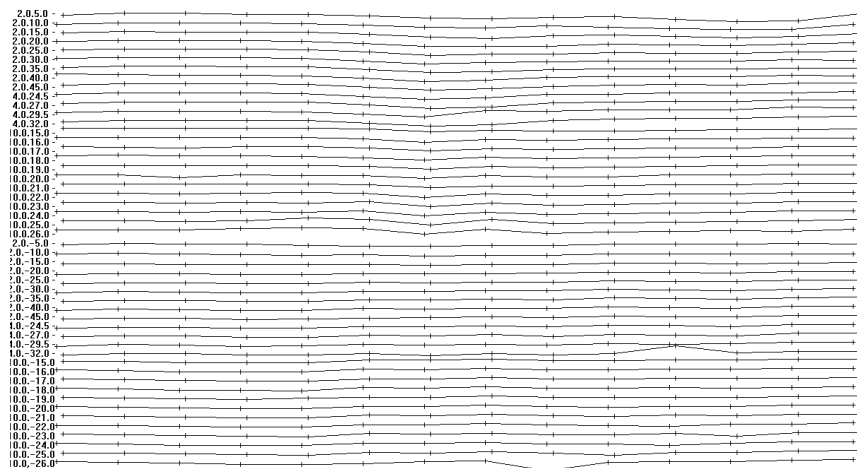
حالت اندازه‌گیری‌ها، مقاومت ویژه الکتریکی واقعی زمین را نشان نمی‌دهند. قطع شدن کابل‌ها، تماس ضعیف الکترودها با زمین، فراموش کردن نصب گیره به الکترودها، وصل کردن وارونه کابل‌ها و غیره، مثال‌هایی‌اند که باعث وارد شدن خطای دستگاهی می‌شوند. تشخیص نویز دستگاهی در اندازه‌گیری‌ها آسان است، زیرا در تعداد محدودی از اندازه‌گیری‌ها به صورت ناهماهنگ با دیگر داده‌ها ظاهر می‌شود. نویز پیشا، مربوط به جریان‌های تلوریک می‌باشد که کل قرائت‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این نویز می‌تواند باعث افزایش یا کاهش دامنه قرائت‌ها نسبت به حالت بدون نویز شود. نویز پیشا بیشتر در آرایش‌های دوقطبی- دوقطبی و قطبی- دوقطبی، که ضریب هندسی بسیار بزرگی دارند ظاهر می‌شود. در این حالت پتانسیل اندازه‌گیری شده با دوقطبی پتانسیل بسیار کوچکتر از پتانسیلی است که با آرایش‌های دیگر، نظیر آرایش ونر اندازه‌گیری می‌شود. وضع آرایش قطبی- قطبی نیز چنین است. در این آرایش، فاصله بین الکترودهای P_1 و الکترودهای P_2 برای n های بزرگ، بسیار زیاد می‌شود و نویز تلوریک از این طریق به راحتی وارد دستگاه می‌شود [Loke, 2004a].

به عنوان یک قاعده کلی، قبل از انجام وارون‌سازی روی یک دسته داده، ابتدا باید نگاهی به شبه مدل مقاومت ویژه الکتریکی آن و همچنین نمودارهای پروفیلی آن انداخت، که در شکل (پ-ب) نشان داده شده است. نویز دستگاهی به صورت پیک‌های تیز و غیرعادی خود را نشان می‌دهد (شکل پ-ب-۱). به دلیل واضح بودن و محدود بودن تعداد این نقاط، می‌توان آنها را به صورت دستی حذف کرد. در صورتی که تعداد داده‌ها زیاد باشند، به ویژه اگر تعداد نقاط داده‌ای بیش از ۱۰۰۰ باشد، نمی‌توان آنها را به صورت شبه مقاطع و پروفیل‌ها نمایش داد. این حالت به ویژه در داده‌های سه بعدی متداول است. نرم‌افزارهای Res2dinv و Res3dinv روشی کلی برای حذف این نقاط بد در دسترس قرار می‌دهند. در این روش، با تعیین یک مقدار ورودی کمینه برای داده‌ها، می‌توان مقادیر غیرعادی را برای هر نوع گسترش الکترودی حذف کرد. به این ترتیب که ابتدا یک وارون‌سازی اولیه روی تمام داده‌ها صورت می‌گیرد. سپس در صفحه نمایش نرم‌افزار INV را باز کرده و نتایج وارون‌سازی خوانده می‌شود. سپس در منوی ویرایش داده‌ها، گزینه RMS error statistics را

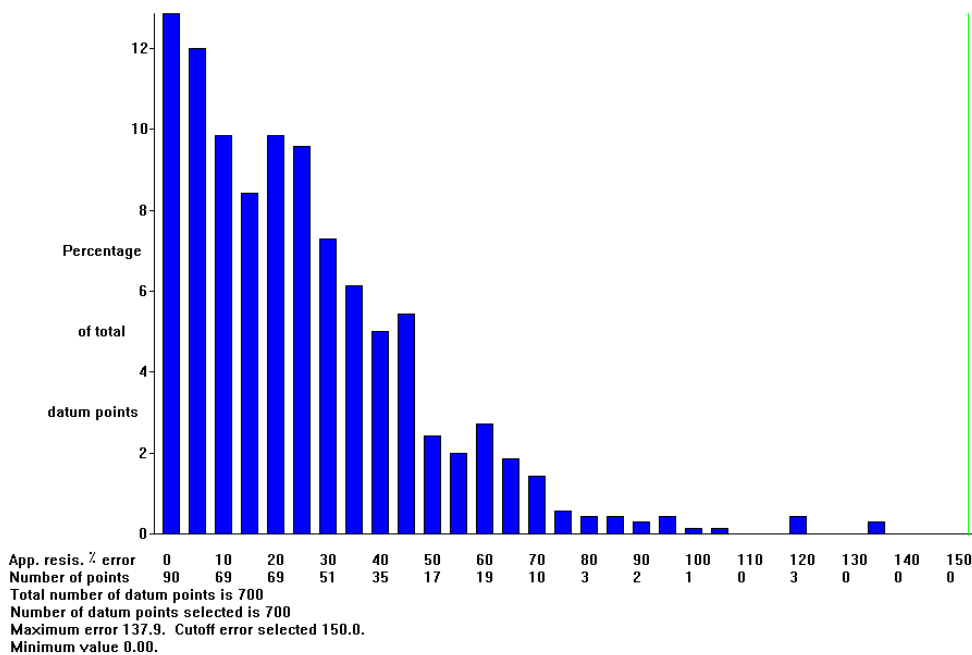
انتخاب کرده و سپس پنجره آنالیز خطای RMS باز می شود. در این قسمت، گسترش آماری درصد اختلاف بین لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه شده نشان داده می شود. گسترش خطا به صورت نمودارهای ستونی در شکل (پ-ب-۲) نشان داده شده است. محور عمودی نشانگر درصد کل نقاط داده، و محور افقی بیانگر درصد خطای مقاومت ویژه الکتریکی است. در زیر هر مقدار درصد خطای محتمل، تعداد الکترودهایی که دارای آن درصد از خطا هستند نشان داده شده است. برای مثال در زیر درصد خطای ۱۸۰، عدد ۱، آمده است، به این مفهوم که یک نقطه داده ای با این درصد خطای دستگاهی موجود است... با حرکت دادن خط قائم سبز رنگ به پشت این نقطه، می توان از طریق منوی خروج، از صفحه آنالیز خطا، خارج شد و خطاهای مربوط به سمت راست خط سبز را حذف کرد [Loke, 2004a].

پ-ب-۲- انتخاب پارامترهای وارون سازی مناسب

برخی مهندسان، زمین شناسان و ژئوفیزیست هایی که به کاوش های صحرایی می پردازند، معمولاً با تئوری وارون سازی چندان آشنا نیستند. نرم افزار Res2dinv و دیگر نرم افزارهای موجود به طور خودکار و مطمئنی طراحی شده اند و در اکثر مواقع پارامترهای وارون سازی پیش فرض نرم افزار نتایج قابل قبولی را بدست می دهند. با این حال، پارامترهای وارون سازی، برای اهداف و مقاصد مختلف، متفاوت می باشند [Loke, 2004a].



