



گروه ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

اکتشاف آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل سازی معکوس دو بعدی داده‌های

مقاومت ویژه در آهک‌های کرتاسه واقع در شمال شاهرود

دانشجو:

غفار احمدزاده

استاد راهنما:

دکتر ایرج پیروز

استاد مشاور:

دکتر مجید انصاری

دی ماه ۸۹

سنة الفجر

زندگی زیباست

زندگی آتش‌گهی دیرنده یا پرچاست

گر پیروزیشی رقص شعله‌اش در هر کران پیدااست

ورنه، خاموشی است و خاموشی گناه ماست

تقدیم به آنهایی که دوستشان

داریم

## قدر دانس

سپاس خدا را که هیچ تلاش بر نام او آغاز نمی‌گردد و هیچ کوشش بر یاد او به انجام نمی‌رسد. او که نعمت دانستنندوزر و کسب معرفت را به ما ارزاند داشت. لازم مردانم تا مراتب سپاس و قدر دانس خود را نسبت به آقاخان دکتر ایرج پیروز و دکتر مجید انصاری استید دانشگده معدن، نفت و ژئوفیزیک، که در تمام مراحل ایرج پژوهش از راهنمایر هار ارزشمند ایرج بزرگوارانج بهره‌مند بوده‌ام، ابراز دارم. و همچنین از آقاخان دکتر ابولقاسم کامکار روحانر و دکتر فرامرز دولتر ارده‌جانر استید دانشگده معدن، نفت و ژئوفیزیک که زحمات داور ایرج تحقیق بر عصاره ایشان نهاده شد، و نیز به خاطر ارانته نظرات و راهنمایر هار ارزشمند آخانها، تشکر و قدر دانس مر نمایم. همچنین از توجه و همراهی خانواده عزیزم و سرانجام از تمام عزیزانر که ذکر نام یکایک آخانها در ایرج مفصلر ممکن نیست و بر برترید، ایرج امر از ارزش همکار ایشان نمیکاهم، تشکر و قدر دانس مر نمایم.



## چکیده

هدف از انجام این پژوهش، ارائه روش مناسب جهت اکتشاف آب‌های زیرزمینی واقع در درزه‌ها، شکاف‌ها، و حفرات سنگ‌های سخت می‌باشد.

امروزه یکی از مهمترین روش‌ها در اکتشافات هیدروژئولوژیکی، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی بویژه روش‌های ژئوالکتریکی می‌باشد که یکی از زیر مجموعه‌های آن، روش مقاومت ویژه الکتریکی است. این روش در مطالعه ناهمگنی‌های جانبی و قائم خواص الکتریکی زمین و همچنین در اکتشاف آب‌های زیر زمینی کاربرد وسیعی دارد.

با توجه به مدل‌های ریاضی محاسبه شده توسط تلفورد و کلر، آرایش قطبی- دو قطبی نسبت به ناهمگنی‌های جانبی و دایک‌های قائم، در مقایسه با سایر آرایش‌ها پاسخ بهتری را ارائه می‌کند. بنابراین، در این پژوهش، برای اکتشاف آب‌های زیر زمینی در آهک‌های کرتاسه واقع در شمال شاهرود از روش مقاومت ویژه الکتریکی با به‌کارگیری دو آرایش قطبی- دو قطبی متقارن استفاده شده است. اندازه‌گیری- های مقاومت ویژه با این دو آرایش در امتداد یک خط پروفیل انجام شده است که عمود بر امتداد دو گسل موازی می‌باشند. به موازات صفحه یکی از این گسل‌ها، دو چاه آب حفر شده‌اند که در اینجا تحت عنوان چاه‌های آب دوقلو نام‌گذاری شده‌اند. داده‌های حاصله از این اندازه‌گیری‌ها با روش مدل سازی معکوس دو بعدی توسط نرم افزار RES2DINV پردازش شده‌اند. علت انتخاب محل اندازه‌گیری‌های فوق‌الذکر در نزدیکی چاه‌های یاد شده این است که امکان مقایسه نتایج به‌دست آمده از به‌کارگیری روش مدل‌سازی مذکور، با وضعیت زمین شناسی تحت‌الارضی محدوده مورد اندازه‌گیری (عمق سطح آب در آهک‌های کرتاسه)، میسر می‌باشد.

در نهایت مقایسه فوق‌الذکر نشان می‌دهد که مقاطع بدست آمده از مدل‌سازی مذکور، وجود دو گسل را در زیر آبرفت نشان می‌دهد که چاه‌های یاد شده در آهک‌های خرد شده نزدیک به صفحه گسل جنوبی حفر شده‌اند.

کلمات کلیدی: آهک‌های کرتاسه، دو آرایش قطبی- دو قطبی متقارن، مدل‌سازی معکوس دو بعدی، اکتشاف آب.

# فهرست مطالب

شماره صفحه

عنوان

## فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- تعریف مساله و بیان سوال های اصلی تحقیق ..... ۴
- ۳-۱- سابقه و ضرورت انجام تحقیق ..... ۶
- ۴-۱- اهداف پایان نامه ..... ۸
- ۵-۱- روش انجام تحقیق ..... ۹
- ۶-۱- ساختار پایان نامه ..... ۱۰

## فصل دوم: موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین شناسی محدوده چاه های آب دوقلو

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۲
- ۲-۲- موقعیت جغرافیایی محدوده چاه های آب دوقلو ..... ۱۴
- ۳-۲- زمین ریخت شناسی ..... ۱۶
- ۴-۲- زمین شناسی ساختمانی منطقه مورد مطالعه ..... ۱۷
- ۱-۴-۲- چین خوردگی های منطقه مورد مطالعه ..... ۱۸
- ۲-۴-۲- گسل های منطقه مورد مطالعه ..... ۱۸

## فصل سوم: حالات مختلف آب در قشر جامد زمین

- ۱-۳- مقدمه ..... ۲۱
- ۲-۳- حالات مختلف آب های زیرزمینی ..... ۲۱
- ۳-۳- چگونگی تجمع آب در زیر سطح زمین ..... ۲۳

۲۴	۴-۳- خصوصیات سنگ‌شناسی موثر بر آب‌های زیر زمینی .....
۲۴	۴-۳-۱- خلل و فرج و فضاهای خالی .....
۲۴	۴-۳-۲- تخلخل .....
۲۷	۴-۳-۳- ضریب نفوذ پذیری .....
۲۷	۴-۳-۴- قابلیت انتقال آب .....
۲۸	۴-۳-۵- جدایش ویژه .....
۲۸	۴-۳-۶- نگه‌داشت ویژه .....

#### فصل چهارم: اشاره‌ای به اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی

۳۰	۴-۱- مقدمه .....
۳۱	۴-۲- مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها .....
۳۴	۴-۳- مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مواد زمین .....
۳۷	۴-۴- روش‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه زمین .....
۳۸	۴-۵- نکاتی در رابطه با روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی .....
۴۰	۴-۶- آرایش‌های الکترودی .....
۴۳	۴-۷- تعریف دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن .....
۴۶	۴-۸- تغییرات چگالی جریان و مقاومت ویژه ظاهری در نزدیکی مرز جدایش دو محیط .....
۵۳	۴-۹- استفاده از مدل‌های ریاضی به منظور تعیین بهترین آرایش الکترودی برای اکتشاف محل ناهمگنی‌های جانبی .....

#### فصل پنجم: روش به تصویر کشیدن دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

۵۹	۵-۱- مقدمه .....
۶۱	۵-۲- نحوه برداشت‌های صحرائی در روش به تصویر کشیدن .....
۶۴	۵-۳- نحوه تهیه شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی .....
۶۴	۵-۴- انتخاب آرایش‌های مختلف در روش به تصویر کشیدن .....

۵-۵- دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در روش به تصویر کشیدن ..... ۶۷

### فصل ششم: نحوه اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده چاه‌های آب دوقلو

۶-۱- مقدمه ..... ۷۰

۶-۲- روش پروفیل زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی-دوقطبی ..... ۷۱

۶-۳- روش سونداژ زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی-دوقطبی ..... ۷۲

۴-۴- ترکیب دو روش سونداژ زنی الکتریکی و پروفیل زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی-دوقطبی ..... ۷۳

۶-۵- ماتریس مقاومت ویژه الکتریکی میانگین، حاصله از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن ..... ۷۴

۶-۶- نحوه اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده چاه‌های آب دوقلو با دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن

..... ۷۵

۶-۷- مختصری در مورد دستگاه مورد استفاده در برداشت صحرایی چاه‌های آب دوقلو ..... ۷۸

### فصل هفتم: مدل سازی معکوس دوبعدی، و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه

۷-۱- مقدمه ..... ۸۱

۷-۲- پردازش داده‌های حاصله از اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در مجاورت چاه‌های آب دوقلو ..... ۸۳

۷-۳- تفسیر داده‌های حاصله از اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در مجاورت چاه‌های آب دوقلو ..... ۸۸

فصل هشتم ..... ۹۸

نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۹۸

فهرست منابع ..... ۱۰۳

پیوست ..... ۱۰۸

## فهرست اشکال

شماره صفحه

عنوان

- شکل (۱-۲) راه‌های اصلی دسترسی به منطقه مورد مطالعه (دایره سیاه رنگ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد)..... ۱۳
- شکل (۲-۲) تصویر ماهواره ای شهرستان شاهرود. علامت زرد رنگ محل مورد مطالعه را نشان می‌دهد..... ۱۵
- شکل (۳-۲) تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه که موقعیت چاه‌های دوقلو و دره پایین دست نشان داده شده است .... ۱۵
- شکل (۴-۲) : قسمتی از نقشه زمین شناسی شاهرود که محدوده چاه‌های دوقلو در آن با دایره مشخص شده است ..... ۱۹
- شکل (۱-۳): آرایش دانه‌ها و درصد تخلخل الف) آرایش کوبیک، ب) آرایش رومبوئیدری ..... ۲۶
- شکل (۲-۳) تاثیر تبلور مجدد بر میزان تخلخل ..... ۲۶
- شکل (۱-۴) وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی به دما و شوری ..... ۳۲
- شکل (۲-۴) وابستگی مقاومت ویژه به دما در سنگ و خاک یخ زده..... ۳۴
- شکل (۳-۴) حد تقریبی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بعضی سنگ‌ها و رسوبات معمولی ..... ۳۶
- شکل (۴-۴): آرایش چهار الکترودی کلی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه..... ۳۷
- شکل (۵-۴): آرایش‌های الکترودی مهم در برداشت‌های صحرایی ..... ۴۰
- شکل (۶-۴) الف): آرایش قطبی - دوقطبی مستقیم، ب): آرایش قطبی - دوقطبی معکوس، ج): دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن ..... ۴۴
- شکل (۷-۴) A): آرایش قطبی - دوقطبی مستقیم و B): آرایش قطبی - دوقطبی معکوس، به کار گرفته شده توسط لوک برای پردازش نرم‌افزار RES2DINV ..... ۴۵
- شکل (۸-۴): انحراف خطوط جریان الکتریکی خارج شده از یک منبع جریان نقطه‌ای C در نزدیکی مرز دو محیط با مقاومت ویژه‌های متفاوت..... ۴۶
- شکل (۹-۴): تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای حالتی که یک آرایش قطبی - دوقطبی از روی یک گسل قائم عبور می‌کند. امتداد خط اندازه‌گیری بر امتداد صفحه گسل عمود می‌باشد ( $P2 > P1$ ) ..... ۴۸
- شکل (۱۰-۴): پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده بر روی یک گسل قائم با استفاده از آرایش‌های الکترودی مختلف. (A): ونر، (B): شلومبرگر، (C): دو قطبی دو قطبی، (D): آرایش دو الکترودی (با C1 ثابت و P1 متحرک). ..... ۴۹

شکل (۴-۱۱): جابجایی آرایش ونر از روی مدل یک گسل قائم و تغییرات منحنی مقاومت ویژه ظاهری حاصله برای ضرایب بازتاب مختلف (برای  $K = -0.1$  تا  $K = -0.9$ )..... ۵۰

شکل (۴-۱۲): بررسی تغییرات منحنی مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به آرایش‌های مختلف الکترودی بر روی یک دایک نازک. (A): آرایش دوقطبی-دوقطبی، (B): آرایش قطبی- دو قطبی، (C): آرایش ونر، (D): آرایش نیم ونر ..... ۵۲

شکل (۴-۱۳): مدل مربوط به یک دایک مقاوم ضخیم و نمودارهای حاصله از به‌کارگیری دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن بر روی این دایک ..... ۵۶

شکل (۴-۱۴) مدل مربوط به یک رگه قائم هادی ضخیم و نمودارهای حاصله از بکارگیری آرایش قطبی- دوقطبی متقارن بر روی این رگه ..... ۵۷

شکل (۵-۱): (A): مدل یک بعدی، (B): مدل دو بعدی و (C): مدل سه بعدی ..... ۶۰

شکل (۵-۲): نحوه برداشت با آرایش ونر با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته در روش به تصویر کشیدن. .... ۶۱

شکل (۵-۳) مقایسه شبه مقاطع در آرایش‌های ونر و ونر-شلومبرگر ..... ۶۳

شکل (۵-۴): مقایسه آرایش‌های قطبی- دوقطبی و ونر- شلومبرگر و فاکتورهای هندسی هر یک از آن‌ها ..... ۶۶

شکل (۵-۵) (A): دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در روش به تصویر کشیدن، (B): طریقه گسترش الکترودها ..... ۶۸

شکل (۶-۱) پروفیل‌زنی الکتریکی با آرایش قطبی-دوقطبی. .... ۷۱

شکل (۶-۲) سوندازنی الکتریکی با آرایش قطبی-دوقطبی. .... ۷۲

شکل (۶-۴): نحوه قرارگیری داده‌ها در زیر ایستگاه‌ها، برای وقتی که داده‌های اندازه‌گیری شده به وسط الکترودهای پتانسیل، نسبت داده شوند ..... ۷۶

شکل (۶-۵): نحوه قرار گیری داده‌ها در زیر ایستگاه‌ها، برای وقتی که داده‌های اندازه‌گیری شده به وسط فاصله بین الکتروود جریان و الکتروود پتانسیل دورتر، نسبت داده شوند ..... ۷۷

شکل (۶-۶): دستگاه SAS 300، ساخت شرکت سوئدی ABEM ..... ۷۸

شکل (۶-۷) دستگاه SAS 300 و جعبه کلید انتخاب کننده الکتروود به صورت دستی ..... ۷۹

شکل (۷-۱): تأثیر اندازه سلول‌ها بر مدل. (A): مدلی که پهنای سلول‌های آن به اندازه واحد الکتروودی می‌باشد، (B): مدلی با پهنای سلولی برابر با نصف فاصله الکتروودی ..... ۸۴

شکل (۷-۲): محدود کردن حدود تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی مدل ..... ۸۵

شکل (۷-۳): مقاطع حساسیت آرایش قطبی- دو قطبی برای (A) N=1 (B) N=2 (C) N=4 (D) N=6 ..... ۸۷

شکل (۷-۴): (A)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده، حاصله از داده‌های خام صحرایی می باشد. (B) شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده‌های خام صحرایی می‌باشد (C): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده‌ها با نرم افزار RES2DINV به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو (داده‌ها به روش پروفیل‌زنی به نرم‌افزار داده شده‌اند). ..... ۸۸

شکل (۷-۵): (A)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده، حاصله از داده‌های خام صحرایی می باشد. (B) شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده‌های خام صحرایی می‌باشد (C): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده‌ها با نرم افزار RES2DINV به طریقه ارائه شده توسط لوک. ..... ۹۱

شکل (۷-۶): (A)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده، حاصله از داده‌های خام صحرایی می باشد. (B) شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده‌های خام صحرایی می‌باشد (C): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده‌ها با نرم افزار RES2DINV به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو (داده‌ها به روش پروفیل‌زنی به نرم‌افزار داده شده‌اند). ..... ۹۱

شکل (۷-۷): (A): تصویر ماهواره‌های منطقه مورد مطالعه، امتداد گسل‌ها توسط خط‌چین و امتداد خط پروفیل توسط خط سفید رنگ نشان داده شده‌اند. (B): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده‌ها با نرم افزار RES2DINV (به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو). ..... ۹۲

شکل (۷-۸): آیین گسل سمت راستی دره که در طرف راست افراد دیده می‌شود. .... ۹۴

شکل (۷-۹): (A): تصویر ماهواره‌های منطقه مورد مطالعه، بر روی این شکل امتداد گسل‌ها توسط خط‌چین و امتداد خط پروفیل توسط خط سفید رنگ نشان داده شده‌اند. (B): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده‌ها با نرم افزار RES2DINV (به طریقه ارائه شده توسط لوک) ..... ۹۵

شکل (۷-۱۰): مقطع مدل‌سازی دو بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده چاه‌های آب دوقلو ..... ۹۷



## فهرست جداول

شماره صفحه

عنوان

۲۵.....	جدول (۱-۳): تخلخل کل و موثر برخی از محیطها.....
۲۸.....	جدول (۲-۳) جدایش ویژه محیطهای آبخانه‌ای.....
۳۵.....	جدول (۱-۴) محدوده مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی برای مواد مختلف.....
۴۴.....	جدول (۲-۴): روابط مقاومت ویژه ظاهری برای آرایش‌های الکترودی مختلف.....
۴۲.....	جدول (۳-۴): مقایسه آرایش‌های الکترودی ونر، شلومبرگر و دوقطبی- دوقطبی.....
۶۶.....	جدول (۱-۵): مقایسه عمق نفوذ آرایش‌های مختلف.....

## لیست علائم ، اختصارات و اصطلاحات

<b>a:</b>	فاصله الکترودی در آرایش ونر
<b>A ,B ,C<sub>1</sub> ,C<sub>2</sub>:</b>	الکترودهای جریان
<b>AB, C, C<sub>v</sub>:</b>	فاصله بین الکترودهای جریان
<b>I:</b>	شدت جریان الکتریکی
<b>J:</b>	چگالی جریان
<b>i, j:</b>	شمارش اعداد
<b>k:</b>	ضریب انعکاس فصل مشترک دو محیط
<b>K:</b>	فاکتور هندسی
<b>M ,N ,P<sub>1</sub> , P<sub>2</sub>:</b>	الکترودهای پتانسیل
<b>MN, P, P<sub>v</sub>:</b>	فاصله بین الکترودهای پتانسیل
<b>R:</b>	مقاومت بین دو سطح هم پتانسیل
<b>δV:</b>	اختلاف پتانسیل الکتریکی
<b>ρ:</b>	مقاومت ویژه الکتریکی
<b>ρ<sub>a</sub>:</b>	مقاومت ویژه ظاهری
<b>VES:</b>	سونداژ قائم الکتریکی

# فصل اول

## کلیات

## ۱-۱- مقدمه

ژئوفیزیک از ترکیب دو واژه ژئو به معنی زمین و فیزیک تشکیل یافته و معنی آن فیزیک زمین می باشد. با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی می‌توان، خواص فیزیکی لایه‌های زیرین را در سطح زمین اندازه‌گیری کرد و توسط داده‌های حاصله جنس موادی را که معمولاً در دسترس نمی‌باشند، مشخص نمود. با استفاده از ژئوفیزیک موفق شده‌اند که ساختار داخلی زمین را مشخص سازند. روش‌های ژئوفیزیکی همچنین می‌توانند در حل مسائل مربوط به محیط زندگی ما از جمله مسائل عمرانی، معدنی، هیدروژئولوژی، تخمین خطرات طبیعی و غیره مورد استفاده قرار گیرند. اساساً همه اطلاعاتی را که از روش‌های ژئوفیزیکی سطحی به دست می‌آیند می‌توان از حفاری و نمونه برداری نیز به دست آورد ولی حفاری پرهزینه و کند می‌باشد.

اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی را می‌توان با توجه به اهداف موردنظر، هم از طریق هواپردی و هم از روی سطح زمین و هم در چاه‌ها، انجام داد. برای به دست آوردن نتایج قابل قبول از به کارگیری یک روش ژئوفیزیکی، باید در خواص فیزیکی مواد مورد اندازه‌گیری، به‌طور جانبی و یا قائم تباین وجود داشته باشد.

از آنجا که هدف در مطالعه حاضر، اکتشاف آب‌های موجود در گسل‌ها، درزه‌ها، شکاف‌ها و حفره‌های ایجاد شده در زمین‌های سخت می‌باشد واز طرفی چون مقاومت ویژه الکتریکی این آب‌ها نسبت به مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌های در برگیرنده آن‌ها بسیار کمتر می‌باشد، لذا تباین جانبی خوبی در خاصیت فیزیکی آب‌ها و سنگ‌های یاد شده وجود دارد. بنابراین در قدم اول از بین گزینه‌های روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، به علت رسانایی بالای آب‌های فوق‌الذکر، در درجه اول، روش‌های ژئوالکتریکی انتخاب می‌شوند. در گام بعدی، از میان این روش‌ها، روش مقاومت ویژه الکتریکی مناسب‌ترین روش برای رسیدن به هدف مذکور، تشخیص داده می‌شود.

لازم به ذکر می‌باشد که اکتشاف آب‌های فوق‌الذکر توسط به‌کارگیری روش الکترومغناطیسی نیز امکان پذیر می‌باشد، ولی به علت وجود کابل‌های برق در منطقه، جهت برق رسانی به پمپ آب چاه‌های مذکور، و در نتیجه بالا بودن نویزهای ایجاد شده توسط آن‌ها، استفاده از این روش با مشکل مواجه می‌شد.

مدل‌های ریاضی نشان می‌دهند که با استفاده از روش ترکیب یافته از سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی، و به‌کارگیری دو آرایش قطبی - دو قطبی متقارن می‌توان بیشترین اطلاعات درباره توزیع مقاومت ویژه الکتریکی به طور جانبی در زیر سطح زمین را به دست آورد. ترکیب یاد شده این امکان را فراهم می‌کند که تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین، هم به طور جانبی و هم به طور عمقی مشخص گردد. این تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی را می‌توان در یک مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی از زمین، نمایش داد. با توجه به تباین زیاد فوق‌الذکر، می‌توان وجود آب‌های مذکور را در این مقاطع به راحتی تشخیص داد. در به‌کارگیری دو آرایش قطبی - دو قطبی متقارن، الکترودهای جریان A و B هر یک، در آرایش مربوطه، الکتروود قطب مثبت جریان هستند، و الکتروود جریان قطب منفی، در فاصله‌ای دور نسبت به آن‌ها قرار دارد. در عمل سعی می‌شود که امتداد خط پروفیل بر امتداد صفحه گسل، درزه و شکاف‌های مذکور عمود انتخاب شود.

این روش، اولین بار توسط کاروس و پرنو [Karous and Pernu, 1985] برای اکتشاف لایه‌های نازک گرافیت که به طور قائم تا نزدیک سطح زمین بالا آمده و توسط یک رو لایه نازک پوشانده شده‌اند، ارائه گردید. لذا در تحقیق حاضر، از همین روش برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در آهک‌های کرتاسه در محدوده چاه‌های آب دوقلو واقع در شمال شاهرود استفاده شده است.

## ۱-۲- تعریف مساله و بیان سوال‌های اصلی تحقیق

با توجه به اینکه کشور ما در مجموع، جزء سرزمین‌های خشک و کم آب محسوب می‌گردد، و با عنایت به اینکه استان‌های زیادی از این کشور در حال حاضر با مشکل کم آبی مواجه می‌باشند و از طرف دیگر گسترش شهرها و ازدیاد جمعیت، باعث شده است که این مشکل روز به روز حادتر شود، لذا برای اینکه در آینده کشور ما با بحران بی‌آبی مواجه نگردد، می‌بایستی از هم اکنون در صدد تأمین منابع آبی جدید برآییم. در اثر عملکرد نیروهای تکتونیکی در سنگ‌های آهکی و دولومیتی، گسل‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های بیشماری ایجاد می‌گردند. آب‌های حاصل از باران و برف، در گسل‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های سنگ‌های مذکور نفوذ می‌کنند و در حین نفوذ، این گونه سنگ‌ها را در خود حل می‌نمایند که از این طریق، مجاری، غارها و کانال‌هایی در زیر سطح زمین به وجود می‌آیند. به این نوع سازندها کارست<sup>۱</sup> گفته می‌شود. تجمع آب‌های یاد شده در این سنگ‌ها، تشکیل منابع آب‌های زیر زمینی در زمین‌های سخت را می‌دهند [White, 1988., Ford, 1989., Milanovic, 1988]. مناطق کارستی بیش از ۱۱ درصد از سطح کشور ما را پوشش می‌دهند [افراسیابیان، ۱۳۷۷] و با عنایت به نقش مؤثر آن‌ها در تأمین آب شرب که با کیفیت بسیار خوبی نیز همراه می‌باشند، مطالعه و تحقیق در این منابع جهت شناخت هر چه بیشتر و بهره‌برداری صحیح از آن‌ها، حائز اهمیت فراوان می‌باشد.

<sup>۱</sup> - Karst

بنابراین با توجه به اینکه بخش‌های وسیعی از کشور ما را زمین‌های آهکی تشکیل می‌دهند، سوال‌های زیر مطرح می‌گردد:

(۱) آیا می‌توان آب‌های زیرزمینی که در درزه‌ها، شکاف‌ها و حفرات سنگ‌های آهکی موجود می‌باشند را اکتشاف نمود؟

(۲) برای اکتشاف آب‌های مذکور، کدامیک از روش‌های ژئوفیزیکی مناسب‌تر می‌باشد و چگونه باید آن را به کار گرفت؟

(۳) نتایج حاصله از برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی فوق‌الذکر تا چه اندازه با شواهد زمین‌شناسی همخوانی دارند؟

(۴) آیا محل چاه‌های حفر شده، بهینه انتخاب شده‌اند؟

### ۱-۳- سابقه و ضرورت انجام تحقیق

به طور کلی در زمینه اکتشاف آب‌های زیر زمینی موجود در درزه‌ها، شکاف‌ها و حفرات سنگ-های آهکی، در مقایسه با اکتشاف آب‌های زیر زمینی موجود در لایه‌های رسوبی دیگر، کمتر کار تحقیقاتی انجام شده است. به عنوان مثال می‌توان به پروژه پژوهشی انجام شده توسط پیروز آپروز، ۱۳۸۲ الف] تحت عنوان به‌کارگیری روش ترکیب یافته از سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی برای اکتشاف منابع آب‌های زیر زمینی در زمین‌های سخت، و همچنین مقاله‌ی ارائه شده تحت عنوان پی‌جویی الکتریکی زون‌های کارستی آبدار در منطقه‌ی اردستان به روش آزیموئال [فتحی م. و همکاران، ۱۳۸۲] اشاره نمود. لذا با توجه به این که آب‌های زیرزمینی موجود در لایه‌های رسوبی در کشور ما، روز به روز در حال کاهش می‌باشند، و به منظور جلوگیری از به وجود آمدن بحران بی‌آبی در این کشور، از هم اکنون می‌باید در صدد تأمین منابع آبی جدید در سنگ‌های آهکی برآییم.

همچنین از بین مقالاتی که با روش مقاومت ویژه الکتریکی، به موضوع مطالعه و اکتشاف آب-های زیر زمینی موجود در درزه‌ها، شکاف‌ها و حفرات پرداخته اند، می‌توان به مقالات زیر اشاره کرد:

✓ مقاله‌ای تحت عنوان ارزیابی پارامترهای هیدروژئولوژیکی در جزیره کارستی دوجی اتوک<sup>۱</sup> واقع در کرواسی.

در این مقاله، هدف استخراج آب شیرین و یا شور در جزیره مذکور می‌باشد. برای اکتشاف، از روش‌های ژئوفیزیکی مانند: مقاومت ویژه الکتریکی و لرزه‌نگاری انکساری سطحی استفاده شده است. برای این منظور از آرایش شلومبرگر برای سونداژزنی الکتریکی، و از آرایش ونر برای تصویر برداری دو بعدی الکتریکی استفاده شده است.



پی‌گیری مطالعات در این مقاله همچنین شامل، نقشه‌برداری زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، مغزه‌های حفاری اکتشافی، اکتشافات هیدروشیمیایی در محل و در آزمایشگاه و نیز پمپاژ آزمایشی می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از تفسیر مقاطع معکوس‌سازی دوبعدی، نواحی کم‌مقاومت ویژه را نشان می‌دهد که ناشی از وجود احتمالی آب در زون‌های خرد شده و درزه‌ها می‌باشد. [Terzic et al., 2007].

✓ مدل ژئوالکتریکی ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی در یک آب‌خوان گرانیتی.

در این مقاله با روش توموگرافی دوبعدی الکتریکی (ERT<sup>1</sup>) با استفاده از آرایش ونر- شلومبرگر، بر روی تپه‌های<sup>2</sup> کوارتزی واقع در حیدرآباد هند، برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی انجام شده است. مقاطع معکوس‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در این مقاله، نشان داده است که تپه‌های کوارتزی موجود در سنگ میزبان گرانیتی، ممکن است دارای پتانسیل خوبی از لحاظ ذخیره آب‌های زیرزمینی باشند. نتیجه مطالعات مقاله مذکور این است که استفاده از روش ژئوفیزیک سطحی به خصوص ERT، ابزار کارآمدی برای ارائه توزیع دقیق مقاومت ویژه الکتریکی برای توصیف مشخصات (درزه‌ها، شکاف‌ها و نواحی هوازده و خردشده آب‌دار) تپه‌های کوارتزی در سنگ میزبان گرانیتی می‌باشد [Chandra et al., 2010].

✓ همچنین می‌توان به مقاله‌ای با عنوان برداشت‌های مقاومت ویژه جامع برای توصیف شکستگی‌ها، به منظور اکتشاف آب در سنگ سخت اشاره کرد. در این مقاله نیز با استفاده از روش مقاومت ویژه الکتریکی، برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در درزه و شکستگی‌های سنگ‌های سخت، اقدام شده است. در این مقاله نشان داده شده است که ترکیب پروفیل‌زنی الکتریکی با آرایش گرادیان، و سونداژنی الکتریکی با آرایش شلومبرگر، تکنیک اولیه سودمندی برای تشخیص وجود شکستگی‌ها، و به دنبال آن اکتشاف آب‌های زیرزمینی در سنگ‌های سخت می‌باشد [Yadav and Kant Singh, 2007].

1 - Electrical Resistivity Tomography

2 -Reef

و همچنین تحقیقاتی زیادی وجود دارند که با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، به مطالعه آبخوان و مدل جریان آب‌های زیرزمینی پرداخته شده است. که می‌توان از بین آن‌ها به موارد زیر اشاره کرد:

[Kelley, 1977; Mazac et al., 1985; Huntley, 1986; Frohlich et al., 1996; Singhal et al. 1998; Niwas and de Lima, 2003; Chand et al., 2004; Singh, 2005; Chandra, 2006 and Chandra et al., 2008].

### ۱-۴- اهداف پایان نامه

هدف در تحقیق حاضر اکتشاف آب در درزه، شکاف و حفرات موجود در سنگ آهک‌های کرتاسه واقع در شمال شاهرود به کمک روش مقاومت ویژه می‌باشد. لذا نخست باید، داده‌های خام مقاومت ویژه الکتریکی پس از اصلاحات لازم، توسط نرم افزارهای مناسب پردازش گردند. سپس مقاطع مدل‌سازی معکوس دوبعدی آن‌ها تهیه و تفسیر شوند. و در ادامه تحقیق شود که آیا با توجه به اطلاعات به دست آمده از دو چاه حفر شده در منطقه مورد اندازه‌گیری، مقاطع تفسیر شده مذکور با واقعیت‌های زمین شناسی زیر سطحی این منطقه هم‌خوانی دارند و یا خیر؟

## ۱-۵- روش انجام تحقیق

- ✓ مطالعه و بررسی وضعیت زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه توسط نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰.
- ✓ اخذ داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده در منطقه مورد مطالعه و انجام تصحیحات مربوطه بر روی آن‌ها.
- ✓ بررسی پژوهش‌های انجام شده توسط پیروز [پیروز، ۱۳۸۲ الف] بر روی داده‌های فوق-الذکر.
- ✓ بررسی نتایج حفاری‌های صورت گرفته توسط اداره آب‌های زیرزمینی شهرستان شاهرود در منطقه یاد شده.
- ✓ پردازش داده‌های مذکور و انجام مدل‌سازی معکوس دوبعدی توسط نرم‌افزار Res2dinv و تهیه مقاطع دو بعدی حاصله و تفسیر آن‌ها.
- ✓ مقایسه مقاطع تفسیر شده با واقعیت‌های زمین‌شناسی و نتایج حفاری‌های انجام شده در منطقه.

