

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

(ژئوفیزیک، ژئوالکترونیک)

تعیین پارامترهای فروشویی جریان با استفاده از
مدل سازی و مرور زمان داده‌های GPR و مقاومت ویژه
الکتریکی مطالعه موردی: تست سایت ژئوفیزیک
دانشگاه صنعتی شاهرود

نگارنده:

علی آقایی کردشامی

اساتید راهنما

دکتر علیرضا عرب‌امیری

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

بهمن ۱۳۹۹

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً

توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند

تقدیم اثر

تقدیم بہ پدر و مادر

کہ از نگاهشان صلابت

از رفتارشان محبت

و از صبرشان ایستادگی را آموختم.

شکر و قدردانی

در اینجا که تدوین و مکارش این اثر به پایان رسیده است، بر خویشتن لازم می‌بینم که از اساتید محترم، جناب آقای

دکتر علیرضا عرب امیری و جناب آقای دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی که بارها بنامی‌های دلسوزانه و کمک‌های بی‌دریغ

خود را بی‌دشواری بر من آسان نموده‌اند، کمال شکر و قدردانی را به جای می‌آورم.

هم‌چنین از کمک‌ها و زحمات جناب آقای مهندس مهدی زارعی کمال شکر و قدردانی را دارم که در امور علمی

پروژه مراباری نمودند.

تعمیرنامه

اینجانب علی آقایی کردشامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک-ژئوالکتریک دانشکده مهندسی معدن، نفت، ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین پارامترهای فروشویی جریان با استفاده از مدل سازی و مرور زمان داده های GPR و مقاومت ویژه الکتریکی، مطالعه موردی: تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود تحت راهنمایی دکتر علیرضا عربامیری و دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می شوم.

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

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این تحقیق مطالعات توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) و رادار نفوذی به زمین (GPR) در تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود و در دو زمان مختلف با هدف بررسی تغییرات حاصل از نشت آلودگی در زمین انجام شده است. مراحل مطالعات به صورت کنترل شده و با توجه به تغییرات پیش آمده اجرا شده است. هدف از انجام این تحقیق بررسی و تخمین چگونگی تغییرات ویژگی‌های الکتریکی بر اثر فرورفت جریان آب در یک زمین آبرفتی و همچنین تغییرات ناشی از پر یا خالی بودن یک لوله پلی اتیلنی مدفون می‌باشد. در این راستا داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR به دست آمده از محدوده‌های مورد مطالعه در دو زمان که شامل تابستان و برداشت دیگر در فصل پاییز می‌باشد (تیر ۱۳۹۸ و آبان ۱۳۹۸) برداشت، پردازش و تفسیر شده است. پروفیل‌های برداشت طراحی شده شامل چهار خط برداشت بر روی یک لوله مدفون و پنج پروفیل بر روی زمین آبرفتی می‌باشد. نتایج پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های برداشت شده به صورت مدل‌های دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی و مقاطع عرضی GPR است؛ که به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای RES2DINV و Prism2 به دست آمده است. از مهم‌ترین نتایج این مطالعه می‌توان به عملکرد نسبتاً خوب روش مقاومت ویژه الکتریکی در آشکارسازی جزئیات و عدم کارایی مناسب GPR در زمین‌های آبرفتی با رس زیاد، نامناسب بودن آنتن فرستنده با فرکانس ۱۵۰ مگاهرتز در روش GPR و همچنین اثر مخرب رطوبت بر عملکرد این روش در نهایت عدم آشکارسازی اهداف به وسیله‌ی روش GPR، به دلیل کنتراست پایین گذردهی نسبی الکتریکی بین اهداف و زمینه اشاره نمود. با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی جزئیات زمین از جمله لوله پلی‌اتیلنی، قسمت‌های دارای خاک سست و متخلخل و تفکیک مناطق مختلف با توجه به رطوبت نسبی موجود در آن‌ها آشکارسازی شده است.

کلمات کلیدی: توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT)، رادار نفوذی به زمین GPR، تغییرات فرورفت جریان، RES2DINV، Prism2، مدل سازی دوبعدی، تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی

شاهرود

فهرست مطالب

ص	فهرست عناوین
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ تعریف مسئله
۳	۲-۱ روش تحقیق
۳	۳-۱ ضرورت و هدف انجام تحقیق
۴	۴-۱ پیشینه تحقیق
۶	۵-۱ ساختار پایان نامه
۹	فصل ۲: مبانی روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR
۱۰	۱-۲ مقاومت ویژه الکتریکی
۱۱	۱-۱-۲ اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی
۱۳	۲-۱-۲ آرایه الکترودی در برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی
۱۸	۳-۱-۲ مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف زمین
۱۹	۴-۱-۲ مدل‌سازی

- ۲۰.....کاربردهای روش مقاومت ویژه الکتریکی ۵-۱-۲
- ۲۱.....محدودیت‌های روش مقاومت ویژه ۶-۱-۲
- ۲۲.....رادار نفوذی به زمین (GPR) ۲-۲
- ۲۳.....اصول روش GPR ۱-۲-۲
- ۲۴.....تئوری انتشار امواج الکترومغناطیس ۲-۲-۲
- ۳۰.....برداشت و استفاده از روش GPR ۳-۲-۲
- ۳۲.....پردازش داده‌های GPR ۴-۲-۲
- ۳۷.....کاربردهای روش GPR ۵-۲-۲

فصل ۳: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، روش کار در محدوده، طراحی و برداشت

- ۳۹.....داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR
- ۴۰.....موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه ۱-۳
- ۴۱.....اهداف مورد مطالعه در تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود ۲-۳
- ۴۲.....طراحی و برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی ۱-۲-۳
- ۴۳.....طراحی و برداشت داده‌های GPR ۲-۲-۳

فصل ۴: نتایج برداشت ، مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و GPR به زمین منطقه مورد

۴۵

مطالعه

۴-۱ مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه الکتریکی ۴۶

۴-۱-۱ محدوده ی A ۴۶

۴-۱-۲ محدوده ی B ۵۴

۴-۲ پردازش و تفسیر داده های GPR برداشت شده ۶۶

۴-۲-۱ پروفیل A1 ۶۸

۴-۲-۲ پروفیل B1 ۷۳

۷۵

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتایج ۷۶

۵-۲ پیشنهادها ۷۷

۷۹

مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۲. مقاومت ویژه الکتریکی برخی از انواع آب، رسوبات و سنگ‌ها. ۱۹

جدول ۲-۲. مشخصات الکترومغناطیسی مواد. ۲۹

جدول ۳-۲. گذردهی نسبی محیط‌های متفاوت به همراه ضرایب بازتاب. ۳۰

فهرست اشکال

شکل ۱-۲. نمایش شماتیک میدان جریان و خطوط هم پتانسیل الف: پتانسیل سطح حاصل از یک تک قطبی سمت راست و یک دوقطبی در سمت راست ب: مقطع سطحی حاصل از یک تک قطبی در سمت چپ و یک دوقطبی سمت راست پ: مقطع افقی حاصل از یک تک قطبی در سمت چپ و یک دوقطبی در سمت راست ۱۲

شکل ۲-۲. آرایه‌ی کلی الکترودی در بررسی‌های مقاومت ویژه الکتریکی؛ شامل دو الکترودی که جریان الکتریکی را به زمین انتقال می‌دهند و دو الکترودی پتانسیل که اختلاف پتانسیل حاصل را اندازه‌گیری می‌کنند ۱۳

شکل ۳-۲. آرایه‌های الکترودی رایج مورد استفاده در پیمایش‌های مقاومت ویژه و فاکتور هندسی مربوط به هر آرایه. پارامتر a فاصله‌ی الکترودی، پارامتر n که برای آرایه‌های قطبی-دوقطبی، دوقطبی-دوقطبی و ونر-شلومبرژه مولفه‌ی تعداد فواصل جدایش به اندازه‌ی a می‌باشد. (a) ونر آلفا، (b) ونر بتا، (c) ونر گاما (d) قطبی-قطبی (e) دوقطبی-دوقطبی (f) قطبی-دوقطبی (g) ونر-شلومبرژه (h) دوقطبی-دوقطبی استوایی ۱۴

شکل ۴-۲. شکل کلی آرایه‌ی ونر که در آن فاصله‌ی الکترودهای متوالی $C2, P2, P1, C2$ برابر و به اندازه‌ی a است. ۱۶

شکل ۵-۲. شکل شماتیک آرایه شلومبرژه و روابط مربوط به محاسبه‌ی مقاومت ویژه و فاکتور هندسی مربوط به این آرایه الکترودی. ۱۷

- شکل ۲-۶. دو ترتیب مختلف ممکن برای اندازه‌گیری با آرایه دو قطبی-دوقطبی؛ این دو ترتیب دارای طول آرایه یکسان هستند اما عوامل "a" و "n" متفاوتی دارند که در نتیجه پاسخ یا سیگنال‌های بسیار متفاوتی دارند. ۱۸
- شکل ۲-۷ نمایش امواج منتشره و دریافتی در GPR ۲۷
- شکل ۲-۸. امواج GPR از امواج رادیویی برای بررسی زیرسطحی رفتار دی‌الکتریکی مواد استفاده می‌کند. دو حالت اندازه‌گیری متداول است که در یکی از این حالات انرژی منعکس شده یا پراکنده شناسایی می‌شود (شکل سمت چپ). در حالت دوم (شکل سمت راست) که به توموگرافی GPR معروف است، تأثیراتی بر انرژی منتقل شده از طریق ماده می‌شود. ۳۲
- شکل ۲-۹. روند پردازش داده‌های GPR؛ از سمت چپ به راست پردازش‌های تصحیح زمانی، فیلترهای مورد نیاز برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه، تخمین سرعت و مهاجرت انجام می‌شود بر روی داده‌های خام GPR انجام می‌شود. ۳۲
- شکل ۲-۱۰. الف) اثر wow بر داده‌های GPR . ب) بازتاب‌ها بعد از اعمال فیلتر Dewow ۳۴
- شکل ۲-۱۱. الف) ردموج GPR قبل از اعمال Dewow. ب) ردموج GPR بعد از اعمال Dewow ۳۴
- شکل ۲-۱۲. مقطع GPR الف) قبل از اعمال فیلتر حذف اثر زمینه و ب) بعد از اعمال فیلتر حذف اثر زمینه ۳۵
- شکل ۲-۱۳. یک رد منفرد از یک پروفیل GPR قبل و بعد از اعمال بهره‌ی AGC ۳۷
- شکل ۲-۱۴. یک رد منفرد از یک پروفیل GPR قبل و بعد از اعمال بهره‌ی SEC ۳۷
- شکل ۳-۱. مسیر دسترسی به تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود. ۴۰

- شکل ۳-۲. محدوده‌های تعیین شده برای مطالعه؛ محدوده A: محل قرارگیری لوله مدفون، محدوده B
 بستر آبرفتی مورد مطالعه. ۴۱
- شکل ۴-۱. محدوده‌ی A، جهت و راستای پروفیل‌های اجرا شده و موقعیت قرارگیری آن‌ها نسبت به
 هدف (دید از جنوب غرب به شمال شرق). ۴۷
- شکل ۴-۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدلسازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده
 در طول پروفیل A1 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون. ۴۸
- شکل ۴-۳. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده
 در طول پروفیل A1 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون. ۴۹
- شکل ۴-۴. پروفیل A2 روی لوله‌ی مدفون (دید از جهت جنوب به سمت شمال). ۵۰
- شکل ۴-۵. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده
 در طول پروفیل A2 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون. ۵۱
- شکل ۴-۶. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده
 در طول پروفیل A2 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون. ۵۱
- شکل ۴-۷. پروفیل A3 روی لوله‌ی مدفون (دید از شمال به جنوب). ۵۲
- شکل ۴-۸. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده
 در طول پروفیل A3 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون. ۵۳
- شکل ۴-۹. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده
 در طول پروفیل A4 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون. ۵۴

شکل ۴-۱۰. راستا و محل اجرای پروفیل‌ها در محدوده B (دید از جنوب غربی به سمت شمال شرقی).

۵۵

شکل ۴-۱۱. نمایی از پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده B با دید از جنوب غربی به سمت

شمال شرقی. ۵۵

شکل ۴-۱۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت

شده در طول پروفیل B1 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۵۷

شکل ۴-۱۳. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت

شده در طول پروفیل B1 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۵۷

شکل ۴-۱۴. آبرفت‌های درشت‌دانه که در جهت عمود بر امتداد پروفیل‌ها باعث ایجاد مقاومت الکتریکی

بالا شده است. ۵۹

شکل ۴-۱۵. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت

شده در طول پروفیل B2 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۵۹

شکل ۴-۱۶. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت

شده در طول پروفیل B2 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۶۰

شکل ۴-۱۷. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت

شده در طول پروفیل B3 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۶۱

شکل ۴-۱۸. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت

شده در طول پروفیل B3 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۶۲

شکل ۴-۱۹. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B4 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین ۶۴

شکل ۴-۲۰. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B4 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۶۴

شکل ۴-۲۱. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B5 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین. ۶۶

شکل ۴-۲۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B5 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین ۶۶

شکل ۴-۲۳. دستگاه Cbra plug_in با آنتن ۱۵۰ مگاهرتز ۶۸

شکل ۴-۲۴. ردموج‌های GPR (سمت راست) و مقاطع GPR در طول پروفیل A1 (سمت چپ) مقطع GPR قبل از تزریق محلول کات کبود داخل لوله؛ الف) سمت چپ بعد از تصحیح استاتیک بر روی داده‌ها، ب) مقطع GPR بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها، ج) مقطع GPR داده‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر روی داده‌ها. ۷۰

شکل ۴-۲۵. ردموج‌های GPR (سمت راست) و مقاطع GPR در طول پروفیل A1 (سمت چپ) مقطع GPR قبل از تزریق محلول کات کبود داخل لوله؛ الف) سمت چپ بعد از تصحیح استاتیک بر روی داده‌ها، ب) مقطع GPR داده‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر روی داده‌ها. ۷۲

شکل ۴-۲۶. مقاطع خط برداشت اول GPR در محل B1 قبل از نشت محلول کات کبود به داخل زمین؛ الف) مقطع داده‌های اولیه به دست آمده از خط برداشت اول ب) نتیجه‌ی انجام پردازش‌های جابجایی صفر زمانی، حذف پس زمینه و اعمال فیلتر بالاگذر بر روی مقطع الف. ۷۳

شکل ۴-۲۷. مقاطع خط برداشت اول GPR در محل B1 پس از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین؛ الف) مقطع داده‌های اولیه‌ی به دست آمده از خط برداشت اول ب) نتیجه‌ی انجام پردازش‌های جابجایی صفر زمانی، حذف پس زمینه و اعمال فیلتر بالاگذر بر روی مقطع الف..... ۷۴

فهرست علائم

عبارت مربوطه	علائم اختصاری
Ground Penetrating Radar	GPR
Signal to Noise Ratio	SNR
Electrical Resistivity Tomography	ERT
Root Mean Squared	RMS
Near Surface Geophysics	NSG
Spreading and Exponential Compensation Gain	SECG
Automatic Gain Control	AGC

فصل ۱: کلیات

۱-۱ تعریف مسئله

ژئوفیزیک، مطالعه‌ی زمین به وسیله‌ی اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی آن تعریف می‌شود. روش‌های ژئوفیزیکی اندازه‌گیری شده در وقفه‌های زمانی مختلف^۱ به طور رایج، پاسخ‌های ژئوفیزیکی را در یک سری نقاط زمانی و یا مکانی گسسته برای یک هدف مشخص و در یک منطقه خاص با استفاده از همان ابزار در شرایط مشابه بررسی می‌کنند. این روش‌ها همچنین شامل پردازش و تفسیر اطلاعات ثبت شده در این نقطه‌های زمانی می‌باشد و با هدف مطالعه و پیش‌بینی تغییرات هدف با گذر زمان است [۱].

ردیابی آلودگی‌های منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های مرسوم مهندسی مانند حفاری به لحاظ اجرایی مشکل، بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. از مهم‌ترین و مناسب‌ترین روش‌های قابل استفاده در ردیابی این آلودگی‌ها، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی نظیر ژئوالکترونیک می‌باشد. که به لحاظ هزینه بسیار مقرون به صرفه است [۲]. خواص ژئوشیمیایی آبخوان‌ها و خاک‌ها برای کاربردهای زیست محیطی و ژئوتکنیکی منافع عمومی دارند. پارامترهای مشخص کننده آب و خاک برای مدل‌سازی جریان آب و مهاجرت مواد خطرناک استفاده می‌شود. روش مقاومت ویژه در مقایسه با استفاده از روش‌های مستقیم رایج اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی دارای پتانسیل خوبی برای پیش‌بینی توزیع پارامترها می‌باشد. بررسی-های ژئوالکترونیک به یک ابزار مهم در برنامه‌های کاربردی هیدروژئولوژیکی تبدیل شده‌اند. توزیع فضایی پارامترهای الکترونیک در زیر زمین می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای تشخیص ناهمگونی آب‌های زیرزمینی و خاک به ارمغان آورد. آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق آلاینده‌های غیرآلی منجر به افزایش میزان هدایت الکترونیک^۲ آب می‌شود که در مورد انباشت زباله‌ها^۳ دیده می‌شود [۳]. مطالعات ژئوفیزیکی

^۱ Time-Lapse

^۲ Electrical conductivity (EC)

^۳ Waste landfill

نزدیک به سطح^۱ به خوبی برای تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی، به ویژه با استفاده از روش‌های الکترومغناطیسی و رادار نفوذی به زمین مناسب است [۴].

۱-۲ روش تحقیق

اهداف انجام این مطالعه شامل؛ ۱- تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی و ۲- تفکیک غلظت‌های یونی مختلف موجود در آب زیرزمینی می‌باشد. تعیین مسیرهای جریان آب زیرزمینی می‌تواند با استفاده از روش GPR انجام شود. بالا بودن غلظت یون‌ها باید بر خواص الکتریکی تأثیر بگذارد و بنابراین روش‌های الکتریکی می‌توانند انتخابی منطقی باشند. همان‌طور که ذکر شد با ایجاد تغییرات در غلظت یون‌ها و مقدار رطوبت زمین مقاومت ویژه الکتریکی زمین تغییر می‌کند که بر این اساس استفاده از روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT^۲) برای تصویرسازی از زیر سطح زمین در نظر گرفته شده است. در این کار، تصمیم آن است که ترکیبی از روش‌های ERT و GPR به کار گرفته شود. به همین علت چندین پروفیل برداشت در این پایان‌نامه طراحی شده و برداشت‌های ERT و GPR در طول این خطوط برداشت انجام شده و در نتیجه‌ی پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های برداشت شده، مسیرهای جریان آب زیرزمینی و وجود غلظت‌های یونی بالا، متوسط و پایین مشخص خواهد شد.

۱-۳ ضرورت و هدف انجام تحقیق

امروزه با توجه به گسترش سریع کارخانه‌ها، معادن و واحدهای صنعتی و همچنین توسعه‌ی شهرها میزان تولید آلودگی‌ها بسیار زیاد شده است و باید توجه داشت که این آلودگی‌ها علاوه بر هوا بر آب‌های

^۱ Near surface geophysics (NSG)

^۲ Electrical resistivity tomography (ERT)

زیرزمینی نیز اثرات مخربی وارد می‌کنند. همچنین دسترسی به منابع آب یکی از مهمترین چالش‌های دولت‌ها و ملت‌هاست. چرا که با افزایش جمعیت و فعالیت انسان‌ها مصرف آب نیز زیادتر می‌شود. این در حالی است که مقدار آب کره زمین ثابت است و در نتیجه نیاز و وابستگی انسان به آب بیشتر می‌شود. در این راستا باید توجه داشت که باید برنامه‌ای در پیش گرفته شود که بتوان تغییرات و میزان گسترش این آلودگی‌ها را کنترل کرد و نیز حداقل هزینه و زمان را برای بررسی‌های متناوب (با وقفه زمانی) در پی داشته باشد. روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی از جمله روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی هستند که برای اکتشاف معادن و ساختارهای مهندسی و تعیین مناطق آلوده شده به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین روش‌های بررسی ژئوالکتریکی می‌توانند از بهترین گزینه‌های آسان و کم هزینه باشند. حال بررسی تاثیرپذیری مؤلفه‌های این روش‌ها به صورت تلفیقی اگر در بازه‌های کوتاه زمانی پاسخگوی نیاز باشد، می‌تواند مدل‌هایی با کیفیت بالاتر در عمق کم تا عمق زیاد ارائه دهد. مدل‌سازی-های مقاومت‌ویژه الکتریکی و GPR، روش‌های مناسب و کم هزینه‌ای نسبت به حفاری هستند. با این کار حجم و میزان آلودگی و همچنین مسیرهای جریان بر اساس خواص الکتریکی اندازه‌گیری شده، مشخص و مدل‌سازی می‌شود تا تصمیم‌گیری برای کارهای بعدی لازم برای رفع آلودگی بسیار ساده‌تر شود.

۴-۱ پیشینه تحقیق

استفاده از ژئوفیزیک به طور کلی در آب‌شناسی و بخصوص در کشاورزی جدید نیست. همچنین کاربرد آن برای تشخیص انتقال آلودگی آب‌های زیرزمینی در یک محیط کشاورزی، نیز قبلاً بررسی شده است. در این زمینه با استفاده از روش GPR نیز مطالعات زیادی انجام شده است که از این جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تعیین ویژگی‌های فرورفت جریان با استفاده از مرور زمان GPR و EM مورد بررسی توسط (۲۰۱۵) James و Nobes انجام شده است. در این بررسی اثر نفوذ نیترات‌های تولید شده در یک دامداری در آب زیرزمینی و تعیین مسیرهای جریان با استفاده از EM و GPR انجام شده است [۴]. همچنین از روش GPR برای نقشه‌برداری مسیرهای ترجیحی جریان توسط (۲۰۰۴) Close et al استفاده شده است. همچنین برای نقشه‌برداری از تغییرات زمانی آب زیرزمینی توسط (۲۰۰۴) Versteeg هرچند در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی انجام شده است [۵،۶] تأثیر تغییرات خواص الکتریکی در GPR توسط (۱۹۹۴) Theimer بررسی شده است [۷].