شکل پ-ب-۱- مثالی از یک سری داده های صحرائی با تعداد نقاط بد



شکل پ-ب-۲- گسترش آماری درصد اختلاف بین لگاریتم مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه شده.

در نرم افزار Res2dinv، با استفاده از ۶ گزینه می توان این پارامترها را بر اساس نوع کاوش، تنظیم کرد. این شش گزینه، در دو منوی تغییر تنظیمات^۱ و وارون سازی^۲ قرار دارند. در منوی وارون سازی، گزینه های روش وارون سازی^۳، گسسته سازی مدل^۴ و گزینه های حساسیت مدل^۵ قرار دارد. در منوی تغییر تنظیمات نیز، سه گزینه پارامترهای میرایی وارون سازی^۶، پارامترهای شبکه بندی^۷ و پیشرفت وارون سازی^۸ نیز وجود دارد.

¹ Change setting

² Inversion

³ Inversion method

⁴ Model discretization

⁵ Model sensitivity option

⁶ Inversion damping parameters

⁷ Mesh parameters

⁸ Inversion progress

پ-ب-۲-۱- روش های وارون سازی

نایکتایی^۱، در وارون سازی سونداژهای مقاومت ویژه الکتریکی و به طور کلی داده های ژئوفیزیکی، مساله ای شناخته شده است. بر این اساس، برای یک سری داده های اندازه گیری شده، مدل های زیادی وجود دارند که مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری تولید شده با آنها در مدل سازی پیشرو، قابل تطبیق با داده های اندازه گیری شده است. برای محدود کردن تعداد این مدل های ممکن، می توان برخی فرض های اولیه را در زیرروال وارون سازی در نظر گرفت. برای مثال، از اطلاعات زمین شناسی زیرسطحی، چاه پیمایی و دیگر روش های ژئوفیزیکی مطمئن، می توان در وارون سازی استفاده کرد [Loke, 2004a].

فرمول بندی پیش فرض وارون سازی مورد استفاده توسط نرم افزار Res2dinv براساس روش وارون سازی هموار-مقید^۲ است.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (\text{پ-ب-۱})$$

معادله فوق، تغییر مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مدل (Δq) را طوری مقید می کند تا تغییرات آن هموار شود، ولی اغلب تضمینی نیست که تغییر مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی به شکلی هموار صورت گیرد. ولی این فرمول بندی بسیار متداول است و محققان مختلفی از آن استفاده کرده اند [deGroot-Heldin and Constable, 1990; Sasaki, 1992].

با توجه به شکل (پ-ب-۳)، در منوی وارون سازی، اولین گزینه از روش های وارون سازی، گزینه هموار سازی مقاومت ویژه^۳ مدل است. این گزینه، از رابطه (پ-ب-۲) استفاده می کند که در آن از قید وارون سازی به طور مستقیم روی داده های مقاومت ویژه الکتریکی مدل استفاده می شود:

¹ Non-uniqueness

Smoothness-constrained²²

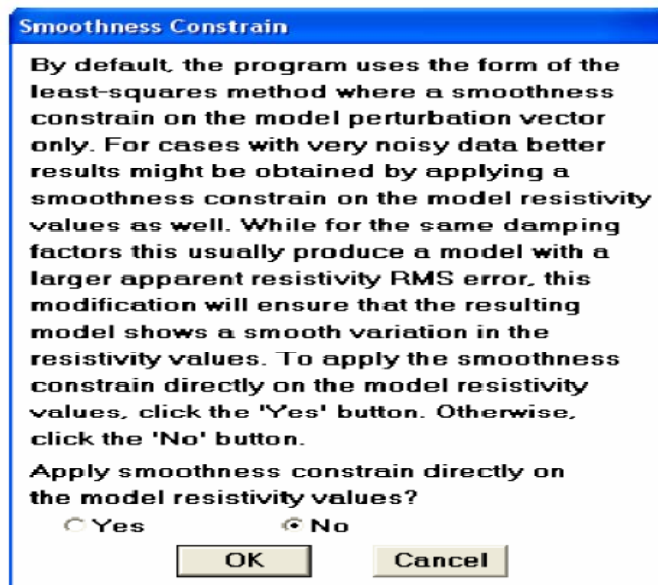
³ Include smoothing of model resistivity

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g - \lambda F q \quad (\text{پ-ب-۲})$$

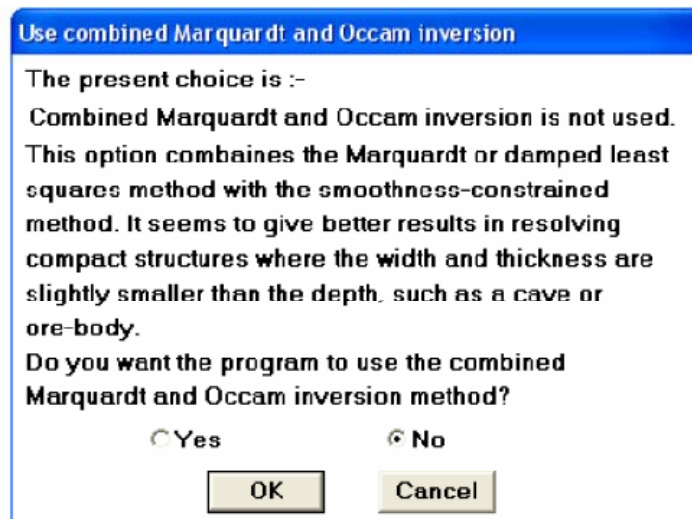
در این روش، مقادیر مقاومت ویژه، q ، به صورت هموار تغییر می کنند. استفاده از این روش برای داده های نویزدار توصیه می شود.

گزینه بعدی، استفاده از روش وارون سازی ترکیبی^۱ است. این گزینه، روش هموار-مقید (یا همان روش اُکام) در معادله (پ-ب-۱) را با روش مارکوارت لِنِبِرگ (یا همان روش رگرسیون ریچ) ترکیب می کند. از این روش در شرایطی استفاده می شود که مقادیر حساسیت بلوک های مدل با تغییرات شدیدی در مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی همراه باشند. در برخی کاوش ها، مثلاً در اکتشاف یک توده رسانا، مسیرهای جریان الکتریکی طوری آشفته می شوند که بخشی از زیرسطح را نمی توان به خوبی تصویر کرد و این بخش خود را با حساسیت کمی در مدل وارون نشان می دهد. در این حالت آشفستگی بزرگی در زیر توده رسانا ایجاد می شود. با ترکیب روش های وارون سازی اُکام و رگرسیون ریچ، می توان این آشفستگی را برطرف کرد. البته از این گزینه باید به عنوان آخرین راه حل استفاده کرد. به نظر می رسد این روش روی ساختارهایی که ضخامت و پهنایشان کمتر از عمقشان است، نظیر غارها و توده های معدنی. البته می توان از روش رگرسیون ریچ به تنهایی استفاده کرد، ولی باید در نظر داشت که وقتی تعداد پارامترهای مدل زیاد و داده ها نویزدار باشند، این روش ناپایدار خواهد بود [Loke, 2004a].

¹ Use combined inversion method



شکل ۷-۳. پنجره هموارسازی مقاومت ویژه [Loke, 2004a]



شکل پ-ب-۴. پنجره وارون سازی ترکیبی [Loke, 2004a]

با توجه به شکل (پ-ب-۵)، گزینه وارون سازی قوی^۱، روش وارون سازی کاربردی تری را بدست می دهد. در این روش، رابطه (پ-ب-۲)، طوری مورد تصحیح واقع می شود که عناصر مختلف پارامتر مدل بتوانند تغییر کنند، و درضمن بردارهای داده های ناچور، بزرگی های مشابهی داشته باشند.