## ۱-۶- ساختار پایان نامه

این پایان نامه مشتمل بر ۸ فصل می باشد که:

- ❖ فصل نخست آن با عنوان کلیات که شامل، تعریف مساله و بیان سوال های اصلی تحقیق، سوابق کارهای انجام شده در منطقه، اهداف پایان نامه و روش انجام تحقیق می باشد.
- ❖ فصل دوم توضیح مختصری درباره موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین شناسی محدوده چاه های آب دوقلو می باشد.
- ❖ فصل سوم تحت عنوان حالات مختلف آب در قشر جامد زمین می باشد که به برخی از حالات مختلف آب های زیرزمینی و خصوصیات سنگ شناسی مؤثر بر آنها، اشاره می شود.
- ❖ در فصل چهارم نیز به بعضی از اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی اشاره می شود.
- ❖ در فصل پنجم، درباره روش به تصویر کشیدن دو بعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی، توضیح داده می شود.
- ❖ در فصل ششم به نحوه اندازه گیری داده های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده چاه های آب دوقلو پرداخته می شود.
- ❖ در فصل هفتم، مدل سازی معکوس دوبعدی، و تفسیر داده های مقاومت ویژه الکتریکی توضیح داده می شود.
- ❖ و در نهایت در فصل هشتم، به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات پرداخته شده است.
- ❖ در پیوست این پایان نامه، مختصری راجع به طریقه ساختن فایل داده های ورودی به نرم افزار Res2dinv توضیح داده شده است.

## فصل دوم

موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین شناسی

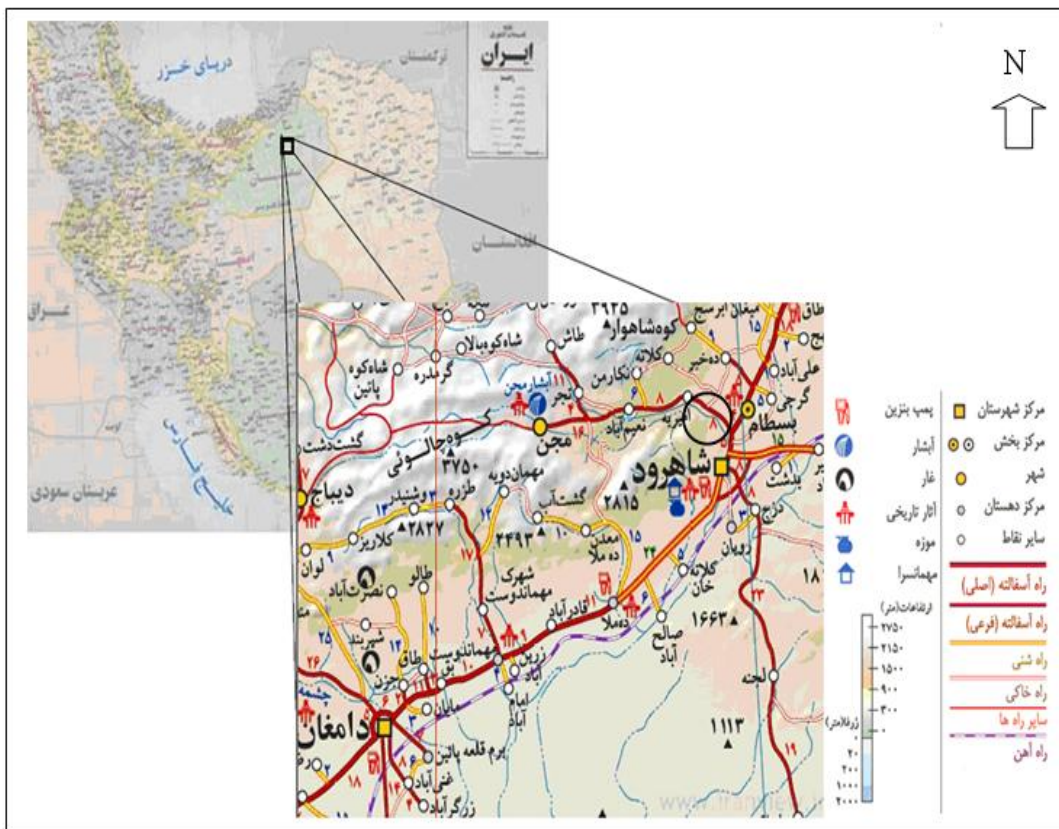
محدوده چاه‌های آب دوقلو

## ۲-۱- مقدمه

نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود بخشی از رویه چهارگوش گرگان با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ است که در محدوده جغرافیائی ۵۵ - ۵۴/۳۰ درجه طول شرقی و ۳۶/۳۰ - ۳۶ درجه عرض شمالی در استان سمنان قرار دارد. بزرگترین شهر منطقه مورد مطالعه، شهرستان شاهرود با وسعت ۵۱۴۱۹ کیلومتر مربع می‌باشد که در واقع بزرگترین شهرستان استان سمنان می‌باشد و دارای ۱۳۶۵ متر ارتفاع از سطح آب‌های آزاد است. شهر بسطام در منتهی الیه شمال شرق نقشه، دومین شهر بزرگ منطقه مورد مطالعه می‌باشد که دارای ارزش و قدمت دیرینه است. قسمت‌های شمالی منطقه مورد مطالعه در زمستان دارای آب و هوای نسبتاً سرد و خشک، در تابستان دارای آب و هوای معتدل می‌باشد؛ اما قسمت‌های جنوبی منطقه دارای آب و هوای نیمه خشک کویری با بارندگی کم و رطوبت اندک است. مقدار بارندگی سالیانه از ۷۲/۸ میلیمتر تا ۱۸۳/۳ میلیمتر است که در برخی از زمان‌ها افزایش قابل توجهی نیز دارد.

مهمترین رودخانه منطقه شاهرود، رودخانه مجن (شاهرود) است که از کانون‌های آبرگیر شاهوار و شاه‌کوه حد فاصل تاش و مجن سرچشمه گرفته و دارای ویژگی‌های رودهای فصلی می‌باشد. این رود پس از دریافت چندین رشته فرعی در ناحیه کوهستانی و پس از مشروب کردن اراضی پشت بسطام به سوی کویر نمک می‌رود [اوزیری، ۱۳۸۰].

با توجه به شکل (۱-۲) راه‌های اصلی منطقه مورد مطالعه، جاده‌های درجه یک (آسفالته) دامغان به شاهرود، شاهرود به بسطام و مجن، می‌باشند. سایر جاده‌های منطقه از نوع جاده‌های درجه دو و درجه سه هستند که مجموعاً دستیابی به رخنمون‌های منطقه را امکان پذیر می‌نمایند. چاه‌های آب دوقلو در شمال غرب شهرستان شاهرود و در جنوب شرق روستای امیریه در سنگ‌های آهکی کوه‌های تپال حفر شده‌اند.



شکل (۱-۲) راه‌های اصلی دسترسی به منطقه مورد مطالعه (دایره سیاه رنگ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد)

[www.iranview.com]

## ۲-۲- موقعیت جغرافیایی محدوده چاه‌های آب دوقلو

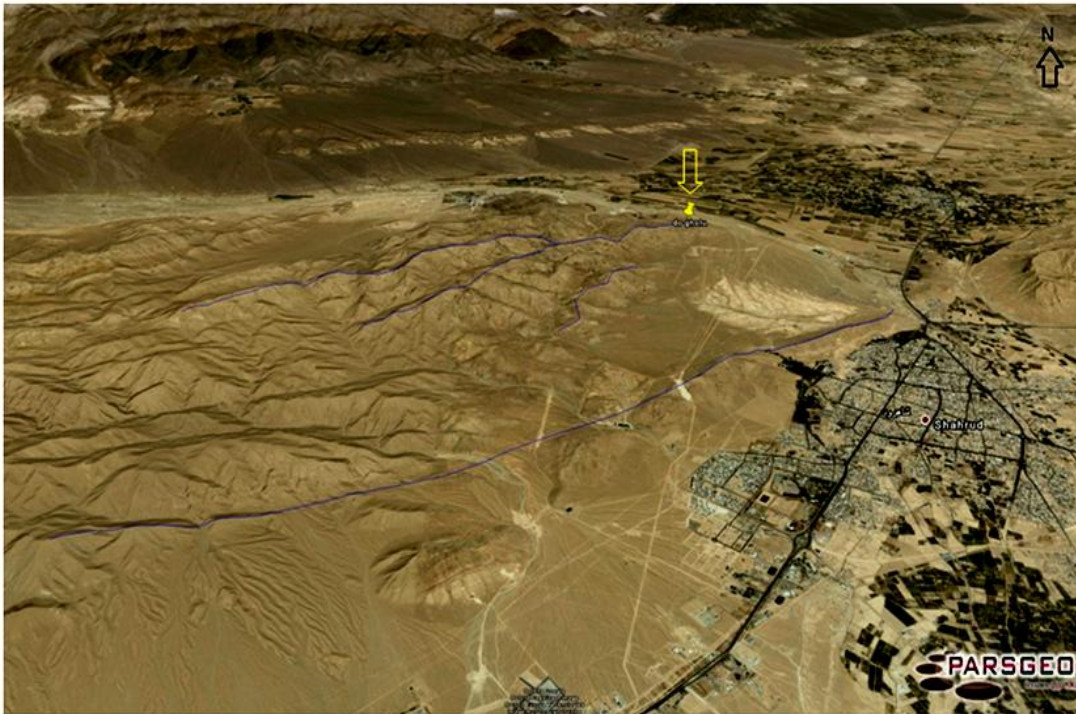
موقعیت جغرافیایی محدوده چاه‌های آب دوقلو به‌طور تقریبی در روی شکل (۱-۲) توسط یک دایره نشان داده شده است. همچنین محل چاه‌های مذکور را می‌توان از تصویرهای گرفته شده توسط نرم‌افزار Google Earth در شکل‌های (۲-۲) و (۳-۲)، و نیز از روی نقشه زمین‌شناسی شکل (۴-۲) مشاهده نمود.

این چاه‌ها، در سنگ‌های آهکی کرتاسه حفر شده‌اند. این سنگ‌ها دست‌خوش گسل خوردگی و چین‌خوردگی‌های متعددی شده و به مقدار زیادی فرسایش‌یافته و هوازده می‌باشند و همچنین در اثر نزولات جوی، حفرات زیادی در آن‌ها به وجود آمده‌اند.

چاه‌های مذکور توسط اداره آب‌های زیرزمینی شهرستان شاهرود حفر شده‌اند و با شماره‌های ۱۱ و ۱۲ نام‌گذاری شده‌اند. چون این چاه‌ها فقط به فاصله تقریبی ۹۰ متر از یکدیگر حفر شده‌اند، در این پژوهش، آن‌ها را چاه‌های آب دوقلو نامیده‌ایم. همچنین دره‌ای را که این دو چاه تقریباً در امتداد آن واقع هستند، دره چاه‌های آب دوقلو نام‌گذاری کرده‌ایم. سیلاب مربوط به این دره، به رودخانه مجن می‌ریزد. عمق چاه شماره ۱۱، ۱۶۰ متر می‌باشد که در زمان حفر، در عمق ۱۰۷ متری از سطح زمین به آب رسیده است. ارتفاع دهانه این چاه از سطح دریا ۱۵۲۰ متر می‌باشد. عمق چاه شماره ۱۲، ۱۷۷ متر می‌باشد که در زمان حفر، در عمق ۹۵ متری از سطح زمین به آب رسیده است. ارتفاع دهانه این چاه از سطح دریا ۱۴۷۴ متر می‌باشد.

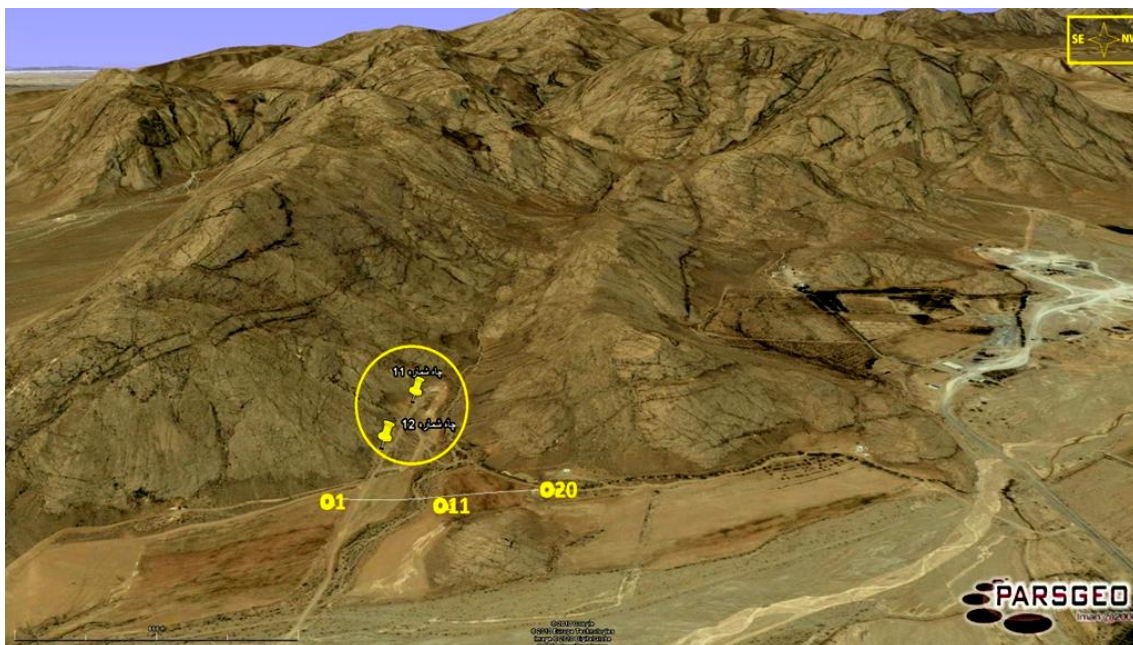
طبق تحقیقات به عمل آمده توسط اداره آب‌های زیرزمینی شهرستان شاهرود، سنگ بستر این منطقه را سازند شمشک تشکیل می‌دهد که به علت دارا بودن تناوب‌های نفوذ ناپذیر، شرایط ایجاد آب‌خوان آزاد در منطقه را فراهم نموده است.





شکل (۲-۲) تصویر ماهواره ای شهرستان شاهرود. علامت زرد رنگ محل مورد مطالعه را نشان می‌دهد

[Google Earth 2010]



شکل (۳-۲) تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه که موقعیت چاه‌های دوقلو و دره پایین دست نشان داده شده

است [Google Earth 2010].

با توجه به شکل‌های (۲-۲) و (۳-۲)، امتداد اغلب گسل‌های منطقه با امتداد دره‌ای که چاه‌های مذکور در آن واقع هستند، تقریباً موازی می‌باشند. این وضعیت باعث می‌شود که گسل‌های مذکور به عنوان زهکش عمل نمایند و آب‌های بالادست دره را به طرف این چاه‌ها هدایت نمایند. چون سنگ‌های اطراف این چاه‌ها از نظر شکل ظاهری، دارای خلل و فرج و حفره‌های زیاد می‌باشند و این وضعیت را نیز می‌توان به سنگ‌های زیر سطح زمین در اطراف چاه‌های مذکور تعمیم داد، بنابراین وضعیت ظاهری فوق‌الذکر می‌تواند دال بر حجیم بودن آب‌خوان مربوط به این چاه‌ها در زیر سطح زمین باشد.

## ۳-۲- زمین ریخت شناسی<sup>۱</sup>

ارتفاعات شمالی منطقه مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات البرز شرقی است. ارتفاعات البرز شرقی نسبت به ارتفاعات البرز غربی رو به نقصان گذاشته و کم عرض‌تر و باریک‌تر می‌شوند تا آنکه در ۲۰۰ کیلومتری شرق دریای خزر ارتفاعات آن به دشت آرموت‌لی در شرق جنگل گلستان منتهی می‌شود. کوه شاهوار با ارتفاع ۳۹۴۵ متر از سطح دریا، بلندترین نقطه منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نزولات جوی رشته کوه‌های البرز در شمال شاهرود منبع اصلی تغذیه رودها و قنوات این منطقه است. 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 می‌دهند. اما بخش‌هایی از سنگ‌های فوق اساساً از واحدهای فرسایش پذیر نظیر شیل، مارن و کنگلومرا شکل گرفته‌اند که مناطق کم ارتفاع و پست را تشکیل داده‌اند [اوزیری، ۱۳۸۰].

اما همان گونه که بیان شد می‌توان ارتفاعات بلند ستیغ سازی که دارای تغییرات توپوگرافی شدید می‌باشند و پرتگاه‌های متعددی را پدید آورده‌اند را در سلسله کوه‌های شمال منطقه مورد مطالعه، در توالی‌های سازند لار و آهک‌های 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 آن‌ها سست و ریزدانه می‌باشند در برابر فرسایش مقاوم نبوده و تحت تاثیر آن قرار گرفته‌اند، بنابراین ارتفاع کمتری نسبت به توالی‌های دیگر داشته و سرزمین‌های کم ارتفاع و پست را تشکیل می‌دهند. در آهک‌های کرتاسه بالایی در اثر نزولات جوی، حفرات متعددی ایجاد شده و همچنین دستخوش گسل خوردگی و چین خوردگی‌های فراوانی شده‌اند [اوزیری، ۱۳۸۰].

## ۲-۴- زمین‌شناسی ساختمانی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخش‌هایی از دو ایالت ساختاری البرز و ایران مرکزی را در بر می‌گیرد. بخش‌های شمالی منطقه که در برگیرنده رشته کوه‌ها و ارتفاعات البرز شرقی است، در طول ادوار گذشته دستخوش رویدادها و پدیده‌های مختلفی مانند عملکرد رویدادهای کوه‌زایی، چین خوردگی و گسلش‌های متعدد شده و ساختمان‌های جالبی در آن‌ها بوجود آمده است. شکل (۲-۴) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بخش‌های میانی و جنوب منطقه نیز که به ایالت ساختاری ایران مرکزی تعلق دارد دستخوش پدیده‌های نظیر چین خوردگی و گسلش شده که در ذیل بطور اجمالی به معرفی پدیده‌های فوق می‌پردازیم [اوزیری، ۱۳۸۰].

## ۲-۴-۱- چین خوردگی‌های منطقه مورد مطالعه

چین خوردگی‌های منطقه مورد مطالعه را اساساً ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی تشکیل می‌دهند که تعداد قابل توجهی از آن‌ها در منطقه مذکور، قابل رویت می‌باشند. ساختمان‌های فوق عمدتاً دارای گسترش شمال شرقی- جنوب غرب و یا شرقی- غربی می‌باشد و از انواع متقارن و یا نامتقارن هستند. برای مثال از مجموع فوق، می‌توان به تاقدیس متقارن خربش در توالی‌های سازند سلطانیه، تاقدیس متقارن نپال در توالی‌ها ژوراسیک با میلی در جهت شمال شرقی- جنوب غربی و ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی پیوسته امام محمد حنفی، مهماندویه و جگل شاه با محوری در راستای شمال شرقی- جنوب غربی اشاره نمود [اوزیری، ۱۳۸۰].

## ۲-۴-۲- گسل‌های منطقه مورد مطالعه

سیستم اصلی گسل‌های منطقه مورد مطالعه را راندگی‌ها<sup>۱</sup> و گسل‌های امتداد لغز<sup>۲</sup> تشکیل می‌دهند. راندگی‌های موجود در منطقه دارای امتداد تقریبی شمال شرقی- جنوب غربی می‌باشد. این راندگی‌ها در مکان‌هایی که شیب گسل‌ها نزدیک به صفر شده‌اند، سفره‌های رورانده<sup>۳</sup> را بوجود آورده‌اند. از جمله گسل‌های راندگی منطقه شاهرود را می‌توان گسل‌های راندگی طزره، مجن و میامی را نام برد.

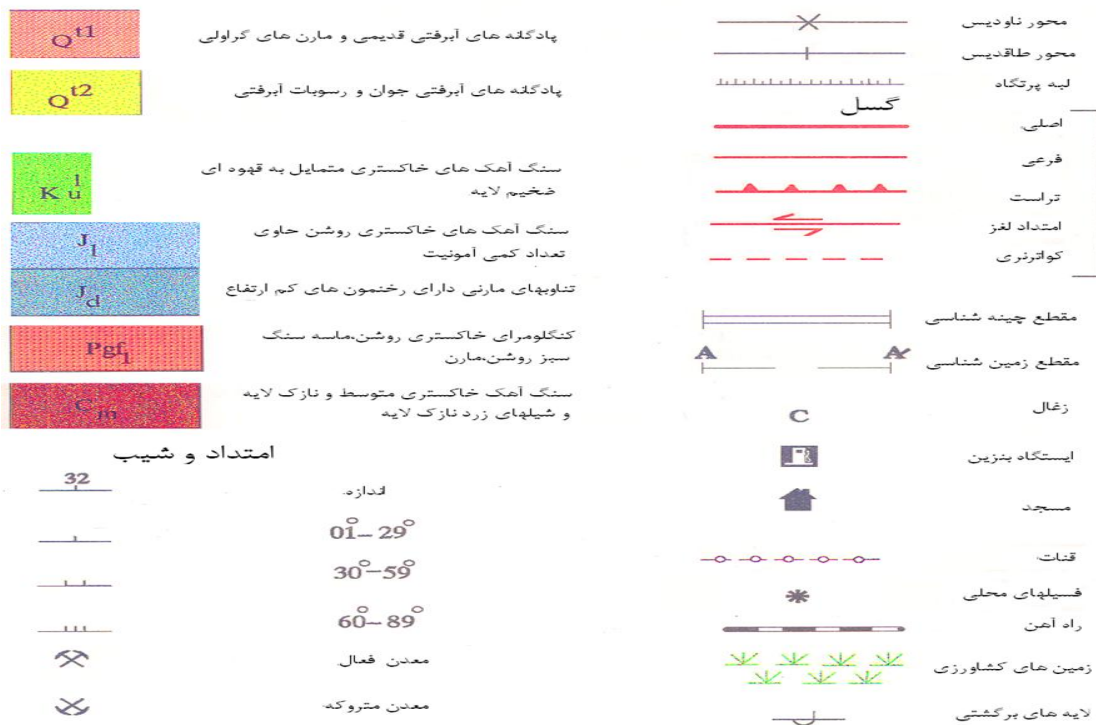
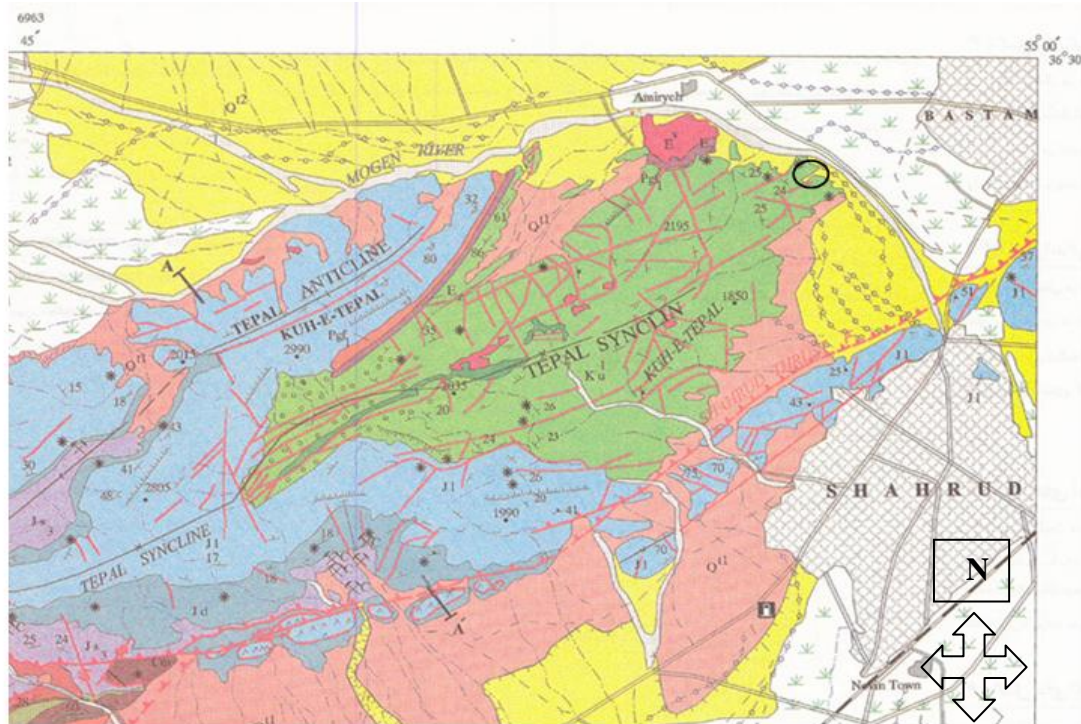
به انضمام گسل‌های معرفی شده تعدادی نیز گسل‌های عادی و معکوس ( با شیب بیش از ۴۵ درجه ) و همچنین گسل‌های امتداد لغز که اساساً راست‌گرد می‌باشد بطور پراکنده در منطقه قابل رویت می‌باشند [اوزیری، ۱۳۸۰].

<sup>۱</sup> - Thrust Faults

<sup>۲</sup> - Strike slip Faults

<sup>۳</sup> - Nappes





شکل (۲-۴): قسمتی از نقشه زمین‌شناسی شاهرود که محدوده چاه‌های دوقلو در آن با دایره مشخص شده است

[اوزیری، ۱۳۸۰].

## فصل سوم

حالات مختلف آب در قشر جامد

زمین

### ۳-۱- مقدمه

زمین‌های آهکی اغلب شامل درزه‌ها و شکاف‌هایی هستند که به تدریج بر اثر نفوذ آب باران حاوی گاز کربنیک، انحلال پیدا کرده، و پدیده کارستی شدن را پدید می‌آورند. رویدادهای تکتونیکی مخصوصاً گسل‌ها و شکستگی‌ها در تسهیل و تشدید کارستی شدن و ابعاد کمی و کیفی رخساره‌های کارستی نقش اساسی و مهم را بازی می‌کنند [White, 1988., Ford, 1989., Milanovic, 1988]. جریان آب زیرزمینی در بیشتر حوزه‌های کارستی تحت تأثیر ساختارهای تکتونیکی موجود در منطقه می‌باشد. با عنایت به اهمیت نقش آب‌های زیرزمینی در ساختارهای زیرسطحی، در این فصل به مطالعه برخی از خصوصیات سنگ‌شناسی موثر بر آب‌های زیرزمینی و حالات قرارگیری آب‌های مذکور، پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- حالات مختلف آب‌های زیرزمینی

قسمت عمده آبی که به صورت برف و باران به زمین می‌رسد پس از نفوذ در زمین و رسیدن به طبقات زیرین زمین درزه‌ها و شکاف‌ها و خلل و فرج بین ذرات سنگ‌ها را اشغال می‌نماید و پس از برخورد به سنگ‌های غیر قابل نفوذ، مخازن آب‌های زیرزمینی را به وجود می‌آورد.

آب‌های زیرزمینی به سه صورت دیده می‌شوند:

(۱) آب محبوس

(۲) آب ثقلی یا آب آزاد

(۳) آب اشباع

آب محبوس: آبی است که به وسیله نیروی چسبندگی مولکول‌ها در حجم سنگ نگهداری می‌شود و این نیرو همیشه بزرگتر از نیروی ثقل است، آب‌های محبوس از نظر کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی بسیار حائز اهمیت می‌باشند.

آب آزاد: عبارت است از آبی که در داخل خلل و فرج و یا فضاهای آزاد سنگ، تحت تأثیر نیروی ثقل جریان می‌یابد. مشروط بر اینکه سنگ مزبور از آب اشباع شده باشد.

آب اشباع: حداکثر مقدار آبی را که سنگ قابل نفوذ می‌تواند در خود نگه دارد، آب اشباع می‌گویند. به غیر از آب‌هایی که در سیکل هیدرولوژیکی هستند، آب‌های کمی نیز ممکن است از خارج سیکل، وارد منابع زیر زمینی شده باشند که عبارتند از:

آب ذاتی: آبی است که در موقع تشکیل سنگ‌های رسوبی در خلل و فرج سنگ محبوس شده است. این آب بسته به اینکه از دریا و یا آب شیرین نتیجه شده باشد، شور یا شیرین است، ولی به طور کلی اغلب آن‌ها شور هستند.

آب‌های جوان: آب‌هایی را می‌گویند که از مواد مذاب درون زمین یا آتشفشان‌ها یا منابع کیهانی نتیجه شده و به آب‌های زیرزمینی اضافه شده‌اند. به این آب‌ها به ترتیب، آب مواد مذاب معدنی، آب آتشفشانی و یا آب کیهانی می‌گویند [Todd, 1959].



### ۳-۳- چگونگی تجمع آب در زیر سطح زمین

آب‌های زیرزمینی در قسمت‌های متخلخل و نفوذ پذیر زمین جمع می‌شوند و می‌توانند مخازن آب‌های زیرزمینی را به وجود آورند.

تشکیلات زمین شناسی را از نظر مخازن آب‌های زیر زمینی به انواع زیر تقسیم می‌کنند:

#### (۱) آبخانه یا سفره آب<sup>۱</sup>

آبخانه‌ها تشکیلات زمین شناسی اشباع و نفوذ پذیری هستند که می‌توانند آب قابل توجهی را در شرایط معمولی از خود عبور داده و یا در خود ذخیره نمایند که در حالت دوم سفره آب زیرزمینی نامیده می‌شوند.

#### (۲) سفره‌های نیمه تراوا<sup>۲</sup>

این سفره‌ها، تشکیلات زمین‌شناسی اشباع شده‌ای هستند که می‌توانند آب‌دار باشند، ولی قابلیت آب-دهی آن‌ها به دلیل ریز دانه بودن آن‌ها کمتر از مواد آبخانه است. به این لایه‌ها، لایه‌های نشتی هم می‌گویند که قابلیت انتقال افقی آن‌ها قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

#### (۳) تشکیلات نا تراوا<sup>۳</sup>

این سفره‌ها، تشکیلات زمین شناسی اشباع شده‌ای هستند که اگر چه ممکن است حاوی مقداری آب باشند، ولی آب از درون آن‌ها قادر به حرکت نیست، مانند سنگ‌های رسی

#### (۴) مناطق بی آب<sup>۴</sup>

این مناطق، به قسمت‌های از زمین اطلاق می‌شوند که نه آب دارند و نه آب را از درون خود عبور می‌دهند. مانند گرانیت یا سینیت بدون شکستگی [Todd, 1959].

<sup>1</sup> - Aquifer

<sup>2</sup> - Aquitard

<sup>3</sup> - Aquiclude

<sup>4</sup> - Aquifuge

### ۳-۴- خصوصیات سنگ‌شناسی موثر بر آب‌های زیر زمینی

در این مبحث به معرفی چند ویژگی سنگ‌شناسی که مؤثر بر آب‌های زیرزمینی می‌باشند، به‌طور اختصار اشاره می‌شود.

#### ۳-۴-۱- خلل و فرج و فضاهای خالی<sup>۱</sup>

آن قسمت از یک توده سنگی یا خاک که از مواد کانی، اشباع نشده باشند و مانند مجراهای زیرزمینی عمل می‌نمایند، خلل و فرج نامیده می‌شوند که در مطالعه آب‌های زیر زمینی اهمیت فراوانی دارند. [ادولتی ارده‌جانی، ۱۳۸۷].

#### ۳-۴-۲- تخلخل<sup>۲</sup>

مسئله تخلخل نقش مهمی را از نظر تجمع و حرکت آب در سنگ‌ها ایفا می‌کند. بنا بر تعریف، تخلخل، درصدی از حجم کل سنگ است که توسط فضاهای خالی اشغال شده است. برای مقایسه تخلخل و فضاهای خالی سنگ‌ها با یک‌دیگر از ضریب تخلخل استفاده می‌شود که عبارت است از نسبت حجم فضاهای خالی یک سنگ به حجم کل سنگ، یعنی:

$$\varphi = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

که در آن:

$\varphi$  = ضریب تخلخل بر حسب درصد

$V$  = حجم کل سنگ

$V_v$  = حجم فضاهای خالی سنگ

<sup>۱</sup> - Voids/ Pore spaces

<sup>۲</sup> - Porosity

اگر سنگ، تخلخل خود را همزمان با رسوب گذاری به دست آورد، این تخلخل، تخلخل اولیه<sup>۱</sup> است. عوامل زمین شناسی ممکن است تخلخل اولیه سنگ را تغییر دهند، در این صورت تخلخلی در سنگ به وجود می آید که تخلخل ثانویه<sup>۲</sup> نامیده می شود. وقتی حجم کل فضاهای خالی را نسبت به حجم سنگ در نظر بگیریم، تخلخل کل مفهوم پیدا می کند. اما تخلخل موثر فقط فضاها و حفراتی از سنگ را که به هم ارتباط دارند، شامل می شود. تخلخل موثر در مورد حرکت آب های زیر زمینی از اهمیت خاصی برخوردار است و با نفوذ پذیری در ارتباط است. تخلخل موثر کوچکتر از تخلخل کل می باشد، که در جدول (۱-۳) تخلخل موثر و تخلخل کل تعدادی از محیطها با هم مقایسه شده اند. [دولتی ارده جانی، ۱۳۸۷].