مطالعات مقاومت ویژه یکی از بهترین روش‌های بررسی آلودگی‌های زیر زمینی و مطالعات مربوط به کیفیت آب می‌باشند لذا از روش مقاومت ویژه الکتریکی مطالعات زیادی مانند موارد زیر در این زمینه انجام شده است. در اینجا به تعدادی از این مطالعات اشاره شده است:

در ایران نیز بررسی گسترش آلودگی آب‌های زیرزمینی با استفاده از توموگرافی الکتریکی توسط کامکار روحانی و همکاران (۱۳۹۳) صورت گرفته است [۲]. (۲۰۰۰) Hubbard و Rubin نیز از توموگرافی با قدرت تفکیک بالا^۱ و داده‌های ژئوفیزیکی متراکم همراه با داده‌های گمانه‌ای محدوده مورد بررسی را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه شامل بررسی سه روش است که برای استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی- هیدرولوژیکی به منظور برآورد پارامترهای هیدرولوژیکی و همبستگی مکانی ساختارها توسعه داده شده‌اند. دو روش اول داده‌های ژئوفیزیکی متراکم برای تولید برآوردی با قدرت تفکیک بالا از خواص هیدرولوژیکی با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی متراکم و داده‌های گمانه‌ای انجام شده است. اگرچه داده‌های ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک بالا برای به دست آوردن این نتایج مفید هستند، اما در

^۱ High resolution

عمل، خطوط برداشت ژئوفیزیکی اغلب تنها بخش کوچکی از سفره آب را تحت بررسی قرار می‌دهند. بنابراین برآورد پارامترهای به دست آمده از داده‌های ژئوفیزیکی ممکن است برای توصیف خصوصیات هیدرولیکی آبخوان کاملاً کافی نباشد. برای دستیابی به نتایج دقیق از داده‌های توموگرافی با قدرت تفکیک بالا و داده‌های گمانه‌ای متمرکز استفاده شده است؛ تا ساختار پیوستگی مکانی نفوذپذیری ورودی به سیستم مشخص شود. در تکنیک‌های شبیه‌سازی تصادفی با استفاده از این ساختارها می‌توان پارامترهای مورد نظر را در مکان‌های نمونه‌برداری نشده تخمین زد [۸]. همچنین (Kazakis et al ۲۰۱۶) از روش مقاومت ویژه الکتریکی برای برآورد تخلخل و رسانندگی هیدرولیکی و قابلیت انتقال‌پذیری یک آبخوان استفاده کردند. برای این هدف از مقاومت ویژه الکتریکی آبخوان و همچنین هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در ۳۷ مکان اندازه‌گیری شدند. همچنین رابطه‌ای بین مقاومت ویژه آبخوان و هدایت هیدرولیکی سفره آبی مورد مطالعه برقرار شد تا برآورد پارامتر هیدرولیکی مورد نظر در مکان‌های فاقد داده با استفاده از مقاومت ویژه آبخوان میسر باشد [۹].

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل اول به بیان کلیات پرداخته شده است. در فصل دوم؛ بررسی روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده، جزئیات روش‌های مورد استفاده، چگونگی پردازش داده‌ها و همچنین طراحی عملیات میدانی پرداخته شده است. در فصل سوم؛ به طراحی پروژه و پروفیل‌ها، آرایه‌های مورد استفاده و همچنین شناسایی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. در فصل چهارم؛ نتایج برداشت، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و GPR به دست آمده از منطقه مورد مطالعه و نحوه اجرای پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR تشریح شده است و همچنین مدل‌های دوبعدی مقاومت‌ویژه الکتریکی و مقاطع عرضی و مدل‌های GPR به دست آمده و نتایج تفسیری حاصل از این مدل‌ها ارائه شده است. در فصل پنجم نتایج جمع‌بندی شده و همچنین برای بهبود نتایج پیشنهادهایی

ارائه شده است.

فصل ۲ : مبانی روش های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR

۲-۱ مقاومت ویژه الکتریکی

روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ ابداع شدند. البته از دهه ۱۹۷۰ و خصوصاً به دلیل دسترسی به کامپیوتر برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کردند. این روش‌ها به طور مؤثری در اکتشاف آب‌های زیرزمینی، انواع آلودگی آب‌های زیرزمینی، بررسی مسائل مهندسی برای تعیین محل حفره‌های زیر سطحی، گسل‌ها و مناطق خرد شده، درز و شکاف‌ها، مناطق یخ‌زده، چاه‌های معدنی، در بررسی‌های باستان‌شناسی برای تعیین گسترش فضایی بقایای ساختارهای مدفون و به علاوه کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶].

در همه‌ی روش‌های مقاومت‌ویژه‌ی الکتریکی از یک جریان الکتریکی استفاده می‌کنند؛ که توسط الکترودهای نقطه‌ای و یا خطوط تماس طولانی به زمین ارسال می‌شود هرچند از حالت دوم به ندرت استفاده می‌شود. روند کار به صورت اندازه‌گیری مقادیر مقاومت ویژه به وسیله‌ی الکترودهایی در نزدیکی محل تزریق جریان می‌باشد. چون مقدار جریان نیز اندازه‌گیری می‌شود، تعیین مقاومت ویژه ظاهری زیرسطح زمین ممکن می‌شود [۱۰].

مقاومت ویژه الکتریکی، اطلاعاتی از شکل و ویژگی‌های الکتریکی ناهمگنی‌های زیر سطح زمین ارائه می‌دهد. هدف از برداشت‌های الکتریکی تخمین چگونگی توزیع مقاومت‌ویژه در زیر سطح زمین به وسیله اندازه‌گیری‌های سطحی می‌باشد [۱۲]. روش ERT می‌تواند اطلاعات زمین‌شناسی زیرسطحی سودمندی فراهم نماید؛ که معمولاً این اطلاعات را نمی‌توان با هزینه کم، به وسیله‌ی روش‌های ژئوفیزیکی دیگر به دست آورد. مقاومت ویژه زمین بستگی به ویژگی‌های گوناگونی همچون کانی‌ها، تخلخل و درجه اشباع آب و نمک محلول در سنگ دارد. برای تفسیر کمی داده‌های ژئوالکتریک می‌توان از مدل‌سازی معکوس استفاده کرد؛ که امروزه در تمام علوم فنی و همچنین ژئوفیزیک کاربرد شایانی دارد. روش‌های مدل‌سازی معکوس متداول شامل مدل‌سازی معکوس اجزا محدود و مدل‌سازی معکوس بهینه می‌باشد [۱۳].

۱-۱-۲ اصول روش مقاومت ویژه الکتریکی

در اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی، جریان الکتریکی از نوع مستقیم؛ با دو الکتروود نقطه‌ای جریان A و B به درون زمین فرستاده می‌شود و اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین دو الکتروود پتانسیل M و N در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۲-۲). مقاومت ویژه الکتریکی از فرمول $\rho = K * \frac{V}{I}$ محاسبه می‌شود [۱۰]. در این رابطه V اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده، I شدت جریان تزریق شده به زمین و K فاکتور هندسی^۱ آرایش مورد استفاده بر حسب متر می‌باشد [۱۴].

فاکتور هندسی آرایش‌های مختلف الکتروودی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$K = 2\pi * \frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (۱-۲)$$

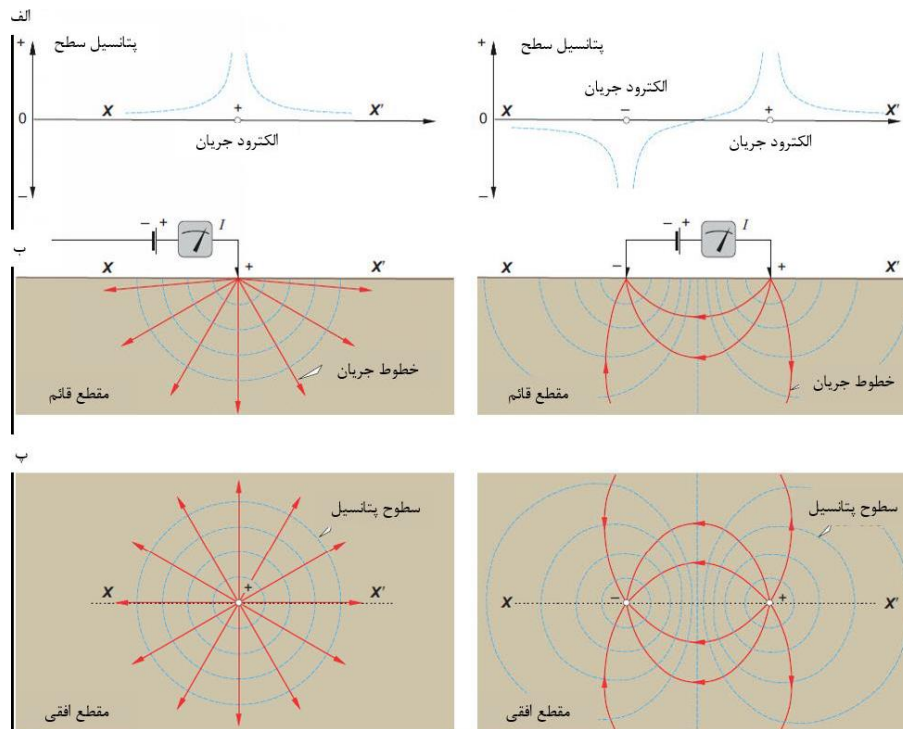
خطوط فرضی هم پتانسیل عمود بر خطوط جریان می‌باشند. ناهمگنی‌های جانبی در مقاومت ویژه و هدایت الکتریکی باعث ایجاد انحراف در خطوط جریان می‌شود؛ که سطوح هم پتانسیل را دچار بی‌نظمی می‌کنند. این بی‌نظمی‌ها را که اثر آن در سطح زمین ظاهر می‌شود، می‌توان به وسیله‌ی الکتروودهای پتانسیل اندازه‌گیری گرفت. اگر جریان الکتریکی از دو الکتروود جریان به زمین تزریق شود، جریان معمولاً از یکی الکتروودها به دیگری جریان پیدا می‌کند (شکل ۲-۱).

مقاومت ویژه الکتریکی بسیاری از سنگ‌ها تقریباً با مقاومت ویژه الکتریکی میزان متخلخل آن‌ها متناسب است. قانون آرچی^۲ بیان می‌کند که مقاومت ویژه الکتریکی با افزایش تخلخل رابطه‌ی عکس

^۱ Geometric factor

^۲ Archie equation

دارد. جریان‌هایی که در پیمایش‌ها به عنوان "جریان مستقیم"^۱ یا DC توصیف شده‌اند، به ندرت یک-طرفه هستند. معکوس کردن جهت جریان باعث می‌شود اثرات جریان‌های طبیعی^۲ یک‌طرفه با جمع-بندی ساده و میانگین نتایج به دست آمده در دو جهت از بین بروند. بررسی‌های جریان مستقیم به مولدهای جریان، ولت متر و تماس الکتریکی با زمین نیاز دارند [۱۱].



شکل ۱-۲. نمایش شماتیک میدان جریان و خطوط هم پتانسیل الف: پتانسیل سطح حاصل از یک تک قطبی سمت چپ و یک دوقطبی در سمت راست ب: مقطع عمقی حاصل از یک تک قطبی در سمت چپ و یک دوقطبی سمت راست پ: مقطع افقی حاصل از یک تک قطبی در سمت چپ و یک دوقطبی در سمت راست [۱۵].

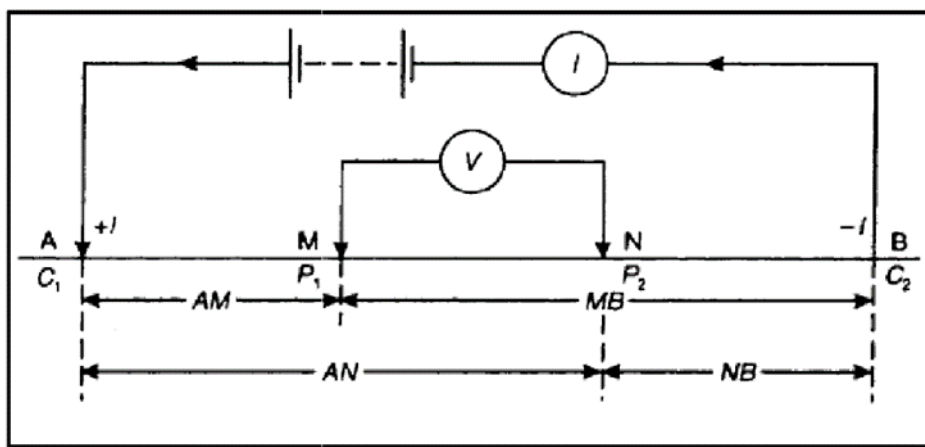
کابل‌ها و الکترودها برای همه‌ی سیستم‌ها قطعاتی ارزان قیمت اما حیاتی هستند و به همین دلیل

است که با بسیاری از نوفه‌ها در ارتباط هستند [۱۶].

^۱ Direct Corrent

^۲ Natural current

اصل عملکرد در یک فرآیند تکرار مرحله به مرحله است؛ که سعی می‌کند انحراف بین مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده و مقادیر مقاومت ویژه ظاهری شبیه‌سازی شده‌ی محاسبه شده از یک مدل فرعی را به حداقل برساند. تهیه مقطع دوبعدی همچنین می‌تواند با استفاده از آرایه‌ی شلومبرژه انجام شود؛ که وضوح مناسبی را برای تغییرات جانبی در محیط همگن فراهم می‌کند. آرایه ونر نسبت سیگنال به نوفه‌ی خوبی را نشان می‌دهد و برای تشخیص لایه‌های افقی مطلوب است؛ در حالی که آرایه‌ی دوقطبی-دوقطبی برای تعیین مرز اشیاء فضایی در زیر سطح و در عمق کم مطلوب است [۱۶، ۱۷، ۱۸].



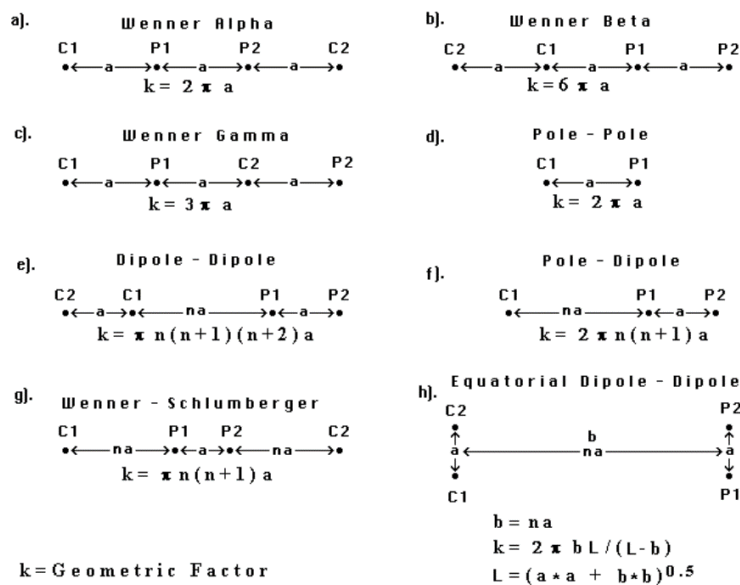
شکل ۲-۲. آرایه‌ی کلی الکترودی در بررسی‌های مقاومت ویژه الکتریکی؛ شامل دو الکتروود A و B که جریان الکتریکی را به زمین انتقال می‌دهند و دو الکتروود پتانسیل M و N که اختلاف پتانسیل حاصل را اندازه‌گیری می‌کنند [۱۹].

۲-۱-۲ آرایه الکترودی در برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی

شکل ۲-۳ برخی از آرایه‌های الکترودی رایج و فاکتورهای هندسی آن‌ها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، یک دوقطبی باید از دو الکتروود تشکیل شده باشد، که در مقایسه با هر الکتروود دیگر در مسافتی اندک از آن قرار دارند. کاربرد معمول در آرایه‌های دو قطبی-دوقطبی و قطبی-قطبی، که در آن فاصله تا الکتروود بعدی معمولاً از ۱ تا ۸ برابر فاصله "دوقطبی" است. فاصله از یک الکتروود ثابت "در بی‌نهایت" باید حداقل ۱۰ و در حالت ایده آل ۳۰ برابر فاصله بین هر دو الکتروود متحرک را داشته باشد. کابل‌های

طولانی مورد نیاز می‌توانند باعث دشواری در کار میدانی شوند و همچنین ممکن است به عنوان آنتن عمل کنند. ایجاد جفت شدگی الکترومغناطیسی (نوفه القایی) می‌تواند تاثیر نامطلوبی بر روی داده‌ها داشته باشد [۱۶].

روش پروفیل زنی الکتریکی یک روش جایگزین است که برای نقشه‌برداری مقاومت ویژه الکتریکی درون زمین در طول یک خط بررسی استفاده می‌شود. در این روش برای بررسی تغییرات جانبی مقاومت ویژه در مقدراری از عمق، یک فاصله الکترودی ثابت، که بر اساس مقدار عمق بررسی هر آرایه انتخاب شده است؛ بین الکترودهای مختلف حفظ می‌شود و آرایه به صورت کلی در طول خط برداشت منتقل می‌شود [۲۰].



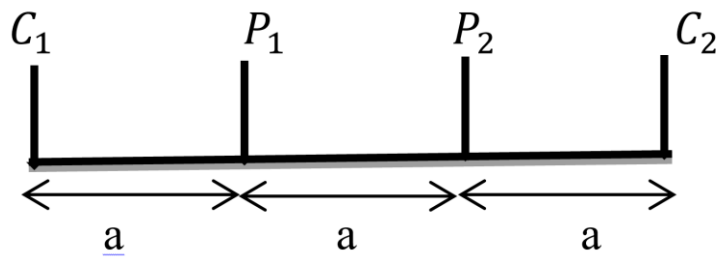
شکل ۲-۳. آرایه‌های الکترودی رایج مورد استفاده در پیمایش‌های مقاومت ویژه و فاکتور هندسی (K) مربوط به هر آرایه می‌باشد. پارامتر a فاصله الکترودی، پارامتر n که برای آرایه‌های قطبی-دوقطبی، دوقطبی-دوقطبی و ونر-شلومبرژه مولفه‌ی تعداد فواصل جدایش به اندازه‌ی a می‌باشد. a ونر آلفا، b ونر بتا، c ونر گاما d قطبی-قطبی e دوقطبی-دوقطبی f قطبی-دوقطبی g ونر-شلومبرژه h دوقطبی-دوقطبی استوایی [۲۱].

در ادامه به طور خلاصه برخی از انواع آرایه‌های مورد استفاده در پیمایش‌های مقاومت ویژه مورد بررسی قرار گرفته است:

۲-۱-۲-۱ آرایه ونر^۱

در این نوع آرایه فاصله‌ی همه‌ی الکترودهای متوالی C_2, P_2, P_1, C_1 با هم مساوی هستند (شکل ۲-۴) و به منظور بررسی تغییرات جانبی مقاومت ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. معمولاً از این آرایه زیاد استفاده می‌شود و داده‌های آن به وسیله‌ی نرم‌افزارهای ژئوالکتریکی مدل‌سازی، تفسیر و پردازش می‌گردد. به طور کلی آرایه‌ی ونر به سه نوع آرایه ونر نوع آلفا، ونر نوع بتا و ونر نوع گاما تقسیم می‌شود (شکل ۲-۳) [۲۶]. در آرایه ونر معمولی که همان آرایه ونر نوع آلفا است، الکترودهای پتانسیل در بین الکترودهای جریان قرار دارند. به عبارت دیگر الکترودهای جریان در دو طرف الکترودهای پتانسیل قرار دارند و فاصله‌ی بین هر دو الکتروود کناری برابر با مقدار مساوی a می‌باشد. در ونر بتا الکترودهای جریان C_1 و C_2 در یک طرف پروفیل و الکترودهای پتانسیل P_1 و P_2 در طرف دیگر و با فاصله‌های مساوی قرار می‌گیرند. همچنین در ونر گاما الکترودهای جریان و پتانسیل به صورت یک در میان P_2, C_2, P_1, C_1 و با فاصله‌ی مساوی از یکدیگر قرار می‌گیرند. فاکتور هندسی به وسیله رابطه معادله (۲-۲) محاسبه می‌شود [۱۹]. در معادله (۲-۳) و (۲-۴) نحوه‌ی محاسبه‌ی شکل و مقدار مقاومت ویژه در آرایه ونر آورده شده است.

^۱ Wenner



شکل ۲-۴. شکل کلی آرایه‌ی ونر که در آن فاصله‌ی الکترودهای متوالی C_2, P_2, P_1, C_1 برابر و به اندازه‌ی a است [۲۲].

$$K = 2\pi a \quad (۲-۲)$$

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (۳-۲)$$

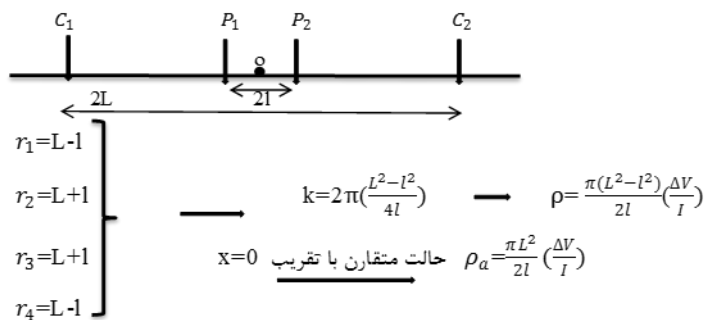
$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (۴-۲)$$

۲-۲-۱-۲ آرایه شلومبرژه^۱

در آرایه شلومبرژه الکترودهای پتانسیل با فاصله‌ی بین الکترودی $2L$ در بین الکترودهای جریان قرار دارند و فاصله هر دو الکتروود جریان و پتانسیل از نقطه وسط بین آن دو به یک اندازه می‌باشد (شکل ۲-۵). در آرایه ونر - شلومبرژه در هر بار اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بایستی فاصله بین الکترودهای جریان با نسبت na افزایش یابد تا به این طریق بتوان عمق‌های بیشتری را کاوش کرد. در این آرایه، الکترودهای جریان در دو طرف و الکترودهای اندازه‌گیر اختلاف پتانسیل در بین دو الکتروود جریان و در یک فاصله مساوی از نقطه وسط بین دو الکتروود جریان قرار گرفته‌اند، به طوری که فاصله بین دو الکتروود پتانسیل و فاصله بین دو الکتروود جریان $2L$ می‌باشد و در هر بار اندازه‌گیری، فاصله بین دو الکتروود

^۱ Schlumberger

جریان در دو طرف نقطه وسط بین آن دو الکتروود به یک مقدار مساوی افزایش می‌یابد [۲۳]. شکل شماتیک این آرایه و نحوه محاسبه فاکتور هندسی و مقاومت ویژه در این آرایه، در شکل ۵-۲ نشان داده شده است:



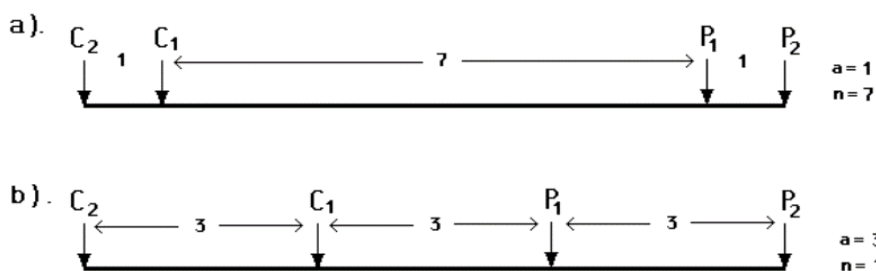
شکل ۵-۲. شکل شماتیک آرایه شلومبرژه و روابط مربوط به محاسبه مقاومت ویژه و فاکتور هندسی مربوط به این آرایه الکتروودی [۲۲].

۲-۱-۲-۳ آرایه دوقطبی-دوقطبی^۱

در این نوع آرایش، الکتروودهای جریان در یک سو و الکتروودهای پتانسیل در سوی دیگر می‌باشند و فاصله بین دو الکتروود جریان با فاصله بین دو الکتروود پتانسیل به یک اندازه می‌باشند. این آرایه به طور گسترده‌ای در برای پیمایش‌های مقاومت ویژه و IP استفاده می‌شود. زیرا اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیسی بین جریان و پتانسیل اندک است. در شکل ۶-۲ چیدمان این آرایه نشان داده شده است. a فاصله الکتروودی بین (C1 و C2) الکتروودهای جریان است؛ که با فاصله بین جفت الکتروودهای پتانسیل (P2 و P1) برابر است. این آرایه یک پارامتر دیگر به نام n دارد؛ که نسبت فاصله بین الکتروودهای C1 و P1 به فاصله الکتروودی a می‌باشد. شکل ۶-۲ دو ترتیب متفاوت با یک گستره‌ی آرایه‌ی برابر و با مقادیر متفاوتی از پارامترهای n و a را نشان می‌دهد [۱۲].