¹ Select robust inversion

فرمول بندی این روش به صورت زیر است:

$$(J^T J + \lambda F_g) \Delta q_k = J^T R_{dg} - \lambda F_g q_k \quad (3-7)$$

این روش، به وارون سازی نرم L_1 یا بلوکی^۲ یا قوی^۳ نیز معروف است. روش ساده تر حداقل مربعات هموار-مقید (رابطه پ-ب-۲) یک روش وارون سازی نرم L_2 است. در وارون سازی نرم L_2 نتایج بهینه خواهند بود و زمین شناسی زیرسطحی تغییراتی هموار، مانند مرز تدریجی یک پلوم^۴ شیمیایی را نشان می دهد. در مواردی که زمین از توده هایی با ساختار درونی یکنواخت، با مرزهای ناگهانی^۵ تشکیل شده باشد (نظیر یک دایک آذرین)، این روش در شناسایی مرزها ناتوان است. روش وارون سازی نرم، یا بهینه سازی بلوکی، مدل هایی را تولید می کند که به صورت تکه تکه ثابت اند (Ellis and Oldenburge, 1994). با دانستن شرایط زمین شناسی، در برخی موارد بهینه سازی خیلی بهتر صورت می گیرد.

در شکل (پ-ب-۶)، نتایج وارون سازی داده ها برای یک مدل مصنوعی با مرزهای ناگهانی نشان داده شده است در این مورد، روش وارون سازی قوی برای مرزهای ناگهانی نتایج بهتری را می دهد. استفاده از روش وارون سازی هموار نرم L_2 ، نتایج بهینه ای بدست نمی دهد (Olayinka and Yaramanci, 2000). در شکل (پ-ب-۶)، مقادیر مقاومت ویژه، مقیاسی لگاریتمی دارند و معمولاً کمتر از یک اهم متر، تا بیش از ۱۰۰۰ اهم متر متغیر هستند. البته می توان مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی را به طور مستقیم وارد کرد، ولی با انتخاب مقیاس لگاریتمی برای پارامترهای وارون سازی، بازه عددی پارامترها را می توان به یک محدوده خطی کاهش داد. در این صورت تغییرات ریز مقاومت ویژه الکتریکی روی مقاطع، بهتر به نمایش در می آید. با این حال، در مواردی که مقادیر منفی یا صفرند، نمی توان از لگاریتم استفاده کرد این حالت معمولاً در کاوش های درون چاهی و یا استفاده از

¹ l_1 -norm inversion

² Blocky inversion

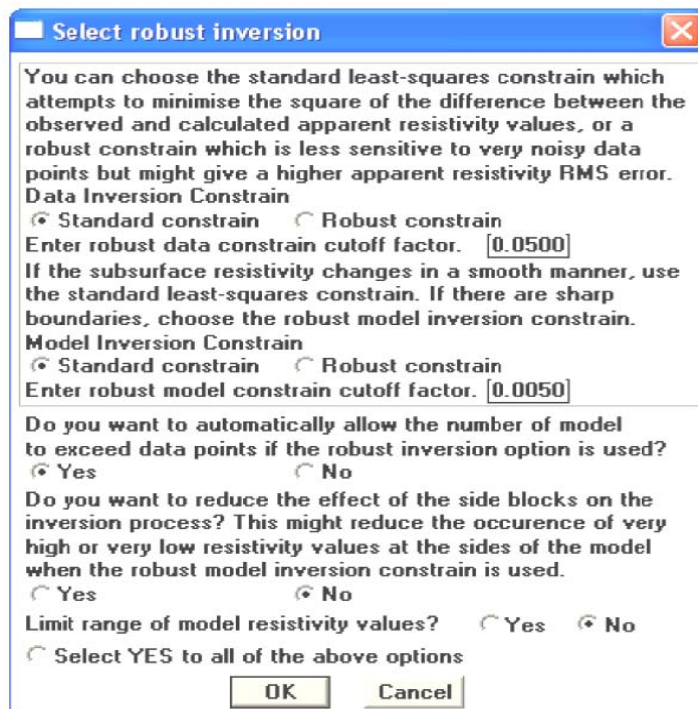
³ Robust inversion

⁴ Plume

⁵ Plume

آرایش های غیر استاندارد^۱ رخ می دهد.

در قسمت محاسبه ماتریس ژاکوبین^۲، محاسبه این ماتریس را می توان کنترل کرد. در این قسمت سه گزینه وجود دارد. سریع ترین راه محاسبه ماتریس ژاکوبین، استفاده از روش شبه نیوتن است [Loke and Barker, 1996].



شکل پ-ب-۵- پنجره وارون سازی نرم ۱. با انتخاب گزینه آخر، تمام گزینه های دیگر "بله" می شوند و فرآیند

وارون سازی به صورت قوی صورت می گیرد [Loke, 2004a].

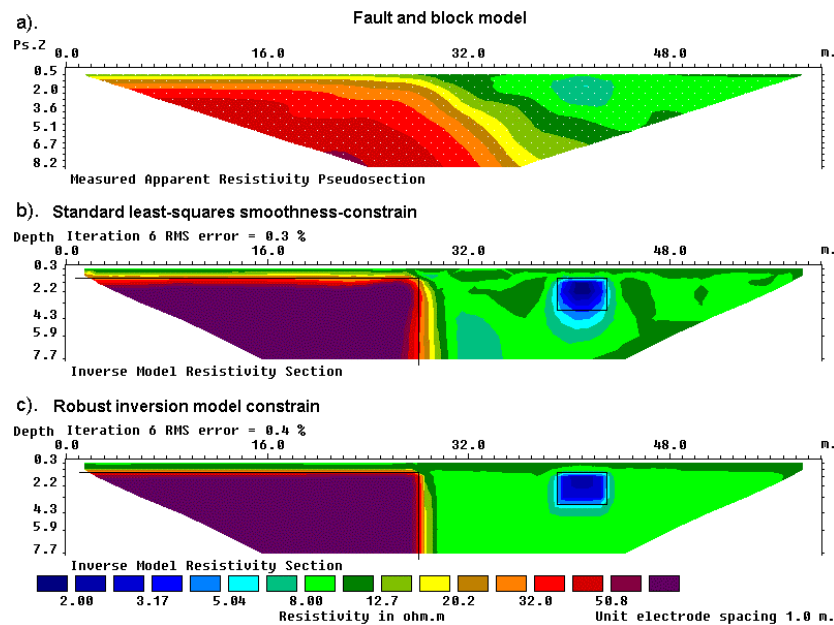
این روش بهترین گزینه ممکن است. روش دقیق تر و کندتر، محاسبه ماتریس ژاکوبین برای تمام تکرارهاست برای این کار به کامپیوتری با حداقل 32 مگابایت RAM و 64 مگابایت فضای ذخیره خالی نیاز است. روش دیگر، محاسبه ماتریس ژاکوبین برای تنها دو تکرار اول، و استفاده از روش شبه-نیوتن در تکرارهای بعدی است. بیشترین تغییرات ماتریس ژاکوبین، معمولاً در چند تکرار اول رخ می دهد. استفاده از روش شبه نیوتن، در وارون سازی سریع داده ها در صحرا با کامپیوترهای

¹ Non-standard array

² Jacobian matrix calculation

لپ تاپ بسیار مفید است و یک دید کلی به مفسر می دهد. در نواحی که کنتراست مقاومت ویژه الکتریکی بسیار زیاد است (نواحی که در آنها بزرگترین مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر از ده برابر کوچکترین مقاومت ویژه الکتریکی باشد)، محاسبه ماتریس ژاکوبین برای تمام تکرارها، مدل هایی با مرزهای تیزتر از روش شبه نیوتون تولید می کند. بنابراین در مناطق با تغییرات ملایم مقاومت ویژه، استفاده از روش شبه نیوتون معقول تر است. گزینه نوع روش بهینه سازی¹ این امکان را فراهم می سازد تا از روش های مختلفی برای حل معادله کمترین مربعات استفاده کنیم. با انتخاب این گزینه، پنجره ای مطابق شکل پ-ب-۷ باز می شود.

1

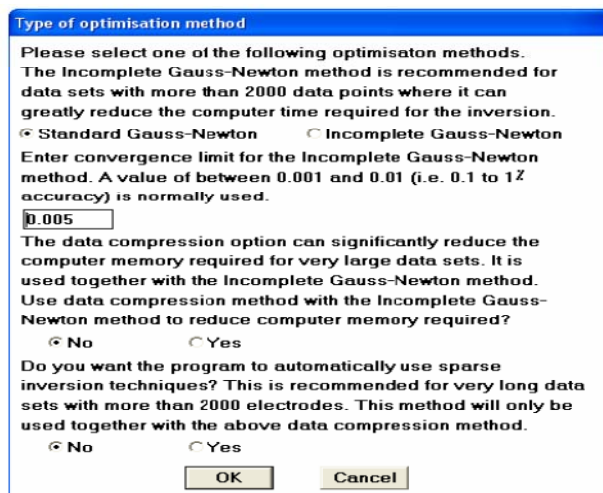


شکل پ-ب-۶- مثالی از کاربرد روش وارون سازی هموار نرم L2 و روش وارون سازی بلوکی نرم L1. [Loke, 2004a].