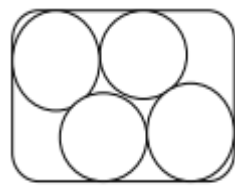
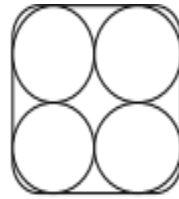
جدول (۱-۳): تخلخل کل و موثر برخی از محیطها [دولتی ارده جانی، ۱۳۸۷].

نوع سنگ	تخلخل کل (%)	تخلخل موثر (%)
قلوه سنگها	۳۰ - ۴۰	۲۵
رسها	۴۵ - ۵۵	۳
سنگهای آذرین	۱/۲ - ۲	-
سیلت استونها	۴۰ - ۵۰	-

تخلخل به وضعیت قرار گرفتن دانه های مواد آبخانه ای در کنار یکدیگر یا آرایش دانه ها بستگی دارد. به طوری که در آرایش کوبیک شکل (۱-۳) الف، بیشترین تخلخل و در آرایش رومبوئدری شکل (۱-۳) ب، کمترین تخلخل وجود دارد.

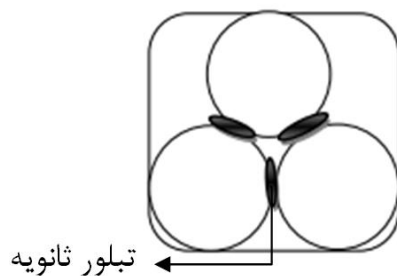
<sup>1</sup> - Primary porosity

<sup>2</sup> - Secondary porosity

ب)  $\phi = 26\%$ الف)  $\phi = 47.5\%$ 

شکل (۱-۳): آرایش دانه‌ها و درصد تخلخل الف) آرایش کوبیک، ب) آرایش رومبوئیدری

مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش عمق، فشردگی، تراکم و سیمان شدگی، تخلخل کاهش می‌یابد. عامل دیگری که باعث کاهش تخلخل می‌شود، تبلور مجدد می‌باشد. این موضوع در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) تاثیر تبلور مجدد بر میزان تخلخل

عواملی هم وجود دارند که سبب افزایش تخلخل می‌گردند، این عوامل عبارتند از:

- ❖ انحلال، که ناشی از تاثیر شیمیایی آب بر روی سنگ‌های آهکی است.
- ❖ درزه‌ها و شکستگی‌ها که در اثر عوامل تکتونیکی ایجاد می‌شوند.
- ❖ دولومیتی شدن سنگ‌های آهکی که باعث ازدیاد تخلخل می‌گردد که در زمین شناسی مخازن نفتی دارای اهمیت خاصی می‌باشد [Todd, 1959].

۳-۴-۳- ضریب نفوذ پذیری<sup>۱</sup>

مقدار جریان آب ثقلی تحت تاثیر ایستایی معین و از یک مقطع واحد در واحد زمان، ضریب نفوذ پذیری نام دارد که جنس آن از نوع سرعت می باشد.

۳-۴-۴- قابلیت انتقال آب<sup>۲</sup>

عبارت است از عبور آب تحت گرادیان واحد و در سطحی که عرض آن واحد است و طول آن ضخامت سفره می باشد. ضریب انتقال آب با T نشان داده می شود و رابطه آن با نفوذ پذیری به صورت زیر است:

$$T = K.H = K.m$$

رابطه (۳-۲)

که در آن:

K = ضریب نفوذ پذیری

H = ضخامت سفره آزاد

m = ضخامت سفره تحت فشار

واحد T ، متر مربع بر روز می باشد [Todd, 1959].

<sup>1</sup> - Permeability  
2- Transmissivity

### ۳-۴-۵- جدایش ویژه<sup>۱</sup>

این ضریب در مورد سفره‌های آزاد تعریف و به کار برده می‌شود. این ضریب با  $S_y$  بیان می‌گردد و عبارت است از ظرفیت آب دهی یک سفره آزاد. قابل ذکر است که تمام آب موجود در بین حفرات سنگ یک سفره قابل بهره برداری نیستند. مقداری از آب در حجم سنگ به سبب نیروی چسبندگی و مولکولی (مولکول‌های آب و جداره‌های سنگی، مولکول‌های آب با یکدیگر) نگه داشته می‌شود [Todd, 1959].

### ۳-۴-۶- نگه‌داشت ویژه

نگه‌داشت ویژه درصد آبی می‌باشد که در فضاهاى خالی کوچک سنگ، شکاف‌های خیلی باریک و لوله‌های موئینه باقی می‌ماند و تحت تاثیر نیروی ثقل جریان نمی‌یابد. این درصد را با  $S_r$  نشان می‌دهند. مجموع جدایش ویژه و نگه‌داشت ویژه، تخلخل کل سنگ می‌باشد. در جدول (۲-۳) جدایش ویژه تعدادی از محیط‌ها داده شده است [Todd, 1959].

جدول (۲-۳) جدایش ویژه محیط‌های آبخانه‌ای [Todd, 1959].

جدایش ویژه (%)	محیط سنگی
۱-۱۰	رس
۱۰-۳۰	ماسه
۱۵-۳۰	گراول
۱۵-۲۵	ماسه و گراول
۵-۱۵	ماسه سنگ
۰/۵-۵	شیل
۰/۵-۵	سنگ آهک

## فصل چهارم

اشاره‌ای به اصول روش مقاومت

ویژه الکتریکی

#### ۴-۱- مقدمه

اکتشافات ژئوالکتریکی بسیار متنوع‌تر از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشند. بعضی از تکنیک‌های ژئوالکتریکی مثل پتانسیل خودزا (sp)، جریان تلوریک، و مگنتو تلوریک از منابع انرژی الکتریکی طبیعی بهره می‌گیرند که از این نظر همانند اکتشافات گرانی سنجی و مغناطیسی می‌باشند. از طرف دیگر، روش‌های ژئوالکتریکی دیگر مانند مقاومت ویژه و قطبش القایی، نیاز به برقرار نمودن جریان و یا میدان الکتریکی به صورت مصنوعی داشته و از این نظر شباهت زیادی به روش‌های اکتشافات لرزه‌ای دارند. روش‌های الکتریکی اغلب برای پی جویی کانی‌های فلزی و هادی به کار می‌روند. این روش‌ها همچنین در آبیابی، کارهای مهندسی (برای تعیین عمق سنگ بستر و سد سازی)، زمین‌گرمایی و غیره کاربرد دارند [کلاگری، ۱۳۷۱].



## ۴-۲- مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها

دامنه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها بسیار وسیع است. سنگ‌ها و کانی‌هایی که مقاومت ویژه الکتریکی آنها بین  $10^{-6}$  تا  $10^{-1}$  اهم-متر باشد هادی‌های خوب، سنگ‌ها و کانی‌هایی که مقاومت ویژه آنها بین ۱ تا  $10^6$  اهم-متر باشد هادی‌های متوسط و سنگ‌ها و کانی‌هایی که مقاومت ویژه آنها بین  $10^7$  تا  $10^{15}$  اهم-متر باشد را هادی‌های بد گویند [کلاگری، ۱۳۷۱]. برای شارش جریان مستقیم مانند آنچه که در اکتشافات مقاومت ویژه الکتریکی استفاده می‌شود، جریان الکتریکی به صورت‌های زیر حمل می‌شود:

(a) حرکت الکترون‌های آزاد یا یون‌ها در جامد

(b) حرکت یون‌ها در آب طبیعی

بخش (a) وقتی که انواعی از مواد مانند گرافیت، مگنتیت و پیریت موجود باشد دارای اهمیت است.

بخش (b) در اغلب کاربردهای مهندسی و هیدروژئولوژی غالب‌تر است.

یون‌های ذاتی آب از تجزیه نمک‌هایی چون کلرید سدیم و کلرید منیزیم حاصل می‌شود. رسانایی توسط شارش الکترون به موجودیت الکترون‌های آزاد بستگی دارد. اگر شمار زیادی از الکترون‌های آزاد موجود باشند، ماده را فلز می‌نامند. در بیشتر سنگ‌ها هدایت جریان الکتریسیته به صورت الکترولیتی توسط محلول‌های موجود در خلل و فرج سنگ‌ها و بین دانه‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین

عوامل مؤثر در مقاومت ویژه الکتریکی مواد زمین عبارتند از [Mooney, 1980]:

(الف) کسری از حجم سنگ اشغال شده با آب

(ب) شوری یا حجم یون آزاد ذاتی آب

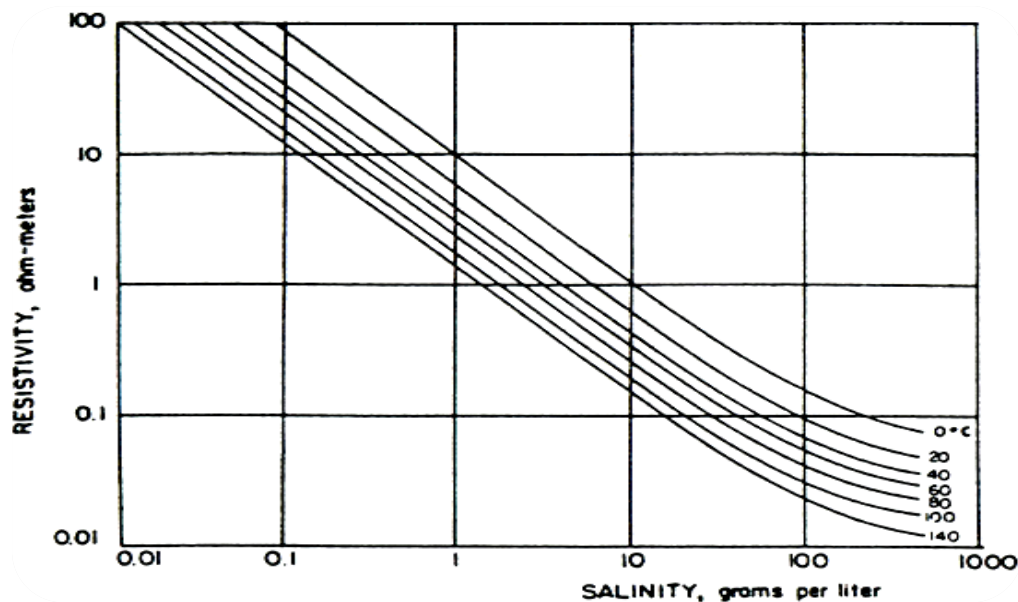
(پ) اتصال داخلی فضاهای خالی (نفوذپذیری)

(ت) دما

بیشتر کانی‌های فلزی جریان الکتریسیته را به صورت الکترونیکی هدایت می‌کنند. کانی‌های رسی جریان الکتریسیته را هم به صورت الکتریکی و هم به صورت الکترونیکی هدایت می‌کنند. در اعماق زیاد در اثر فشار لیتوستاتیک تمامی خلل و فرج سنگ‌ها بسته شده و هدایت الکتریکی بیشتر توسط دانه‌ها و ماتریکس سنگ صورت می‌گیرد [کلاگری، ۱۳۷۱]. عوامل الف و ب می‌توانند با قانون تجربی آرچی<sup>۱</sup> ترکیب شوند. مقاومت ویژه الکتریکی حجمی  $\rho_0$  برای سنگ آهک و ماسه سنگ متخلخل اشباع شده، به تخلخل  $\phi$  و مقاومت ویژه الکتریکی ذاتی آب  $\rho_\omega$  بستگی دارد.

$$\rho_0 = \alpha \rho_\omega \phi^{-m} \quad (۱-۴)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب ثابت از مرتبه ۱ و  $m$  ضریب ثابت از مرتبه ۲ است. با توجه به شکل (۱-۴) افزایش درجه شوری، کاهش مقاومت ویژه الکتریکی را در بر دارد. با افزایش دما قابلیت انحلال بیشتر می‌شود که این خود موجب افزایش درجه شوری و کاهش مقاومت ویژه الکتریکی می‌شود [Mooney, 1980].



شکل (۱-۴) وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی به دما و شوری [Mooney, 1980]

<sup>۱</sup> - Archie's Law

با توجه به گفته های قبلی نتیجه می شود که:

- موادی که فاقد فضای خالی هستند مقاومت ویژه بالایی را نشان می دهند مانند: سنگ آهک توده ای و اغلب سنگ های آذرین و دگرگونی مانند بازالت و گرانیت.
- موادی که فضای خالی آنها فاقد آب است، مقاومت ویژه بالایی را نشان می دهند مانند: ماسه سنگ خشک یا گراول و یخ.
- موادی که آب ذاتی آنها تمیز است (شور نیست) مقاومت ویژه بالایی را نشان می دهند مانند: گراول یا ماسه سنگ تمیز حتی اگر اشباع از آب باشد.
- اغلب مواد دیگر مقاومت ویژه پایین یا متوسط را نشان می دهند مخصوصاً اگر حاوی رس باشند، مانند: خاک رس و سنگ هوازده.

وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی و اشباع بودن آب، غیر خطی است. وقتی که اشباع شدگی از درجه کامل تا محدوده ۶۰-۴۰٪ کاهش پیدا می کند، مقاومت ویژه الکتریکی به نسبت خیلی کم افزایش می یابد. و از اینجا به بعد کاهش اشباع شدگی، افزایش ناگهانی مقاومت ویژه الکتریکی را در پی خواهد داشت [Mooney, 1980].

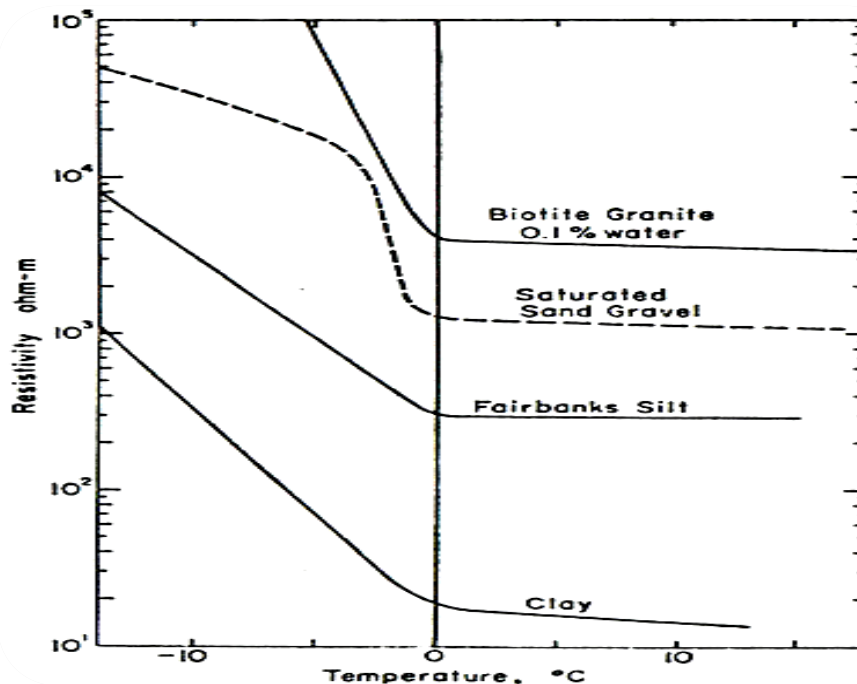
حضور کانی های رسی باعث پایین آمدن مقاومت ویژه خواهد شد زیرا کانی های رسی:

الف) می توانند با آب ترکیب شوند.

ب) می توانند در یک حالت تبادل پذیر، کاتیون ها را به طرف سطح خود جذب کنند.

پ) تمایل به یونیزه شدن و شرکت در تأمین یون های آزاد دارند.

همان طور که در شکل (۴-۲) دیده می شود، زمین های یخ زده مقاومت ویژه الکتریکی بالای را نسبت به زمین های غیر یخ زده نشان می دهند. وقتی که دما از ۰ درجه به ۱۰- یا ۱۵- درجه کاهش می یابد، مقاومت ویژه به تدریج افزایش می یابد [Mooney, 1980].



شکل (۲-۴) وابستگی مقاومت ویژه به دما در سنگ و خاک یخ زده [Mooney, 1980].

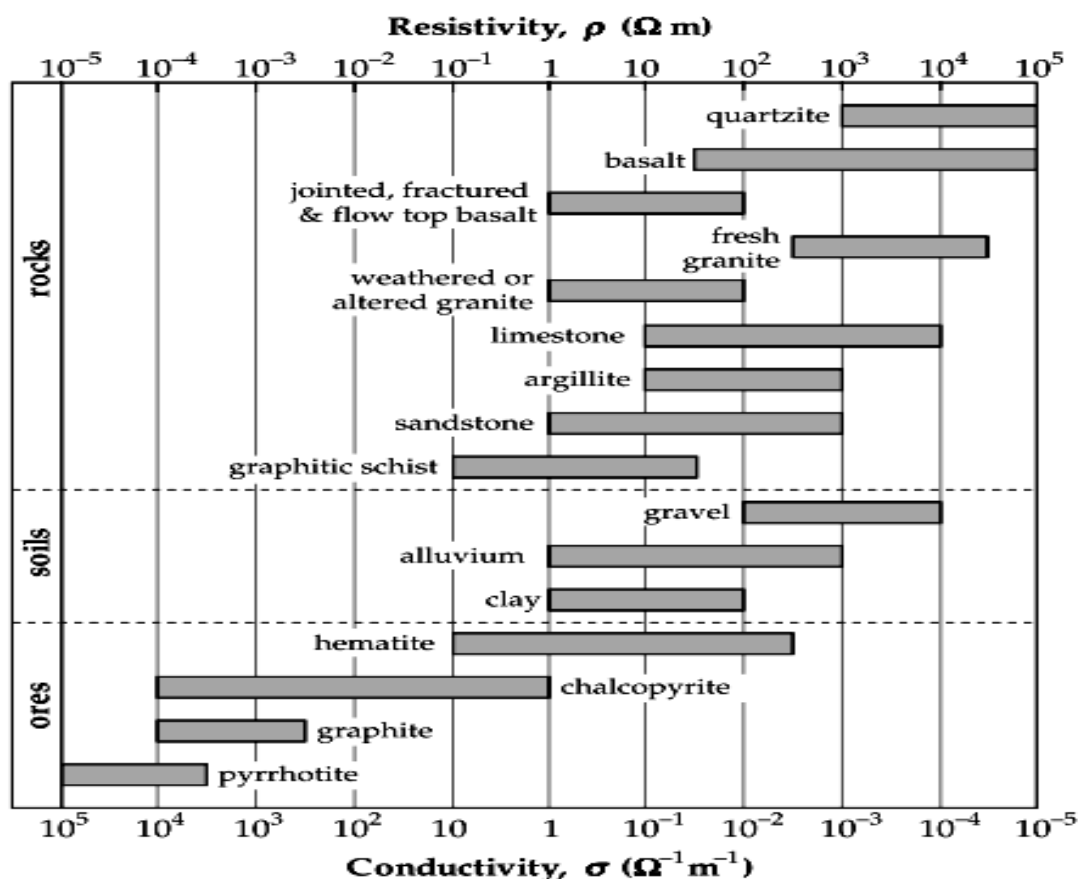
### ۳-۴- مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مواد زمین

مقاومت ویژه الکتریکی بعضی از سنگ‌ها و مواد معدنی در جدول (۴-۱) نشان داده شده است. سنگ‌های آذرین و دگرگونی دارای مقادیر بالای مقاومت ویژه می‌باشند. مقاومت ویژه این گونه از سنگ‌ها به میزان خردشدگی و درصد شکستگی‌های پر شده از آب و مقدار نمک موجود در آن وابسته است. سنگ‌های رسوبی، که معمولاً متخلخل می‌باشند، بطور معمول مقاومت ویژه الکتریکی کمتری در مقایسه با سنگ‌های آذرین و دگرگونی دارند. رسوبات نامتراکم عموماً مقادیر مقاومت ویژه کمتری نسبت به سنگ‌های رسوبی دارند و مقاومت ویژه آنها بین  $10 \Omega m$  تا کمتر از  $1000 \Omega m$  می‌باشد.

جدول (۴-۱) محدوده مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی برای مواد مختلف [Telford et al., 1990., and Mooney, 1980]

ماده مورد نظر	محدوده مقاومت ویژه $\Omega m$	ماده مورد نظر	محدوده مقاومت ویژه $\Omega m$
فلزات		سنگ‌های آذرین و دگرگونی	
مس	$1.7 \times 10^{-8}$	گرانیت	$3 \times 10^2 - 10^6$
طلا	$2.4 \times 10^{-8}$	دیوریت	$10^4 - 10^5$
نقره	$1.6 \times 10^{-8}$	گابرو	$10^3 - 10^6$
گرافیت	$10^{-3}$	آندزیت	$4.5 \times 10^4$ (wet) - $1.7 \times 10^2$ (dry)
آهن	$10^{-7}$	بازالت	$10 - 1.3 \times 10^7$ (dry)
سرب	$2.2 \times 10^{-7}$	پریدوتیت	$3 \times 10^3$ (wet) - $6.5 \times 10^3$ (dry)
نیکل	$7.8 \times 10^{-8}$	شیست	$20 - 10^4$
قلع	$1.1 \times 10^{-7}$	گنیس	$6.8 \times 10^4$ (wet) - $3 \times 10^6$ (dry)
روی	$5.8 \times 10^{-8}$	اسلیت	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
کانی‌های سولفیدی		مرمر	$10^2 - 2.5 \times 10^8$
کالکوزیت	$3 \times 10^{-5} - 0.6$	کوارتزیت	$10 - 2 \times 10^8$
کالکوپیریت	$1.2 \times 10^{-5} - 0.3$	سنگ‌های رسوبی	
پیریت	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$	شیل	$20 - 2 \times 10^3$
پیروتیت	$6.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$	ماسه‌سنگ	$1 - 6.4 \times 10^8$
مولیبدنیت	$10^{-3} - 10^6$	سنگ آهک	$50 - 10^7$
گالن	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$	دولومیت	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
اسفالریت	$1.5 - 10^7$	کنگومرا	$2 \times 10^3 - 10^4$
کانی‌های اکسیدی		رسوبات نامتراکم	
بوکسیت	$2 \times 10^2 - 6 \times 10^3$	ماسه‌های نفتی	4- 800
کرومیت	$1 - 10^6$	مارل	3- 70
کوپریت	$10^{-3} - 300$	رس	1- 100
هماتیت	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$	رس مرطوب	20
مگنتیت	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$	آب‌ها	
ایلمنیت	$10^{-3} - 50$	آب زیرزمینی	10- 100
روتیل	$30 - 10^3$	آب دریا	0.2
کانی‌های سیلیکانه		آب باران	30- 1000
کوارتز	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$	یخ	$10^5 - 10^8$
مسکویت	$10^2 - 10^{14}$	کلی	
بیوتیت	$2 \times 10^2 - 10^6$	سولفیدهای توده‌ای	$10^4 - 1$
هورنبلند	$2 \times 10^2 - 10^6$	خاک نواحی مرطوب	50- 200
فلدسپات	$10^2 - 10^4$	خاک نواحی خشک	100- 500
اولیوین	$10^2 - 10^4$	خاک نواحی بیابانی	200- 1000
کانی‌های دیگر			
کلسیت	$2 \times 10^{12}$		
آنیدریت	$10^9$		
هالیت	$10 - 10^{13}$		
زغال سنگ	$10 - 10^{11}$		

مقاومت ویژه آب زیر زمینی با توجه به میزان نمک‌های محلول از ۱۰ تا ۱۰۰ اهم-متر تغییر می‌کند. مقاومت ویژه پایین آب دریا (در حدود  $0.2 \Omega m$ ) به علت میزان نمک فراوان موجود در آب دریا می‌باشد. خاک‌های مرطوب و زمین‌های آبدار مقدار مقاومت ویژه الکتریکی کمتری دارند. خاک‌های رسی معمولاً مقاومت ویژه پایین‌تری نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند. شکل (۳-۴) حد تقریبی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بعضی سنگ‌ها و رسوبات معمولی را نشان می‌دهد. نکته جالب توجه این است که، انواع سنگ‌ها و خاک‌ها، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی همدیگر را پوشش می‌دهند. این بدین دلیل است که مقاومت ویژه الکتریکی سنگ یا یک خاک به عوامل دیگر مانند تخلخل، اشباع از آب و غلظت نمک‌های محلول وابسته است [کلاگری، ۱۳۷۱].

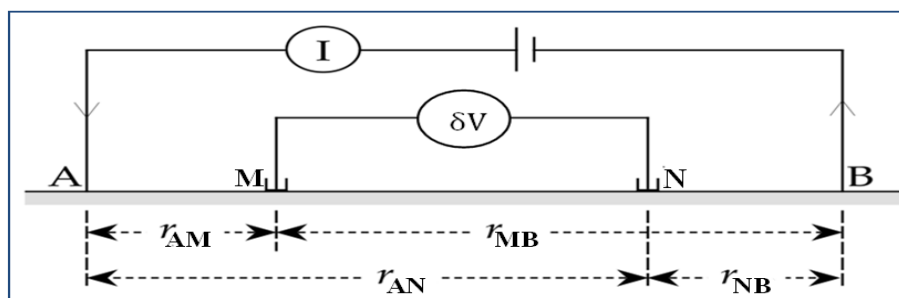


شکل (۳-۴) حد تقریبی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بعضی سنگ‌ها و رسوبات معمولی [Lowrie, 2007].

تمام اجسام باعث کند شدن جریان الکتریکی می‌شوند، به طوری که برای به حرکت در آوردن ذرات باردار باید انرژی مصرف شود. میزان جلوگیری اجسام در برابر عبور جریان با عنوان مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به آن جسم توصیف می‌شود. یکی از اهداف برداشت‌های الکتریکی، اندازه‌گیری این خاصیت فیزیکی می‌باشد که به عنوان پایه‌ای برای تشخیص لایه بندی و ساختمان‌های داخل زمین تلقی می‌شود. مقاومت ویژه الکتریکی در زمین به یک مجموعه از اثرات اهمی و دی الکتریکی بستگی دارد که در ارتباط با لیتولوژی و اثرات الکترولیتی آب‌های زیرزمینی می‌باشد [حیدریان، ۱۳۸۴].

#### ۴-۴- روش‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه زمین

برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه زمین بدین طریق عمل می‌شود که مطابق شکل (۴-۴) دو الکتروود جریان A و B که به ترتیب به قطب‌های مثبت و منفی یک باطری متصل می‌باشند و دو الکتروود پتانسیل M و N که به یک ولت متر حساس متصل می‌باشند را در سطح زمین در نظر می‌گیریم. اگر اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود M و N را  $\delta V$ ، و جریان تزریق شده به داخل زمین را I بنامیم، مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده از رابطه زیر به دست می‌آید [Reynold, 1997].



شکل (۴-۴): آرایش چهار الکتروودی کلی برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه [Lowrie, 2007].

$$\rho = \left[ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}} \right] \frac{\delta V}{I} \quad (۲-۴)$$

عبارت  $\left[ \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB}} \right]$  را فاکتور هندسی آرایش الکتروودی می‌نامند و معمولاً آن را با حرف K

نمایش می‌دهند. رابطه (۲-۴) را می‌توان به صورت زیر نیز نمایش داد:

$$\rho = K \frac{\delta V}{I} \quad (۳-۴)$$

اگر اندازه‌گیری در یک محیط همگن و ایزوتروپ انجام شود، مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده از رابطه (۳-۴) را مقاومت ویژه واقعی<sup>۱</sup> می‌نامند. اما اگر اندازه‌گیری در یک محیط ناهمگن و ناهمسانگرد صورت گیرد، آن را مقاومت ویژه ظاهری<sup>۲</sup> می‌نامند [Reynold, 1997].

#### ۴-۵- نکاتی در رابطه با روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی

از کاربردهای روش مقاومت ویژه الکتریکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- (۱) اکتشاف و تعیین محل ذخایر شن و ماسه.
- (۲) تخمین عمق سطح آب‌های زیر زمینی و افق‌های حاوی آب.
- (۳) تخمین عمق سنگ بستر و ضخامت رولایه.
- (۴) بررسی تغییرات ناحیه‌ای در لایه‌های خاک (به عنوان مثال ماسه/ گراول در مقابل رس).
- (۵) تعیین کانال‌های رودخانه‌های مدفون.
- (۶) اکتشاف آنومالی‌های زمین گرمایی.
- (۷) تعیین فصل مشترک آب‌های شور و شیرین.
- (۸) تعیین مناطق گسل خورده.
- (۹) تعیین محل ذخایر معدنی.
- (۱۰) آشکار سازی و تعیین محل آلودگی‌های زیر زمینی.
- (۱۱) اکتشافات باستان شناسی.

1- True resistivity

2 - Apparent resistivity



## (۱۲) تخمین مقاومت الکتریکی سنگ‌ها.

روش مقاومت ویژه الکتریکی در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی مانند لرزه نگاری و یا روش‌های اکتشافی مستقیم مانند حفاری، دارای خصوصیات زیر می‌باشد:

(a) سرعت در اندازه‌گیری‌های صحرائی.

(b) هزینه‌های پایین عملیات صحرائی.

(c) سبک و قابل حمل بودن تجهیزات.

(d) امکان تفسیر مستقیم و کیفی داده‌ها.

و در کنار این خصوصیات، محدودیت‌های این روش عبارتند از:

(a) امکان اختلاف مدل‌های ژئوالکتریکی با واقعیت‌های زمین شناسی.

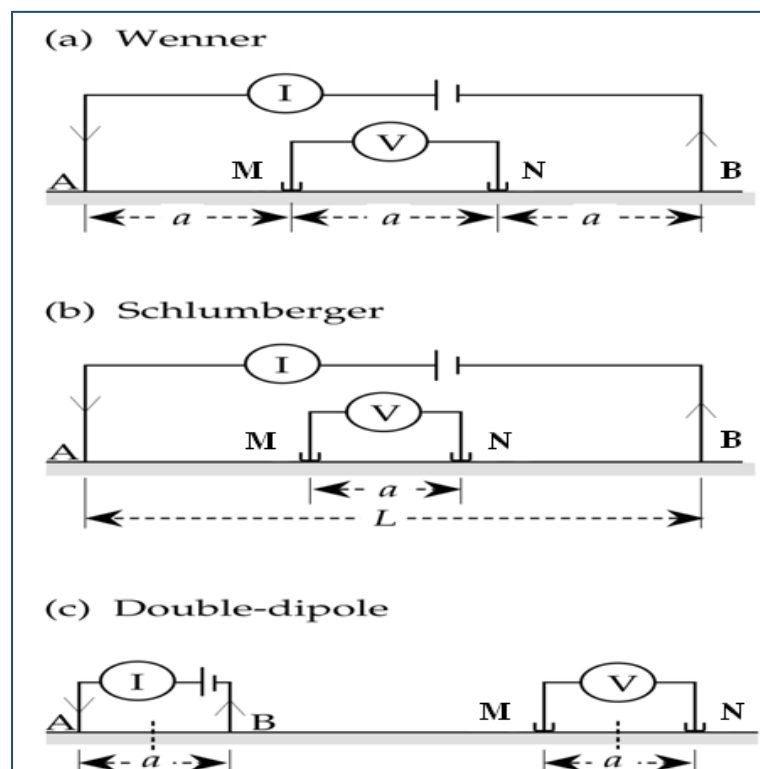
(b) ابهام در تفسیر ممکن است منجر به تولید چندین مدل مختلف شود.

(c) صحت عمق محاسبه شده به طور قابل توجهی کمتر از روش‌های لرزه‌ای و حفاری است.

یک جنبه مهم روش مقاومت ویژه الکتریکی این است که توسط این روش (در مقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی)، می‌توان خصوصیات مختلفی از مواد، از جمله محتوا و میزان املاح موجود در آب و ساختارهای زیرزمینی را بررسی نمود. اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی همراه برداشت‌های لرزه‌ای، یک قدرتمند برای بررسی‌های مختلف می‌باشند [Mooney, 1980].

## ۴-۶- آرایش‌های الکترودی

برای انجام اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه در صحرا، آرایش‌های الکترودی متفاوتی وجود دارند که هر یک از این آرایش‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. آرایش‌های الکترودی رایج در کارهای صحرائی عبارتند از آرایش ونر، آرایش شلومبرگر و آرایش دوقطبی-دوقطبی که به ترتیب در شکل (۴-۵) نشان داده شده‌اند. در این شکل با توجه به رابطه (۴-۲)، نحوه محاسبه مقاومت ویژه ظاهری، برای آرایش‌های فوق‌الذکر، نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): آرایش‌های الکترودی مهم در برداشت‌های صحرائی [Lowrie, 2007].

در آرایش‌های الکترودی فوق‌الذکر، هر چهار الکتروود جریان و پتانسیل روی یک خط راست قرار می‌گیرند.

در آرایش ونر چهار الکتروود  $A, B, M$  و  $N$  در روی زمین در طول یک خط راست طوری قرار می‌گیرند که  $AM = MN = NB = a$  می‌باشد. این آرایش، برخلاف وضع هندسی ساده اش، غالباً در کارهای صحرائی پر زحمت است. وقتی آرایش ونر در کاوش‌های عمقی به کار می‌رود، الکتروودها نسبت به یک مرکز ثابت گسترش یافته و فاصله  $a$  به دفعات اضافه می‌شود. در کاوش‌های جانبی یا به نقشه در آوردن<sup>۱</sup>، فاصله  $a$  ثابت می‌ماند و هر چهار الکتروود در امتداد خط اندازه‌گیری حرکت می‌کنند. در روش به نقشه در آوردن، مقاومت ویژه ظاهری هر آرایش به مرکز آن نسبت داده می‌شود.