^۱ Dipole-Dipole

Dipole-dipole array



شکل ۲-۶. دو ترتیب مختلف ممکن برای اندازه‌گیری با آرایه دو قطبی-دوقطبی؛ این دو ترتیب دارای طول آرایه یکسان هستند اما عوامل "a" و "n" متفاوتی دارند که در نتیجه پاسخ یا سیگنال‌های بسیار متفاوتی دارند. [۱۲].

۳-۱-۲ مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف زمین

پیمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی تصویری از تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی از ساختارهای زیرسطح زمین به دست می‌دهند. برای تبدیل این تصاویر به تصاویر زمین‌شناسی، لازم است اطلاعاتی درباره‌ی مقادیر مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی در اختیار باشد. در جدول ۲-۱ اطلاعاتی از مقادیر مقاومت ویژه سنگ‌ها، خاک‌ها و انواع مختلف آب آورده شده است.

مجموعه‌ای از عوامل مختلف بر مقدار مقاومت ویژه سنگ‌ها، خاک‌ها و آب‌ها تاثیر می‌گذارند که عبارتند از [۲۰]:

۱- حجم خلل و فرج موجود در سنگ و میزان شکستگی

۲- وضعیت قرارگیری خلل و فرج و چگونگی ارتباط آن‌ها با یکدیگر

۳- حجم خلل و فرج (تخلخل) سنگ که از آب اشباع است

۴- رسانندگی الکتریکی آب محتوی

۵- جنس کانی‌های تشکیل دهنده سنگ

جدول ۱-۲. مقاومت ویژه الکتریکی برخی از انواع آب، رسوبات و سنگ‌ها [۲۰].

نوع سنگ	محدوده‌ی مقاومت ویژه الکتریکی (mΩ)
آب دریا	۰,۲
آب محتوی سفره‌های زیرزمینی	۳-۱۰
آب چشمه‌ی طبیعی	۵۰-۱۰۰
خاک رس	۲-۲۰
شن و ماسه خشک	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰
شن و ماسه اشباع از آب شیرین	۵۰-۵۰۰
شن و ماسه اشباع از آب شور	۰,۵-۵
آهک	۳۰۰-۱۰۰۰۰
مارن	۲۰-۱۰۰
ماسه‌سنگ آرژیلیتی	۵۰-۳۰۰
ماسه‌سنگ-کوارتزیت	۳۰۰-۱۰۰۰۰۰
توف‌های آتش‌فشانی	۲۰-۱۰۰۰۰

۲-۱-۴ مدل‌سازی

مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در این پایان‌نامه با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV

انجام شده است. عملیات مدل‌سازی وارون (وارون‌سازی) استفاده شده با این برنامه نرم‌افزاری بر اساس

روش کمترین مربعات^۱ می‌باشد. وارون سازی در این روش بر اساس معادله (۵-۲) عمل می‌کند:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (۵-۲)$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

که در این معادله: f_x : فیلتر هموارسازی افقی^۲، f_z : فیلتر هموارسازی عمودی^۳، J : ماتریس مشتقات جزئی^۴، u : فاکتور تعدیل^۵، d : بردار تغییرات مدل^۶، g : بردار اختلافات^۷ می‌باشد.

این برنامه ابزاری است که از روش کمترین مربعات بر اساس روش بهینه‌سازی گوس-نیوتن استفاده می‌کند. هم‌چنین در روش گوس-نیوتن مرسوم در هر تکرار^۸ ماتریس ژاکوبی که همان ماتریس مشتقات جزئی است مجدداً محاسبه می‌شود. اما در روش شبه نیوتن^۹ که در این نرم افزار نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، ماتریس ژاکوبی فقط یکبار محاسبه می‌شود [۱۲].

۵-۱-۲ کاربردهای روش مقاومت ویژه الکتریکی

روش مقاومت ویژه کاربردهای زیادی دارد که در زیر به تعدادی از آنها اشاره شده است [۲۰]:

۱. تعیین عمق سنگ بستر

۲. تعیین عمق ذخایر آب زیرزمینی

^۱ Least-squares

^۶ Model perturbation vector

^۲ Horizontal flatness filter

^۷ Discrepancy vector

^۳ Vertical flatness filter

^۸ Iteration

^۴ Matrix of partial derivatives

^۹ Quasi Newton

^۵ Damping factor

۳. تعیین نواحی گسلش
۴. تعیین محل ذخایر شن و ماسه
۵. تشخیص آلودگی آب‌های زیرزمینی
۶. اکتشاف کانال‌های رودخانه‌ای مدفون
۷. تعیین ضخامت خاک
۸. تعیین فصل مشترک آب‌های شیرین و شور
۹. اکتشاف بی‌هنجاری‌های ژئوترمال و زمین‌گرمایی
۱۰. تعیین زون‌های آلوده‌ی معدنی
۱۱. مطالعات باستان‌شناسی
۱۲. تخمین مقاومت فشاری سنگ
۱۳. تعیین تغییرات ناحیه‌ای در لایه‌های خاک
۱۴. تعیین زون‌های آلوده‌ی معدنی
۱۵. تعیین عمق و حجم زمین‌لغزش
۱۶. ضخامت لایه‌های یخچالی

۲-۱-۶ محدودیت‌های روش مقاومت ویژه

برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های مقاومت‌ویژه و رسیدن به نتایج مناسب دارای محدودیت و

مشکلاتی است که در ادامه به تعدادی از این محدودیت‌ها اشاره شده است [۱۷]:

۱. عمق نفوذ این روش وابسته به فاصله الکترودی آرایه در روی زمین محدود است.
۲. در روش مقاومت ویژه الکتریکی به دلیل لزوم اتصال فیزیکی الکترودها به زمین برای برداشت داده‌ها روشی وقت‌گیر به حساب می‌آید.
۳. رسانندگی لایه‌های سطحی می‌تواند به شدت عمق نفوذ را در این روش کاهش دهد.
۴. در تفسیر نتایج حاصل از مقاومت ویژه ساختارهای ساده قابل شناسایی هستند و پیچیدگی ساختارها تفسیر را دشوار می‌کند.
۵. به دلیل وقت‌گیر بودن عملیات برداشت در این روش نمی‌توان از این روش برای بررسی‌های وسیع و محدوده‌های بزرگ استفاده کرد.

۲-۲ رادار نفوذی به زمین (GPR)

GPR یکی از ابزارهای اصلی ژئوفیزیک در تصویربرداری و بررسی‌های نزدیک به سطح خصوصیات فیزیکی و ساختاری می‌باشد [۲۵]. روش GPR در شکل حاضر خود از عمق‌سنجی رادیویی یخ‌های قطبی در سال ۱۹۶۰ آغاز شد. از آن زمان تاکنون در بسیاری از کارها و مشاغل با ابزارهای دقیق به طور متداول دیده شده است [۲۶]. GPR یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد ژئوفیزیکی است که با امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا (۱۲/۵ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی در اعماق کم را به‌منظور آشکارسازی زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند [۲۷]. ایده‌ی استفاده از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا برای اولین بار به اختراعات ثبت شده در آلمان به سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر^۱ برمی‌گردد [۲۸]. در GPR، امواج الکترومغناطیس به درون زمین انتشار می‌یابد، بخشی از این امواج در اعماق کم

^۱ Hulsmeyer

با تغییر خصوصیات الکترومغناطیسی تغییر پیدا کرده، منعکس می‌شوند و این بازتاب‌ها در دستگاه گیرنده ثبت می‌شود. سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی که عامل اصلی ایجاد این انعکاس می‌باشند؛ به واسطه‌ی تباین نسبی گذردهی الکتریکی محیط دربرگیرنده و هدف زیرسطحی تعیین می‌شود. این روش مشابه روش لرزه‌نگاری بازتابی است؛ که بر اساس انتشار و بازتاب موج عمل می‌کند. به منظور آشکار کردن یک شیء بایستی بخشی از انرژی موج رادیویی که به سطح شیء برخورد می‌کند؛ بازتابیده شود. این امر مستلزم آن است که تفاوتی بین ویژگی‌های الکتریکی شیء و محیط در برگیرنده‌ی آن وجود داشته باشد. تغییرات در گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی الکتریکی، بین شیء و محیط دربرگیرنده‌ی آن سبب بازتاب امواج رادیویی از شیء می‌شود. با آشکار کردن این انرژی بازتاب شده، تعیین محل و موقعیت چشمه‌های پراکنده و بازتاب کننده‌ی انرژی، امکان‌پذیر می‌شود. GPR برای محیط‌های با مقاومت ویژه بالا در جایی که اطلاعات با جزئیات دقیق مورد نیاز است؛ کارایی بیشتری دارد [۲۹]. این روش دارای چهار مزیت اساسی در برداشت می‌باشد که شامل سادگی، سرعت عمل بالا، غیر مخرب و دقیق بودن با قدرت تفکیک زیاد است [۳۰].

۲-۱-۲ اصول روش GPR

سیستم GPR، سیگنال‌های الکترومغناطیسی را به وسیله‌ی فرستنده ارسال می‌کند و نحوه رفتار میدان الکترومغناطیسی بازتابی از ناهمگنی‌های زیرسطحی را به واسطه گیرنده، آشکار می‌سازد. سیگنال ثبت شده به تغییرات ویژگی‌های فیزیکی ثبت شده از محیط پیرامون و خصوصیات موج GPR، مانند میزان تضعیف میدان در محیط سیر موج (α) و امپدانس مغناطیسی (Z) بستگی دارد. ویژگی‌های فیزیکی مواد که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در یک محیط کنترل می‌کنند؛ شامل گذردهی نسبی الکتریکی (ϵ)، رسانایی الکتریکی (σ) و تراوایی مغناطیسی (μ) هستند. در همه‌ی شیوه‌های برداشت GPR، اندازه‌گیری از یک مؤلفه‌ی میدان الکترومغناطیسی (معمولاً مؤلفه‌ی میدان الکتریکی)، صورت

می‌گیرد و شدت مؤلفه‌ی میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده به یک سیگنال ولتاژ تبدیل شده و نسبت به زمان ثبت می‌شود [۳۱].

همان‌طور که گفته شد؛ اصول GPR در تئوری الکترومغناطیس (EM) ^۱ نهفته است. این توضیحی کلی بر ساختار بنیادی کارهای لازم برای کمی کار کردن با GPR می‌باشد. معادلات ماکسول از منظر ریاضیات، فیزیک میدان‌های الکترومغناطیسی را توصیف می‌کند، در عین حال روابط بین ویژگی‌های سازنده مواد را کمی می‌کند. با ترکیب معادلات ماکسول و ویژگی‌های سازنده‌ی مواد می‌توان توصیف کمی سیگنال‌های GPR را انجام داد [۳۲].

از نظر ریاضی، میدان‌ها و روابط EM به شرح زیر بیان می‌شوند [۳۲]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (۶-۲)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (۷-۲)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q_v \quad (۸-۲)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (۹-۲)$$

در این معادلات \vec{E} بردار شدت میدان الکتریکی، \vec{B} چگالی شار مغناطیسی، t زمان، \vec{H} بردار شدت میدان مغناطیسی، \vec{D} چگالی بار الکتریکی (جابه‌جایی الکتریکی)، \vec{J} چگالی جریان الکتریکی و q_v چگالی حجمی بار الکتریکی است. ε ، μ و σ نیز به ترتیب گذردهی دی‌الکتریک، تراوایی مغناطیسی و رسانندگی الکتریکی می‌باشند. این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی مواد هستند که رفتار انرژی الکترومغناطیسی را در محیط کنترل می‌کنند و معمولاً پارامترهای ساختاری اطلاق می‌شوند. به‌طور کلی این پارامترها

^۱ Electromagnetic

می‌توانند، به شکل توابعی از مکان، جهت، انتشار و کنترل میدان اعمال شده و زمان باشند [۳۳].

ویژگی‌های گذردهی الکتریکی، رسانندگی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی، سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی و میرایی انرژی امواج الکترومغناطیسی را کنترل می‌کنند. تجزیه و تحلیل تغییرات، در رفتار EM در بررسی‌های انجام شده اطلاعات مهمی از ایمنی و درستی از ساختارها می‌دهند. این تغییرات تباین مربوط به امپدانس EM را به وجود می‌آورند؛ بنابراین ویژگی‌های الکترومغناطیسی در زیر خاک به شدت بر روی سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی و تضعیف و میرایی انرژی تولید شده در زیر زمین تأثیر می‌گذارند. در شرایط با اتلاف کم سرعت (V) و میرایی موج EM (α) برابر است با :

$$V = 1/\sqrt{\epsilon\mu} \quad (10-2)$$

$$\alpha = 0.5\sigma\sqrt{\mu/\epsilon} \quad (11-2)$$

که در روابط (۱۰-۲) و (۱۱-۲) ϵ ضریب دی‌الکتریک، μ تراوایی مغناطیسی و σ رسانندگی الکتریکی می‌باشند. در روش GPR که با فرکانس بالا کار می‌کند نیز میدان‌ها توسط امواج الکترومغناطیسی در محیط پخش شده و از معادلات قبلی، معادلات زیر حاصل می‌شود:

$$V = 1/\sqrt{\epsilon\mu} = C/\sqrt{K} \quad (12-2)$$

$$\alpha = 0.5\sigma\sqrt{\mu/\epsilon} = \sigma/2.K \quad (13-2)$$

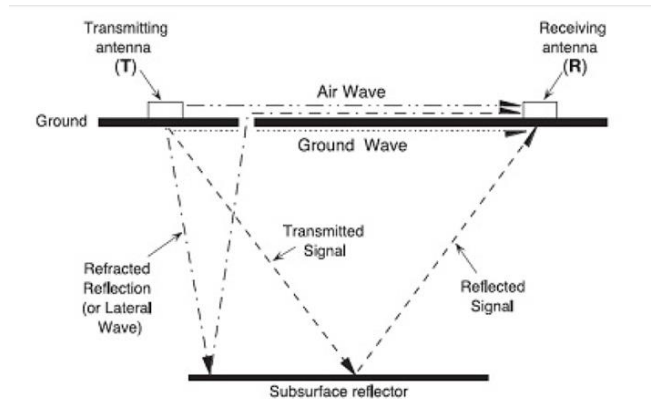
در رابطه (۱۳-۲) هنگامی که تراوایی مغناطیسی ناچیز تلقی شود، $Z = \sqrt{\mu/\epsilon} = Z_0/\sqrt{K}$ امپدانس محیط مورد بررسی، Z_0 امپدانس فضای خالی و K ضریب دی‌الکتریک است. دو عبارت فوق نشان می‌دهند که قابلیت انتقال دی‌الکتریک سرعت را کنترل می‌کند؛ در حالی که رسانندگی الکتریکی تأثیر زیادی در میرایی دارد. این دو پارامتر در استفاده از GPR بسیار مهم هستند و پدیده انتشار امواج EM را در محیط، تنظیم و تجزیه و تحلیل می‌کنند [۳۴].

۲-۲-۲ تئوری انتشار امواج الکترومغناطیس

به طور کلی دستگاه GPR شامل یک تولید کننده سیگنال و یک دریافت کننده است. سیگنال منتشر شده به وسیله‌ی این تولیدکننده توسط یک آنتن فرستنده به درون زمین فرستاده می‌شود. امواج منتشر شده با سرعت بسیار زیاد در زمین جابجا شده و هنگامی که به یک جسم یا یک سطح بازتاب دهنده برخورد می‌کنند، به دلیل متفاوت شدن امپدانس الکترومغناطیسی در این نواحی بخشی از امواج منتشره از سطح برخورد بازتاب خواهد شد [۳۵]. شکل ۲-۷ انواع امواج منتشره و دریافتی در روش GPR را برای یک محیط حاوی یک بازتابنده افقی تخت نشان می‌دهد.

در روش ژئوفیزیکی GPR، امواج الکترومغناطیس (EM) به درون زمین منتشر شده، بخشی از این امواج EM با تغییر خصوصیات الکترومغناطیسی در اعماق کم، بازتاب پیدا می‌کنند و در گیرنده دستگاه ثبت می‌شوند. سرعت انتشار امواج که عامل اصلی در تولید بازتاب‌ها است، به وسیله تباین گذردهی نسبی محیط دربرگیرنده و هدف زیرسطحی تعیین می‌شود [۳۶].

برای همه‌ی کارهای عملی GPR این مقادیر به صورت کمیت‌های اسکالر مستقل از میدان عمل می‌کنند، به بیان دیگر پاسخ به حضور میدان یکسان و مستقل از شدت میدان است. اگر چه این فرضیات به ندرت معتبر هستند؛ ولی در کارهای عملی توصیف چنین پیچیدگی‌هایی بسیار مشکل است. پاسخ مواد به زمان اعمال میدان هم بستگی دارد. این مقادیر زمانی که نرخ تغییرات میدان کم باشد، ثابت و زمانی که نرخ تغییرات میدان زیاد باشد؛ متغیر در نظر گرفته می‌شوند. در بسیاری از کاربردهای زمین شناسی و ژئوتکنیکی GPR، ویژگی‌های الکتریکی عامل عمده کنترل کننده پاسخ‌های GPR هستند. تغییرات تراوایی مغناطیسی سنگ‌ها معمولاً ضعیف است و بنابراین در روش GPR در بیشتر مواقع گذردهی الکتریکی و رسانندگی الکتریکی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر و کنترل کننده پاسخ‌های GPR می‌باشند [۲۴].



شکل ۷-۲ نمایش امواج منتشره و دریافتی در GPR [۲۴].

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه بعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت اتلاف این امواج تاثیر می‌گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی از معادله (۱۴-۲) محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2 \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma/\varepsilon\omega)}}{2}}} \quad (14-2)$$

که در این رابطه، C_0 سرعت موج الکترومغناطیس در هوا، μ_r نشان دهنده تراوایی مغناطیسی نسبی، ε_r گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا و ω بسامد زاویه‌ای موج GPR هستند. عبارت $\sigma/\varepsilon\omega$ که به فاکتور اتلاف^۱ معروف است، در محیط‌های کم اتلاف مانند شن و ماسه‌های خالص خشک نزدیک به صفر و قابل صرف نظر است. هم‌چنین اثر μ_r در محیط‌های غیرمغناطیس و در محدوده‌ی بسامدهای GPR کوچک است و می‌توان آن را مانند محیط‌های غیرمغناطیس برابر ۱ در نظر گرفت. بدین ترتیب رابطه (۱۴-۲) به معادله (۱۵-۲) تبدیل می‌شود [۱۹].

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (15-2)$$

^۱ Loss factor

گذردهی دی الکتریکی مهم‌ترین عاملی است که انتشار امواج الکترومغناطیسی را درون ساختارهای مورد بررسی کنترل می‌کند. در جدول ۲-۲ مقادیر گذردهی نسبی بعضی از مواد آورده شده است [۳۷].

جدول ۲-۲. مشخصات الکترومغناطیسی مواد [۴۷].

مواد رایج	گذردهی نسبی (ϵ_r)	رسانندگی (ms/M)	میرایی (dB/M)	سرعت (M/ns)
هوا	۱	۰	۰,۳۰	۰
آب مقطر	۸۰	۰,۰۱	۰,۰۳۳	۲۰۰۰
آب شیرین	۸۰	۰,۵	۰,۰۳۳	۰,۱
آب دریا	۸۰	۳۰۰۰	۰,۰۱	۱۰۰۰
ماسه خشک	۳-۵	۰,۰۱	۰,۱۵	۰,۰۱
ماسه اشباع	۲۰-۳۰	۰,۱-۱	۰,۰۶	۰,۰۳-۰,۳
رس‌ها	۵-۴۰	۲-۱۰۰۰	۰,۱۲	۱-۳۰۰
سنگ آهک	۴-۸	۰,۵-۲	۰,۰۹	۰,۴-۱
شیل	۵-۱۵	۱-۱۰۰	۰,۰۷	۱-۱۰۰
گرانیت‌ها	۴-۶	۰,۰۱-۱	۰,۰۶	۱-۰,۰۱
سیلت‌ها	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰,۱۳	۱-۱۰۰
نمک خشک	۵-۶	۰,۰۱-۱	۰,۱۳	۰,۱-۱
یخ	۳-۴	۰,۰۱	۰,۱۶	۰,۰۱

برای به دست آوردن یک مقیاس کمی از ضرایب بازتاب و مطالبی که تا اینجا ذکر شد، باید به جدول ۲-۳ توجه شود که در آن مشخصات الکترومغناطیسی بعضی از مواد رایج تشکیل دهنده‌ی زمین آورده شده است. در این جدول ϵ_{r1} و ϵ_{r2} گذردهی نسبی در محیط‌های اول و دوم هستند؛ که در ستون

اول جدول به ترتیب فهرست شده‌اند. هرچقدر ضریب بازتاب بزرگ‌تر باشد، مقدار انرژی که به گیرنده می‌رسد بیشتر است و مرزها یا فصول مشترک بهتر قابل تفکیک می‌باشند. برای مثال فصل مشترک خاک و فلز دارای ضریب بازتابی در حدود ۱- است. به این معنی که تمام انرژی موج ارسالی از این فصل مشترک بازتاب می‌شود. از این رو فلزات مدفون در خاک اهداف بسیار مناسبی برای آشکارسازی به روش GPR هستند. فصل مشترک خاک و سنگ دارای ضریب بازتاب کمتری نسبت به دیگر فصل مشترک‌ها است. از تفاوت بین ضرایب بازتاب در این فصل مشترک می‌توان در تفسیر داده‌های GPR استفاده کرد [۴۴].

جدول ۲-۳. گذردهی نسبی محیط‌های متفاوت به همراه ضرایب بازتاب [۴۴].

ضریب بازتاب	ϵ_{r2}	ϵ_{r1}	فصل مشترک
-۰,۳۳	۴	۱	هوا-خاک خشک
-۰,۶۷	۲۵	۱	هوا-خاک مرطوب
-۰,۴۳	۲۵	۴	خاک خشک-خاک مرطوب
-۰,۰۱	۶	۴	خاک خشک-سنگ
۰,۳۴	۶	۲۵	خاک مرطوب-سنگ
-۰,۶۷	۸۱	۳,۲	یخ- آب
-۰,۵	۸۱	۹	خاک مرطوب- آب
۰,۵	۱	۹	خاک مرطوب- هوا
-۱	۳۰۰	۴	خاک خشک- فلز

۲-۲-۳ برداشت و استفاده از روش GPR

برخی پارامترهای برداشت شامل مقدار فرکانس مرکزی، بازه فرکانسی آنتن و وضعیت آنتن معمولاً

به دلیل در اختیار داشتن یک نوع دستگاه GPR تک فرکانس، ثابت (غیرقابل تغییر) باقی می‌ماند. مهم‌ترین پارامترهای برداشت مورد بررسی نیز شامل فرکانس نمونه‌برداری زمانی^۱، فاصله نمونه‌برداری مکانی^۲، پنجره زمانی^۳ و تعداد ردموج‌های برانبارش شده^۴ می‌باشد [۳۸].