به طور پیش فرض، نرم افزار از روش کمترین مربعات گاوس-نیوتن استاندارد استفاده می کند. استفاده از این روش در مواقعی مناسب است که تعداد نقاط داده و یا سوله های مدل (n) کم باشد (کمتر از چند هزار). زمان لازم برای وارون سازی متناسب است با n^3 . وقتی این تعداد زیاد باشد (بیش از پنج

¹ Type of optimisation method

هزار)، زمان لازم برای وارون سازی بسیار بالا می رود. برای کاهش زمان وارون سازی، یک راه حل استفاده از روش گاوس-نیوتن ناتمام است که حلی تقریبی از معادله حداقل مربعات بدست می دهد. کاربر می تواند دقت تقریب را نیز مشخص کند. دقت تقریب متناسب با حد همگرایی^۱ مساله وارون می باشد. در اغلب موارد دقت ۵ درصد (معادل با حد همگرایی ۰.۰۰۵) حلی مشابه با روش گاوس-نیوتن استاندارد بدست می دهد. کاهش دقت در استفاده از این روش بین ۱ تا ۲ درصد است ولی در عوض زمان وارون سازی بین ۵ تا ۱۰ برابر کاهش می یابد. برای داده های بسیار حجیم (بیش از ده هزار نقطه داده)، می توان با استفاده از گزینه فشرده سازی داده^۲ استفاده کرد. هنگامی که طول خطوط کاوش زیاد باشد، استفاده از گزینه وارون سازی پراکنده^۳ زمان و حافظه لازم برای کامپیوتر را کاهش می دهد. برای مثال در یک کاوش زیرآبی با ۷۵۰۰ نقطه الکترو، استفاده از این روش زمان وارون سازی را ۱۰ برابر کاهش می دهد (یعنی برای یک کامپیوتر ۳.۲ گیگاهرتزی پنتیوم ۴، حدود ۱۰۱ دقیقه صرفه جویی زمانی خواهیم داشت).



شکل پ-ب-۷- پنجره انتخاب نوع روش بهینه سازی [Loke, 2004a]

¹ Convergence limit

² Data compression

³ Sparse inversion

پ-ب-۲-۲- گسسته سازی مدل

با استفاده از گزینه های این قسمت، می توان روش شبکه بندی نرم افزار را کنترل کرد. به صورت پیش فرض، نرم افزار از یک الگوریتم سعی و خطا و تا حدی با توجه به محل نقاط داده برای طراحی سلول های شبکه استفاده می کند. در نسخه های اولیه این نرم افزار بلوک های مدل دقیقاً مشابه با گسترش داده ها در شبه مقاطع طراحی می شد. این روش برای شبه مقاطع ساده مناسب است ولی در مواقعی که برداشت داده ها به صورت هم پوشان است و یا مواقعی که با کمبود داده مواجهیم و یا برخی داده ها را به دلایلی حذف کرده ایم، استفاده از این روش با مشکل مواجه می شود. آخرین نسخه از نرم افزار Res2dinv از الگوریتم جامعی برای تقسیم زیرزمین به بلوک ها استفاده می کند. در الگوریتم پیش فرض، عمق عمیق ترین لایه در مدل برابر با بزرگترین عمق کاوش مربوط به نقاط داده ای در نظر گرفته شده است و تعداد سلول های مدل از تعداد نقاط داده بیشتر نمی شوند. برای در نظر گرفتن کاهش رزولوشن روش های الکتریکی با عمق، ضخامت هر لایه با عمق افزایش می یابد. شبکه بندی حاصل از این روش طوری است که سلول های مدل در اعماق بیشتر و در گوشه ها ضخیم تر می شوند (شکل پ-ب-۸). در اغلب موارد، این نوع شبکه بندی مناسب است. با این حال مقاطع مدل دقیقاً از شبه مقاطع پیروی نمی کنند و حتی با امکاناتی که نرم افزار در اختیار می گذارد، کاربر می تواند پهنا و ضخامت سلول ها را تغییر دهد [Loke, 2004a].

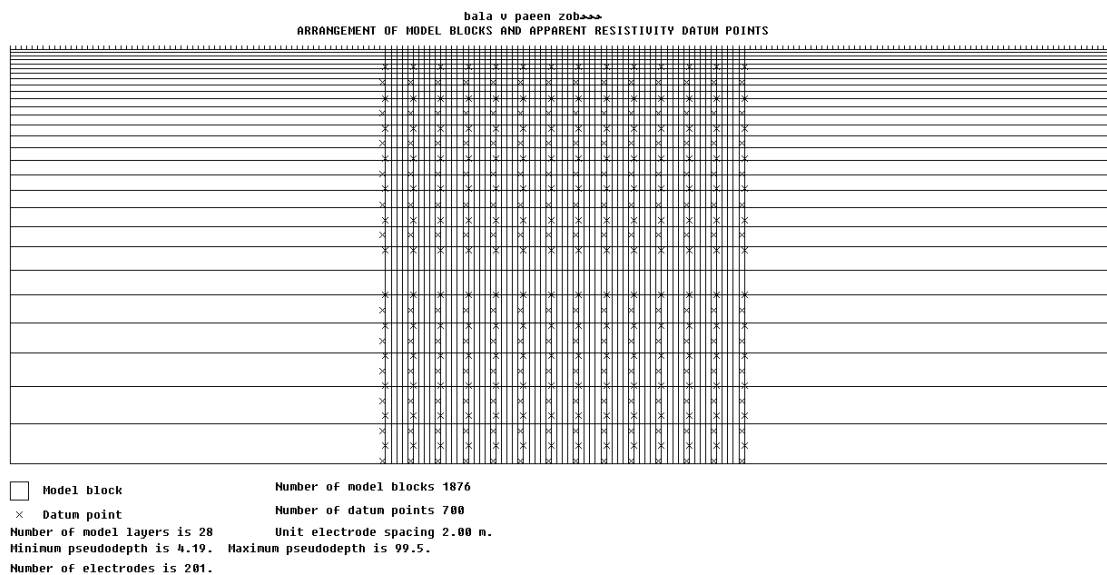
پس از قرائت داده ها، با انتخاب گزینه نمایش بلوک های مدل^۱، گسترش پیش فرض سلول های مدل نمایش داده می شود (شکل پ-ب-۸) با انتخاب گزینه تغییر ضخامت لایه ها^۲، پنجره ای مانند شکل (پ-ب-۹) باز می شود.

برای شروع می توان مدلی را انتخاب کرد که در آن ضخامت لایه ها با عمق، به صورت ملایم