در آرایش شلومبرگر در مقایسه با آرایش ونر، فاصله بین الکتروودهای جریان خیلی بزرگتر از فاصله بین الکتروودهای پتانسیل می‌باشد. این آرایش در سونداژزنی الکتریکی قائم کاربرد وسیع دارد. در سونداژزنی الکتریکی قائم، الکتروودهای پتانسیل ثابت هستند در حالی که فاصله الکتروودهای جریان به طور متقارن نسبت به مرکز آرایش گسترش می‌یابند. وقتی که فاصله الکتروودهای جریان افزایش می‌یابد، برای اینکه مقدار پتانسیل قابل اندازه‌گیری باشد، لازم می‌شود که فاصله الکتروودهای پتانسیل نیز افزایش یابند. گسترش این آرایش نسبت به آرایش ونر راحت‌تر می‌باشد زیرا تا زمانی که الکتروودهای جریان به اندازه کافی از هم فاصله نگرفته‌اند و سیگنال‌های جریان ضعیف نشده‌اند، تنها لازم می‌شود که دو الکتروود (الکتروودهای جریان) حرکت داده شوند.

در آرایش دوقطبی - دوقطبی الکتروودهای پتانسیل به هم نزدیک و در فاصله دور از الکتروودهای جریان قرار دارند که آنها نیز به هم نزدیک می‌باشند. در حقیقت ما با دو دوقطبی سرو کار داریم یکی دوقطبی جریان و دیگری دو قطبی پتانسیل می‌باشد. در این آرایش، فاصله بین الکتروودهای جریان  $A$  و  $B$ ، و فاصله بین الکتروودهای پتانسیل  $M$  و  $N$  تقریباً ثابت بوده و به طور قابل ملاحظه‌ای باید کمتر از فاصله بین مراکز دو دوقطبی باشد. فاصله بین الکتروود  $B$  و  $M$  معمولاً ۱ تا ۶ برابر طول دو قطبی‌ها است، و کابل‌های حامل جریان در فاصله نسبتاً دوری از کابل‌های متصل به الکتروودهای پتانسیل قرار

---

<sup>۱</sup> - Mapping

می‌گیرد، بنابراین در این آرایش جفت‌شدگی القایی بین کابل‌های پتانسیل و جریان کاهش می‌یابد [Telford et al., 1990].

نقاط ضعف و قوت برای هر یک از آرایش‌های الکترودی ونر، شلومبرگر و دوقطبی- دوقطبی، در جدول (۳-۴)، آورده شده است.

- ✓ آرایش ونر نسبت به تغییرات عمقی مقاومت ویژه الکتریکی زیر سطحی حساس می‌باشد، یعنی نسبت به ساختارهای افقی خوب جواب می‌دهد.
- ✓ عمق نفوذ آرایش دوقطبی- دوقطبی، نسبت به آرایش‌های دیگر بیشتر است.
- ✓ آرایش شلومبرگر، آرایش مناسبی برای سونداژزنی می‌باشد.

جدول (۳-۴): مقایسه آرایش‌های الکترودی ونر، شلومبرگر و دوقطبی- دوقطبی [Reynold, 1997].

معیار	ونر	شلومبرگر	دوقطبی- دوقطبی
تفکیک عمودی	YYY	YY	Y
عمق نفوذ	Y	YY	YYY
مناسب برای سونداژ زنی الکتریکی	YY	YYY	Y
مناسب برای پروفیل زنی الکتریکی	YYY	*	YYY
حساس به جهت گیری	بله	بله	متوسط <sup>۱</sup>
حساس به نا همگنی جانبی	بالا	متوسط	متوسط
شدت نیاز به کارگر <sup>۲</sup>	بله (No+)	متوسط (No+)	متوسط (No+)
کمک <sup>۳</sup> های تفسیری موجود	YYY	YYY	YYY
	Y=ضعیف	YY=متوسط	YYY=خوب
			*=نامناسب

+ وقتی از کابل چند هسته‌ای و آرایش اتوماتیک الکتریکی استفاده می‌شود

<sup>1</sup> - Moderate

<sup>2</sup> - Labour intensive

<sup>3</sup> -Aid

## ۴-۷- تعریف دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن

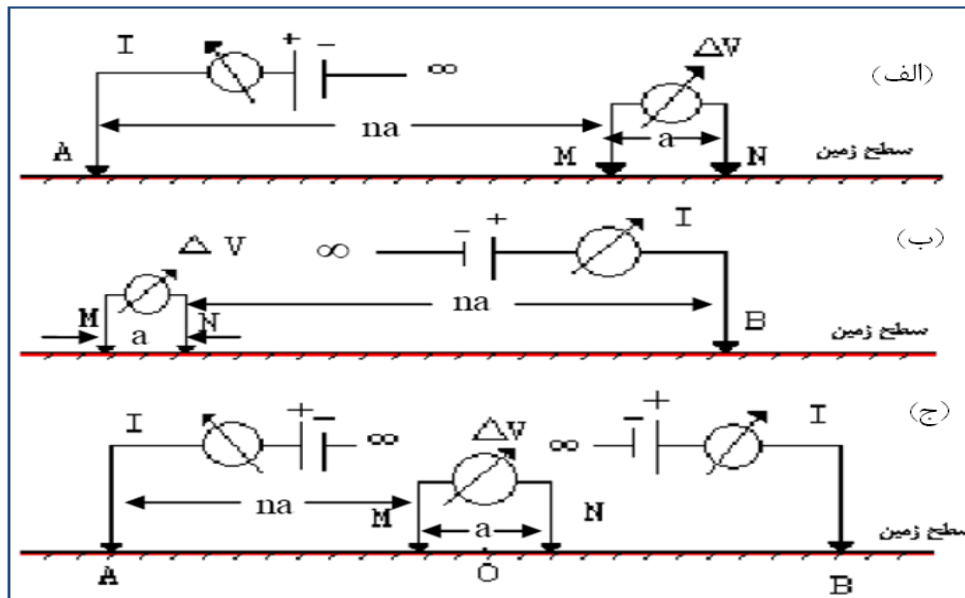
در شکل ((۴-۶- الف) از قطب مثبت باطری، توسط الکتروود جریان A، جریان الکتریسیته I به داخل زمین تزریق می‌گردد. الکتروود جریان متصل به قطب منفی باطری، در فاصله‌ای بینهایت دور به زمین متصل شده است. توسط الکتروودهای M و N اختلاف پتانسیل زمین اندازه‌گیری می‌شود فرض بر این است که  $AM \gg MN$  می‌باشد. چون الکتروودهای M و N در طرف راست الکتروود A واقع هستند آن را یک آرایش قطبی - دو قطبی مستقیم<sup>۱</sup> می‌نامیم. حال اگر مانند شکل ((۴-۶- ب) الکتروودهای M و N را در طرف چپ الکتروود جریان B قرار دهیم، آنرا یک آرایش قطبی - دو قطبی معکوس<sup>۲</sup> می‌نامیم. در اینجا نیز فرض بر این است که  $BN \gg MN$  می‌باشد.

در شکل ((۴-۶- ج) هر دو آرایش قطبی - دوقطبی مستقیم و معکوس، در هم ادغام شده‌اند. در صورتی که الکتروودهای A و B نسبت به نقطه O متقارن باشند، به این دو آرایش، دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن می‌گوییم. در عمل هر چهار الکتروود فوق‌الذکر را در امتداد یک خط راست قرار می‌دهند به طوری که امتداد این خط، بر امتداد ناهمگنی‌های مورد مطالعه حتی‌المقدور عمود باشد [Karous and Pernu, 1985].

این آرایش در مقایسه با آرایش‌های ونر و شلومبرگر، نسبت سیگنال به نویز کمتری دارد اما نسبت به آرایش دوقطبی - دوقطبی قدرت سیگنال بیشتری دارد [Loke, 2004].

<sup>1</sup> - Forward

<sup>2</sup> - Backward

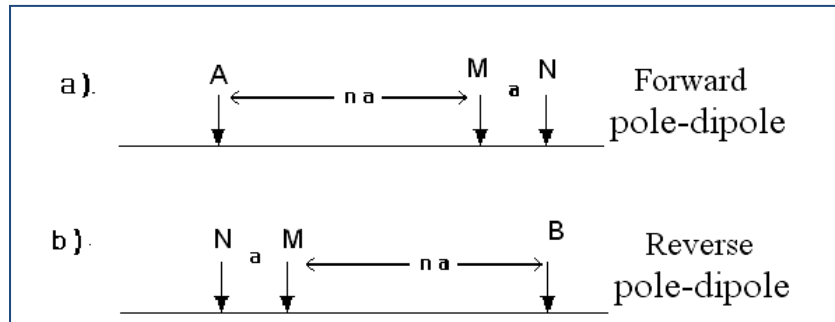


شکل (۴-۶) الف): آرایش قطبی - دوقطبی مستقیم، ب): آرایش قطبی - دوقطبی معکوس، ج): دو آرایش قطبی - دو-

قطبی متقارن [Karous and Pernu, 1985].

ضمناً توصیه می‌شود که در این آرایش فاصله  $AM$  نباید از هشت یا ده برابر فاصله  $MN$  زیادتر گردد چون در غیر این صورت، قدرت سیگنال کاهش می‌یابد، همچنین توصیه می‌شود که همزمان با افزایش فاصله  $AM$ ، فاصله بین الکترودهای  $MN$  نیز باید جهت افزایش نسبت سیگنال به نویز، افزایش یابد [Loke, 2004].

در اینجا باید متذکر شد که علاوه بر آرایش‌های قطبی - دوقطبی مستقیم و معکوس فوق‌الذکر که توسط کاروس و پرنو ارائه شده است، آرایش‌های قطبی - دوقطبی مستقیم و معکوس دیگری توسط لوک [Loke, 2004] ارائه شده است به این ترتیب که بعد از اندازه‌گیری توسط آرایش مستقیم، برای به‌دست آوردن آرایش معکوس، جای هر سه الکترود را به صورت شکل (۴-۷) تعویض می‌نماید. در نرم‌افزار Res2dinv که توسط لوک ارائه شده است، داده‌ها با در نظر گرفتن آرایش‌های قطبی - دو-قطبی اخیر پردازش می‌شوند.



شکل (۴-۷) a): آرایش قطبی-دوقطبی مستقیم و b): آرایش قطبی-دوقطبی معکوس، به کار گرفته شده توسط لوک برای پردازش نرم‌افزار [Res2dinv, 2001]. [Loke, 2001]

لازم به ذکر است که در آرایش‌های مستقیم و معکوس ارائه شده توسط کاروس و پرنو، مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده به زیر نقطه O (وسط MN) نسبت داده می‌شود. ولی در آرایش‌های مستقیم و معکوس ارائه شده توسط لوک، مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده به زیر نقطه وسط AN و یا BN نسبت داده می‌شود.

با توجه به شکل‌های (۴-۵)، (۴-۶) و (۴-۷) و همچنین هندسه آرایش‌ها، مقدار مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری برای آرایش‌های الکترودی و نر، شلومبرگر، دوقطبی-دوقطبی و قطبی-دوقطبی، از روابط مذکور در جدول (۴-۲) محاسبه می‌شوند.

جدول (۴-۲): روابط مقاومت ویژه ظاهری برای آرایش‌های الکترودی مختلف [Loke, 2004].

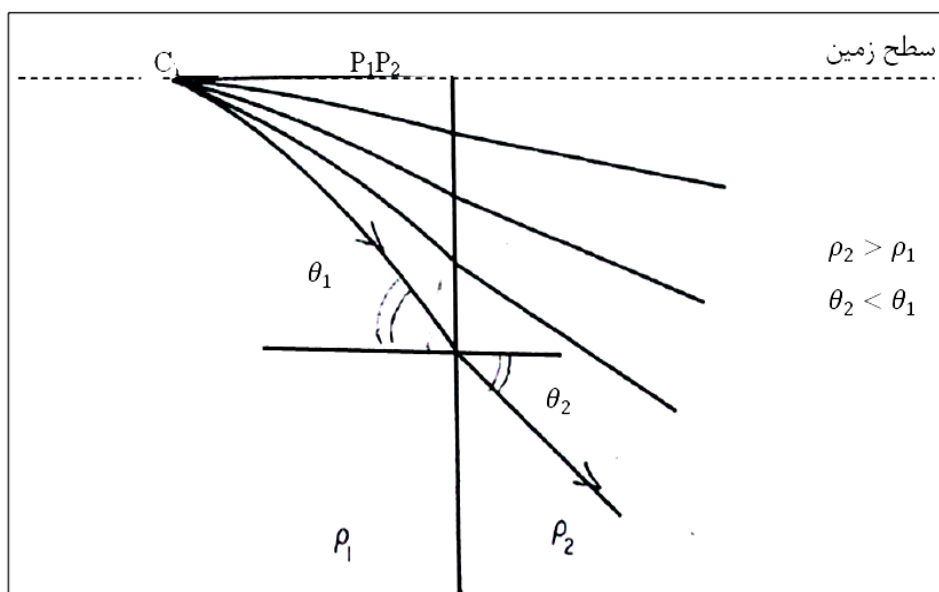
رابطه	آرایش
$\rho_a = 2\pi aR$	آرایش و نر
$\rho_a = \frac{\pi}{4} \left[ \frac{L^2 - a^2}{a} \right] R \quad L = AB$	آرایش شلومبرگر
$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)aR$ if $BM = na$	آرایش دو قطبی-دو قطبی
$\rho_a = 2\pi n(n+1)aR$	آرایش قطبی-دو قطبی

در این روابط،  $a$  فاصله بین الکترودهای پتانسیل و  $R = \frac{\delta V}{I}$  می‌باشند.

## ۸-۴- تغییرات چگالی جریان و مقاومت ویژه ظاهری در نزدیکی مرز

### جدایش دو محیط

در این پژوهش، چون در نظر است که بهترین آرایش الکترودی برای اکتشاف ناهمگنی‌های جانبی، معرفی گردد، لذا نخست لازم است که نحوه تغییرات مسیر خطوط جریان الکتریکی که از یک منبع جریان نقطه‌ای خارج می‌گردند، در نزدیکی مرز دو محیط که دارای تباین مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشند را بررسی نماییم. به طوری که در شکل (۸-۴) دیده می‌شود، یک منبع جریان نقطه‌ای C در نزدیکی مرز بین دو محیط با مقاومت ویژه‌های متفاوت قرار دارد. خطوط جریان در نزدیکی مرز، متناسب با تباین مقاومت ویژه دو محیط، از مسیر اصلی خود منحرف می‌شوند.



شکل (۸-۴): انحراف خطوط جریان الکتریکی خارج شده از یک منبع جریان نقطه‌ای C در نزدیکی مرز دو محیط با

مقاومت ویژه‌های متفاوت [پیروز، ۱۳۸۹].

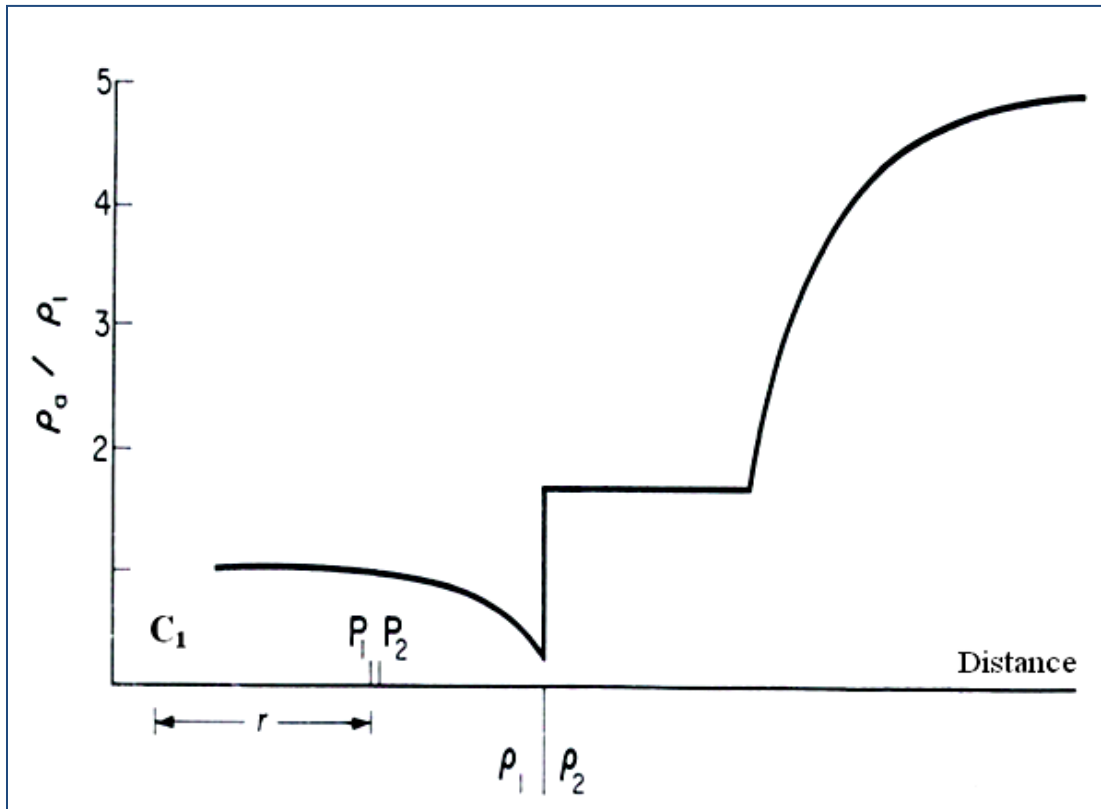


به‌طور کلی در یک محیط همگن و ایزوتروپ (در محیطی که در آن مرزی وجود ندارد)، خطوط جریان به صورت شعاعی از منبع نقطه‌ای، شارش می‌یابند. در صورت وجود مرز در بین دو محیط مذکور، مطابق شکل (۴-۸)، خطوط جریان طبق رابطه زیر شکسته می‌شوند.

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (4-4)$$

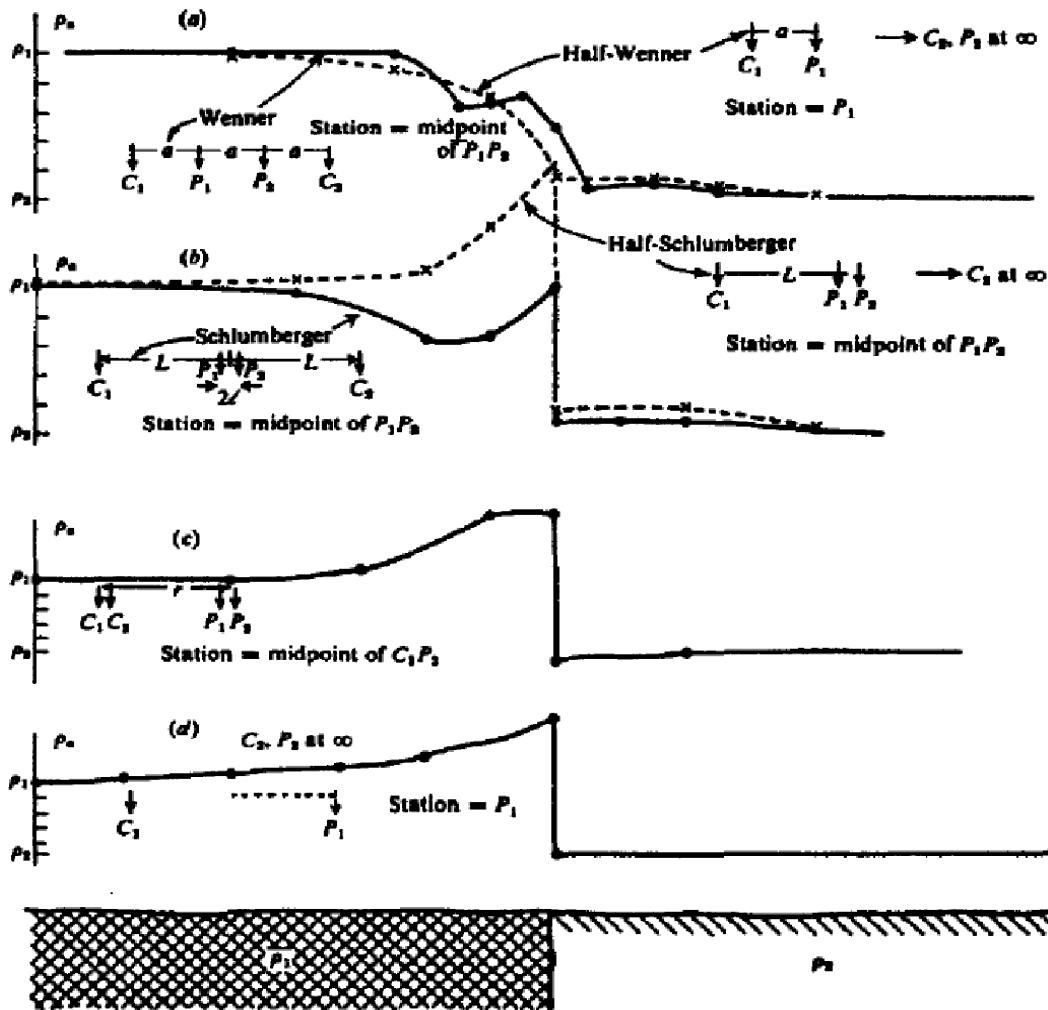
حال با توجه به مطالب فوق‌الذکر، مدلی را در نظر می‌گیریم که نشان می‌دهد که یک آرایش قطبی-دوقطبی، از روی یک مرز ناهمگنی جانبی عبور می‌نماید و از یک محیط با مقاومت ویژه الکتریکی کمتر به محیط با مقاومت ویژه الکتریکی بیشتر می‌رود، بخش‌های مختلف منحنی مقاومت ویژه الکتریکی حاصله را می‌توان به صورت زیر شرح داد:

وقتی الکترودهای پتانسیل مطابق شکل (۴-۹) از طرف چپ به مرز دو محیط نزدیک می‌شوند، چگالی جریان در زیر الکترودهای پتانسیل  $P_1P_2$  با توجه به شکل (۴-۸)، کاهش می‌یابد (چون خطوط جریان تمایلی به ورود به محیط با مقاومت ویژه بیشتر را ندارند و از مرز دوری می‌جویند)، و به تبع آن، مقاومت ویژه ظاهری  $\rho_a$  به مقدار کمتر از  $\rho_1$  افت می‌کند. وقتی که الکترودهای پتانسیل از مرز عبور می‌کنند، با توجه به شکل (۴-۸)، چگالی جریان در طرف راست مرز به‌طور جهشی افزایش می‌یابد (به دلیل این که خطوط جریان در مرز دو محیط، شکسته می‌شوند و در محیط با مقاومت ویژه بیشتر، به خط عمود بر مرز نزدیک‌تر می‌شوند)، و در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده نیز افزایش می‌یابد. در حالتی که هنوز چشمه و الکترودهای پتانسیل در دو طرف مرز قرار دارند، مقدار مقاومت ویژه ظاهری مربوطه، ثابت می‌ماند و بلاخره وقتی که الکترودهای جریان نیز وارد محیط با مقاومت ویژه بیشتر گردد، خطوط جریانی که از آن شارش می‌یابند، به طرف مرز همگرا می‌گردند. لذا مقاومت ویژه ظاهری مربوطه، هنوز کمتر از مقاومت ویژه واقعی  $\rho_2$  می‌باشد. با دور شدن آرایش از مرز، این همگرایی کاهش یافته و مقاومت ویژه ظاهری به تدریج افزایش می‌یابد تا به مقدار واقعی آن یعنی  $\rho_2$  می‌رسد.



شکل (۴-۹): تغییرات مقاومت ویژه ظاهری برای حالتی که یک آرایش قطبی-دوقطبی از روی یک گسل قائم عبور می‌کند. امتداد خط اندازه‌گیری بر امتداد صفحه گسل عمود می‌باشد ( $\rho_2 > \rho_1$ ) [Griffiths and King., 1981].

بر روی مدل یک گسل قائم، می‌توان انواع مختلفی از آرایش‌های الکترودی را به کار گرفت که امتداد آن‌ها بر صفحه گسل عمود می‌باشند. مثال‌هایی از آرایش‌های الکترودی مختلف بر روی مدل مذکور در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. محل‌های هر یک از ناپیوستگی‌ها در شکل‌های (a)، (b)، (c) و (d) ناشی از عبور یکی از الکترودها از روی صفحه گسل می‌باشد.

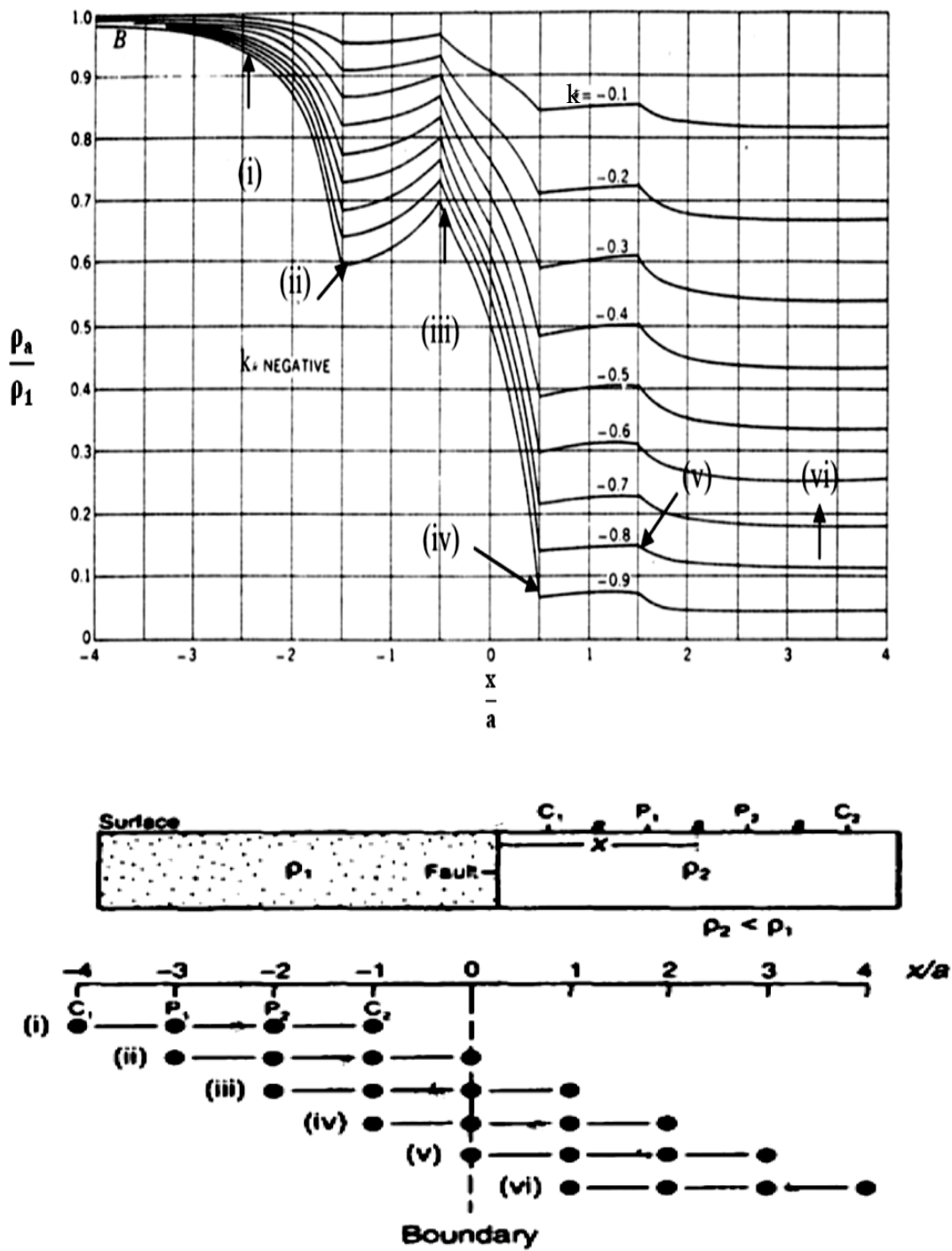


شکل (۴-۱۰): پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده بر روی یک گسل قائم با استفاده از آرایش‌های الکترودی

مختلف. (a): ونر، (b): شلومبرگر، (c): دو قطبی دو قطبی، (d): آرایش دو الکترود (با  $C_1$  ثابت و  $P_1$  متحرک)

[Telford et al., 1990]

پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری مختلف برای ضرایب بازتاب مختلف (k) در شکل (۴-۱۱) برای آرایش ونر نمایش داده شده‌اند. وقتی که این آرایش از محیط با مقاومت ویژه بیشتر به سمت محیط با مقاومت ویژه کمتر حرکت می‌کند (نمونه i در شکل ۴-۱۱)، خطوط جریان الکترود  $C_2$  به سمت مرز همگرا می‌شوند و این باعث افزایش چگالی جریان در مرز و کاهش چگالی جریان در بین الکترودهای پتانسیل می‌شود و در نتیجه باعث افت تدریجی مقاومت ویژه ظاهری، از مقدار واقعی آن ( $\rho_1$ ) می‌شود.



شکل (۴-۱): جابجایی آرایش و نر از روی مدل یک گسل قائم و تغییرات منحنی مقاومت ویژه ظاهری حاصله برای

ضرایب بازتاب مختلف (برای  $k = -0.1$  تا  $k = -0.9$ )

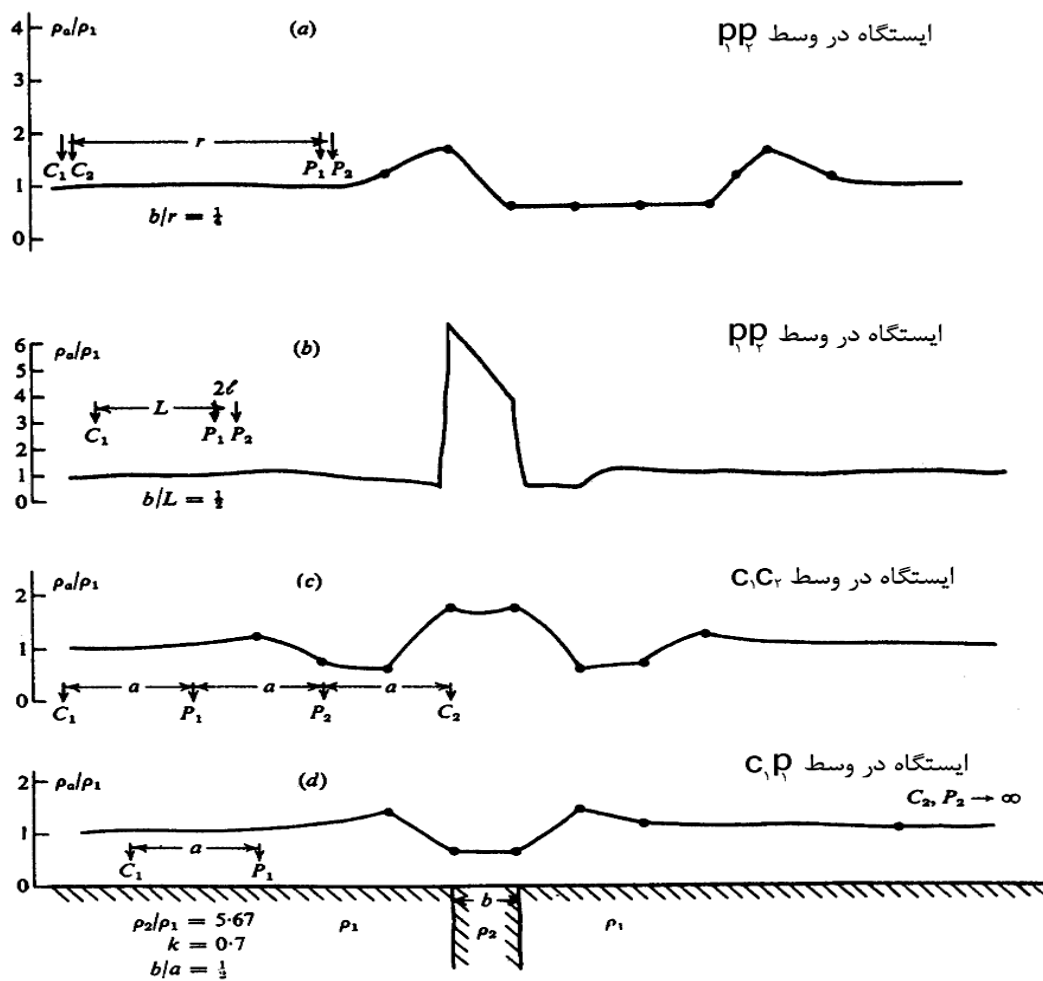
[Reynold, 1997, and van Nostrand and Cook 1976]

این وضعیت تا وقتی که الکتروود جریان  $C_2$  به مرز می‌رسد، و مقاومت ویژه ظاهری به مقدار حداقل خود کاهش می‌یابد، ادامه دارد (حالت (ii)). به محض عبور الکتروود  $C_2$  از مرز دو محیط (iii)، چگالی جریان در بین الکتروودهای پتانسیل افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت ویژه ظاهری نیز نسبت به حالت (ii) افزایش می‌یابد [Reynold, (1997)].