هدف پیمایش GPR به دست آوردن اطلاعات غیرمستقیم از ساختارهای زیرسطحی به وسیله‌ی امواج رادیویی است. میدان EM به عنوان تابع مکان و زمان باید نمونه‌برداری و ثبت شود. طراحی پیمایش برای نمونه‌برداری از اهداف باید پیوسته باشد. برای یک موج سینوسی معین f ، با زمان و فاصله‌ی نمونه‌برداری مکانی، Δx و Δt و برای رعایت کردن مقادیر نایکوئست^۵، باید از روابط ۱۶-۲ و ۱۷-۲ پیروی شود.

$$\Delta t \leq 1/2f \quad (۱۶-۲)$$

$$\Delta x \leq v/2f \quad (۱۷-۲)$$

اندازه‌گیری‌های GPR به دو دسته‌ی بازتابی و عبوری محدود می‌شوند، در شکل ۸-۲ پیمایش بازتابی با استفاده از یک فرستنده و یک دریافت کننده که بیشتر رایج است، نشان داده شده است. اگرچه استفاده از چند منبع و چند دریافت کننده گاهی اوقات برای برخی از کارها استفاده می‌شوند.

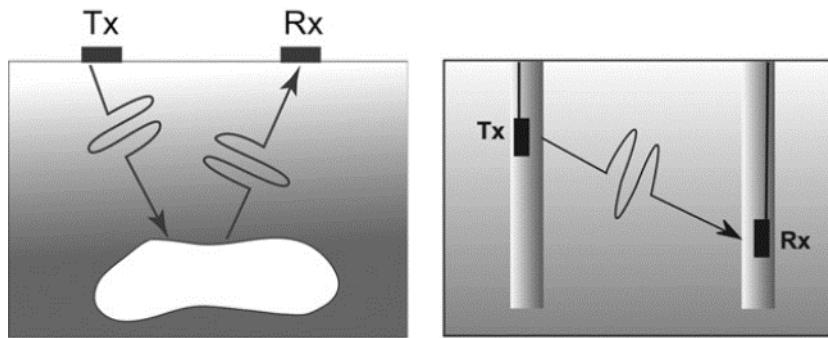
^۱ Sampling time

^۴ Stacking

^۲ Sampling interval

^۵ Nyquist

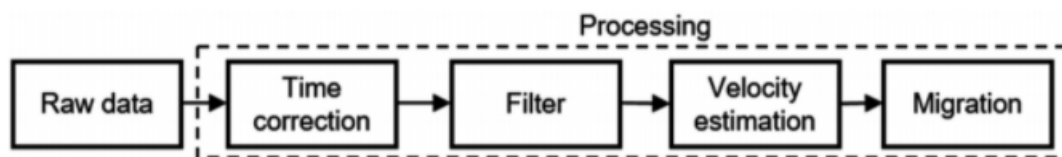
^۳ Time window



شکل ۲-۸. امواج GPR از امواج رادیویی برای بررسی زیرسطحی رفتار دی‌الکتریکی مواد استفاده می‌کند. دو حالت اندازه‌گیری متداول است که در یکی از این حالات انرژی منعکس شده یا پراکنده شناسایی می‌شود (شکل سمت چپ). در حالت دوم (شکل سمت راست) که به توموگرافی GPR معروف است، تأثیراتی بر انرژی منتقل شده از طریق ماده می‌شود [۳۹].

۴-۲-۲ پردازش داده‌های GPR

برای پردازش داده‌های GPR می‌توان مطابق با روند نشان داده شده در شکل ۲-۹ عمل کرد [۲۹].



شکل ۲-۹. روند پردازش داده‌های GPR؛ از سمت چپ به راست پردازش‌های تصحیح زمانی، فیلترهای مورد نیاز برای افزایش SNR، تخمین سرعت و مهاجرت بر روی داده‌های خام GPR انجام می‌شود [۲۹].

۱-۴-۲-۲ تصحیح صفر زمانی^۱

جابجایی‌های زمانی رسید موج، زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت در نزدیک سطح رادار به طور قابل توجهی تغییر داشته باشد [۴۰]. تصحیح صفر زمانی اولین مرحله‌ی پردازش داده‌های GPR می‌باشد [۳۰]. این خطا وقتی ایجاد می‌شود که در پیمایش بازتابی اولین رویداد^۲ (موج مستقیم که از طریق هوا

^۱ Static Shift

^۲ First breake

از فرستنده به گیرنده می‌رسد)، در زمان برداشت داده‌ها تغییر موقعیت دهد. در واقع این جابجایی باعث جابه‌جایی اولین رویداد بلکه باعث رانش تمامی رویدادها، از جمله رویدادهای بازتابی از مکان واقعی‌شان می‌گردد [۴۱]. تغییرات حرارتی، نوسانات الکتریکی، تغییر طول کابل و تغییرات شکاف هوایی آنتن می‌توانند باعث ایجاد این خطا شوند [۲۹]. زمانی که نمایشگر الکترونیکی به شدت سردتر و یا گرم‌تر از دمای محیط اطراف می‌شود، این خطا تشدید می‌شود. کابل‌های آسیب دیده نیز می‌توانند باعث بوجود آمدن این خطا شوند که خطای ایجاد شده در این حالت نامنظم است [۴۱ و ۴۲].

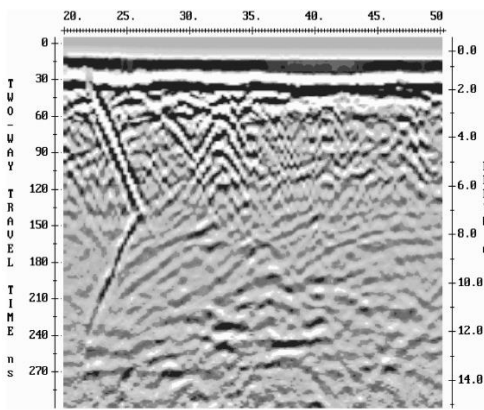
۲-۲-۴-۲ تصحیح اشباع سیگنال^۱

یک از ویژگی‌های منحصر به فرد GPR نزدیک بودن فرستنده و گیرنده به یکدیگر است [۳۹]. به علت فاصله زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده، پالس‌هایی که به صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و نیز بازتاب‌هایی که از بی‌هنجاری‌های نزدیک سطح به وجود می‌آیند، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود. میدان‌های نزدیک فرستنده دربرگیرنده‌ی انرژی با فرکانس پایین است که وابسته به میدان‌های الکترواستاتیکی و القایی می‌باشند و با افزایش فاصله به سرعت زوال می‌یابند. این مسئله سبب به وجود آمدن یک زوال آهسته فرکانس پایین که به WOW معروف است، بر روی ردموج‌ها می‌شود. این زوال فرکانس پایین بر روی فرکانس‌های بالاتر قرار گرفته و آن‌ها را دچار اغتشاش می‌کند. اندازه و شدت این زوال فرکانس پایین به فاصله آنتن‌ها و همچنین مشخصات الکتریکی زمین وابسته است [۴۴]. فرآیند پردازش سیگنال "wow" را می‌توان با استفاده از اعمال یک فیلتر زمانی با تضعیف زیاد^۲ بر سیگنال شناسایی شده مهار کرد. این فرآیند "dewow" نامیده می‌شود [۳۹]. برای کاهش این نوفه‌ها دو راه حل پیشنهاد شده است: ۱- استفاده از فیلتر "Dewow" و ۲- استفاده

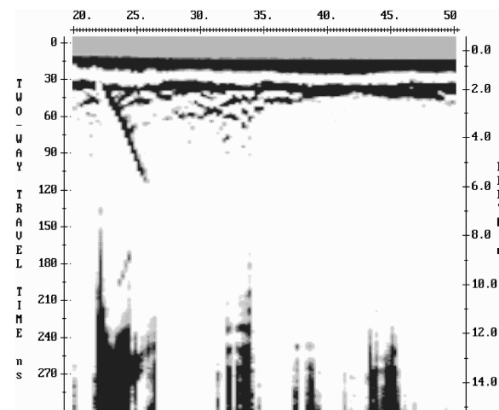
^۱ Signal saturation correction

^۲ High-loss

از فیلتر "Dc-Shift". در شکل ۲-۹، الف) مقطع GPR قبل از اعمال فیلتر "Dewow" و در شکل ۲-۹ ب) بعد از اعمال فیلتر "Dewow" نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بعد از اعمال پردازش یاد شده و حذف مؤلفه‌های فرکانس پایین، بازتاب کننده‌ها به خوبی قابل تشخیص می‌باشند. همچنین در شکل ۲-۱۰ ردموج GPR قبل و بعد از اعمال فیلتر "Dewow" نشان داده شده است.

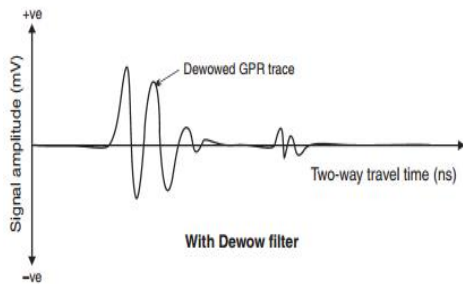


(ب)

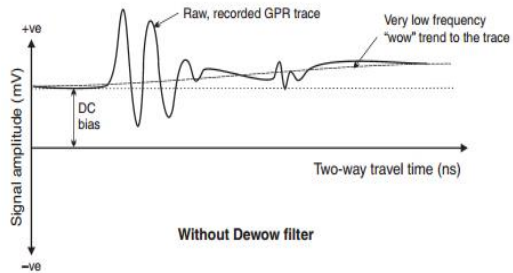


(الف)

شکل ۲-۱۰ الف) اثر wow بر داده‌های GPR ب) بازتاب‌ها بعد از اعمال فیلتر Dewow [۴۵].



(ب)

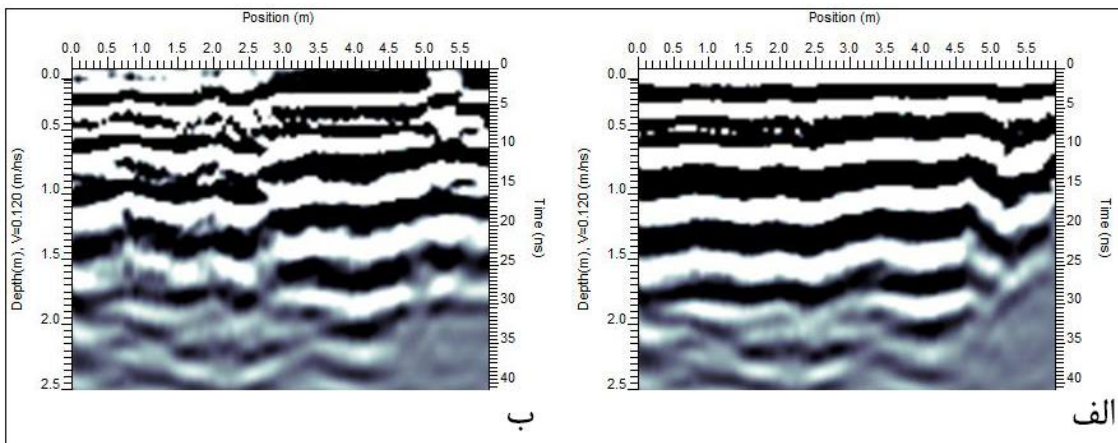


(الف)

شکل ۲-۱۱ الف) ردموج GPR قبل از اعمال Dewow ب) ردموج GPR بعد از اعمال Dewow [۴۲].

۲-۲-۴ حذف نوفه زمينه^۱

حذف نوفه زمينه يکي از مراحل رايج در روند پردازش است؛ که بر روی داده‌های GPR اعمال می‌شود. این فیلتر یک فیلتر فضایی می‌باشد؛ که به صورت یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند و باعث می‌شود سیگنال‌های ضعیف‌تر در مقاطع GPR تیزتر دیده شوند [۴۲]. این فیلتر در واقع اثرات نوفه‌های ناخواسته را تا حدودی کاهش می‌دهد و به عبارتی می‌توان گفت که باعث کاهش اثر زمينه می‌شود. در شکل ۲-۱۲، الف) مقطع GPR قبل از اعمال حذف اثر زمينه و شکل ۲-۱۲، ب) بعد از اعمال آن را نمایش می‌دهند [۴۳].



شکل ۲-۱۲. مقطع GPR الف) قبل از اعمال فیلتر حذف اثر زمينه و ب) بعد از اعمال فیلتر حذف اثر زمينه [۴۳].

۲-۲-۴ بهره‌ها^۲

بهره یک تابع متغیر با زمان است؛ که می‌توان با استفاده از آن توان سیگنال در اعماق بیشتر را افزایش داد. از بهره‌های مختلفی برای اعمال بر داده‌های GPR استفاده می‌شود. انواع مختلف بهره‌ها

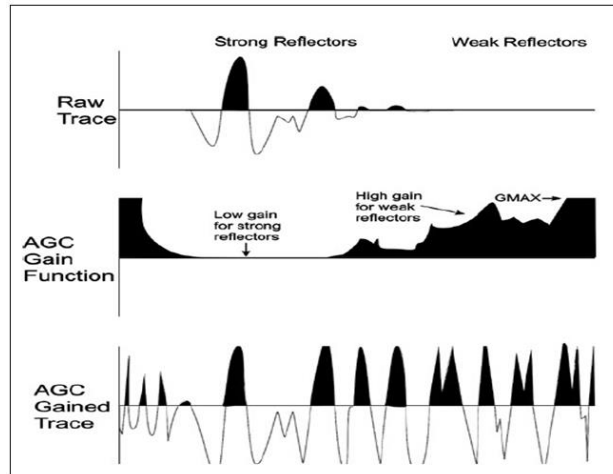
^۱ Background removal

^۲ Gain

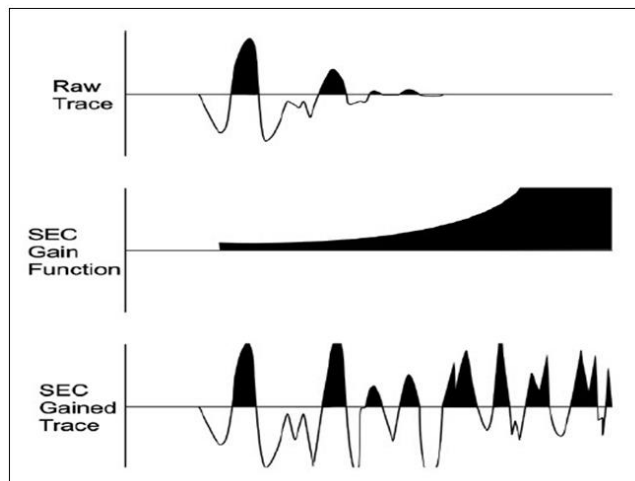
عبارتند از: بهره ثابت، بهره نمایی، بهره گسترش هندسی و نمایی^۱ (SEC) و کنترل بهره اتوماتیک^۲ (AGC)؛ که هر بهره پارامترهای خاص خود را دارد [۴۱]. در بررسی‌های رسوب‌شناسی به نقشه درآوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است. به همین خاطر در اغلب مطالعات رسوب‌شناسی از بهره‌ی AGC استفاده می‌شود. این بهره به طور معکوس با توان سیگنال متناسب است و بهره را تا حدودی که کاربر تعریف می‌کند، بر روی داده‌ها اعمال می‌کند. از این رو سعی در یکسان‌سازی سیگنال‌ها دارد. شکل ۲-۱۳ و شکل ۲-۱۴ به ترتیب نحوه‌ی عملکرد بهره‌های AGC و SEC را نشان می‌دهند که مؤلفه‌ی متغیر در اعمال این بهره‌ها اندازه پنجره زمانی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲-۱۳ دیده می‌شود؛ تفاوت این دو بهره در این است که بهره‌ی AGC با اعمال یک تابع بهره که با عکس شدت سیگنال متناسب است و همه‌ی سیگنال‌ها را یکسان می‌کند ولی بهره‌ی SEC فقط توان سیگنال را در عمق به صورت خطی و نمایی افزایش می‌دهد. بهره‌ی SEC ترکیبی از بهره زمانی خطی و نمایی است و با استفاده از اطلاعات مربوط به اتلاف انرژی سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی ناشی از رسانندگی سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد [۴۴].

^۱ Spreading and exponential compensation
Gain

^۲ Automatic gain control



شکل ۲-۱۳. یک رد منفرد از یک پروفیل GPR قبل و بعد از اعمال بهره‌ی AGC [۴۵].



شکل ۲-۱۴. یک رد منفرد از یک پروفیل GPR قبل و بعد از اعمال بهره‌ی SEC [۴۵].

۲-۲-۵ کاربردهای روش GPR

برخی از مناطق و اهداف مختلفی که برای شناسایی یا بررسی قدرت تفکیک بالا لازم دارند و روش

GPR برای کاوش یا مطالعه این اهداف مناسب است [۳۹].

۱. بررسی ویژگی‌های خاک (خواص خاک که بر عملکرد GPR تأثیر می‌گذارند).

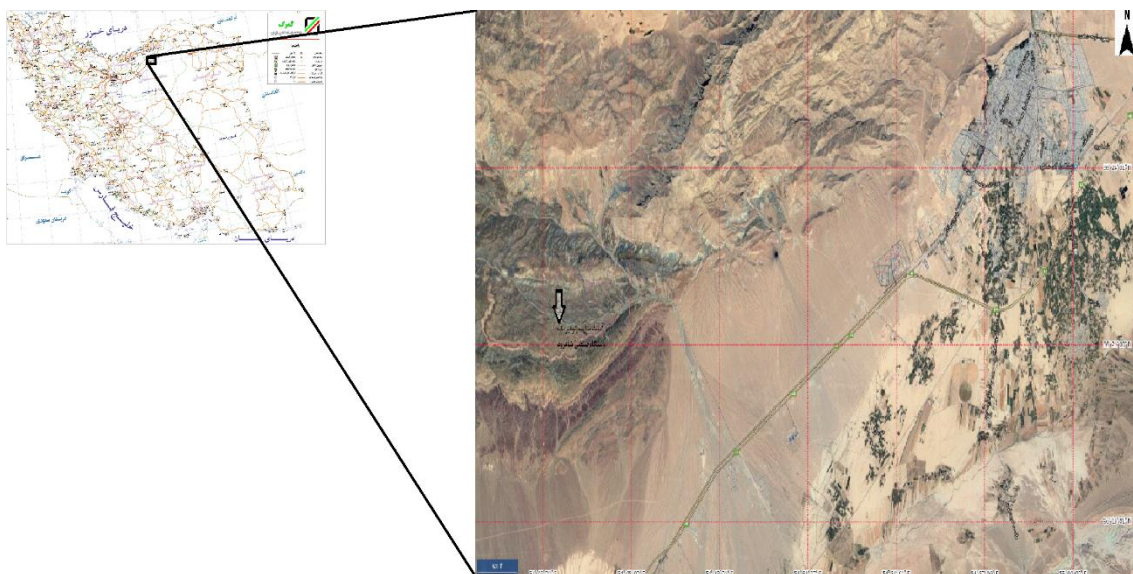
۲. بررسی مناطق دربرگیرنده‌ی ذغال سنگ
۳. تعیین ویژگی‌های فروشویی و مکان‌های دفن زباله
۴. مطالعه‌ی مکان‌های فرونشست
۵. مطالعات باستان‌شناسی
۶. اکتشاف و شناسایی اجسام مدفون
۷. مطالعه و بررسی درز و شکاف‌های سنگ‌ها و سازه‌ها
۸. بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی
۹. مطالعات چینه‌شناسی
۱۰. اکتشاف کانال‌های رودخانه‌ای مدفون
۱۱. مطالعه‌ی محل ریشه‌ی گیاهان و گیاه‌خاک
۱۲. تخمین رطوبت خاک

فصل ۳ : موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، روش کار در محدوده، طراحی و

برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR

۱-۳ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در تست سایت ژئوفیزیکی دانشگاه صنعتی شاهرود واقع شده است و در زون ۴۰S ، WGS84 قرار دارد. این تست سایت در فاصله ۲۴ کیلومتری شهر شاهرود و ۱۵ کیلومتری روستای دهملا و در شمال غربی آن قرار دارد. در شکل ۱-۳ موقعیت تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود و مسیر دسترسی به آن دیده می‌شود.



شکل ۱-۳. مسیر دسترسی به تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

دو محدوده برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه و GPR در این تحقیق در نظر گرفته شده است. محدوده A در بردارنده‌ی لوله‌ای پلی اتیلنی و با قطر ۰/۵ متر می‌باشد. همچنین بستر آبرفتی که خصوصیات ژئوالکتریکی و پاسخ GPR در آن قبل و بعد از نشت محلول بررسی شده و در یک رودخانه فصلی قرار دارد (محدوده B). در شکل ۲-۳ موقعیت دو محدوده‌ی A و B در تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نشان داده شده است.



شکل ۳-۲. محدوده‌های تعیین شده برای مطالعه؛ محدوده A: محل قرارگیری لوله مدفون، محدوده B بستر آبرفتی مورد مطالعه.

۲-۳ اهداف مورد مطالعه در تست سایت ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

در این مطالعه یک لوله‌ی پلی‌اتیلنی که دارای یک شیر ورودی و یک دریچه‌ی خروجی می‌باشد به عنوان مخزن در نظر گرفته شده است. این لوله‌ی استوانه‌ای شکل به طول ۶ متر و قطر ۰/۵ متر می‌باشد و در زیر زمین دفن شده است. در ابتدای مطالعه ویژگی‌های الکتریکی لوله‌ی خالی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده است. سپس لوله را با استفاده از محلول نمکی (محلول کات کبود) با غلظت ۰/۴۷ مولار پر کرده و دوباره ویژگی‌های الکتریکی لوله با استفاده از روش‌های ذکر شده، اندازه‌گیری شده است.

در قسمت دیگری از مطالعه تغییرات ویژگی‌های الکتریکی در یک زمین آبرفتی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR در زمان‌های قبل و بعد از ورود محلول نمکی به زمین مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که زمان بررسی به دنبال از تزریق محلول به زمین پس از خشک شدن زمین انجام گرفته است. زیرا خیس بودن زمین باعث ایجاد رسانندگی کاذب در زمین می‌شود.

۳-۲-۱ طراحی و برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی برای دستیابی به اهداف مختلف و در دو محدوده طراحی شده است. محدوده A برای اکتشاف اجسام مدفون در طول زمان و با تغییر خصوصیات طراحی و انجام شده است. محدوده B یک زمین آبرفتی می‌باشد؛ که کف آن با رسوبات رودخانه‌ای و سیلابی پوشیده شده است. در محدوده B هدف از انجام مطالعات، بررسی تغییرات ایجاد شده ناشی از فرسایشی محلول کات کبود و بررسی تغییرات مقاومت ویژه به وجود آمده در گذر زمان در این ناحیه می‌باشد.

برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده A تعداد ۴ پروفیل در راستای تقریباً عمود بر امتداد لوله برنامه‌ریزی شده است. به دلیل حساسیت و دقت بالای مورد نیاز برای جزئیات از آرایه الکتروودی دوقطبی- دوقطبی با فاصله الکتروودی ۰/۵ متر و پروفیل‌هایی به طول هریک ۶ متر تعیین شده است. فاصله پروفیل‌ها از یکدیگر برابر ۱/۵ متر مشخص شده است و پروفیل شماره یک در جهت شمال غربی محدوده قرار دارد و پروفیل‌های دیگر به ترتیب به سمت جنوب محدوده‌ی مطالعه طراحی شده‌اند. دستگاه ژئوالکتریکی مورد استفاده SAS4000 می‌باشد. امتداد این پروفیل‌ها در جهت آزیموت ۲۰ می‌باشد.