¹ Display model blocks

² Changing thickness of layers

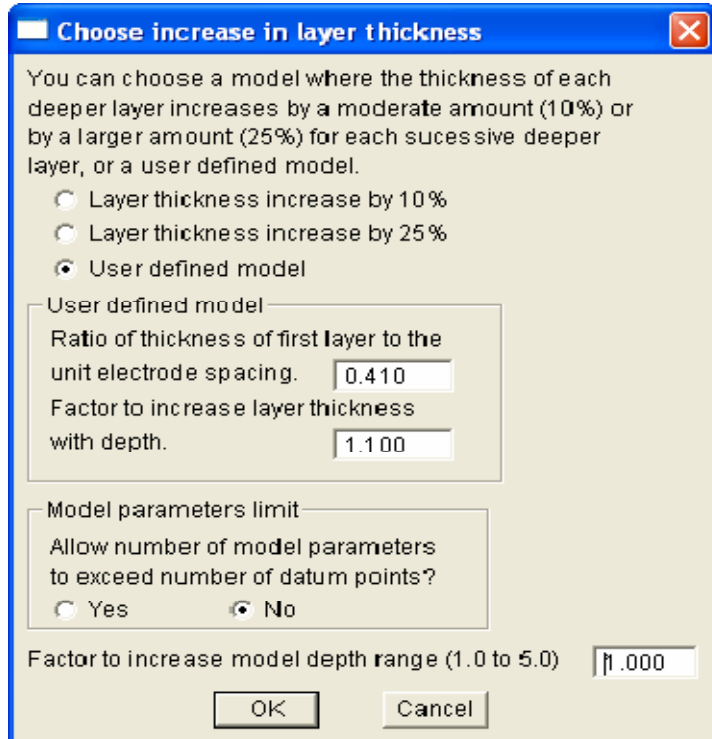
(10 درصد) یا زیاد (۲۵ درصد) تغییر کند. اگر این دو گزینه موثر واقع نشد، می توان از گزینه شکل مدل تعریف شده کاربر^۱ استفاده کرد. در این روش، ابتدا ضخامت لایه اول تعیین می شود (نسبت ضخامت لایه اول به فاصله الکترودی واحد) و سپس ضریبی برای افزایش ضخامت لایه های بعدی با عمق به نرم افزار داده می شود. همچنین می توان از مدلی استفاده کرد که تعداد بلوک های آن بسیار بیشتر از تعداد داده ها باشد (شکل پ-ب-۱۰). این روش بویژه هنگامی مفید است که با داده هایی فشرده در عمق های زیاد مواجه باشیم. در این حالت نرم افزار لایه های مدل را طوری تعیین می کند تا به حداکثر شبه عمق نقاط داده ای برسد. حتی اگر اعماق بیشتری نیز مد نظر باشد، می توان از گزینه ضریب افزایش محدوده عمق مدل^۲ استفاده کرد، که عددی بین ۱ تا ۵ است. برای مثال، اگر از ضریب ۱.۲ استفاده شود، برنامه لایه ها را تا عمقی اضافه می کند که 25 درصد بزرگتر از حداکثر شبه عمق داده های خام باشد [Loke, 2004a].



شکل پ-ب-۸- روش پیش فرض شبکه بندی در نرم افزار

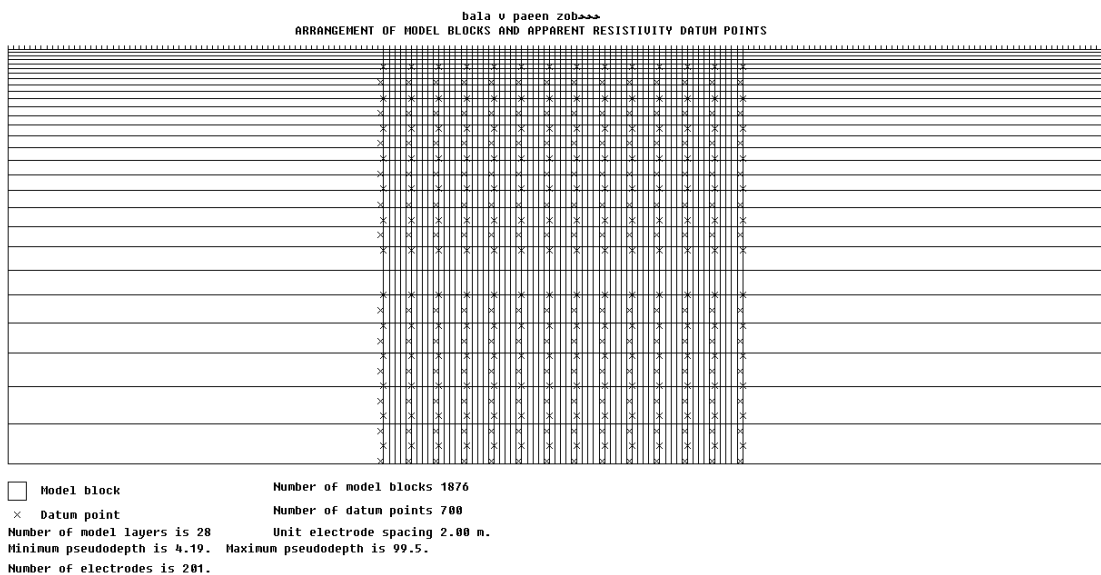
¹ User defined model

² Factor to increase model depth points



شکل پ-ب-۹- پنجره تغییر شکل سلول های مدل [Loke, 2004a]

در گزینه تعدیل عمق به لایه ها، می توان عمق هر لایه را به صورت دستی به نرم افزار داد. این روش به ویژه هنگامی مناسب است که بخواهیم یک مرز لایه را دقیقاً منطبق بر یک مرز لایه از پیش مشخص (مانند کنتاکت زمین شناسی یا کنتاکت های حاصل از روش های لرزه ای) کنیم.



شکل پ-ب-۱۰- وقتی تعداد بلوک ها مدل بیشتر از نقاط داده باشد

در گزینه استفاده از مدل تعمیم یافته^۱، می توان شبکه بندی را از چپ و راست به نقاطی تعمیم داد که فاقد داده می باشند. نرم افزار به صورت پیش فرض سعی می کند گسترش بلوک های مدل را طوری تعیین کند که در ناحیه ای با بیشترین اطلاعات قرار گیرند. با استفاده از گزینه استفاده از مدل تعمیم یافته، می توان از مدلی استفاده کرد که در آن بلوک ها تا لبه های خط کاوش امتداد یافته اند (شکل ۷-۱۱) استفاده از این روش در آرایش هایی نظیر دوقطبی -دوقطبی، قطبی -دوقطبی و قطبی -قطبی که حساسیت های بالایی را در گوشه ها نشان می دهند مناسب است. استفاده از این گزینه در آرایش های ونر و ونر- شلومبرژر مناسب نیست [Loke, 2004a].

وقتی تعداد پارامترهای مدل افزایش می یابد، زمان لازم برای وارون سازی نیز افزایش می یابد. در وارون سازی داده های حجیم این نکته اهمیت بسیاری دارد. در این موارد، استفاده از گزینه اطمینان از یکسان بودن پهنای سلول های مدل توصیه می شود. در این روش، مدل مبنایی شبیه شکل (پ-ب-۱۰) انتخاب می شود، ولی سعی می شود سلول ها در لبه ها ضخیم تر نشوند.

با استفاده از گزینه کاهش اثر بلوک های مجاور^۲، می توان مقادیر ماتریس ژاکوبین را برای سلول های واقع در گوشه ها و زیر مدل مدل تحت تاثیر قرار داد. به طور عادی، برای سلولی که در لبه واقع است، اثر تمام المان های شبکه روی لبه شبکه جمع می شود. به این دلیل، سلول های لبه مدل، وزن بیشتری نسبت به سلول های درونی پیدا می کنند. در برخی موارد، به ویژه وقتی از روش وارون سازی بلوکی استفاده می شود، این روش باعث ایجاد مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی غیرعادی (بزرگ یا کوچک) در گوشه ها می شود. با استفاده از گزینه کاهش اثر بلوک های^۳ مجاور، می توان این اثر را خنثی کرد [Loke, 2004a].

در سیستم های اندازه گیری متحرک نظیر اهم متر، فاصله بین نقاط داده ای بسیار کوچک تر از

¹ Use extended model

² Reduce effect of side blocks

³ Reduce effect of side block

فاصله الکترودی واحد است. چنین سیستم‌هایی معمولاً چندین هزار نقطه داده تولید می‌کنند که در مدل سازی آنها نیاز به در نظر گرفتن چندین هزار مکان الکترودی است. در چنین شرایطی می‌توان پهنای سلول‌ها را تا ۷ برابر فاصله الکترودی واحد بزرگتر کرد. با این کار اثرات اعوجاجی^۱ موجود در چنین داده‌هایی کاهش می‌یابد. این روش در وارون سازی دوبعدی داده‌های حاصل از برداشت‌های سونداژی نیز مناسب است [Loke, 2004a].