وقتی که هر جفت الکتروودهای پتانسیل از مرز عبور کنند (حالت iv)، خطوط جریان مربوط به الکتروود  $C_2$  از مرز دوری می‌جویند، و خطوط جریان مربوط به الکتروود  $C_1$  در محیط  $\rho_2$ ، برعکس وضعیت شکل (۴-۸)، از خط عمود بر مرز دور می‌شوند و منجر به افت شدید چگالی جریان در بین الکتروودهای پتانسیل می‌شوند. بنابراین مقاومت ویژه ظاهری به‌طور ناگهانی افت می‌کند. با واقع شدن الکتروود جریان  $C_1$  در محیط با مقاومت ویژه کم‌تر (حالت v)، خطوط جریان در نزدیکی مرز، واگرا می‌شوند که باعث افزایش چگالی جریان در بین الکتروودهای پتانسیل می‌شوند. در حالتی که این آرایش به اندازه کافی از مرز دو محیط دور شود، مقاومت ویژه ظاهری به مقدار واقعی خود (حالت vi) می‌رسد. به طوری که در شکل (۴-۱۱) دیده می‌شود، اندازه ناپیوستگی‌ها در روی هر منحنی پروفیل‌زنی، بستگی به مقدار  $k$  (ضریب بازتاب) دارد که از رابطه (۴-۵) به‌دست می‌آید [Reynold, 1997].

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{رابطه (۴-۵)}$$

همان گونه که در شکل (۴-۱۰) تغییرات منحنی مقاومت ویژه ظاهری حاصله از آرایش‌های مختلف الکتروودی را بر روی یک مدل گسل قائم بررسی نمودیم، می‌توان این تغییرات را بر روی مدل یک دایک قائم نیز مطابق شکل (۴-۱۲)، بررسی نمود. پهنای آنومالی‌ها در منحنی‌های فوق‌الذکر، علاوه بر نوع آرایش الکتروودی به‌کار گرفته شده، به پهنای دایک مدل انتخاب شده نیز بستگی دارد.



شکل (۴-۱۲): بررسی تغییرات منحنی مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به آرایش‌های مختلف الکترودی بر روی یک

دایک نازک. (a): آرایش دوقطبی-دوقطبی، (b): آرایش قطبی-دو قطبی، (c): آرایش وئر، (d): آرایش نیم وئر

[Telford et al., 1990]

در مجموع، از شکل (۴-۱۲) نتیجه می‌شود که، آرایش قطبی-دو قطبی، شکل دایک را نسبت به سایر آرایش‌ها، بهتر نشان می‌دهد. آرایش دوقطبی-دو قطبی دو آنومالی را نشان می‌دهد که آنومالی سمت راستی یک آنومالی کاذب می‌باشد و باعث اشتباه در تفسیر می‌گردد. آرایش نیم وئر در روی دایک مقاوم، یک آنومالی منفی را نشان می‌دهد که گمراه کننده می‌باشد [Telford et al., 1990].

## ۴-۹- استفاده از مدل‌های ریاضی به منظور تعیین بهترین آرایش

### الکترودی برای اکتشاف محل ناهمگنی‌های جانبی

همان طور که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده، تلفورد و دیگران به منظور تعیین نمودن بهترین آرایش الکترودی برای اکتشاف ناهمگنی‌های جانبی، مدل‌های ریاضی را به کار گرفته‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بهترین آرایش، آرایش قطبی-دوقطبی می‌باشد. ولی پیروز آپروز، ۱۳۸۲ ب [ نشان داده است که نمودار حاصل از به‌کارگیری آرایش مذکور، همیشه و تحت هر شرایطی نمی‌تواند یک نمودار بهینه باشد. منظور از یک نمودار بهینه در اینجا، نموداری است که دقیقاً در محل ناهمگنی جانبی، بیشترین تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی را نشان دهد. نمودار بهینه فقط در شرایط خاصی حاصل می‌شود. این شرایط که می‌باید همزمان برقرار باشند، عبارتند از:

۱- انتخاب مناسب علامت ضریب بازتاب.

۲- انتخاب مناسب ترتیب قرار دادن الکترودهای آرایش قطبی- دو قطبی نسبت به محل

ناهمگنی جانبی.

لذا برای اینکه همیشه و تحت هر شرایطی یک نمودار بهینه حاصل شود، استفاده از دو آرایش

قطبی- دو قطبی متقارن بهترین راه حل می‌باشد.

لازم به ذکر است که منظور از ناهمگنی‌های جانبی در این تحقیق، موارد زیر می‌باشند:

(۱) گسل‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های قائم.

(۲) دایک‌ها.

(۳) رگه‌های هادی قائم.

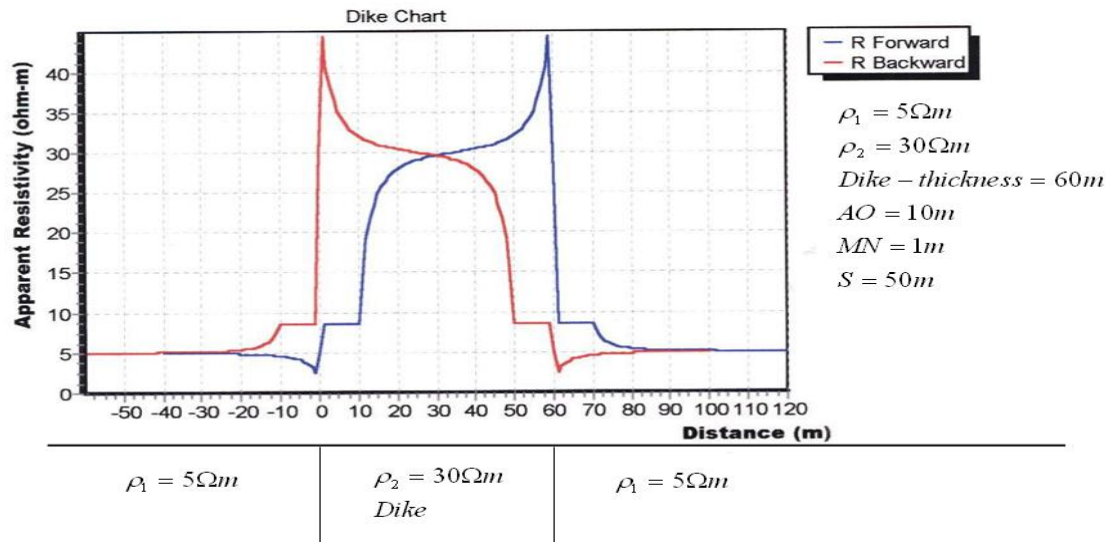
اکتشاف محل هر یک از این ناهمگنی‌ها که معمولاً در زیر یک رولایه پنهان می‌باشند، به نوبه خود دارای اهمیت بسزایی می‌باشد. بعنوان مثال، اکتشاف گسل‌های پنهان یک منطقه ضمن اینکه برای شناخت لرزه‌خیزی آن منطقه یک امر حیاتی می‌باشد، می‌تواند به اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی آن منطقه نیز کمک شایانی نماید. بدیهی است که اکتشاف دایک‌ها و رگه‌های هادی قائم یک منطقه نیز از نظر اقتصادی برای آن منطقه حائز اهمیت فراوانی می‌باشد. لذا تحقیق به منظور تعیین بهترین آرایش الکترودی برای اکتشاف محل ناهمگنی‌های جانبی، یکی از مواردی می‌باشد که هر روز در علم ژئوفیزیک اهمیت بیشتری می‌یابد.

کاروس و پرنو [Karous and Pernu, 1985] روش‌های مختلف ژئوفیزیکی را بر روی زمینی که دربرگیرنده لایه‌های نسبتاً قائم‌گرافیت بود به کار گرفتند و از مقایسه نمودارهای حاصله از آن‌ها نتیجه گرفتند که روش مقاومت ویژه الکتریکی با به‌کارگیری دو آرایش قطبی - دو قطبی متقارن برای اکتشاف این لایه‌ها بهترین روش می‌باشد. مقاله کاروس و پرنو به طور کلی فاقد به‌کارگیری مدل‌های ریاضی بر روی ناهمگنی‌های جانبی می‌باشد.

پیروز در مقاله خود [پیروز، ۱۳۸۲ ب] سعی نموده است که نخست بطور سیستماتیک با استفاده از مدل‌های ریاضی و تجزیه و تحلیل نمودارهای حاصله، نشان دهد که دو آرایش قطبی - دو قطبی متقارن بهترین آرایش الکترودی برای اکتشاف گسل‌های قائم، دایک‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های آب‌دار می‌باشد. سپس نتایج حاصله از به‌کارگیری این دو آرایش را به ترتیب بر روی سنگ‌های آهکی نزدیک شاهرود (برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در زمین‌های سخت)، رگه‌های مس معدن چاه‌موسی در تروود و بالاخره گسل‌های پنهان دامغان و شاهرود، به صورت سه شبه مقطع قائم مقاومت ویژه، نشان داده است.



- برای محاسبه کلیه مدل‌های ریاضی فوق‌الذکر، پیوسته سه مورد مشروحه زیر در نظر گرفته شده‌اند:
- (۱) مدل‌های مذکور برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی با روش پروفیل‌زنی الکتریکی و به-کارگیری دو آرایش قطبی- دو قطبی متقارن، محاسبه شده‌اند.
  - (۲) تصاویر چشمه الکتریکی نسبت به ناهمگنی‌های جانبی و اثرات این تصاویر در محاسبات پتانسیل‌ها و در نهایت در رسم نمودارهای مقاومت ویژه ظاهری مربوطه، بطور کامل لحاظ شده‌اند.
  - (۳) محاسبات فوق‌الذکر برای ناهمگنی‌های جانبی‌ائی انجام شده‌اند که فاقد رولایه می‌باشند.
- لازم به ذکر است که به‌طور کلی مدل‌های ریاضی از انواع فوق‌الذکر، برخلاف اهمیت زیادی که دارند، متأسفانه تاکنون کمتر مورد توجه مراجع معتبر قرار گرفته‌اند. لذا تعداد کمی از آنها در دسترس می‌باشند و از این تعداد نیز نمودارهای بعضی از آنها مانند شکل (۴-۱۲) از تلفورد و دیگران [Telford et al., 1990] و نیز کلر و دیگران [Keller et al., 1966]، اشتباه رسم شده‌اند. از مقایسه شکل (۴-۱۱) با شکل (۴-۱۳) می‌توان به این اشتباه پی برد.
- در شکل (۴-۱۳)، بعنوان 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، به‌طور مستقل می‌توان بعنوان یک گسل قائم در نظر گرفت. بنابراین، نمودارهای حاصله از به‌کارگیری روش پروفیل‌زنی الکتریکی با هر یک از آرایش‌های قطبی- دو قطبی مستقیم و معکوس بر روی دایک مذکور، به‌طور موضعی، برای ناهمگنی‌های فوق‌الذکر نیز صادق می‌باشند. این نمودارها در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده‌اند. نمودار آبی‌رنگ مربوط به آرایش قطبی- دو قطبی مستقیم و نمودار قرمز رنگ مربوط به آرایش قطبی- دو قطبی معکوس می‌باشد که در بخش (۴-۷) توضیح داده شده‌اند.

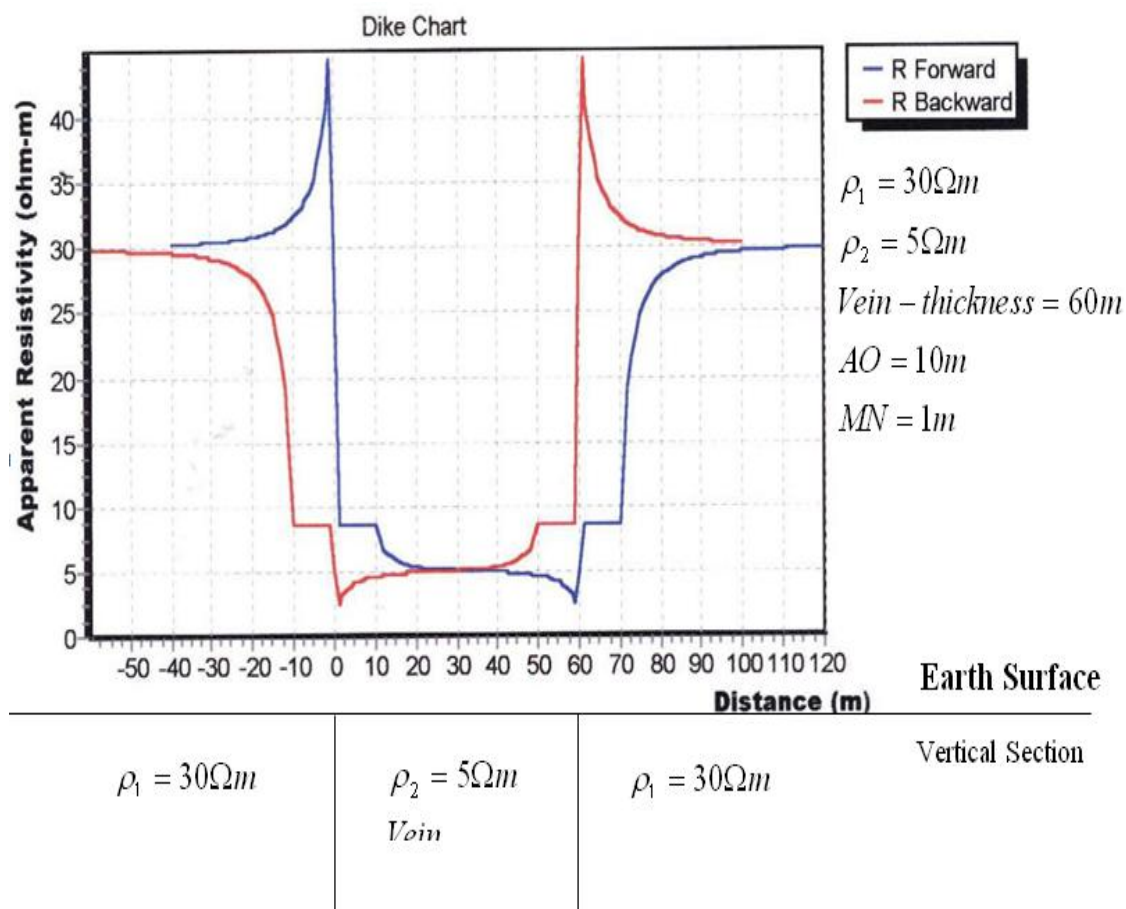


شکل (۴-۱۳): مدل مربوط به یک دایک مقاوم ضخیم و نمودارهای حاصله از به‌کارگیری دو آرایش قطبی-دوقطبی

مقارن بر روی این دایک [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 این ناهمگنی را مشخص نمود ولی توسط نمودار قرمز رنگ، احتمال تشخیص محل این ناهمگنی بیشتر می‌باشد. و بر عکس، 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، دقیقاً در وسط دایک، محل برخورد دو نمودار قرمز رنگ و آبی رنگ حاصل می‌گردد.

شکل (۴-۱۴)، مدل مربوط به یک رگه هادی قائم ضخیم و نمودارهای حاصله از به‌کارگیری روش دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن بر روی این رگه را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که از این نمودارها نیز نتیجه می‌شود برای مشخص نمودن محل ناهمگنی‌های جانبی در زیر سطح زمین، به‌کارگیری این دو آرایش الزامی می‌باشد.



شکل (۴-۱۴) مدل مربوط به یک رگه قائم هادی ضخیم و نمودارهای حاصله از به‌کارگیری آرایش قطبی-دوقطبی متقارن بر روی این رگه [پرواز، ۱۳۸۲، ب].

## فصل پنجم

روش به تصویر کشیدن دو بعدی

داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

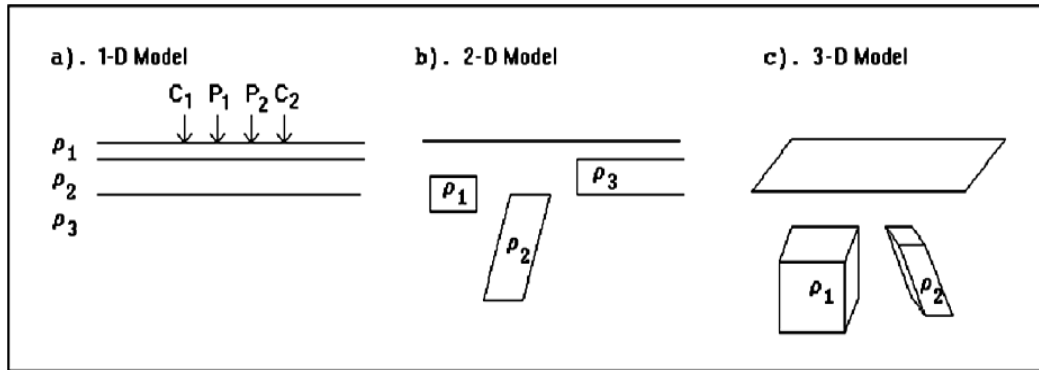
## ۵-۱- مقدمه

برای شناسایی بهتر ویژگی‌های ساختارهای زیرسطحی، اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی به صورت دوبعدی انجام می‌شوند که حاوی اطلاعات بیشتری از خواص این ساختارها نسبت به برداشت‌های یک‌بعدی می‌باشند. در برداشت‌های دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی، اندازه‌گیری‌ها باید به صورت ترکیبی از پروفیل‌زنی و سونداژزنی الکتریکی و با فواصل الکتروودی مختلف انجام شود. مسلم است که انجام این کار با دست مستلزم صرف کار، هزینه و زمان بیشتری می‌باشد. با پیشرفت تکنیک‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی تحت عنوان توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)، برداشت‌های دوبعدی و سه‌بعدی به آسانی و با صرف هزینه و زمان کمتر انجام می‌شود

[Barker 1978., Griffiths et al., 1990., Loke and Barker, 1996., Barker et al., 2001]

نظر به این که هدف از انجام این پژوهش، نشان دادن نتایج اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی به صورت دو بعدی می‌باشد، لذا در این مبحث نخست به طور مختصر راجع به نحوه به تصویر کشیدن داده‌های مقاومت ویژه به صورت دو بعدی، توضیحاتی داده می‌شود.

به‌طور کلی اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی به صورت‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی انجام می‌شوند. در شکل (۱-۵) مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی نشان داده شده‌اند.



شکل (۱-۵): (a) مدل یک بعدی، (b) مدل دو بعدی و (c) مدل سه بعدی [Loke, 2004].

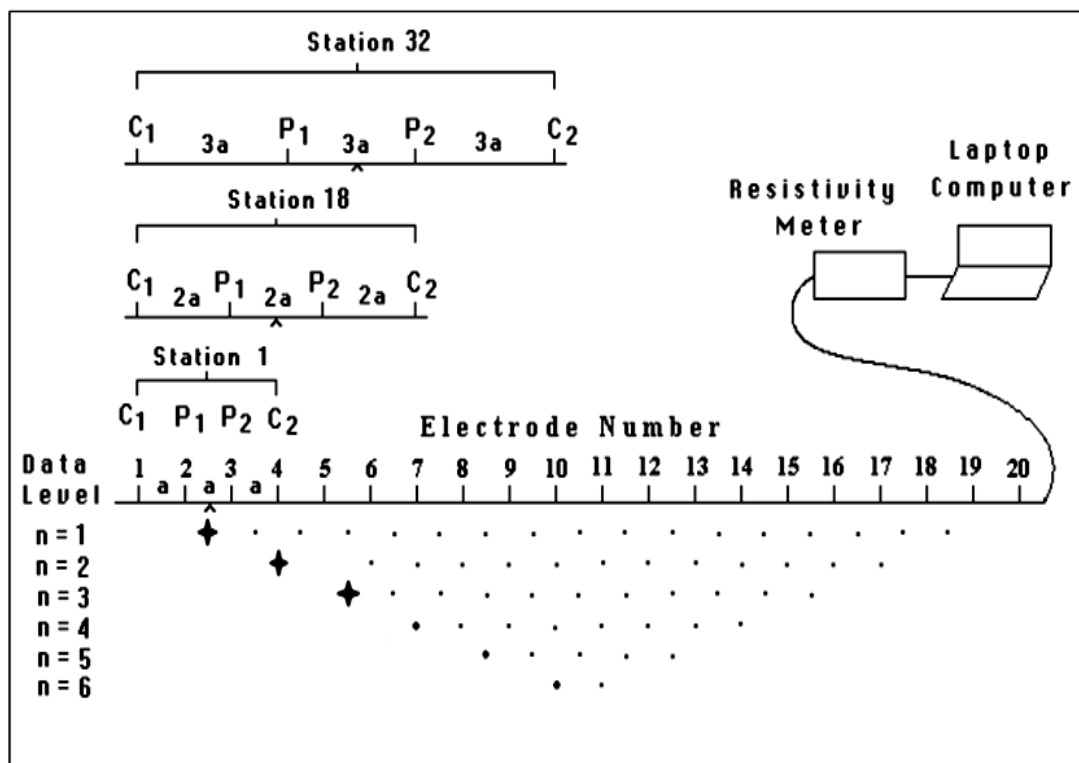
برای به‌دست آوردن یک مقطع قائم دو بعدی، تغییرات مقاومت ویژه هم به صورت عمودی و هم به صورت جانبی اندازه‌گیری می‌شوند، یا به عبارت دیگر روش سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی با یکدیگر ترکیب می‌گردند. در این مقطع، تغییرات مقاومت ویژه در امتداد خط عمود بر خط پیمایش، ثابت در نظر گرفته می‌شود. به شبه مقطع قائم مقاومت ویژه حاصله از این اندازه‌گیری اصطلاحاً تصویر<sup>۱</sup>، و به روش به‌کار گرفته شده، به تصویر کشیدن<sup>۲</sup> می‌گویند. از نظر اقتصادی برداشت‌های دو بعدی به صرفه‌تر از سه بعدی می‌باشند. اطلاعات دریافت شده از روش به تصویر کشیدن مقاومت ویژه الکتریکی، می‌تواند مکمل روش‌های دیگر ژئوفیزیکی از جمله روش لرزه نگاری انعکاسی باشد [Loke, 2004].

<sup>۱</sup> - Image

<sup>۲</sup> - Imaging

## ۵-۲- نحوه برداشت‌های صحرائی در روش به تصویر کشیدن

در روش به تصویر کشیدن، با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته، از تعداد زیادی الکتروود استفاده می‌شود. در این روش الکتروودهای چیده شده توسط کابل مادر به واحد کنترل وصل می‌شوند و کاربر، آرایش مورد نظر را از طریق واحد کنترل، انتخاب می‌کند و سپس اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود. شکل (۵-۲)، نحوه به‌کارگیری این روش با استفاده از آرایش ونر با به‌کارگیری تعداد ۲۰ الکتروود نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲): نحوه برداشت با آرایش ونر با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته در روش به تصویر کشیدن [Loke, 2004].

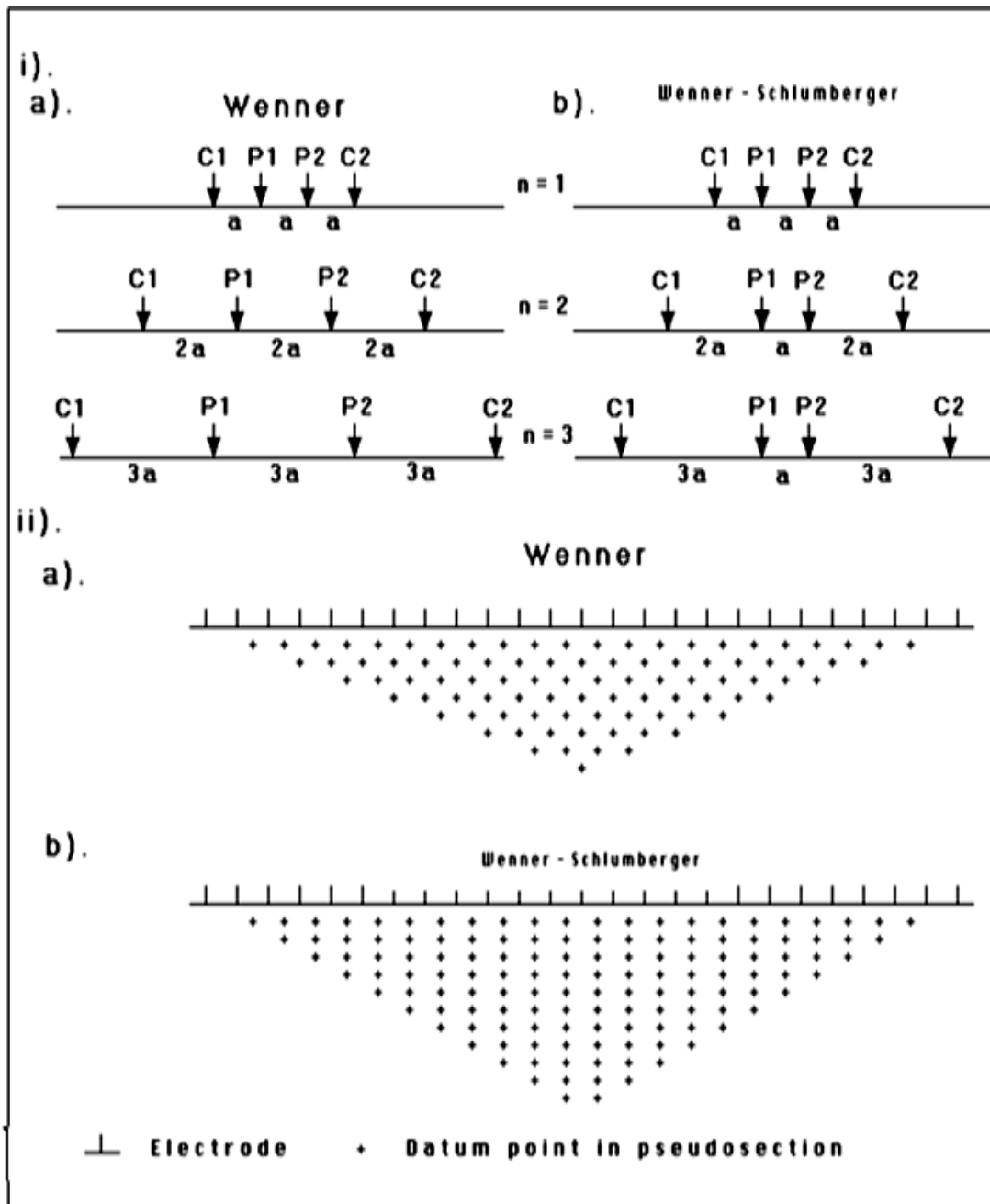
همان گونه که در شکل (۵-۲) دیده می‌شود، در مجموع شش پروفیل‌زنی با شش فاصله الکتروودی مختلف  $na$  (برای  $n=1,2,3,4,5,6$ ) انجام شده است. در اولین پروفیل‌زنی فاصله الکتروودی برابر  $1a$  در نظر گرفته شده است و در اولین ایستگاه از الکتروودهای شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ استفاده شده است.

الکتروود شماره ۱ به عنوان الکتروود جریان  $C_1$ ، الکتروود شماره ۲ به عنوان الکتروود پتانسیل  $P_1$ ، الکتروود شماره ۳ به عنوان الکتروود پتانسیل  $P_2$  و الکتروود شماره ۴ به عنوان الکتروود جریان  $C_2$  انتخاب شده‌اند. در ایستگاه بعدی به همین ترتیب از الکتروودهای شماره ۲، ۳، ۴ و ۵ استفاده شده‌اند تا اینکه بعد از ۱۷ ایستگاه، اندازه‌گیری به انتهای خط پروفیل یعنی الکتروودهای ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ برای فاصله الکتروودی 1a رسیده است. سپس برای دومین پروفیل‌زنی به ابتدای خط پروفیل بازگشت می‌شود و از الکتروودهای شماره ۱، ۳، ۵ و ۷ به ترتیب برای الکتروودهای  $C_1$ ،  $P_1$ ،  $P_2$  و  $C_2$  فوق‌الذکر برای فواصل الکتروودی 2a استفاده می‌گردد و ایستگاه به ایستگاه آن‌ها تا انتهای خط پروفیل جابجا می‌شوند. سپس به همین طریق پروفیل‌زنی‌های بعدی برای فواصل الکتروودی 3a، 4a، 5a و ... تکرار می‌شوند و هر چه فواصل بیشتر می‌شود تعداد اندازه‌گیری‌ها کمتر می‌شود.

در روش به تصویر کشیدن فوق‌الذکر، همچنین می‌توان به جای آرایش وئر، از آرایش وئر-شلومبرگر استفاده نمود. این آرایش هم به تغییرات جانبی و هم به تغییرات عمقی حساس می‌باشد و در حالت  $n=1$  به آرایش وئر تبدیل می‌شود. فاکتور  $n$  برای این آرایش، نسبت فاصله  $C_1P_1$  به  $P_1P_2$  می‌باشد. در محل‌هایی که تغییرات مقاومت ویژه هم به صورت عمقی و هم به صورت جانبی وجود دارد، این آرایش نسبت به آرایش وئر و دو قطبی- دو قطبی بهتر جواب می‌دهد.

در شکل (۳-۵) (i)، نحوه گسترش الکتروودها در دو آرایش وئر و وئر-شلومبرگر نشان داده شده است. به طوری که در شکل (۳-۵) (ii) دیده می‌شود، در مقطع قائم مربوط به آرایش وئر، با افزایش عمق هر سطر از داده‌ها، از تعداد داده‌ها، سه عدد کاهش می‌یابد. ولی در مقطع قائم مربوط به آرایش وئر-شلومبرگر، این تعداد کاهش، فقط دو عدد می‌باشد. بنابراین آرایش وئر-شلومبرگر پوشش افقی بهتری نسبت به آرایش وئر دارا می‌باشد [Loke, 2004].





شکل (۳-۵) مقایسه شبه مقاطع در آرایش‌های ونر و ونر-شلومبرگر [Loke, 2004].

### ۵-۳- نحوه تهیه شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی

به طوری که در شکل (۵-۲) دیده می‌شود، در زیر خط اندازه‌گیری مربوط به آرایش ونر، یک مقطع قائم نشان داده شده است. نقاط واقع در این مقطع، مختصات نقاط اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند. نقاط واقع در سطر اول تا سطر ششم در این مقطع، به ترتیب مربوط به پروفیل‌زنی‌های حاصله از فاصله الکترودی  $n=1$  تا  $n=6$  می‌باشند. هر نقطه در این مقطع دارای یک مختصات می‌باشد که طول آن برابر است با طول نقطه وسط آرایش مربوطه و عرض آن (عمق آن) برابر است با فاصله الکترودی آرایش مربوطه (بعضی از مؤلفین، این عمق را برابر با نصف فاصله الکترودی آرایش مربوطه می‌دانند). به عنوان مثال در شکل (۵-۲)، در بالای خط اندازه‌گیری، سه آرایش ونر، به ترتیب برای فاصله‌های الکترودی  $1a$ ،  $2a$  و  $3a$  نشان داده شده‌اند. مختصات نقاط اندازه‌گیری شده توسط این سه آرایش، در مقطع شکل مذکور، به ترتیب از بالا به پایین توسط سه علامت ستاره مشخص شده‌اند. بنابراین، مقدار مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده توسط هر آرایش در مقطع مذکور، به مختصات نقطه مربوطه نسبت داده می‌شود. سپس توسط نرم‌افزار Surfer، مقادیر هم مقاومت ویژه، کانتور (پربند) می‌شوند و در نهایت یک شبه‌مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصل می‌شود که توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین را نمایش می‌دهد.

### ۵-۴- انتخاب آرایش‌های مختلف در روش به تصویر کشیدن

انتخاب بهترین آرایش برای اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی، به نحوه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین، به میزان حساسیت دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی و به مقدار نویز زمینه، بستگی دارد.