به دلیل پوشش افقی وسیع و زمان کم در برداشت داده‌ها نسبت به آرایه‌های دیگر از آرایه دوقطبی - دوقطبی استفاده شده است. در این مطالعه پیمایش مقاومت الکتریکی در محل لوله مدفون در تابستان ۱۳۹۸ و با اطمینان از این که لوله خالی از محلول است، انجام شده است. سپس لوله از محلول کات کبود پر شده و پیمایش مقاومت ویژه الکتریکی در محل پروفیل‌های تعیین شده در آبان ماه ۱۳۹۸ بر روی این لوله مدفون تکرار شده و نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است.

در محدوده B تعداد ۵ پروفیل به طول ۳/۵ الی ۵ متر (وابسته به عرض بستر رسوبی که حاشیه‌ای تپه‌ای با شیب زیاد دارد) با آرایه الکتروودی دوقطبی- دوقطبی و با فاصله‌ی الکتروودی ۰/۵ متر طراحی

شده است و برداشت‌های الکتریکی آن قبل و بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون در زیر سطح زمین صورت گرفته است.

در بخش دیگر این مطالعه محدوده زمین آبرفتی در مکانی که شیر لوله در آن باز می‌شود؛ تغییرات ناشی از تزریق آلودگی ایجاد شده توسط محلول کات کبود مورد مطالعه قرار گرفته است. کات کبود یا زاج کبود یک ترکیب شیمیایی با فرمول $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ است. این ماده (که در اصل عضوی از خانواده نمک‌هاست)، مجموع چند ترکیب است که در میزان آب‌پوشی با هم تفاوت دارند. سولفات مس بدون آب، پودر سبز کم رنگ یا سفید مایل به خاکستری است و در حالی که مس سولفات پنج آبه که رایج‌ترین شکل این ماده است، به رنگ آبی به همراه واکنش حرارت زا در آب حل می‌شود، که هندسه مولکولی هشت سطحی و خاصیت پارامغناطیسی دارد. از اسامی دیگر مس سولفات می‌توان به کات کبود اشاره کرد. سولفات مس به صورت صنعتی از طریق الکترولیز فلز مس با اسید سولفوریک غلیظ یا اکسید مس (I) با اسید سولفوریک رقیق تهیه می‌شود. سولفات مس برای مصارف آزمایشگاهی معمولاً به صورت آماده تهیه می‌شود. شکل بدون آب سولفات مس به عنوان ماده معدنی کمیاب با نام کالکوسیانیت وجود دارد. سولفات مس آبدار در طبیعت با عنوان کالکانتیت (پنج آبه) و دو مورد کمیاب‌تر بوناتایت (سه آبه) و بوثایت (هفت آبه) ایجاد می‌گردد [۴۶].

۲-۲-۳ طراحی و برداشت داده‌های GPR

دقیقاً در مکان خطوط برداشت تعیین شده برای برداشت داده‌های ژئوالکتریک در دو محدوده A و B، پروفیل‌های GPR نیز در دو مرحله برداشت شده است. این کار برای مقایسه‌ی بهتر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و GPR انجام شده است. برای برداشت داده‌های GPR از دستگاه Cobra Plug_in با آنتن ۱۵۰ مگاهرتز استفاده شده است. برای این مطالعه عمق نفوذ کم مد نظر بوده است

ولی به دلیل عدم دسترسی به آنتن با فرکانس بالاتر از این آنتن استفاده شده است. تعداد پروفیل‌های GPR برداشت شده شامل ۴ خط برداشت بر روی لوله مدفون با آزیموت ۲ درجه و تعداد ۵ خط برداشت با آزیموت ۲۰ درجه در بستر رسوبی (محل نشت محلول) می‌باشند.

فصل ۴: نتایج برداشت، مدل سازی و تفسیر داده های مقاومت ویژه و

GPR به زمین منطقه مورد مطالعه

۱-۴ مدل سازی و تفسیر داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی

۱-۱-۴-۱ محدوده A

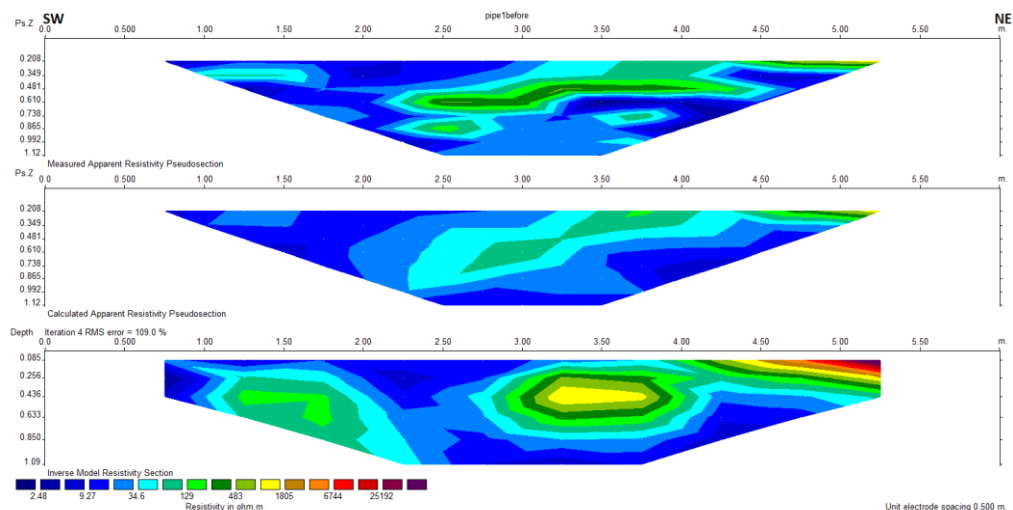
این محدوده شامل ۴ پروفیل با نام‌های A1، A2، A3 و A4 می‌باشد. پروفیل A1 در قسمت شمال غربی محدوده و پروفیل A4 در قسمت جنوب شرقی محدوده قرار گرفته است. این پروفیل‌ها به صورت موازی با هم بوده و هریک به طول ۶ متر می‌باشد. برداشت مقاومت ویژه با آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی فاصله‌ی الکترودی ۰/۵ متر در طول پروفیل با آزیموت ۲۰ و در راستای عمود بر امتداد ساختار مدفون؛ در جهت شمال شرقی و در امتداد شمال شرقی-جنوب غربی طراحی شده است. هدف اکتشافی در این محدوده بررسی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی یک لوله‌ی مدفون پلی اتیلنی در دو حالت خالی و پر می‌باشد. در این بخش به تفسیر مدل‌های مقاومت ویژه دوبعدی به دست آمده از مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که برداشت داده‌های مقاومت ویژه در طول پروفیل‌ها با استفاده از آرایه دوقطبی-دوقطبی و فاصله‌ی الکترودی ۰/۵ انجام شده است همچنین مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از نرم افزار RES2D INV انجام شده است.



شکل ۴-۱. محدوده‌ی A، جهت و راستای پروفیل‌های اجرا شده و موقعیت قرارگیری آن‌ها نسبت به هدف (دید از جنوب غرب به شمال شرق).

۴-۱-۱-۱ پروفیل A1

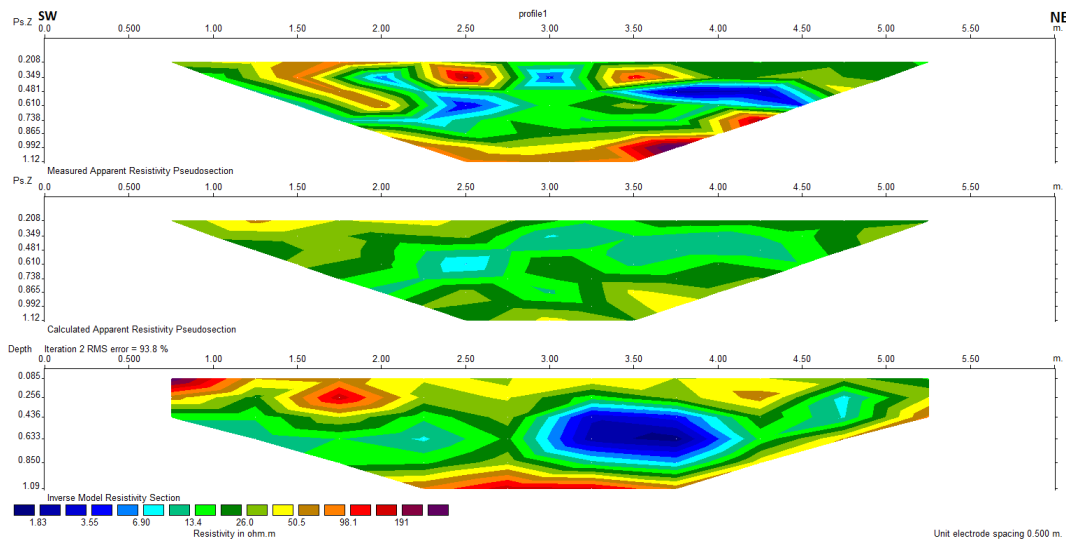
این پروفیل با آزمون ۲۰ درجه و در قسمت شمالی محدوده قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۴-۲ مشاهده می‌شود؛ از ابتدای پروفیل در سطح مقاومت‌ویژه بالایی ایجاد شده است که در محل ذکر شده ضخامت کمی از خاک دست‌ریز یا جابجا شده توسط جانوران وجود دارد. همچنین از عمق حدود ۳۰ الی ۴۰ سانتیمتری تا حدود ۸۵ سانتیمتری زمین یک بی‌هنجاری مقاوم دیده می‌شود. این بی‌هنجاری تقریباً ابعادی متناسب با هدف مدفون (لوله‌ی پلی اتیلنی) دارد و با توجه به پروفیل‌های دیگر می‌توان این موضوع را قبول یا رد نمود.



شکل ۴-۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A1 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.

پس از تزریق محلول کات کبود در لوله، اندازه گیری های مقاومت ویژه تکرار شده است. مقطع مقاومت ویژه پروفیل اول روی لوله پس از تزریق محلول مورد نظر در شکل ۴-۳ مشاهده می شود. نکته قابل توجه در این اندازه گیری ها تفاوت مقدار مقاومت ویژه الکتریکی لوله نسبت به زمینه در برگیرنده می باشد. قبل از تزریق محلول، مقاومت ویژه محل لوله که در مقطع در فاصله ی ۳ تا ۴ متر از ابتدای پروفیل واقع شده است، بیشتر از مقاومت ویژه زمینه ی دربرگیرنده و پس از تزریق محلول نمکی این مقدار مقاومت ویژه کمتر از زمینه ی دربرگیرنده بوده است. این موضوع می تواند ناشی از رسوب محلول کات کبود در لوله و فرونشست جریان محلول باشد. به عبارت دیگر به دلیل وجود محلول در لوله، رسانندگی الکتریکی لوله افزایش یافته است. در سطح زمین در امتداد پروفیل از ابتدای پروفیل تا موقعیت ۴/۵ متر از ابتدای پروفیل، مقاومت ویژه الکتریکی از مقاومت ویژه زمینه بیشتر است. دلیل این بی هنجاری در سطح را می توان به وجود حفرات و خاک های سطحی نسبت داد. البته با توجه به رسانا شدن کلی محیط زمینه نسبت به داده های مرحله اول (قبل از تزریق کات کبود) برداشت بر اثر رطوبت

بالای سطح زمین یکی از دلایل اصلی بر پاسخ‌های مقاومت ویژه در این مقطع می‌باشد. همچنین همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، مقدار RMS^1 Error نیز در مدل به دست آمده برابر ۹۳/۸ درصد می‌باشد که نشان دهنده وجود خطای بالا در مدل‌سازی داده‌ها می‌باشد. این مسئله به دلیل تغییرات نسبتاً شدید در داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده می‌باشد.



شکل ۳-۴. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A1 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون

۲-۱-۱-۴ پروفیل A2

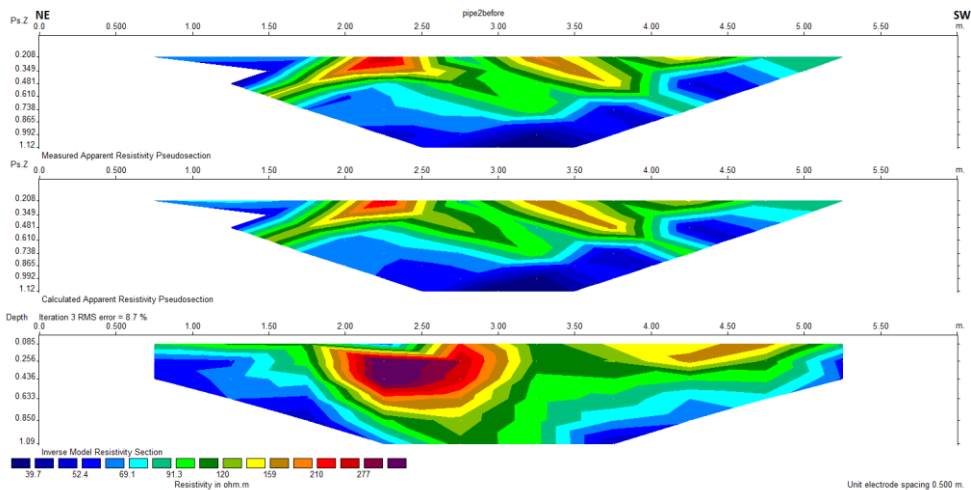
پروفیل دوم با فاصله‌ی ۱/۵ متر از پروفیل اول در قسمت جنوب شرقی آن واقع شده است. جهت برداشت در پروفیل دوم با آزیموت ۱۱۰ درجه و برعکس پروفیل اول بوده است. همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود، لوله در فاصله‌ی ۲۱۰ سانتیمتری تا ۲۶۰ سانتیمتری از ابتدای پروفیل بیشترین بی‌هنجاری مقاومت ویژه را ایجاد کرده است. با توجه به مدل مقاومت ویژه وارون به دست آمده، لوله‌ی

¹ Root Mean Squared

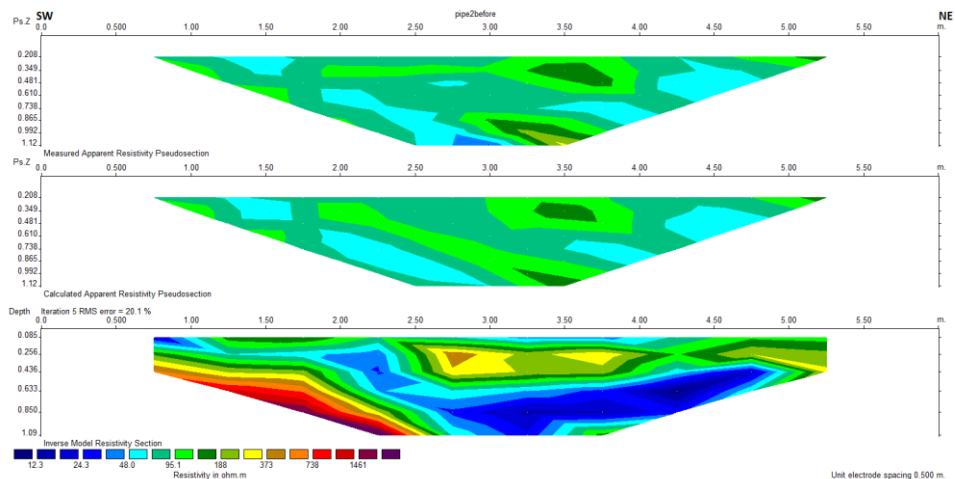
مدفون در عمق ۲۵ سانتیمتری در این پروفیل دیده می‌شود. در شکل ۴-۶ مدل مقاومت ویژه وارون پروفیل دوم بعد از تزریق کات کبود به داخل لوله مشاهده می‌شود. در مدل مقاومت ویژه وارون؛ زمینه دارای رسانندگی بالاتری نسبت به زمینه در پروفیل اول می‌باشد. این موضوع می‌تواند به وجود رطوبت بارندگی که چند روز قبل از برداشت دوم اتفاق افتاده، به وجود آمده باشد. البته در طرف دیگر محل قرارگیری لوله نیز مقاومت ویژه بیشتری نسبت به زمان قبل از پر کردن آن به وسیله‌ی محلول کات کبود دیده می‌شود، هرچند تباین کمتری بین لوله و محیط دربرگیرنده مشاهده می‌شود و تعیین محدوده دقیق لوله در برداشت دوم دشوارتر به نظر می‌رسد. بنابراین احتمالاً می‌توانیم پایین‌تر بودن مقاومت ویژه لوله در پروفیل اول را به نشت محلول کات کبود در اطراف لوله نسبت داد.



شکل ۴-۴. پروفیل A2 روی لوله‌ی مدفون (دید از جهت جنوب به سمت شمال).



شکل ۴-۵. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A2 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.



شکل ۴-۶. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A2 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.

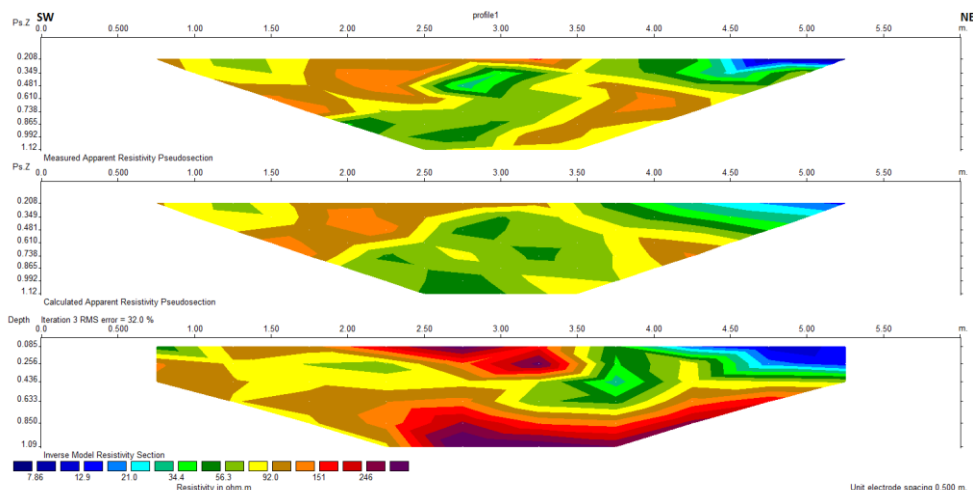
۴-۱-۱-۳ پروفیل A3

برداشت داده های مقاومت ویژه الکتریکی برای پروفیل های سوم و چهارم رو لوله مدفون قبل از پر کردن لوله مدفون انجام شده است. محل اجرای پروفیل A3 در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. در شکل ۴-۸ مدل مقاومت ویژه وارون پروفیل چهارم قبل از تزریق کات کبود به داخل لوله مشاهده

می‌شود. در این مدل که در امتداد شمالی-جنوبی برداشت شده است. محل قرارگیری لوله در فاصله ۳/۵ تا ۴/۵ متری از ابتدای پروفیل تشخیص داده می‌شود؛ که بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا در این ناحیه در عمق حدوداً ۳۵ سانتیمتری در مدل وارون مقاومت ویژه دیده می‌شود. در فاصله‌های ۲/۵ الی ۳ متر و همچنین ۲ الی ۲/۵ متر دو بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا در سطح زمین دیده می‌شود؛ که به احتمال زیاد علت آن وجود مقداری خاک سطحی روی زمین و یک قطعه سنگ نبرجا می‌باشد و همچنین در حاشیه پروفیل گیاهان زیادی رویده است؛ که می‌توانند باعث افزایش رسانندگی در ناحیه‌ی سطحی ۴/۵ الی ۵ متر در مدل باشند. این رسانندگی ظاهراً باعث ایجاد یک بی‌هنجاری در مدل وارون مقاومت ویژه در محل لوله شده است؛ که به جای مقاومت ویژه بالا، در محل لوله رسانندگی بیشتری نشان داده شده است.



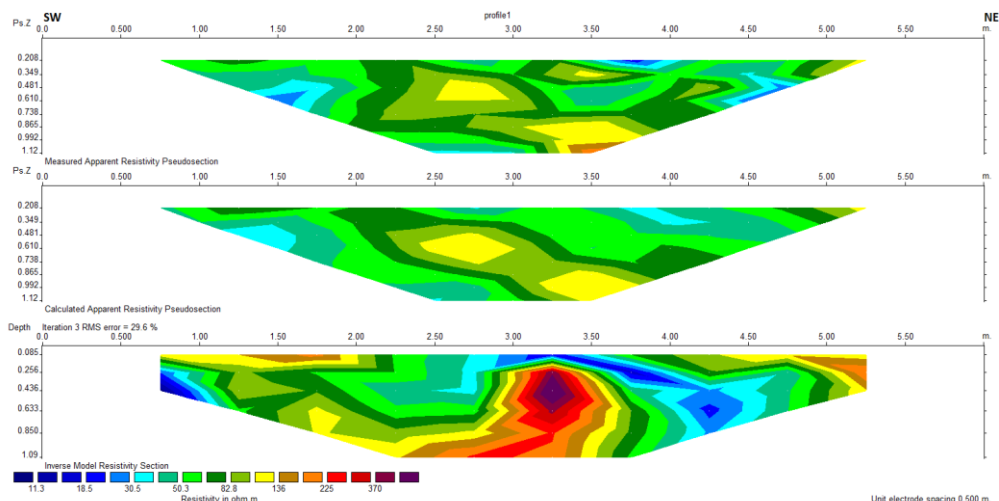
شکل ۴-۷. پروفیل A3 روی لوله‌ی مدفون (دید از شمال به جنوب).



شکل ۴-۸. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A3 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.

۴-۱-۱-۴ پروفیل شماره ۴

پروفیل چهارم نیز به موازات سه پروفیل دیگر و با فاصله ی ۱/۵ متر در قسمت شرقی پروفیل سوم واقع شده است. جهت برداشت داده های مقاومت ویژه شمالی-جنوبی می باشد. در شکل ۴-۹ مدل وارون این پروفیل که با استفاده از نرم افزار RES2D INV ترسیم شده، مشاهده می شود. در این مدل لوله به خوبی در موقعیت ۳-۳/۵ متر و در عمق ۲۵ تا ۶۵ سانتیمتری به صورت یک بی هنجاری با مقاومت ویژه بالا دیده می شود. در ابتدای پروفیل در فاصله ی ۱ تا ۲ متر و در انتهای آن در فاصله ی ۵ تا ۵/۵ متر بی هنجاری هایی با مقاومت ویژه بالا دیده می شود؛ که احتمالاً به دلیل وجود خاک دست ریز غیرمترکم ایجاد شده است.

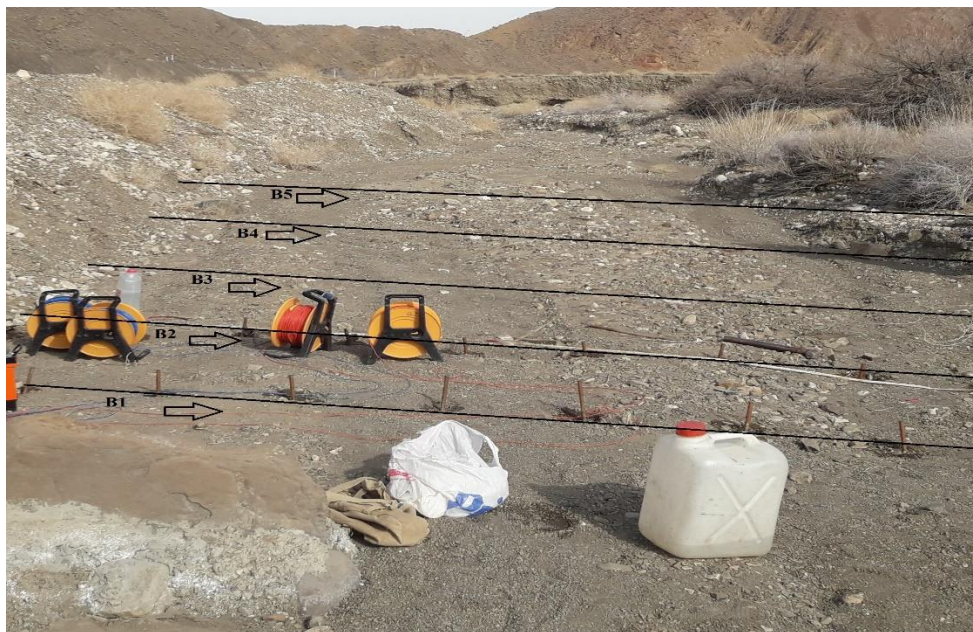


شکل ۴-۹. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A4 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون.