پ-ب-۲-۳- آنالیز حساسیت

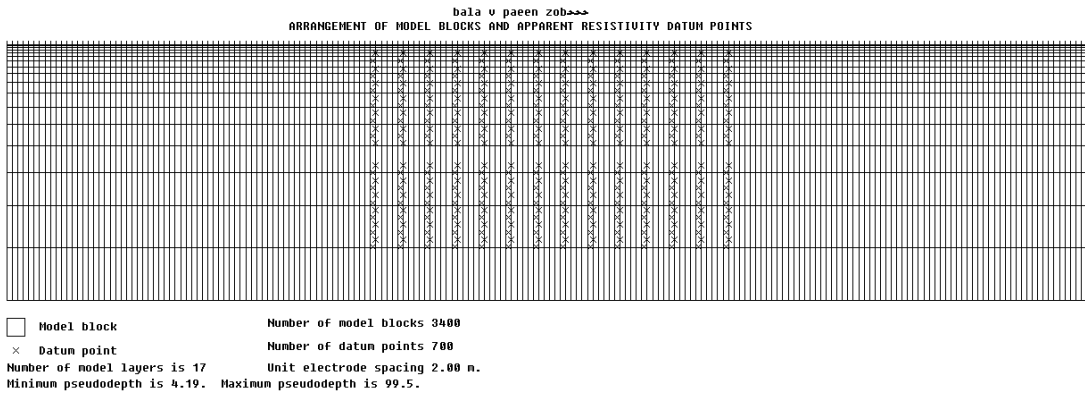
با استفاده از اختیاراتی که نرم افزار Res2dinv به کاربر می‌دهد، می‌توان مقادیر حساسیت مدل ماتریس ژاکوبین را کنترل کرد. گزینه نمایش بلوک‌های حساسیت مدل^۲، جمع مقادیر مطلق حساسیت مربوط به سلول‌های مدل را نمایش می‌دهد. نمونه‌ای از این مقاطع حساسیت در پ-ب-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در گوشه‌ها و زیر مدل، مقادیر حساسیت بالاتر رفته‌اند که این به دلیل بزرگتر شدن سلول‌های مدل در این مکان‌هاست. برای اجتناب از این اثر (بخصوص در آرایش‌های دوقطبی- دوقطبی)، می‌توان از گزینه نمایش حساسیت زیرسطحی^۳ استفاده کرد. در این حالت، تمام مدل، به سلول‌هایی با ابعاد مساوی تقسیم می‌شود (شکل پ-ب-۱۳). استفاده از این گزینه یک دید مفید از نواحی زیرسطحی اسکن شده بدست می‌دهد. تا اینجا، تمام روش‌های تقسیم زیرسطح به سلول‌ها، بر مبنای الگوریتم‌های سعی و خطا بودند. بلوک‌های مدل را می‌توان بر مبنای یک سری آنالیزهای حساسیت دقیق‌تر نیز طراحی کرد. گزینه تولید بلوک مدل^۴ این امکان را فراهم می‌کند. با این روش می‌توان اطمینان حاصل کرد که حساسیت برخی سلول‌ها هرگز خیلی کوچک نمی‌شود [Loke, 2004a].

¹ Ripple effects

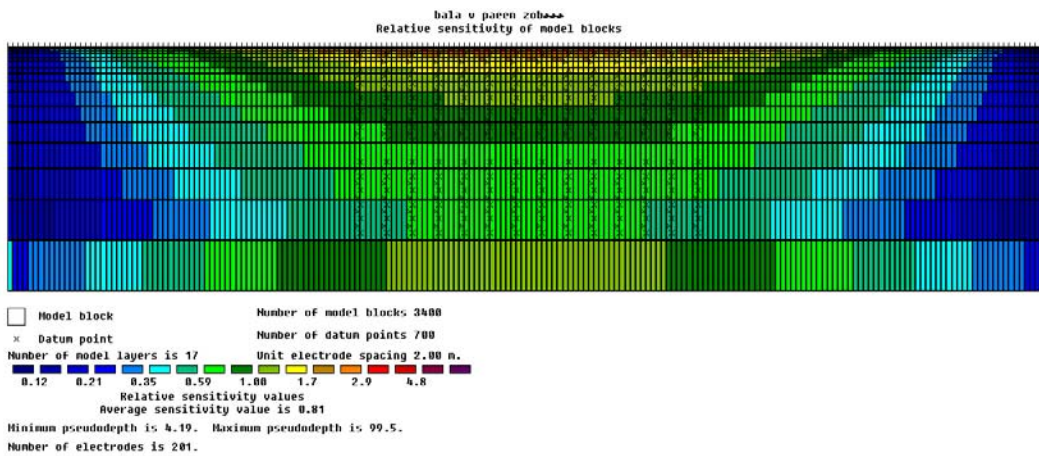
² Display model block sensitivity

³ Display subsurface sensitivity

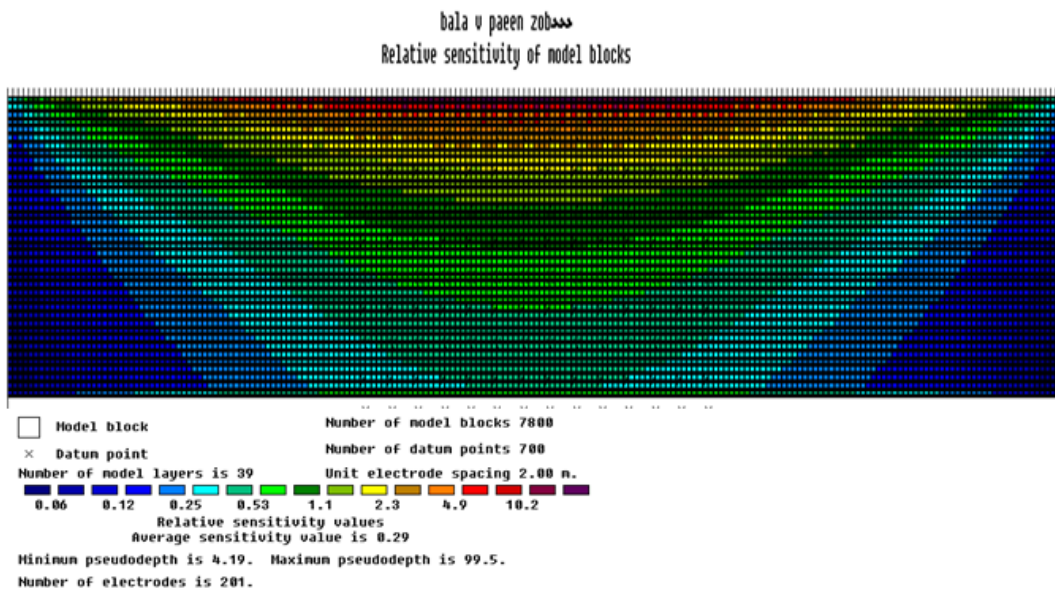
⁴ Generate model block



شکل پ-ب-۱۱- مدلی که در آن بلوکها تا لبه های خط کاوش امتداد یافته اند.