به‌طور کلی ویژگی‌هایی که در یک آرایش باید مورد توجه قرار گیرند عبارتند از:

(۱) حساسیت آرایش به تغییرات عمقی و جانبی مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها در زیر سطح

زمین

(۲) عمق بررسی

(۳) پوشش افقی داده‌ها

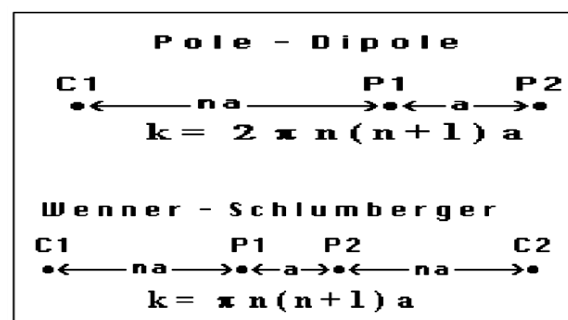
(۴) قدرت سیگنال

در جدول (۵-۱) عمق نفوذ آرایش‌های مختلف نشان داده شده‌اند. در این جدول  $Z_e$  عمق نفوذ موثر برای آرایش‌های مختلف،  $L$  طول کل آرایش و  $a$  فاصله بین دو الکتروود پتانسیل می‌باشد. به عنوان مثال اگر بیشترین فاصله الکتروودی  $a$  برای آرایش ونر، برابر ۱۰۰ متر باشد به عبارت دیگر بیشترین مقدار  $L$  برابر با ۳۰۰ متر باشد، در نتیجه با توجه به فاکتور  $\frac{Z_e}{a}$  یا فاکتور  $\frac{Z_e}{L}$ ، ماکزیمم عمق نفوذ در حدود ۵۱ متر خواهد بود. اما برای آرایش‌های دوقطبی-دوقطبی، قطبی-دوقطبی و ونر-شلومبرگر، فاکتور  $n$  را نیز باید در نظر گرفت. برای مثال در آرایش دوقطبی-دوقطبی اگر ماکزیمم مقدار  $a$  برابر ۱۰ متر باشد و ماکزیمم مقدار  $n$  برابر ۶ باشد، ماکزیمم مقدار  $L$  برابر ۸۰ می‌باشد بنابراین ماکزیمم عمق نفوذ برابر با:  $17 = 80 \times 0.216$  متر می‌باشد. طبق این جدول، مقادیر  $\frac{Z_e}{a}$  برای آرایش‌های قطبی-دوقطبی و ونر-شلومبرگر یکسان می‌باشند. در شکل (۵-۴) دو آرایش اخیرالذکر و فاکتورهای هندسی آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند.

در این پژوهش سعی شده است که در به‌کارگیری آرایش قطبی-دوقطبی، فواصل الکتروودهای  $C_1P_1$  و  $P_1P_2$ ، طوری افزایش یابند که پیوسته، مقدار  $n$  ثابت و برابر ۶ باشد. بنابراین مقدار  $\frac{Z_e}{a}$  برابر  $2/478$  می‌باشد. همچنین برای این آرایش مقدار فاکتور هندسی با توجه به جدول فوق‌الذکر، برابر  $263/89$  می‌باشد [Loke, 2004].

جدول (۵-۱): مقایسه عمق نفوذ آرایش‌های مختلف [Loke, 2004].

Array type	$z_e/a$	$z_e/L$	Geometric Factor
Wenner	0.519	0.173	6.2832
Dipole-dipole			
n = 1	0.416	0.139	18.850
n = 2	0.697	0.174	75.398
n = 3	0.962	0.192	188.50
n = 4	1.220	0.203	376.99
n = 5	1.476	0.211	659.73
n = 6	1.730	0.216	1055.6
n = 7	1.983	0.220	1583.4
n = 8	2.236	0.224	2261.9
Equatorial dipole-dipole			
n = 1	0.451	0.319	21.452
n = 2	0.809	0.362	119.03
n = 3	1.180	0.373	367.31
n = 4	1.556	0.377	841.75
Wenner - Schlumberger			
n = 1	0.519	0.173	6.2832
n = 2	0.925	0.186	18.850
n = 3	1.318	0.189	37.699
n = 4	1.706	0.190	62.832
n = 5	2.093	0.190	94.248
n = 6	2.478	0.191	131.95
n = 7	2.863	0.191	175.93
n = 8	3.247	0.191	226.19
n = 9	3.632	0.191	282.74
n = 10	4.015	0.191	345.58
Pole-dipole			
n = 1	0.519		12.566
n = 2	0.925		37.699
n = 3	1.318		75.398
n = 4	1.706		125.66
n = 5	2.093		188.50
n = 6	2.478		263.89
n = 7	2.863		351.86
n = 8	3.247		452.39
Pole-Pole	0.867		6.28319



شکل (۵-۴): مقایسه آرایش‌های قطبی-دوقطبی و ونر-شلومبرگر و فاکتورهای هندسی هر یک از آنها

[Loke, 2004].

## ۵-۵- دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده

### در روش به تصویر کشیدن

همان گونه که در شکل (۵-۲) دیده می‌شود، چون به کارگیری روش به تصویر کشیدن، مستلزم به دست آوردن تعداد زیادی داده می‌باشد که اگر بخواهیم آن‌ها را به صورت سنتی (دستی) برداشت کنیم، علاوه بر صرف وقت زیاد، مقرون به صرفه نیز نمی‌باشد. لذا اخیراً برای به دست آوردن این داده‌ها از دستگاهی که دارای تعداد زیادی الکتروود و کابل‌های چندین مغزه‌ای (چندین رشته‌ای) می‌باشند، مانند شکل (۵-۵)، (a)، استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها، به گونه‌ای به کار برده می‌شوند که نخست تعداد زیادی الکتروود در امتداد خط پروفیل با فاصله‌های منظم در زمین کوبیده می‌شوند. به هر الکتروود یک جعبه رله وصل می‌گردد، سپس در امتداد خط پروفیل، کابل چندین رشته‌ای (کابل اصلی یا کابل مادر) گسترده می‌شود. هر جعبه رله توسط یک سیم رابط به یکی از رشته‌های کابل اصلی وصل می‌گردد. دستگاه اندازه‌گیری مرکزی از یک دستگاه انتخاب‌کننده الکتروودها<sup>۱</sup> و یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین تشکیل شده است. دستگاه انتخاب‌کننده الکتروودها، به طور خودکار، از طریق هر جعبه رله‌ای که به هر الکتروود متصل می‌باشد، فرمان قطع و یا وصل نمودن سیم رابط به الکتروود را می‌دهد. تا بدین وسیله، آرایش الکتروودی مورد نظر، انتخاب و سپس مقاومت ویژه الکتریکی زمین اندازه‌گیری گردد. بدین ترتیب در اسرع وقت و بدون انجام اشتباهاتی که ممکن است در روش سنتی در هنگام جابجایی و قطع و وصل نمودن الکتروودها توسط دست رخ دهد، اندازه‌گیری‌ها به طور خودکار و متوالی انجام می‌گیرند.

<sup>۱</sup> - Server



شکل (۵-۵) (a): دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در روش به تصویر کشیدن، (b):

طریقه گسترش الکترودها [ABEM].

## فصل ششم

نحوه اندازه‌گیری داده‌های مقاومت

ویژه الکتریکی در محدوده چاه‌های

آب دوقلو



## ۶-۱- مقدمه

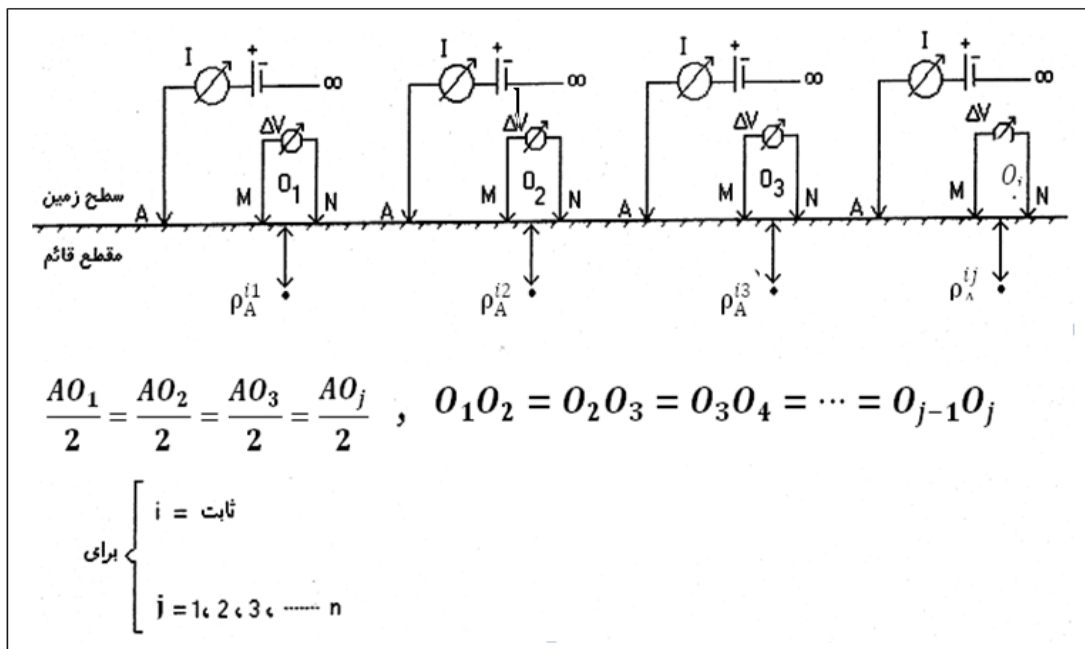
همان گونه که در بخش ۲-۲ ذکر گردید، منطقه‌ای که چاه‌های آب دوقلو در آن واقع می‌باشند، یک منطقه آهکی (آهک‌های کرتاسه) می‌باشند، که در اثر عملکرد نیروهای تکتونیکی و نفوذ نزولات جوی در آن، گسل‌ها، درزه‌ها، شکاف‌ها، و حفراتی بوجود آمده‌اند که منابع آب‌های زیرزمینی را تشکیل داده‌اند. این آب‌ها با آهک‌های در بر گیرنده آن‌ها، از نظر ژئوالکتریکی، تشکیل ناهمگنی‌های جانبی مقاومت ویژه الکتریکی را داده‌اند.

به طوری که در فصل ۴ توضیح داده شد، مناسب‌ترین آرایش برای اکتشاف ناهمگنی‌های جانبی مذکور، دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن می‌باشد. به منظور تهیه شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی از این ناهمگنی، باید امتداد خط پروفیل بر امتداد ناهمگنی عمود باشد. چون همان طور که در شکل (۲-۳) دیده می‌شود، در محل چاه‌های فوق‌الذکر، عرض دره بسیار تنگ می‌باشد، لذا به ناچار می‌باید خط پروفیل، تقریباً به اندازه ۱۳۰ متر از محل چاه شماره ۱۲ به طرف دهانه دره (که بازتر بود) به موازات خودش جابجا می‌شد. شکل مذکور موقعیت خط پروفیل فوق‌الذکر را نسبت به دره چاه‌های آب دوقلو به طور تقریبی نشان می‌دهد. بنابراین اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه الکتریکی در منطقه مذکور، با ترکیبی از روش‌های پروفیل‌زنی و سونداژزنی به شرح زیر انجام شده است.



## ۶-۲- روش پروفیل زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی - دوقطبی

به طوری که در شکل (۶-۱) دیده می‌شود، توسط اولین آرایش قطبی-دوقطبی مستقیم، مقاومت ویژه الکتریکی زمین در زیر ایستگاه  $O_1$  برای یک عمق ثابت اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که بخواهیم تغییرات مقاومت ویژه زمین را به‌طور جانبی برای یک عمق ثابت اندازه‌گیری نماییم، باید این آرایش را بدون اینکه فواصل بین الکترودهای آن را تغییر دهیم در امتداد خط پروفیل، ایستگاه به ایستگاه جابجا کنیم که فاصله ایستگاه‌ها در پروفیل چاه‌های آب دوقلو ۱۰ متر به ۱۰ متر می‌باشد. جابجایی باید با فاصله‌های یکسان و به‌طور متوالی انجام شود. این روش را پروفیل‌زنی الکتریکی می‌گویند. در این روش، از اندازه‌گیری در هر ایستگاه، یک مقاومت ویژه به دست می‌آید که آنرا توسط  $\rho_A^{ij}$  نمایش می‌دهیم. در این نمایش  $i$  یک عدد ثابت است که نمایان‌گر یک عمق اندازه‌گیری ثابت می‌باشد. ولی برای  $j$  داریم:

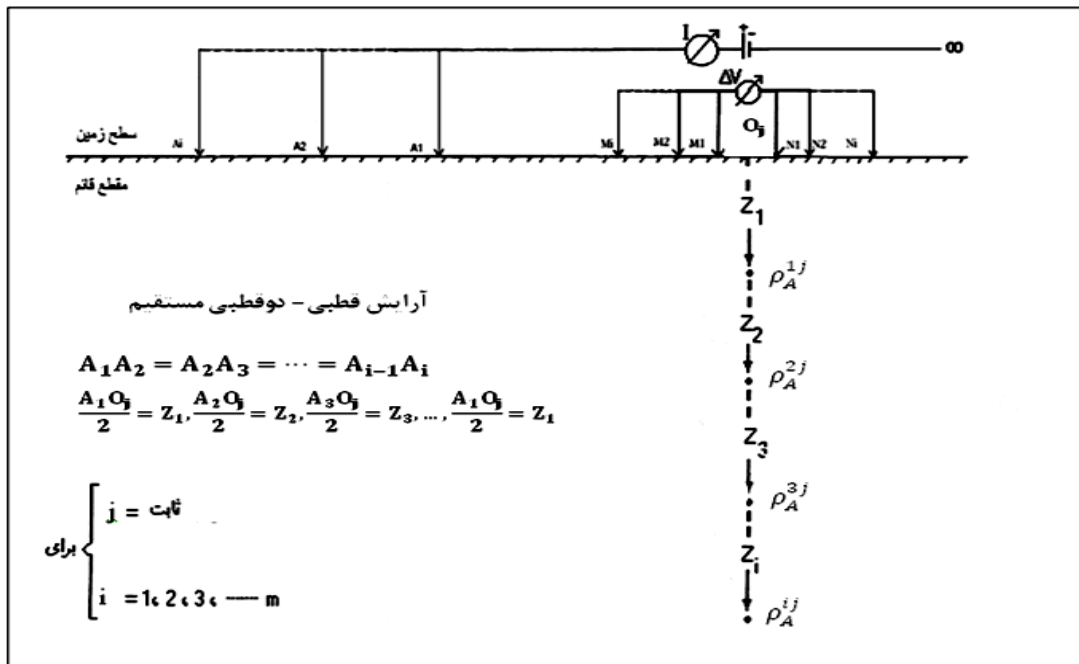
$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$


شکل (۶-۱) پروفیل‌زنی الکتریکی با آرایش قطبی-دوقطبی.

اگر O وسط MN باشد، محل‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری متوالی که با فاصله‌های یکسان از یکدیگر در روی خط پروفیل قرار دارند، می‌باشند. مقادیر  $\rho_A^{i1}, \rho_A^{i2}, \rho_A^{i3}, \dots, \rho_A^{ij}$  به ترتیب مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده در زیر ایستگاه‌های  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_j$  برای یک عمق ثابت می‌باشند.

### ۳-۶- روش سونداژ زنی الکتریکی توسط آرایش قطبی-دوقطبی

به طوری که در شکل (۲-۶) دیده می‌شود اگر بخواهیم تغییرات عمقی مقاومت ویژه زمین را برای یک ایستگاه ثابت (مثلاً  $O_j$ ) توسط آرایش قطبی-دوقطبی اندازه‌گیری نمائیم، باید الکترودهای پتانسیل M و N و الکتروود جریان A را بطور متوالی از وسط MN دور نمائیم.



شکل (۲-۶) سونداژ زنی الکتریکی با آرایش قطبی-دوقطبی.

در این پژوهش، زیاد شدن فاصله برای الکتروود جریان A، ۱۰ متر به ۱۰ متر می‌باشد و فاصله الکتروود-های پتانسیل M و N نیز از ۱/۶۵ متر برای  $n=1$  شروع می‌شود که هر بار با افزایش فاصله الکتروود جریان، این فاصله نیز دو برابر می‌شود و بنابراین فاکتور  $n$  ثابت می‌ماند به طوری که همواره نسبت

۶ AM/MN= برقرار می‌باشد. این روش را روش سونداژزنی الکتریکی می‌نامند. با توجه به شکل (۶-۲)، اگر الکتروود جریان  $A_1$  در فاصله  $A_1O_j$  قرار گیرد، مقاومت ویژه ای که بدین وسیله اندازه‌گیری می‌شود مربوط به زمینی است که در زیر نقطه  $O_j$  واقع و دارای عمقی است که از جدول (۵-۱) محاسبه می‌شود که تقریباً با  $\frac{A_1O_j}{2}$  برابر می‌باشد.

این مقاومت ویژه توسط  $\rho_A^{1j}$  نمایش داده می‌شود بنابراین با قرار دادن الکتروودهای جریان، به ترتیب در موقعیت‌های:  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$  به ترتیب مقادیر:  $\rho_A^{1j}, \rho_A^{2j}, \rho_A^{3j}, \dots, \rho_A^{ij}$  برای اعماق:  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_i$  زیر ایستگاه  $O_j$  به دست می‌آیند (ز در اینجا یک عدد ثابت فرض شده است).

## ۴-۴- ترکیب دو روش سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی

### توسط آرایش قطبی - دوقطبی

حال با توجه به روش‌های سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی فوق‌الذکر، توسط آرایش قطبی-دوقطبی، می‌توانیم این دو روش را با هم ترکیب نمائیم بدین طریق که روش سونداژزنی الکتریکی را که در شکل (۶-۲) شرح داده شده است، برای تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری که به‌طور متوالی و به فواصل یکسان از همدیگر در روی خط پروفیل قرار دارند، به ترتیب از  $O_1$  تا  $O_j$  را تکرار کنیم. در این صورت اگر مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی به دست آمده برای اعماق مختلف از هر ایستگاه را در زیر آن ایستگاه بنویسیم، می‌توانیم هر مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده را به صورت  $\rho_A^{ij}$  نمایش داد. در این نمایش  $i$  و  $j$  هر دو متغیر هستند. به‌طوریکه می‌توانیم بنویسیم:

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

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

با این تعریف، هر  $\rho_A^{ij}$  را می‌توان یک عنصر از یک ماتریس تلقی نمود و ماتریس حاصله را می‌توان بصورت  $[\rho_A]$  نمایش داد.

در ماتریس فوق‌الذکر، اندیس‌های  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ، تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی را به‌طور عمقی و اندیس‌های  $j=1, 2, 3, \dots, m$ ، تغییرات مقاومت ویژه را به‌طور جانبی نشان می‌دهند.

در این ماتریس، نوشتن اندیس  $A$  در زیر حرف  $\rho$  نمایانگر این است که الکتروود جریان،  $A$  نام دارد (مطابق شکل (۴-۶) الف). مشابه آنچه که برای آرایش مستقیم گفته شد، توسط آرایش معکوس نیز می‌توان با ترکیب نمودن روش‌های سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی، داده‌های مقاومت ویژه را بصورت  $\rho_B^{ij}$  نشان داد و یک ماتریس مانند  $[\rho_B]$  به دست آورد. نوشتن اندیس  $B$  در زیر حرف  $\rho$  نمایانگر این است که الکتروود جریان،  $B$  نام دارد (مطابق شکل (۴-۶) ب).

بطور کلی این روش را روش ترکیب یافته از سونداژزنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی می‌نامند.

## ۶-۵- ماتریس مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از دو آرایش قطبی - دو-

### قطبی متقارن

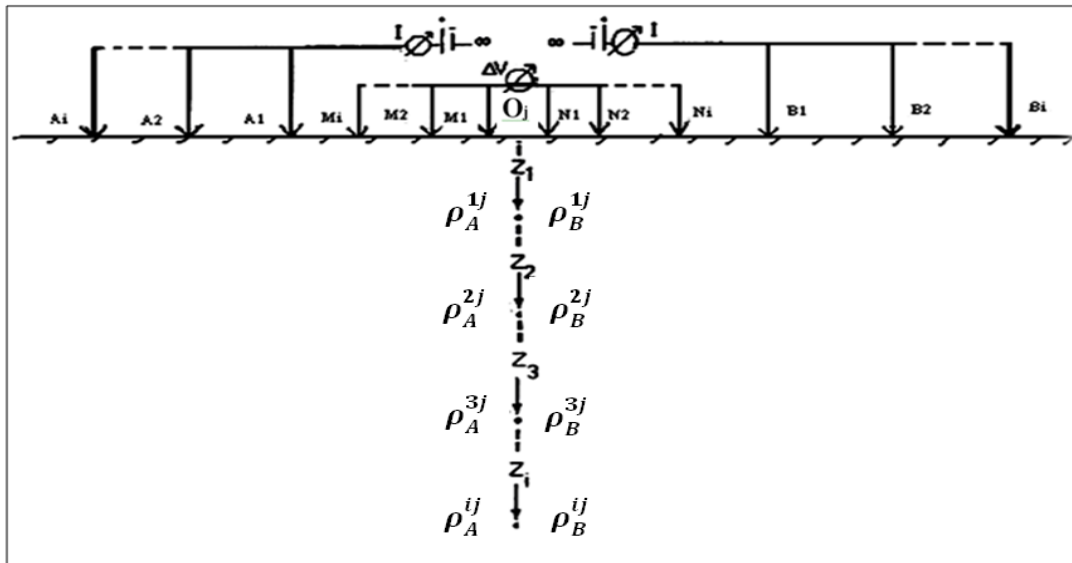
با توجه به توضیحات داده شده در بخش ۴-۷، و با توجه به نحوه تشکیل دو ماتریس  $[\rho_A]$  و  $[\rho_B]$  به طریق فوق‌الذکر، می‌بینیم که برای زیر هر ایستگاه اندازه‌گیری مانند  $O$  به هر عمق، دو داده تعلق می‌گیرد که از این دو داده، یک داده  $\rho_A^{ij}$  توسط آرایش مستقیم و یک داده  $\rho_B^{ij}$  توسط آرایش معکوس، اندازه‌گیری می‌شود. در این صورت، ترکیب دو آرایش مستقیم و معکوس را دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن (متقارن نسبت به  $O$  واقع در وسط  $MN$ ) می‌نامند.

## ۶-۶- نحوه اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده

### چاه‌های آب دوقلو با دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن

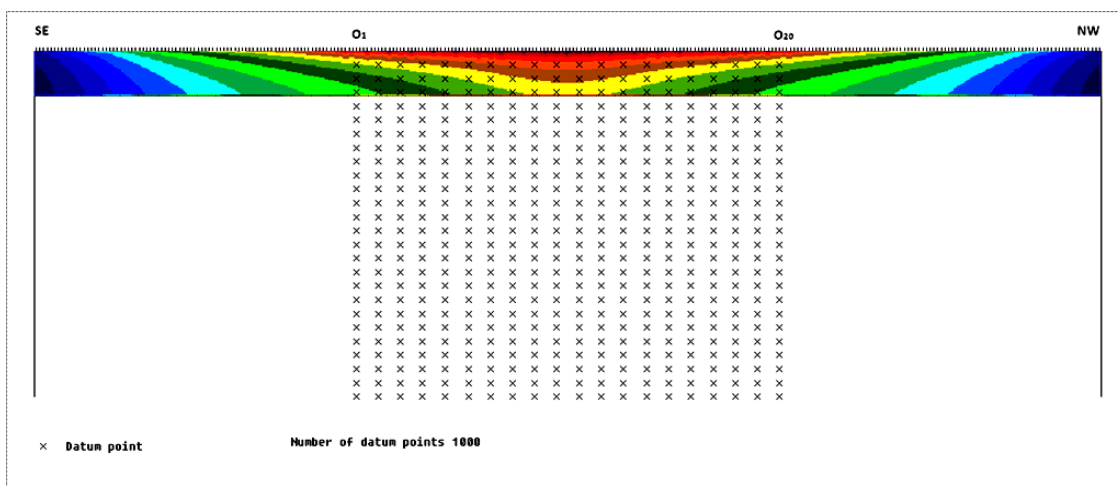
به طوری که در شکل‌های (۲-۳) و (۷-۷) دیده می‌شود، در روی خط پروفیل مربوط به چاه‌های آب دوقلو بیست ایستگاه اندازه‌گیری در نظر گرفته شده است. اندازه‌گیری‌ها توسط روش ترکیب یافته از سونداژنی الکتریکی و پروفیل‌زنی الکتریکی با استفاده از دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن انجام شده است. فاصله هر ایستگاه اندازه‌گیری تا ایستگاه اندازه‌گیری مجاورش برابر ۱۰ متر می‌باشد. افزایش فاصله الکترودهای جریان به صورت ۱۰ متر به ۱۰ متر و به طور متوالی صورت گرفته است. به منظور ثابت باقی ماندن ضریب  $n$  در رابطه  $AM/MN = n$ ، در هر اندازه‌گیری، فاصله  $MN$  متناسب با فاصله  $AM$  افزایش یافته است، به طوری که در اندازه‌گیری‌های متوالی، همواره ضریب  $n$  برابر عدد ۶ ثابت بوده است.

شکل (۶-۳) نحوه قرار دادن الکترودها را در دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن، نشان می‌دهد. در شکل مذکور دیده می‌شود که با به کارگیری آرایش‌های مستقیم و معکوس، داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده، برای عمق  $Z_1$ ، به ترتیب شامل  $\rho_A^{1,j}$  و  $\rho_B^{1,j}$  می‌باشند. بنابراین با افزایش فاصله الکترودهای جریان از  $O_j$ ، فاصله الکترودهای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل نیز افزایش می‌یابد، و داده‌هایی که از این طریق حاصل می‌شوند، به مکان عمیق‌تری ( $Z_2, Z_3, \dots$ ) نسبت داده می‌شوند.



شکل (۳-۶): نحوه قرار دادن الکترودها در دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن.

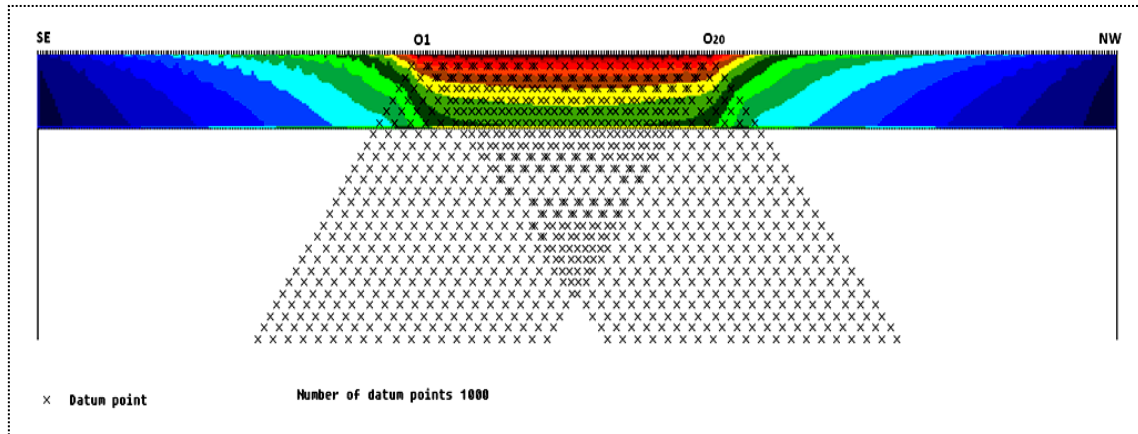
بنابراین با تکرار این روش برای ۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری، و با نسبت دادن داده‌ها به مکان خود (واقع در زیر ایستگاه‌ها و در اعماق مربوطه)، می‌توان نحوه قرارگیری نقاط داده‌ها را در زیر ایستگاه‌ها، به صورت شکل (۴-۶) نمایش داد. لازم به ذکر است که در شکل مذکور، فقط مکان داده‌ها مدنظر می‌باشد و قسمت رنگی در بالای شکل، چیز خاصی را نشان نمی‌دهد.



شکل (۴-۶): نحوه قرارگیری داده‌ها در زیر ایستگاه‌ها، برای وقتی که داده‌های اندازه‌گیری شده به وسط الکترودهای

پتانسیل، نسبت داده شوند [نرم‌افزار Res2dinv].

ولی با توجه به طریقه برداشت در این پژوهش، اگر داده‌های فوق‌الذکر با دو آرایش متقارن لوک به نرم افزار Res2dinv داده شود، یعنی مرکز آرایش قطبی- دو قطبی، وسط الکترودهای C1P2 در نظر گرفته شود، نحوه قرارگیری داده‌ها در زیر ایستگاه‌ها به صورت شکل (۵-۶) خواهد بود.



شکل (۵-۶): نحوه قرارگیری داده‌ها در زیر ایستگاه‌ها، برای وقتی که داده‌های اندازه‌گیری شده به وسط فاصله بین الکتروود جریان و الکتروود پتانسیل دورتر، نسبت داده شوند [نرم‌افزار Res2dinv].

با توجه به شکل‌های (۴-۶) و (۵-۶) به وضوح مشخص است که بعضی از داده‌های حاصل شده از به- کارگیری آرایش‌های مستقیم و معکوس بر روی هم همپوشانی ندارند. بنابراین با توجه به نحوه قرار گرفتن داده‌ها در مکان مناسب در شکل (۴-۶)، می‌توان نتیجه گرفت که روش کاروس و پرنو در نهایت، بعد از مدل‌سازی، منجر به تولید مدل بهتری می‌شود که به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد.

## ۶-۷- مختصری در مورد دستگاه مورد استفاده در برداشت صحرائی

### چاه‌های آب دوقلو

دستگاه اندازه‌گیری به‌کارگرفته شده ساخت شرکت ABEM سوئد است و مدل آن TERRAMETER SAS 300 C می‌باشد. توسط این دستگاه می‌توان مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزای زمین را اندازه‌گیری نمود [ABEM, Instruction manual].



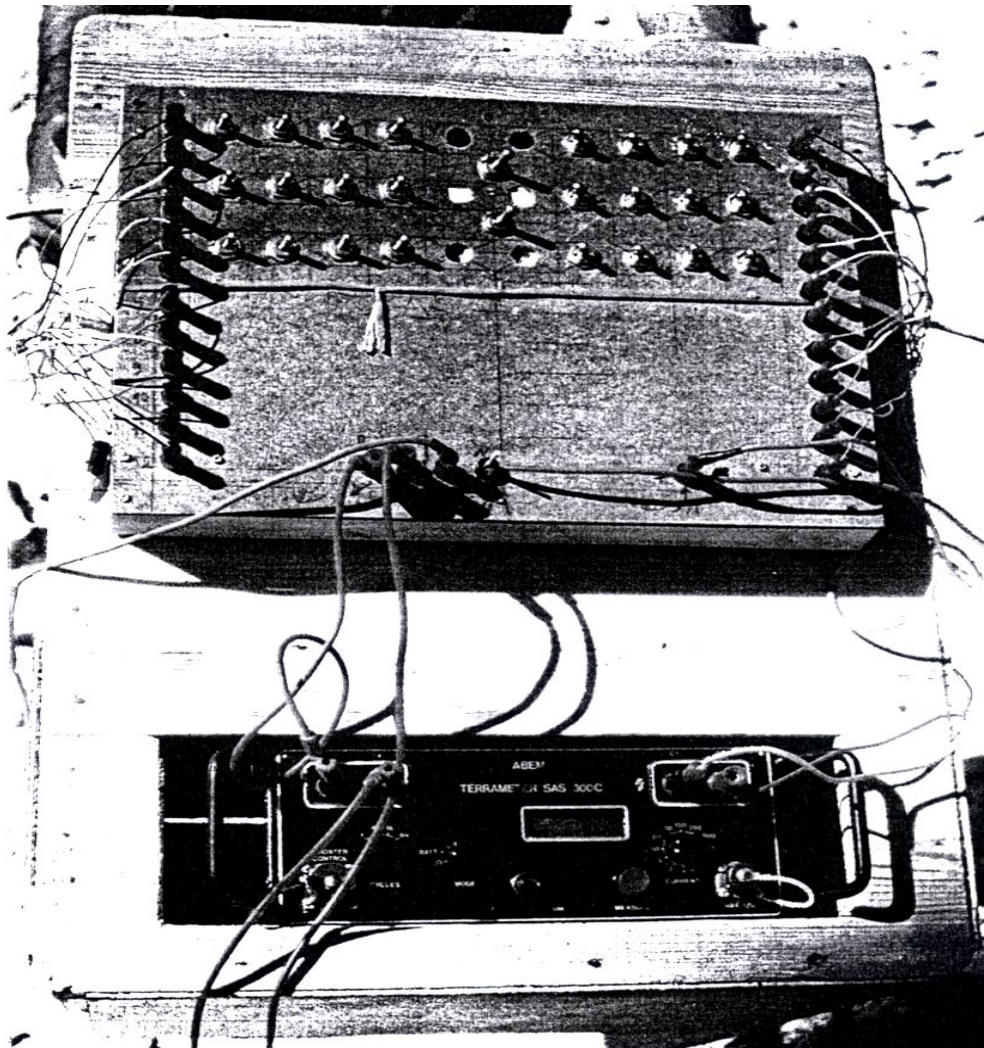
شکل (۶-۶): دستگاه SAS 300 ، ساخت شرکت سوئدی ABEM [ABEM, Instruction manual].