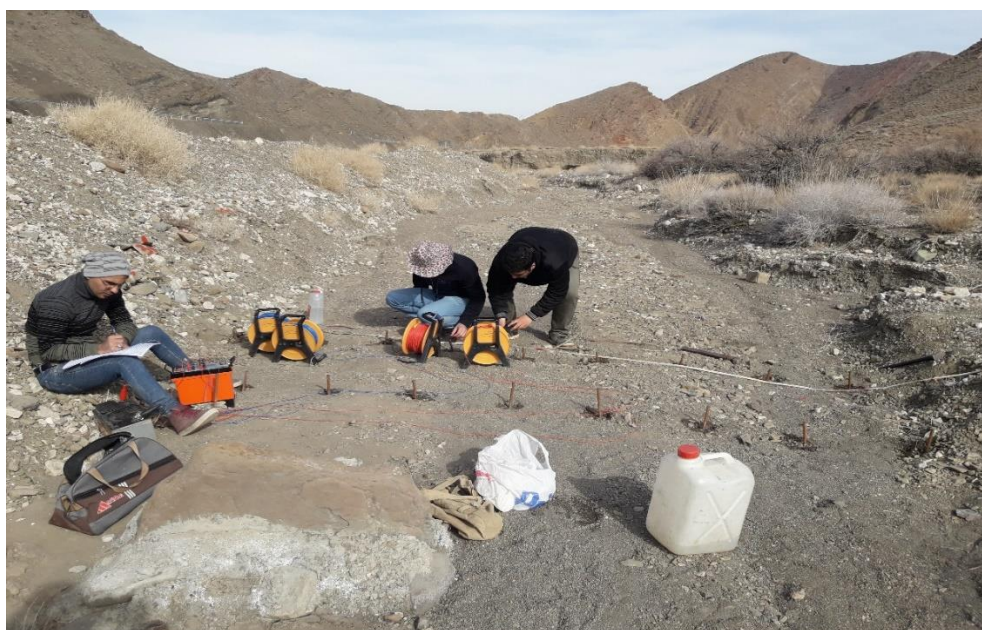
۲-۱-۴ محدوده B

زمین مورد نظر برای بررسی تغییرات مقاومت ویژه در بستری آبرفتی و در محل خروجی شیر لوله ی پلی اتیلنی انتخاب شده است. در این محدوده ۵ پروفیل (شکل ۴-۱۰) برای بررسی تعیین و اندازه گیری های مقاومت ویژه در این ناحیه در دو مرحله که شامل یک بار قبل از تخلیه محلول کات کبود و بار دیگر پس از تخلیه این محلول انجام گرفته است. این پروفیل ها با آزمون ۲ درجه در نظر گرفته شده است. در زیر به برآورد نتایج حاصل از مدل سازی و کنار هم قرار دادن نتایج هر پروفیل قبل و بعد از تزریق محلول کات کبود پرداخته شده است.

در شکل ۴-۱۱ تصویر محل تخلیه ی محلول نمکی با دید از جنوب غربی به شمال شرقی مشاهده می شود. همچنین جهت و راستای پروفیل های برداشتی در این ناحیه که شامل ۵ پروفیل با طول تقریبی ۴ تا ۴/۵ متر و فاصله ی الکترودی ۰/۵ متر می باشند. آرایه ی الکترودی مورد استفاده در برداشت های مقاومت ویژه در این محدوده، آرایه دوقطبی- دوقطبی بوده است. فاصله ی پروفیل ها از یکدیگر به اندازه ی ۱ متر در نظر گرفته شده و قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۰. راستا و محل اجرای پروفیل‌ها در محدوده B (دید از جنوب غربی به سمت شمال شرقی).



شکل ۴-۱۱. نمایی از پروفیل‌های مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده B با دید از جنوب غربی به سمت شمال شرقی.

۴-۱-۲-۱ پروفیل B1

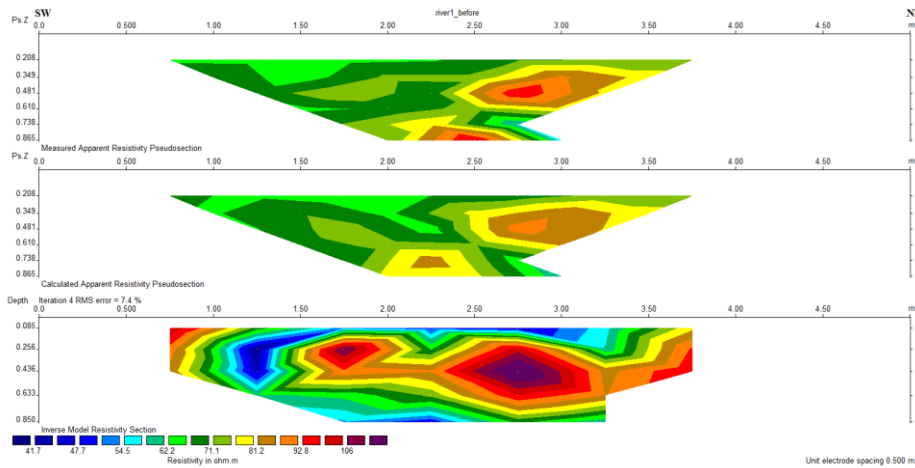
در شکل ۴-۱۲ مدل مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل اول که در فاصله ۲۰ سانتیمتری شیر خروجی

لوله قرار دارد مشاهده می‌شود. در این مدل مقدار مقاومت ویژه بالا در ناحیه‌ی ۲/۵ تا ۳ متری و در عمق ۲۵ سانتی‌متری دیده می‌شود. در ناحیه‌ای که این بی‌هنجاری مقاومت ویژه بالا دیده می‌شود، در سطح بستر رودخانه لایه‌ای شنی و با ذرات رسوبی درشت در امتداد مسیر رودخانه قرار گرفته است؛ که پیش‌بینی می‌شود باعث افزایش مقاومت الکتریکی شده است (شکل ۴-۱۱).

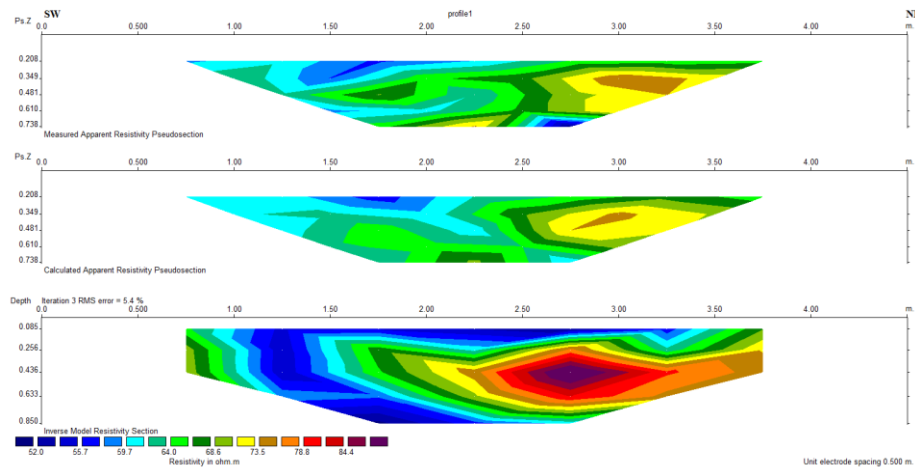
در بخش ابتدایی پروفیل سطح زمین توسط مقداری شن‌های خشک آبرفتی پوشیده شده است و به دیواره‌ی رودخانه‌ی فصلی منتهی می‌شود، که مقاومت الکتریکی بالای این ناحیه توسط شن‌های خشک متخلخل ایجاد شده است.

در شکل ۴-۱۳ مدل وارون مقاومت ویژه پروفیل اول پس از تزریق محلول کات کبود در این محدوده مشاهده می‌شود. در این مدل رسانندگی الکتریکی به وضوح نسبت به حالت این زمین قبل از تخلیه محلول بیشتر شده است. البته این موضوع قابل ذکر است، که زمین دارای مقداری رطوبت حاصل از بارندگی قبل از برداشت داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی می‌باشد. در این پروفیل در موقعیت ۲/۵ تا ۳ متر مانند داده‌های مرحله اول و در عمق حدود ۲۵ سانتی‌متری مقاومت ویژه الکتریکی بالا است و این بی‌هنجاری دقیقاً در مکانی که رسوبات حاصل از نشست رسوبات درشت رودخانه‌ای در امتداد رودخانه قرار گرفته است، دیده می‌شود. این بی‌هنجاری با رسانندگی الکتریکی کمتر نسبت به زمینه، به دلیل وجود یک لایه‌ی شنی برآمده در بستر رودخانه ایجاد شده است. در مدل مقاومت ویژه پروفیل B1 در این مرحله یکی از بی‌هنجاری‌های با مقاومت الکتریکی بالا که در نزدیکی محل تزریق محلول نمکی قرار داشته است، به یک بی‌هنجاری با مقاومت الکتریکی پایین تبدیل شده است. در محل پروفیل B1 دلیل ایجاد این بی‌هنجاری را می‌توان به بیشتر بودن رطوبت و همچنین متراکم‌تر بودن زمین در موقعیت ۱ تا ۲ متری در طول پروفیل نسبت به قسمت‌های دیگر آن نسبت داد. همچنین ممکن است وجود مانعی که بر سر مسیر عبور جریان‌اتی که بر اثر بارندگی قبل از برداشت مرحله دوم در زمین (وجود یک

محفظه‌ی بتنی در محل قرارگیری شیر خروجی لوله) قرار دارد تأثیری در این موضوع ایفا کرده باشد. نکته‌ی قابل توجه دیگر کاهش مقادیر کلی مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به داده‌های مقاومت ویژه قبل از تزریق محلول در محدوده B می‌باشد؛ که با مقایسه‌ی دو مدل در شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ قابل توجه می‌باشد.



شکل ۴-۱۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B1 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.



شکل ۴-۱۳. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B1 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

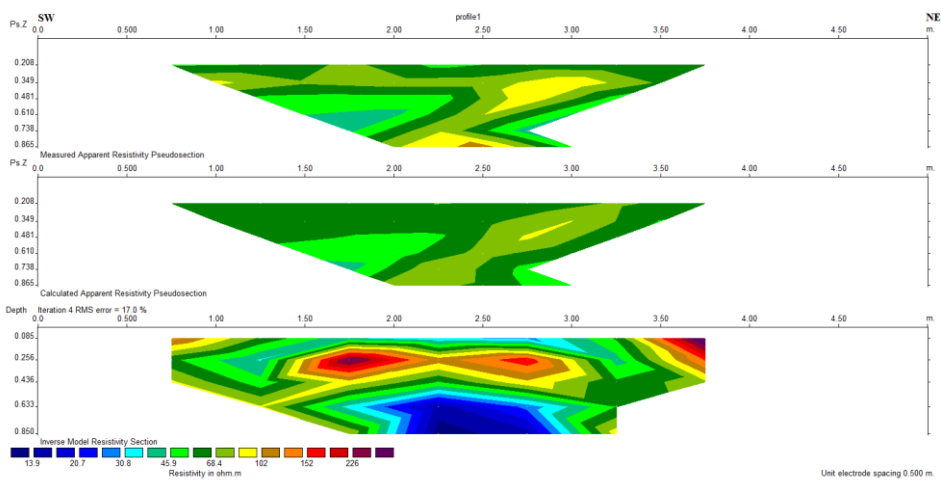
۴-۱-۲-۲ پروفیل B2

در شکل ۴-۱۵ مدل وارون پروفیل دوم با فاصله‌ی ۱ متری از پروفیل اول در محل تخلیه محلول نمکی قرار دارد دیده می‌شود. در این مدل دو بی‌هنجاری در موقعیت‌های ۱,۵ متر تا ۲ متر و از دو متر تا ۲,۵ دیده می‌شود که تقریباً به یکدیگر متصل هستند. در محل این دو بی‌هنجاری ادامه‌ی رسوبات بیضوی رودخانه‌ای درشت‌دانه که در پروفیل اول نیز مشاهده شدند امتداد یافته است و این عامل اصلی بی‌هنجاری با مقاومت بالا در این ناحیه است. در گوشه‌های مدل مقاومت‌الکتریکی بالا دیده می‌شود که به دلیل وجود حاشیه‌های شنی دست‌ریز در اطراف محدوده B می‌باشد؛ زیرا از خصوصیات این نواحی می‌توان به درشت‌دانه بودن و تخلخل زیاد آن‌ها اشاره کرد و این هر دو عواملی مؤثر بر افزایش مقاومت ویژه می‌باشند. هم‌چنین یک بی‌هنجاری با مقاومت الکتریکی بالا در حاشیه‌ی مدل و در فاصله‌ی ۳ تا ۳,۵ متری وجود دارد، که مانند پروفیل اول می‌توان این بی‌هنجاری را به رسوبات دست‌ریز حاشیه‌ی مسیر رودخانه با بافت متخلخل و غیرمتراکم نسبت داد.

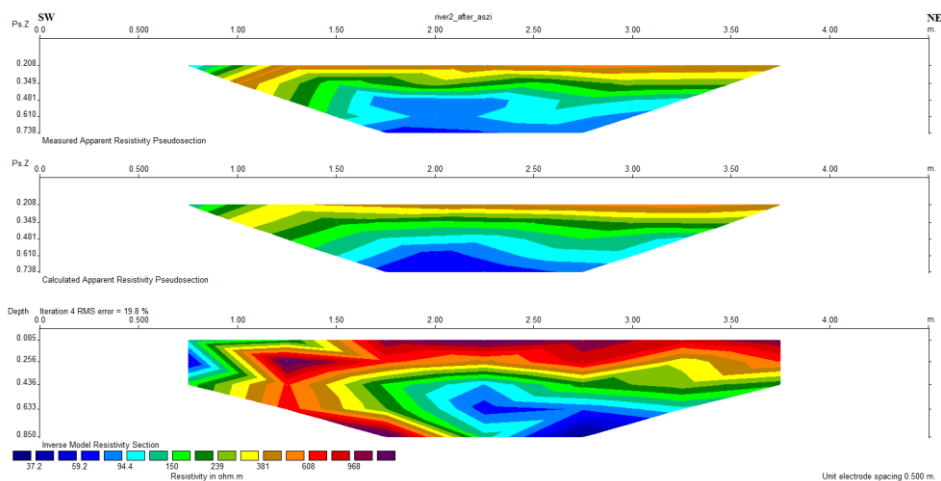
در شکل ۴-۱۶ مدل وارون پروفیل دوم پس از تخلیه محلول به زمین آبرفتی مورد نظر می‌باشد. در این مدل لایه‌ای مقاوم روی سطح زمین از ابتدا تا انتهای پروفیل مشاهده می‌شود. این لایه با ضخامت تقریبی ۲۰ سانتی‌متری، به دلیل افزایش رسوبات آواری درشت دانه و غیر متراکم که به صورت عمود بر امتداد پروفیل‌ها قرار گرفته‌اند باعث بی‌هنجاری مقاومت الکتریکی بالا در سطح شده است و هرچه به سمت پروفیل پنجم حرکت کنیم، گسترش عرضی بیشتری می‌یابند. در طول ۱ تا ۱,۵ متری در این پروفیل بی‌هنجاری دیگری با مقاومت الکتریکی بالا و در عمق ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متری در مدل دیده می‌شود که با توجه به شکل ۴-۱۴ بر اثر رسوبات آبرفتی برآمده‌ی دیگر ایجاد شده است که دقیقاً از محل کوبیده شدن الکتروود دوم در پروفیل دوم شروع شده و تا الکتروود چهارم این رسوبات در سطح قابل رؤیت می‌باشند که البته باعث ایجاد بی‌هنجاری در این ناحیه شده است.



شکل ۴-۱۴. آبرفت‌های درشت‌دانه که در جهت عمود بر امتداد پروفیل‌ها باعث ایجاد مقاومت الکتریکی بالا شده است.



شکل ۴-۱۵. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B2 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.



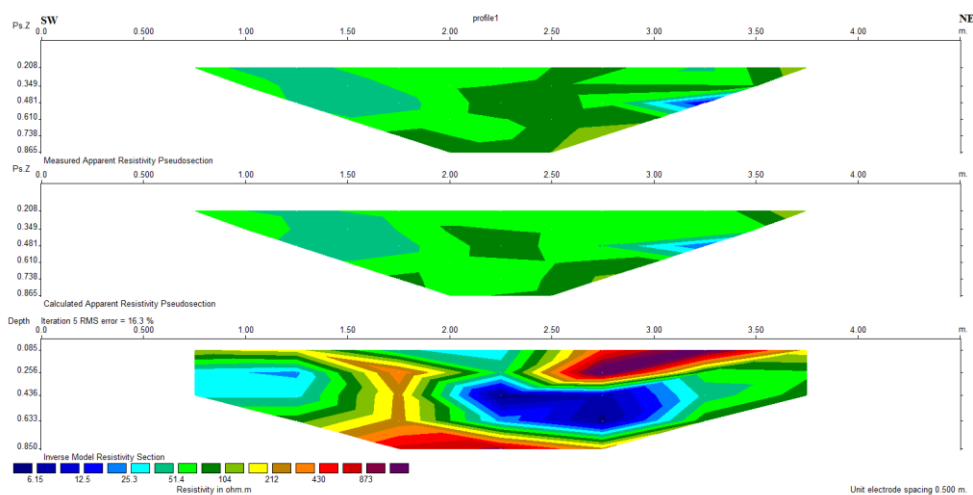
شکل ۴-۱۶. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B2 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

۴-۱-۲-۳ پروفیل B3

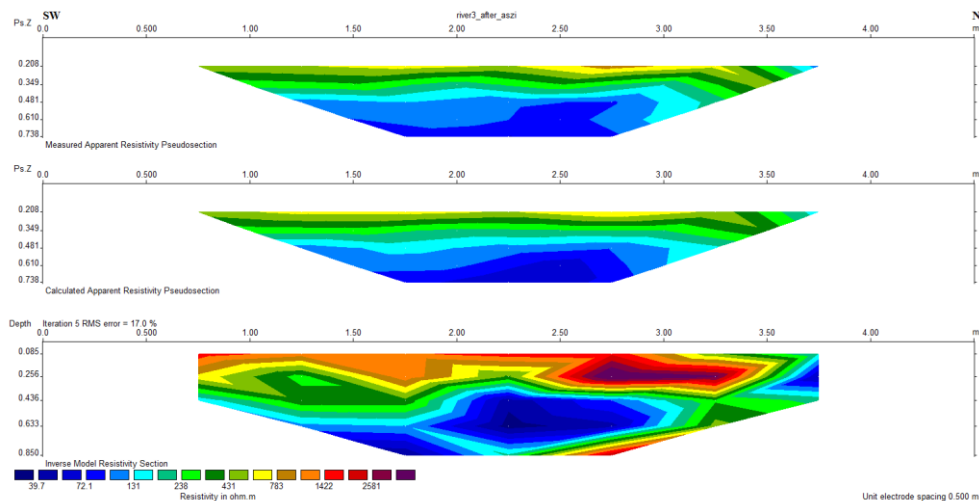
در شکل ۴-۱۷ مدل وارون مقاومت ویژه پروفیل B3 در محل تخلیه، قبل از نشت محلول کات کبود مشاهده می شود. در این پروفیل رسانندگی الکتریکی از ابتدای پروفیل تا فاصله ی حدود ۱ متری و از ۱/۵ متری تا ۲/۵ متری در سطح نسبت به بخش های سطحی دیگر بیشتر است. پیش بینی می شود مطابق با مشاهدات عینی در محل برداشت، این رسانندگی به واسطه ی وجود ذرات ریز رسی و ماسه های آبرفتی به شکل دو جویبار در نواحی ذکر شده ایجاد شده است. در قسمت سطحی دیگر که بی هنجاری مقاومت ویژه بسیار بالا دیده می شود و شامل بازه های ۱ تا ۱/۵ متری و ۲/۵ تا ۴ متری در قسمت سطحی پروفیل B3 هستند، ذرات درشت آواری شامل شن ها و قلوها در سطح زمین با بافت غیرمتراکم و خشک دیده می شوند. در فاصله ی ۲ تا ۳ متری روی پروفیل و در عمق حدود ۳۰ سانتیمتری توده ای با رسانندگی الکتریکی بالا مشاهده می شود. این بی هنجاری رسا همان طور که در شکل ۴-۱۴ دیده می شود به دلیل بالا بودن مقدار رس و ریزدانه بودن آبرفت ها در این ناحیه تصور می شود.

در شکل ۴-۱۸ مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل سوم بعد از تخلیه محلول در این ناحیه

مشاهده می‌شود. در این پروفیل مقاومت ویژه الکتریکی در سطح پروفیل نسبت به مرحله‌ی قبل افزایش یافته است و لایه‌ای با مقاومت ویژه بالا در بخش میانی این پروفیل دیده می‌شود، که تقریباً با داده‌های مرحله‌ی قبل از تزریق محلول کبود تطابق دارد. موضوع قابل توجه در این پروفیل افزایش رسانندگی الکتریکی در عمق بیشتر از ۵۰ سانتیمتری می‌باشد. این افزایش رسانندگی الکتریکی می‌تواند به واسطه‌ی نشت محلول کبود به این قسمت باشد؛ که از آن برای افزایش رسانش الکتروودها با بستر زمین در برداشت داده‌های مقاومت ویژه نیز استفاده می‌شود.



شکل ۴-۱۷. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B3 قبل از تزریق محلول کبود به داخل زمین.