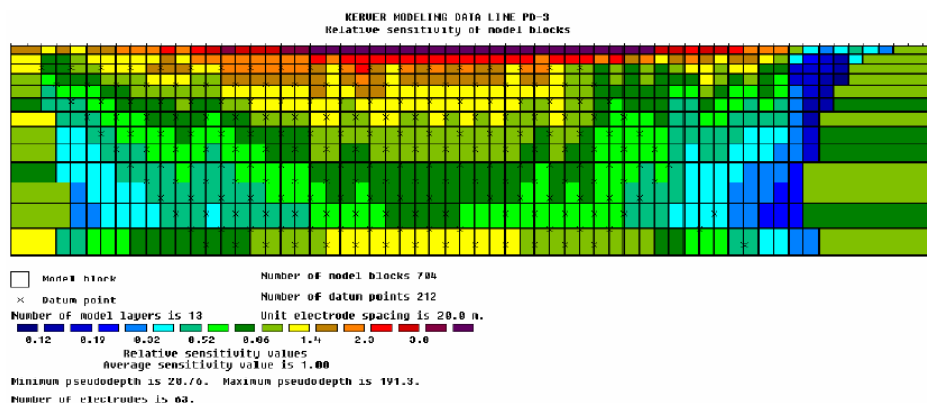


شکل پ-ب-۱۲- مقادیر حساسیت محاسبه شده، با فرض همگن و همسانگرد بودن زمین

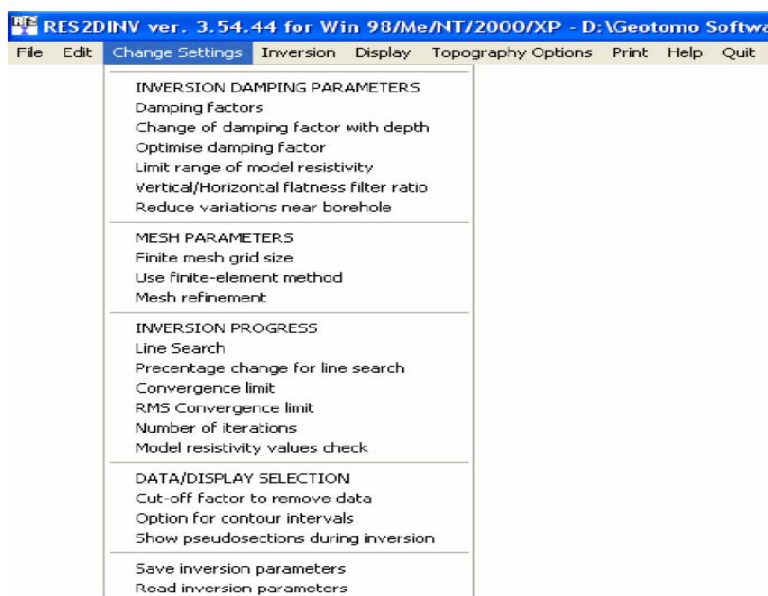


پ-ب-۱۳- مقادیر حساسیت محاسبه شده مانند شکل (پ-ب-۱۲)، با این تفاوت که در اینجا تمام مدل، به

سلول هایی با ابعاد مساوی تقسیم شده است



پ-ب-۱۴- تولید بلوک های مدل بر مبنای آنالیز حساسیت



شکل پ-ب-۱۵ منوی تغییر تنظیمات و گزینه های موجود در آن [Loke, 2004a]

در ادامه به پارامترهای مربوط به منوی تغییر تنظیمات^۱ نرم افزار پرداخته می شود. این منو

شامل قسمت هایی است که در شکل (پ-ب-۱۵) نشان داده شده است.

^۱ Change setting

پ-ب-۲-۴- پارامترهای میرایی وارون سازی

گزینه های این قسمت، مربوط به تنظیم ضریب میرایی (λ) در معادلات کمترین مربعات است. نرم افزار به طور پیش فرض از مقدار 0.16، به عنوان ضریب میرایی اولیه در اولین تکرار استفاده می کند. برای اجتناب از ناپایداری حاصل از مقادیر کوچک λ ، حداقل مقدار ضریب میرایی برابر با 0.015 در نظر گرفته می شود [Loke, 2004a].

در گزینه ضرایب میرایی^۱، می توان ضریب میرایی اولیه و مقدار مینیمم آنرا تغییر داد. در شرایطی که داده ها حاوی نویز زیادی باشند، و یا در مواقعی که با مقادیر خیلی کم یا خیلی زیاد مقاومت ویژه الکتریکی مواجه باشیم، می توان ضریب میرایی را تا جایی که پایداری مساله وارون اجازه می دهد افزایش دهیم (شکل پ-ب-۱۶).

از آنجا که رزولوشن مدل با عمق کاهش می یابد، ضریب میرایی باید با عمق افزایش داده شود. پارامترهای مربوط به این تنظیم را می توان در شکل (پ-ب-۱۷) تغییر داد. فرض ضریب میرایی را از هر لایه به لایه عمیق تر به میزان 5 درصد افزایش می دهد. این مقدار را می توان در پنجره حاصل از انتخاب گزینه تغییر ضریب میرایی با عمق^۲ تغییر داد هر چه اغتشاشات مقاومت ویژه الکتریکی در قسمت های عمیق مقطع بالاتر باشد، باید ضریب میرایی را بیشتر افزایش داد. استفاده از محاسبه خودکار ضریب میرایی نیز در مواقعی مناسب است که شبکه بندی بسیار ریزتر از گسترش نقاط داده های باشد.

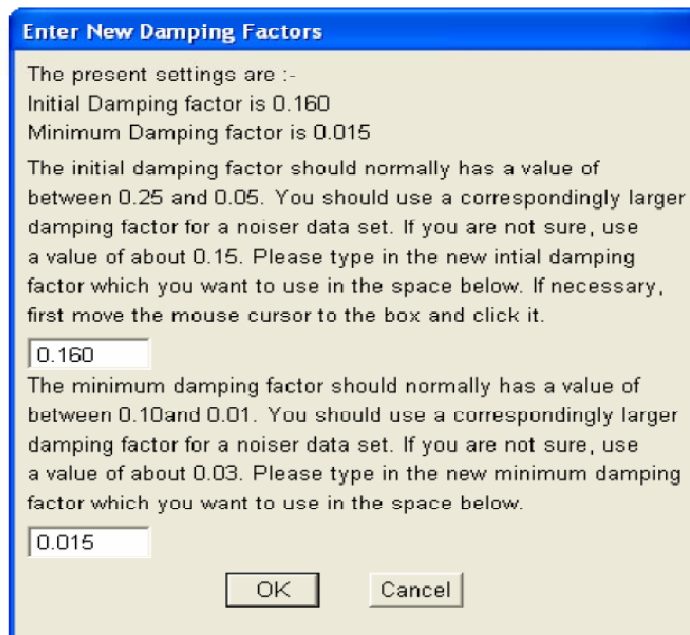
در گزینه بهینه سازی ضریب میرایی^۳، بهینه ترین مقدار را می توان تعیین کرد. در واقع در معادله های مربوط به روش بلوکی و یا هموار مقید و ...، λ در هر تکرار طوری تعیین می شود که کمترین مقدار خطای RMS، در حل معادلات مربوط به روش حداقل مربعات بدست آید. با این کار،

¹ Damping factors

² Change of damping factor with depth

³ Optimize damping factor

تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی مساله ی وارون به طرز چشم گیری کاهش می یابد. در عوض زمان لازم برای وارون سازی در هر تکرار افزایش می یابد. برای داده های کم حجم تا متوسط، این روش زمان کلی وارون سازی را تا حدودی کاهش می دهد. برای داده های بیش از هزار نقطه، زمان لازم برای هر تکرار به شدت افزایش می یابد. باید توجه داشت. که همیشه کمترین میزان خطای RMS، بهترین مدل ممکن را بدست نمی دهد، بویژه در مواقعی که نویز زیادی وارد اندازه گیری ها شده باشد. بنابراین گرچه نرم افزار قابلیت آن را دارد که تا تکرارهای بدون نامحدودی وارون سازی را ادامه دهد، ولی سعی می شود وارون سازی تاجایی که خطای RMS بدون تغییر می ماند ادامه یابد. این اتفاق معمولاً بین تکرارهای سوم تا پنجم رخ می دهد [Loke, 2004a].

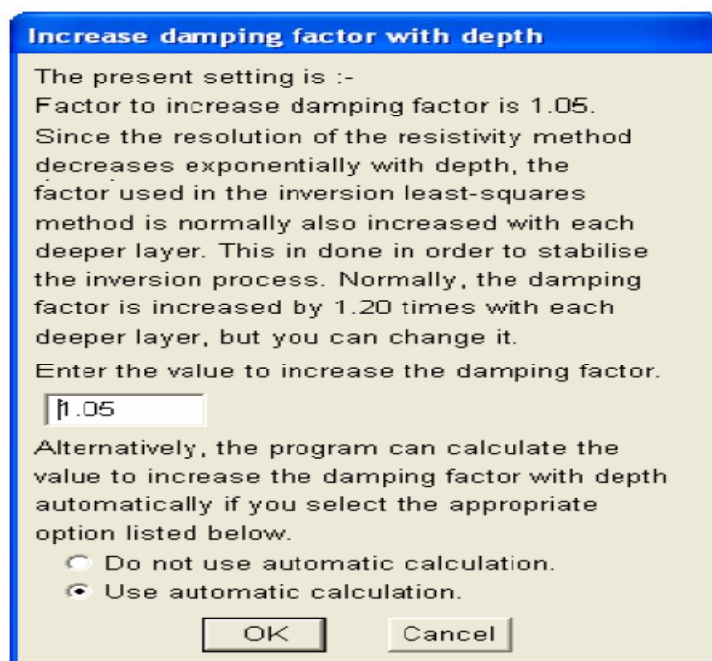


پ-ب-۱۶- پنجره ضرایب میرایی. نرم افزار به طور پیش فرض مقدار ۰.۱۶ و ۰.۰۱۵ را به ترتیب به ضریب میرایی

اولیه و ضریب میرایی مینیمم نسبت می دهد. این مقادیر را می توان در این پنجره تغییر داد [Loke, 2004a].