چون دستگاه مذکور، فاقد دستگاه انتخاب‌کننده چندین الکتروده به‌طور خودکار می‌باشد، لذا، مجری طرح (دکتر پیروز) به‌طور ابتکاری، برای برداشت‌های دوعدی و به منظور سرعت بخشیدن به نحوه اندازه‌گیری در صحرا، از یک کابل ۱۲ رشته‌ای و یک صفحه کلید استفاده نموده است. انتهای هر یک از این رشته‌ها به ترتیب به یکی از الکترودهای  $A_1$  تا  $A_{12}$  و در مرحله بعدی به  $A_{13}$  تا  $A_{25}$  وصل می‌گردد.

همچنین ابتدای هر یک از این رشته‌ها به فیشی متصل است که آن نیز به صفحه کلیدی که در بالای شکل (۶-۷) مشاهده می‌گردد، وصل می‌باشد. به‌طوری‌که 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. همین سیستم برای اندازه‌گیری توسط الکترودهای  $B_1$  تا  $B_{25}$  تکرار شده است. یا به عبارت دیگر توسط یک کابل دوازده رشته‌ای، این الکترودها توسط ۱۲ فیش به کنار سمت راست صفحه کلید متصل می‌باشند که توسط ۱۲ عدد کلید قطع و وصلی که در قسمت سمت راست صفحه کلید دیده می‌شوند، ارتباط هر یک از الکترودهای یاد شده با دستگاه اندازه‌گیری برقرار می‌گردد.



شکل (۶-۷) دستگاه SAS 300 و جعبه کلید انتخاب کننده الکترودها به صورت دستی [پیروز، ۱۳۸۲ الف].

## فصل هفتم

مدل سازی معکوس دوبعدی،

و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه

## ۷-۱- مقدمه

داده‌های اندازه‌گیری شده که در طی عملیات صحرایی حاصل می‌گردند، در واقع یک سری اعداد خام می‌باشند که با قاعده مشخص و تحت شرایط خاصی به دست آمده‌اند و تعیین دقیق وضعیت لایه‌های زمین از روی این داده‌ها (به طور مستقیم) غیر ممکن است. بنابراین تعیین رابطه بین داده‌های تجربی به دست آمده و توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و به عبارت دیگر مدل-سازی داده‌های برداشتی جهت تعیین وضعیت لایه‌های زیر سطحی ضروری می‌باشد. افرادی چون جانسون و دیگران پس از سال‌ها تحقیق بر روی مسائل معکوس‌سازی، روش‌های مختلفی را جهت حل این گونه مسائل ارائه نموده‌اند. تمامی روش‌های مذکور، یک مدل اولیه مناسب برای داده‌های تجربی نیاز دارند تا در کمترین زمان ممکن به مدل واقعی زمین، همگرا گردند. انتخاب مدل صحیح و مناسب به عنوان مدل اولیه در عملیات مدل‌سازی از این جهت دارای اهمیت است که باعث به دست آمدن مدل واقعی زمین می‌گردد. لونیبرگ نشان داد که با تصحیح پارامترهای مدل اولیه در تقریبات تیلور در هر مرحله از تکرار می‌توان از ناپایدار شدن مسئله و به دست آوردن نتایج غلط جلوگیری نمود.

این نظریه چند سال بعد توسط مارکوارت [Marquardt, 1963] مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب یک الگوریتم خطی مناسب جهت مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد شد که امروزه به رگریسون ریج یا روش مارکوارت- لونیبرگ معروف است.

مدل سازی ژئوفیزیکی عمدتاً به دو دسته مدل سازی فیزیکی و مدل سازی عددی تقسیم می شود. در روش مدل سازی فیزیکی که گاهی مدل سازی آزمایشگاهی نیز نامیده می شود، ساختارهای زمینی را در مقیاس های آزمایشگاهی شبیه سازی می کنند و سپس با استفاده از آرایش های مختلف ژئوالکتریکی و به روش های پروفیل زنی و سونداژ زنی الکتریکی، داده های مقاومت ویژه قرائت و در نهایت با جواب های صحرائی مطابقت داده می شوند. مدل سازی فیزیکی عمدتاً با مشکلاتی همراه است. یکی از این مشکلات این است که، جواب های مدل های فیزیکی با جواب های صحرائی به این دلیل که شرایط زمین طبیعی، کاملاً متفاوت از شرایط کنترل شده آزمایشگاهی است، تفاوت دارد. به هر حال این روش به طور کلی مفید است، اما همیشه جوابگو نیست. مشکل دیگر، وقت گیر و پرهزینه بودن آن است و از طرفی، با پیشرفت و توسعه علوم کامپیوتر، امروزه اغلب از مدل سازی عددی استفاده می شود. در مدل سازی عددی داده های ژئوفیزیکی را به دو نوع مدل سازی پیشرو و مدل سازی معکوس تقسیم بندی می کنند. داده های خام به دست آمده از زمین، هیچ گونه اطلاعات کمی در رابطه با توزیع خواص فیزیکی زمین و یا عمق آنومالی ها ارائه نمی کنند. پس مدل سازی داده ها در ژئوفیزیک امری اجتناب ناپذیر است. هم مدل سازی پیشرو و هم مدل سازی معکوس، رابطه بین توزیع خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه و پاسخ ژئوفیزیکی (اندازه گیری های صحرائی) را بیان می کنند. اگر از توزیع خواص فیزیکی به پاسخ ژئوفیزیکی برسیم، مدل سازی را مستقیم می نامند، ولی استنباط خواص فیزیکی زمین مورد مطالعه از داده های مشاهده ای را، مدل سازی معکوس می گویند. ورودی مدل سازی معکوس، داده های صحرائی است که به کمک محاسبات مربوط به تئوری معکوس سازی بر روی آن ها، پارامترهای مدل، به عنوان خروجی ارائه می شوند [Loke and barker, 1996].

## ۷-۲- پردازش داده های حاصله از اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی

### در مجاورت چاه های آب دوقلو

در این تحقیق برای مدل سازی معکوس دو بعدی از نرم افزار Res2dinv استفاده شده است. به منظور کاهش اثرات داده های نویزی و پرت<sup>۱</sup> (نویزی که از منابع غیر تصادفی از قبیل اشتباهات کاربر یا مشکلات دستگاهی وارد می شود)، از چند گزینه از منوهای نرم افزار مذکور استفاده شده است که در زیر به اختصار توضیح داده می شود.

روش متداول حداقل مربعات هموار مقید شده<sup>۲</sup> سعی می کند مربع<sup>۳</sup> اختلاف بین مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه شده را به حداقل برساند. در این روش، چنانچه داده ها شامل نویز تصادفی باشند، شاهد نتایج قابل قبولی خواهیم بود. ولی چنانچه مجموعه داده ها شامل نقاط داده ای پرت باشد، رضایت بخش نیست. نقاط داده ای پرت تأثیر زیادی روی نتایج مدل سازی معکوس دارند. برای کاهش اثر نقاط داده ای پرت، می توان از روش معکوس سازی استفاده کرد که اختلاف مطلق<sup>۴</sup> (توان اول) بین مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده و اندازه گیری شده حداقل می رسد. در نرم افزار Res2dinv، این روش مدل سازی را می توان با کلیک گزینه "Select robust inversion" تحت فهرست "Inversion" انتخاب کرد. این کار منجر به تولید مدلی با مرزهای مشخص بین نواحی مختلف با مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مختلف می شود، اما در هر ناحیه مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی تقریباً ثابت است. این روش در مناطقی که بافت زمین شناسی و توده های زیر سطح زمین مرزهای تیز و مشخصی داشته باشند (از قبیل مرز بین سنگ بستر و خاک و یا توده های همگن متراکم)، کاملاً مناسب است [رحمانی جوینانی، ۱۳۸۷].

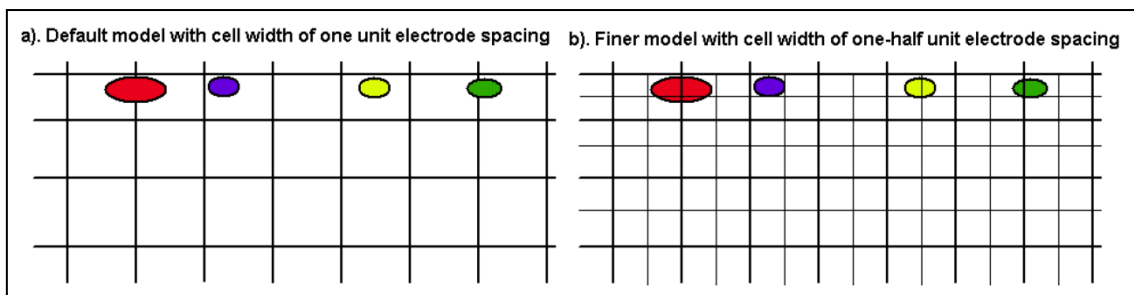
<sup>۱</sup>- Outlier

<sup>۲</sup>- Smoothness-Constrained Least Square

<sup>۳</sup>-Square

<sup>۴</sup>-Absolute

نرم افزار به صورت پیش فرض، مدلی را استفاده می کند که پهنای سلول های درونی مدل، برابر واحد فاصله الکترودی می باشد (مانند شکل (۱-۷) a). این پیش فرض به خوبی در خیلی موارد نتیجه بخش است. در برخی وضعیت ها، بویژه جایی که تغییرات مقاومت ویژه در نزدیکی سطح زمین خیلی زیاد است، می توان نتایج بهتری را با استفاده از سلول های مدل باریک تر به دست آورد (مانند شکل (۱-۷) b). با استفاده از گزینه "Use model refinement" در فهرست "Inversion" می توان این گزینه را انتخاب کرد.



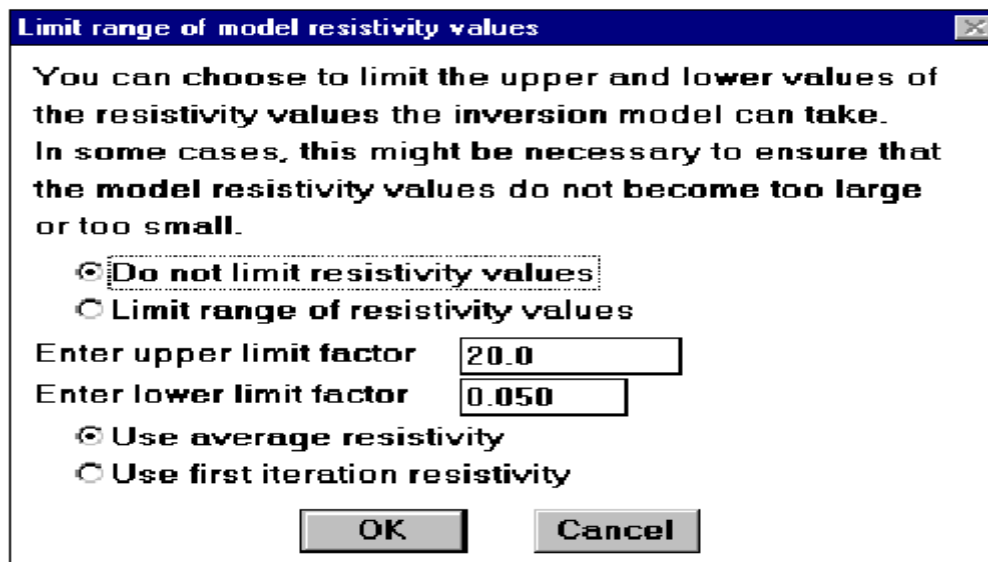
شکل (۱-۷): تأثیر اندازه سلول ها بر مدل. a: مدلی که پهنای سلول های آن به اندازه واحد الکترودی می باشد، b:

مدلی با پهنای سلولی برابر با نصف فاصله الکترودی [Loke, 2004].

روش معکوس سازی ترکیبی<sup>۱</sup> برای وضعیت های غیر عادی در نظر گرفته شده است. منظور از وضعیت های غیر عادی شرایطی است که مقادیر حساسیت بلوک های مدل به سبب تغییرات زیاد مقاومت ویژه الکتریکی به طور قابل توجهی در هم ریخته باشند. با به کارگیری گزینه مذکور می توان، روش های مارکوارت (رگرسیون- ریچ) و اکام (شرط هموار بودن) را، با هم دیگر ترکیب نمود که در برخی موارد منجر به کاهش درهم ریختگی خواهد شد. این روش در حل ساختارهای فشرده از قبیل حفره یا توده معدنی که اندازه وسعت و ضخامتش کمی کوچکتر از عمق آن است، نتایج بهتری دارد [رحمانی جویانی، ۱۳۸۷].

<sup>۱</sup> - Use combined inversion method

گزینه محدود کردن حدود تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی مدل<sup>۱</sup> به کاربر اجازه می‌دهد که حدود تغییرات مقادیر مقاومت ویژه‌ای که در روند معکوس‌سازی به کار می‌رود را محدود کند. در مثال شکل (۲-۷)، حد بالا ۲۰ برابر، و حد پایین ۰/۰۵ برابر، مقدار متوسط مقاومت ویژه مدل، می‌باشد. این برنامه انعطافی در محدودیت‌ها اعمال می‌کند که اجازه می‌دهد مقادیر مقاومت ویژه مدل، در یک حد معینی باشد. به این ترتیب گزینه مذکور به شدت از مقادیر مقاومت ویژه خیلی بزرگ یا خیلی کوچک مدل که به صورت فیزیکی غیر طبیعی می‌باشند، اجتناب می‌کند. [رحمانی جوینانی، ۱۳۸۷].



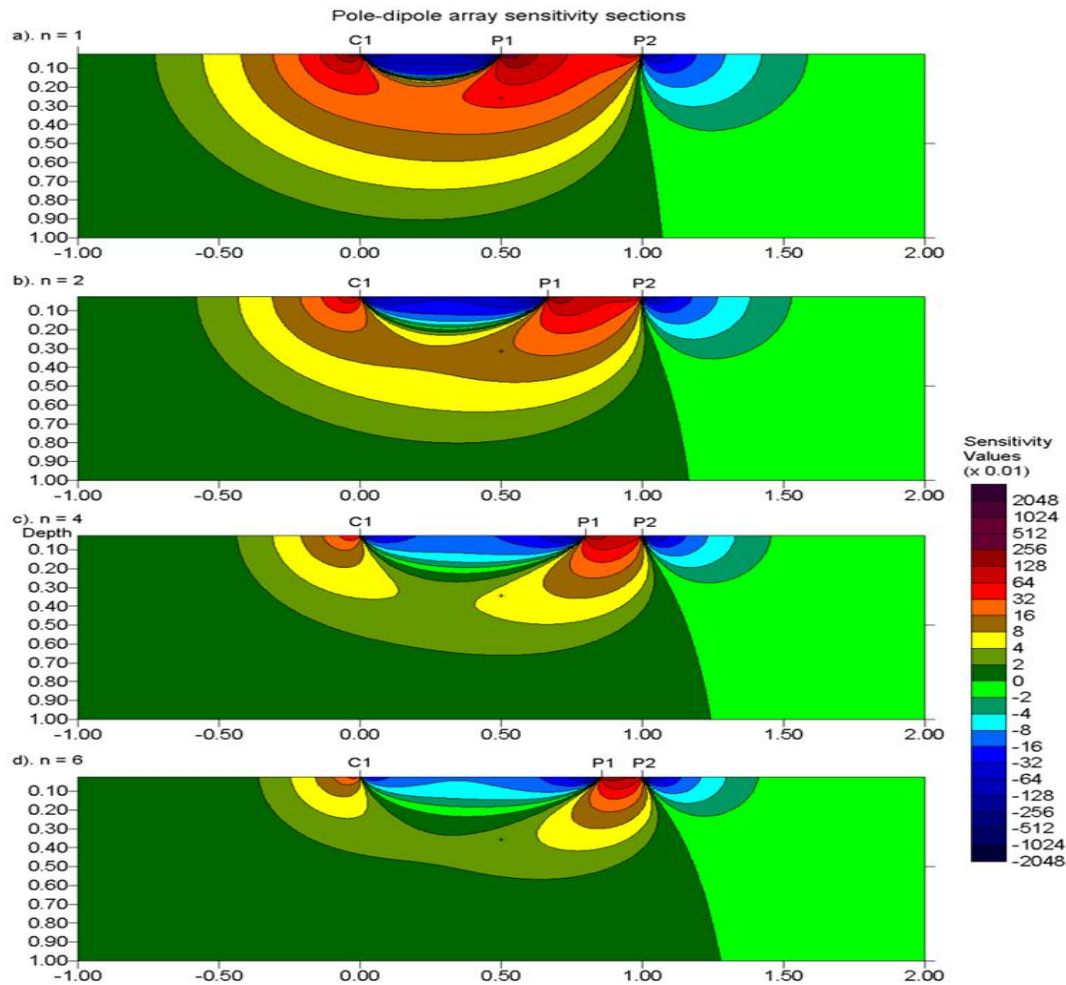
شکل (۲-۷): محدود کردن حدود تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی مدل [Loke, 2004].

<sup>۱</sup> - Limit range of model resistivity

بعد از به کارگیری نرم افزار Res2dinv، سه شکل حاصل می گردد. شکل (a)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده، حاصله از داده های خام صحرائی می باشد. شکل (b) شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده های خام صحرائی می باشد و شکل (c)، مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی مدل حاصله از به کارگیری برنامه معکوس سازی می باشد. با توجه به مقطع سوم، کار تفسیر انجام می گیرد.

نکته مهم و قابل توجه در رسم مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی بوسیله نرم افزار Res2dinv این است، که این نرم افزار تحت عنوان دو آرایش قطبی-دوقطبی، آرایش های مستقیم و معکوس که مطابق شکل (۷-۴) توسط لوک ارائه شده اند را می شناسد و مقدار مقاومت ویژه الکتریکی اندازه گیری شده را به زیر نقطه وسط الکتروود جریان و الکتروود پتانسیل دورتر نسبت می دهد (نگاه کن به بخش ۷-۴). ولی با توجه به شکل (۳-۷) نتیجه می شود که مقدار حساسیت، بین الکتروودهای پتانسیل، نسبت به نواحی دیگر بیشتر می باشد. لذا شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی تهیه شده به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو، دارای حساسیت بیشتری از شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی تهیه شده به طریقه لوک می باشد.





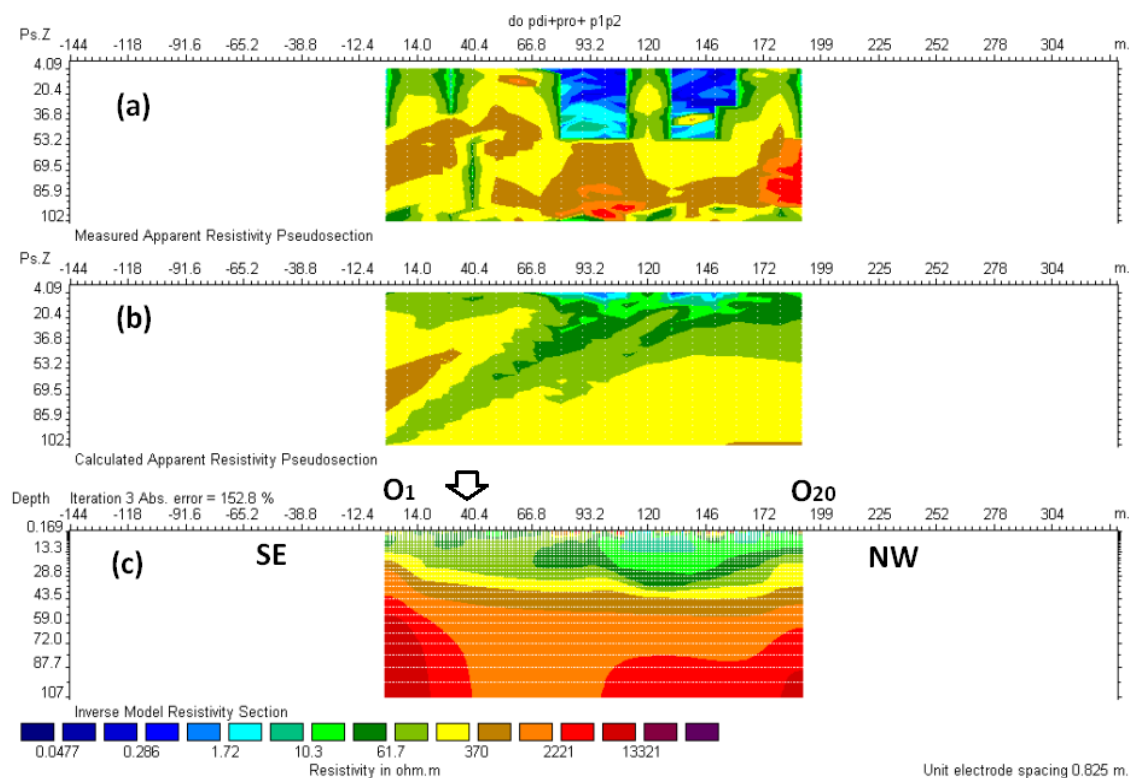
شکل (۷-۳): مقاطع حساسیت آرایش قطبی- دو قطبی برای (a . n=1 (b . n=2 (c . n=4 (d . n=6 [Loke, 2004].

لذا در این پژوهش، محاسبات به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو انجام شده‌اند و در هنگام استفاده از نرم افزار Res2dinv نیز بر همین اساس عمل شده است. نتایج حاصله از این روش، با واقعیت‌های زمین‌شناسی و چاه‌های حفر شده در منطقه، هم‌خوانی بهتری دارند. یعنی اگر روش برداشت داده‌ها به صورتی که در فصل ۶ توضیح داده شده است باشد، و داده‌ها نیز به طریقه کاروس و پرنو به نرم افزار Res2dinv داده شوند، نتایج قابل قبول‌تری حاصل می‌گردند.

### ۳-۷- تفسیر داده های حاصله از اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی

#### در مجاورت چاه های آب دوقلو

با توجه به توضیحات داده شده در بخش ۲-۷، داده های حاصله از اندازه گیری مقاومت ویژه الکتریکی با دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن در محدوده چاه های آب دوقلو، توسط نرم افزار Res2dinv به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو مدل سازی شده اند و نتیجه آن به ترتیب در سه بخش (a)، (b) و (c) در شکل (۴-۷) رسم گردیده اند. لازم به ذکر می باشد که داده های مقاومت ویژه در شکل مذکور، به روش پروفیل زنی به نرم افزار داده شده اند.



شکل (۴-۷): (a)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده، حاصله از داده های خام صحرائی می باشد. (b) شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده های خام صحرائی می باشد (c): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده ها با نرم افزار Res2dinv به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو (داده ها به روش پروفیل زنی به نرم افزار داده شده اند).

با توجه به شکل (c(4-7)) (و همچنین شکل (a) (7-7))، ایستگاه  $O_1$ ، مبدأ خط پروفیل در نظر گرفته شده است و ایستگاه  $O_5$  روی گسل سمت چپی دره، و ایستگاه  $O_{11}$  بر روی گسل سمت راستی دره، واقع می‌باشند که به ترتیب در فواصل ۴۰ متری و ۱۰۰ متری از مبدأ خط پروفیل قرار دارند. به طوری که در شکل (c(7-4)) دیده می‌شود، تا عمق کمتر از ۴۰ متر را لایه‌های تقریباً موازی تشکیل داده‌اند که بیانگر رسوبات رودخانه‌ای می‌باشند. به دلیل پایین بودن مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی نسبی این رسوبات، می‌توان نتیجه گرفت که ذرات تشکیل دهنده آن‌ها تا عمق ۲۵ متری، دارای ابعاد کوچک، و ریز دانه می‌باشند که میزان رس در آن‌ها، نسبتاً بالا می‌باشد. و عمق ۲۵ تا ۴۰ متری را، رسوبات با دانه‌بندی بزرگتر تشکیل داده است که به تدریج از میزان رس موجود کاسته شده و میزان آهک‌های خرد شده و هوازده شده افزایش یافته است.

در فاصله ۱۱۰ تا ۱۳۰ متری از مبدأ خط پروفیل، و در عمق کمتر از ۲۰ متر، یک ناحیه کم مقاومت ویژه الکتریکی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از میزان بالای رس موجود در آن‌جا، و تجمع آب و رطوبت رودخانه ( قسمتی از رودخانه که بالاتر از خط پروفیل، تغییر جهت داده است. شکل (7-7))، در خلل و فرج‌های موجود در محدوده مذکور باشد.

با توجه به شکل (c(4-7))، برای اعماق بیشتر از ۴۰ متر می‌توان گفت که:

✓ در فاصله بین ۳۰ تا ۵۰ متری بر روی خط پروفیل، تغییرات جانبی مقاومت ویژه به‌طور محسوس مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، در این فاصله، گسل سمت چپی دره به‌طور کاملاً واضح مشاهده می‌شود. چاه حفاری شده در ۴۰ متری از مبدأ خط پروفیل، و در مرز زون شکسته شده قرار دارد که با علامت فلش بر روی مقطع مدل‌سازی شده، مشخص می‌باشد.

✓ ضخیم‌ترین محدوده خرد شده با مقاومت ویژه پایین‌تر از نواحی اطراف، در فاصله ایستگاه‌های  $O_5$  تا  $O_{11}$  (فاصله ۴۰ متری تا ۱۰۰ متری از مبدأ خط پروفیل) قرار دارد که جهت آن از جنوب شرقی به سمت شمال غربی می‌باشد. این ناحیه باریک با پهنای تقریبی ۶۰ متر، احتمالاً یک زون شکسته شده در سنگ بستر است که کم شدن مقاومت ویژه، می‌تواند ناشی

از کم تراکم بودن و ترک دار بودن آهک های محدوده مذکور، و در نتیجه آب دار بودن آنها باشد.

✓ در فاصله بین ۱۰۰ تا ۱۲۰ متری بر روی خط پروفیل و در عمق تقریباً ۸۰ متری برای بار دوم، تغییرات جانبی مقاومت ویژه به طور محسوس مشاهده می شود. به عبارت دیگر می توان گفت، در این فاصله، گسل سمت راستی دره عمل کرده است.

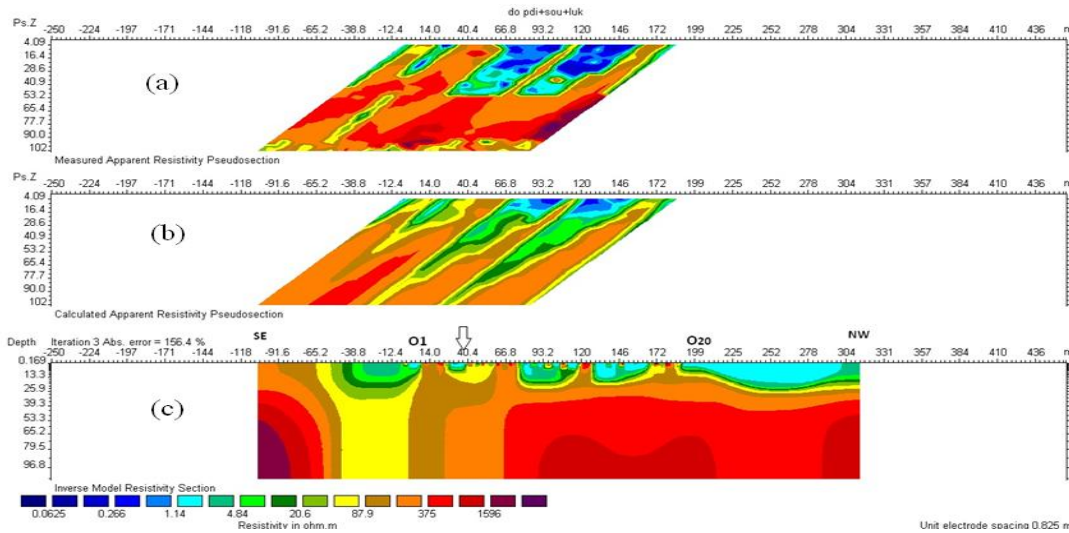
✓ از فاصله ۱۲۰ متری به بعد ( به سمت شمال غربی)، به دلیل تراکم بیشتر آهک ها، و غیر قابل نفوذ بودن برای عبور آب های زیرزمینی، شاهد افزایش مقاومت ویژه می باشیم.

همچنین داده های اخیرالذکر توسط نرم افزار Res2dinv ولی با روش لوک مدل سازی شده اند که نتیجه آن به ترتیب در سه بخش (a)، (b) و (c) از شکل (۷-۵) رسم گردیده اند. در این شکل مشاهده می شود که بخش های (a) و (b) که به ترتیب شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی اندازه گیری شده و محاسبه شده می باشند، به صورت شکل های مایلی در آمده اند (برای توضیحات بیشتر به بخش ۶-۶ مراجعه شود). ولی این وضعیت در شکل (۷-۴) وجود ندارد.

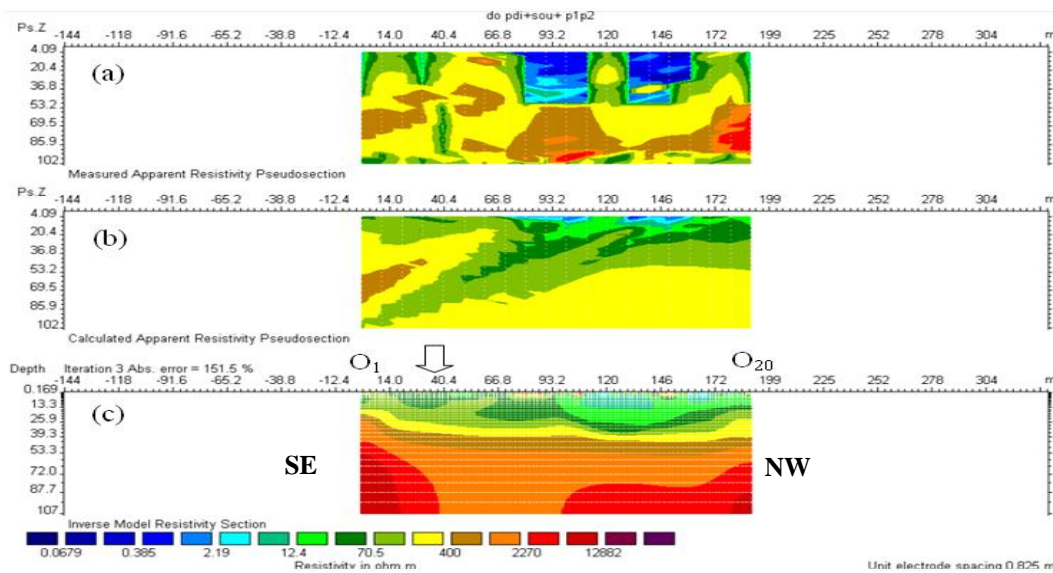
همچنین در قسمت (c) از شکل (۷-۵) دیده می شود که مقطع مدل سازی شده شامل داده هایی می باشد که در فاصله تقریباً ۱۰۰-۳۱۰ متری نسبت به مبدأ خط پروفیل، واقع می باشند. ولی در واقع، مکان ایستگاه اول ( $O_1$ )، در موقعیت صفر و مکان ایستگاه آخر ( $O_{20}$ )، در فاصله ۱۹۰ متری از مبدأ خط پروفیل می باشند. لذا، این مقطع حاوی اطلاعات اضافی می باشد و با واقعیت های زمین شناسی و چاه های حفر شده در منطقه هم خوانی ندارد.

برای اطمینان بیشتر از به کارگیری روش کاروس و پرنو، داده های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده در محدوده چاه های آب دوقلو، به روش سونداژنی نیز، به نرم افزار Res2dinv داده شد و شکل (۷-۶) مقطع مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از این پردازش به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو را نشان می دهد.

همان طور که از این شکل دیده می شود، نتیجه مقطع مدل سازی شده کاملاً شبیه به مقطع مدل سازی شده با روش پروفیل زنی در شکل (۴-۷) می باشد.



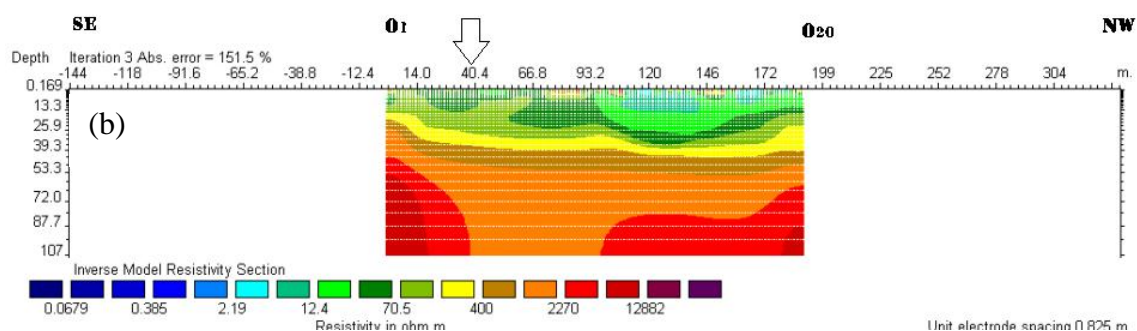
شکل (۵-۷): (a)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده، حاصله از داده های خام صحرائی می باشد. (b) شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده های خام صحرائی می باشد (c): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده ها با نرم افزار Res2dinv به طریقه ارائه شده توسط لوک.