شکل ۴-۱۸. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B3 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

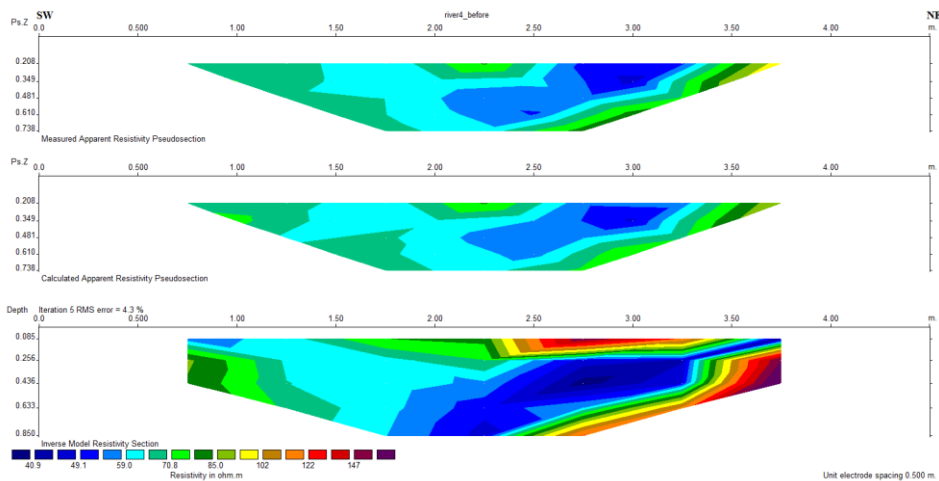
۴-۲-۱-۴ پروفیل B4

در شکل ۴-۱۹ مدل وارون مقاومت ویژه پروفیل B4 در محل نشت محلول کات کبود در زمان قبل از تزریق محلول کات کبود در زمین مشاهده می شود. در این پروفیل در قسمت سطحی در محل مشخص شده در شکل ۴-۱۴ که دارای رسوبات درشت دانه است، مقاومت ویژه ی بالا با ضخامت تقریبی ۲۰ سانتیمتر و در فاصله ی ۲/۳ تا ۳/۵ متر دیده می شود که با مشاهدات زمینی تطابق دارد. در قسمت زیرین این قسمت ظاهراً رسوبات ریزدانه و حاوی مسیر جریان ناشی از بارندگی می باشند زیرا دارای رطوبت بالاتری نسبت به سطح و قسمت های دیگر پروفیل می باشند. مقاومت ویژه بسیار پایین در عمق ۲۵ سانتیمتری تا ۶۰ سانتیمتری و در فاصله ی ۲ تا ۳/۵ متر در طول پروفیل می تواند به دلیل تجمع رس ها در این محل و حفظ رطوبت بستر رودخانه این رسانندگی ایجاد شده باشد.

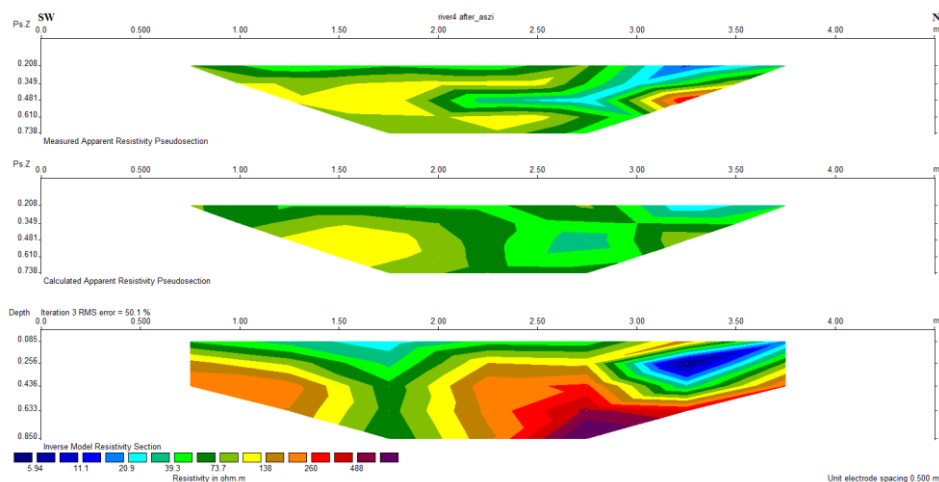
در شکل ۴-۲۰ مدل وارون مقاومت ویژه پروفیل B4 پس از تزریق محلول کات کبود مشاهده می شود.

بی‌هنجاری‌های موجود در این مدل در عین حال که SD^1 (انحراف معیار) مقدار بالایی نداشته است و داده‌های مقاومت ویژه دارای بی‌هنجاری زیادی در هنگام برداشت داده‌ها نبوده است، مقدار خطای RMS برابر با $50/3$ می‌باشد که تا حدودی زیاد است و با انجام تکرارهای بیشتر این مقدار کاهش نمی‌یابد و لذا تنها راه کاهش مقدار RMS Error حذف داده‌های دارای اختلاف زیاد با سایر داده‌ها می‌باشد که انجام این کار واقعی بودن داده‌ها را از بین می‌برد. در عین حال بی‌هنجاری مقاومت ویژه بالا در قسمت سطحی زمین در فاصله‌ی ۲,۵ تا ۳,۵ متر و در عمق به یکدیگر پیسته است. دلیل این موضوع تبخیر و فرورفتن جریان محلول کات کبود در محدوده B برآورد شده است. در قسمت دیگر این پروفیل در در عمق ۱۰ تا ۴۰ سانتیمتری و در فاصله‌ی ۳ تا ۳,۷۵ متری یک بی‌هنجاری رسانا مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری به دلیل افزایش تجمع رس‌ها و نیز حفظ آب موجود در خلل و فرج در این ناحیه، ایجاد شده است. در ابتدای پروفیل در ناحیه $0/75$ تا $1/5$ متری و در عمق ۳۰ سانتیمتری تا عمق پروفیل بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری به دلیل وجود آبرفت‌های درشت دانه در جداره‌ی رودخانه ایجاد شده است؛ که در محل پروفیل قابل رؤیت می‌باشد.

¹ Standard Deviation



شکل ۴-۱۹. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B4 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین



شکل ۴-۲۰. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B4 بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.

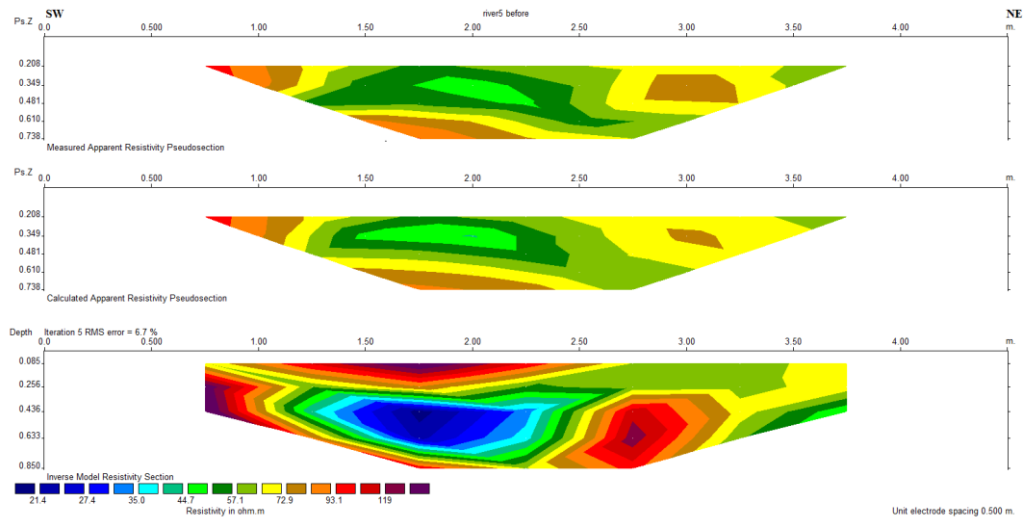
۴-۱-۲-۵ پروفیل B5

این پروفیل با فاصله‌ی ۴ متر از پروفیل اول به سمت شمال‌شرق قرار دارد. طول پروفیل به دلیل وجود دیواره‌هایی که توسط بیل مکانیکی برای مسیر رودخانه ساخته شده است، ۴/۵ متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۲۱ مدل وارون مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل B5 در محل تزریق

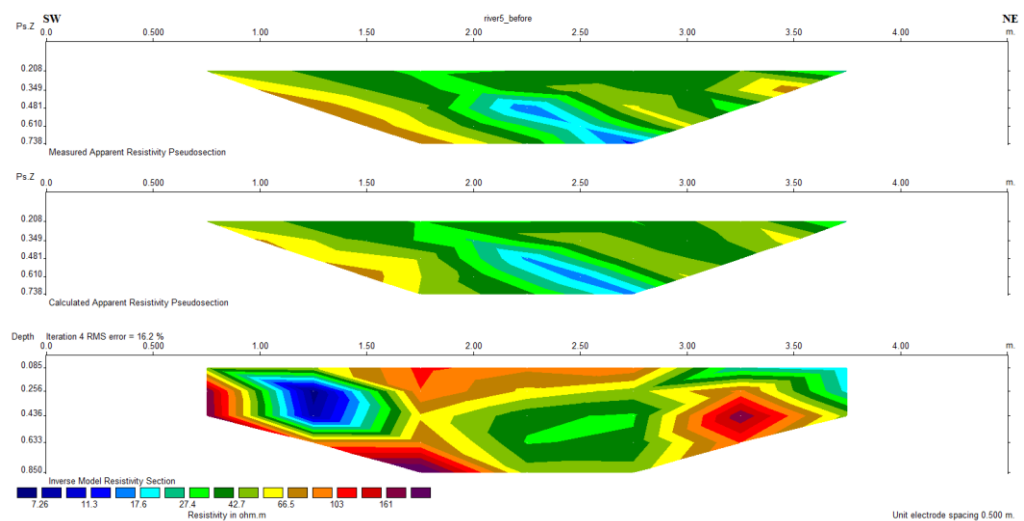
محلول کات کبود دیده می‌شود، در سطح این پروفیل یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه الکتریکی بالا به صورت لایه‌ای نازک وجود دارد؛ که نشان‌دهنده ذرات درشت آواری می‌باشد و در شکل ۴-۱۴ مشخص شده است. در فاصله‌ی ۱ تا ۱/۵ متر روی پروفیل در عمق بین ۲۵ تا ۶۰ سانتیمتری بی‌هنجاری مقاومت ویژه روی پروفیل با رسانندگی بالا مشاهده می‌شود که مطابق با شکل ۴-۱۴ در این محل رسوبات درشت‌انه کاهش یافته و رسوبات ریزدانه و متراکم بیشتر شده است، همچنین شیب سطحی بستر به سمت این قسمت میل دارد و این می‌تواند عامل مهمی برای حرکت جریان‌ات به سمت این قسمت بوده باشد و رسانندگی را افزایش دهد. همچنین در عمق ۳۰ تا ۶۵ سانتیمتری و فاصله‌ی ۳ تا ۳/۵ متری از ابتدای پروفیل بی‌هنجاری تقریباً کروی شکلی دیده می‌شود؛ که به دلیل تجمع ذرات درشت آواری و قطعات سنگ شکسته شده که در کنار هم قرار گرفته، ایجاد شده است، البته این بی‌هنجاری می‌تواند از مقاومت الکتریکی بالای حاشیه‌ی مسیر رودخانه اثر پذیرفته باشد؛ که در مقطع داده‌های مقاومت‌ویژه نیز در شکل ۴-۲۱ اثر این بی‌هنجاری در حاشیه‌ی پروفیل و دقیقاً در محل قرارگیری دیواره‌ی شنی ساخته شده با استفاده از بیل مکانیکی است، قابل مشاهده می‌باشد.

در شکل ۴-۲۲ مدل وارون مقاومت‌ویژه پروفیل پنجم مربوط به زمان بعد از تخلیه محلول مشاهده می‌شود. در این مدل نیز مانند شکل ۴-۲۱ بی‌هنجاری‌های مقاوم در سطح مرکزی پروفیل و دو بی‌هنجاری در دو گوشه‌ی پروفیل قابل استناد به ذرات آواری درشت‌دانه در مرکز و دیواره‌ی رودخانه می‌باشند. در این مدل قسمت رسانایی که در شکل ۴-۲۱ در ناحیه‌ی ۱ تا ۱,۵ متر و تا عمق ۶۰ سانتی‌متری پروفیل دیده می‌شد را می‌توان به بی‌هنجاری رسانایی که در عمق ۲۵ تا ۶۰ سانتی‌متری و در فاصله‌ی ۱ تا ۲,۵ متری طول پروفیل دیده می‌شود تعمیم داد. این بی‌هنجاری در محل قرارگیری عمیق‌ترین جای رودخانه مشاهده می‌شود. این بی‌هنجاری رسانا در برداشت دوم ابعاد گسترده‌تری را تشکیل داده است که احتمال می‌رود در این ناحیه محلول کات کبود اثر رسانندگی گسترده‌تری را

ایجاد کرده باشد.



شکل ۴-۲۱. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B5 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین.



شکل ۴-۲۲. مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل B5 قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین

۲-۴ پردازش و تفسیر داده‌های GPR برداشت شده

در این بخش نتایج پردازش و تفسیر داده‌های GPR آورده شده است. برداشت داده‌های GPR در

طول پروفیل‌های A1، A2، A3 و A4 با آزیموت ۲۰ درجه که هر یک دارای طول تقریبی ۶ متر می‌باشد، انجام شده است. برداشت داده‌های GPR در طول پروفیل‌های B1، B2، B3، B4 و B5 نیز با آزیموت ۲ که هر یک دارای طول تقریبی ۴ متر می‌باشد، انجام شده است. در این کار از دستگاه Cobra GPR با پهنای باند ۱۵۰ مگاهرتز استفاده شده است (شکل ۴-۲۳). ابتدا بر روی داده‌ها تصحیح استاتیک اعمال شده است تا زمان اولین رویداد در همه‌ی ردموج‌ها برابر شود. سپس پردازش‌هایی برای تقویت سیگنال‌ها و تضعیف نوفه‌های احتمالی بر داده‌ها اعمال شده است. از نرم‌افزار Prism2 که نرم‌افزار تخصصی پردازش داده‌های GPR می‌باشد، برای انجام پردازش داده‌های GPR در این پایان‌نامه استفاده شده است. برای تصحیح دامنه‌ی امواج دریافتی و کاهش نوفه‌ها و افزایش قدرت سیگنال در داده‌های GPR با فرمت segy، فیلترهای حذف پس زمینه و فیلتر بالاگذر^۱ در نرم‌افزار Prism2 اعمال شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمین در این محدوده دارای شرایط چندان مناسبی برای برداشت داده‌های GPR ندارد (زمین دارای مقدار زیاد رس با طوبت بالا می‌باشد). به همین دلیل عمق نفوذ امواج GPR و بازتاب خوبی از امواج GPR بدست نیامده است. به این خاطر تنها دو پروفیل که نتایج مشابهی با سایر پروفیل‌ها در دو زمان برداشت اول و دوم می‌باشند به‌عنوان نمونه در این پایان‌نامه آورده شده است.

^۱ Highpass filter

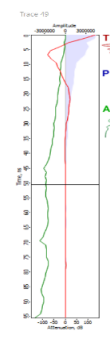
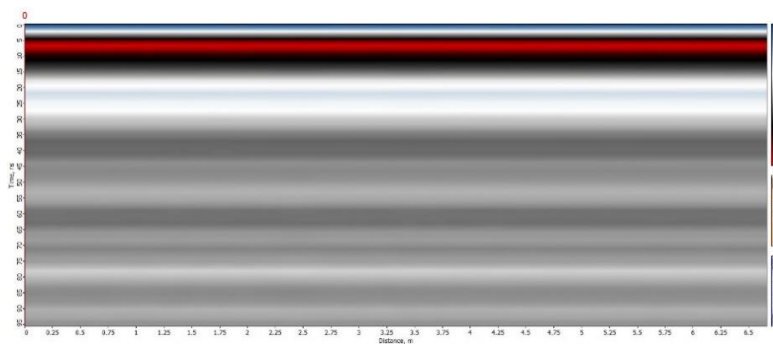


شکل ۴-۲۳. دستگاه Cbra plug_in با آنتن ۱۵۰ مگاهرتز

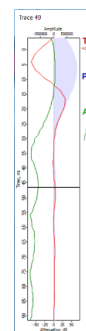
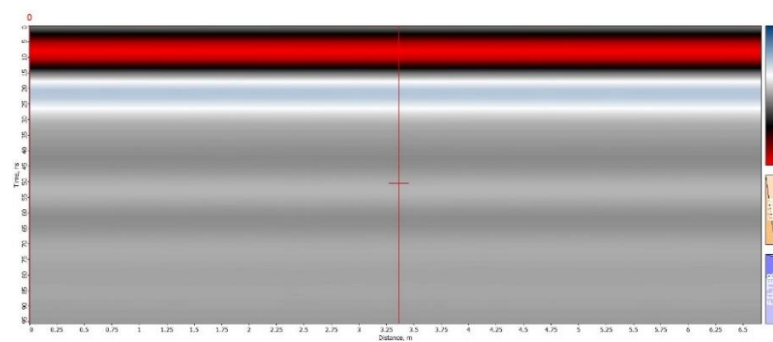
۴-۲-۱ پروفیل A1

در شکل ۴-۲۴ (الف) در سمت چپ مقطع عمقی GPR حاصل از برداشت داده‌های در طول پروفیل A پس از تصحیح استاتیک و قرارگیری تمامی اولین رویدادها در یک مقطع زمان رسید موج مشاهده می‌شود. این مقطع حاصل برداشت داده‌های GPR بر روی پروفیل‌های اجرا شده بر روی لوله مدفون قبل از تزریق محلول کات کبود است. در سمت راست شکل ۴-۲۴ نمایش عمقی یک ردموج GPR را نشان می‌دهد؛ که در آن خط قرمز بیانگر دامنه ردموج، خط سبز بیانگر میرایی سیگنال و منحنی هاشور زده آبی بیانگر توان سیگنال می‌باشد. طیف‌های رنگی در این مقطع بیانگر دامنه‌های مختلف موج می‌باشد. در شکل ۴-۲۴ (ب) مقطع GPR این پروفیل پس از اعمال فیلتر حذف زمینه در مقطع GPR همان مقطع پروفیل آورده شده در قسمت (الف) شکل ۴-۲۴ مشاهده می‌شود که پردازش حذف پس زمینه بر روی آن اعمال شده است. فیلتر حذف زمینه بر این داده با حداقل میرایی سیگنال انجام شده است. برای انجام این کار پنجره‌هایی با پهناهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به منحنی‌های سیگنال و میرایی سیگنال بهترین پنجره‌های فرکانسی برای اعمال فیلتر پس‌زمینه انتخاب شد. در شکل ۴-۲۴ (ج) نیز رد موج و مقطع GPR پروفیل مذکور بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر

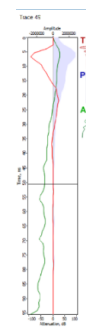
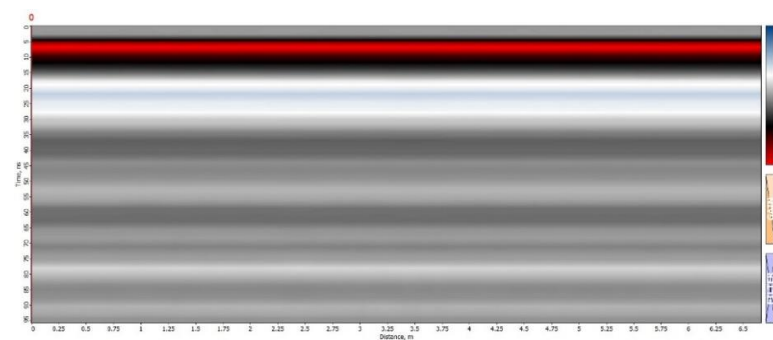
روی داده‌های GPR برداشت‌های در طول پروفیل A1 را نشان می‌دهد.



الف



ب



ج

شکل ۴-۲۴. ردموج‌های GPR (سمت راست) و مقاطع GPR در طول پروفیل A1 (سمت چپ) مقطع GPR قبل از تزریق محلول کات کبود داخل لوله؛ الف) سمت چپ بعد از تصحیح استاتیک بر روی داده‌ها، ب) مقطع GPR بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه بر روی داده‌ها، ج) مقطع GPR داده‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر روی داده‌ها.

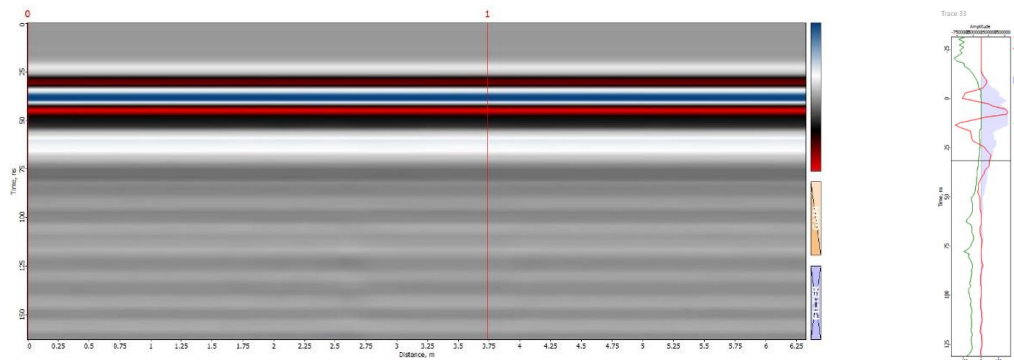
مقاطع GPR نشان داده شده در شکل ۴-۲۴ نیز به دلیل تباین بسیار پایین در زمین مورد برداشت و مقدار زیاد رطوبت خاک در طول این پروفیل؛ موج GPR ارسالی به زمین به شدت میرا شده است.

همچنین این نکته قابل توجه است که امکان داده‌برداری در زمان مناسب‌تر وجود نداشته است. در طول این پروفیل، مقدار رس موجود در خاک نیز زیاد می‌باشد، که این عامل نیز باعث میرایی بیشتر امواج GPR و محدود شدن عمق نفوذ شده است. مطابق با آنچه در شکل ۴-۲۴ (ج) سمت راست دیده می‌شود، در زمان حدود ۲۵ نانوثانیه دامنه سیگنال تقریباً برابر صفر شده است. لذا در داده‌های GPR برداشت شده سیگنال بسیار ضعیف و محدودی از زمین دریافت شده و با توجه به عدم وجود تباين گذردهی الکتریکی کافی بین بی‌هنجاری‌ها و زمینه در زمین مورد مطالعه در طول این پروفیل و همچنین رخداد پدیده رینگینگ^۱ که نوعی نوفه محسوب می‌شود، در نتیجه اطلاعاتی از محل قرارگیری لوله مدفون و تغییرات حاصل از پر شدن آن با محلول کات کبود در زیر سطح زمین بدست نمی‌آید.

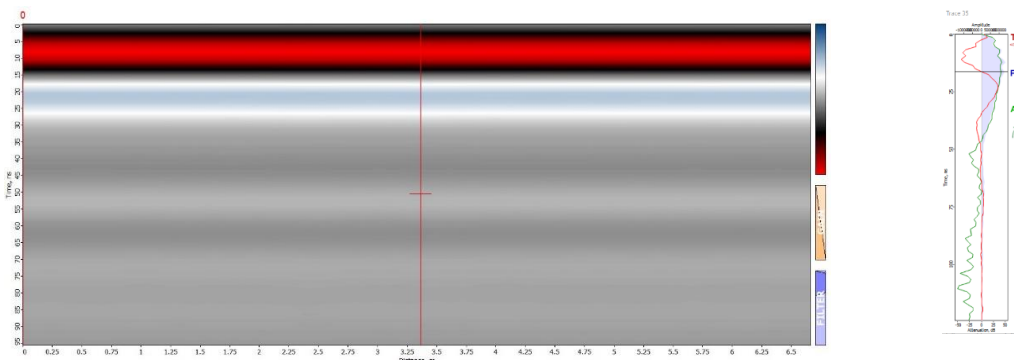
در شکل ۴-۲۵ (الف) سمت چپ مقطع عمقی GPR در طول پروفیل A1 بر روی لوله‌ی مدفون پس از تزریق محلول کات کبود را نشان می‌دهد. در این مقطع هیچ‌گونه پردازشی از جمله تصحیح جابجایی صفر زمانی نیز بر روی داده‌ها صورت نگرفته است. در سمت راست شکل ۴-۲۵ (الف) نیز مقطع زمانی یک ردموج GPR در داده‌ها به‌عنوان داده‌ی اولیه آورده شده است. همان‌طور که در این ردموج دیده می‌شود، دامنه‌ی سیگنال در زمان حدود ۵۰ نانوثانیه (بدون اعمال تصحیح صفر زمانی) به شدت تضعیف شده یا به عبارت دیگر موج میرا می‌شود. در شکل ۴-۲۵ (ب) سمت چپ، مقطع GPR پس از اعمال پردازش تصحیح صفر زمانی، فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بدست آمده است. در این مقطع نیز خصوصیات زمین به دلیل وجود رس زیاد و رطوبت بالای زمینه قابل مشاهده نمی‌باشد. دلیل دیگری که باعث می‌شود بی‌هنجاری‌ها در مقاطع GPR قابل مشاهده نباشد را می‌توان به عدم وجود تباين کافی بین گذردهی نسبی زمینه و هدف مدفون نسبت داد. طیف‌های رنگی متفاوتی که در مقاطع دیده

^۱ Ringing

می‌شود، بیانگر مقادیر مختلف دامنه موج است.