گاهی اوقات مدل های حاصل از وارون سازی، مقادیر غیرعادی بالا یا پایین از مقاومت ویژه الکتریکی را نشان می دهند. برای غلبه بر چنین مشکلی، می توان از گزینه محدودسازی مقادیر

مقاومت ویژه الکتریکی مدل^۱ استفاده کرد. در حالت پیش فرض محدودیتی وجود ندارد. برای محدودسازی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مدل باید ضریب حد بالایی و پایینی آن را تعریف کرد. مثلاً ضریب حد بالایی ۵۰ به این مفهوم است که حداکثر تغییر مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مدل در طی هر تکرار، ۵۰ برابر متوسط مقاومت ویژه الکتریکی تکرار قبلی است. ضریب حد پایینی ۰.۰۲ هم به این مفهوم است که مقدار حداقل تغییر مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مدل در طی هر تکرار، ۰.۰۲ برابر متوسط مقاومت ویژه الکتریکی تکرار قبلی است. همچنین این امکان وجود دارد تا تنها از مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی تکرار اول به عنوان مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مینا استفاده کرد [Loke, 2004a].



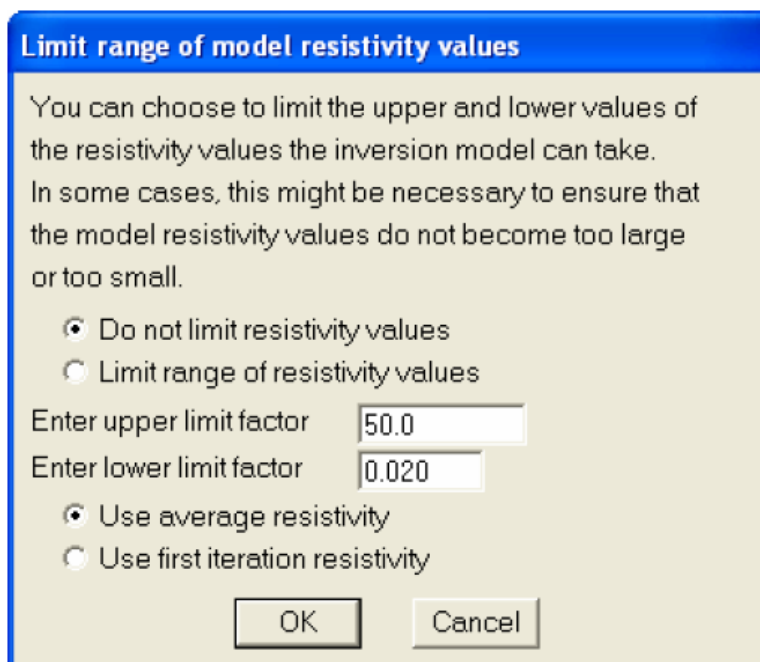
شکل ۷-۱۷. پنجره تغییر ضریب میرایی با عمق. برای پایدار کردن وارون سازی [Loke, 2004a]

گزینه نسبت ضریب قائم به افقی در فیلتر هموارسازی^۲ این امکان را برای کاربر فراهم می سازد تا روش هموارسازی مقید را متناسب با ساختارهای قائم یا افقی زمین به کاربرد (شکل پ-ب-۱۹).

^۱ Limit range of model resistivity

^۲ Vertical/Horizontal flatness filter ratio

برخی ساختارهای زمین شناختی، جهت یابی افقی از خود نشان می دهند (نظیر سیل ها^۱ و لایه های رسوبی) و برخی جهت یابی قائم (نظیر دایک ها و گسل ها). استفاده از این اطلاعات در فرآیند وارون سازی کمک زیادی به بهینه تر شدن مدل نهایی می کند. برای این کار می توان ضرایب α_x و α_y و طوری را در رابطه (پ-ب-۲) طوری تعیین کرد که هموارسازی متناسب با ساختار زمین صورت گیرد. برای مثال هرچه ساختارهای قائم زمین غالب تر باشند، باید از نسبت $\frac{\alpha_x}{\alpha_y}$ بالاتری استفاده کرد (مثل گسل). در چنین حالتی، وارون سازی در جهت قائم بیشتر صورت می گیرد. لذا احياناً اگر مثلاً گسلی در زیر سطح پنهان باشد، پاسخ الکتریکی اش در مدل سازی مورد هموارسازی کمتری قرار می گیرد و بهتر نمایان می شود. در مطالعاتی که با زمین لایه ای مواجهیم، این مقدار باید کمتر از 1 انتخاب شود (مثلاً ۰.۵). برای مطالعه سطح آب زیرزمینی. در این حالت، وارون سازی در جهت افقی بیشتر صورت می گیرد. بنابراین مرز لایه ها را بهتر می توان تفکیک کرد [Loke, 2004a].



شکل پ-ب-۱۸- پنجره محدودسازی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مدل [Loke, 2004a]

¹ Sills

پ-ب-۲-۵- پارامترهای شبکه بندی

با استفاده از گزینه های این قسمت، می توان شبکه بندی تفاضل متناهی یا المان متناهی در زیر روال پیشرو را کنترل کرد. در گزینه اندازه متناهی گرید شبکه^۱، می توان شبکه بندی را طوری انجام داد که بین هر دو الکتروود مجاور ۲ یا ۴ گره^۲ موجود باشد. با انتخاب ۴ گره بین هر دو الکتروود مجاور، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری دقیق تر محاسبه می شوند (بویژه در مدل سازی مرزهای شارپ^۳)، ولی زمان و حافظه بیشتری برای وارون سازی لازم است. شبکه بندی پیش فرض نرم افزار برای داده های با بیش از ۹۰ الکتروود، دو گره ای است. توجه شود که با این گزینه اندازه شبکه را در راستای افقی می توان بزرگ یا کوچک کرد. برای تغییر اندازه سلول های شبکه در راستای قائم، باید از گزینه پالایش شبکه^۴ استفاده کرد. برای مواقعی که کنتراست مقاومت ویژه الکتریکی بزرگتر از ۲۰ برابر است، بهتر است از سلول های کوچکتری استفاده کرد. با استفاده از گزینه کاربرد روش المان متناهی^۵، می توان روش محاسبه مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری را از روش تفاضل متناهی (روش پیش فرض نرم افزار) به روش المان متناهی تغییر داد. اگر داده ها حاوی توپوگرافی باشند، باید از روش المان متناهی استفاده کرد [Loke, 2004a].

¹ Finite mesh gride size

² gride

³ Sharp bandries

⁴ Mesh refinement

⁵ Finite element

Abstract

The goal of this research is groundwater resources exploration in hard formations, by inverse 2D modeling with resistivity data.

These data are acquired by symmetric pole- dipole array in Kal Ghornoo valley in west Shahrood. This survey carried out near a water well named “Zobahan”. To facilitate comparison between results of the measured data with the subsurface geology of the well environment. Practical researches for identification of geometrical situation of joints and cracks of the place to be studied. Practical researches such as cracks dip and strike determination and rock type thin section studies show that joints and cracks of this valley have a dip more than 80 degrees and a north south strike. Theoretical studies have shown that pole- dipole array is a suitable array for lateral inhomogeneity resistivity. In this research to prove this claim, sensitivity sections of arrays and mathematical models have been used. According to what discussed, geoelectrical measurements carried out by symmetric pole- dipole array and the acquired data have been modeled by Res2Dinv software.

The resulting 2D models, properly show the saturated joints and cracks. The interesting results which concluded from this research, is that lateral inhomogeneities properly could be explored from geoelectrical measurements by symmetric pole- dipole array and modeling of the obtained data by Re2Dinv software.



**Technology University of Shahrood
Faculty of Mine, Petroleum and Geophysics**

**Groundwater Exploration Using 2D Inverse
Modelling of Resistivity Data Acquired From LAR
Formation in West of SHAHROOD**

Ali Rafat Harab

Supervisor(s):

Dr Iraj Pirooz

Advisor(s):

Dr Majid Ansari

March 2011