شکل (۶-۷): (a)، شبه مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری اندازه گیری شده، حاصله از داده های خام صحرائی می باشد. (b) شبه مقطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری محاسبه شده است که نتیجه پردازش بر روی داده های خام صحرائی می باشد (c): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده ها با نرم افزار Res2dinv به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو (داده ها به روش پروفیل زنی به نرم افزار داده شده اند).



در شکل (۷-۷) (a)، نمای دره چاه های آب دوقلو را با دید به طرف انتهای دره نشان می دهد. محل چاه شماره ۱۲ با علامت زرد رنگ مشخص شده است.



شکل (۷-۷) (a): تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه [Google Earth 2010]، امتداد گسل ها توسط خط چین و امتداد خط پروفیل توسط خط سفید رنگ نشان داده شده اند. (B): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده ها با نرم افزار Res2dinv (به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو)

با توجه به شکل (۷-۷) (a) اثر هر دو گسل فوق الذکر توسط خط چین مشخص شده اند. فاصله این دو گسل با نزدیک تر شدن آن ها به دهانه دره مذکور، زیادتر می شود و در نتیجه، حالت موازی بودن آن ها از بین می رود. اثر این گسل ها با رسیدن به دهانه دره، به تدریج در زیر آب رفت پنهان می گردد.

همان طور که در شکل (۷-۷) (a) دیده می شود، محل تلاقی امتداد احتمالی گسل سمت چپی دره با خط پروفیل، در سمت چپ ایستگاه O5، یعنی در فاصله ۳۵ تا ۴۰ متری از مبدأ اندازه گیری می باشد. همچنین از شکل (۷-۷) (a) می توان نتیجه گرفت که امتداد احتمالی گسل سمت راستی دره در ایستگاه O11 خط پروفیل را قطع کرده است. افزایش مقاومت ویژه در قسمت سمت راست ایستگاه O11، یعنی از فاصله ۱۲۰ متری به بعد نسبت به مبدأ، به احتمال زیاد مربوط به دیواره گسل سمت راستی دره می باشد که امتداد گسل مذکور در انتهای دره، کاملاً رخنمون دارد و نزدیک به ۱۰ متر از آیینه این گسل به طور کامل قابل مشاهده می باشد.

در شکل (۷-۷) به طور تقریبی نشان داده شده است که مقطع حاصله از پردازش داده های مذکور (شکل (b))، با امتداد گسل ها (خط چین های سبزرنگ) و راستای موقعیت چاه ها (شکل (a)) مطابقت خوبی دارد. علامت فلش بر روی مقطع مدل سازی شده (در شکل (b))، محل تلاقی امتداد دهانه چاه-های آب دوقلو با خط پروفیل را نشان می دهند (شکل (۷-۸)).

در بازدیدی که از منطقه انجام شد، موارد زیر قابل ذکر می باشد:

✓ در انتهای این دره، اثر یک گسل که تقریباً در امتداد دره قرار دارد، به خوبی قابل تشخیص می باشد که ما در اینجا آنرا گسل سمت راستی دره می نامیم (شکل (۷-۸)). در واقع آیینه گسل سمت راستی دره، در قسمت انتهایی دره به خوبی قابل مشاهده می باشد. با توجه به شواهد زمین شناسی منطقه، ادامه این گسل در دهانه دره، خط پروفیل را در محل ایستگاه-های یازده و دوازده قطع می کند که این نتیجه را نیز می توان از مقطع مدل سازی شده به روش کاروس و پرنو مشاهده نمود.

✓ در انتهای سمت چپ این دره، اثر یک گسل دیگر که آن هم در امتداد دره قرار دارد، وجود دارد که در اینجا آنرا گسل سمت چپی دره می نامیم. تشخیص گسل سمت چپی، به خاطر نداشتن رخنمون در سطح زمین، مشکل تر از گسل سمت راستی دره می باشد.

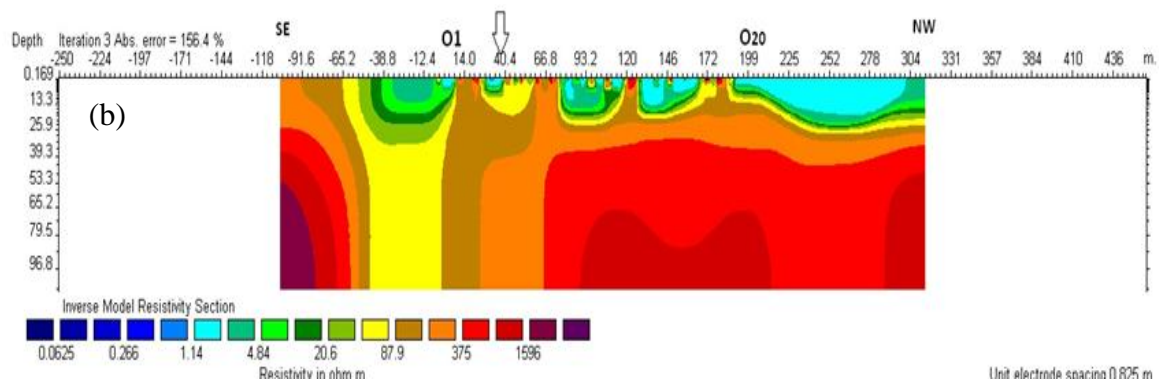
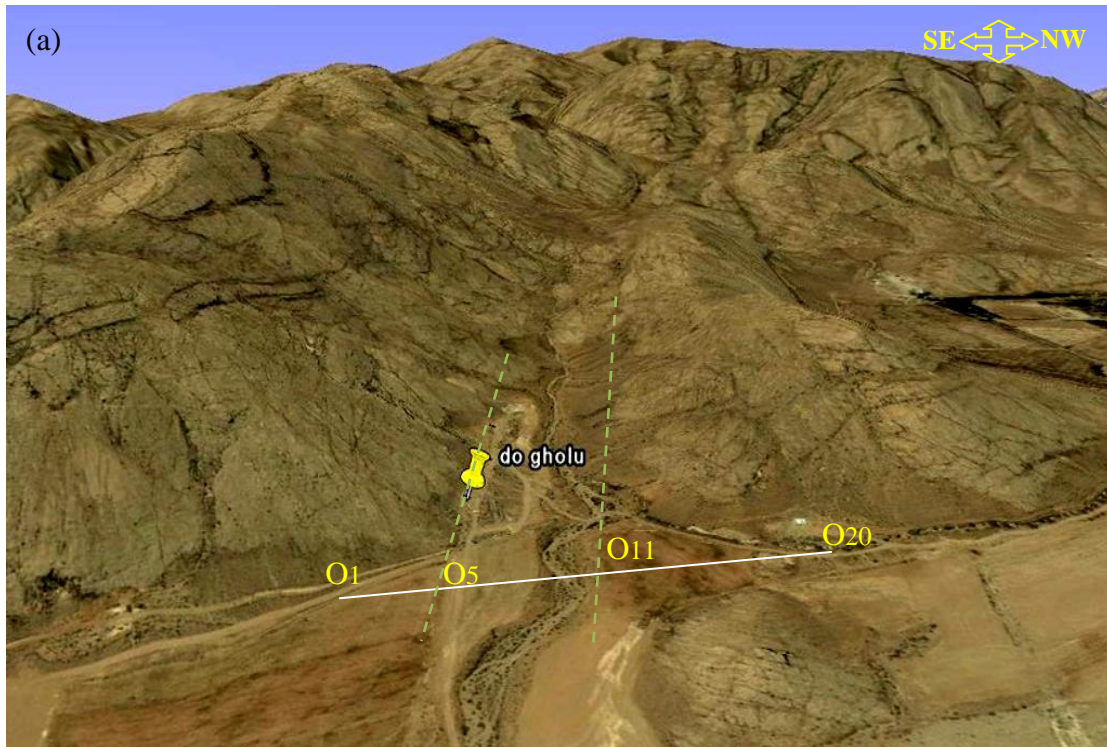


شکل (۷-۸): آئینه گسل سمت راستی دره که در طرف راست افراد دیده می‌شود.

در شکل (۷-۹) (a)، عکس ماهواره‌ای دریافتی از Google Earth، و امتداد گسل‌ها (توسط خط چین) و امتداد خط پروفیل توسط خط سفید رنگ، رسم گردیده‌اند. در شکل (۷-۹) (b)، مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله از پردازش داده‌ها با نرم افزار Res2dinv (به طریقه ارائه شده توسط لوک) نشان داده شده است.

به‌طوری که در شکل (۷-۹) (b) دیده می‌شود، دیواره گسل‌های سمت راستی دره و سمت چپی دره، به طرف چپ مقطع، به‌طور تقریبی، جابجا شده‌اند. در واقع گسل سمت چپی دره در این شکل به مکان ۹۰- متری منتقل شده است که اولاً در مکان مذکور ایستگاه اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی وجود ندارد، و ثانیاً ناحیه کم مقاومت ویژه الکتریکی در این مقطع، در عکس هوایی فوق‌الذکر، در زیر دیواره سمت چپی دره واقع می‌شود که بعد از ایستگاه شماره  $O_1$  قرار دارد که از نظر زمین‌شناسی محتمل نمی‌باشد.





شکل (۹-۷): (a): تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه [Google Earth 2010]، بر روی این شکل امتداد گسل‌ها توسط

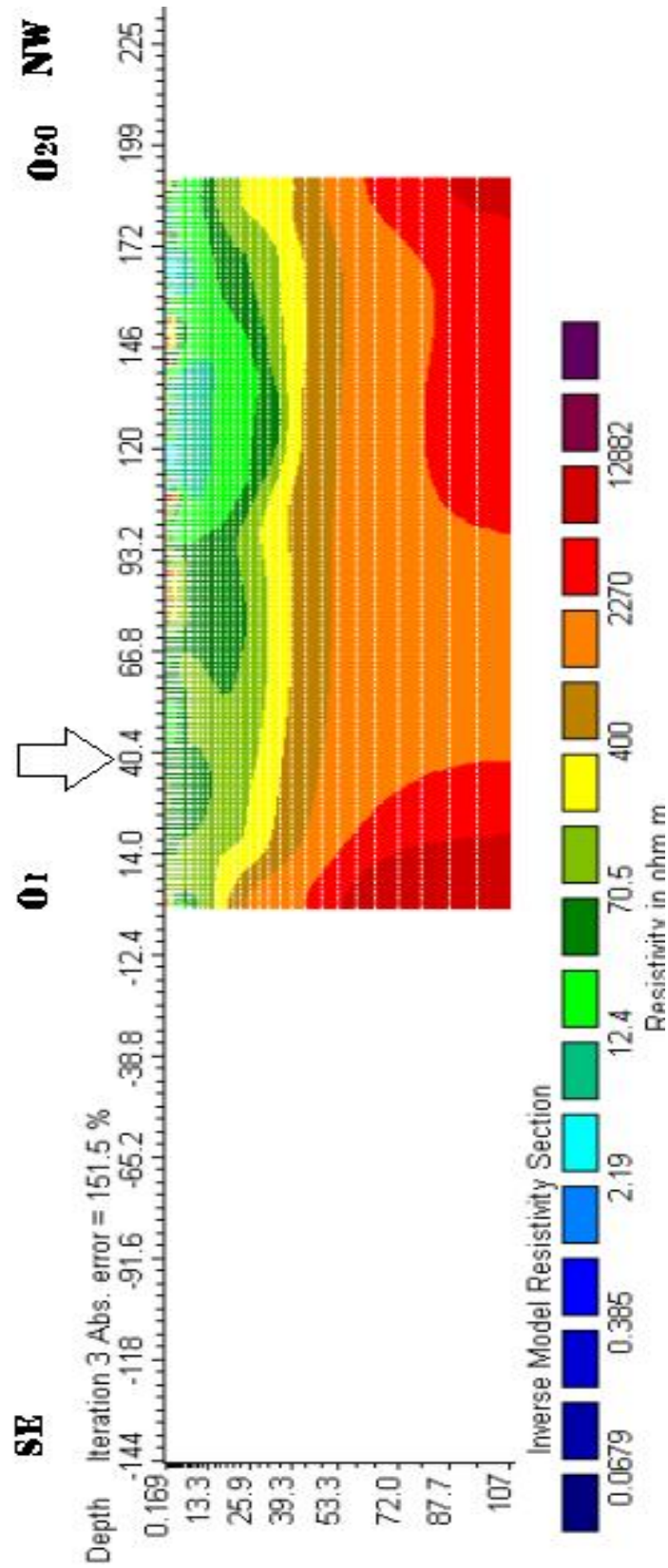
خط چین و امتداد خط پروفیل توسط خط سفید رنگ نشان داده شده‌اند. (B): مقطع قائم مقاومت ویژه الکتریکی حاصله

از پردازش داده‌ها با نرم افزار Res2dinv (به طریقه ارائه شده توسط لوک)

بستر رودخانه در شکل (۹-۷) (b)، به فاصله ۱۹۰ تا ۳۰۴ متری از مبدأ خط پروفیل منتقل شده است

که با شکل (۹-۷) (a)، هم‌خوانی ندارد.

در شکل (۷-۱۰)، مقطع حاصله از مدل سازی دو بعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی، برای دقت بیشتر، با مقیاس بزرگ تر، رسم گردیده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، فاصله بین ایستگاه های O5 تا O11 از عمق ۴۰ متری به بعد، شامل آهک های خرد شده و کم تراکم با درزه و شکاف های فراوان می باشد. لذا احتمال وجود آب در این فاصله بیشتر از مناطق اطراف آن می باشد. در محدوده ۱۰۰ متری تا ۲۰۰ متری نسبت به مبدأ اندازه گیری، از عمق ۴۰ تا ۶۵ متری، مقاومت ویژه الکتریکی سنگ ها حدود ۸۰۰ اهم- متر می باشد که می تواند نمایانگر آهک های درزه و ترک دار باشد. ولی از عمق ۶۵ متری به بعد، مقاومت ویژه الکتریکی سنگ ها به طور ناگهانی با افزایش عمق، افزایش یافته است که نمایانگر آهک های مقاوم می باشد. برای کل مقطع می توان گفت که از سطح زمین تا عمق تقریباً ۴۰ متری را رسوبات آبرفتی و رس ها پوشانده اند، و از این عمق تا عمق ۶۵ متری را آهک های خورد شده تشکیل داده اند.



شکل (۷-۱۰): مقطع مدل سازی دو بعدی داده های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده چاه های آب دوقلو

## فصل هشتم

### نتیجه گیری و پیشنهادات

## نتیجه گیری:

در این پژوهش نشان داده شده است که مناسب‌ترین روش ژئوفیزیکی برای اکتشاف منابع آب-های زیرزمینی در زمین‌های سخت (کارست)، روش ترکیب یافته از دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن می‌باشد. توسط این روش می‌توان بیشترین اطلاعات درباره توزیع جانبی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در زیر سطح زمین را بدست آورد. ترکیب یادشده این امکان را فراهم می‌کند که تغییرات مقاومت ویژه در زیر سطح زمین، هم به صورت عمقی و هم به طور جانبی مشخص گردد. نظر به اینکه آب موجود در درزه‌ها، شکاف‌ها و گسل‌ها دارای مقاومت ویژه الکتریکی کمتری از سنگ میزبان خود می‌باشد، لذا می‌توان در مقاطع حاصله از مدل‌سازی دو بعدی معکوس داده‌های مقاومت ویژه 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 درزه و شکاف و گسل می‌باشند، بلکه برای اکتشاف گسل‌های پنهان در زیر آبرفت نیز، کاربرد دارد. با توجه به اینکه گسل‌ها مانند زهکش عمل می‌نمایند و می‌توانند آب را از مناطق پر آب به مناطق کم آب منتقل کنند و همچنین می‌توانند مانند یک سد در مقابل آب‌های زیرزمینی عمل نمایند، لذا شناسایی این‌گونه گسل‌ها می‌تواند برای اکتشاف آب‌های زیر زمینی و بهره برداری از این آب‌ها، حائز اهمیت باشد.

مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده در محدوده چاه‌های آب دوقلو، حاکی از آن است که منطقه مورد مطالعه، از دو نوع سنگ آهک تشکیل شده است. یکی، سنگ‌های آهکی متراکم با مقاومت ویژه الکتریکی بالا، و دیگری سنگ‌های آهکی درزه و شکافدار با تراکم کمتر و با مقاومت ویژه الکتریکی پایین‌تر (در ناحیه خرد شده واقع در بین صفحات دو گسل) که توسط رسوباتی به ضخامت تقریباً ۴۰ متر پوشیده شده‌اند شکل (۷-۱۰).

به دلیل پایین بودن مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی نسبی این رسوبات، می‌توان نتیجه گرفت که ذرات تشکیل دهنده آن‌ها تا عمق ۲۵ متری، دارای ابعاد کوچک، و ریز دانه می‌باشند که میزان رس در آن‌ها، نسبتاً بالا می‌باشد. و عمق ۲۵ تا ۴۰ متری را، رسوبات با دانه‌بندی بزرگتر تشکیل داده است که به تدریج از میزان رس موجود کاسته شده و میزان آهک‌های خرد شده و هوازده شده افزایش یافته است.

لازم به توضیح می‌باشد که محل چاه‌های آب دوقلو، در نزدیکی دیواره گسل سمت چپی دره واقع شده‌اند که با توجه به مقاطع مدل‌سازی شده، محل این چاه‌ها، در آهک‌های خرد شده و درزه و شکافدار با تراکم کمتر، حفر شده‌اند.

با توجه به اینکه مقطع مدل‌سازی شده، تا عمق ۱۰۰ متری را نمایش می‌دهد، به دلیل پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، بر روی مقاطع مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار Res2dinv، نواحی کم مقاومت ویژه‌ای که حاکی از وجود آب در منطقه مورد مطالعه باشد را، نشان نمی‌دهد. ولی می‌توان توسط این مقاطع مدل‌سازی شده، بهترین مکان را برای حفر چاه‌های آب زیر-زمینی پیش‌بینی نمود.

لازم به ذکر است که سطح آب‌های زیرزمینی منطقه، به دلیل پمپاژ مداوم آب از چاه‌های مذکور، به تدریج از محل اولیه خود افت پیدا کرده است. عمق چاه شماره ۱۱، ۱۶۰ متر می‌باشد که در زمان حفر، در عمق ۱۰۷ متری از سطح زمین به آب رسیده است، و عمق چاه شماره ۱۲، ۱۷۷ متر می‌باشد که در زمان حفر، در عمق ۹۵ متری از سطح زمین به آب رسیده است. همچنین پروفیلی که داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی بر روی آن برداشت شده است، به اندازه ۱۳۰ متر پایین‌تر از محل چاه شماره ۱۲ واقع شده است.

همچنین از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که اگر روش برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی، با به‌کارگیری دو آرایش قطبی-دوقطبی متقارن، به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو باشد، و مدل‌سازی دوبعدی معکوس این داده‌ها، توسط نرم‌افزار Res2dinv انجام شود، لازم است که وارد کردن داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی به نرم‌افزار Res2dinv، به طریقه‌ای که در این تحقیق انجام شده است (به طریقه کاروس و پرنو)، صورت گیرد.

### پیشنهادات:

- ✓ با به‌کارگیری روش گرانی سنجی می‌توان نواحی بین صفحات دو گسل را به عنوان یک ناحیه خرد شده و پایین افتاده با گرانش کمتر اکتشاف نمود. همچنین در مناطق کارستیک جهت اکتشاف دیگ‌چاله‌های احتمالی و فضاهای مناسب جهت ذخیره آب‌های زیرزمینی، علاوه بر روش مقاومت ویژه، روش گرانی سنجی نیز به‌کار گرفته می‌شود. لذا پیشنهاد می‌گردد که در راستای نیل به صحت نتایج فوق‌الذکر، در منطقه مورد مطالعه، برداشت‌های گرانی سنجی نیز، انجام شود.
- ✓ در این تحقیق، نتایج مفیدی در خصوص وارد کردن داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی به نرم‌افزار Res2dinv به طریقه ارائه شده توسط کاروس و پرنو، حاصل شده است. لذا نتایج مذکور می‌تواند به عنوان راهکاری برای تحقیقات آتی، در مناطقی که از نظر ساختاری با منطقه مورد مطالعه مشابهت دارند، به‌کار گرفته شود.

✓ 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 می باشد. لذا، پیشنهاد می گردد که به منظور انجام تحقیقات آتی، برای بالا بردن سرعت اندازه گیری در صحرا و کاهش هزینه ها و همچنین جلوگیری از اشتباهات در قطع و وصل کردن الکترودها، از دستگاه های خودکار انتخاب کننده چندین الکترودها، استفاده گردد.

✓ با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه دو چاه حفر شده وجود دارد، برای کسب اطلاعات بیشتر از ساختارهای زیر سطحی می توان از مطالعات چاه نگاری نیز بهره گرفت. لذا پیشنهاد می گردد که در منطقه مورد مطالعه، برداشت های چاه نگاری صورت گیرد، و نتایج آن، به نتایج به دست آمده از این تحقیق افزوده شود.



# فهرست منابع

- افراسیابیان ا، (۱۳۷۷)، " اهمیت مطالعات و تحقیقات منابع آب کارست در ایران"، مجموعه مقالات دومین همایش جهانی منابع آب در سازندهای کارستی، تهران - کرمانشاه.
- پیروز، ا. (۱۳۸۲ الف)، "به کارگیری روش ترکیب یافته از سونداژ زنی الکتریکی و پروفیل 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 مدهای ریاضی به منظور تعیین بهترین روش الکتریکی برای اکتشاف محل نا-همگنی‌های جانبی"، یازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک، تهران
- پیروز، ا. (۱۳۸۹)، "جزوه طراحی پروژه‌های ژئوفیزیکی"، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- وزیری س. ح، مجیدی فرد م. ر، (۱۳۸۰)، "نقشه زمین شناسی شاهرود"، مقیاس ۱:۱۰۰/۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- رحمانی جوینانی م، (۱۳۸۷)، "خود آموز کامل نرم افزار مهندسی *Res2dinv*"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه افسری امام علی (ع).
- حیدریان شهری م، (۱۳۸۴)، "مبانی اکتشافات ژئوفیزیک"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۷۵۰ ص.
- کامکار روحانی ا، (۱۳۸۷)، "جزوه درس روش‌های عددی"، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کلاگری ع ا، (۱۳۷۱)، "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی"، چاپ تابش، تبریز، ۵۸۸ ص.
- فتحی م. ب، شرقی ی، کیمیا قلم ج و رمضی ح. ر، (۱۳۸۳)، "پی جویی ژئو الکتریکی زون‌های کارستی آبدار در منطقه‌ی اردستان به روش آزیموئال". کنفرانس مهندسی معدن ایران، ص ۱۸، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

- ABEM, “*Instruction manual*”, Terrameter SAS 300 Issued by ABEM Instrument.
- Barker R. D., (1978), “The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multi-core cable”, *Geophys Prospect.* 29, 128–143.
- Barker R., Rao T. V., Thangarajan M., (2001), “Delineation of contaminant zone through electrical imaging technique”, *Curr. Sci.* 81 (3), 277–283.
- Chand R., Chandra S., Rao V. A., Singh V. S. and Jain S C., (2004), “Estimation of natural recharge and its dependency on subsurface geoelectric parameters”, *J. Hydrol.* 299, 67–83.
- Chandra S., Dewandel B., Dutta S. and Ahmed S., (2010), “Geophysical model of geological discontinuities in granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences”, *Journal of Applied Geophysics*, pp. 137-148.
- Chandra S., Ahmed S., Ram A. and Dewandel B., (2008), “Estimation of hard rock aquifers hydraulic conductivity from geoelectrical measurements: A theoretical development with field application”, *Journal of Hydrology*, pp. 218– 227.
- Elawadi E., El-qadi G., Salem A. and Ushijima K., (2001), “ Detection of Cavities Using Pole-Dipole Resistivity Technique”, *Kyushu Univercity, Vol 61, No 4, pp. 101-112.*
- Ford D. C., and Williams P. W., (1989), “Karst Geomorphology and Hydrology”, *Champanand Hall, London.*
- Frohlich R. K., Fisher J. J. and Summerly E., (1996), “Electrical hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill”, *Rhode Island, USA. J. Appl. Geophys.* 35, 249–259.
- Geology 228/378, “Applied and Enironmental Geophysics”, *Lectur 6.*
- Griffiths D. H., Turnbull J. and Olayinka A. I., (1990), “Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array”, *First Break* 8, 121–129.
- Griffiths D. H. and King R. F., (1981), “*Applied Geophysics For Geologgists and Engineers*”, Pergamon Press Oxford, pp. 82.
- Huntley D., (1986), “Relations between hydraulic conductivity and electrical resistivity in granular aquifers”, *Ground Water* 24, 466–474.
- Karous M., and Pernu T. k., (1985), “Combined Sounding-Profiling Resistivity Measurements With The Three-Electrode Arrays”, *Geophysical prospecting*, 33, pp. 447-459.
- Keller G. V., and Frischknecht F. C., (1966) “*Electrical Methods in Geophysical Prospectivg*”, Pergamon, PP.183.
- Kelley W. E., (1977), “Geoelectrical sounding for estimating hydraulic conductivity”, *Ground Water* 15, 420–425.

- Loke M. H., (2001), “*Electrical Imaging Surveys For Environmental And Engineering Studies*”. 62 p.
- Loke M. H., (2004), “2-D and 3-D electrical imaging surveys”. Res2dinv ver. 3.54, Geotomo software”, 136 p, www.Geoelectrical.com.
- Loke M. H. and Barker R. D., (1996), “Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method”, *Geophy. Prosp.* 44, 131–152.
- Lowrie W., (2007), “Fundamentals of Geophysics”, *Cambridge University Press, Second Edition*, 393 p.
- Marquardt D. W., (1963), “An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters”, *Jour. Sac. Indust. Appl. Math.*, v. lino. 2, p. 431-441.
- Mazac O., Kelly W. E. and Landa I., (1985), “A hydro-geophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifer”, *J. Hydrol.* 79, pp. 1–19.
- Mooney H. M., (1980), “*Hand book of Engineering Geophysics Electrical Resistivity*”, Bison Instruments, Inc, 81p.
- Milanovic P.T., (1988), “Karst Hydrogeology”, *Water Resources publication. Colorado. U.S.A*, pp.434.
- Niwas S. and de Lima O. A. L., (2003), “Aquifer parameter estimation from surface resistivity data”, *Ground Water* 41 (1), pp. 95–99.
- Nur A., Kujir A. S., (2006), “HYDRO-GEOELECTRICAL STUDY IN THE NORTHEASTERN PART OF ADAMAWA STATE, NIGRERIA”, *Journal of Environmental Hydrology*, Vol 14.
- Robert L. and Parker., (1994), “Geophysical Inverse Theory”, *Princeton University Press*.
- Reynold J. M., (1997), “*An Introduction to Applied and Invironmental Geophysics*”, 796 p.
- Singh K. P., (2005), “Nonlinear estimation of aquifer parameters from surfacial resistivity measurements”, *Hydrology. Earth Sys. Sci. Discuss.* 2, pp.917–938.
- Singhal D. C., Niwas S., Shakeel M. and Adam B. M., (1998), “Estimation of hydraulic characteristics of alluvial aquifer from electrical resistivity data”, *J. Geol. Soc. India* 51, pp.461–470.
- Terzic J., Sumanovac F and Buljan R., (2007), “An assessment of hydrogeological parameters on the karstic island of Dugi Otok, Croatia”, *Journal of Hydrology* , pp.29– 42.
- Telford W. M., Geldart L. P., and Sheriff R. E., (1990), “*Applied Geophysics*”, Second Edition, Cambridge University Ress, New York, 744 p.
- Todd D.K., (1959), “*Groundwater hydrology*”, Johan Wiley and Sons, Inc., New York, 336p.

Van Nostrand R. G., and Cook, K. L., (1976), "*Interpretation of resistivity data: Professional*", Paper 499, United States Geological Survey, 310 P.

White W. B., (1983), "Geomorphology and Hydrology of karst Terrains", *Oxford University Press: New York. Pp.464.*

Yadav G. S. and Singh S. K., (2007), "Integrated resistivity surveys for delineation of fractures for ground water exploration in hard rock areas", *Journal of Applied Geophysics, pp. 301- 312.*

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

پیوست

## پیوست الف: طریقه ساختن فایل داده‌های ورودی نرم افزار Res2dinv

نحوه وارد کردن داده‌ها در فایل داده‌ای اکسل بصورت زیر می‌باشد:

ردیف اول: اسم خط برداشت.

ردیف دوم: کوچکترین فاصله الکترودی به کارگرفته در آرایش مورد نظر.

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

ردیف چهارم: تعداد کل داده‌های برداشت شده.

ردیف پنجم: موقعیت X برای مکان داده‌ها: اگر برای نشان دادن موقعیت X، از موقعیت اولین الکتروود سمت چپ در آرایش استفاده شود عدد صفر را وارد می‌کنیم، و اگر از موقعیت مرکز آرایش (به روش کاروس و پرنو وسط الکتروودهای پتانسیل، و به روش لوک وسط الکتروودهای  $C_1P_2$ ) استفاده شود، عدد یک را وارد می‌کنیم.

ردیف ششم: وجود داده‌های IP (موجود باشند عدد یک را وارد می‌کنیم، موجود نباشد عدد صفر را وارد می‌کنیم).

ردیف هفتم ستون اول: مختصات مربوط به الکتروود C1 باید نوشته شود. برای داده‌های آرایش معکوس، مختصات مربوط به الکتروود پتانسیل P2 را باید وارد کرد.

ردیف هفتم ستون دوم: فاصله الکتروودهای پتانسیل وارد می‌شوند.

ردیف هفتم ستون سوم: فاکتور  $n$  ( $n = \frac{C_1P_1}{P_1P_2}$  یا  $n = \frac{AM}{MN}$ )

ردیف هفتم ستون چهارم: داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده وارد می‌شود.

اگر داده‌های توپوگرافی موجود باشند، در زیر ستون اول داده‌ها، ۵ عدد صفر پشت سر هم وارد می‌شوند.

لازم به ذکر است که در هنگام وارد کردن داده‌های دو آرایش قطبی - دوقطبی متقارن، برای داده‌های مربوط به آرایش مستقیم، در مکان X مختصات مربوط به الکتروود C1 باید نوشته شود و برای داده‌های آرایش معکوس، مختصات مربوط به الکتروود پتانسیل P2 را باید وارد کرد و عدد مربوط به فاکتور  $n$  نیز (واقع در ردیف هفتم ستون سوم) در منفی یک ضرب می‌شود. ولی در این پژوهش به خاطر متفاوت بودن روش برداشت در ردیف هفتم ستون اول، مختصات مربوط به وسط الکتروودهای P1P2 (موقعیت ایستگاه‌ها)، هم برای آرایش معکوس و هم برای آرایش مستقیم، وارد شده است. و مبدأ مختصات نیز، موقعیت ایستگاه اول واقع در سمت چپ آرایش می‌باشد.

در نهایت فایل داده‌ها را باید با پسوند .dat ذخیره کرد، تا برای نرم‌افزار قابل خواندن باشد.

## **Abstract**

The aim of this study provide a suitable method to explore the groundwater located in the joints, the gaps, and hard rock cavities.

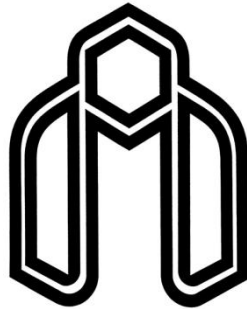
Nowadays, geophysical methods, particularly geoelectrical methods, is one of the most important methods in hydrogeological exploration, which one of its subsidiaries, is the electrical resistivity method. This method has been used extensively in the study of the Lateral inhomogeneities and vertical electrical properties of the earth and groundwater exploration.

According to mathematical models calculated by Telford and Keller, Pole- Dipole array can offer better replies in the Lateral inhomogeneity and vertical Dyke, Compare with other array. So, in this study the electrical resistivity method with two symmetry Pole- Dipole array is used to explore groundwater in Cretaceous limestone located in northern Shahrood. Resistivity measurements have been done with two arrays along a line profile which perpendicular to that along the two parallel faults. Parallel to the one of the fault plane, two water wells have been drilled that are called water wells Twin here. Acquired data from these measurments are processed with two-dimensional inverse method of modeling with RES2DINV software. Reason for choice the Location measurements near the wells above mentioned is the possibility to compare results obtained using the modeling method, with the subterraneous Geological situation region (depth of water level in the Cretaceous limestone), is possible.

Finally comparison shows that the Sections obtained from the modeling, shows two faults in the alluvium below that the wells mentioned have been drilled in the crushed limestone near the southern fault plane.

Keywords: Cretaceous limestone, two Symmetrical Pole- Dipole array, two-dimensional inverse modeling, water exploration.





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining and Geophysics**

**MSc Thesis In Exploration Geophysics**

**Groundwater exploration using 2-D inverse modeling of resistivity  
data acquired from cretaceous limestones in north of Shahrood**

**By:**

**Ghaffar Ahmadzadeh**

**Supervisor:**

Dr. Iraj Pirooz

**Advisor:**

Dr. Majid Ansari

**January 2011**