الف



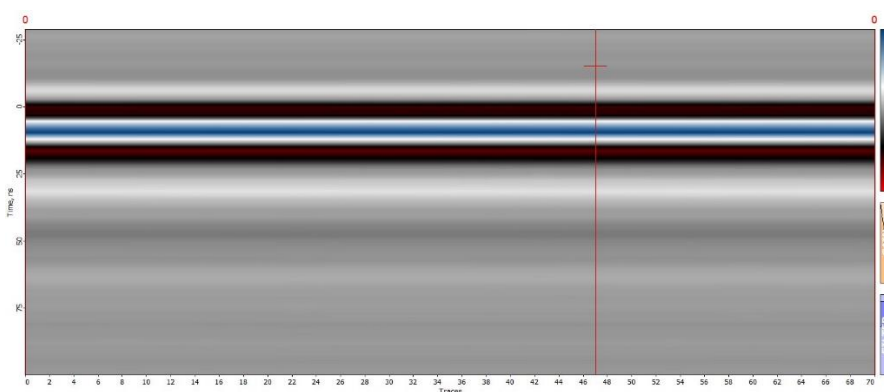
ب

شکل ۴-۲۵. ردموج‌های GPR (سمت راست) و مقاطع GPR در طول پروفیل A1 (سمت چپ) مقطع GPR بعد از تزریق محلول کات کبود داخل لوله؛ الف) سمت چپ بعد از تصحیح استاتیک بر روی داده‌ها، ب) مقطع GPR داده‌ها بعد از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر روی داده‌ها.

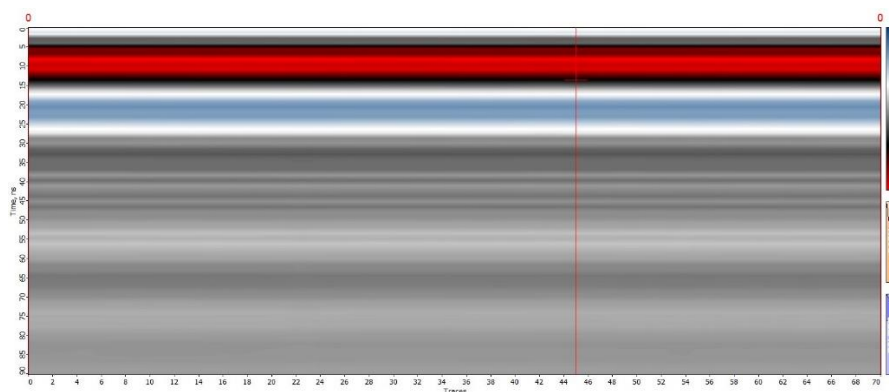
نتایج حاصل از برداشت داده‌های GPR در طول پروفیل‌های برداشت نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ ولی به دلیل شباهت پاسخ‌ها و نتایج به دست آمده تنها بررسی یک خط برداشت بر روی لوله‌ی مدفون در اینجا آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش GPR برای این‌گونه زمین‌های دارای مقادیر زیاد رس و هم‌چنین زمین‌های دارای رطوبت نسبتاً بالا که دارای تباین گذردهی نسبی پایین بین اهداف و زمینه می‌باشند؛ مناسب نیست.

۲-۲-۴ پروفیل B1

در شکل ۴-۲۶ (الف) مقطع عمقی GPR حاصل از برداشت داده‌های در طول پروفیل B1 مشاهده می‌شود. مقطع GPR این پروفیل پس از اعمال فیلتر حذف زمینه در مقطع GPR همان مقطع پروفیل آورده شده در قسمت (الف) شکل ۴-۲۷ این مقطع حاصل برداشت داده‌های GPR بر روی پروفیل‌های اجرا شده در محدوده B قبل از تزریق محلول کات کبود است. شکل ۴-۲۶ (ب) نیز ردموج و مقطع GPR پروفیل B1 پس از اعمال فیلتر حذف زمینه و فیلتر بالاگذر بر روی داده‌های GPR برداشت شده در طول پروفیل مذکور را نشان می‌دهد.



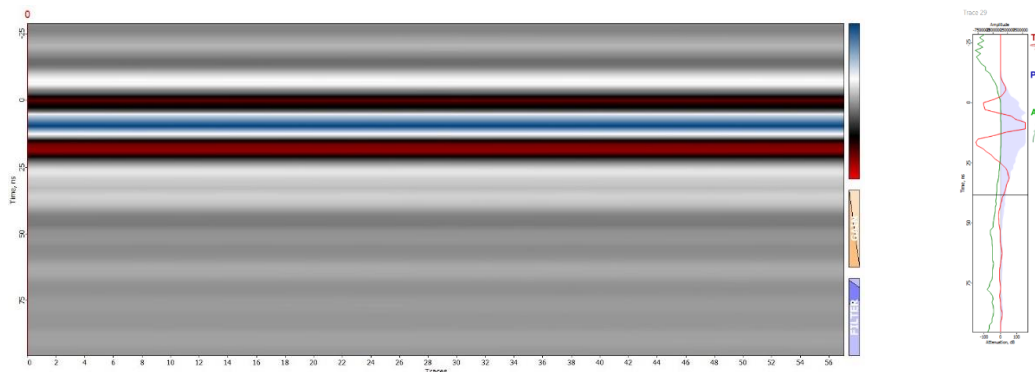
الف



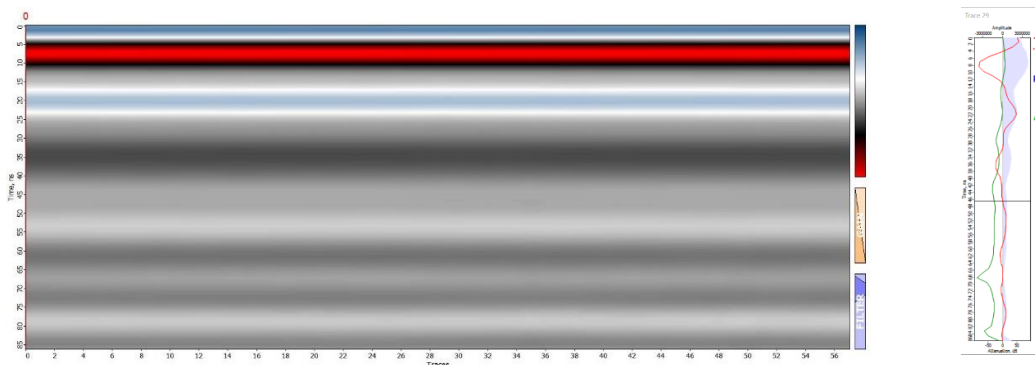
ب

شکل ۴-۲۶. مقاطع خط برداشت اول GPR در محل B1 قبل از نشت محلول کات کبود به داخل زمین؛ (الف) مقطع داده‌های اولیه‌ی به دست آمده از خط برداشت اول (ب) نتیجه‌ی انجام پردازش‌های جابجایی صفر زمانی، حذف پس زمینه و اعمال فیلتر بالاگذر بر روی مقطع الف.

شکل ۴-۲۷ (الف) مقطع عمقی GPR حاصل از برداشت داده‌های در طول پروفیل B1 بعد از تزریق محلول کات کبود در مدوده B است. در شکل ۴-۲۷ (ب) نیز نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش GPR در زمینی با این خصوصیات پاسخ مناسبی در بر ندارد و لذا تا حد ممکن زمین باید خشک بوده و دارای مقدار رس کمی باشد تا بتوان از نفوذ و انعکاس امواج GPR اطلاعاتی از بستر زمین به دست آورد ولی در این تحقیق به دلیل پیش‌بینی بارندگی‌های سیل آسا امکان داده‌برداری در زمان مناسب‌تری وجود نداشته است. به همین دلیل و به خاطر عدم وجود اطلاعات کافی در مقاطع GPR در این بخش تنها نتایج حاصل از برداشت و پردازش داده‌های یک خط برداشت برای نمونه آورده شده است.



الف



ب

شکل ۴-۲۷. مقاطع خط برداشت اول GPR در محل B1 پس از تزریق محلول کات کبود به داخل زمین؛ (الف) مقطع داده‌های اولیه‌ی به دست آمده از خط برداشت اول (ب) نتیجه‌ی انجام پردازش‌های جابجایی صفر زمانی، حذف پس زمینه و اعمال فیلتر بالاگذر بر روی مقطع الف.

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتایج

نتایج مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل‌های A1 و A2 نشان می‌دهد که میانگین مقاومت ویژه الکتریکی زمین در مرحله اول پیمایش (قبل از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون) بیشتر از مقادیر مقاومت ویژه در پیمایش دوم (بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله مدفون) می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از مقاطع GPR به دست آمده از برداشت در طول این پروفیل‌ها نشان می‌دهد که سیگنال دریافتی از زمین بسیار ضعیف بوده است که در نتیجه اطلاعات خاصی از زمین پیمایش شده به دست نمی‌آید. همچنین مدل‌های دوبعدی مقاومت ویژه وارون در طول پروفیل‌های A1 تا A4 و B1 تا B5 بیانگر تغییرات مقاومت ویژه در طول زمان می‌باشند. مدل‌های B1 تا B5 نمایش دهنده‌ی تغییرات جریان محلول در بستر رسوبی و جهت حرکت جریان محلول می‌باشند. سایر نتایج حاصل از این تحقیق در زیر برآورد شده است:

۱- لوله مدفون در زیر زمین که از جنس پلی اتیلن می‌باشد در هر دو حالت قبل و بعد از تزریق محلول کات کبود در لوله در پروفیل A2 و در حالت قبل از پر شدن لوله در پروفیل A1 به صورت یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا خود را نشان داده است. دلیل رسانندگی لوله مدفون در مقطع حاصل از وارون سازی داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل A1 را می‌توان به نشت محلول کات کبود و رسوب احتمالی آن در اطراف لوله پس از تزریق محلول به داخل آن نسبت داد. این موضوع نشان می‌دهد جهت حرکت جریانات زیرسطحی و وجود محلول را می‌توان با استفاده از بررسی‌های دقت بالای مقاومت ویژه تعیین نمود.

۲- در مقاطع حاصل از وارون سازی دوبعدی داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده در طول پروفیل‌های A3 و A4، لوله‌ی مدفون با دقت بالایی به صورت یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا دیده می‌شود.

۳- مدل‌های وارون مقاومت ویژه حاصل از وارون سازی دوبعدی داده‌ها در طول پروفیل B1 قبل و بعد از تزریق محلول کات کبود به داخل لوله نشان دهنده‌ی کاهش مقاومت ویژه الکتریکی در طول پروفیل به خصوص در بخشی که لوله حاوی محلول تخلیه می‌شود، می‌باشد. نتایج بدست آمده از برداشت و مدل‌سازی وارون داده‌ها در طول پروفیل B2، نتایج به دست آمده از پروفیل B1 را مورد تایید قرار می‌دهد با این تفاوت که دو بی‌هنجاری مقاوم در طول پروفیل B2 بهتر قابل تفکیک می‌باشد. هم‌چنین می‌توان هم‌چنان اثر تزریق محلول کات کبود را در ابتدای پروفیل B2 در مدل‌سازی وارون داده‌های مقاومت ویژه در طول پروفیل مشاهده کرد.

۴- در طول پروفیل‌های B3، B4 و B5 اثری از رسانندگی ناشی از تزریق و نشت احتمالی محلول کات کبود دیده نمی‌شود، که دلیل اصلی آن را می‌توان به وجود رسوبات خشک درشت دانه، نوفه احتمالی و هم‌چنین عدم نشت محلول کات کبود در طول این پروفیل‌ها نسبت داد.

۵- نتایج به دست آمده از به کارگیری روش GPR در طول پروفیل‌های مورد بررسی بیانگر عدم نفوذ مناسب امواج GPR می‌باشد. دلیل این موضوع را می‌توان به وجود رطوبت بالا و رس زیاد در خاک زمین محدوده مورد بررسی نسبت داد؛ در نتیجه به کارگیری این روش در چنین مناطقی معمولاً مناسب نیست.

۲-۵ پیشنهادها

۱- برای تعیین دقیق‌تر مرزهای آلودگی محلول وارد شده به زیر سطح زمین و برای تعیین مسیرهای پخش این جریان‌ها در زیر سطح زمین پروفیل‌های برداشت مقاومت ویژه الکتریکی بیشتری طراحی و اجرا شود.

۲- به منظور دستیابی به عمق بیشتر طول پروفیل‌های مقاومت ویژه و فاصله الکترودی بزرگتری

در نظر گرفته شود مخصوصاً این که در طول پروفیل‌های B1 و B2 و همچنین در پروفیل‌های مقاومت ویژه اجرا شده در محدوده A، کف بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه ناشی از تزریق و نشت احتمالی محلول کات کبود و لوله به خوبی مشخص نشده است.

۳- در به کارگیری از روش GPR در این تحقیق، توصیه می‌شود از آنتن‌های با فرکانس بالاتر که قدرت تفکیک بالاتری دارند استفاده شود، هرچند عمق نفوذ امواج محدودتر خواهد شد.

مراج

- [1] He Z. and Hu Z. and Y. He L. and Meng C. and Yang L. (2015) "Field test of monitoring gas reservoir development using time-lapse continuous electromagnetic profile method," *Geophysics*, vol. 80, no. 2, pp. WA127–WA134.
- [۲] کامکار روحانی ا. و اکبری فیض آبادی و. ، شاه‌پسندزاده م. و یعقوبی تبار ب. و دژپسند س. و راه انجام م. و بابائی م. (۱۳۹۳) بررسی گسترش آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از توموگرافی الکتریکی، "کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- [3] Ernstson K. and Kirsch R. (2006) "Groundwater Geophysics a tool for hydrogeology." Berlin: Springer.
- [4] James M. and D. Nobes C. (2015), "Time Lapse Characterization of Leachate Flow Using Electromagnetics and Ground Penetrating Radar," in *Near-Surface Asia Pacific Conference, Waikoloa, Hawaii, 7-10 July 2015*, pp. 211–214.
- [5] Close M. E. D., Nobes C. and Pang L. (2004), "Presence of preferential flow paths in shallow groundwater systems as indicated by tracer experiments and geophysical surveys," in J. S. Bridge and D. W. Hyndman, eds., *Aquifer Characterization: SEPM Special Publication*, 80, 79–91.
- [6] Versteeg R. (2004) Time-lapse geophysics for mapping fluid flow in near real time: Results from a controlled mesoscale experiment, in J. S. Bridge and D. W. Hyndman, eds., *Aquifer Characterization: SEPM Special Publication*, 80, 93–105.

- [7] Theimer B. D. Nobes D. C. and Warner B. G. (1994), "A study of the geoelectrical properties of peatlands and their influence on ground-penetrating radar surveying1," *Geophys. Prospect.*, vol. 42, no. 3, pp. 179–209.
- [8] Hubbard S. S. and Rubin Y. (2000), "Hydrogeological parameter estimation using geophysical data: a review of selected techniques," *J. Contam. Hydrol.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 3–34.
- [9] Kazakis N. Vargemezis G. and Voudouris K. S. (2016), "Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods," *Sci. Total Environ.*, vol. 550, pp. 742–750.
- [10] Reynolds J. M. (2011) *An introduction to applied and environmental geophysics.* John Wiley & Sons.
- [11] Telford W. M. Geldart L. P. R. E. Sheriff R. E. (1990) *Applied geophysics.* Cambridge university press.
- [12] Loke M. H. (2004), "2-D and 3-D electrical imaging surveys," PDF available from [http://www. Geoelectr. com](http://www.Geoelectr.com).
- [13] Oldenburg D. W. and Li Y. (2005), "Inversion for applied geophysics: A tutorial," *Near-surface Geophys.*, pp. 89–150.
- [14] Kirsch R. and Yaramanci U. (2009), "Geoelectrical methods," in *Groundwater geophysics*, Springer, pp. 85–117.
- [15] Dentith M. and Mudge S. T. (2014), *Geophysics for the mineral exploration geoscientist.* Cambridge University Press.
- [16] Milsom J. (2003), *Field geophysics*, vol. 25. John Wiley and sons.

- [17] Kearey P. Brooks M. and Hill I. (2002), An introduction to geophysical exploration, vol. 4. John Wiley & Sons.
- [18] Schrott L. and Sass O. (2008), “Application of field geophysics in geomorphology: advances and limitations exemplified by case studies,” *Geomorphology*, vol. 93, no. 1–2, pp. 55–73.
- [19] Reynolds J. M. (1997), “An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley & Sons Ltd,” Chichester, UK.
- [20] Mooney H. M. (1980), Handbook of engineering geophysics. 2. Electrical resistivity. Bison Instruments.
- [21] Loke M. H. (2002), “RES2DMOD ver. 3.01,” Rapid 2D Resist. Forw. Model. using finite-difference finite-elements method. Geotomo Software. Man.
- [22] Aizebeokhai A. P. (2010), “2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design,” *Sci. Res. Essays*, vol. 5, no. 23, pp. 3592–3605.
- [23] Ward S. H. (1988), “The resistivity and induced polarization methods,” in *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, pp. 109–250.
- [24] A. Neal (2004), “Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress,” *Earth-science Rev.*, vol. 66, no. 3–4, pp. 261–330.
- [25] Benson A. K. Frederickson C. and Mustoe N. B. (1991), “Ground penetrating radar, electrical resistivity, soil and water quality studies integrated to determine the source (s) and geometry of hydrocarbon contamination at a site in north-central Arizona,” in *Proceedings of the 27th symposium on engineering geology and geotechnical engineering*, pp. 31–38.

- [26] Redman D. Parkin G. W., and Annan A. P. (2000), "Borehole GPR measurement of soil water content during an infiltration experiment," in Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar, vol. 4084, pp. 501–505.
- [27] Van Dam R. L. Schlager W. Dekkers M. J. (2002), and J. A. Huisman, "Iron oxides as a cause of GPR reflections," *Geophysics*, vol. 67, no. 2, pp. 536–545.
- [28] Apparao A. (1997), *Developments in geoelectrical methods*. Taylor & Francis.
- [۲۹] حیدری ا. عابر ح. جهان آرا ع. (۲۰۱۸) "شناسایی تونل مدفون با استفاده شبیه سازی عددی دوبعدی داده های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین، مطالعه ی موردی: تونل شماره ۳ آزادراه تهران-پردیس،" پژوهش های ژئوفیزیک کاربرد.
- [30] Annan A. P. (2001), "Ground penetrating radar workshop notes," Sensors Softw. Inc., Ontario, Canada.
- [31] H. Z. M. Abdullah R. S. A. R. Roslee M. and Muniandy R. (2008), "Optimization of ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pavement density data analysis," in IGARSS IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008, vol. 3, pp. III–1326.
- [32] Annan A. P. (2009), "Electromagnetic principles of ground penetrating radar," *Gr. penetrating radar theory Appl.*, vol. 1, pp. 1–37.
- [33] Giannopoulos A. (2005), "Modelling ground penetrating radar by GprMax," *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 10, pp. 755–762.
- [34] Capozzoli L. and Rizzo E. (2017), "Combined NDT techniques in civil engineering applications: Laboratory and real test," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 1139–1150.

- [35] Whaler K. A. (1997) "Principles of Applied Geophysics DS Parasnis, Chapman & Hall, London, 1997, 5th edn, 429 pp, ISBN 0-412-64 080-5, Paperback,£ 39.99." Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK.
- [۳۶] فریدونی ح. احمدی ر. (۲۰۱۹) "بررسی تأثیر پارامترهای برداشت بر نتایج روش GPR با استفاده از مدل‌سازی پیش‌رو و پژوهش‌های میدانی," نشریه زمین‌شناسی مهندسی.
- [37] Baker G. S. Jordan T. E. and Pardy J. (2007), "An introduction to ground penetrating radar (GPR)," Spec. Pap. Soc. Am., vol. 432, p. 1.
- [38] Jamali F. Arab-Amiri A. R. Kamkar-Rouhani A. Mohammadi-Vizheh M. and Bahrami A. (1393), "Geophysical prospecting and exploration of poly-metallic deposits in Kaboudan-Bardaskan area".
- [39] Jol H. M. (2008), Ground penetrating radar theory and applications. elsevier.
- [40] Fisher S. C. Stewart R. R. and Jol H. M. (1992) "Processing ground penetrating radar (GPR) data," GPR Process. CREWES Res. Rep., vol. 4, p. 11.
- [41] Warren C. (2009), "Numerical modelling of high-frequency ground-penetrating radar antennas." University of Edinburgh.
- [42] Cassidy N. J. and Jol H. M. (2009), "Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis," Gr. penetrating radar theory Appl., pp. 141–176.
- [۴۳] بانوی ن. (۱۳۹۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بررسی نشست پی و خاک زیرسطحی در محل سازه‌های مجتمع آلومینای جاجرم با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR)"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [44] A. P. Annan, "Ground-penetrating radar," in Near-surface geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 2005, pp. 357–438.

- [45] Win_EKKO Users Guide, Version 1.0 (1999).
- [46] <https://www.akamsulfur.com/Cut-blue-Copper-sulfate>.
- [47] Sensors and software. (1999), Ground penetrating radar survey design.

Abstract

In this study, tomography studies of electrical resistivity and GPR were performed in Geophysical test site of Shahrood University of technology and at two points in times with the aim of investigating the changes caused by pollution leakage in the ground. The stages of the studies have been controlled in accordance with the changes that have taken place. The purpose of this study is to investigate and estimate how the electrical properties change due to the leaching of water flow in an alluvial ground and also the changes caused by the filling or emptying of a buried polyethylene pipe. In this regard, electrical resistivity and GPR data obtained from the studied areas in two time periods have been processed and interpreted. The designed profiles include four lines on a buried reservoir and five profiles on alluvial soil. The results of this data are in the form of two-dimensional models of electrical resistivity and GPR cross sections; which have been obtained using RES2DINV and Prism2 software, respectively. the most important results of this study is the relatively good performance of the electrical resistivity method in details detection and inefficiency of GPR in alluvial soils with high clay, the unsuitability of the transmitter antenna with a frequency of 150 MHz in the GPR method and the destructive effect of moisture on the performance of this method. Using specific electrical resistance data, ground details such as polyethylene reservoir, loose and porous soil parts and separation of different areas according to the relative humidity in them have been revealed.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), Electrical resistivity tomography, RES2DINV, Prism, Tow Dimentional, Geophysical test site of Shahrood University of technology



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

M.Sc. Thesis in Geoelectrics

**Characterization of Leachate Flow Using Time Lapse Ground
Penetrating Radar (GPR) and resistivity survey: A case
study-Geophysical test site of Shahrood University of
Technology**

By: Ali Aghaei Kordeshami

Supervisors:

Dr. Alireza Arab-Amiri

Dr. Abolghasem Kamkar-Rouhani

February

2021